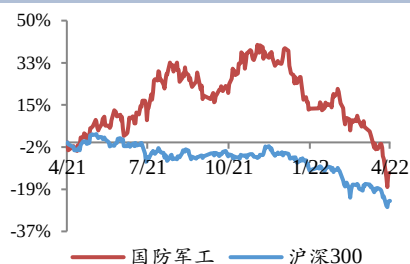


传世陶瓷，传奇再现

行业评级：增持

报告日期：2022-05-5

行业指数与沪深 300 走势比较



分析师：郑小霞

执业证书号：S0010520080007

电话：13391921291

邮箱：zhengxx@hazq.com

联系人：邓承佯

执业证书号：S0010121030022

电话：18610696630

邮箱：dengcy@hazq.com

主要观点：

● 先进陶瓷是新材料领域中最具潜力的赛道

按陶瓷的制备技术和应用领域分类，可分为传统陶瓷材料和先进陶瓷材料，其中先进陶瓷应用最为广泛。

先进陶瓷按照具体性能及用途又可分为功能陶瓷和结构陶瓷两大类。结构陶瓷主要包括氧化物陶瓷、氮化物陶瓷、碳化物陶瓷及低膨胀陶瓷，因其具备优异的力学性能及热学性能，被广泛应用于消费电子、新能源、机械、环保及医疗器械等领域，市场份额约占整个陶瓷市场的 30%；功能陶瓷主要包括电介质陶瓷、敏感陶瓷、光学陶瓷及生物陶瓷等，目前在电力电子、环保、能源和生物医药等领域得到广泛应用，成为推动我国科技发展的重要功能性材料之一。

● 电子信息、生物医药及环保等行业陶瓷应用较为成熟

目前陶瓷在电子信息、生物医药及环保等领域应用成熟，未来随着下游行业技术的革新及相关政策的执行，新老产品迭代将会为陶瓷材料带来新的契机。

电子陶瓷领域，随着电子信息技术日益走向集成化、智能化和微型化，以半导体技术为基础的有源器件和集成电路迅速发展，无源电子元件日益成为电子元器件技术的发展瓶颈，因此电子陶瓷材料及其制备加工技术越来越成为制约电子信息技术发展的核心技术之一。在新能源、5G 通讯及工业互联网推动下，电子元器件更新换代加速，用量继续攀升，电子陶瓷行业上下游陶瓷粉料及瓷介器件的市场规模已突破千亿。

生物医药领域，活动义齿、固定义齿及种植牙被视为治疗牙缺失的常见三种手段，氧化锆兼具优良的机械性能、生物相容性及美学效果，被视为固定义齿及种植牙的最佳牙冠材料。基于国内消费群体的消费能力的不断提升及美学意识的逐步增强，预计牙冠用陶瓷材料市场规模可达 500 亿元。此外，随着陶瓷种植体相关技术及临床验证结果不断积累，氧化锆有望成为种植体一大选择，按照牙冠及种植体的价值对比，预计陶瓷种植体的市场规模极有可能超过千亿。

环保领域，随着全球各国政府对环保问题的高度重视，移动源污染物限排成为焦点。目前蜂窝陶瓷以其化学稳定性好、耐酸耐碱和有机溶剂、优异的耐高低温性能、优良的抗菌性能等特性，被广泛选用为尾气催化器件的载体。伴随着国内国六政策的执行，预计蜂窝陶瓷的年需求量将突破万升，氧化铝涂层需求量将达万吨。

相关报告

1. 高温合金，金属新材料优质赛道
2022-04-17

● 陶瓷基板、锂电池陶瓷涂覆、陶瓷轴承球及纳米晶陶瓷蓄势待发

科技创新是推动产业高质量发展的源动力,技术升级对部分行业的材料提出了更高的要求,陶瓷材料正以其优异的综合性能逐步切入,并有望在未来推动更多新兴行业的诞生。

电子信息领域,随着近年来科技不断升级,芯片输入功率越来越高,对高功率产品来讲,其封装基板要求具有高电绝缘性、高导热性及与芯片匹配的热膨胀系数,因而陶瓷基板逐渐走进大家的视野,GII 预计陶瓷基板市场规模有望在 2027 年前突破百亿美金。

新能源领域,固体材料陶瓷涂覆逐渐成为锂电池隔膜涂覆的主流,EVTank 预计 2025 年无机涂覆材料用量将突破 40 亿平方米。此外,相较传统的金属轴承球,氮化硅陶瓷轴承球以其能耐高温腐蚀、强度高特点逐渐在风电及新能源汽车中大规模使用,前瞻产业研究院预计其市场规模有望在 2025 年突破千亿。

玻璃领域,纳米微晶玻璃是微晶玻璃的升级版,是指玻璃内生长出来的晶体尺寸只有纳米级别,具备强度高韧性好等特点。近年来华为逐步推出纳米晶陶瓷材质手机及苹果渐次推出超瓷晶手机,我们预计随着相关技术的进一步成熟,纳米晶陶瓷有望在千亿智能手机端玻璃盖板市场占据一席之地。

● 陶瓷材料多领域海外公司处于优势地位,国内企业未来可期

在陶瓷行业中,多数领域海外公司占据着较大的优势,国内企业市场份额较小。考虑到部分行业关系国家战略安全,同时下游终端产品的技术也在革新,其产品正逐步迭代释放新的市场需求。我们预计国内诸多拥有丰富产品体系及核心工艺的企业有望在短期内扩大自身的市场份额,逐步成长为具有全球竞争力的企业。

● 投资建议

我们推荐关注“内生增长+外延并购”双轮驱动的陶瓷材料平台型企业国瓷材料及高可靠电子元器件平台型企业鸿远电子,建议重点关注振华科技、中瓷电子、火炬电子、宏达电子、三环集团、风华高科、奥福环保等。

● 风险提示

技术研发不及预期;疫情导致消费电子销量下滑;MLCC 下游需求不及预期,生物陶瓷方面进展缓慢。

正文目录

1 先进陶瓷已逐步成为新材料的重要组成部分	11
1.1 结构陶瓷：极端环境领域最具潜质的优质材料	13
1.1.1 氧化物陶瓷	19
1.1.2 氮化物陶瓷	29
1.1.3 碳化物陶瓷	38
1.1.4 低膨胀陶瓷	45
1.2 功能陶瓷：现代科学技术先行领域的关键材料	53
1.2.1 电介质陶瓷	55
1.2.2 敏感陶瓷	61
1.2.3 光学陶瓷	63
1.2.4 生物陶瓷	64
2 粉体合成、成型、烧结及加工是主要的环节	70
2.1 粉体制备：对最终结构和力学性能具有的重要作用	71
2.2 成型工艺：得到内部均匀及高密度坯体的核心环节	75
2.3 烧结工艺：坯体转变成高强度致密瓷体的必经之路	77
2.4 加工工艺：改善表面光洁度及尺寸精度的关键工艺	82
3 先进陶瓷正逐步推动诸多高技术领域的发展	86
3.1 电子陶瓷行业：推动电子信息业迅猛发展	87
3.1.1 MLCC 行业	88
3.1.2 片式电感器行业	95
3.1.3 压电陶瓷行业	98
3.1.4 陶瓷基板行业	99
3.2 光学陶瓷行业：纳米晶显示陶瓷爆发在即	105
3.2.1 齿科正畸行业	106
3.2.2 纳米微晶陶瓷行业	110
3.2.3 光纤通讯行业	116
3.3 生物陶瓷行业：聚焦人体组织修复及植入	118
3.3.1 口腔修复行业	119
3.3.2 骨修复行业	123
3.3.3 人体植入体行业	128
3.4 高温陶瓷行业：发力发动机及新能源领域	134
3.4.1 航空发动机行业	134
3.4.2 机械轴承行业	137
3.4.3 新能源行业	140
3.4.4 汽车尾气吸附行业	143
4 重点关注公司	149



风险提示:	149
-------------	-----

图表目录

图表 1 陶瓷材料可分为传统陶瓷和先进陶瓷	11
图表 2 先进陶瓷分类	11
图表 3 陶瓷耐高温特性：相比有机材料及金属材料，陶瓷材料具有更高的熔点	13
图表 4 陶瓷耐高温特性：绝大多数金属使用温度低于 1000℃，但大部分陶瓷材料使用温度均在 1000℃ 以上	13
图表 5 陶瓷材料高强度特性：相同密度情况下，陶瓷材料强度最高	14
图表 6 陶瓷材料高强度特性：陶瓷材料兼具高强度及高比刚度双重特性	14
图表 7 陶瓷材料高强度特性：相同成本情况下，陶瓷材料强度最高	15
图表 8 陶瓷材料耐磨性能：耐磨性相当于锰钢的 266 倍，高铬铸铁的 171.5 倍	15
图表 9 陶瓷材料耐磨特性：相比有机材料及金属材料，陶瓷材料具有更高的弹性模量	16
图表 10 陶瓷材料热学特性：相比有机材料及金属材料，陶瓷材料具有更高的热导率	16
图表 11 陶瓷材料热学特性：陶瓷材料拥有优异的热膨胀系数	17
图表 12 陶瓷材料热学特性：陶瓷材料拥有优良的抗热冲击断裂性能	17
图表 13 陶瓷材料缺点：相较金属材料，陶瓷材料较脆	18
图表 14 陶瓷材料缺点：断裂韧性较其他材料小，表征为脆性	18
图表 15 陶瓷材料增韧机理示意图	19
图表 16 氧化物陶瓷的主要物性	19
图表 17 日本生产的典型高纯超细氧化铝粉体特性	20
图表 18 常用氧化铝陶瓷的配方及物性	20
图表 19 氧化铝晶体结构及主要应用	21
图表 20 氧化锆三种晶型	21
图表 21 添加氧化钇增韧效果	22
图表 22 添加氧化镁增韧机理	22
图表 23 部分商用氧化锆的力学及热学性能	23
图表 24 氧化锆的应用	23
图表 25 国内外氧化锆陶瓷主要性能	24
图表 26 添加剂和温度对烧结后氧化锆陶瓷导热影响	24
图表 27 添加氧化镁-三氧化二铁助烧剂后的氧化锆陶瓷	24
图表 28 氧化锆陶瓷应用	25
图表 29 氧化镁坩埚相关参数	25
图表 30 添加剂对氧化镁陶瓷晶粒尺寸和烧结性的影响	26
图表 31 氧化镁陶瓷应用	26
图表 32 莫来石晶胞投影图	27
图表 33 莫来石 $Al_2O_3-SiO_2$ 元相图	27
图表 34 莫来石性能	28
图表 35 不同制备方式制备出的莫来石组成	28
图表 36 莫来石应用	29
图表 37 典型氮化物陶瓷的主要性能	29
图表 38 氮化硅晶型	30
图表 39 氮化硅陶瓷制品的制造方法	31
图表 40 不同烧结方法得到氮化硅陶瓷的性能	31



图表 41 氮化硅应用.....	32
图表 42 氮化铝的主要性能.....	32
图表 43 碳酸钙添加剂对氮化铝陶瓷致密度影响.....	33
图表 44 氧化钇添加剂对氮化铝陶瓷致密度影响.....	33
图表 45 氮化铝陶瓷应用.....	33
图表 46 氮化硼陶瓷加工性能好.....	34
图表 47 不同烧结方法制备的氮化硼陶瓷性能.....	35
图表 48 氮化硼陶瓷应用.....	35
图表 49 赛隆陶瓷性能.....	36
图表 50 赛隆陶瓷及其他陶瓷性能对比.....	36
图表 51 不同晶型赛隆陶瓷的物性.....	37
图表 52 稳定剂离子半径对赛隆陶瓷的性能影响.....	37
图表 53 赛隆陶瓷的应用.....	38
图表 54 碳化物陶瓷的基本物理特性.....	39
图表 55 碳化硅不同晶型.....	40
图表 56 碳化硅合成路径.....	40
图表 57 碳化硅陶瓷与其它高温结构陶瓷的物理性能比较.....	41
图表 58 碳化硅陶瓷的烧结方法及性能.....	41
图表 59 碳化硅陶瓷的应用.....	42
图表 60 碳化硼陶瓷晶体结构.....	42
图表 61 碳化硼物理性能与力学性能.....	43
图表 62 国外三家大公司制备的碳化硼陶瓷性能.....	43
图表 63 氧化铝添加剂对碳化硼陶瓷的性能影响.....	44
图表 64 碳化硼陶瓷应用.....	44
图表 65 堇青石陶瓷的性能对比.....	45
图表 66 标堇青石成分对热膨胀系数有重要影响.....	46
图表 67 杂质含量对堇青石陶瓷的热膨胀系数的影响.....	46
图表 68 康宁公司超低热膨胀系数堇青石配方及性能.....	47
图表 69 堇青石陶瓷应用.....	48
图表 70 钛酸铝理论组成为 56.1%的氧化铝及 43.9%的氧化钛.....	49
图表 71 国外工业用钛酸铝陶瓷相关参数.....	49
图表 72 氧化铁添加剂加入量对钛酸铝陶瓷热解的抑制作用.....	50
图表 73 钛酸铝陶瓷的应用.....	50
图表 74 国内外石英陶瓷的相关性能.....	51
图表 75 不同温度和烧结条件下浇注熔融石英陶瓷的性能.....	51
图表 76 石英陶瓷的应用.....	52
图表 77 锂质陶瓷类型.....	53
图表 78 锂辉石低膨胀陶瓷的配方与材料性能.....	53
图表 79 陶瓷材料及其他材料室温电阻率对比.....	54
图表 80 电介质材料（包括介电陶瓷）具有透明性.....	54
图表 81 陶瓷材料极化形式.....	55
图表 82 电绝缘陶瓷材料的种类.....	55
图表 83 电绝缘陶瓷材料的应用.....	56
图表 84 电容器介电陶瓷种类.....	57



图表 85 非铁电电容器陶瓷的密度、介电常数和介电常数温度.....	57
图表 86 铁电电容器主要陶瓷-钛酸钡陶瓷的介电温度特性.....	58
图表 87 打火机内压电陶瓷的应用.....	59
图表 88 直接压电效应.....	60
图表 89 间接压电效应.....	60
图表 90 常用压电材料性能.....	60
图表 91 半导体空气污染传感器.....	61
图表 92 敏感陶瓷分类.....	61
图表 93 热敏陶瓷的电阻在不同温度下出现巨大差异.....	62
图表 94 光敏陶瓷太阳能电池.....	62
图表 95 光学陶瓷种类及应用领域.....	63
图表 96 光学陶瓷透光率的影响因素及改进措施.....	63
图表 97 光学陶瓷的应用.....	64
图表 98 生物陶瓷分类.....	64
图表 99 氧化铝基复合微晶陶瓷半成品白杯部分.....	65
图表 100 不同材质间的界面磨损率.....	65
图表 101 “三明治”陶瓷内衬(LIMA, ITALY)及 BIOLOX FORTE 内衬(CERAM TEC AG, GERMANY).....	65
图表 102 氧化锆植入体的应用.....	66
图表 103 多功能新型生物活性玻璃材料研究获进展.....	67
图表 104 生物玻璃软骨植入物.....	68
图表 105 LITHOZ 公司制备的可降解陶瓷骨骼植入体样品.....	68
图表 106 表面涂覆羟基磷灰石(HA)的人工关节.....	69
图表 107 先进陶瓷制备的几大步骤.....	70
图表 108 粉体制备的工艺.....	71
图表 109 自蔓延燃烧法流程图.....	72
图表 110 自蔓延燃烧法装置图.....	73
图表 111 气相反应法原理.....	73
图表 112 化学气相沉积法生产碳化硅陶瓷粉末.....	73
图表 113 等离子体法制备氮化铝粉末.....	73
图表 114 激光法制备陶瓷粉末.....	73
图表 115 水热法的一般工艺.....	74
图表 116 醇盐水解法生产氧化锆的流程.....	74
图表 117 陶瓷成型工艺的优缺点.....	75
图表 118 干法成型：干压成型陶瓷产品.....	76
图表 119 塑性成型：螺旋式注射成型机示意图.....	76
图表 120 液态成型：不同类型的流延机.....	77
图表 121 热压烧结装置示意图.....	78
图表 122 气氛烧结压力炉.....	79
图表 123 热等静压炉典型结构.....	80
图表 124 微波加热烧结系统.....	81
图表 125 放电等离子加热烧结炉.....	81
图表 126 高压兹曼延燃烧烧结法.....	82
图表 127 陶瓷材料的主要加工方式.....	82
图表 128 典型的化学机械抛光原理.....	83

图表 129 电泳磨削原理.....	83
图表 130 电火花线切割装置.....	84
图表 131 激光加工装置的基本构造.....	84
图表 132 超声加工的装置示意图.....	85
图表 133 陶瓷打孔装置.....	85
图表 134 先进陶瓷国内外公司简略.....	86
图表 135 先进陶瓷产业链.....	86
图表 136 中国电子功能陶瓷发展路线图.....	87
图表 137MLCC 结构示意图.....	88
图表 138MLCC 的应用.....	89
图表 139 不同手机对 MLCC 的需求量 (颗)	90
图表 140 全球 5G 手机渗透拉动的 MLCC 需求预测.....	90
图表 1412019-2023 年中国 5G 基站 MLCC 总需求量、增速及预测.....	91
图表 142 不同汽车单车用 MLCC 量.....	91
图表 143 汽车领域 MLCC 增量测算.....	92
图表 1442016-2020 年全球新能源乘用车销量结构.....	92
图表 145MLCC 成本拆分.....	93
图表 146MLCC 产业链.....	93
图表 1472019 年全球 MLCC 陶瓷粉末市场格局.....	93
图表 148MLCC 产业链中陶瓷粉体及陶瓷电容器相关企业.....	94
图表 149 片式电感细分领域使用数量.....	95
图表 150 电感器产业链结构.....	95
图表 151 全球电感终端应用市场占比分布情况.....	96
图表 1522017-2026 年中国电感器市场规模测算 (亿元)	96
图表 153 2019 年电感器市场竞争格局.....	97
图表 154 电感产业相关公司.....	97
图表 155 压电陶瓷应用范围.....	98
图表 156 压电陶瓷产业相关公司.....	99
图表 157 电子元器件温度与功率密度成正相关.....	100
图表 158 电容器寿命与环境温度符合“十度法则”成反比.....	100
图表 159 电子元器件可靠性与温度成反比.....	101
图表 160 陶瓷基板种类及其性能.....	101
图表 161 几种常见陶瓷基板应用对比.....	103
图表 162 几种常见陶瓷基板性能对比.....	104
图表 163 各类陶瓷基板 2020 年市场规模及 2026 年预测市场规模 (亿美元)	104
图表 164 陶瓷基板产业相关公司.....	105
图表 165 光在陶瓷内部的传输路径.....	106
图表 166 四类正畸治疗手段.....	107
图表 1672015 年至 2030 年 (估计) 的全球正畸市场规模 (单位: 十亿美元)	107
图表 1682015 年至 2030 年 (估计) 的全球正畸病例.....	108
图表 1692015 年至 2030 年 (估计) 的全球传统正畸市场规模 (单位: 十亿美元)	108
图表 1702015 年至 2030 年 (估计) 的中国正畸市场规模 (单位: 十亿美元)	109
图表 171 陶瓷托槽相关公司.....	109
图表 172 纳米微晶玻璃.....	110

图表 173 重庆鑫景特种玻璃公司纳米微晶玻璃生产线	111
图表 174 华为 P 系列产品纳米微晶科技	111
图表 175 国内纳米微晶玻璃与苹果超瓷晶玻璃对比	112
图表 176 苹果 IPHONE 12 使用的超瓷晶玻璃技术	112
图表 177 华为纳米晶玻璃、第六代大猩猩玻璃与微晶玻璃、不锈钢、蓝宝石和钢化玻璃部分性能参数比较	113
图表 178 超瓷晶玻璃防摔能力强	113
图表 179 超瓷晶晶体结构展示	113
图表 180 重庆特玻专利号 CN 110002760 A 所列纳米晶陶瓷玻璃生产流程	114
图表 181 各品牌手机盖板材质演变	115
图表 182 全球 5G 手机渗透拉动的玻璃基板需求预测	115
图表 183 光纤适配器产品图	116
图表 184 光通信陶瓷结构件行业产业链	117
图表 1852014-2025E 中国光纤光缆市场规模预测（单位：亿元）	117
图表 1862015-2019 年中国陶瓷套管、导管、槽管及管子配件 进出口金额统计图	118
图表 1872015-2019 年中国陶瓷套管、导管、槽管及管子配件 进出口数量	118
图表 188 牙缺失的危害	119
图表 189 活动义齿、固定义齿及种植牙对比	120
图表 190 不同牙冠材料的性能对比	120
图表 191 齿科修复陶瓷材料相关的标准	121
图表 192 全国氧化锆义齿存量市场空间及增量市场测算	122
图表 193 全球义齿主要供应商	123
图表 194 各类骨修复材料的特点	124
图表 195 人工骨修复材料的不同种类的技术路线差异、应用情况等对比	125
图表 1962014-2023 年我国骨修复材料行业市场规模（亿元）	126
图表 197 美国骨科临床获批使用的胶原/羟基磷灰石类人工骨修复材料情况	127
图表 198 骨修复领域相关公司	128
图表 199 STRAUMANN SNOW 氧化锆陶瓷种植系统	129
图表 200 使用 STRAUMANN 氧化锆陶瓷种植系统的患者种植期间及种植一年后复诊效果对照图	129
图表 201 植入体领域陶瓷材料相关的标准	130
图表 202 氧化铝基复合微晶陶瓷人工关节病例显示假体多年后周围均无骨溶解现象	131
图表 203 全球骨科关节市场规模	132
图表 2042012-2021E 我国骨科关节植入物市场规模（百万元）	133
图表 205 生物陶瓷植入相关公司	133
图表 206 陶瓷材料最耐高温	134
图表 207 航空发动机选材趋势（重量占比）	134
图表 208 陶瓷基复合材料之碳化硅纤维和高温合金性能对比	134
图表 209 同一温度下，压力越大发动力效率越高	135
图表 210 效率相同情况该，发动机温度越高，推力越大	135
图表 211 陶瓷基复合材料在航空领域中的应用	135
图表 212 各代航空发动机关键指标及叶片主要材料	136
图表 2132016-2026 年陶瓷基复合材料市场规模（亿美元）	136
图表 214 国外碳化硅陶瓷基复合材料主要厂商	137
图表 215 国内碳化硅陶瓷纤维主要厂商及产能	137
图表 216 氮化硅陶瓷轴承球	138



图表 217 氮化硅轴承和轴承钢性能对照表	138
图表 218 新能源汽车轴承	139
图表 219 氮化硅陶瓷球应用在风力发电轴承座中	139
图表 220 新能源汽车领域可创造数十亿市场空间	140
图表 221 国内外陶瓷球相关生产企业	140
图表 222 锂离子电池结构	141
图表 223 不同涂覆材料的特点和主要应用领域	141
图表 224 氧化铝/勃姆石涂覆的功能	142
图表 225 中国 2016-2025 年无机涂覆膜用量（亿平方米）	142
图表 226 2019 年全球锂电池用勃姆石/氧化铝出货量分布	143
图表 227 美国、欧洲、日本及中国重型柴油机法规进程	143
图表 228 我国重型柴油车尾气限值	144
图表 229 柴油机尾气催化器净化作用及所用主要材料	144
图表 230 国六阶段蜂窝陶瓷应用情况	145
图表 231 蜂窝陶瓷市场空间测算	146
图表 232 氧化铝市场空间测算	146
图表 233 尾气净化产业链	147
图表 234 蜂窝陶瓷竞争格局	148
图表 235 助剂及涂层主要企业及技术路线	148

1 先进陶瓷已逐步成为新材料的重要组成部分

陶瓷是以粘土为主要原料，并与其他天然矿物经过粉碎混炼、成型和煅烧制得的材料以及各种制品，是陶器和瓷器的总称。陶瓷的传统概念是指所有以粘土等无机非金属矿物为原料的人工工业产品。它包括由粘土或含有粘土的混合物经混炼、成形、煅烧而制成的各种制品。陶瓷的主要原料是取之于自然界的硅酸盐矿物，因此它与玻璃、水泥、搪瓷、耐火材料等工业同属于“硅酸盐工业”的范畴。

广义上的陶瓷材料指的是除有机和金属材料以外的其他所有材料，即无机非金属材料。陶瓷制品的品种繁多，它们之间的化学成分、矿物组成、物理性质，以及制造方法，常常互相接近交错，无明显的界限，而在应用上却有很大的区别。因此，很难硬性地把它们归纳为几个系统，详细的分类法也说法不一，到现在国际上还没有一个统一的分类方法。按陶瓷的制备技术和应用领域分类，可分为传统陶瓷材料和先进陶瓷材料。

- **传统陶瓷**：传统意义上的陶瓷是指以粘土及其天然矿物为原料，经过粉碎混合、成型、焙烧等工艺过程所制得的各种制品，通常会被称为“普通陶瓷”或传统陶瓷，例如日用陶瓷、建筑卫生陶瓷。
- **先进陶瓷**：按化学成分可分为氧化物陶瓷、氮化物陶瓷、碳化物陶瓷、硼化物陶瓷、硅化物陶瓷、氟化物陶瓷、硫化物陶瓷等。按性能和用途可分为功能陶瓷和结构陶瓷两大类。功能陶瓷主要基于材料的特殊功能，具有电气性能、磁性、生物特性、热敏性和光学特性等特点，主要包括绝缘和介质陶瓷、铁电陶瓷、压电陶瓷、半导体及其敏感陶瓷等；结构陶瓷主要基于材料的力学和结构用途，具有高强度、高硬度、耐高温、耐腐蚀、抗氧化等特点，主要包括氧化物陶瓷、氮化物陶瓷、碳化物陶瓷、硼化物陶瓷等。

图表 1 陶瓷材料可分为传统陶瓷和先进陶瓷

	传统陶瓷	先进陶瓷
原料	天然矿物原料	人工精制化工原料
成分	黏土、长石、石英	纯化合物、人工配比决定
烧结	1350℃以下，无需精确控温	需精确控温
性能	以外观为主	耐温、耐磨、耐腐蚀及各种声光热电磁特性
用途	餐具、地砖	航空航天、冶金、通讯及冶金

资料来源：CNKI，华安证券研究所

图表 2 先进陶瓷分类

类别	应用领域	陶瓷主要种类
结构陶瓷	氧化物	坩埚、瓷舟、耐火炉管
	碳化物	研磨材料、原子反应堆
	硼化物	航空装置元件、涡轮机部件、高温材料试验机构件、核装置中耐热构件
	氮化物	轴承球、切削刀具、耐火构件
	硅化物	高温电热元件、热交换器
	低 堇青石陶瓷	汽车尾气净化、红外辐射
		Al ₂ O ₃ 、ZrO ₂ 、MgO、CaO、ThO ₂ 、Cr ₂ O ₃ 、SiO ₂ 、BeO、3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ 等
		碳化钛、碳化锆、碳化钨
		二硼化锆（ZrB ₂ ）、二硼化钛（TiB ₂ ）、六硼化镧（LaB ₆ ）等
		氮化硅、氮化硼、氮化铝
		硅和钼、钨、钽等难熔硅化物为主要成分的陶瓷
		二氧化硅-氧化镁-氧化铝系



	膨胀陶瓷	钛酸铝陶瓷	汽车排气管道隔热、低压铸造机	钛酸铝
		熔融石英	玻璃、多晶硅冶炼	石英
		锂质陶瓷	高温夹具、内燃机、燃烧管	二氧化硅-氧化锂-氧化铝系
		超高温陶瓷	航空航天、核电	过渡金属硼化物、碳化物和碳化合物
功能陶瓷	功能电子陶瓷	介质瓷	铁电介质瓷	钛酸钡基固溶体、钛酸铅基固溶体等不含铁或极少含铁陶瓷
			高频介质瓷	二氧化钛、钛酸钙、钙钛硅、钛酸镁、镁钨钛、锡酸盐、钛酸铋等碱土金属和稀土金属的钛酸盐
			微波介质瓷	BaO-TiO ₂ 、LTA 系、ABTiO 系
		敏感陶瓷	热敏	掺入稀土元素的钛酸钡、过渡金属 (Mo、Co、Cu) 等氧化物的混合陶瓷
			压敏	SiC 系、ZnO 系、钛酸钡系、氧化铁系、氧化锡系、钛酸铋系等
			气敏	ZnO 系、氧化锡系及氧化铁系
			湿敏	铬酸镁-氧化钛系、硅-氧化钠-氧化钒系、氧化锌-氧化锂-氧化钒系、氧化锌-氧化铬系
			光敏	CdS、PbS、InAs、InSb、InSe、PbSe、PbTe
		特殊性能	导电	SiC、石墨陶瓷、氧化锡
			压电	钛酸钡、PbZrO ₃ 等
	结构电子陶瓷	滑石瓷	高压高功率电路	偏硅酸镁与玻璃相组合
		氧化铝瓷	高温及电炉元件	α-氧化铝
		长石瓷	碳膜电阻基体	莫来石-石英-长石质玻璃
		低碱瓷	金属膜电阻器的瓷体	莫来石-石英变体-钡长石-长石质玻璃
		高导热率瓷	集成电路	金刚石、石墨、BN、BeO、AlN、SiC
	超导陶瓷		配电系统、磁悬浮	Ba-La-Cu-O 系、Y-Ba-Cu-O 系
	光学陶瓷	照明、牙齿正畸		氧化铝
		高温炉窗口，红外探测器罩和高耐碱性的坩埚与反应容器		氧化镁
		高阶的镜头或是军事光学窗		氧化钇
		红外导流罩		氮化铝
		高温护目镜		镁铝尖晶石
		激光器		钇铝石榴石
		装甲观察窗口，防弹玻璃		α-SiAlON
		气体灯管、雷达天线罩、耐高温红外传感器窗口		AlON
		手机显示屏		氧化铝-玻璃体系
	生物陶瓷	生物惰性陶瓷	人体硬组织修复	氧化铝、氧化锆、氧化钛、氮化硅、碳化硅、硅铝酸盐、钙铝系
		生物活性陶瓷	人造关节、种植体	羟基磷灰石、生物玻璃、玻璃陶瓷、磷酸三钙、可溶性钙铝系、
	磁性陶瓷		磁记录	M ₃ Fe ₅ O ₁₂ 六方晶系、六方铁氧体、钙钛矿
	储能陶瓷		储氢罐	MgH ₂ -Al ₂ O ₃ 体系

资料来源：华安证券研究所整理

1.1 结构陶瓷：极端环境领域最具潜质的优质材料

结构陶瓷凭借其优异的力学性能及热学性能成为陶瓷材料的重要分支，约占整个陶瓷市场的 30% 左右。近二十年来，国家重大工程和尖端技术对陶瓷材料及其制备技术也提出了更高的要求和挑战：例如航天工业火箭发射中液氢液氧涡轮泵用的氮化硅陶瓷轴承在低温极端条件下无滑状态下高速运转，要求陶瓷轴承强度高、初性好、耐磨损、表面加工精度高；核电站主泵用的大尺寸陶瓷密封环需要长寿命高可靠性，特别是地球卫星拍摄地面目标的对地监测使用的碳化硅陶瓷反射镜，除了高弹性模量、低热膨胀系数和轻量化，要求高精度超镜面和大尺寸，这对大尺寸结构陶瓷材料的成型技术、烧结技术、加工技术都是一个挑战；而光通讯中的光纤连接器陶瓷插芯，其内孔为 125 微米，并且要求极高的表面光洁度与尺寸精度及同心度。

力学性能方面，高熔点及使用温度范围广奠定了陶瓷材料在结构领域中的应用基础。有机材料大多是分子键结合，金属材料则以金属键结合为主，陶瓷材料主要以离子键及共价键结合，因而陶瓷材料熔点相较最高。同时陶瓷材料在承受载荷的长期使用温度也均稳定在 1000℃ 以上，相较金属材料中，当前使用温度最高的为高温合金，其使用温度为 1200℃ 以下，承受载荷情况时使用温度在 1000℃ 以上。

图表 3 陶瓷耐高温特性：相比有机材料及金属材料，陶瓷材料具有更高的熔点

类别		大致熔点/℃
有机材料	聚苯乙烯	65-75
	聚甲基丙烯酸甲酯	60-90
	聚乙烯	120
	尼龙-6	135-150
金属材料	铝合金	595
	镁合金	596
	碳钢	1520
	高温合金	1320-1450
陶瓷材料	莫来石	1850
	氧化铝	2050
	尖晶石	2135
	氧化锆	2500-2600

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

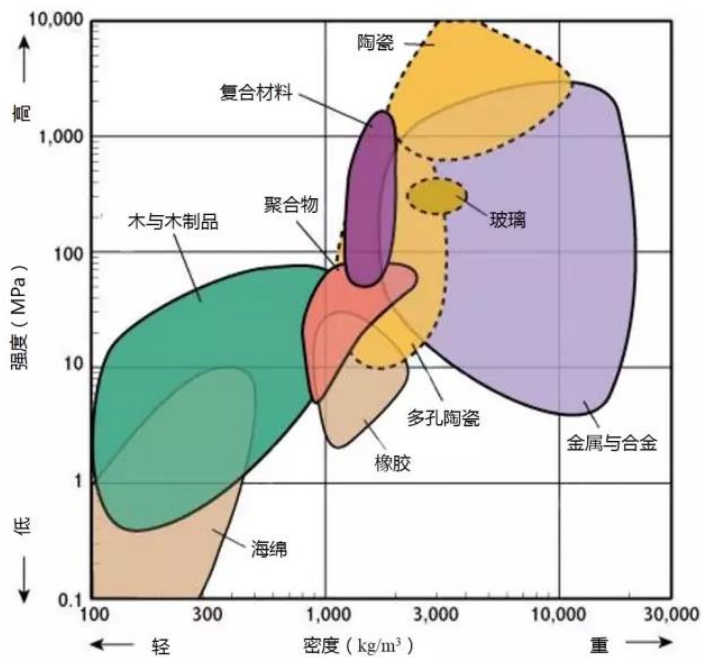
图表 4 陶瓷耐高温特性：绝大多数金属使用温度低于 1000℃，但大部分陶瓷材料使用温度均在 1000℃ 以上

材料类别	承受载荷下长期使用温度/℃	承受载荷下出现蠕变温度/℃	无载荷时短期使用温度/℃
莫来石	1000	1200	1600
Al ₂ O ₃ (>99.5%)	1200	1400	1700
耐火型高纯 Al ₂ O ₃	1400	1550	1900
稳定 ZrO ₂	1200	1300	2000
Si ₃ N ₄ (热压烧结)	1200	1300	1600
SiC (反应烧结)	1400	1600	1600
ThO ₂	1500	1600	2200
BN (热压烧结)	1200	1500	>2000

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

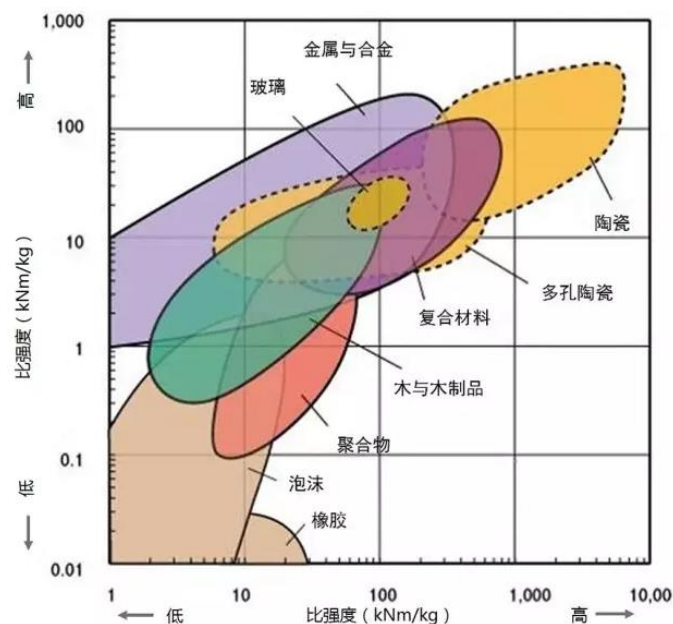
此外，高强度及耐磨性能使得陶瓷材料在结构领域选材中脱颖而出。相较有机材料及金属材料，在相同密度、比刚度及成本情况下，陶瓷材料的强度最强，因而决定了陶瓷材料可以更好适用于更加苛刻的环境中，此外，经中南工大粉末冶金研究所测定，陶瓷材料耐磨性相当于锰钢的 266 倍，高铬铸铁的 171.5 倍。

图表 5 陶瓷材料高强度特性：相同密度情况下，陶瓷材料强度最高



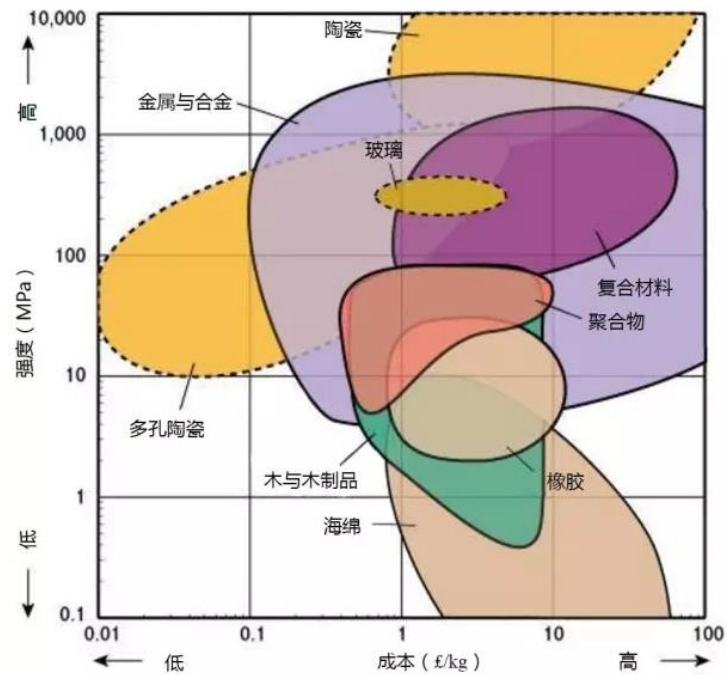
资料来源：世界先进制造技术论坛，华安证券研究所

图表 6 陶瓷材料高强度特性：陶瓷材料兼具高强度及高比刚度双重特性



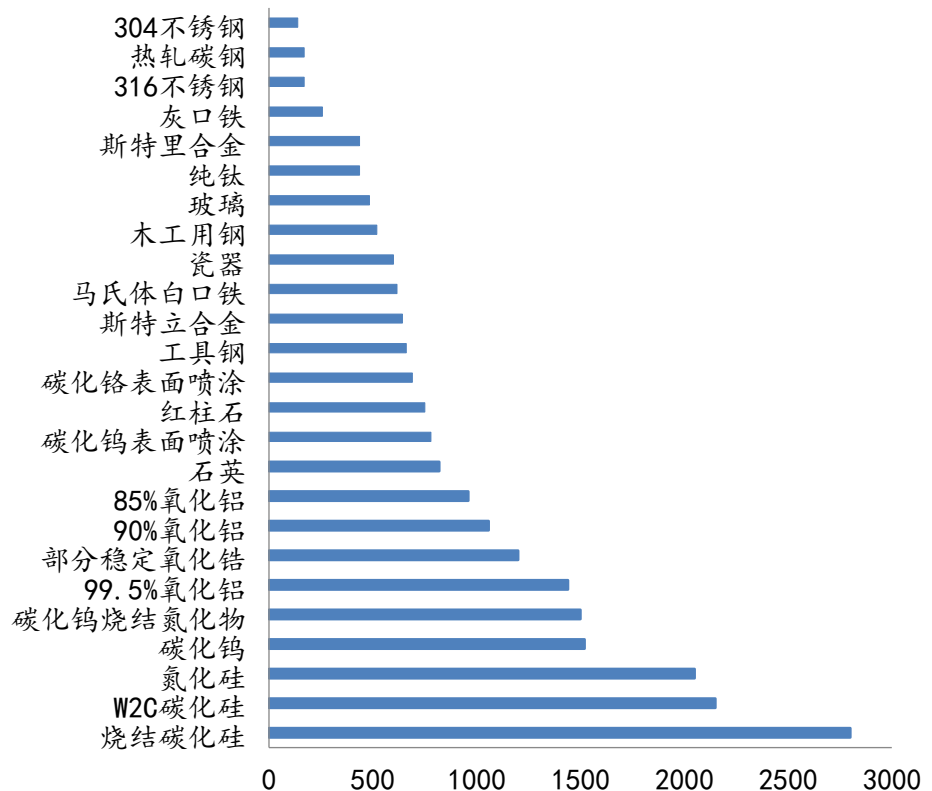
资料来源：世界先进制造技术论坛，华安证券研究所

图表 7 陶瓷材料高强度特性：相同成本情况下，陶瓷材料强度最高



资料来源：世界先进制造技术论坛，华安证券研究所

图表 8 陶瓷材料耐磨性能：耐磨性相当于锰钢的 266 倍，高铬铸铁的 171.5 倍



资料来源：丰链科技官网，华安证券研究所

图表 9 陶瓷材料耐磨特性：相比有机材料及金属材料，陶瓷材料具有更高的弹性模量

类别		弹性模量 E/GPa
有机材料	ABS	0.2
	PE 高密度	1.07
	聚丙烯	1.5-2
	尼龙-66	8.3
金属材料	镍	8.9
	银	10.5
	铅	16
	金	19.32
陶瓷材料	氧化锆	200
	氧化铝 (90%)	260
	尖晶石	260
	碳化硅 (常压烧结)	400

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

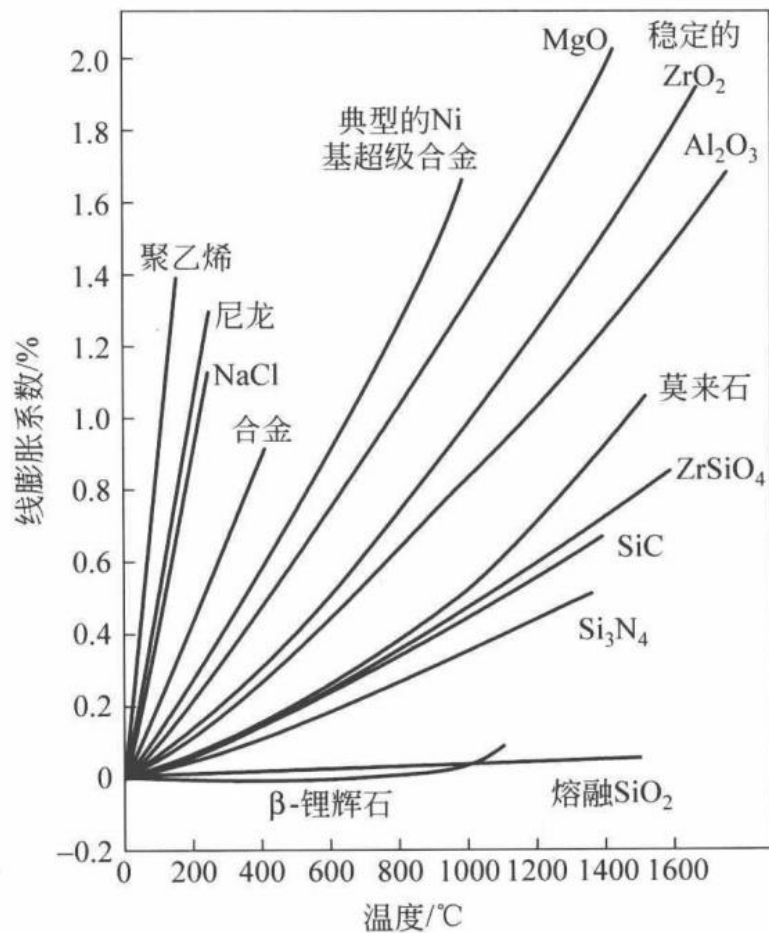
热学性能方面，良好的导热性能、热膨胀性能及抗热震性使得陶瓷材料在许多应用领域有着金属等其它材料不可替代的地位。相比于有机材料，陶瓷材料及金属材料的导热性能更好，但在高温情况下，陶瓷材料的热膨胀系数及热应力断裂抵抗因子低于金属材料，意味着陶瓷材料在高温情况下可以经受住较大的热冲击，是极端环境中最佳材料。

图表 10 陶瓷材料热学特性：相比有机材料及金属材料，陶瓷材料具有更高的热导率

类别		热导率/[W/(m. K)]
有机材料	PS	0.08
	PVC	0.13-0.17
	PE	0.16-0.24
	PTFE	0.27
金属材料	钛	22.4
	银	67
	铅	35
	金	318
陶瓷材料	氮化硅	12.56
	氮化铝	20.1-30.1
	氧化铝	25.1
	碳化硅	58.62

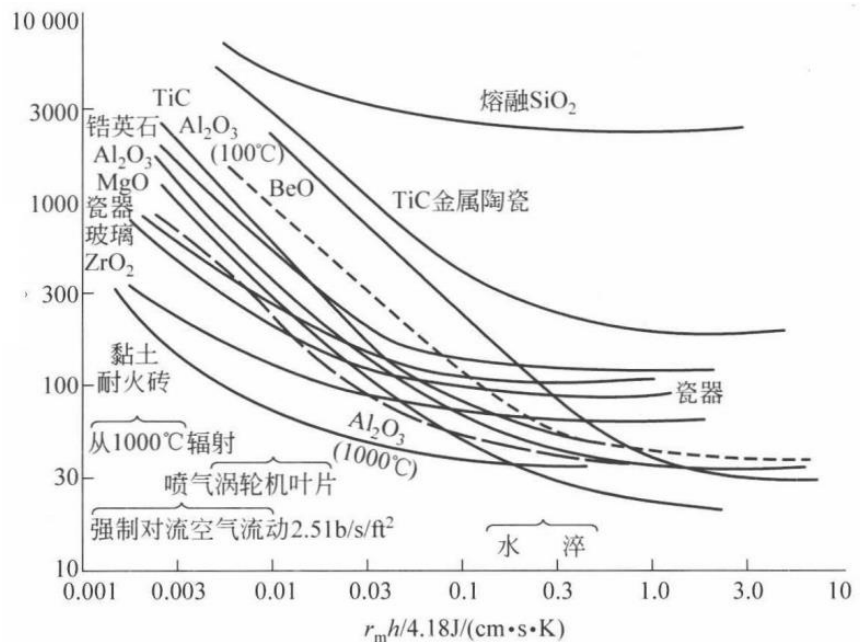
资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 11 陶瓷材料热学特性：陶瓷材料拥有优异的热膨胀系数



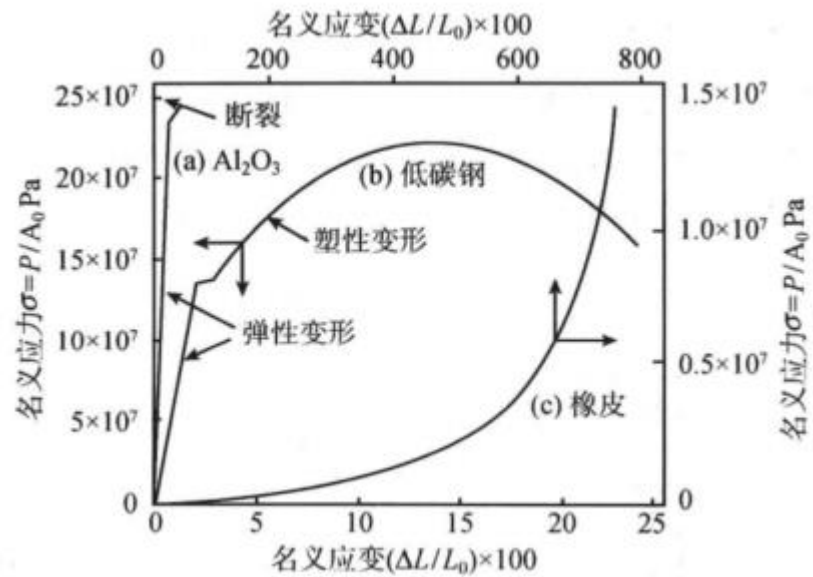
资料来源：《高温结构陶瓷研究浅论》，华安证券研究所

图表 12 陶瓷材料热学特性：陶瓷材料拥有优良的抗热冲击断裂性能



资料来源：《高温结构陶瓷研究浅论》，华安证券研究所

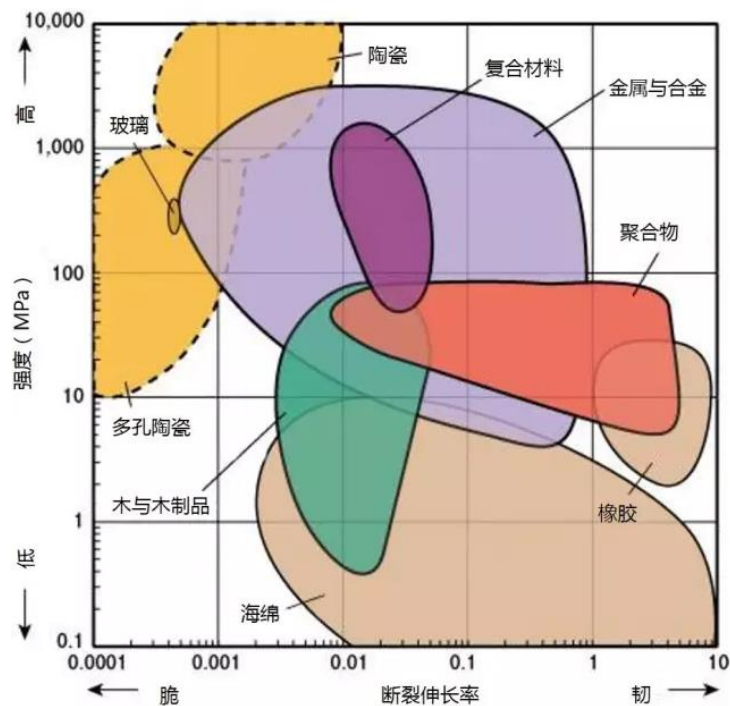
图表 13 陶瓷材料缺点：相较金属材料，陶瓷材料较脆



资料来源：《高温结构陶瓷研究浅论》，华安证券研究所

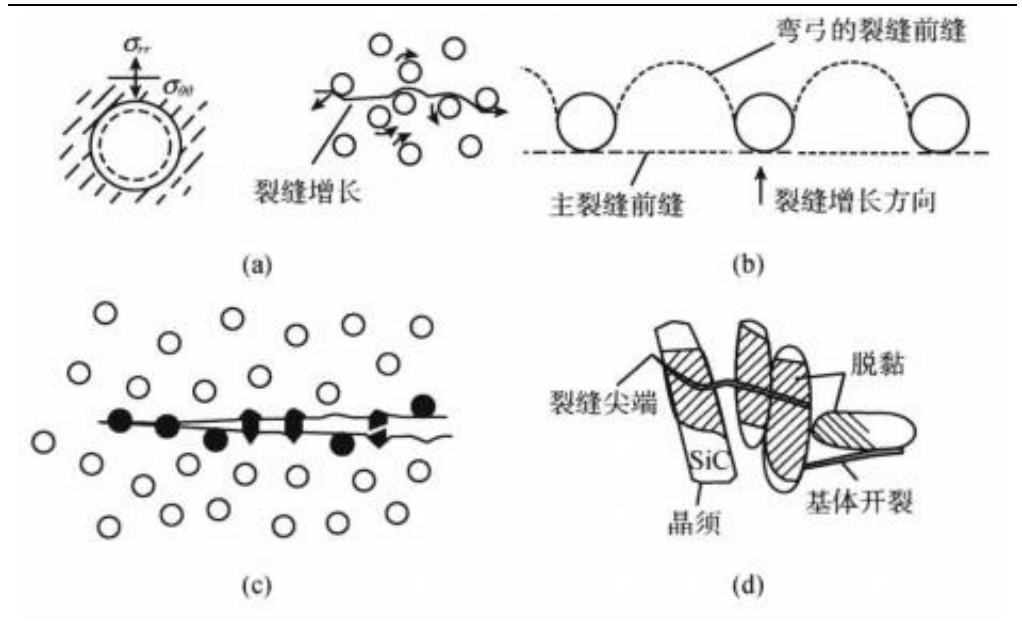
结构陶瓷材料的致命弱点是脆性。目前结构陶瓷材料的研究及开发已从原先倾向于单相和高纯度的特点向多相复合的的发展方向，其中包括纤维（或者晶须）补强的陶瓷基复合材料、自补强陶瓷材料及纳米复相陶瓷等等，使得结构陶瓷材料性能得到了极大的改观。

图表 14 陶瓷材料缺点：断裂韧性较其他材料小，表征为脆性



资料来源：世界先进制造技术论坛，华安证券研究所

图表 15 陶瓷材料增韧机理示意图



资料来源：《高温结构陶瓷研究浅论》，华安证券研究所

1.1.1 氧化物陶瓷

氧化物陶瓷材料的原子结合以离子键为主，存在部分共价键，因此具有许多优良的性能。大部分氧化物具有很高的熔点，良好的电绝缘性能，特别是具有优异的化学稳定性和抗氧化性，在工程领域已得到了较广泛的应用。按组分可分为单一氧化物陶瓷（如氧化铝、氧化铍、二氧化钛陶瓷等）及复合氧化物陶瓷（如尖晶石 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ，莫来石 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、锆钛酸铅 PZT 陶瓷等）。

图表 16 氧化物陶瓷的主要物性

材料类别	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^3)$	热导率/ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	
			500 $^{\circ}\text{C}$	1000 $^{\circ}\text{C}$
Al_2O_3	2015	3.97	10.9	6.2
BeO	2550	3.01	65.4	20.3
CaO	2600	3.32	8.0	7.8
MgO	2800	3.58	13.9	7.0
SiO_2	1730	2.20	1.6	2.1
ThO_2	3300	10.01	5.1	3.0
TiO_2	1840	4.24	3.8	3.3
UO_2	2878	10.90	5.1	3.4
ZrO_2	2677	5.90	2.1	2.3
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	1850	3.16	4.4	4.0
$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	2135	3.58	9.1	5.8
$2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	1880	3.22	3.1	2.4
$\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$	2340–2550	4.60	4.3	4.1

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

● 氧化铝陶瓷：发展最早及应用范围最广的结构陶瓷

氧化铝陶瓷制备方面，目前商用的方法有拜耳法、化学法、烧结片状刚玉法及电熔刚玉法，其中拜耳法应用最为广泛。拜耳法可制备得到纯度为 99.5%的氧化铝粉末，但主要含有氧化钠等杂质，后化学法出现，可制备出 99.99%纯度的氧化铝高纯细粉。

图表 17 日本生产的典型高纯超细氧化铝粉体特性

材料类别	硫酸铝铵热解法	碳酸铝铵热解法	有机铝盐水解法	铝在水中火花放电法	改良拜耳法
Al ₂ O ₃ /%	>99.99	>99.99	>99.99	>99.99	>99.99
Fe ₂ O ₃ /%	0.004	<0.003	<0.001	0.004	0.001
SiO ₂ /%	0.009	<0.008	<0.002	0.004	0.003
Na ₂ O/%	0.007	<0.001	<0.0004	<0.0003	<0.004
中位粒径/μm	0.52	0.35	0.1-0.3	0.83	0.5
原晶粒径/μm	-	0.1	-	-	-
公司名称	BA	TC	SC	IC	SC
商城名称	CR-6	TN-10	AKP-50	RA-40	A-MPST

注：SC-住友化学工业公司；TC-大明化学工业公司；IC-岩谷化学工业公司；BA-拜柯夫斯基公司

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 18 常用氧化铝陶瓷的配方及物性

名称		95 瓷			97 瓷		99 瓷
组分及质量分数	Al ₂ O ₃	93.5	95	95	97	97	99
	高岭土	1.95	2.0	-	1.0	1.0	0.75
	滑石	-	3.0	3.75	1.3	0.8	-
	CaCO ₃	3.27	-	0.63	-	-	-
	MgCO ₃	-	-	-	-	-	0.25
	SiO ₂	--	-	0.63	-	-	-
	Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0.05	-
	Nb ₂ O ₃	-	-	-	-	0.9	-
	La ₂ O ₃	-	-	-	0.5	-	-
	SrCO ₃	-	-	-	0.3	0.3	-
主要物性	烧成温度/°C	1600	1610	1760	1740	1740	1750
	抗折强度/MPa	>320	217	235	>320	>320	370-450
	介电常数	8-8.5	8.8	8	8.9-9.6	>9	>9
	比体积电阻/Ω·m	10 ¹¹ -10 ¹²	2×10 ⁸	10 ¹¹	10 ¹¹	10 ¹¹	10 ¹² -10 ¹³

资料来源：华安证券研究所整理

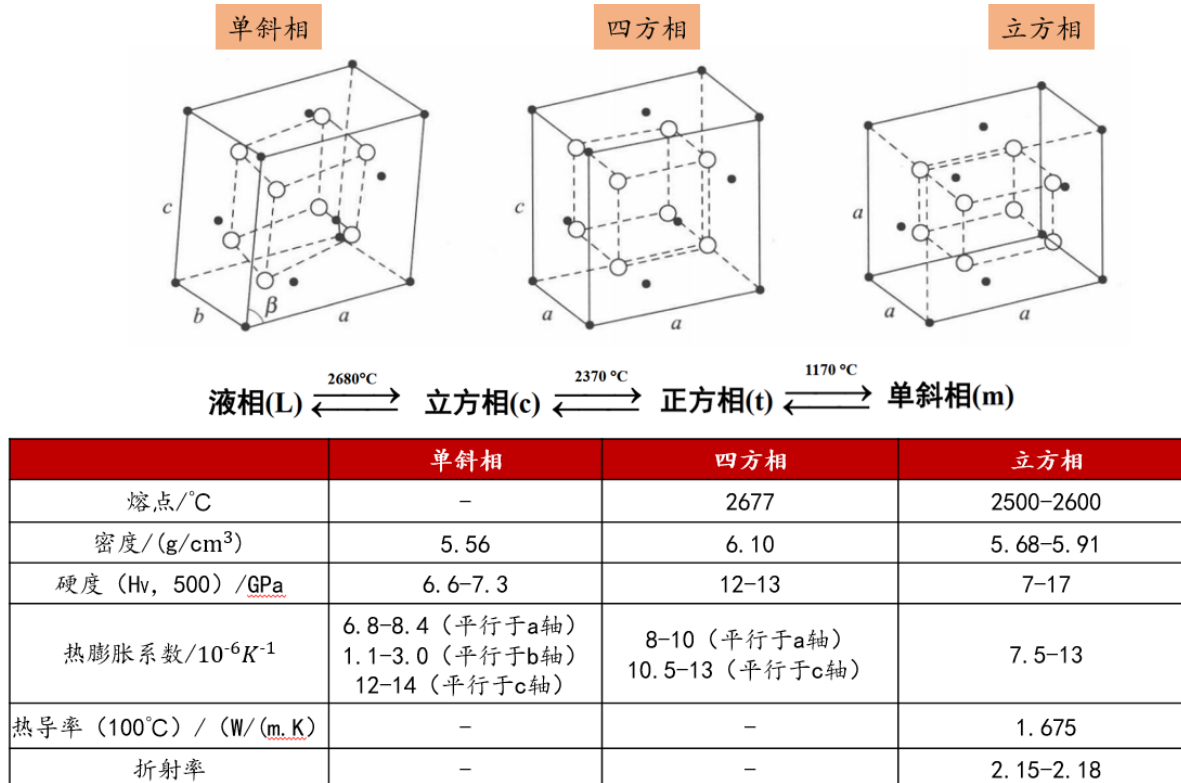
应用端，氧化铝陶瓷目前可应用于机械领域耐磨器件、电力领域耐高温绝缘结构件、半导体领域陶瓷基板等。

图表 19 氧化铝晶体结构及主要应用



资料来源：《现代陶瓷材料选用及设计》，华安证券研究所

图表 20 氧化锆三种晶型



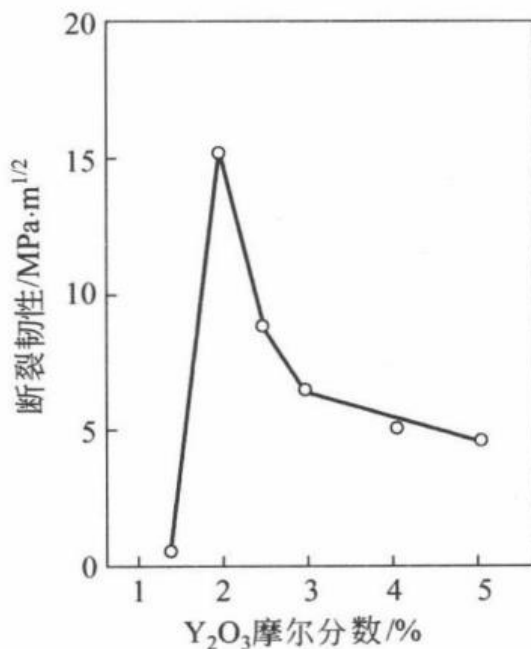
资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

● 氧化锆陶瓷：高性能结构陶瓷，增韧是制备的关键

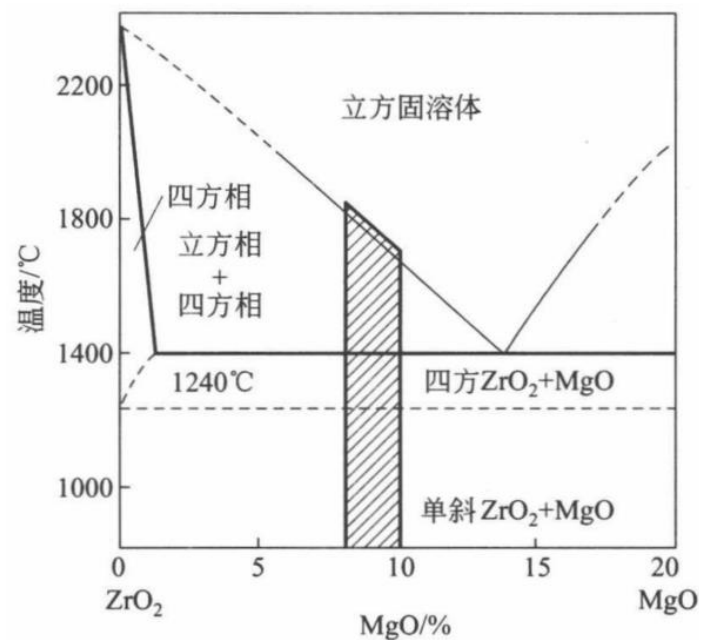
氧化锆的传统应用主要是作为耐火材料、涂层和釉料等的原料，但是随着对氧化锆陶瓷热力学和电学性能的深入了解，使它有可能作为高性能结构陶瓷和固体电介质材料而获得广泛应用。特别是随着对氧化锆相变过程深入了解，在 20 世纪 70 年代出现了氧化锆陶瓷增韧材料，使氧化锆陶瓷材料的力学性能获得了大幅度提高，尤其是室温韧性高居陶瓷材料榜首。

制备端，增韧是最核心的目标，最常见的方式就是添加稳定剂。二氧化锆都是由锆砂和斜锆石矿制得。锆砂以硅酸锆 ($ZrO_2 \cdot SiO_2$) 为主要成分，斜锆石矿的主要成分为 ZrO_2 ，含有少量 SiO_2 、 TiO_2 等杂质。氧化锆的制备以往全都以上述两种天然矿物为原料，而工程陶瓷用的易烧结性二氧化锆微粉是以这两种天然矿物制备的锆盐为原料而制造的。氧化锆有三种晶型：立方相(c)、四方相(t)和单斜相(m)。热力学观点分析表明，纯氧化锆单斜相在 $1170^\circ C$ 以下是稳定的，超过此温度转变为四方相，温度到达 $2370^\circ C$ 则转变为立方相，直到 $2680-2700^\circ C$ 发生熔化。整个相变过程可逆。当从高温冷却到四方相转变温度时，由于存在相变滞后现象，故大约要在 $1050^\circ C$ 左右，即偏低 $100^\circ C$ 才由 t 相转变成 m 相，称之为马氏体相变，与此同时相变会产生 5%-9% 的体积膨胀，这一体积变化足以超过 ZrO_2 晶粒的弹性限度，从而导致材料开裂。因此从热力学和晶体相变过程来看制备纯 ZrO_2 材料几乎是不可能的。为了避免这一相变，可以来用二价氧化物(CaO , MgO , SrO)和稀土氧化物(Y_2O_3 , CeO_2)等的作为稳定剂与 ZrO_2 形成固溶体，生成稳定的立方相结构。不过，这些稳定剂氧化物金属离子的半径与 Zr^{4+} 离子半径相差小于 40% 时，才能起到稳定作用。

图表 21 添加氧化钇增韧效果



图表 22 添加氧化镁增韧机理



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 23 部分商用氧化锆的力学及热学性能

指标名称	商用稳定氧化锆				商用四方多晶氧化锆	
	Mg-PSZ	Ca-PSZ	Y-PSZ	Ca/Mg-PSZ	Y-TZP	Ce-TZP
稳定剂质量分数/%	2.5-3.5	3-4.5	5-12.5	3	2-3	12-15
硬度/GPa	14.4 ^a	17.1 ^b	13.6 ^c	15	10-12	7-10
室温断裂韧性 $K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	7-15	6-9	6	4.6	6-15	6-30
杨氏模量/GPa	200 ^a	200-217	210-238	-	140-200	140-200
室温弯曲强度/MPa	430-720	400-690	650-1400	350	800-1300	500-800
1000℃热膨胀系数/ $(10^{-6}/\text{K})$	9.2 ^a	9.2 ^b	10.2 ^c	-	9.6-10.4	-
热导率/ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	1-2	1-2	1-2	1-2	2-3.3	-

注：a 对应 2.8%MgO；b 对应 4%CaO；c 对应 5%Y₂O₃

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

应用端，氧化锆(特别是增韧的)陶瓷由于其优良的性能，已在各工业及技术领域得到广泛的应用。最主要的是，其凭借优异的力学性能和耐高温性能作为结构材料，应用于机械工程(做陶瓷刀具、量具、轴承、模具、密封件等)、冶金工业(坩埚、耐火材料、连铸注口、抗压支撑、导辊等)、军事工业(火箭隔热层、防弹装甲板)以及化学工业、纺织工业、生物工程和日常生活等各方面。

图表 24 氧化锆的应用

氧化锆研磨介质



氧化锆轴承



氧化锆插芯



氧化锆汽车部件



氧化锆固态电解质



氧化锆耐火材料



资料来源：华安证券研究所整理

● **氧化铍陶瓷：导热系数最大的氧化物陶瓷，但粉末毒性限制了其应用**

BeO 是碱土金属氧化物中唯一的六方纤锌矿结构，由于 BeO 具有纤锌矿型和强共价键结构，而且相对分子质量很低，因此，BeO 具有极高的热导率，是氧化铝的 10 倍左右，其室温热导率可达 250W/(m·K)，与金属的热导率相当，并且在高温、高频下，其电气性能、耐热性、耐热冲击性、化学稳定性俱佳。但 BeO 陶瓷的致命缺点是其剧毒性，长期吸入 BeO 粉尘会引起中毒甚至危及生命，并会对环境造成污染，这极大影响了 BeO 陶瓷基片的生产和应用。

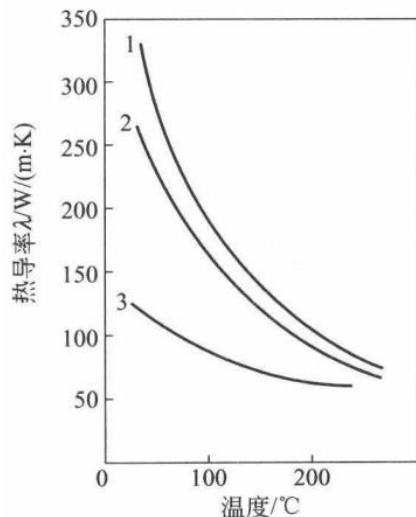
图表 25 国内外氧化铍陶瓷主要性能

	美国氧化铍公司	美国 BRUSH 公司	国内研制水平
介电常数	6.6	6.73	7.2
$\tan \delta / 10^4$	9 (10HZ)	40 (10HZ)	3.6 (10HZ)
电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	1×10^{15}	1×10^{15}	4×10^{15}
介电强度/kV/mm	11.8 (厚 3.17mm)	9 (厚 6.35mm)	50 (厚 1.5mm)
热导率/[W/(m·K)]	265	285	286
线膨胀系数/ $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	8.0 (25-1000 $^\circ\text{C}$)	9.0 (25-1000 $^\circ\text{C}$)	7.6 (25-1000 $^\circ\text{C}$)
抗折强度/MPa	242	220	230
密度/ g/cm^3	2.85	2.85	2.92

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

制备端，纯氧化铍粉料难以烧结，即使采用较低温度的活性氧化铍粉料，烧成温度仍然很高（达到 1800 $^\circ\text{C}$ ），因此需要引入助烧剂以降低烧结温度，促进致密化。

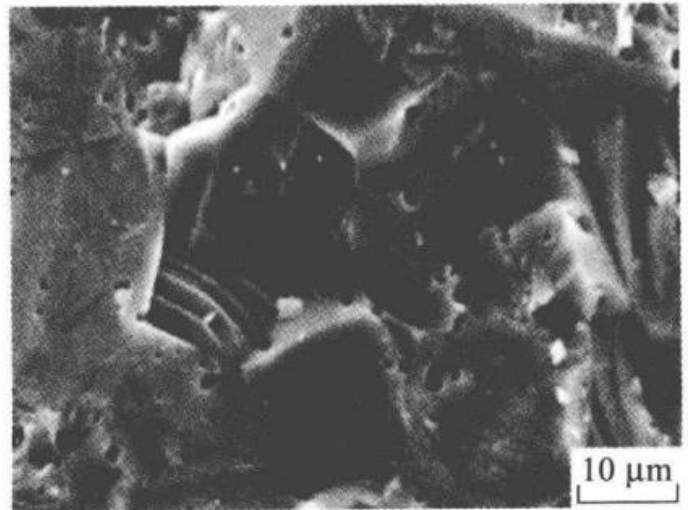
图表 26 添加剂和温度对烧结后氧化铍陶瓷导热影响



注：1-纯氧化铍；2-氧化铍+2%氧化铝；3-氧化铍+2%氧化镁

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

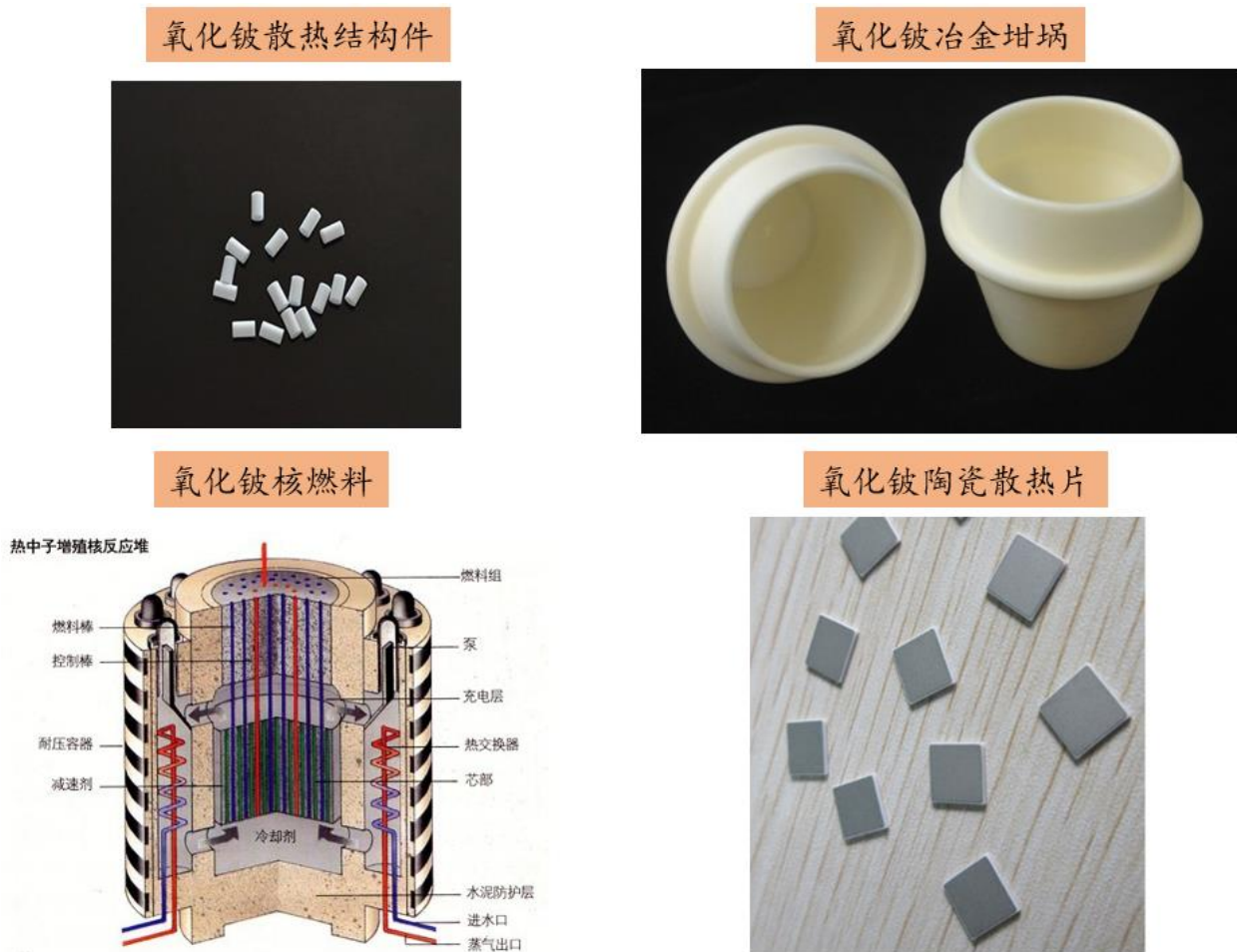
图表 27 添加氧化镁-三氧化二铁助烧剂后的氧化铍陶瓷



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

应用端，氧化铍陶瓷具有高的热导率、高的耐火度、良好的核性能以及优良的电性能，因而可应用于高级耐火材料、原子能反应堆以及各种大功率电子器件和集成电路等。然而，氧化铍的毒性是不可忽略的，随着世界各国对环境保护的日趋重视，氧化铍陶瓷的使用今后可能会受到一定的限制和影响。

图表 28 氧化铍陶瓷应用



资料来源：华安证券研究所整理

● 氧化镁陶瓷：现代冶金行业的关键材料

氧化镁陶瓷是典型的新型陶瓷，也属于传统的耐火材料。氧化镁本身对碱性金属溶液有较强的抗侵蚀能力，制备的氧化镁陶瓷坩埚具有优异的化学性能和抵抗金属侵蚀的稳定性，与镁、镍、铀、铝、钼等不起作用。在氧化气氛或氮气保护下氧化镁陶瓷可稳定工作到 2400℃，因此氧化镁是现代冶金工业先进工艺中的关键材料。

图表 29 氧化镁坩埚相关参数

类别	参数
纯度	99.3%
抗压强度/MPa	1800
抗弯强度/MPa	600
莫氏硬度	5-6
最高使用温度/℃	2200
密度/ g/cm ³	3.5

资料来源：北科新材官网，华安证券研究所

图表 30 添加剂对氧化镁陶瓷晶粒尺寸和烧结性的影响

添加剂	1500℃		1600℃		1700℃	
	晶粒尺寸/ μm	气孔率/%	晶粒尺寸/ μm	气孔率/%	晶粒尺寸/ μm	气孔率/%
1%TiO ₂	4-6	20	20-25	12.9	35-40	16
8%Al ₂ O ₃	15-18	10.7	20-30	5.6	55-60	4.8
5%ZrO ₂	4-6	25	10-12	15.7	12-15	11.0
5%V ₂ O ₃	35-40	14.7	50-55	9.8	55-60	10.1
3%MgO	4-6	21.2	4-6	20.7	18-20	12.3

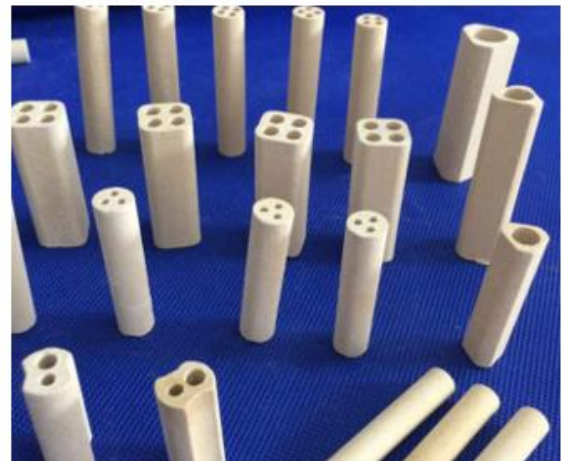
资料来源：瓷录 Ceramats，华安证券研究所

图表 31 氧化镁陶瓷应用

氧化镁耐磨陶瓷



氧化镁陶瓷型芯



氧化镁陶瓷坩埚



氧化镁陶瓷炉衬



资料来源：华安证券研究所整理

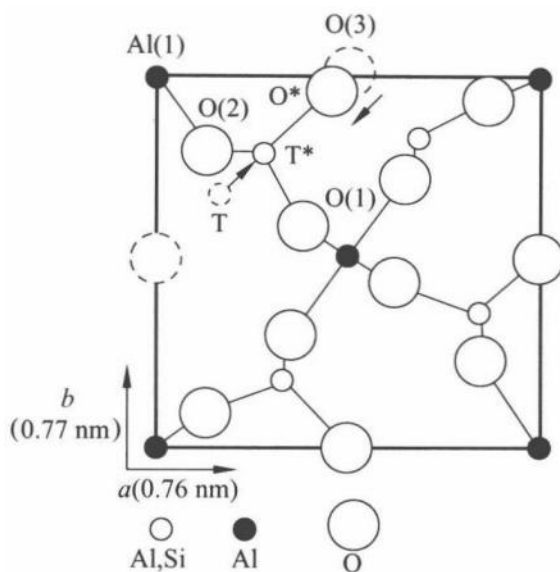
制备方面，原材料源于矿物或海水，烧结过程需加入添加剂调节性能。自然界中含镁的化合物很丰富，它以多种矿物形式存在于地壳和海洋之中，如菱镁矿、白云石、水镁石、滑石等。工业上主要从上述矿物中提取 MgO ，近来发展从海水中提取。从矿物或海水中提取 MgO ，大多先制成氢氧化镁或碳酸镁，然后经煅烧分解成 MgO ，将这种 MgO 通过进一步化学处理或热处理可得到高纯 MgO 。制备时对 MgO 原料进行处理后，按组成进行配料。为了促进烧结以及能使晶粒稍微长大些，同时为了减少制备的水化倾向，可加入一些添加剂，如 TiO_2 、 Al_2O_3 、 V_2O_5 等。如果要求具有高纯度的 MgO 陶瓷，就不能采用加入添加剂的方法来促进烧结和晶粒长大，而是采用活化烧结的方法，即将 $Mg(OH)_2$ 在适当温度下煅烧，得到具有很多晶格缺陷的活性 MgO ，用以制造烧结氧化镁陶瓷。

应用端，氧化镁陶瓷理论使用温度高达 $2200^{\circ}C$ ，可在 $1600^{\circ}C \sim 1800^{\circ}C$ 长期使用。其高温稳定性及耐腐蚀性能均优于氧化铝陶瓷，且与 Fe 、 Ni 、 U 、 Th 、 Zn 、 Al 、 Mo 、 Mg 、 Cu 、 Pt 等都不起作用，所以其应用范围可包括：钢铁、玻璃等冶炼行业中腐蚀性条件下的坩埚或者其他耐火材料。 MgO 陶瓷可用作冶炼金属的坩埚，在原子能工业中也适于冶炼高纯度的铀和钍；还可用作热电偶保护套管。利用它能使电磁波通过的性质，作雷达罩及红外辐射的投射窗口材料等、冶炼金属、合金，如镍合金、放射性金属铀、钍合金、铁及其合金等的坩埚。压电、超导材料等的原料，并且无污染、耐铅腐蚀等；亦可做陶瓷烧结载体，特别是 $\beta-Al_2O_3$ 等高温下有腐蚀性、挥发性物质的陶瓷产品的烧结保护。

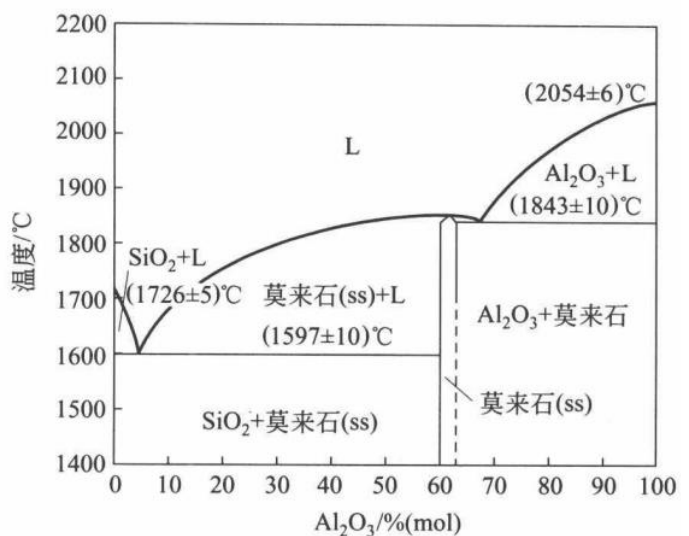
● 莫来石：铝硅酸盐组成的矿物统称

莫来石是一种优质的耐火原料，这一类矿物比较稀少。莫来石是铝硅酸盐在高温下生成的矿物，人工加热铝硅酸盐时会形成莫来石。天然的莫来石晶体为细长的针状且呈放射簇状。莫来石矿被用来生产高温耐火材料。在 C/C 复合材料中多作为热障涂层，应用广泛。莫来石 $Al_2O_3-SiO_2$ 元系中常压下稳定的二元固溶体，化学式为 $Al_2O_3-SiO_2$ 的天然莫来石非常少，通常烧结法或电熔法等人工合成。

图表 32 莫来石晶胞投影图



图表 33 莫来石 $Al_2O_3-SiO_2$ 元相图



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 34 莫来石性能

类别	参数
熔点 (°C)	1850
最高使用温度 (°C)	1800
体积密度 (g/cm ³)	≥2.65
线膨胀系数 (20—1000°C)	5.3×10 ⁻⁶

资料来源：CNKI，华安证券研究所

高温工业大规模使用的莫来石按其制备方法分为电熔莫来石和烧结莫来石两大类。莫来石是一种优质的耐火材料。最早在苏格兰的莫尔岛被发现而被命名。莫来石的铝和硅的成分是一个范围，其在常温常压下能够稳定存在。天然的莫来石比较稀少，通常是通过对铝硅化合物进行热处理后制备莫来石。莫来石的合成可分为固相合成(包括传统的溶胶-凝胶(SSG)工艺)，液态合成和气态合成。固态合成和液态合成的莫来石根据加热处理的温度和铝硅的组成，可以被分为烧结莫来石和熔融莫来石。烧结莫来石是指将合成莫来石的原料加热到生成少量液相的温度，促进烧结又不影响其固相烧结，继而保温，使莫来石结晶并发育长大，形成所需要的莫来石形貌和结构。而熔融莫来石则是将氧化铝和二氧化硅的混合物加热到莫来石熔点以上，在冷却过程中结晶形成的莫来石。溶胶凝胶法制备莫来石也被称为化学莫来石，是由化学反应、热分解和莫来石化得到的莫来石，这种方法所制备的莫来石其性能高度依赖于化合物的纯度、均匀性、结晶温度以及致密度等条件。

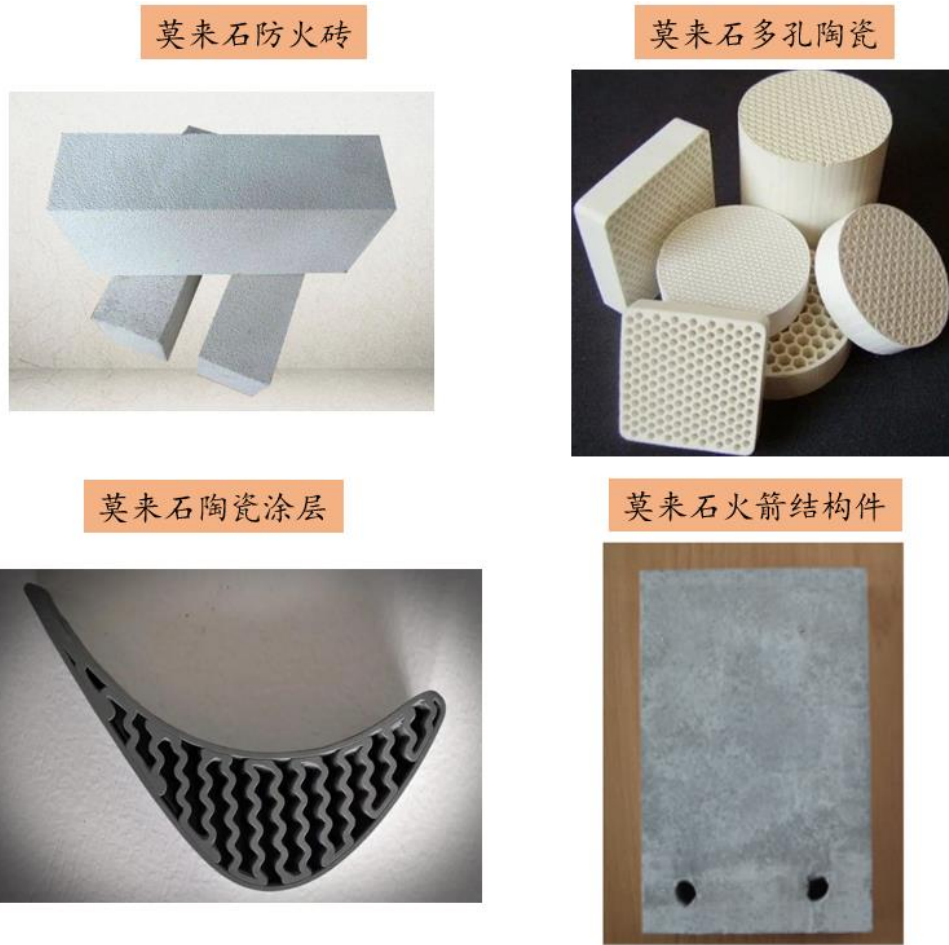
图表 35 不同制备方式制备出的莫来石组成

	高纯电熔莫来石	普通电熔莫来石	全天然烧结莫来石
Al ₂ O ₃ %	72.6	71.7	74.1
SiO ₂ %	25.6	22.0	26.2
Fe ₂ O ₃ %	0.01	0.65	0.81
TiO ₂ %	0.01	2.81	2.05
CaO%	0.17	0.15	0.28
MgO%	0.08	0.20	0.25
K ₂ O%	0.01	0.19	0.21
Na ₂ O%	0.19	0.05	0.15
体密 g/cm	3.02	2.84	2.86
显气孔率	2.1	9.4	5

资料来源：CNKI，华安证券研究所

应用端，莫来石制备的耐火新材料，目前广泛应用于马弗炉、煅烧炉、锅炉、回转窑等高温设备中。由莫来石制备耐高温设备，不仅仅耐高温，而且使用寿命长、耐腐蚀。莫来石与其他优质的材料进行优势互补，复合合成更加优良性能的耐火材料。如采用堇青石-莫来石复合合成陶瓷窑具材料，制备的材料具有热膨胀系数小、抗热震性优异、耐火度高、高温稳定性好等优点。此外，莫来石在电性能领域的应用就体现在其作为一种优秀的基片材料，它具有很低的介电常数，能承担高的线路密度，莫来石陶瓷和莫来石质玻璃-陶瓷复合材料被用作高性能集成电路的优良功能材料。

图表 36 莫来石应用



资料来源：华安证券研究所整理

1.1.2 氮化物陶瓷

氮化物陶瓷是氮与金属或非金属元素造成的陶瓷，是一类重要的结构与功能材料。

图表 37 典型氮化物陶瓷的主要性能

类别	熔点/°C	密度/g/cm ³	电阻率/Ω·cm	热导率/[W/(m·K)]	线膨胀系数/1×10 ⁻⁶ K ⁻¹
Si ₃ N ₄	1900	3.184	10 ¹¹	1.67-2.09	2.5
AlN	2450	3.26	2.00×10 ⁹	20.10-30.14	4.03-6.09
BN	3000	2.27	10 ¹¹	15.07-28.89	0.59-10.51
TiN	2950	5.43	2.17×10 ⁻⁷	29.30	9.3
ZrN	2980	7.32	1.36×10 ⁻⁷	13.82	6-7
NbN	2050	7.3	2.00×10 ⁻⁶	3.77	-
VN	2030	6.04	8.59×10 ⁻⁷	11.30	-
CrN	1500	6.1	-	8.79	-

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

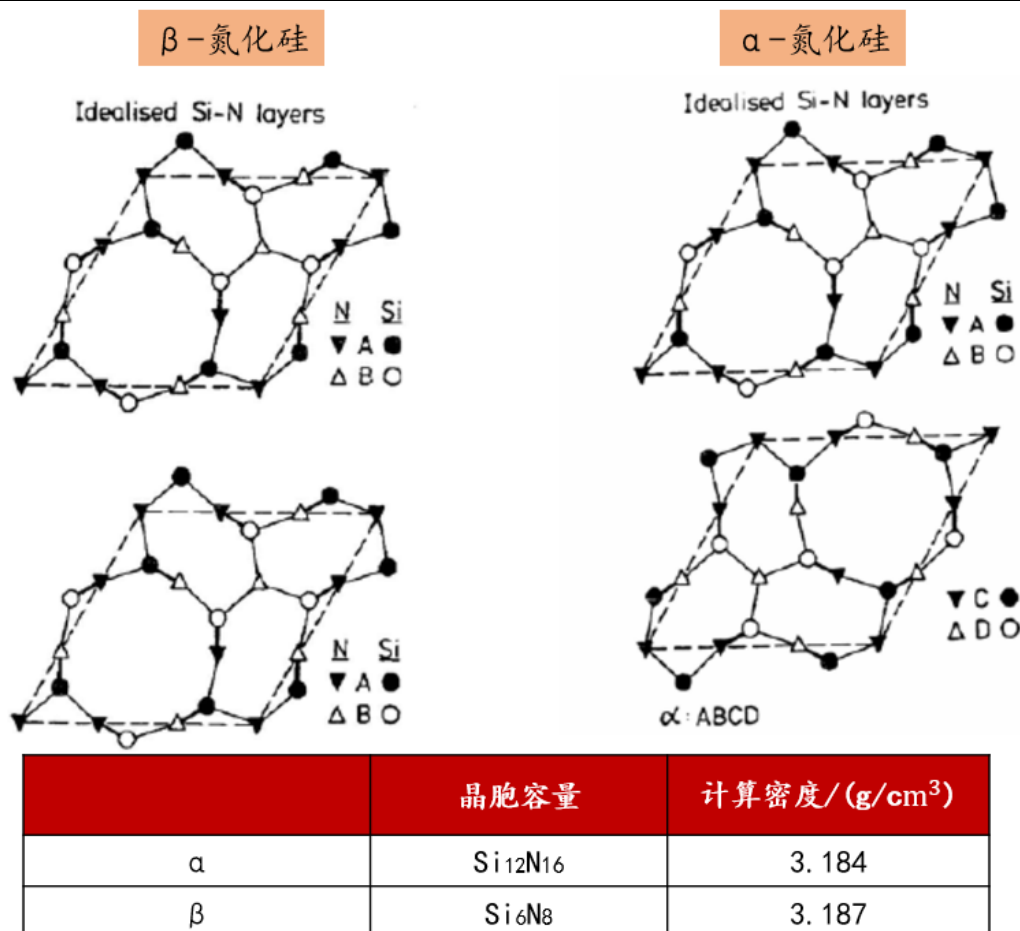
氮化物陶瓷具有良好的力学、化学、电学、热学及高温物理性能，在冶金、航空、化工、陶瓷、电子、机械及半导体等行业具有广泛的应用。但许多由氮元素和金属元素构成的氮化物在高温下不稳定，易氧化，因而在自然界不能自由存在，只能靠人工合成。目前主要合成氮化物可分为氮化硼，氮化铝，氮化硅等共价结合型。

● 氮化硅陶瓷：先进陶瓷中综合性能最好的材料之一

随着当代科学技术的发展，航空、航天能源等技术领域对结构材料的要求越来越高，耐高温、耐腐蚀、耐摩擦、高强度、高硬度和综合力学性能好的结构材料的开发和研究已经变得十分重要。 Si_3N_4 陶瓷是先进陶瓷中综合性能最好的材料之一，它的电学、热学和机械性质十分优良，在氧化气氛中可使用到 1400°C ，在中性或还原性气氛中可使用到 1850°C 。它既突出了一般陶瓷材料的坚硬、耐热、耐磨、耐腐蚀的优点，又具备了抗热震好、耐高温蠕变、自润滑好、化学稳定性佳等优势，还具有相对较低的密度以及低的介电常数、介电损耗等优良的介电性能。

氮化硅分子量 140.28，按重量百分比，其中硅占 60.28%，氮占 39.94%。两种元素电负性相近，氮化硅晶体中 Si-N 之间以共价键结合为主（其中离子键仅占 30%），键合强度高。氮化硅没有熔点，在常压于 1870°C 升华分解，具有高的蒸汽压和很低的扩散系数。Si 原子与 N 原子以键强很强的共价键结合，导致氮化硅高强度、高硬度、耐高温、绝缘等性能。因为 Si 原子与 N 原子之间强共价键，高温下原子扩散很慢，所以烧结过程中需加入高温形成液相的添加剂促进扩散，加快烧结致密。

图表 38 氮化硅晶型



资料来源：华安证券研究所整理

氮化硅陶瓷的性能与烧结方法密切相关。氮化硅的高温力学性能在很大程度上取决于晶界玻璃相。为了改善氮化硅的烧结性能在原料中加入烧结助剂，高温时烧结助剂形成玻璃相，冷却后玻璃相存在于晶界处，必须经过晶界工程处理才能保持和发挥氮化硅的这一高温特性，否则晶界玻璃相在高温下软化造成晶界滑移，对高温强度、蠕变和静态疲劳中的缓慢裂纹扩展都有很大的影响，晶界滑移速度同玻璃相的性质（如粘度等）、数量及分布有关。

图表 39 氮化硅陶瓷制品的制造方法

烧结方法	主要原料	烧结助剂	制品特征
反应烧结	Si	—	收缩小、气孔率 10-20%、尺寸精确、强度低
二次反应烧结	Si	MgO, Y ₂ O ₃	收缩小、较致密、尺寸精确、强度有所提高
常压烧结	Si ₃ N ₄	Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃	较致密、低温强度高、高温强度下降
气压烧结	Si ₃ N ₄	MgO, Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃	添加剂加入量减少、致密度和强度提高
热压烧结	Si ₃ N ₄ (Si)	MgO, Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃	制品形状简单、致密、强度高、存在各项异性
热等静压烧结	Si ₃ N ₄	Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃	致密、组织均匀、强度高、添加剂少
化学气相沉积	SiH ₄ , NH ₃	—	高纯度薄层、各向异性、不能得到壁厚制品

资料来源：CNKI，华安证券研究所

图表 40 不同烧结方法得到氮化硅陶瓷的性能

	无压烧结	热压烧结	反应烧结	气氛压力烧结
室温弯曲强度/MPa	850-950	1000-1300	200-300	900-1000
断裂韧性/MPa·m ^{1/2}	5-6	6-7	3-4	6-7
韦伯模量/m	10-18	15-20	15-20	12-18
弹性模量/GPa	280-300	300-320	160-200	290-320
硬度/HRA	90-91	92-93	83-85	91-92
密度/g/cm ³	3.2-3.4	3.2-3.3	2.6-2.8	3.2-3.3
膨胀系数/1×10 ⁻⁶ K ⁻¹	2.8-3.2	3.0-3.5	2.5-3.0	2.8-3.2
抗热冲击温差/K	700-900	800-1000	300-400	700-900
热导率/[W/(m·K)]	20-25	25-30	17	23-28

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

应用端，Si₃N₄ 陶瓷是一种重要的结构材料，它是一种超硬物质，本身具有润滑性，并且耐磨损；除氢氟酸外，它不与其他无机酸反应，抗腐蚀能力强，高温时抗氧化。而且它还能抵抗冷热冲击，在空气中加热到 1000℃ 以上，急剧冷却再急剧加热，也不会碎裂。正是由于 Si₃N₄ 陶瓷具有如此优异的特性，人们常常利用它来制造轴承、气轮机叶片、机械密封环、永久性模具等机械构件。其中，利用 Si₃N₄ 重量轻和刚度大的特点，可用来制造滚珠轴承、它比金属轴承具有更高的精度，产生热量少，而且能在较高的温度和腐蚀性介质中操作。用 Si₃N₄ 陶瓷制造的蒸汽喷嘴具有耐磨、耐热等特性，用于 650℃ 锅炉几个月后无明显损坏，而其它耐热耐蚀合金钢喷嘴在同样条件下只能使用 1-2 个月。

图表 41 氮化硅应用



资料来源：华安证券研究所整理

● 氮化铝陶瓷：微电子工业电路基板及封装的理想结构材料

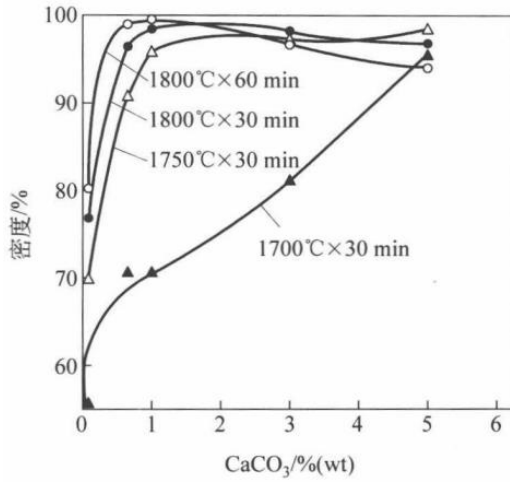
氮化铝 (AlN) 作为一种新型陶瓷材料，是近年来新材料领域的研究热点之一。虽然早在一百多年前，AlN 粉末便被合成制得，但由于它固有的难于烧结的缺点，在随后的几十年中，有关 AlN 的研究并不多，本世纪五十年代，AlN 陶瓷才被第一次制得，但当时强度很低，限制了其工业应用。至七十年代，致密的氮化铝陶瓷得以制备，其优良的热传导性、可靠的电绝缘性、耐高温、耐腐蚀、低的介电常数以及与硅相匹配的热膨胀系数等一系列优良特点才显现出来。尤其是近些年来，随着微电子技术的迅速发展，电子器件日趋多功能、小型化、高集成度大功率的电子器件工作时产生大量热量，为了避免电子器件因过热而失效，需要采用具有高热导率的基片将热量带带。AlN 具有优良的导热性能，是新一代基片的理想材料，在电子工业中的应用前景十分广阔，其优良的高温耐蚀性、高温稳定性、较高的强度和硬度，使其在高温结构材料方面的应用也很有潜力。

图表 42 氮化铝的主要性能

性能	指标		优势
热学性能	热导率	实际产品接 200W/m.K	为 Al ₂ O ₃ 的 2-3 倍
	热膨胀系数	$3.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Si: $3.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
电学性能	绝缘性能	室温电阻 > 10 ¹⁶ Ω/m	良好的绝缘体
	介电常数	8	与 Al ₂ O ₃ 相当
机械性能	室温机械性能	HV=12Gpa, E=314Gpa, σ=400-500MPa	比重轻，比强度高
	高温机械性能	1300℃ 下降 20%	热压 Si ₃ N ₄ 、Al ₂ O ₃ 下降 50%
其他	无毒 (BeO 原料剧毒)；对熔融金属和盐类有优异抗浸蚀性能等		

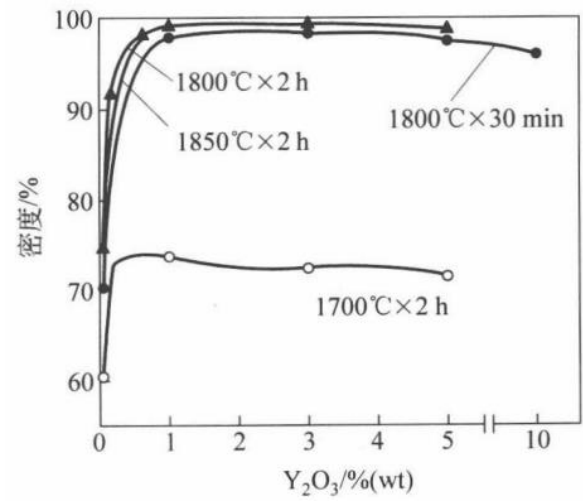
资料来源：CNKI，华安证券研究所

图表 43 碳酸钙添加剂对氮化铝陶瓷致密度影响



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 44 氧化钇添加剂对氮化铝陶瓷致密度影响



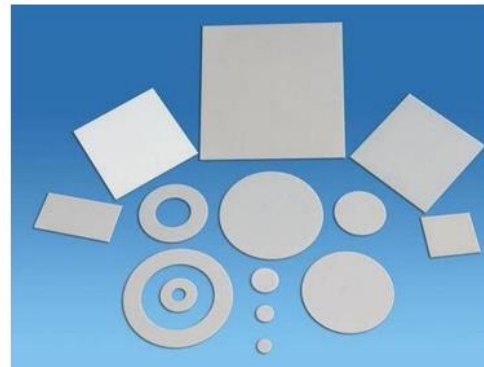
资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 45 氮化铝陶瓷应用

氮化铝陶瓷异形件



氮化硅陶瓷硅片托盘



氮化铝陶瓷坩埚



氮化硅陶瓷电偶保护管



资料来源：华安证券研究所整理

氮化铝作为共价键化合物，难以进行固相烧结，通常采用液相烧结机制，即向氮化铝原料粉末中加入能够生成液相的烧结助剂，并通过溶解产生液相，促进烧结。

作为一种人工合成的材料，氮化铝陶瓷的制备过程通常是先合成氮化铝粉体，再将得到的粉体烧结制备成陶瓷。由于氮化铝中的铝-氮键（Al-N）具有较高的共价键成分，所以氮化铝的熔点高，自扩散系数小，烧结活性低，因此是一种难烧结的陶瓷材料。据中国粉体网编辑了解，当氮化铝粉体纯度较高时，非常难以通过烧结达到完全致密，在陶瓷晶粒中或晶界处均有气孔存在，这极大地限制了氮化铝陶瓷的实际应用。引入合适的烧结助剂，一方面可以与 AlN 表面氧化形成的 Al_2O_3 反应生成较低熔点的第二相，由于液相表面的张力作用，促进 AlN 晶粒的重排，加速烧结体致密化进程。另一方面形成的第二相冷却后，淀析凝结在晶界上，减少了高温下氧进入晶格的可能，起到净化晶格，提高热导率的作用。目前常用的烧结助剂主要为氧化物和氟化物，氧化物主要为 Y_2O_3 ， Sm_2O_3 ， La_2O_3 ， Dy_2O_3 ， CaO ；而氟化物有 CaF_2 ， YF_3 等。其中 Y_2O_3 驱氧能力强，稳定性好等综合性能优越，成为最常用的烧结助剂；而 CaO 由于液相形成温度较低，在低温烧结中的作用比较明显。

应用端，氮化铝陶瓷室温比较强度高，且不易受温度变化影响，同时具有比较高的热导系数和比较低的热膨胀系数，是一种优良的耐热冲材料及热交换材料，作为热交换材料，可望应用于燃气轮机的热交换器上。此外，氮化铝陶瓷是一种高温耐热材料，其热导率高，较氧化铝陶瓷高 5 倍以上，膨胀系数低，与硅性能一致。使用氮化铝陶瓷为主要原材料制造而成的基板，具有高热导率、低膨胀系数、高强度、耐腐蚀、电性能优、光传输性好等优异特性，是理想的大规模集成电路散热基板 and 封装材料。随着电子信息产业技术不断升级，PCB 基板小型化、功能集成化成为趋势，市场对散热基板与封装材料的散热性与耐高温性要求不断提升，性能相对普通的基板材料难以满足市场需求，氮化铝陶瓷基板行业发展迎来机遇。

● 氮化硼陶瓷：陶瓷材料中的软质陶瓷，机械加工性能好

氮化硼问世于 100 多年前，最早的应用是作为高温润滑剂的六方氮化硼[简称： $h-BN$ ，或 $a-BN$ ，或 $g-BN$ （即石墨型氮化硼）]， $h-BN$ 不仅结构而且其性能也与石墨极为相似，且自身洁白，所以俗称白石墨。氮化硼（BN）陶瓷是早在 1842 年被人发现的化合物。国外对 BN 材料从第二次世界大战后进行了大量的研究工作，直到 1955 年解决了 BN 热压方法后才发展起来的。美国金刚石公司和联合碳公司首先投入了生产，1960 年已生产 10 吨以上。1957 年 R·H·Wentrof 率先试制成功 CBN，1969 年美国通用电气公司以商品 Borazon 销售，1973 年美国宣布制成 CBN 刀具。1975 年日本从美国引进技术也制备了 CBN 刀具。1979 年 Sokolowski 首次成功采用脉冲等离子体技术在低温低压下制备 $c-BN$ 薄膜。20 世纪 90 年代末，人们已能够运用多种物理气相沉积（PVD）和化学气相沉积（CVD）的方法制备 $c-BN$ 薄膜。它有良好的耐热性、热稳定性、导热性、高温介电强度，是理想的散热材料 and 高温绝缘材料。氮化硼的化学稳定性好，能抵抗大部分熔融金属的侵蚀。它也有很好的自润滑性。氮化硼制品的硬度低，可进行机械加工，精度为 1/100mm。

图表 46 氮化硼陶瓷加工性能好

性能	热压 BN		石墨	氧化铝陶瓷	热压氮化铝陶瓷
	平行热压方向	垂直热压方向			
压缩强度/MPa	315	238	35-80	1000-2800	0
弯曲强度/MPa	60-80	40-50	5-25	280-420	900-1200
拉伸强度/MPa	110	50	7-11	150-210	200-400
弹性模量/GPa	84	35	60-100	370	320

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

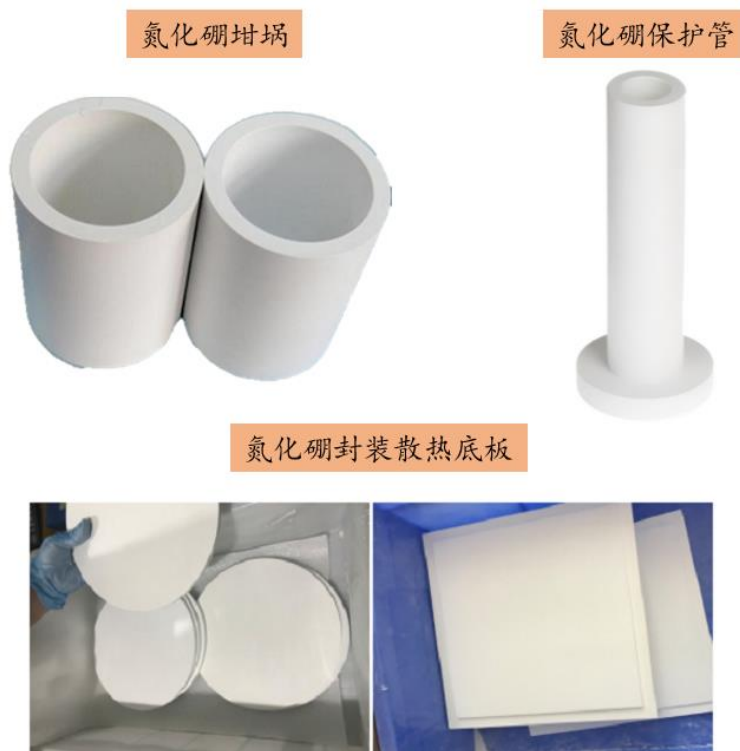
制备端,共价键化合物一般采取添加烧结助剂的办法,BN常用的烧结助剂有 B_2O_3 、 Si_3N_4 、 ZrO_2 、 SiO_2 、 $BaCO_3$ 等。目前氮化硼粉体的制备方法有很多,根据其原理大致可以分为两大类:其中一类是合成法,主要有高温合成法、溶剂热合成法、模板法和化学气相沉积法(CVD)等;而另一类是剥离法,包括液相超声剥离法、激光蚀刻剥离法、机械球磨法等。随着对氮化硼的研究不断深入,一些纳米结构的氮化硼的性质逐渐被发现。一方面纳米粉体比表面能高,烧结活性高,可以有效地促进h-BN陶瓷的致密化;另一方面,以纳米粉体作为原料,可以降低烧结温度,减小陶瓷烧结体晶粒尺寸,提高陶瓷的韧性,增强h-BN陶瓷的力学性能,为h-BN陶瓷工业化大规模应用奠定基础。

图表 47 不同烧结方法制备的氮化硼陶瓷性能

性能指标	高热导型 BN	高强型 BN	高纯型 BN
BN 含量/%	95	97	98.5
密度/ g/cm^3	2.1	2.1	1.9-2.0
弯曲强度/MPa	63	160	40.3
压缩强度/MPa	101	250	61
热膨胀系数(25-700 $^{\circ}C$)/ $10^{-6}/^{\circ}C$	2.7(//)	2.7(//)	2.7(//)
热导率/W/($m \cdot K$)	0.3($\perp$)	0.3($\perp$)	0.3($\perp$)
电阻率/ $\Omega \cdot m$	56.94($\perp$)	56.94($\perp$)	56.94($\perp$)

资料来源:《结构陶瓷》,华安证券研究所

图表 48 氮化硼陶瓷应用



资料来源:华安证券研究所整理

应用端，氮化硼可用于制造熔炼半导体的坩埚及冶金用高温容器、半导体散热绝缘零件、高温轴承、热电偶套管及玻璃成形模具等。通常制得的氮化硼是石墨型结构，俗称为白色石墨。另一种是金刚石型，和石墨转变为金刚石的原理类似，石墨型氮化硼在高温（1800℃）、高压（800Mpa）下可转变为金刚型氮化硼。这种氮化硼中B—N键长（156pm）与金刚石在C—C键长（154pm）相似，密度也和金刚石相近，它的硬度和金刚石不相上下，而耐热性比金刚石好，是新型耐高温的超硬材料，用于制作钻头、磨具和切割工具。

● **赛隆陶瓷：陶瓷材料中的软质陶瓷，机械加工性能好**

赛隆（sialon）是由Si、Al、O、N四种元素的合成词，音译为“赛隆”。赛隆陶瓷是 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-AlN-SiO}_2$ 系列化合物的总称，是在 Si_3N_4 陶瓷基础上开发出的一种Si-N-O-Al致密多晶氮化物陶瓷，由 Al_2O_3 中的Al原子和O原子部分置换 Si_3N_4 中的Si原子和N原子形成。赛隆陶瓷由日本的Oyama和Kamigaito（1971年）及英国的Jack和Wilson（1972年）发现，他们在对氮化硅陶瓷各种添加剂的研究中发现了金属氮化物中的固溶体，即在 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系统中发现了 Si_3N_4 的固溶体，这能有效地促进烧结，从而发现了sialon（赛隆）。赛隆陶瓷的主要类别有 β' -sialon、 α' -sialon、 $0'$ -sialon三种，尤其以前两种最为常见。

图表 49 赛隆陶瓷性能

性能	参数
结晶形态	(Si, Al) (O_3N_4) 4 四面体与硅氧四面体空间联结
理论密度/ g/cm^3	3.05-3.13
抗弯强度/MPa	(四点抗弯) 400-450
显微硬度/GPa	13-15
弹性模量/GPa	200-280
泊松比(20℃)	0.288
热膨胀系数/ 10^{-6}K^{-1}	2.4-3.2 (20-100℃)
热扩散系数(300℃) / cm^2/s	0.0195

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 50 赛隆陶瓷及其他陶瓷性能对比

	烧结赛隆陶瓷	热压氮化硅陶瓷	氧化铝陶瓷	WC-Co 硬质合金
抗弯强度/ MN/m^2	946	896	380	3000
抗压强度/ MN/m^2	>3500	>3500	2750	5000
杨氏模量/ MN/m^2	3×10^5	3.1×10^5	3.6×10^5	6×10^5
断裂韧性/ $\text{MN/m}^{3/2}$	7.7	5	1.75	13
维氏硬度(负荷 0.5kg) / Kg/mm^2	1800	2200	1600	1500
热膨胀系数(0-1000℃) / $^{\circ}\text{C}^{-1}$	3.2×10^{-6}	3.2×10^{-6}	9×10^{-6}	4.9×10^{-6}
导热率(室温) / $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$	20-25	25	8.4	100

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

制备端，在制备赛隆陶瓷时应选择超细、高 α 相的 Si_3N_4 粉末，采用适当的工艺措施控制其晶界相的组成和结构，才能获得性能优异的材料。由于赛隆陶瓷有很宽的固溶范围，可通过调整固溶体的组分比例按预定性能对赛隆陶瓷进行组成设计，

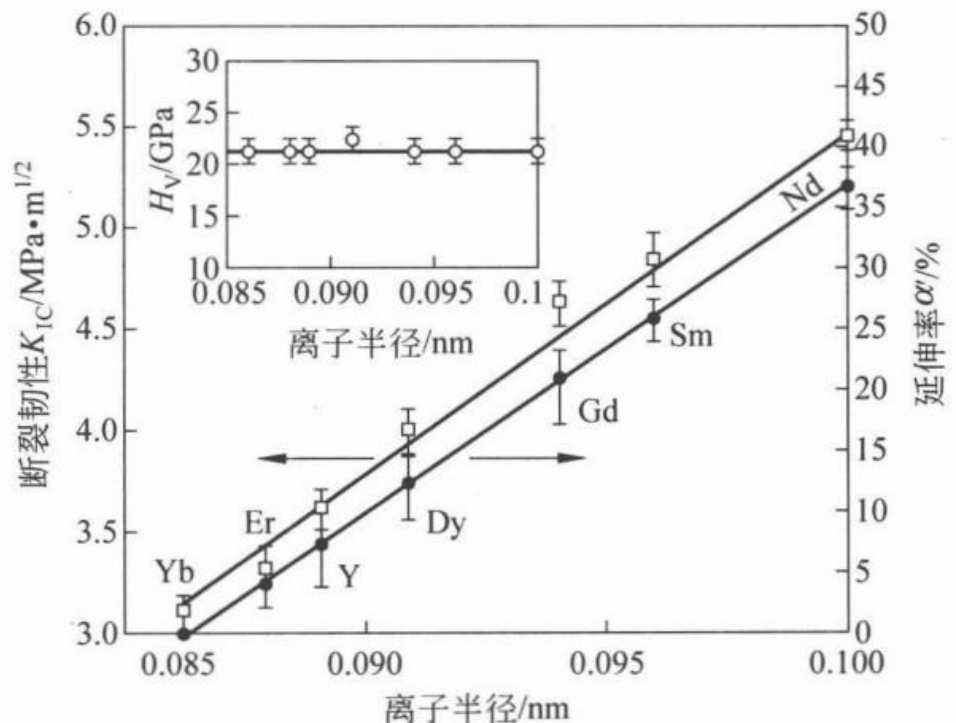
通过添加剂加入量的适当调节可以得到最佳 α -sialon 和 β -sialon 的比例，获得最佳强度和硬度配合的材料。赛隆陶瓷通常采用无压烧结或热压烧结，在 1600-1800°C 的惰性气氛中烧结，可获得接近理论密度的赛隆陶瓷烧结体，主要的添加剂为 MgO 、 Al_2O_3 、 AlN 、 SiO_2 等。同时，添加 Y_2O_3 、 Al_2O_3 能获得强度很高的赛隆陶瓷。此外，加入 Y_2O_3 可降低赛隆陶瓷的烧结温度。常压烧结赛隆陶瓷的制造工艺是将 Si_3N_4 粉与适量的 Al_2O_3 粉及 AlN 粉共同混合，成型之后在 1700°C 的 N_2 气氛中烧结。固溶体的性质随其组成和处理温度而异。

图表 51 不同晶型赛隆陶瓷的物性

	β' -赛隆	α' -赛隆	
		高硬度型	高强度型
密度/ g/cm^3	3.25	3.22	3.22
抗弯强度/ MN/m^2	945	800	1000
杨氏模量/ MN/m^2	3×10^5	3.1×10^5	3.1×10^5
断裂韧性/ $MN/m^{3/2}$	7.7	5.8	6.8
维氏硬度(负荷 0.5kg)	1800	2000	1650
热膨胀系数(0-1000°C) / $^{\circ}C^{-1}$	3.2×10^{-6}	3.2×10^{-6}	3.2×10^{-6}
导热率(室温) / $W/(m \cdot K)$	22	10.9	13.4
抗热震性(在冷水中骤冷) / $^{\circ}C$	900	-	-

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 52 稳定剂离子半径对赛隆陶瓷的性能影响



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

应用端，赛隆陶瓷作为一种性能优异的新型高温结构陶瓷，在军事工业、航空航天工业、机械工业和电子工业等方面都有广阔的应用前景。赛隆陶瓷硬度高、耐

磨性能好，已在机械工业上用于制造轴承、密封件、焊接套筒和定位销及磨损件等。赛隆陶瓷还可以用作连铸用的分流块、热电偶保护套管、晶体生长器、坩埚、高炉下部内衬、铜铝合金管拉拔芯棒，以及滚轧、挤压和压铸用模具材料。赛隆陶瓷还可以用来制作切削工具，其热硬性优于 WC-Co 硬质合金和氧化铝，刀尖温度大于 1000℃ 时仍可进行高速切削。赛隆陶瓷还可制作透明陶瓷（高压钠灯灯管、高温红外测温仪窗口），以及用作生物陶瓷、制作人工关节等。

图表 53 赛隆陶瓷的应用

赛隆陶瓷铣刀



赛隆陶瓷保护管



赛隆陶瓷热机部件



赛隆陶瓷耐火



资料来源：华安证券研究所整理

1.1.3 碳化物陶瓷

碳化物陶瓷以其优良的高温力学性能、高温抗氧化性能、耐蚀耐磨性能和特殊的电、热学等性能而倍受人们的青睐。作为一类新型工程陶瓷材料，碳化物陶瓷展现了极为广阔的应用前景，并由此可能推动一些相关科技的进步，具有重要的研究

价值。然而，碳化物陶瓷的研究进展和应用并不如人们想象的那么顺利，存在的主要问题：一是制造的成本高，二是制品性能的可靠性和重现性差。为了研制具有工业应用价值的高性能和高可靠性产品，必须进一步提高它们的综合性能。从研究结果看，碳化物复相陶瓷或其复合材料比单一材料具有更优异的性能。另外，以超细粉末制备的纳米材料，同样具有很好的应用和研究价值，这些都有可能成为今后碳化物陶瓷发展的主要方向。另外，为了获得组成和结构更均匀的复相陶瓷，已开始了“组成—结构—性能”的计算机辅助设计。

目前，碳化物陶瓷的研究热点是纳米级复合材料合成和高温自蔓延（SHS 法）纳米复相陶瓷。在粉末的制备技术方面，溶胶—凝胶法（Sol—Gel 法）、化学气相法（CVD 法）和高温自蔓延（SHS 法）合成三足鼎立；从低成本和实用化来看，无机溶胶—凝胶法（Sol—Gel 法）和高温自蔓延（SHS 法）合成较为优势；在成形技术方面，胶态分散成形、注浆成形和等静压成形引人注目；在烧结技术方面，除刀具外，一般更倾向于常压烧结或气氛烧结。

图表 54 碳化物陶瓷的基本物理特性

类别	密度 /g/cm ³	熔点/°C	热膨胀系数 /10 ⁻⁶ K ⁻¹	导热率/W/(m·K)	电阻率/Ω·m	弹性模量/GPa	显微硬度/GPa
α-SiC	3.21	2600	4.70	—	—	400-440	—
β-SiC	3.21	2100	4.35	0.418	—	—	25.5
TiC	4.93	3147	7.74	17.10	1.05×10 ⁻⁴	460	30.0
ZrC	6.90	3530	6.74	20.50	70.00×10 ⁻⁶	355	29.3
VC	5.36	2816	4.20	24.70	1.56×10 ⁻⁴	430	20.9
HfC	12.60	3890	5.60	6.27	—	359	29.1
NbC	7.85	3480	6.50	14.20	7.40×10 ⁻⁴	345	24.7
WC	15.55	2720	3.84	31.80	1.20×10 ⁻⁴	710	24.6
TaC	14.30	3877	8.30	22.20	30.00×10 ⁻⁴	291	18.0
B ₄ C	2.51	2450	4.50	8.36-29.30	0.30×10 ⁻⁴	380	28.0

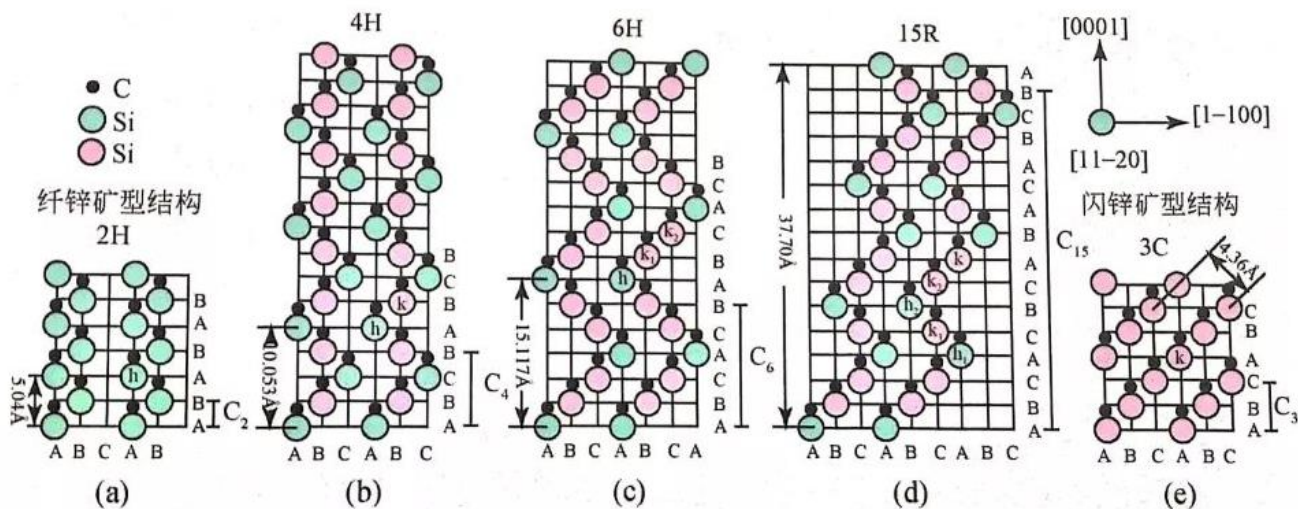
资料来源：CNKI，华安证券研究所

● 碳化硅陶瓷：既古老又新型的陶瓷材料

碳化硅是一种人造材料，只是在人工合成碳化硅之后，才证实陨石中及地壳上偶然存在碳化硅，碳化硅的分子式为 SiC，分子量为 40.07，质量百分组成为 70.045 的硅与 29.955 的碳，碳化硅的理论密度为 3.16-3.2g/cm³。

SiC 是以共价键为主的共价化合物，由于碳和硅两元素在形成 SiC 晶体时，它的基本单元是四面体，所有 SiC 均由 SiC 四面体堆积而成，所不同的只是平行结合和反平行结合，从而形成具有金刚石结构的 SiC。SiC 共有 75 种变体，如 3C-SiC、4H-SiC、15R-SiC 等，其中 α-SiC、β-SiC 最为常见。β-SiC 的晶体结构为立方晶系，Si 和 C 分别组成面心立方晶格；α-SiC 存在着 4H、15R 和 6H 等 100 余种多型体，其中，6H 多型体为工业应用上最为普遍的一种。在 SiC 的多种型体之间存在着一定的热稳定性关系，在温度低于 1600°C 时，SiC 以 β-SiC 形式存在。当高于 1600°C 时，β-SiC 缓慢转变成 α-SiC 的各种多型体。4H-SiC 在 2000°C 左右容易生成；15R 和 6H 多型体均需在 2100°C 以上的高温才易生成；对于 6H-SiC，即使温度超过 2200°C，也是非常稳定的。SiC 中各种多型体之间的自由能相差很小，因此，微量杂质的固溶也会引起多型体之间的热稳定关系变化。

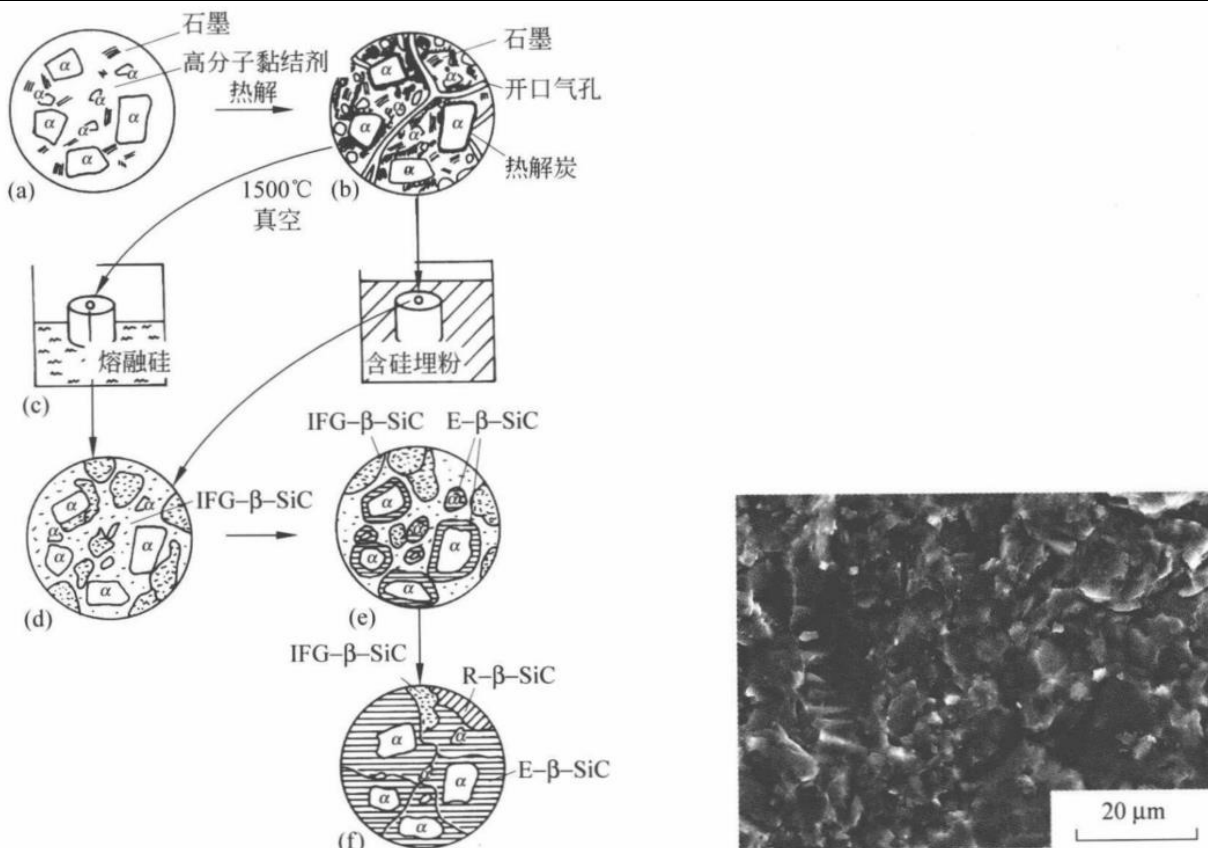
图表 55 碳化硅不同晶型



硅碳双原子层在 2H-SiC(a)、4H-SiC(b)、6H-SiC(c)、15R-SiC(d)、3C-SiC(e) 多型(11-20)面上连接的示意图

资料来源：中关村天合宽禁带联盟，华安证券研究所

图表 56 碳化硅合成路径



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

制备端，在工业生产中，用于合成 SiC 的石英砂和焦炭通常含有 Al 和 Fe 等金属杂质。其中杂质含量少的呈绿色，被称为绿色碳化硅；杂质含量多的呈黑色，被称为黑色碳化硅。一般碳化硅含量愈高、颜色愈浅，高纯碳化硅应无色。SiC 是强共价键结合的化合物，烧结时的扩散速率相当低，即使在 2100 °C 的高温下，C 和 Si 的自扩散系数也仅为 $1.5 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$ 和 $2.5 \times 10^{-13} \text{cm}^2/\text{s}$ 。所以，很难烧结 SiC，必须借助添加剂形成特殊的工艺手段促进烧结。目前制备高温 SiC 陶瓷的方法主要有无压烧结、热压烧结、热等静压烧结、反应烧结等。

常压烧结被认为是 SiC 烧结最有前途的烧结方法，通过常压烧结工艺可以制备出大尺寸和复杂形状的 SiC 陶瓷制品。

图表 57 碳化硅陶瓷与其它高温结构陶瓷的物理性能比较

	SiC 陶瓷	Si ₃ N ₄ 陶瓷	Al ₂ O ₃ 陶瓷	MgO 陶瓷
密度/g/cm ³	3.2	3.16	3.9	3.58
熔点(°C)	2800	1900	2050	2800
硬度	25GPa	9(莫氏)	9(莫氏)	6(莫氏)
导热系数(W/m·K)	33.5-502	12.56(RT)	31.4(RT)	159.1(RT)
热膨胀系数/10 ⁻⁶ /°C	4-5	2.5-3.5	6.8-8	10.0-13.0
弹性模量/GPa	350-700	250-320	310-390	350
抗弯强度/MPa	590	1000	3700	140
介电常数/1MHz	/	9.4	9-10.5	9.1
介电损耗/1MHz(×10 ⁻⁴)	/	/	1-3	1-2

资料来源：CNKI，华安证券研究所

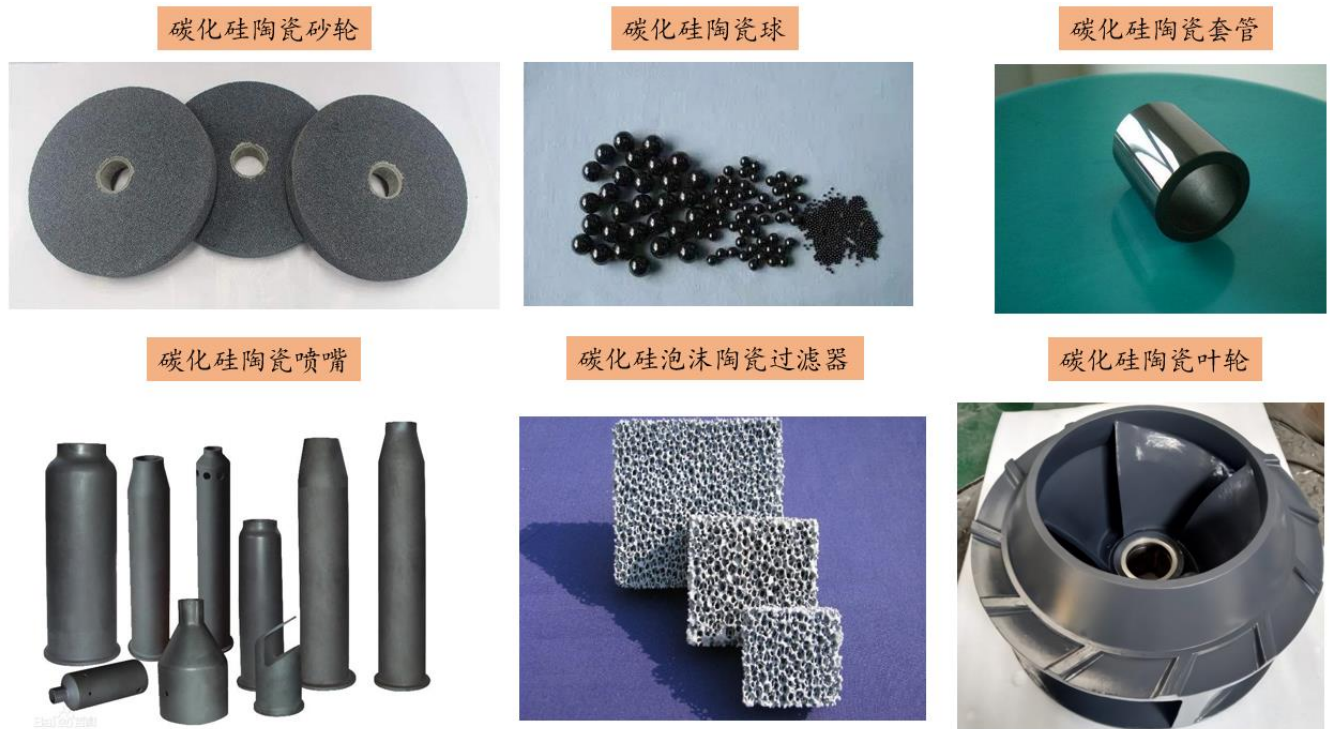
图表 58 碳化硅陶瓷的烧结方法及性能

	无压烧结	热压烧结	热等静压烧结	反应烧结
密度/g/cm ³	3.12	3.21	3.21	3.05
断裂韧性/MPa·m ^{1/2}	3.2	3.2	3.8	3
抗弯强度(20°C)/MPa	410	640	640	380
抗弯强度(1400°C)/MPa	410	650	610	300
弹性模量/GPa	410	450	450	350
热膨胀系数/10 ⁻⁶ K ⁻¹	4.7	4.8	4.7	4.5
导热率(20°C)/W/(m·K)	110	130	220	140
导热率(1400°C)/W/(m·K)	45	45	50	50

资料来源：CNKI，华安证券研究所

应用端，SiC 的最初应用是由于其超硬性能，可制备成各种磨削用的砂轮、砂布、砂纸以及各类磨料，因而广泛应用于机械加工行业。第二次世界大战中又发现它还可以作为炼钢时的还原剂以及加热元件，从而促进了 SiC 的快速发展。SiC 陶瓷在石油、化工、微电子、汽车、航天、航空、造纸、激光、矿业及原子能等工业领域获得了广泛的应用，碳化硅已经广泛应用于高温轴承、防弹板、喷嘴、高温耐蚀部件以及高温和高频范围的电子设备零部件等领域。

图表 59 碳化硅陶瓷的应用

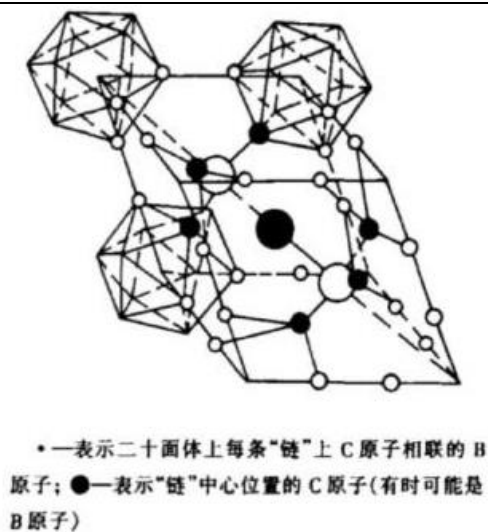


资料来源：华安证券研究所整理

● 碳化硼陶瓷：仅次于金刚石、立方氮化硼的超硬材料

碳化硼(B_4C)是一种重要的工程陶瓷材料,其最突出的优点就是高硬度和低密度:常温下其硬度仅次于金刚石和立方氮化硼,高温下其恒定的硬度($>30GPa$)甚至优于金刚石和立方氮化硼;而密度仅有 $2.52g/cm^3$,远小于 Al_2O_3 , SiC 等其他结构陶瓷。同时,碳化硼陶瓷还具有高模量、良好的耐磨性、优异的中子吸收性能、高熔点($2450^{\circ}C$)、良好的热电性、优越的抗化学侵蚀能力等特点。

图表 60 碳化硼陶瓷晶体结构



资料来源：耐火材料网，华安证券研究所

图表 61 碳化硼物理性能与力学性能

性能	数值
硼含量/%	78.26
碳含量/%	21.74
密度/g/cm ³	2.51
熔点/°C	2447
沸点/°C	3497
热膨胀系数/10 ⁻⁶ /°C	5
热导率(室温) /W/(m·K)	29-67
电阻率(室温) /Ω·cm	0.1-10
中子吸收截面/b	600
显微硬度(Hk100, 室温)/MPa	29000-31000
四点抗弯强度(室温)/MPa	300-500
抗压强度(室温)/MPa	2800
弹性模量(室温)/GPa	450

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

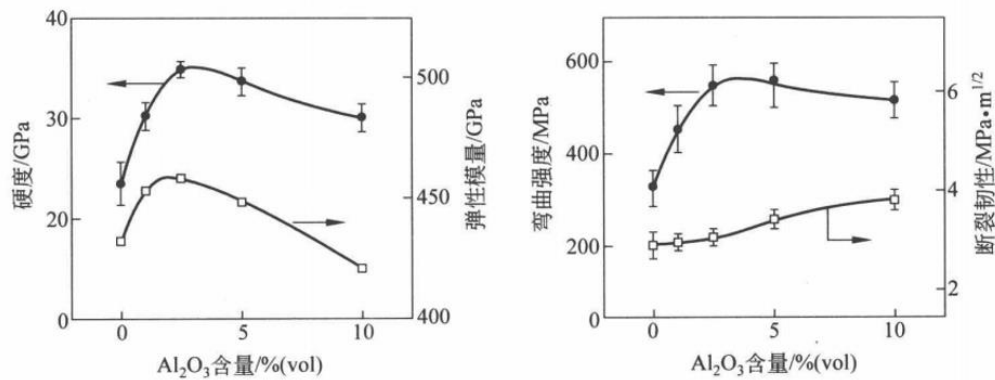
图表 62 国外三家大公司制备的碳化硼陶瓷性能

性能	德国 ESK 公司	法国圣戈班公司(热压 B ₄ C)	美国卡博伦登公司(热压 B ₄ C)
密度/g/cm ³	>2.48	2.52	2.5
平均晶粒尺寸/μm	<15	-	<7
努普硬度 HK0.1/GPa	29	29-35.8	28
弹性模量/GPa	420	450-470	440
韦布尔模数 m	15	-	-
四点弯曲强度/MPa	450	-	425
抗压强度/MPa	>2800	-	2900
泊松比	0.15	-	0.18
断裂韧性/MPa·m ^{1/2}	5	2.9-3.7	3.1
热膨胀系数/10 ⁻⁶ /K	20-500°C	4.5	5
	500-1000°C	7.2	-
热导率(20°C)/W/(m·K)	40	30-42	90

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

制备端，无压烧结碳化硼陶瓷材料是一种大批量生产形状复杂零件的工艺方法，但其对粉末存在过于苛刻的条件，烧结温度高且烧结温度范围窄，因此在大批量生产中工艺参数难以控制，制品的性能也参差不齐。随着陶瓷烧结助剂的进一步研究，无压烧结技术仍将不断改善。热压烧结由于将外界施加的压力与表面能一同作为碳化硼烧结的驱动力，因此具有降低烧结温度的作用，在其基础上利用惰性气体施加压力的热等静压烧结应运而生，解决了其无法显著降低烧结温度以及难以制作复杂零件的痛点。液相烧结作为较新的致密化烧结技术，使得碳化硼的相对密度甚至达到 100%，但是其内在机理的研究仍亟待进行。

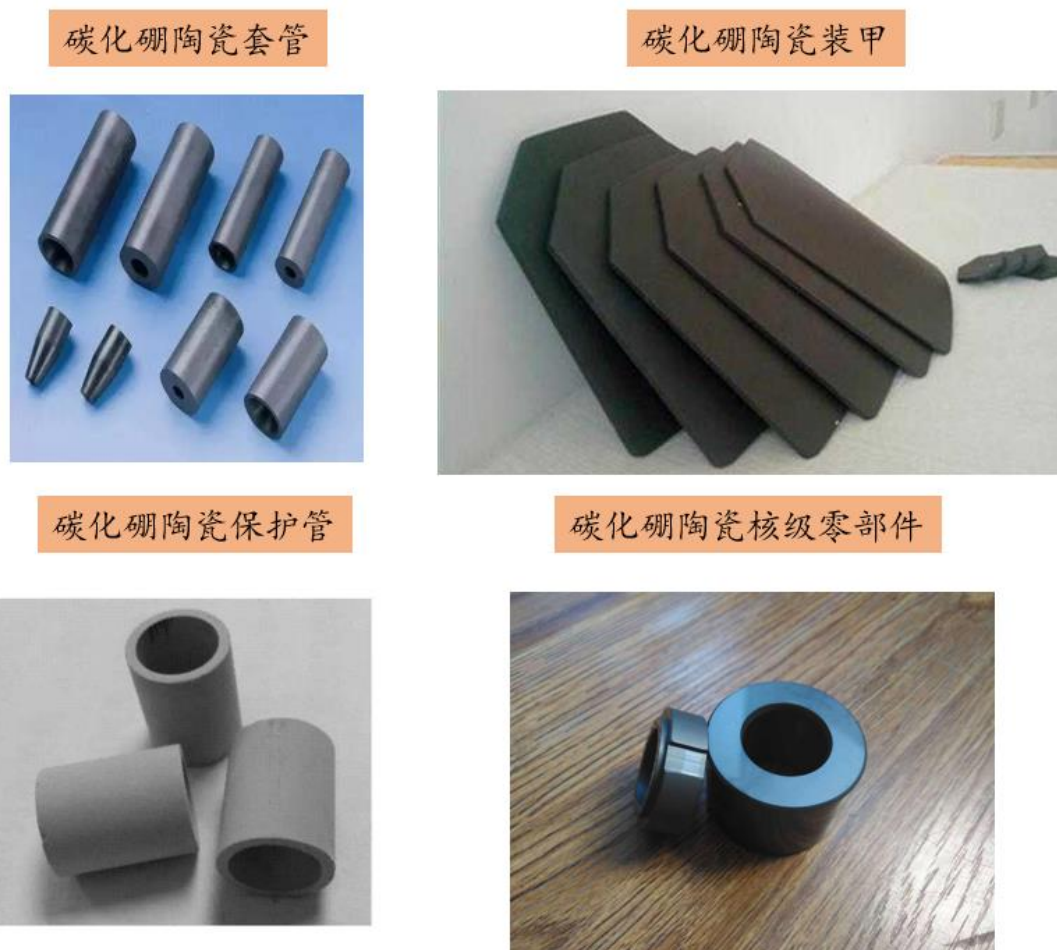
图表 63 氧化铝添加剂对碳化硼陶瓷的性能影响



烧结助剂	相对密度/%	硬度/GPa	弹性模量/GPa	弯曲强度/MPa	断裂韧性/MPa·m ^{1/2}
Al ₂ O ₃	>99.0	35	460	550	3.8
ZrO ₂	>99.0	33	440	570	4.1

资料来源：华安证券研究所整理

图表 64 碳化硼陶瓷应用



资料来源：华安证券研究所整理

应用端，碳化硼陶瓷具有优秀的性能，而且随着烧结技术的不断发展，其性能还在不断提升，性能越来越突出，当前碳化硼陶瓷在高温、高速、强腐蚀介质等条件下具有重要应用，已经被广泛的应用于国防、核能、耐磨技术和温差电偶等诸多领域，具有较高的应用价值。但是当前碳化硼陶瓷还存在成本较高、烧结温度高、断裂韧性低和对金属稳定性差等方面的问题，这些问题制约了碳化硼陶瓷的进一步应用，因此对碳化硼陶瓷的结构和性能进行调控，改进烧结技术，对其结构性提高其性能的同时，降低成本，对扩大其应用范围非常重要。

1.1.4 低膨胀陶瓷

陶瓷材料有不一样的膨胀特性，根据材料热膨胀系数的大小，可将陶瓷材料分为三类，分别是低膨胀类、中膨胀类和高膨胀类：高膨胀类热膨胀系数 $>8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的 BeO 、 Al_2O_3 、 MgO 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、稳定 ZrO_2 等；中膨胀类热膨胀系数 $=2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \sim 8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的 SiC 、 SnO_2 、 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 ZrSiO_4 等；低膨胀类热膨胀系数 $<2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的 $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$ 、 $2\text{ZrO}_2 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 、 Nb_2O_5 等。

● 堇青石陶瓷：仅次于金刚石、立方氮化硼的超硬材料

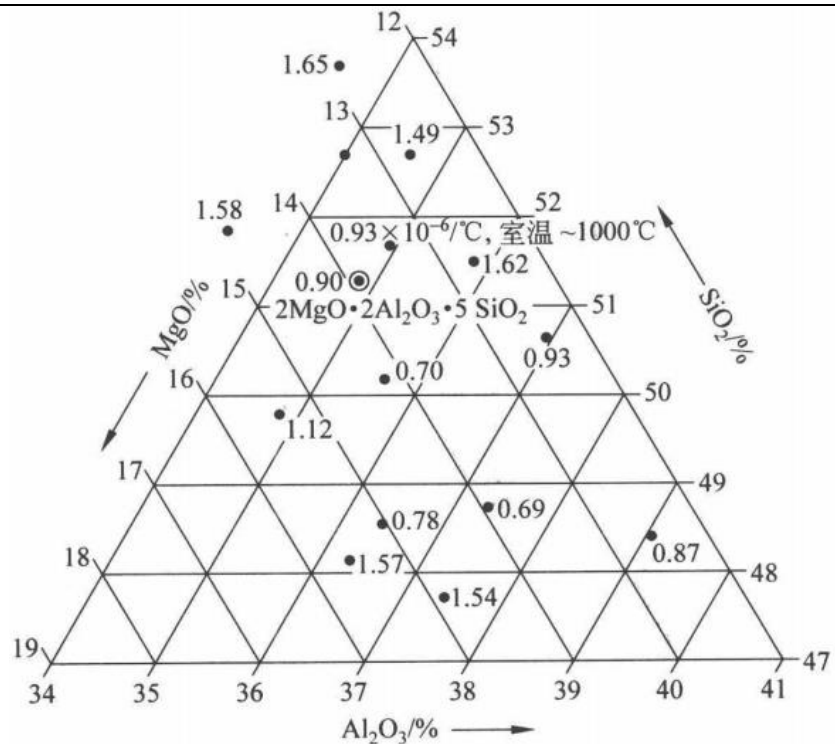
堇青石的化学式为 $2\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ (MgO 13.7wt%， Al_2O_3 34.9wt%， SiO_2 51.4wt%)，其熔点为 1460°C 。堇青石材料具有低膨胀特性（热膨胀系数为 $210^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 左右）和低介电性能，还具有良好的耐高温性、化学稳定性等，因此被广泛应用在耐火材料、火焰喷嘴、热交换器和耐热瓷等高温领域。工业上所使用的堇青石大多为人工合成。

图表 65 堇青石陶瓷的性能对比

材料名称	氧化铝	氧化铍	氧化镁	莫来石	块滑石	镁橄榄石	锆英石	堇青石
主成分	Al_2O_3 98%	BeO	MgO	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	$\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	$2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$	$2\text{MgO}_2 \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$
密度 (g/cm^3)	3.75	2.8	3.56	3.1	2.7	2.3	3.7	2.2
抗压强度 (MPa)	2500	1500	840	/	560	560	630	350
弯曲强度 (MPa)	350	175	140	180	126	140	160	100
弹性模量 ($\times 10^6$)	3.1	3	3.5	1	9	/	1.7	/
热膨胀系数 (25– 300°C) $/10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	6.7	6.3	10	4	6.9	1	4.3	2.2
热膨胀系数 (25– 700°C) $/10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	7.7	8.4	13	4.4	7.3	12	4.8	2.8
热导率 (25°C) [W/ ($\text{m} \cdot \text{K}$)]	0.052	0.38	0.1	0.01	0.006	0.008	0.012	0.003
热导率 (300°C) [W/ ($\text{m} \cdot \text{K}$)]	0.03	0.2	0.038					
Te 值 ($^{\circ}\text{C}$)	1000	7100	71000	650	740	71000	780	485
介电常数 1MHz	9	6.5	8.9	6.5	6	6	8.8	5.3
介电损耗 $\tan \delta$ (1MHz)	0.0003	0.0001	0.0001	0.004	0.0004	0.0005	0.001	0.005

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

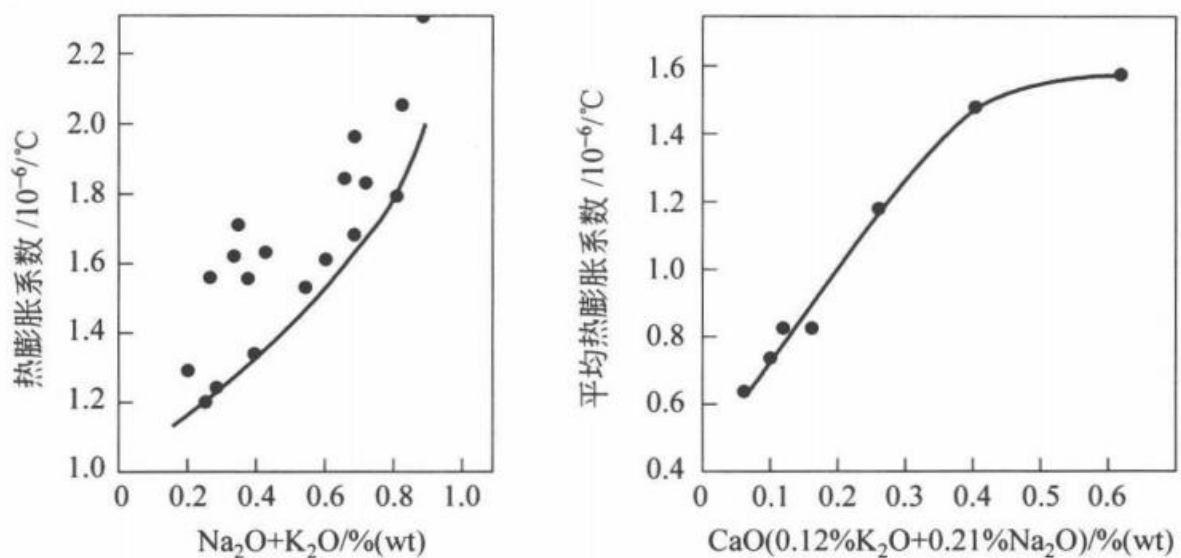
图表 66 标堇青石成分对热膨胀系数有重要影响



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

为了满足各种实际需求，人们通过各种途径合成堇青石。应用最广泛的是固相合成法，此外还有玻璃反玻化法、溶胶-凝胶法、水解-沉淀法。通过这些方法均可以制备出符合实际应用的堇青石相关产品，并不断从实际生产与应用中改善工艺、降低成本、提高产量、开发新产品，以满足堇青石的市场需求。

图表 67 杂质含量对堇青石陶瓷的热膨胀系数的影响



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 68 康宁公司超低热膨胀系数堇青石配方及性能

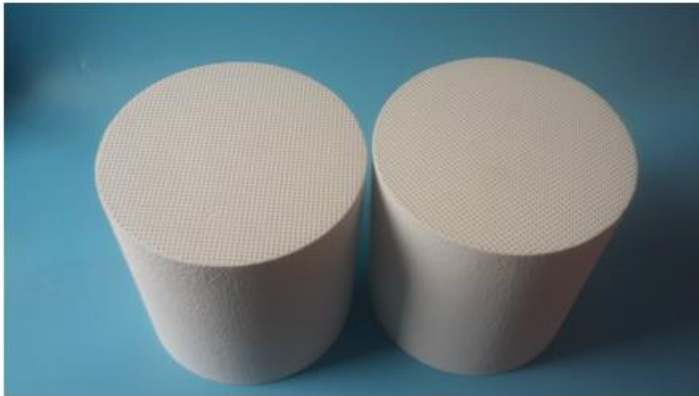
		1	3	5	7	8*	9*	11*	13*
原料	滑石 1#	/	/	/	/	40.78	40.86	/	/
	滑石 2#	/	41.92	39.88	40.13	/	/	/	/
	滑石 3#	42.29	/	/	/	/	/	/	41.14
	煅烧粘土	/	/	/	15.71	26.48	32.6	/	/
	生粘土	/	/	/	9.12	15.37	12.82	/	19.46
	煅烧 MgO	/	/	/	/	/	/	13.7	/
	粗晶 α -Al ₂ O ₃	/	/	/	/	15.35	/	/	/
	细晶 α -Al ₂ O ₃	34.2	28.94	/	/	/	13.72	34.9	25.57
	Al(OH) ₃	/	37.94	/	/	/	/	/	/
	SiO ₂ (1#)	23.52	23.31	16.6	/	2.03	/	51.4	13.83
	SiO ₂ (2#)	/	/	5.55	/	/	/	/	/
氧化物百分比	SiO ₂	51.35	51.5	52.41	52.07	51.45	51.42	51.4	51.36
	Al ₂ O ₃	34.9	34.7	33.54	33.99	35	35.05	34.9	34.89
	MgO	13.76	13.8	14.05	13.95	13.55	13.53	13.7	13.76
有机黏结剂系统	甲基纤维素	4	4	4	4	4	4	2.73	4
	硬脂酸	1	1	1	1	1	1	0.6	1
	水	28	32	38	40	30	30	23	29
堇青石陶瓷性能	热膨胀系数(10 ⁻⁶ /°C)	0.15	0	-0.05	0.19	0.63	0.42	0.55	0.35
	开口孔隙率/%	33	33.6	19.8	14.3	36	28.5	29.6	34.1
	平均孔径	2.2	2.4	2.7	2.5	3.3	3.1	2.6	2.2
	断裂强度(psi)	2900	/	/	4000	2500	3300	2900	3300

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

堇青石具有较低的热膨胀系数，是优良的高温抗热震材料，被广泛用作陶瓷窑棚板、匣钵、电子封装材料、催化剂载体、泡沫陶瓷、生物陶瓷和高温热辐射材料等。由于堇青石的低热膨胀性，可以大大延长匣钵(陶瓷烧成的封装材料)的寿命，因此，堇青石最初用于匣钵。随后又用于隧道窑的棚板和支架材料，从而可以使生产周期大大缩短。轻质堇青石材料，导热系数低，使用温度高而直接用在火焰上面，达到高效节能的效果。此外，堇青石陶瓷可应用于汽车尾气净化方面，作为催化剂载体。由于堇青石具有较低的膨胀系数和良好吸附性等特点，堇青石制成的催化剂载体可使催化剂更好地吸附和分散到载体上，而且由于其热导率较低，可以使催化剂能快速地达到活化温度，使用效果较佳。

图表 69 堇青石陶瓷应用

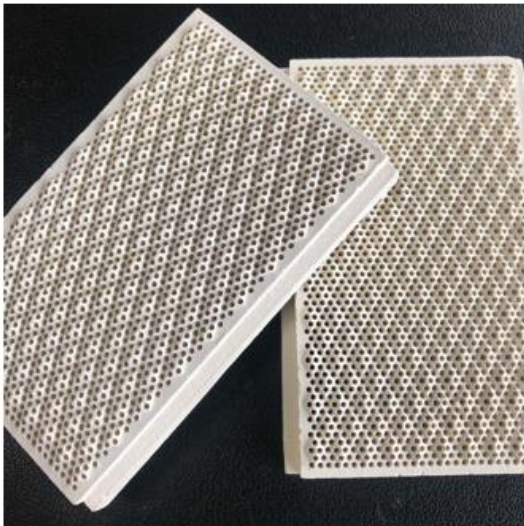
堇青石蜂窝陶瓷



堇青石多孔泡沫陶瓷



堇青石陶瓷蓄热体



堇青石陶瓷棚板



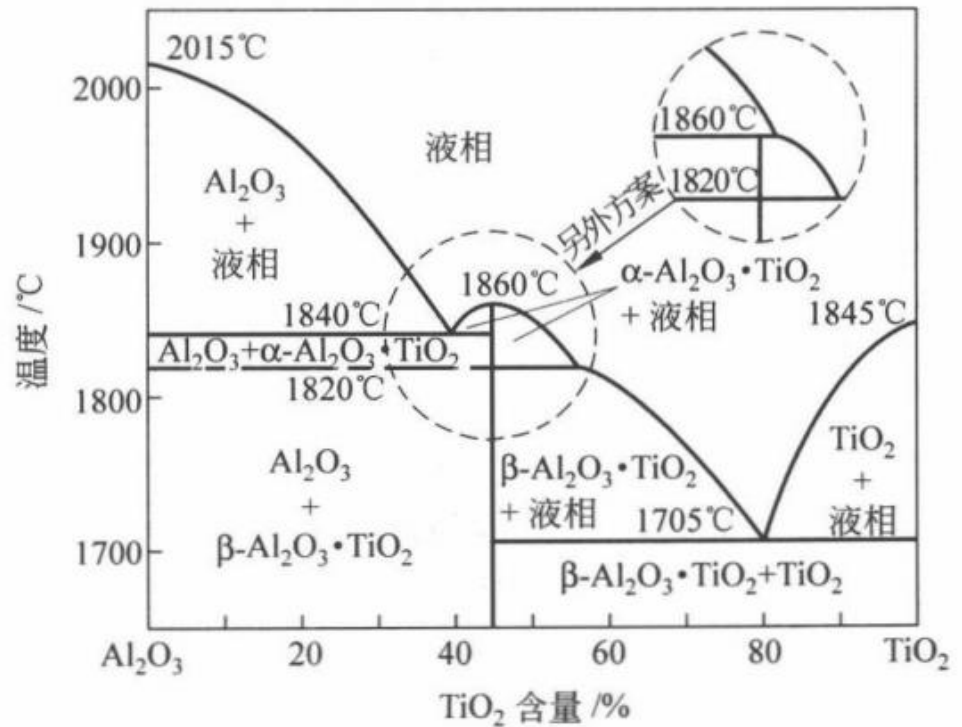
资料来源：华安证券研究所整理

● 钛酸铝陶瓷：兼具高熔点及热膨胀系数的陶瓷材料

钛酸铝陶瓷是一种集高熔点（ $1860 \pm 10^\circ\text{C}$ ）和低热膨胀系数（ $0 \sim 1.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ， $\text{RT} \sim 1000^\circ\text{C}$ ）于一身的优异材料，因此它具有极其优良的抗热震稳定性，耐火度高、隔热性能好，并且它还耐腐蚀、耐碱、抗渣，广泛应用于钢铁、化工、陶瓷等许多工业领域。但该材料也存在着两大致命弱点：一是在 $750 \sim 1300^\circ\text{C}$ 温度区间易分解成金红石和刚玉相，失去其优良的低膨胀性能，限制了其应用；二是晶体冷却时内部会产生大量微裂纹，造成机械强度低的缺陷。

钛酸铝为假板钛矿结构族化合物，属正交晶系，其晶体在不同方向上的热膨胀系数显著不同，因此在烧成冷却后，由于内部应力过大，在内部产生大量的微裂纹。在钛酸铝晶体结构中，每个铝离子和钛离子被形成八面体的六个氧原子所包围而位于八面体的中心，这些 TiO_6 或 AlO_6 在 a 轴、 b 轴方向上，以共用边相连。在 c 轴方向上，3 个八面体的顶点连接起来形成连续的链，各链条在空间无限延伸，相互交叉联结，形成空间网状结构，这在宏观上表现出较低的热膨胀系数，但同时也使烧结体的强度大大降低。

图表 70 钛酸铝理论组成为 56.1%的氧化铝及 43.9%的氧化钛



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

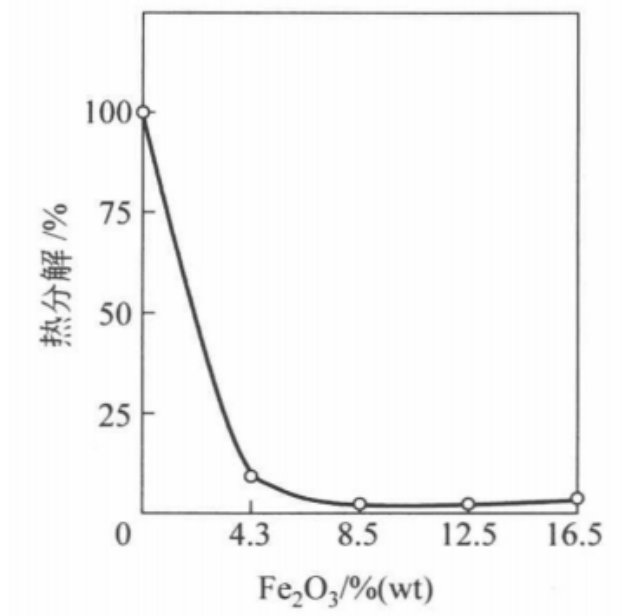
图表 71 国外工业用钛酸铝陶瓷相关参数

	美国 BLASCH	英国 MORGAN
密度/g/cm ³	3.0-3.4	3.2-3.4
断裂强度/MPa	30	>25
弹性模量/GPa	20	-
热膨胀系数/10 ⁻⁶ /K	0-1 (20-600°C); 1-2 (600-1000°C)	<2 (20-1000°C)
热导率/W/(m·K)	<2	1.8
最高使用温度/°C	1000	900
抗热震性/°C	优异	>700
抗熔融金属腐蚀性	优良	优良

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

制备端，粉体的合成方法可以归纳为固相法、金属或者金属醇盐水解物的液相法和化学气相法。但由于钛酸铝材料的特点，为了对钛酸铝改性抑制它的热分解，改善热稳定性和降低它的各向异性，减少微裂纹，改善其机械性能，烧结过程通常引入添加剂。国内外钛酸铝改性用到的添加剂有 Li₂O、B₂O₃、Cr₂O₃、La₂O₃、CeO₂、SiC、Si₃N₄、SiO₂、MgO、F₂O₃、ZrO₂ 以及 FeTiO₃+Fe₂O₃ 等。

图表 72 氧化铁添加剂加入量对钛酸铝陶瓷热解的抑制作用



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 73 钛酸铝陶瓷的应用

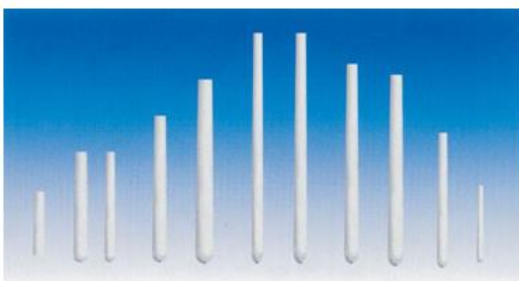
钛酸铝陶瓷升液管



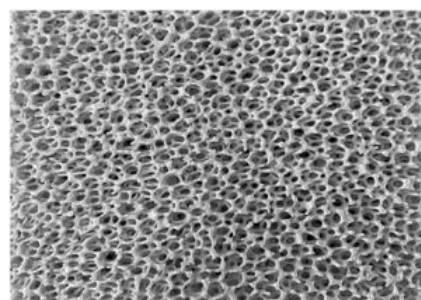
钛酸铝陶瓷铸造内衬管



钛酸铝陶瓷电偶管



钛酸铝多孔陶瓷



资料来源：华安证券研究所整理

应用端，钛酸铝陶瓷具有较高的熔点($1860^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$)、较低的热膨胀系数($\text{RT} \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 、 $\alpha < 2.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)，且具有极其优良的抗热震稳定性 $\Delta T \geq 1250^{\circ}\text{C}$ ；另外，还具

有抗渣、耐蚀、耐碱与许多金属熔体及玻璃熔液不润湿的特性。所以, 钛酸铝陶瓷可作为功能陶瓷及高级耐火材料广泛应用于耐高温、抗热震、耐腐蚀等条件苛刻的环境中。钛酸铝陶瓷及其耐火材料的应用范围比较广泛, 如有色金属冶炼用熔液流槽、坩埚、测温保护管、过滤器, 熔融有色金属容器内壁涂料及其不定形耐火材料衬里, 汽车尾气净化处理用蜂窝状催化剂载体, 铝铸轧净化气用转子、升液管等。

● 石英陶瓷: 玻璃相为主的陶瓷材料

熔融石英陶瓷也称作石英陶瓷, 最早由美国 Georgia 理工学院在 20 世纪 60 年代研制成功并于 1963 年实现产业化, 是一种以熔融石英或者石英玻璃为原料, 经过粉碎、成型、烧结等工艺而制成的烧结体。熔融石英陶瓷具有热稳定性好、热膨胀系数小、介电常数低、耐酸碱腐蚀性好、电绝缘性好、成本低等一系列优异性质。

图表 74 国内外石英陶瓷的相关性能

	美国	法国	日本	中国
含量/(wt)	99.86	>99.5	99.7	>99.5
方石英含量/(wt)	微量	≤2	微量	≤2
体积密度/g/cm ³	1.92-1.94	1.9	1.94-1.96	1.9-1.99
显气孔率/%	10-12	13	8-11	7-13
常温耐压强度/MPa	56.5	-	60-120	≥60
常温抗弯强度/MPa	24.2	20	10-20	>25
热膨胀系数(25-700℃)/10 ⁻⁶ /℃	0.7	0.6	0.4	<0.6
热导率(500℃)[W/(m·K)]	0.84	0.59	0.58	0.65

资料来源:《结构陶瓷》, 华安证券研究所

图表 75 不同温度和烧结条件下浇注熔融石英陶瓷的性能

最高烧结温度/℃	保温时间/h	密度/g/cm ³	气孔率/%	抗弯强度/MPa	弹性模量/GPa	热膨胀系数(20-900℃)/10 ⁻⁶ /℃	介电常数	热导率(20-900℃)/W/(m·K)
1150	2	1.93	12.7	7	8	0.56	3.31	0.47
1200	2	1.98	10.4	45.7	29	0.53	3.4	0.67
1250	2	2	9.5	51	32	0.52	3.41	1.02
1150	3	1.94	12.2	9.3	12.5	0.55	3.33	0.56
1200	3	1.97	10.9	49.6	31	0.58	3.38	1.06
1250	3	2.02	8.6	63.8	46	0.54	3.47	1.14

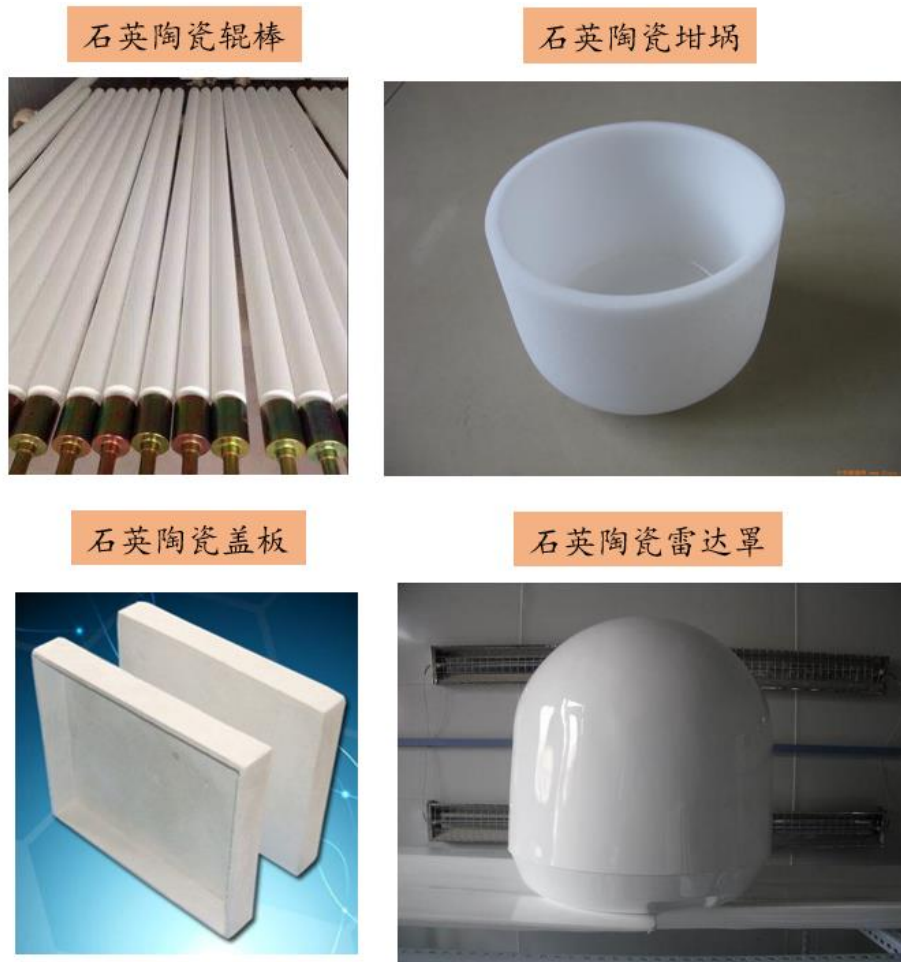
资料来源:《结构陶瓷》, 华安证券研究所

制备端, 在国内外石英陶瓷的生产中, 一般普遍采用注浆成型工艺, 也有离心浇注成型、蜡浇注成型、等静压成型、捣打成型等工艺。然而采用上述工艺制备的制品中普遍存在着显微结构不均匀、难以制作形状复杂的制品、生产周期长、成本高、效率低等缺点。例如采用压制成型的石英陶瓷坯体存在强度不高、易破碎开裂、烧成后的坯体变形大、致密度低等不足, 难以适应大批量工业化生产的需要。目前石英陶瓷比较成熟的成型工艺为振动压力注浆成型工艺和凝胶注模成型工艺。烧结方面, 石英陶瓷普遍采用常压烧结, 即在常压下, 石英陶瓷坯体在高温的作用下通过介质扩散形成致密体。石英陶瓷在烧结过程中关键要注意防止石英原料的非晶态遭到破坏。例如当石英陶瓷采用振动压力注浆成型或凝胶注模成型工艺时, 一般来说在低温

阶段要缓慢升温,这样有利于硅胶的脱水及坯体中有机物的排除。而在高温阶段应当快速升温,并在烧结完成后进行快速冷却,以避免形成晶态方石英。此外,由于石英陶瓷的烧结温度不能过高,所以在烧结过程中石英陶瓷收缩不到 5%,通常存在 10% 左右的气孔率,因此石英陶瓷存在密度低和强度差的问题,而引入少量的添加剂是改善石英陶瓷的烧结性能、提高其密度和强度的常用方法。

应用端,石英陶瓷有着其它陶瓷制品诸多无法比拟的特性,因此具有广阔的应用前景,是一种极具发展潜力的陶瓷材料。美国、法国、德国、日本等对熔融石英陶瓷研究较早,在石英陶瓷生产和应用方面仍居世界领先水平。目前石英陶瓷主要作为耐火材料及中等温度下的能抗拒温度剧变的结构材料使用,并可根据使用条件的不同,生产出具有不同性能特点的石英陶瓷制品,既有高致密度、高强度的结构材料制品,也有低密度、高气孔的隔热保温制品及泡沫石英制品。

图表 76 石英陶瓷的应用

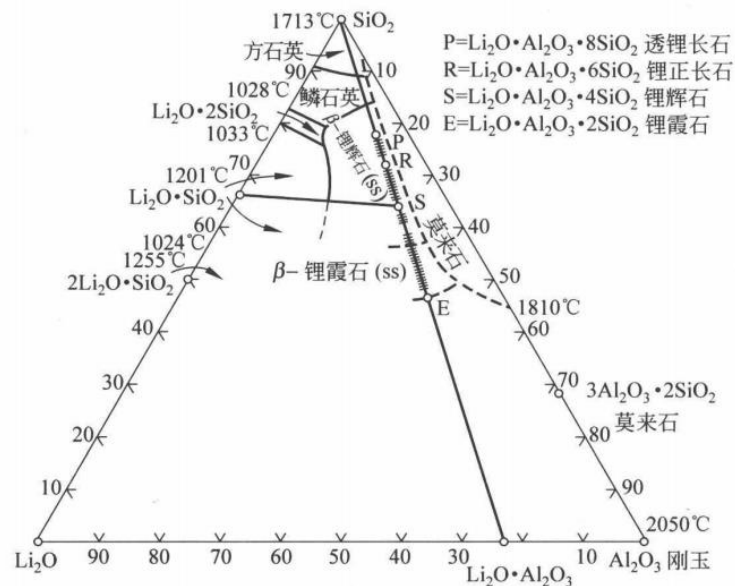


资料来源：华安证券研究所整理

● **锂质陶瓷：无膨胀和低膨胀的陶瓷材料**

锂辉石的化学组成 $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$, 其中 LiO_2 的理论含量为 8.03%。熔点 1420°C , 有 α 和 β 两种晶型。锂辉石的化学组成较稳定, 常有少量 Fe^{3+} 、 Mn 代替 6 次配位的 Al , Na 代替 Li 。可含有稀有元素、稀土元素和 Cs 的混入物。以及 Ga 、 Cr 、 V 、 Co 、 Ni 、 Cu 、 Sn 等微量元素, 部分溶于 HCl 、 H_2SO_4 及 HNO_3 中, 抗腐蚀性强。

图表 77 锂质陶瓷类型



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

制备端，锂质低膨胀陶瓷可以是单一的 β -锂辉石固溶体或者透锂长石固溶体为晶相，也可以是 β -锂辉石或者透锂长石与其他晶相构成的多项材料，通常根据相图，以锂辉石（或者碳酸锂）、高岭土（或黏土）、石英为原料进行配料，成型后于高温下固熔烧结，使其生成 β -锂辉石固溶体。

图表 78 锂辉石低膨胀陶瓷的配方与材料性能

锂辉石/%	高岭土/%	石英/%	烧成温度/°C	烧成收缩/%	热膨胀系数(0-800°C) / $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
80	20	0	1320	—	0.96
80	10	10	1320	—	0.628
70	20	10	1320	5.16	0.503
60	30	10	1320	6.38	1.109
60	20	20	1300	7.37	0.481
50	30	20	1300	8.42	1.184

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

应用端，在抗热震陶瓷材料体系中，锂质陶瓷材料因 β -锂辉石具有独特的螺旋链状结构、稳定的结构、极低的膨胀系数，广泛应用于窑具、感应加热部件、耐热微晶陶瓷面板、高温夹具、内燃机部件以及要求尺寸很稳定的高精度电子元部件等使用环境严苛的众多领域。

1.2 功能陶瓷：现代科学技术先行领域的关键材料

功能陶瓷是利用光、热、力、声、磁、电等直接效应及耦合效应的一种先进材料。

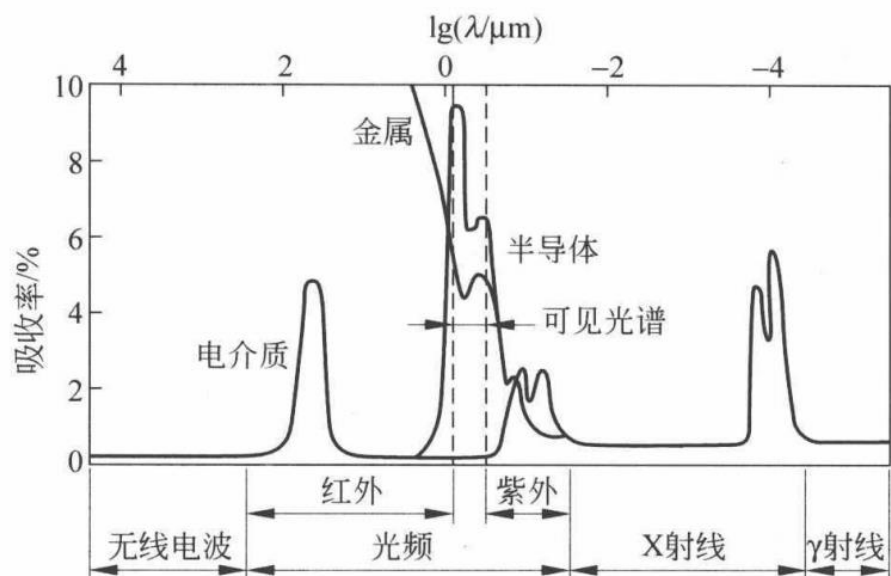
功能陶瓷经历了电介质陶瓷、压电铁电陶瓷、半导体陶瓷、高温超导陶瓷等一系列的过程，目前在微电子技术、电子技术、激光技术、自动化技术、光电子技术、通信、环保、能源和生物医药等领域得到广泛应用，成为推动我国科技发展的重要功能性材料。当前功能陶瓷正朝着智能化、小型化、复合化、多功能化和材料、设计、工艺一体化的方向进一步的发展。

图表 79 陶瓷材料及其他材料室温电阻率对比

材料类别		电阻率/ $\Omega \cdot m$
金属材料	铜	1.7×10^{-6}
	铁	10×10^{-6}
	钨	5.5×10^{-6}
半导体材料	SiC	10
	B ₄ C	0.5
	Ge	40
高分子材料	酚醛树脂	10^{12}
	尼龙	10^{14}
	特氟隆	10^{16}
	聚苯乙烯	10^{18}
陶瓷材料	氧化锆瓷	10^9
	尖晶石瓷	10^{14}
	氧化铝瓷	10^{16}
	氧化铍瓷	$> 10^{16}$

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 80 电介质材料（包括介电陶瓷）具有透明性



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

小型化、低损耗化、复合化、多功能化、智能化将是未来新型功能陶瓷材料的发展趋势。由于电子产品有向轻、薄、小发展的趋势，这就要求材料、损耗必须越来越

小，当材料尺寸达到纳米级，表面、量子效应会显著加强，会产生独特的光、热、电等特性，从而使材料产生一些新的功能。随着科技的发展，对材料的功能也要求越来越高，单一材料往往难以满足，可以通过离子掺杂、材料复合等手段开发出综合的功能材料。智能材料是功能陶瓷发展的更高阶段，它是人类社会的需求和现代科学技术发展的必然结果。

1.2.1 电介质陶瓷

电介质陶瓷即是指电阻率大于 $10^8 \Omega \cdot m$ 的陶瓷材料，能够承受较强的电场而不被击穿。在静电场或者交变电场中使用，通常用体积电阻率、介电常数和介电损耗等参数来对其性能进行评价。根据参数的不同，可分为电绝缘陶瓷和电容器介质陶瓷等两大类。

图表 81 陶瓷材料极化形式

极化类型	具有此种极化的介质	发生极化的频率范围	影响因素	能量损耗
电子位移极化	一切陶瓷介质中	从直流到光频	无关	没有
离子位移极化	离子组成的陶瓷介质中	从直流到红外线	温度升高极化增强	很微弱
离子松弛极化	离子组成的陶瓷介质中、结构不紧密的晶体及陶瓷中	从直流到超高频	随温度变化有极大值	有
电子松弛极化	钛质瓷及高价金属氧化物基础的陶瓷中	从直流到超高频	随温度变化有极大值	有
自发极化	温度低于居里点的铁电材料	从直流到超高频	随温度变化有显著极大值	很大
界面极化	结构不均匀的陶瓷介质	从直流到音频	随温度变化而减弱	有
谐振式极化	一切瓷介质中	光频	无关	很大
极性分子弹性联系转向极化/极性分子松弛转向极化	有机材料中	从直流到超高频	随温度变化有极大值	有

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

- **电绝缘陶瓷**：在电子设备中作为安装、固定、支撑、保护、绝缘、隔离及链接各种无线电子元件及器件的陶瓷材料

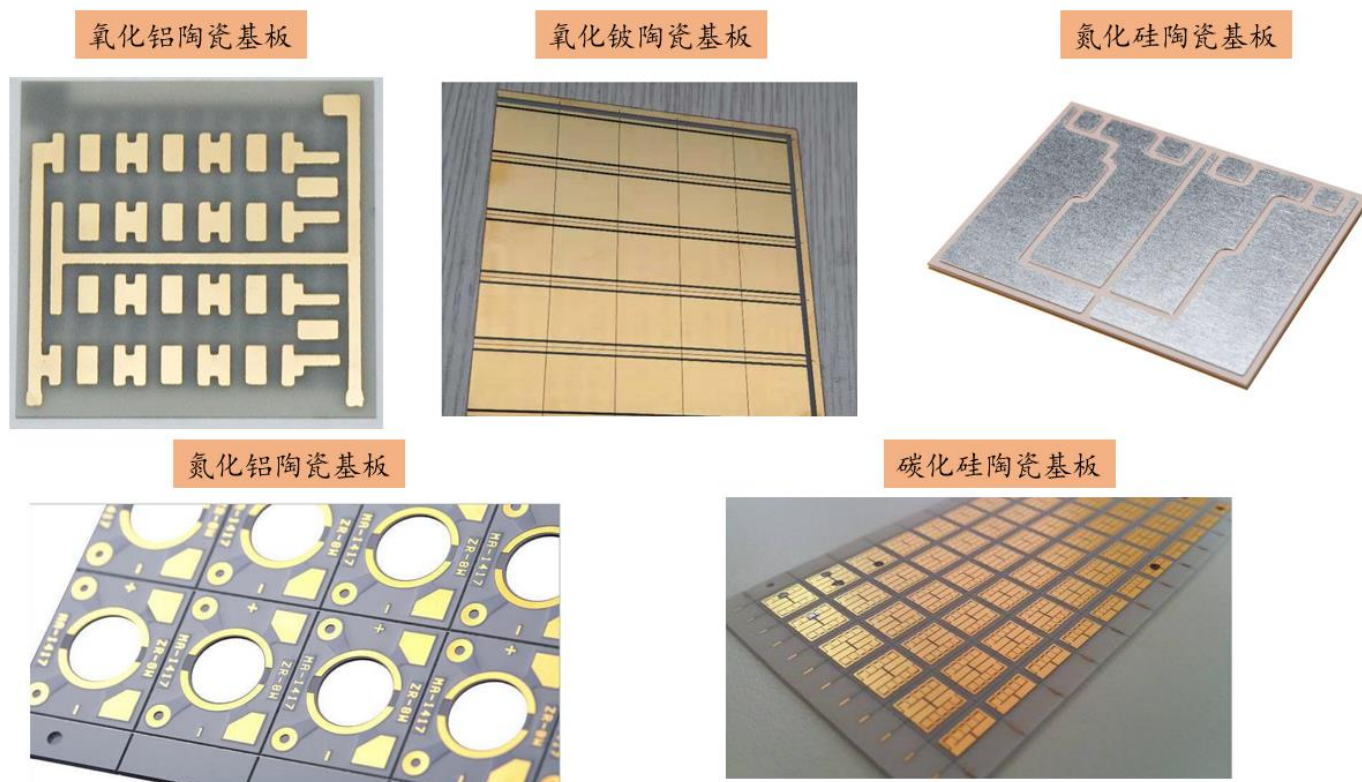
电绝缘陶瓷也称之为绝缘装置瓷，具有优良的电绝缘性能，用于电子设备和器件中的结构件、基片和外壳等的电子陶瓷。绝缘装置瓷件包括各种绝缘子、线圈骨架、电子管座、波段开关、电容器支柱支架、集成电路基片和封装外壳等。

图表 82 电绝缘陶瓷材料的种类

类别	陶瓷种类
氧化物系	氧化铝、氧化镁
非氧化物系	氮化物陶瓷
多元系统	$BaO-Al_2O_3-SiO_2$ 、 $Al_2O_3-SiO_2$ 、 $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ 、 $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ 等

资料来源：《功能陶瓷材料及制备工艺》，华安证券研究所

图表 83 电绝缘陶瓷材料的应用



资料来源：华安证券研究所整理

● 瓷介电容器陶瓷：电子设备中不可缺少的零部件

陶瓷电容器是目前飞速发展的电子技术的基础之一，今后随着集成电路、大规模集成电路的发展，陶瓷电容器将迎来繁荣发展。陶瓷电容器的用途可以分为低频高介电容器瓷、高频热补偿电容器瓷，高频热稳定电容器瓷和高压电容器瓷等，按照结构及机理可分为单层和多层（即独石电容器）以及内边界电容器，按照电容器的材料性质则可分为非铁电电容器陶瓷、铁电电容器陶瓷、反铁电电容器陶瓷及半导体电容器陶瓷。1970 年，随着混合 IC、计算机、以及便携电子设备的进步，陶瓷介质电容器也随之迅速的发展起来，成为电子设备中不可缺少的零部件。现在的陶瓷介质电容器的全部数量约占电容器市场的 70% 左右。

电容器陶瓷的主要应用领域是无源电子元件。MLCC 是目前用量最大的无源元件之一，主要用于各类电子整机中的振荡、耦合、滤波旁路电路中，其应用领域涉及自动仪表、数字家电、汽车电器、通信、计算机等行业。MLCC 的主流发展趋势是小型化、大容量、薄层化、贱金属化、高可靠性，其中内电极贱金属化相关技术在近年来发展最为迅速，采用贱金属内电极是降低 MLCC 成本的最有效途径，而实现贱金属化的关键技术是发展高性能抗还原钛酸钡瓷料。未来的发展趋势是制备出颗粒尺寸 $\leq 150 \text{ nm}$ 的钛酸钡材料作为 MLCC 介质层的主晶相材料。

图表 84 电容器介电陶瓷种类

类别	特性	别名	陶瓷种类	应用领域
非铁电电容器陶瓷	高频下介电常数为 12-900	温度补偿电容器陶瓷	金刚石瓷、钛酸钙瓷	补偿回路及元件的温度系数的电容器
		热稳定性电容器瓷	钛酸镁瓷、锡酸钙瓷	高频电路维持谐振频率
		微波电容器陶瓷	钙钛矿型结构陶瓷 (BZT-BZN、BZN-SZN)	微波滤波器
铁电电容器	介电系数呈非线性且较高	强介电瓷	钛酸钡、钛酸铅基固溶体	MLCC
反铁电电容器	净自发极性强度为 0	-	锆钛酸铅基固溶体、铌酸钠、三氧化钨、磷酸二铵	储能及电压调节
半导体电容器	陶瓷材料的晶粒为半导体	-	钛酸钡、钛酸锶、钛酸钡基固溶体及钛酸锶基固溶体	PTC 热敏电阻、二次电子倍增管、非线性压敏电阻器、表面层陶瓷电容器、晶界层陶瓷电容器

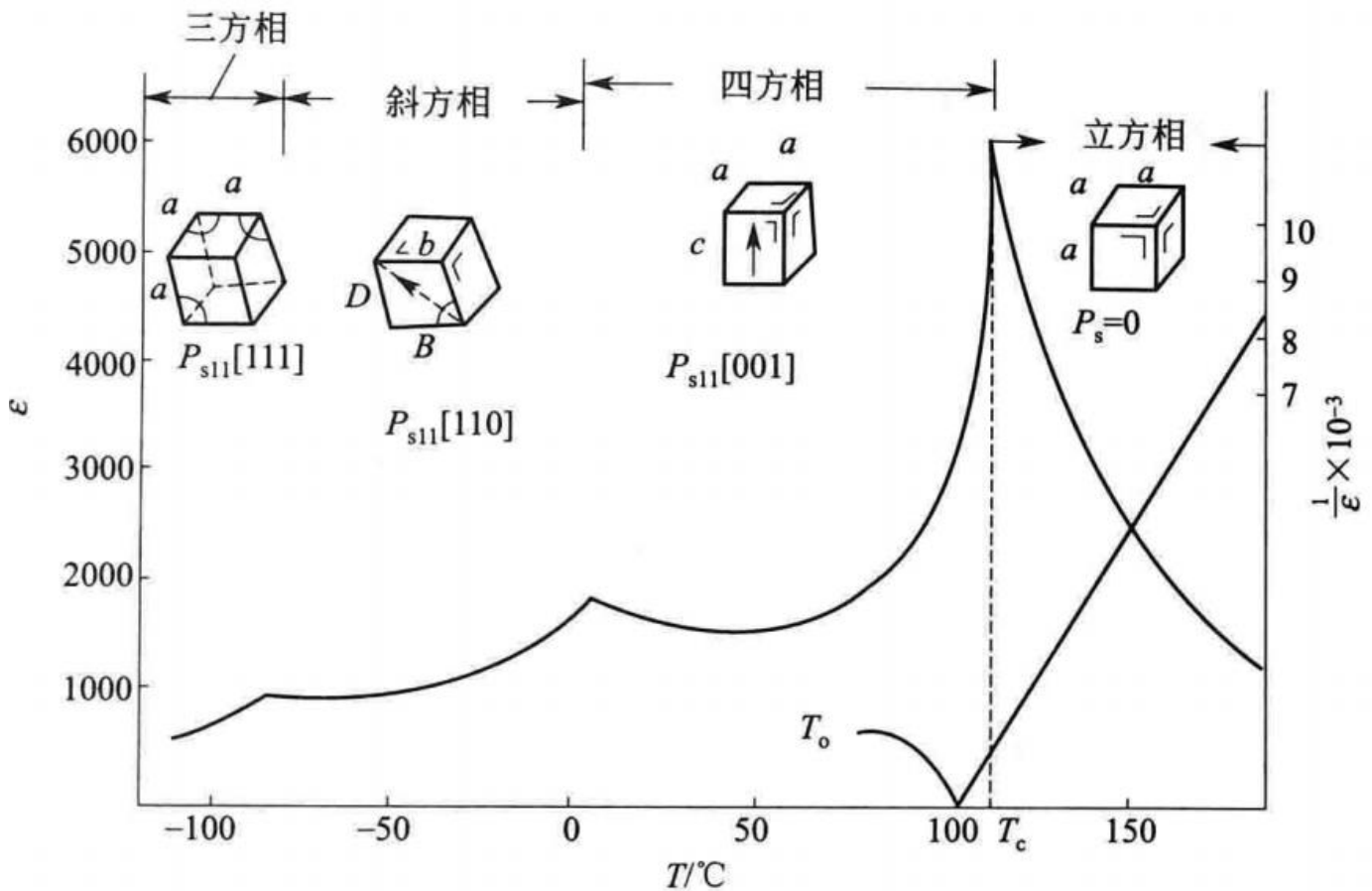
资料来源：《功能陶瓷及应用》，华安证券研究所

图表 85 非铁电电容器陶瓷的密度、介电常数和介电常数温度

类型	密度/(g/cm ³)	介电常数	介电常数温度系数/($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
TiO ₂	4.25	80-100	(-750)-(-850)
ZrO ₂	5.56	16	100
CaTiO ₃	4.1	150	-150
2MgO-TiO ₂	3.52	14	60
CaZrO ₃	4.35	25	76
CaSnO ₃	4.8	14-16	30
SrTiO ₃	5.04	250-270	-2500
ZrTiO ₄	3.05	39	-110
La ₂ Ti ₂ O ₇	5.6	37	-100
La ₂ Zr ₂ O ₇	5.64	25	-167
Nd ₂ Zr ₂ O ₇	6.34	23.4	780
Sm ₂ Zr ₂ O ₇	6.37	20.5	336
BaZrO ₃	5.34	32	-330
SrZrO ₃	5.1	26.5	140

资料来源：《功能陶瓷及应用》，华安证券研究所

图表 86 铁电电容器主要陶瓷-钛酸钡陶瓷的介电温度特性

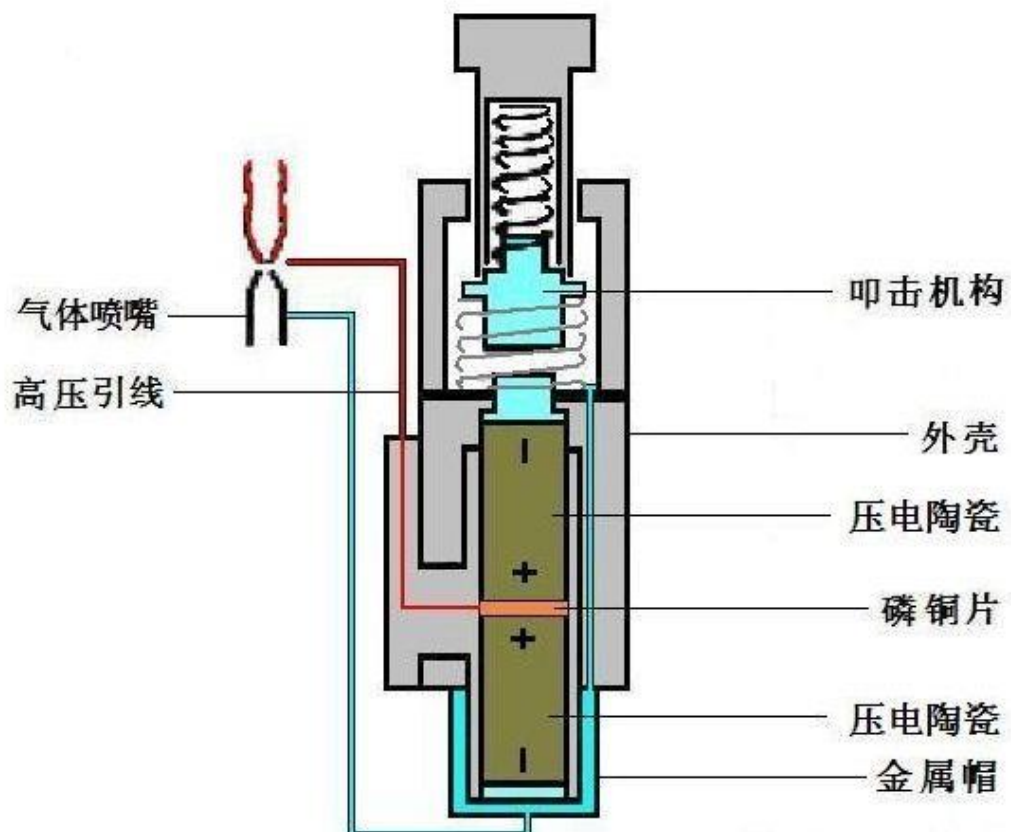
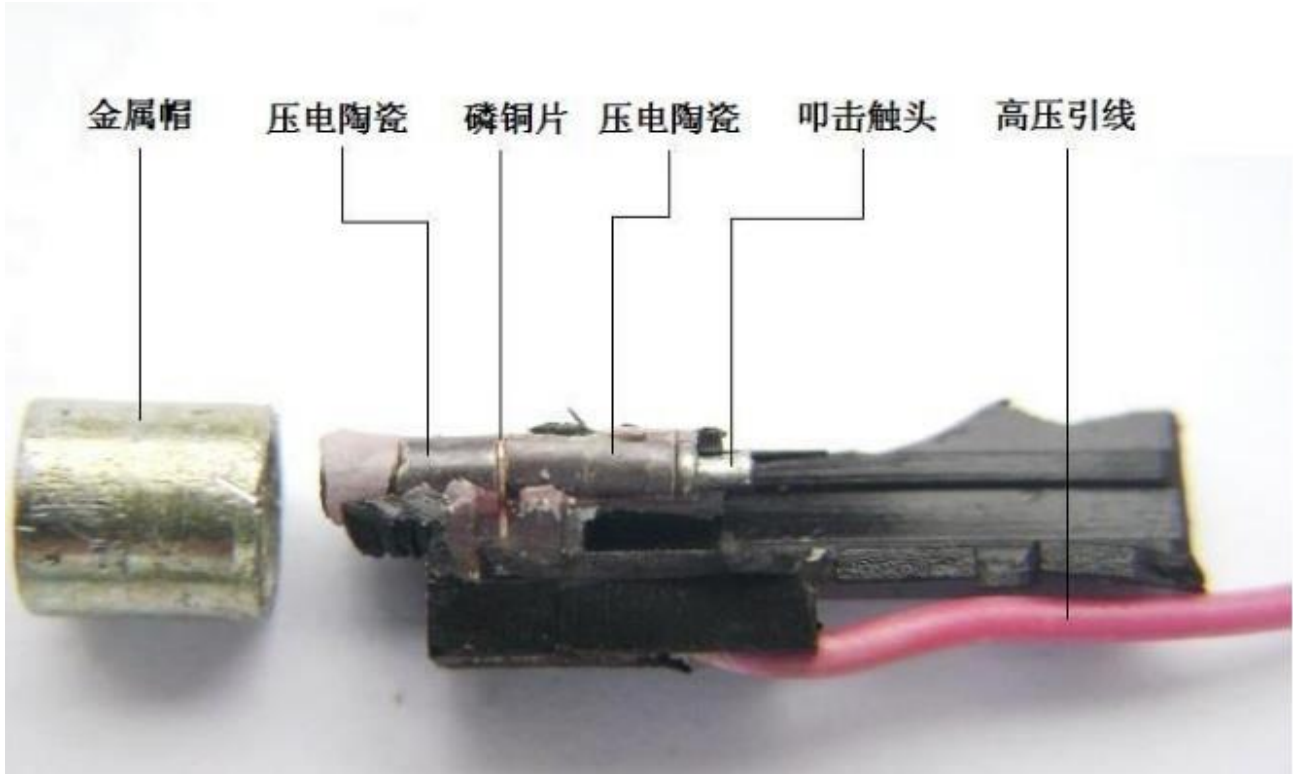


资料来源：《功能陶瓷及应用》，华安证券研究所

● 压电陶瓷：被广泛应用于传感器等

任何无对称中心的材料，都或多或少具有压电效应。有些电介质材料通过纯粹的机械作用而发生极化，并导致介质两端表面出现符号相反的束缚电荷，这种效应称压电效应，具有压电效应的陶瓷称为压电陶瓷。1943 年间发现 BaCO_3 具有压电效应，并于 1947 年制成器件，这对压电材料的发展有很重要的意义。50 年代初发现了锆钛酸铅系列，其性能远优于钛酸钡。60 年代发展了铌酸盐压电陶瓷，70 年代发展了锆钛酸铅透明压电陶瓷，使压电陶瓷的品种和系列进一步扩大，目前应用最多的是 PT 和 PZT2 大系列。压电陶瓷是一种极为重要的、世界各国竞相研究开发的功能材料，其应用已遍及日常生活及生产的不同角落。近年来，随着宇航、电子、计算机、激光、微声和能源等新技术的发展，对各类材料器件提出了更高的性能要求，压电陶瓷作为一种新型功能材料，在日常生活中，作为压电元件广泛应用于传感器、气体点火器、报警器、音响设备、超声清洗、医疗诊断及通信等装置中。它的重要应用大致分为压电振子和压电换能器 2 大类。前者主要是利用振子本身的谐振特性，要求压电、介电、弹性等性能稳定，机械品质因数高。后者主要是将一种能量形式转换成另一种能量形式，现在所用的压电陶瓷材料，主要是 $\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ (PZT)、 PbTiO_3 - PbTiO_3 - ABO_3 (ABO_3 为复合钙钛矿型铁电体) 等铅基压电陶瓷。

图表 87 打火机内压电陶瓷的应用



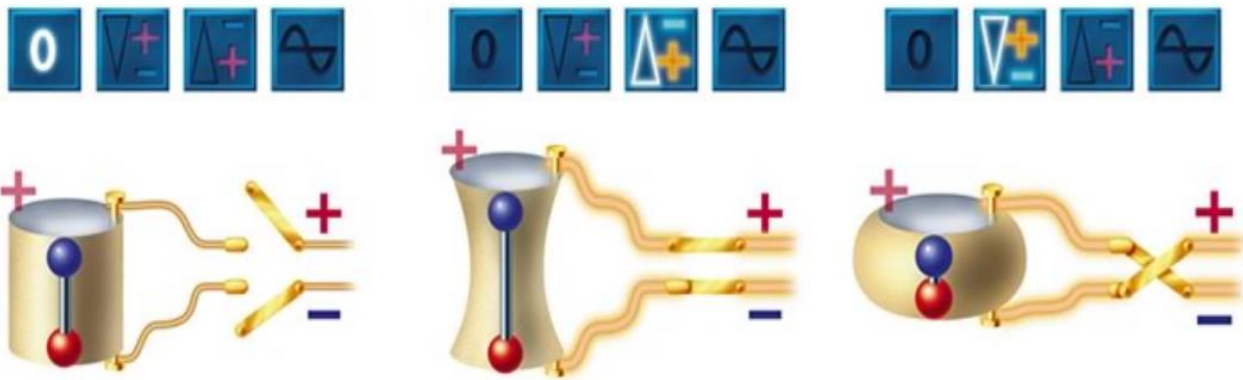
资料来源：CNKI，华安证券研究所

图表 88 直接压电效应



资料来源：CNKI，华安证券研究所

图表 89 间接压电效应



资料来源：CNKI，华安证券研究所

图表 90 常用压电材料性能

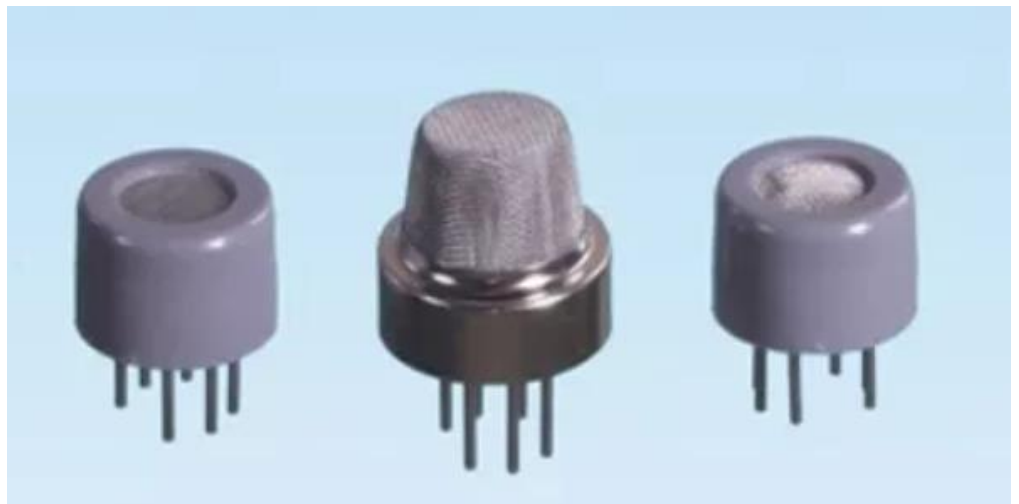
性能	石英	钛酸钡	锆钛酸铅 PZT-4	锆钛酸铅 PZT-5	锆钛酸铅 PZT-8
压电系数/(pC/N)	d11=2.31	d15=260	d15≈410	d15≈670	d15≈330
	d14=0.73	d31=-100	d31=-100	d31=-185	d31=-90
	-	d33=190	d33=230	d33=600	d33=200
相对介电常数/ ϵ_r	4.5	1200	1050	2100	1000
居里点温度/ $^{\circ}\text{C}$	573	115	310	260	300
密度/ (10^3kg/m^3)	2.65	5.5	7.45	7.5	7.45
弹性模量/ (10^3N/m^2)	80	110	83.3	117	123
机械品质因数	10^5-10^6	-	≥ 500	80	≥ 800
最大安全应力/ (10^5N/m^2)	95-100	81	76	76	83
体积电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	$>10^{12}$	$10^{10}(25^{\circ}\text{C})$	$>10^{10}$	$10^{11}(25^{\circ}\text{C})$	-
最高允许温度/ $^{\circ}\text{C}$	550	80	250	250	-
最高允许温度/%	100	100	100	100	-

资料来源：《功能陶瓷及应用》，华安证券研究所

1.2.2 敏感陶瓷

敏感陶瓷指某些性能随外界条件（温度、电压、湿度、气氛）的变化而发生改变的陶瓷。当某一个外界条件，如温度、压力、湿度、气氛、电场、光及射线等改变时，能引起该材料某种物理性能的变化，从而能从这种元件上准确迅速地获得某种有用的信号。

图表 91 半导体空气污染传感器



资料来源：CNKI，华安证券研究所

敏感陶瓷是由晶粒、晶界、气孔组成的多相系统，通过人为掺杂，造成晶粒表面的组分偏离，在晶粒表面产生固溶、偏析及晶格缺陷；在晶界处产生异质相的析出、杂质的聚集、晶格缺陷及晶格各种异性等。这种晶粒边界层的组成、结构变化，显著改变了晶界的电性能，从而导致整个陶瓷电气性能的显著变化（产生敏感特性的机理）。

图表 92 敏感陶瓷分类

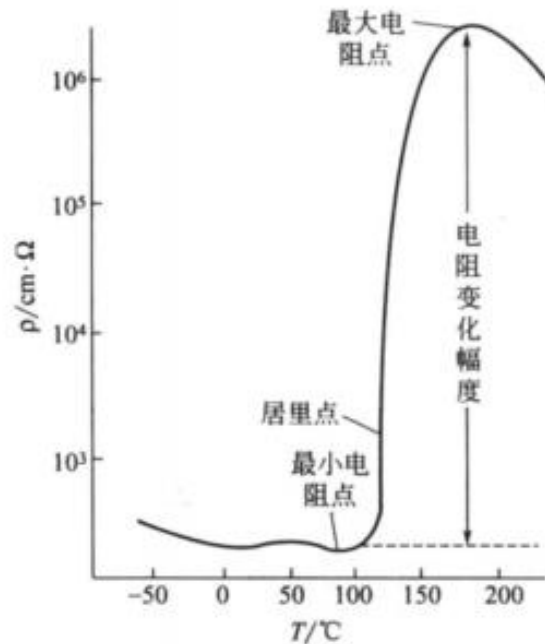
类别	陶瓷种类
光敏陶瓷	CdS、CdSe
热敏陶瓷	PTC 陶瓷，NTC 和 CTR 热敏陶瓷
磁敏陶瓷	InSb, InAs, GaAs
声敏陶瓷	罗息盐，水晶，BaTiO ₃ 、PZT
压敏陶瓷	ZnO, SiC
力敏陶瓷	PbTiO ₃ , PZT
氧敏陶瓷	SnO ₂ 、ZnO、ZrO ₂
湿敏陶瓷	TiO ₂ 、ZnO-Li ₂ O-V ₂ O ₅

资料来源：华安证券研究所整理

敏感陶瓷绝大部分是由各种氧化物组成的，由于这些氧化物多数具有比较宽的禁带，在常温下它们都是绝缘体，要使它们变为半导体，需要一个半导体化的过程。所谓半导化，就是指在禁带中形成附加能级：施主能级或受主能级。一般来说，这些施主能级多数是靠近导带底的，而受主能级多数是靠近价带顶的。即它们的电离能

一般比较小，在室温下就可以受到热激发产生导电载流子，从而形成半导体。形成附加能级主要有两个途径：不含杂质的氧化物主要通过化学计量比偏离来形成；而含杂质的氧化物附加能级的形成还与杂质缺陷有关。

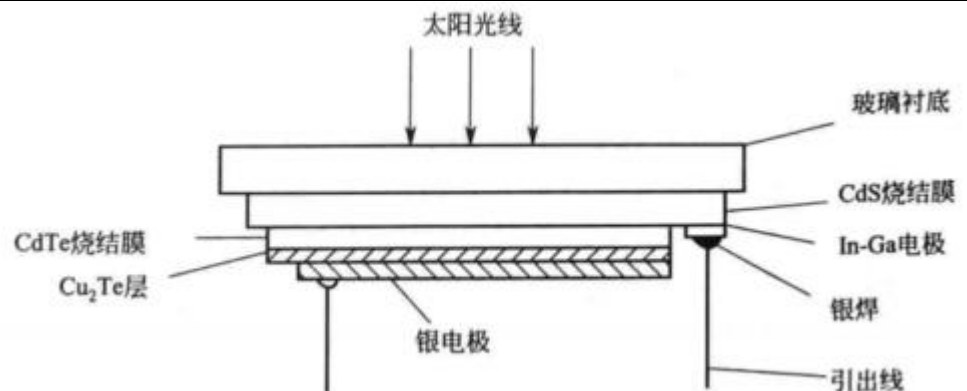
图表 93 热敏陶瓷的电阻在不同温度下出现巨大差异



资料来源：《功能陶瓷材料及应用》，华安证券研究所

敏感陶瓷用于制造敏感元件，是根据某些陶瓷的电阻率、电动势等物理量对热、湿、光、电压及某种气体、某种离子的变化特别敏感这一特性，按其相应的特性，可把这些材料分别称作热敏、湿敏、光敏、压敏、气敏及离子敏感陶瓷。此外，还有具有压电效应的压力、位置、速度、声波敏感陶瓷，具有铁氧体性质的磁敏感陶瓷及具有多种敏感特性的多功能敏感陶瓷等。这些陶瓷已广泛应用于工业检测、控制仪器、交通运输系统、汽车、机器人、防止公害、防灾、公安及家用电器等领域。

图表 94 光敏陶瓷太阳能电池



资料来源：《功能陶瓷材料及应用》，华安证券研究所

1.2.3 光学陶瓷

所谓透明陶瓷就是能透过光线的陶瓷。通常陶瓷是不透明的，其原因是陶瓷材料内部含有的微气孔等缺陷对光线产生折射和散射作用，使得光线几乎无法透过陶瓷体。1959 年通用电气公司首次提出了一些陶瓷具有可透光性，随后 1962 年 R. L. Coble 首次制备了半透明的 Al_2O_3 陶瓷证实了这一点，同时也为陶瓷材料开辟了新的应用领域。

图表 95 光学陶瓷种类及应用领域

类别	应用领域
氧化铝	高压钠灯、陶瓷金卤灯、正畸陶瓷托槽
氧化镁	高温炉观察窗口、红外探测器罩
氧化钇	高温窗口、红外透过窗、高温试验装置、微波基板、红外发生器、天线罩
镁铝尖晶石	红外窗口、光学透镜、整流罩
钇铝石榴石	激光器
氮化铝	红外整流罩、窗口材料
赛隆陶瓷	高压钠灯灯管、高温红外测温仪窗口
阿隆陶瓷	气体灯管、雷达天线罩、耐高温红外传感器窗口材料、坦克装甲车的观察窗、武装直升飞机的透明装甲

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 96 光学陶瓷透光率的影响因素及改进措施

影响因素	改进措施
气孔率	完全消除气孔或使气孔率趋于 0
晶界结构	让晶界结构尽可能薄，洁净无杂物和气孔
表面光洁度	通过研磨抛光提高表面光洁度
晶粒尺寸	让晶粒尺寸与入射光波长相差较大
晶体结构	选择立方等轴晶系的陶瓷
杂质	减小杂质

资料来源：CNKI，华安证券研究所

透明陶瓷不仅有良好的透明性和光学特性，而且耐腐蚀、耐高温、电绝缘好、热导率高及良好的介电性能，因此在新型照明技术、高温高压及腐蚀环境下的观测窗口、红外探测用窗、导弹用防护整流罩、军事用透明装甲等领域得到愈来愈多的应用。

此外，与单晶相比，透明陶瓷制造成本低、易于大批量生产，可以制成尺寸较大、形状复杂的制品；而与玻璃相比，透明陶瓷具有强度和硬度高、光学透过范围大、导热性好、耐腐蚀、可以实现活性离子的高浓度均匀掺杂等特点，所以对于许多特殊要求的光学零部件及激光材料，透明陶瓷具有无可比拟的优势。

透明陶瓷材料不仅具有较好的透明性、耐腐蚀性，能在高温高压下工作，而且还有许多其他材料无可比拟的性能，如强度高、介电性能优良、电导率低、热导性好等。因此，透明陶瓷材料在国民生活的各个领域应用广泛。

图表 97 光学陶瓷的应用



资料来源：华安证券研究所整理

1.2.4 生物陶瓷

生物陶瓷，是指用作特定的生物或生理功能的一类陶瓷材料，即直接用于人体或与人体相关的生物、医用、生物化学等的陶瓷材料。生物陶瓷不仅具有不锈钢、塑料等所具有的特性，而且具有亲水性，能与细胞等生物组织表现出良好的亲和性，它是材料工业发展的一个新领域，受到世界各国的重视。

图表 98 生物陶瓷分类

类别	陶瓷种类
生物惰性陶瓷	氧化铝(Al_2O_3)，氧化锆(ZrO_2)，氧化钛(TiO_2)，氮化硅(Si_3N_4)，碳化硅(SiC)，硅铝酸盐($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)，钙铝系(CaOAl_2O_3)
生物活性陶瓷	高结晶度羟基磷灰石($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)，生物玻璃($\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$)，磷酸三钙($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)，低结晶度羟基磷灰石($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)，掺杂型羟基磷灰石($\text{Ca}_{10-n}\text{Sr}_n(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)

资料来源：《先进陶瓷材料》，华安证券研究所

- 生物惰性陶瓷材料的结构比较稳定，分子中的键合力较强，而且都具有较高的强度、耐磨性和化学稳定性。

目前氧化铝陶瓷已经应用于人造骨、人工关节及人造齿根的制作方面。氧化铝陶瓷在体外对热纤维细胞只有微弱的毒性，长时间存于体内环境，力学特性也无明显改变，硬度超过 2000 维氏单位。近些年随着热等静压成型技术和激光刻蚀技术的应用，使三代氧化铝陶瓷晶粒更小，纯度及密度更高，强度和硬度得到显著增加，破

裂率显著降低。氧化铝陶瓷超强的硬度，良好的抗磨损能力，使之成为骨科 THA 中主要的生物材料。

图表 99 氧化铝基复合微晶陶瓷半成品白杯部分



资料来源：《氧化铝复合陶瓷在全髋关节置换中的应用》，华安证券研究所

图表 100 不同材质间的界面磨损率

类别	磨损率
金属对传统聚乙烯	35~50mm ³ /百万周
金属对高交联聚乙烯	5~10 mm ³ /百万周
金属对金属	1~4mm ³ /百万周
第三代氧化铝陶瓷对陶瓷	1.84mm ³ /百万周
第四代氧化铝复合陶瓷对陶瓷	0.13mm ³ /百万周

资料来源：《氧化铝复合陶瓷在全髋关节置换中的应用》，华安证券研究所

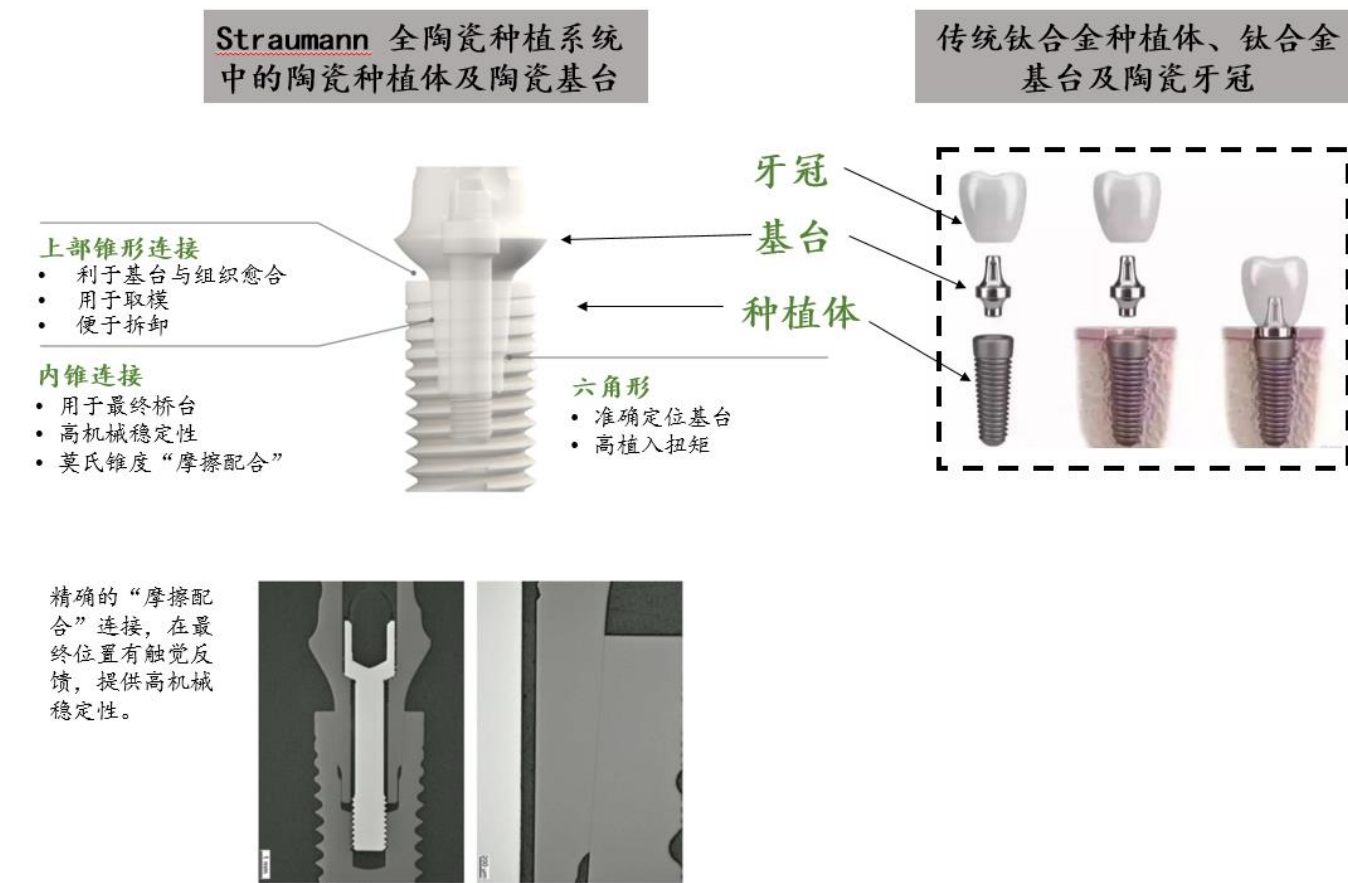
图表 101 “三明治”陶瓷内衬(Lima, Italy)及 BILOX forte 内衬 (Ceram Tec AG, Germany)



资料来源：《第 3 代陶对陶人工全髋置换术治疗中青年髋关节疾病的中远期疗效》，华安证券研究所

氧化锆陶瓷由于其优良的力学性能，尤其是其远高于氧化铝陶瓷的断裂韧性，使其作为增强增韧第二相材料在人体硬组织修复体方面取得了较大的研究进展。

图表 102 氧化锆植入体的应用



资料来源：士卓曼官网，华安证券研究所

● **生物吸收陶瓷的特点是能部分吸收或者全部吸收，在生物体内能够诱发新生骨的生长。**

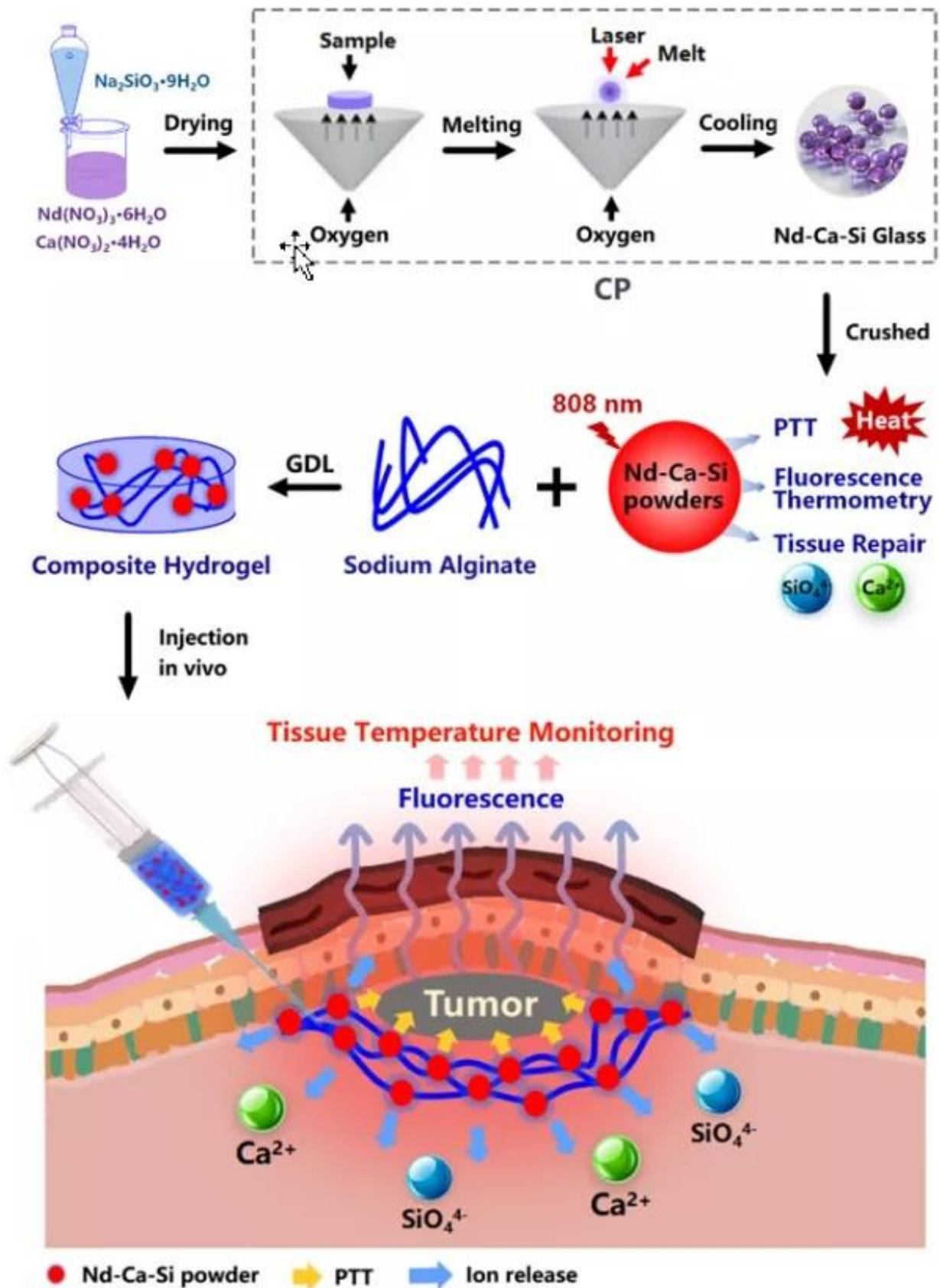
生物活性玻璃主要是由 SiO_2 、 P_2O_5 、 CaO 、 Na_2O 构成，可以键合到现有的骨组织中，可降解，并通过它们的溶解产物对细胞的作用刺激新骨生长。它具有区别于其他生物材料的独特属性，能在植入部位迅速发生一系列表面反应，最终导致含碳酸盐基磷灰石层的形成。

生物活性陶瓷中应用最多的是羟基磷灰石，简称 HAp，属表面活性材料，由于生物体硬组织（牙齿、骨）的主要成分是羟基磷灰石，因此有人也把羟基磷灰石陶瓷称为人工骨。具有生物活性和生物相容性好、无毒、无排斥反应、不致癌、可降解、可与骨直接结合等特点，是一种临床应用价值很高的生物活性陶瓷材料。

目前广泛应用的生物降解陶瓷为 β -磷酸三钙， β -磷酸三钙的最大优势就是生物相容性好，植入基体与骨直接融合，无任何局部炎性反应及全身毒副作用。其不足是高切口敏感性导致的低疲劳强度，较高刚性和脆性使其难以加工成型或固定钻孔。

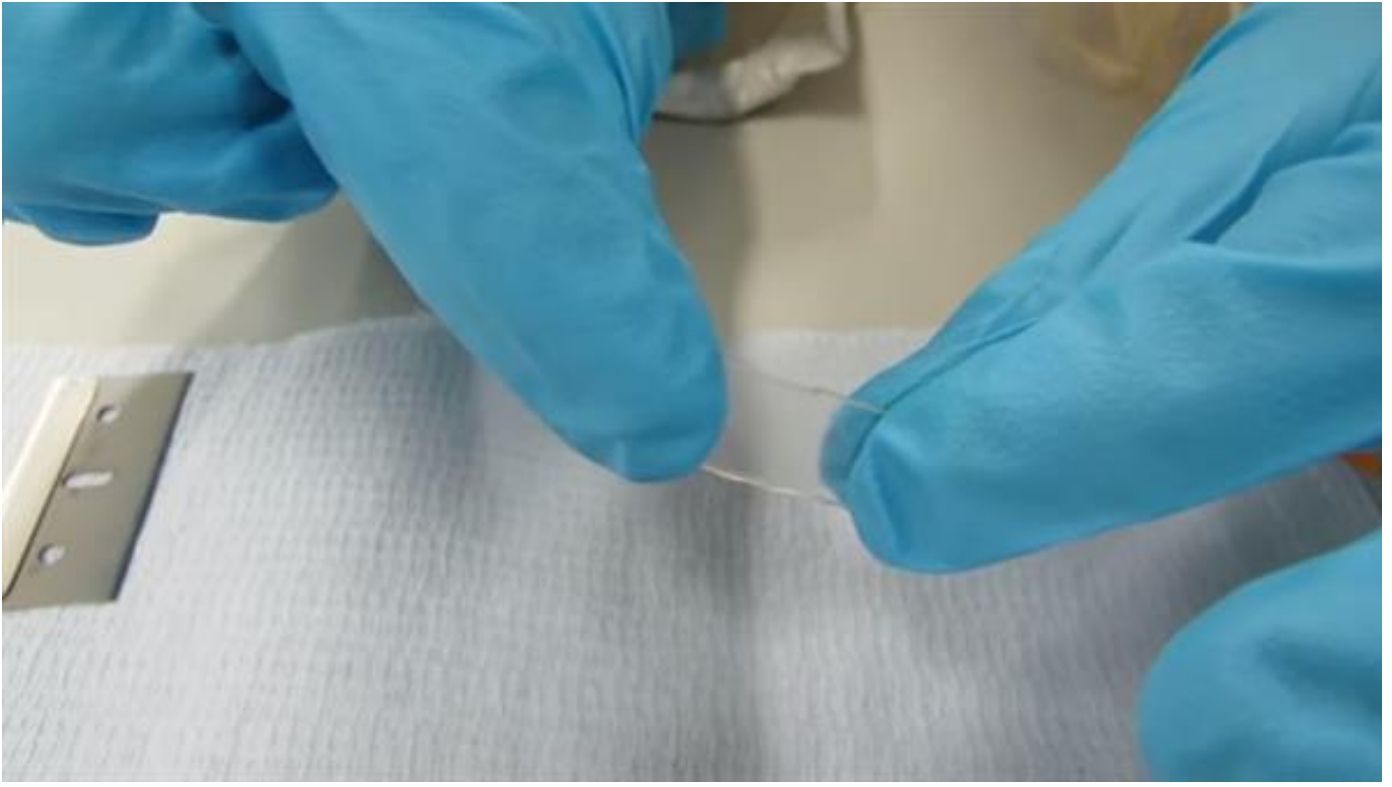


图表 103 多功能新型生物活性玻璃材料研究获进展



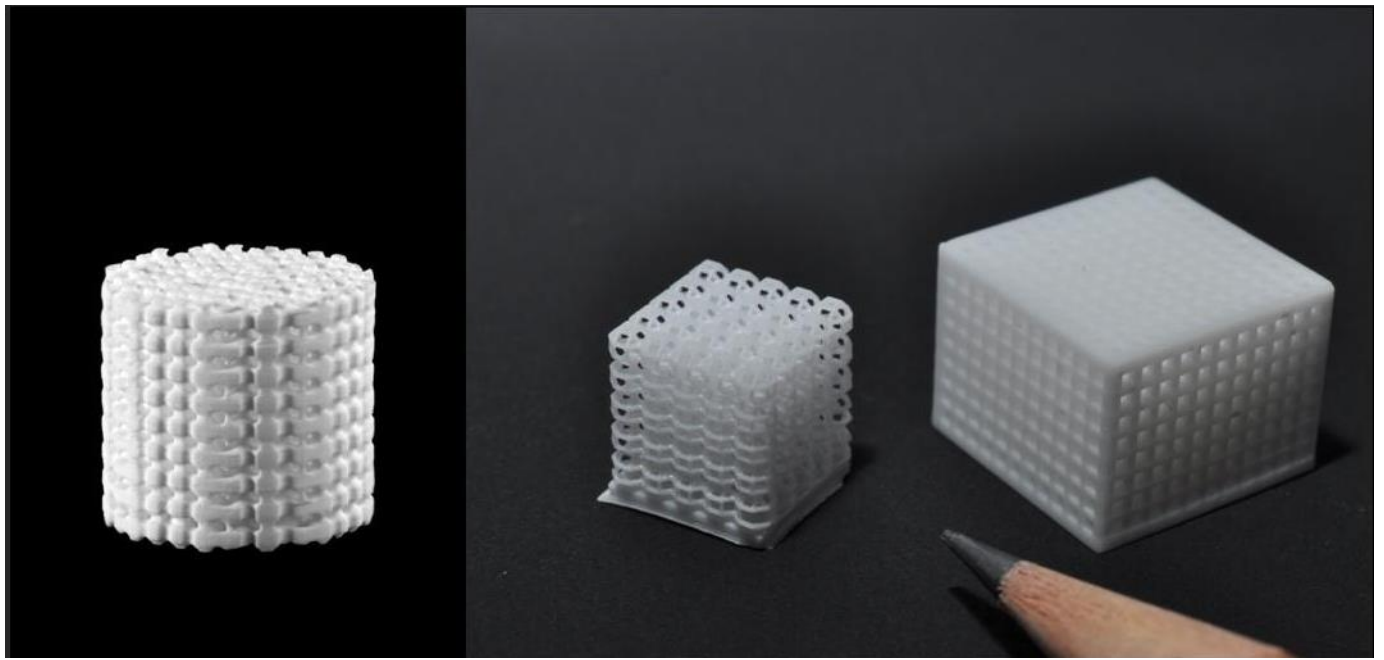
资料来源：中国科学院上海硅酸盐研究所，华安证券研究所

图表 104 生物玻璃软骨植入物



资料来源：贝哥仕口腔护理，华安证券研究所

图表 105Lithoz 公司制备的可降解陶瓷骨骼植入体样品



资料来源：搜狐网，华安证券研究所

图表 106 表面涂覆羟基磷灰石(HA)的人工关节



资料来源：科技日报，华安证券研究所

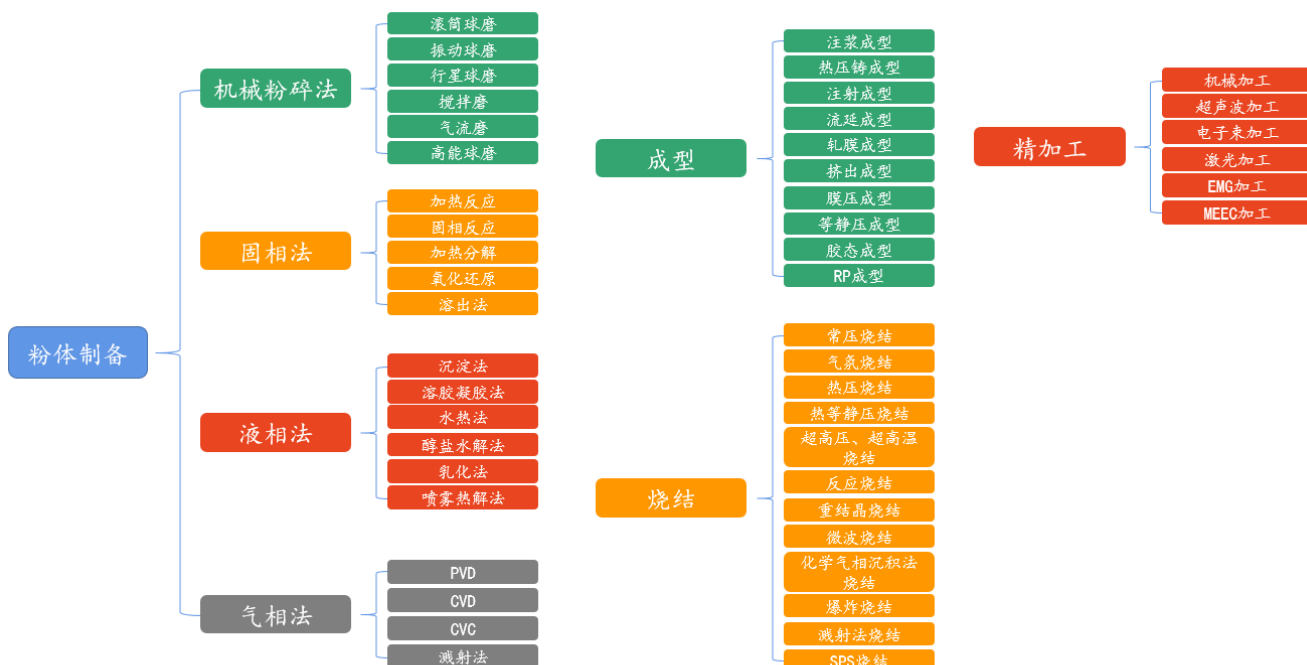
2 粉体制备、成型、烧结及加工是主要的环节

一般地，可以把陶瓷工艺过程分为粉体合成、粉体处理、材料制备、坯体成型、干燥、脱脂、烧结和后加工等几个阶段，其中粉体合成主要包括固相反应、固相熔融盐法、液相沉淀法、溶胶-凝胶、燃烧合成、化学共沉淀和水热合成等多种方法；粉体处理包括煅烧、研磨、粉碎、混合等；材料制备过程中的处理包括悬浮、混合、除气、喷雾干燥等；关键的成型工艺包括干压成型、等静压成型、挤出成型、注射成型、注浆成型、压滤成型、流延成型等；陶瓷烧结包括热压烧结、常压烧结、等离子烧结等。

粉体的特性对后续的成型和烧结具有显著的影响，特别是对陶瓷最终纤维结构和力学性能具有重要的作用。通常纯度高、粒径细小均匀且烧结活性好的粉体有利于制备出结构均匀致密和力学性能优异的陶瓷材料。先进的陶瓷粉体特征主要包括颗粒大小、粒径分布、颗粒形状、团聚度、化学纯度及相组成，此外，粉体表面的结构以及化学状态对烧结活性也具有重要的影响。

成型作为联系粉体与制品的中间环节，对陶瓷材料的可靠性有着至关重要的影响。因为尽管陶瓷制品中的各种缺陷大都表现于干燥、烧结、后加工乃至使用过程中，但这些缺陷基本上都起源于成型。成型坯体中组分分布和密度分布的不均匀在干燥和烧成过程中引起坯体的不一致收缩，形成裂纹，即使不出现裂纹，也会留下相当的内应力，给后续工艺和使用阶段留下隐患，所以成型工艺对于保证陶瓷制品微观结构的均匀性，从而保证陶瓷制品的可靠性有着至关重要的作用。

图表 107 先进陶瓷制备的几大步骤



资料来源：华安证券研究所整理

2.1 粉体制备：对最终结构和力学性能具有的重要作用

粉末体简称粉末或粉体，通常是指由大量的固体颗粒及颗粒间的空隙所构成的集合体。而组成粉末体的最小单位或个体称为粉末颗粒，简称颗粒，其大小一般小于 1000 μm 。粉体在陶瓷工业生产中可以是原料、半成品或成品。粉末颗粒的大小、形状、表面性质、堆积特性，各种物理性质、化学性质不仅关系到粉体的应用，也直接取决于并影响生产粉体的单元操作过程。因此，研究粉体的性能及表征、制备技术及表面处理也变得尤为重要。

高技术陶瓷制备工艺的一个基本特点是以粉体为原料经成型和高温处理形成多晶烧结体。颗粒尺寸、形状、粒径分布和团聚度将直接影响到成型坯体和烧结体的显微结构。通常亚微米级的陶瓷粉体对于注浆或胶态成型的悬浮体制备是有利的，而且烧结活性较高容易得到高密度的陶瓷坯体和烧结体。粒径分布较宽的粉体或双峰分布的粉体，虽然有可能达到高的坯体堆积密度，但在烧结过程中，其显微结构的控制却显得非常困难。这是因为大晶粒常常会吞噬小晶粒而快速长大，导致结构不均匀，力学性能变差。而粒径分布较窄的粉体的均匀堆积，一般可以保证更好地控制显微结构，而球形或等轴状的粉体颗粒对于控制粉体堆积的均匀性是有利的。

图表 108 粉体制备的工艺

类别		适用陶瓷类别
固相反应法	高温固相反应法	氧化物陶瓷粉末
	碳热还原法	碳化物、硼化物、氮化物等非氧化物陶瓷粉末
	自蔓延燃烧合成法	大多数非氧化物和多元复合陶瓷粉末
	盐类热分解法	氧化物陶瓷粉末
气相反应法	气相冷凝法	熔点较低的粉体
	等离子体法	Si_3N_4 、 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ 、 AlN 、 TiN 、 ZrN 等氮化物纳米陶瓷粉体
	激光诱导气相沉积法	熔点较高的碳化物和氮化物
液相法	沉淀法	纳米级超细粉体（氧化锆）
	溶胶-凝胶法	Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 ZrO_2 以及氧化物复合粉等纳米粉体
	水热法	氧化物材料
	喷雾热解法	氧化物超细陶瓷粉体

资料来源：CNKI，华安证券研究所

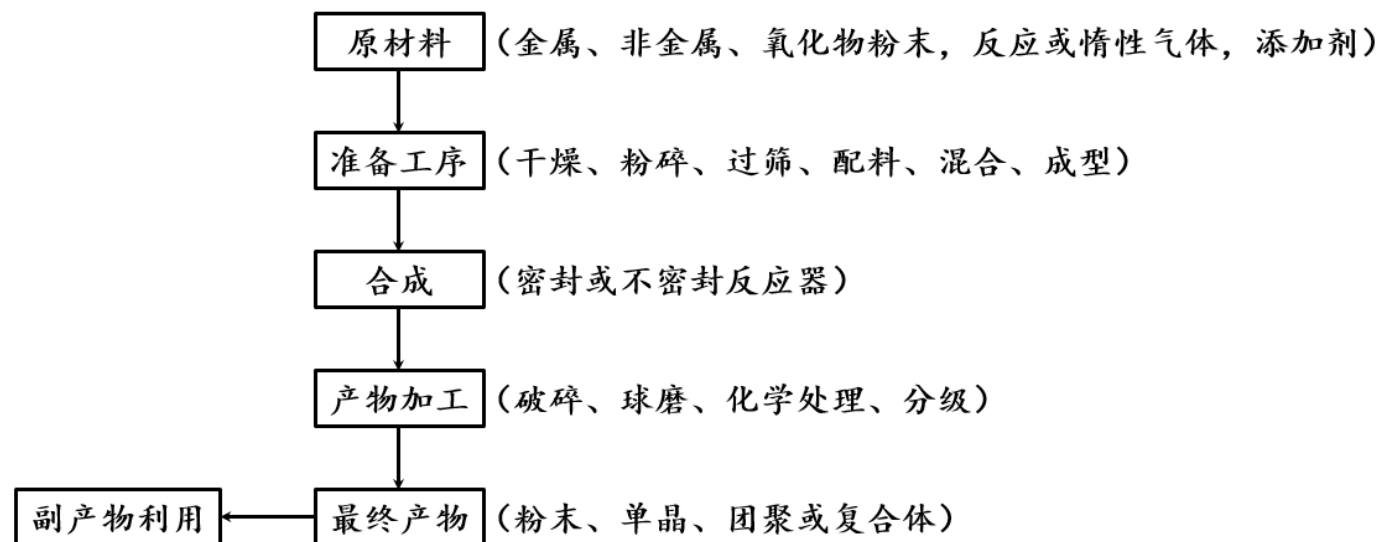
粉料团聚会导致成型坯体的不均匀性，这又会在烧结过程中因各部位收缩速率不同而导致“差异烧结”，从而在烧结体中形成大的不规则孔洞或类似裂纹的孔洞。这些孔洞成为潜在的裂纹源，从而大大降低材料的力学性能和可靠性。可见，粉末的团聚会严重影响到烧结后陶瓷的致密度和显微结构的均匀性。通常团聚可分为两类，即颗粒之间以弱的范德华力连接的软团聚和颗粒之间以强化学键连接的硬团聚。对于陶瓷粉体最理想的 27 状态是避免团聚，但在大多数情况下是不可能的，此时，可允许软团聚而尽可能通过机械方法避免硬团聚。另外，粉体中的杂质对粉体性能有重要影响，一方面杂质可能对颗粒在液体中的分散不利，因为杂质离子会减小双电层厚度和 Zeta 电位，增大陶瓷悬浮体的粘度；另一方面，杂质有可能在烧结过程中产生少量液相，导致少数晶粒的异常长大，难以获得晶粒均匀细小的显微结构。现代高技术陶瓷材料对粉体的基本要求是高纯、超细、粒度分布均匀、团聚程度低、烧结活性好。这里所说的超细，通常是指颗粒的平均直径小于 1 μm 的微粉，其极小的粒径、巨大的比表面积使其具有很高的表面活性，可以显著降低材料的烧结致

密化温度，节约能源；使陶瓷材料的组成分布致密均匀，改善陶瓷材料的性能，提高其使用可靠性；甚至可以在纳米尺度（1~100nm）上控制材料的成分和结构，有利于充分发挥陶瓷材料的潜在性能。

目前发展的陶瓷粉体制备方法，按原料起始状态可分为固相法、气相法和液相法三大类。

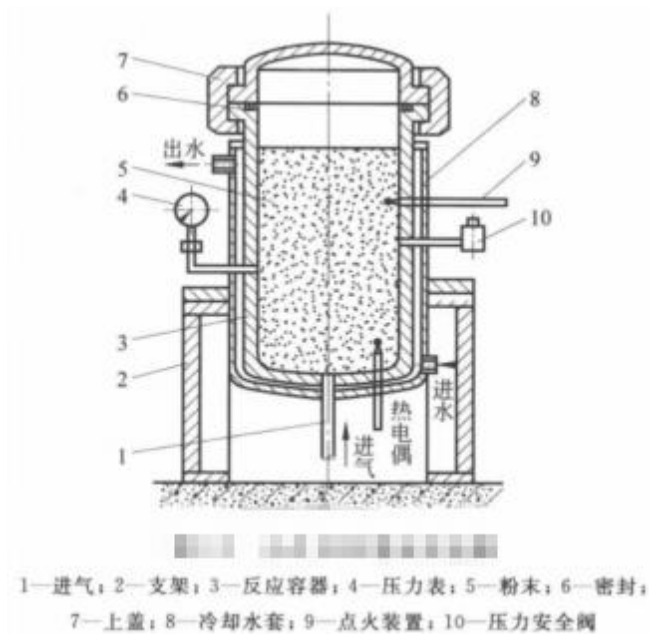
- 固相法作为一种传统的制粉工艺，虽然有其固有的缺点，如 28 能耗大、效率低、粉体不够细、易混入杂质等，由于该法制备的粉体颗粒无团聚、填充性好、成本低、产量大、制备工艺简单、便于批量化和规模化生产等优点，迄今仍是常用的方法。
- 气相反应具有如下特点：1) 金属化合物具有挥发性，容易精制（提纯），而且生成的粉料不需要进行粉碎，因此，生成物的纯度高；2) 生成颗粒的分散性良好；3) 只要控制反应条件，就很容易得到颗粒直径分布范围较窄的超微粒子；4) 气氛容易控制。这种方法适合制备氧化物，也适合氮化物、碳化物、硼化物等非氧 1 化物的合成与制备。但气相反应法的特点是设备昂贵，工艺控制难度较大。关键性的技术是气相反应参数，如反应温度、反应压力、反应气体配比和载气流量、反应体系的平衡常数与过饱和比等。这些参数的变化对产物的产率和性能影响很大，而且还要采取急冷措施来控制晶核的生长。激光法适合制备熔点较高的碳化物和氮化物，并且一些产品如 SiC、Si₃N₄ 已经采用该方法进行工业化生产。

图表 109 自蔓延燃烧法流程图



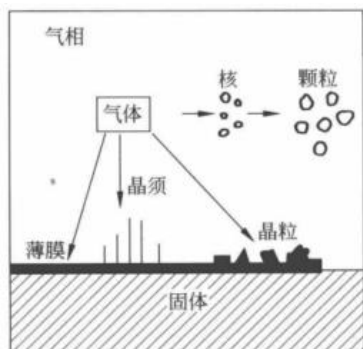
资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 110 自蔓延燃烧法装置图



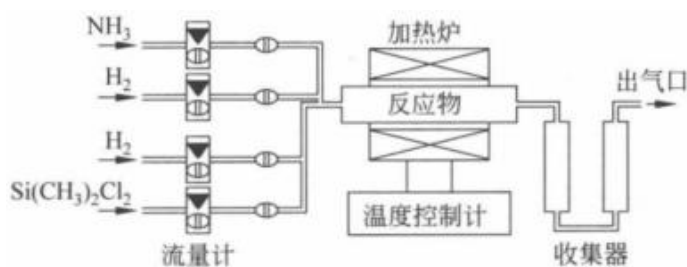
资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 111 气相反应法原理



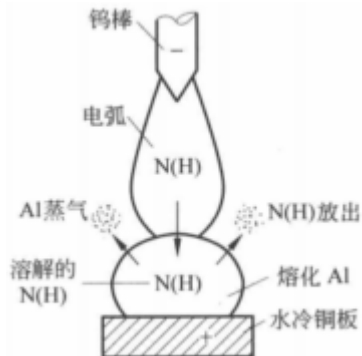
资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 112 化学气相沉积法生产碳化硅陶瓷粉末



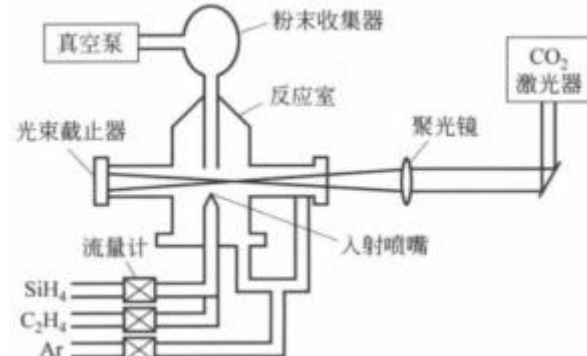
资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 113 等离子体法制备氮化铝粉末



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 114 激光法制备陶瓷粉末

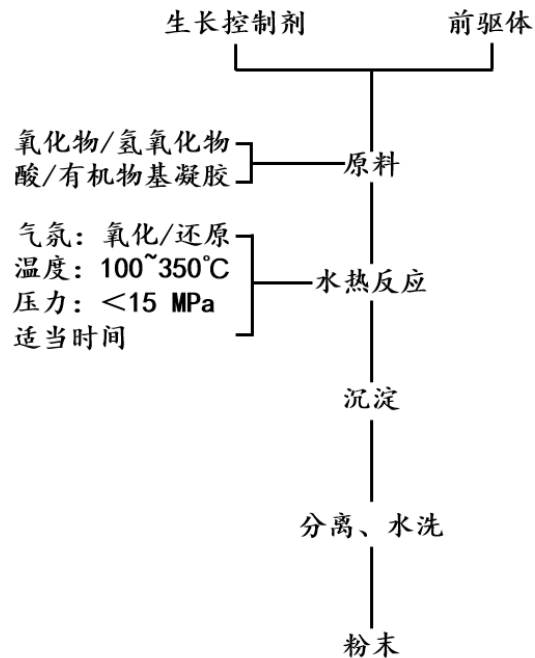


资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

- 液相法是通过液相溶液化学反应来制备粉体，具有设备简单、产物组成

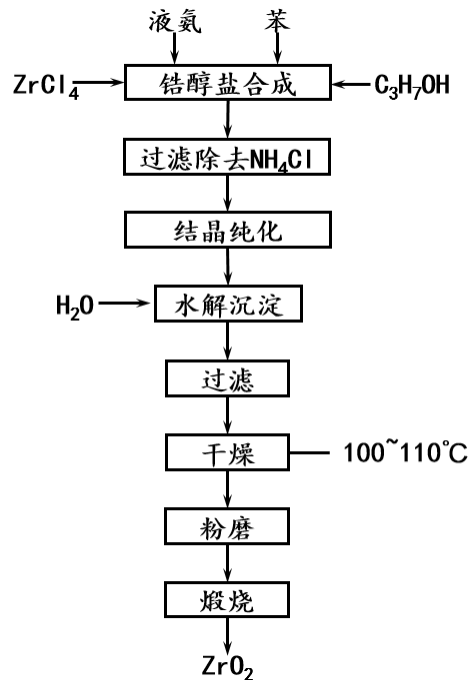
含量可精确控制、可实现分子甚至原子尺度水平上的混合、易于中试放大等特点，制得的粉体粒度分布窄、形貌规整，是目前实验室和工业上广泛采用的方法。

图表 115 水热法的一般工艺



资料来源:《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 116 醇盐水解法生产氧化锆的流程



资料来源:《结构陶瓷》，华安证券研究所

2.2 成型工艺：得到内部均匀及高密度坯体的核心环节

陶瓷制品的主要制备流程包括：粉体造粒，成型、干燥、烧结。其传统的成型工艺包括：干压成型、等静压成型、挤出成型、注射成型、注浆成型、流延成型、热压铸成型等，后来又发展起来凝胶注模成型、直接凝固成型等新型胶态成型工艺和固体无模成型工艺。这些成型方法，成型原理及过程不同，因此其优缺点也不尽相同。干压成型和冷等静压成型已经在实验室和实际生产中获得广泛的应用。尽管干压成型可能存在密度梯度和不够均匀等缺陷，但由于其成型效率高、尺寸精确、成本低，成为一般结构陶瓷产品首选的成型工艺。冷等静压成型因可获得高密度、高均匀性及高强度的陶瓷坯体，从而成为高性能结构陶瓷部件的主要成型方法，例如高压钠灯用透明陶瓷管、陶瓷轴承球等。粘塑性成型工艺中的挤压成型特别适合制造截面尺寸一致的陶瓷产品，特别是对长宽比大的管状或棒状产品具有更大的优势，并且成型的陶瓷坯体可大可小，容易实现连续化和机械化的批量生产。呈粘塑特性的热压铸成型（国际上称之为低压注射成型）和注射成型是制备小型复杂形状精密陶瓷零部件的有效方法，特别是注射压力大、成型密度高的陶瓷注射成型工艺近 10 多年在国内外先进陶瓷产业中发展迅速；例如光纤连接器用氧化锆陶瓷插芯和套筒、发动机用增压器涡轮转子、金卤灯中球形陶瓷发光管等都是采用陶瓷注射成型制备的。陶瓷成型中的传统注浆成型因工艺简单，可制备形状相当复杂、尺寸较大的制品且成型坯体密度高，仍是结构陶瓷产品制造中不可或缺的一种主要成型方法。以浆料形态进行的流延成型除了广泛用于氧化铝、氮化铝等基板材料的制备，也用于燃料电池介质薄膜、仿生叠层复合材料薄层的成型，并由传统的有机溶剂流延成型发展出环保的水基流延及凝胶流延多种方法。

作为新型浆料成型的凝胶注模成型和直接凝固成型，其成型机理不同于传统的石膏模注浆成型，它们是通过浆料内部化学反应使浆料产生原位固化成型得到坯体，因此，具有更好的均匀性，特别是可制备大尺寸和厚截面的陶瓷制品，如熔融石英陶瓷匣板和多晶硅熔炼用石英坩埚。因此，各种不同成型机理的凝胶注模成型方法在近十几年来得到了广泛的研究和关注。20 世纪 90 年代初出现了固体无模成型的陶瓷成型新方法，该方法也被译为固体自由成型制造或快速自动成型技术。

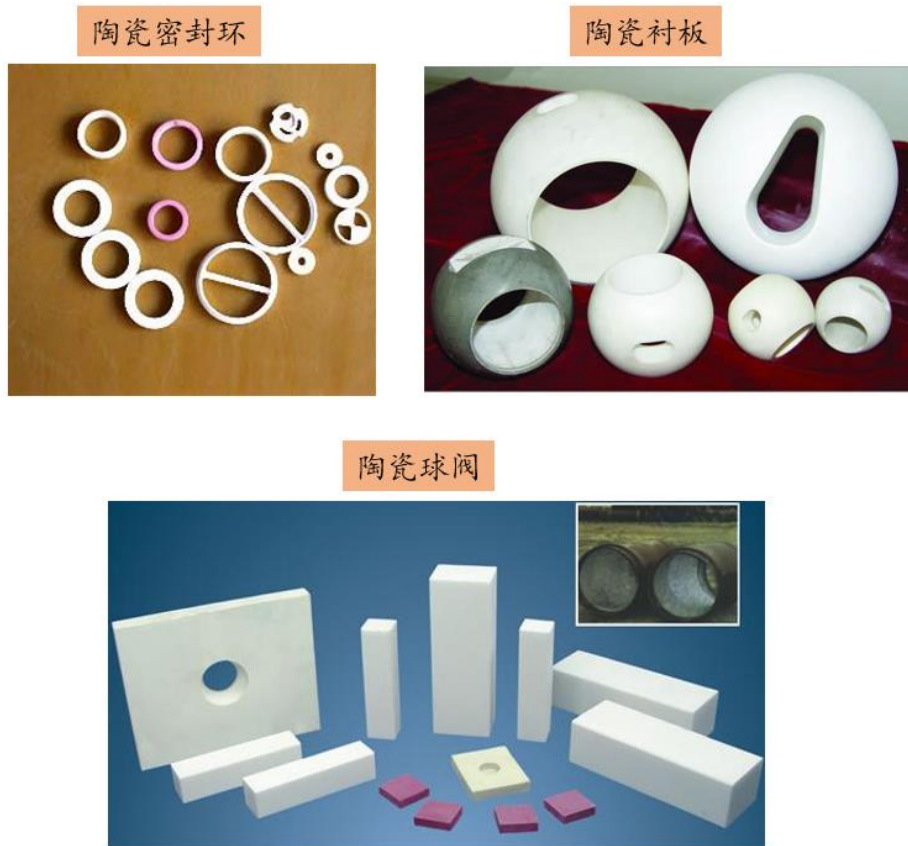
陶瓷制品分为块状制品、基片和层状制品两大类。传统的陶瓷成型方法包括干法成型、塑性成型和流态成型。

图表 117 陶瓷成型工艺的优缺点

成型方法	成型用料	制品形状	均匀性	效率	成本
干压成型	造粒粉料	扁平形状	偏差	高	低
冷等静压	造粒粉料	圆管圆柱形球状体	好	中等	中等
注浆成型	浆料	复杂形状，大尺寸	较好	较低	低
流延成型	浆料	<1mm 厚截面	好	高	中等
凝胶注模	浆料	复杂形状，厚截面，大尺寸	较好	低	较低
直接凝固注模	浆料	复杂形状厚截面	好	低	较低
挤出成型	塑性料	圆柱圆筒形，长尺寸制品	中等	高	中等
热压铸	粘塑性料	复杂形状，小尺寸	较好	高	较低
注射成型	粘塑性料	复杂形状，小尺寸	好	高	中等

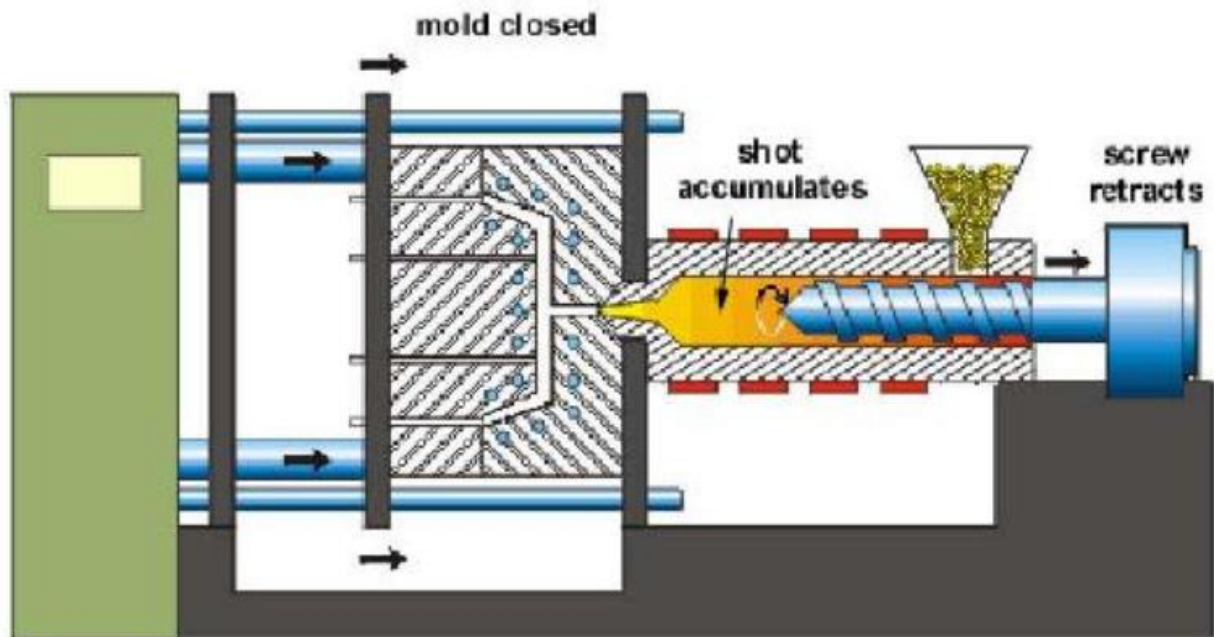
资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 118 干法成型：干压成型陶瓷产品



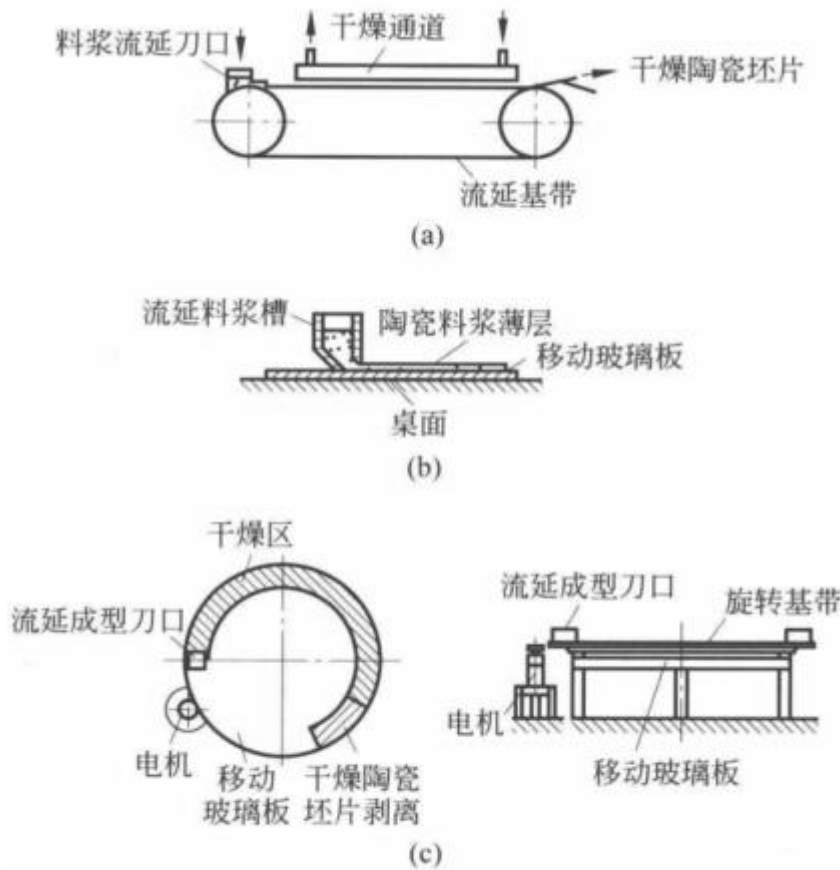
资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 119 塑性成型：螺旋式注射成型机示意图



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

图表 120 液态成型：不同类型的流延机



(a) 连续式；(b) 间歇式；(c) 旋转式

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

2.3 烧结工艺：坯体转变成高强度致密瓷体的必经之路

烧结是陶瓷制备过程中的一个最重要环节。所谓烧结，是指陶瓷坯体在一定的高温过程中，内部通过一系列的物理化学过程，使材料获得一定密度、微结构、强度和其他物理性能的一个过程。它对材料的微观结构、最终性质起着重要作用。传统陶瓷的烧结过程相当复杂，包括诸如相变、化学反应、溶解沉淀、晶粒生长并相互结合、致密化等过程。烧结的目的是：使坯体在高温下发生一系列的物理化学反应，形成预期的矿物组成的显微结构，通过物质传递变成致密的具有一定强度和固定外形的陶瓷。烧结的驱动力是粉体的表面能降低和系统自由能降低，烧结过程由低能量晶界取代高能量晶粒表面和坯体体积收缩引起的总界面减少来驱动；而促使坯体致密化的烧结机理包括蒸发-凝聚、晶格扩散、晶界扩散、粘滞流动等。

对于致密陶瓷材料，相对密度一般可达到 98% 以上，而对于透明陶瓷要求烧结后陶瓷内部气孔率趋近于零。烧结过程按照压力大小可分为常压烧结和压力烧结，按照反应可分为固相、液相、气相、活化以及反应烧结，按照是否产生液相又可分为固相烧结和液相烧结。常压烧结是在大气压条件下进行陶瓷烧结，气氛通常是空气，

也可以是其他还原性或惰性气氛，具有成本低，适合规模化生产和制备复杂形状制品的特点。大多数氧化物结构陶瓷都是采用这种烧结工艺。真空烧结因不易氧化适合金属陶瓷和碳化物陶瓷烧结。而对于共价键结合、自扩散系数小的非氧化物陶瓷，如 SiC、AlN、BN、B₄C 等高温陶瓷或者 ZrB₂、HfB₂ 等超高温陶瓷，常采用热压或热等静压烧结。此外，采用特殊加热原理实现快速烧结的一些新工艺，如微波烧结、放电等离子烧结、自蔓延合成与致密化烧结等，近些年也得到广泛关注与研究。

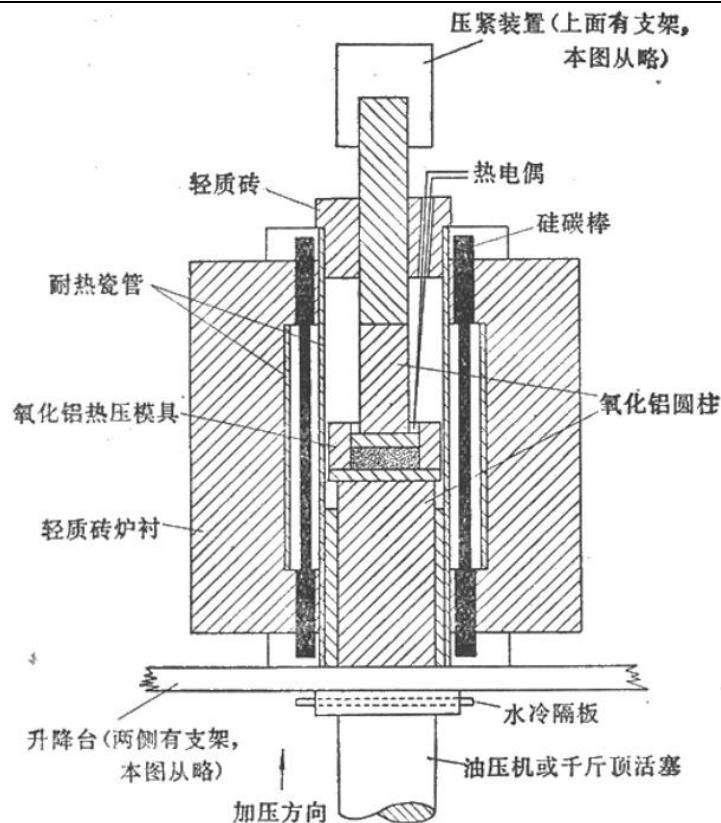
陶瓷烧结涉及到温度、气氛、压力等因素及调控，因而可以分为常压烧结、真空烧结、气氛烧结及各种压力烧结。

● 热压烧结：技术成熟且重要的烧结工艺

热压烧结包括一般热压烧结和等静压烧结。热压烧结指在烧成过程中施加一定的压力（在 10~40MPa），促使材料加速流动、重排与致密化。连续热压烧结生产效率高，但设备与模具费用较高，又不利于过高过厚制品的烧制。热压烧结是一种机械加压的烧结方法，此法是把陶瓷粉末装在模腔内，在加压的同时将粉末加热到烧成温度，由于从外部施加压力而补充了驱动力，因此可在较短时间内达到致密化，并且可获得具有细小均匀晶粒的显微结构。因此，对于共价键难烧结的高温陶瓷材料（如 Si₃N₄、B₄C、SiC、TiB₂、ZrB₂ 等），热压烧结是一种有效的致密化技术。

热压烧结可在低于常压烧结温度 100~200℃ 的稍低温度下得到接近理论密度的陶瓷产品，热压烧结还可以提高制品的性能，例如透明性、电导率、力学性能以及使用可靠性。但热压烧结通常只能制造形状单一的产品，在很多情况下后期加工会大大增加制造成本。

图表 121 热压烧结装置示意图



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

● 气氛烧结：促进陶瓷材料致密化的重要手段

气氛烧结是指陶瓷坯体在通入一定气体的炉膛内进行烧结的方法。不同的材料选择适宜的气氛烧结，有助于烧结过程，提高制品致密化程度、获得良好的性能的制品。气氛烧结中常用的气体有真空、氢、氧、氮和惰性气体（如氩气）等。例如透明氧化铝陶瓷可用氢气气氛烧结，透明铁电陶瓷宜用氧气气氛烧结，氮化物陶瓷如氮化铝等宜用氮气气氛烧结。

图表 122 气氛烧结压力炉



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

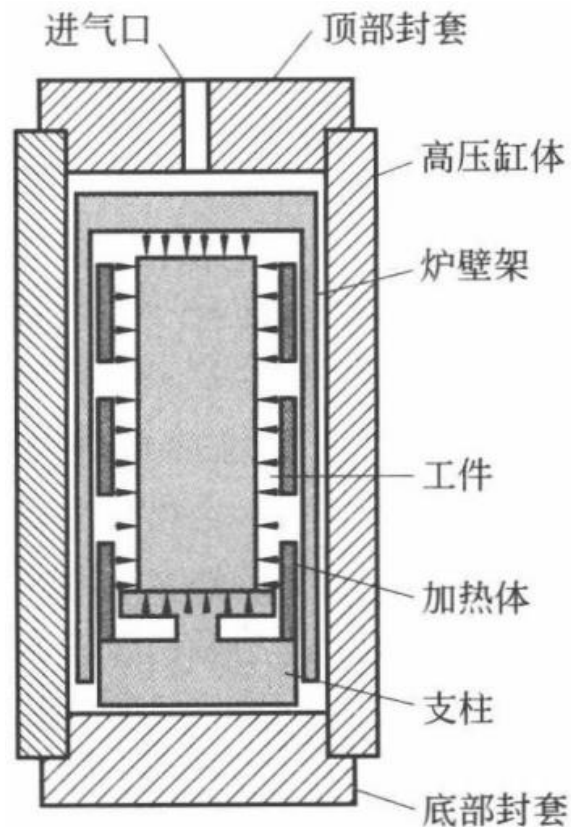
● 热等静压烧结：较为理想的烧结方式

热等静压是一种集高温、高压于一体的工艺生产技术，是工程陶瓷快速致密化烧结最有效的一种方法，其基本原理是：以高压气体作为压力介质作用于陶瓷材料（包封的粉末和素坯，或者烧结体），使其在加压过程中经受各向均衡的压力，借助于高温和高压的共同作用达到材料致密化。热等静压最早是在 1955 年由美国 Battelle Columbus 实验室研制成功，随后瑞典的 ASEA 公司，美国的 ABB 公司生产出商业用热等静压设备。从 20 世纪 60 年代开始，热等静压技术已经在粉末冶金领域（硬质合金产品的烧结）得到广泛应用。随着设备所能达到的温度和压力不断提高，也引起了陶瓷工作者的极大兴趣。70 年代后热等静压技术现代陶瓷烧结领域，成为许多高性能陶瓷产品制备的一种关键技术。

热等静压装置主要由高压容器、加热炉、压缩机、真空泵、储气罐、冷却系统和计算机控制系统组成，其中高压容器为整个设备的关键装置，主要包括密封环、压力容器、顶盖和底盖等，高压容器通常都设有冷却壁，内部的加热炉与容器壁热绝缘，水流提供外部冷却。加热炉主要包括发热体、隔热屏和热电偶等，其中发热体材料主要有 Ni-Cr、Fe-Cr-Al、Pt、Mo 和石墨，这些发热体材料允许使用的最高温度与气氛有关。温度测量用铂铑热电偶（Pt-6Rh/Pt-30Th），使用温度为 1750℃，钨/钨热电偶使用温度至 2000℃，B4C/C 热电偶可用至 2400℃（长期使用则为

2200℃)。气体增压部分主要有气体压缩机、过滤器、止回阀、排气阀和压力表等。控制系统主要包括功率控制、温度控制和压力控制等。

图表 123 热等静压炉典型结构



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

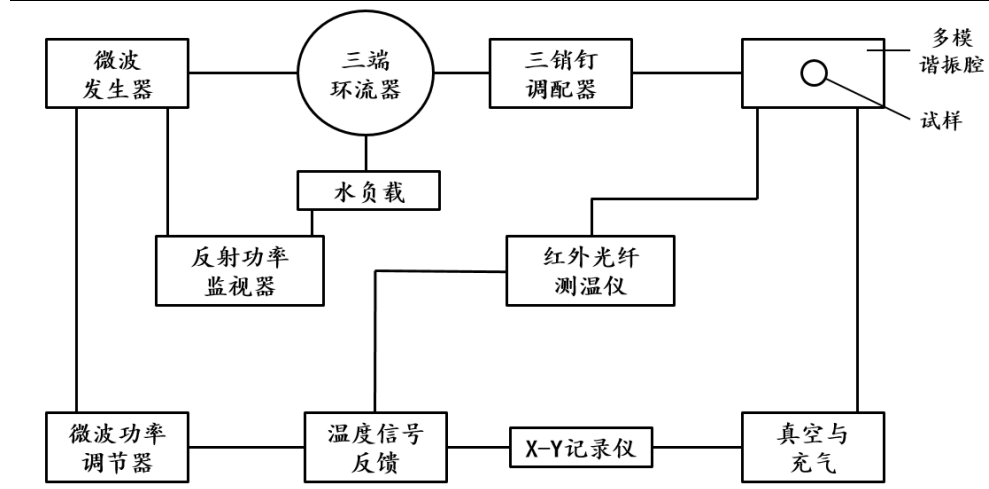
● 微波烧结：快速、均匀、能效高且无热原污染的烧结方式

微波是一种电磁波，它遵循光的有关定律，可以被物质传递、吸收或反射，同时还能透过各种气体，很方便地实现在各种气氛保护下的微波加热及有气相参与的合成反应。微波烧结就是利用微波加热原理来对材料进行的烧结。作为一种新型的陶瓷加工技术，微波烧结的应用时间并不长。加拿大的 W.R.Tinga 等人在 60 年代末期最早尝试了用微波加热及烧结陶瓷材料，并获得了初步成功。进入 80 年代以后，人们对微波烧结技术进行了广泛而深入的研究，并成功的制备出了 Al_2O_3 、 B_4C 、 Y_2O_3 - ZrO_2 、 SiO_2 、 TiO_2 、 ZnO 等陶瓷材料。

典型的微波烧结设备主要由微波发生器、波导管和加热腔体等组成。微波源产生的微波能量由传输系统导入加热腔中，对放置在腔体中的试样进行加热和烧结。由于传输系统并不总是与加热腔完全匹配，因此会有一部分微波能被反射回来，而环行器的作用就是将反射回来的微波导向水负载，以保护微波源。微波烧结的工艺参数主要有微波源功率、微波频率、烧结时间和烧结速度。微波源功率的大小影响着烧结腔中电场的强度，从而也影响着试样的升温速度。微波频率影响着微波烧结过程中试样吸收微波能的功率密度。频率越高则试样在单位时间、单位体积内吸收的微波能量就越多。烧结时间和加热速度对烧结体的组织性能有很大的影响。高温快烧和低温慢烧均会造成组织晶粒尺寸不均匀、孔隙尺寸过大等现象，这些都是材

料性能恶化的主要原因。

图表 124 微波加热烧结系统



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

● 放电等离子烧结：快速低温且高效的烧结方式

放电等离子烧结又称等离子活化烧结或等离子辅助烧结，是近年来发展起来的一种新型的快速烧结技术。放电等离子烧结技术融等离子活化、热压、电阻加热为一体，具有升温速度快、烧结时间短、冷却迅速、外加压力和烧结气氛可控、节能环保等特点，可广泛用于磁性材料、梯度功能材料、纳米陶瓷、纤维增强陶瓷和金属间复合材料等一系列新型材料的烧结，并在纳米材料、复合材料等的制备中显示了极大的优越性，是一项有重要使用价值和广泛前景的烧结新技术。

图表 125 放电等离子加热烧结炉

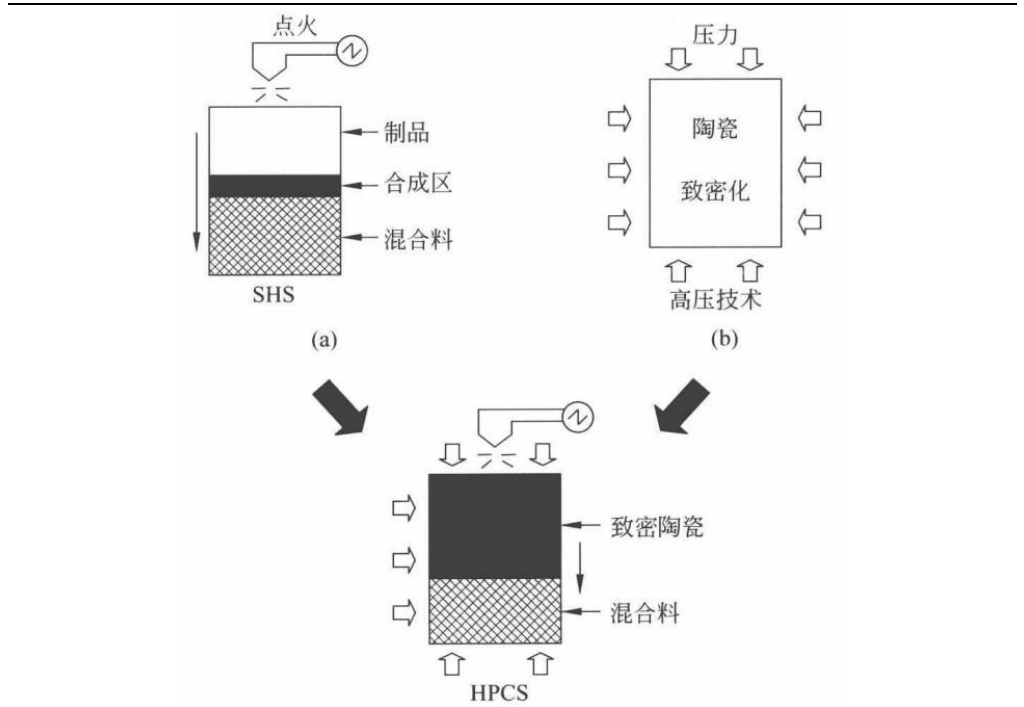


资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

● 自蔓延高温合成及烧结：制备块体陶瓷材料的极佳工艺

自蔓延高温合成技术，是利用化学反应自身放热，依靠燃烧波自我维持，并通过控制自维持反应速度、燃烧温度、反应转化率等条件，进而获得具有指定成分和结构产物的一种新型材料制备技术。自 1967 年前苏联的 Merzhanov 等发明后，经其国家保密 20 余年后，现已受到国际物理、化工、冶金、材料与机械工程等领域界的日益重视和广泛应用，已成为合成、制造和加工处理材料的新技术。生产效率提高，产品成本降低，是目前 SHS 技术研究与开发的主要方向。

图表 126 高压兹曼延燃烧烧结法



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

2.4 加工工艺：改善表面光洁度及尺寸精度的关键工艺

陶瓷经成型和烧结，虽然具有一定的形状和尺寸，但较大的烧结收缩，使得烧结体尺寸偏差通常在毫米数量级以上，必需要加工之后才能应用。

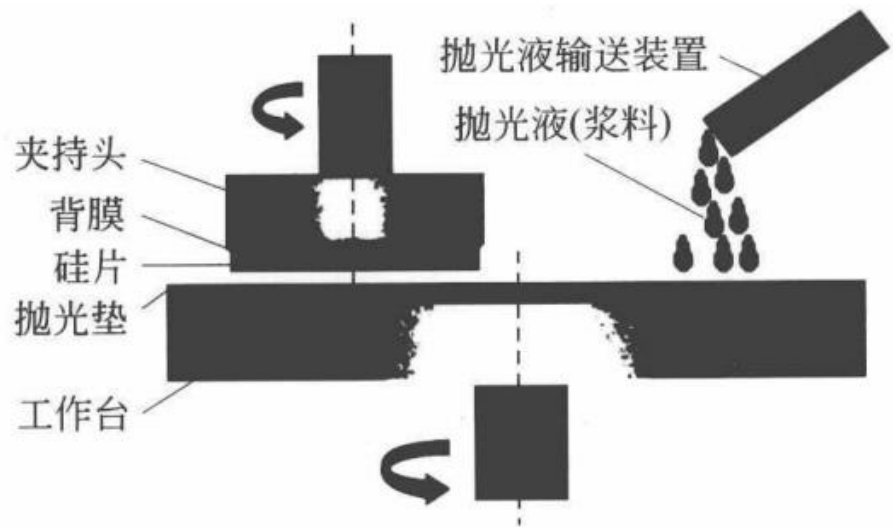
图表 127 陶瓷材料的主要加工方式

加工方式	具体措施
机械加工	磨削，研磨，抛光
电加工	电火花
光学加工	激光、超声波
化学加工	化学腐蚀、电泳
复合加工	超声电火花，化学-机械，ELID 磨削

资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

- **机械加工：**陶瓷部件的机械加工主要包括磨削、研磨、抛光，是目前陶瓷工业上广泛使用的机械加工方式。

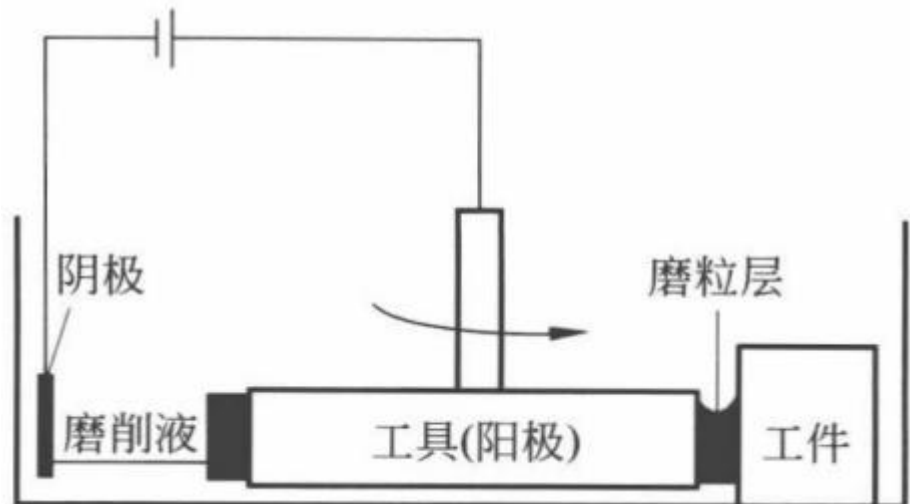
图表 128 典型的化学机械抛光原理



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

- **化学加工：**陶瓷部件的化学加工主要包括化学研磨、化学刻蚀、电泳抛光及磨削。

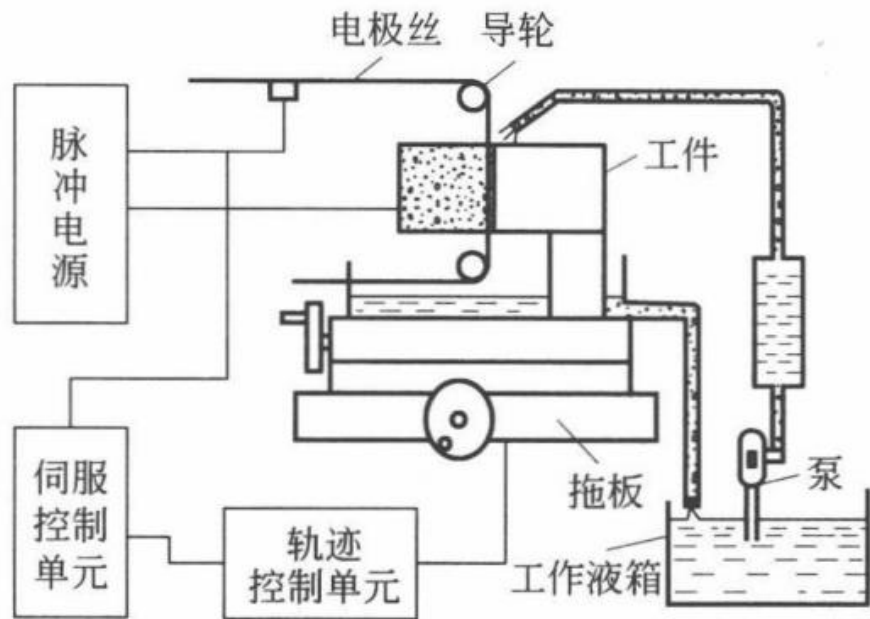
图表 129 电泳磨削原理



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

- **电火花加工：**利用工具点击及工件电极间脉冲放电时产生的电蚀现象对材料进行加工。火花放电时，在放电区域能量高度集中，瞬间温度高达10000℃左右，足以使陶瓷材料局部熔化和气化而被蚀除，因而可加工相聚晶金刚石、立方氮化硼等一类超硬陶瓷。

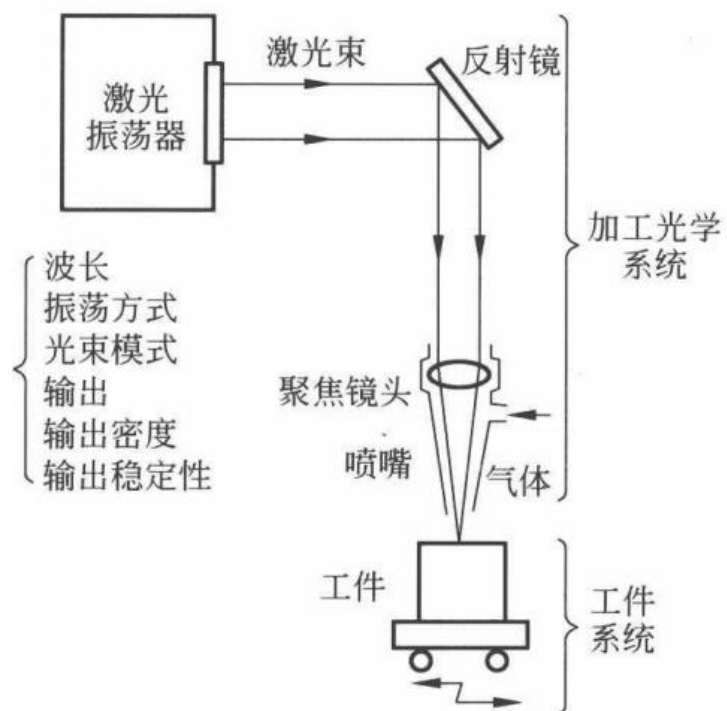
图表 130 电火花线切割装置



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

- **激光加工：**工程陶瓷加工的新方法，只要材料能吸收激光就可以进行加工。

图表 131 激光加工装置的基本构造

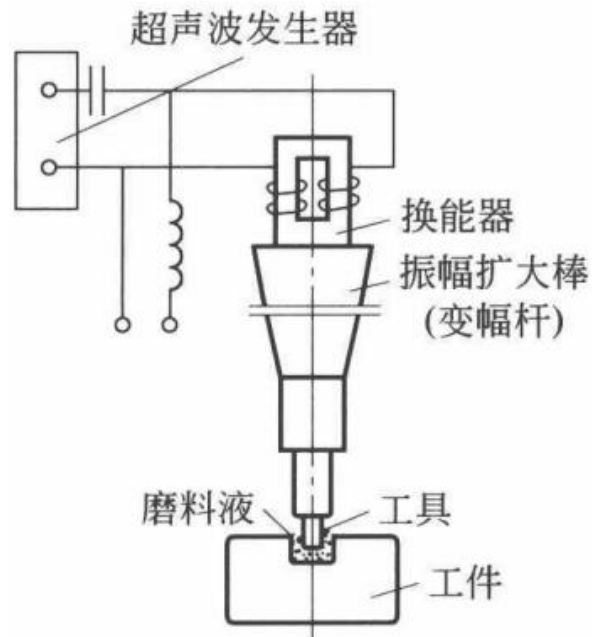


资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

- **激光加工：**在加工工具或被加工材料上施加超声波震动，在工具和工件

中加入由磨料和液体混合的悬浮液，并以较小的压力使工具贴压在工件上进而在超声振动中进行加工。

图表 132 超声加工的装置示意图



资料来源：《结构陶瓷》，华安证券研究所

- **打孔加工：**主要有机械加工、超声波加工及激光加工等方式，是陶瓷加工的重要技术。

图表 133 陶瓷打孔装置



资料来源：搜狐网，华安证券研究所

3 先进陶瓷正逐步推动诸多高技术领域的发展

先进陶瓷已逐步成为新材料的重要组成部分，成为许多高技术领域发展的重要关键材料，备受各工业发达国家的极大关注，其发展在很大程度上也影响着其他工业的发展和进步。由于先进陶瓷特定的精细结构及其高强、高硬、耐磨、耐腐蚀、耐高温、导电、绝缘、磁性、透光、半导体以及压电、铁电、声光、超导、生物相容等一系列优良性能，被广泛应用于国防、化工、冶金、电子、机械、航空、航天、生物医学等国民经济的各个领域。

图表 134 先进陶瓷国内外公司简略



资料来源：新材料在线，华安证券研究所

图表 135 先进陶瓷产业链

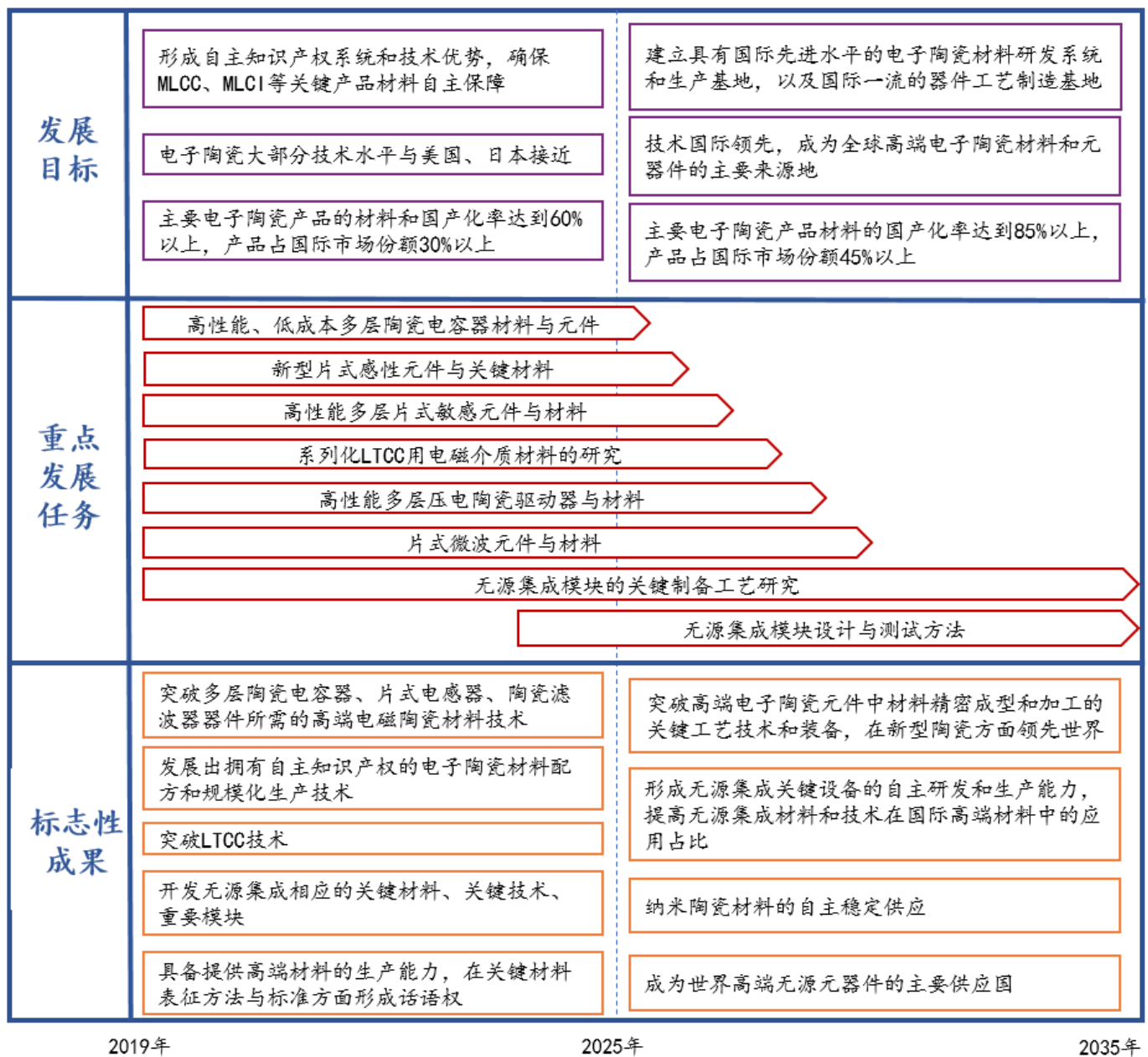


资料来源：新材料在线，华安证券研究所

3.1 电子陶瓷行业：推动电子信息业迅猛发展

电子陶瓷是无源电子元件的核心材料，是电子信息技术的重要材料基础。

图表 136 中国电子功能陶瓷发展路线图



资料来源：《我国电子陶瓷技术发展的战略思考》，华安证券研究所

近年来，随着电子信息技术日益走向集成化、智能化和微型化，以半导体技术为基础的有源器件和集成电路迅速发展，无源电子元件日益成为电子元器件技术的发展瓶颈。而电子陶瓷材料及技术是制约高端元件发展的重要因素之一，越来越成为制约电子信息技术发展的核心技术之一。从战略高度研判国内外电子陶瓷材料与元器件技术的发展现状，分析我国相关领域的问题及对策，对于推动我国高端电子元器件产业的发展具有重要意义。

我国是无源电子元件大国但不是强国。从产品产量上看，我国无源元件的产量

占到了全球的 40% 以上，多种电子陶瓷产品的产量居世界首位，已经形成了一批在国际上拥有一定竞争力的元器件产品生产基地，同时拥有全球最大的应用市场。然而，我国但元件产值不足全球产值的四分之一，高端元件大量依赖进口。目前高端电子陶瓷材料市场主要为日本企业所垄断，国内生产的材料少部分用于高端元器件产品，大部分用于中低端元器件产品；国内高水平科研成果在转化过程中遭遇来自原材料、生产装备、稳定性等方面的瓶颈，所占市场份额相对较低。在产业技术方面，我国的电子陶瓷及其元器件产品生产基地已经形成了相当的规模，并拥有国际先进的生产水平。

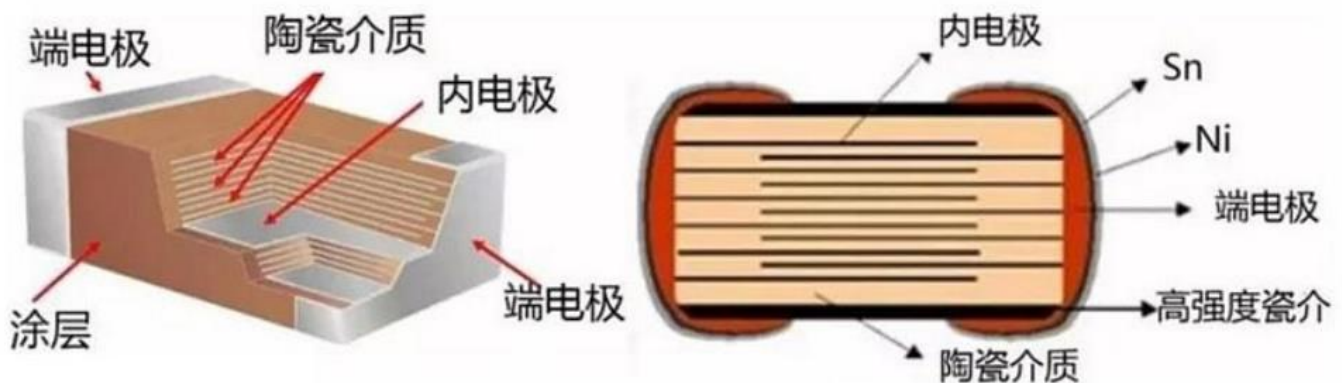
3.1.1 MLCC 行业

电子元器件是构建电子系统最基础的部件，不管多么复杂的电子系统，实际上都是由一个个电子元器件组合而成。电子元器件按是否影响电信号特征进行分类，可分为被动元件与主动元件。其中被动元件无法对电信号进行放大、振荡、运算等处理和执行，仅具备响应功能且无需外加激励单元，是电子产品中不可或缺的基本零部件。电阻、电容、电感是三种最主要的被动元件，其中电容应用范围较为广泛。电容器是充、放电荷的被动元件，其电容量的大小，取决于电容器的极板面积、极板间距及电介质常数。根据电介质的不同，电容器可以分为陶瓷电容器、铝电解电容器、钽电解电容器和薄膜电容器等。其中陶瓷电容器因为具备包括体积小、电压范围大等特点，目前在电容器市场中占据超过一半的市场份额。

陶瓷电容器可以分为单层陶瓷电容器、片式多层陶瓷电容器和引线式多层陶瓷电容器。其中，MLCC 是由印好电极（内电极）的陶瓷介质膜片以错位的方式叠合起来，经过一次性高温烧结形成陶瓷芯片，再在芯片的两端封上金属层（外电极）而成。

MLCC 全称片式多层瓷介质电容器，以电子陶瓷材料作为介质，将预制好的陶瓷浆料通过流延方式制成要求厚度的陶瓷介质薄膜，然后在介质薄膜上印刷内电极，并将印有内电极的陶瓷介质膜片交替叠合热压，形成多个电容器并联，并在高温下一次烧成一个不可分割的整体电子元器件，最后在电子元器件的端部涂敷外电极浆料，使之与内电极形成良好的电气连接，形成 MLCC 的两极。

图表 137 MLCC 结构示意图

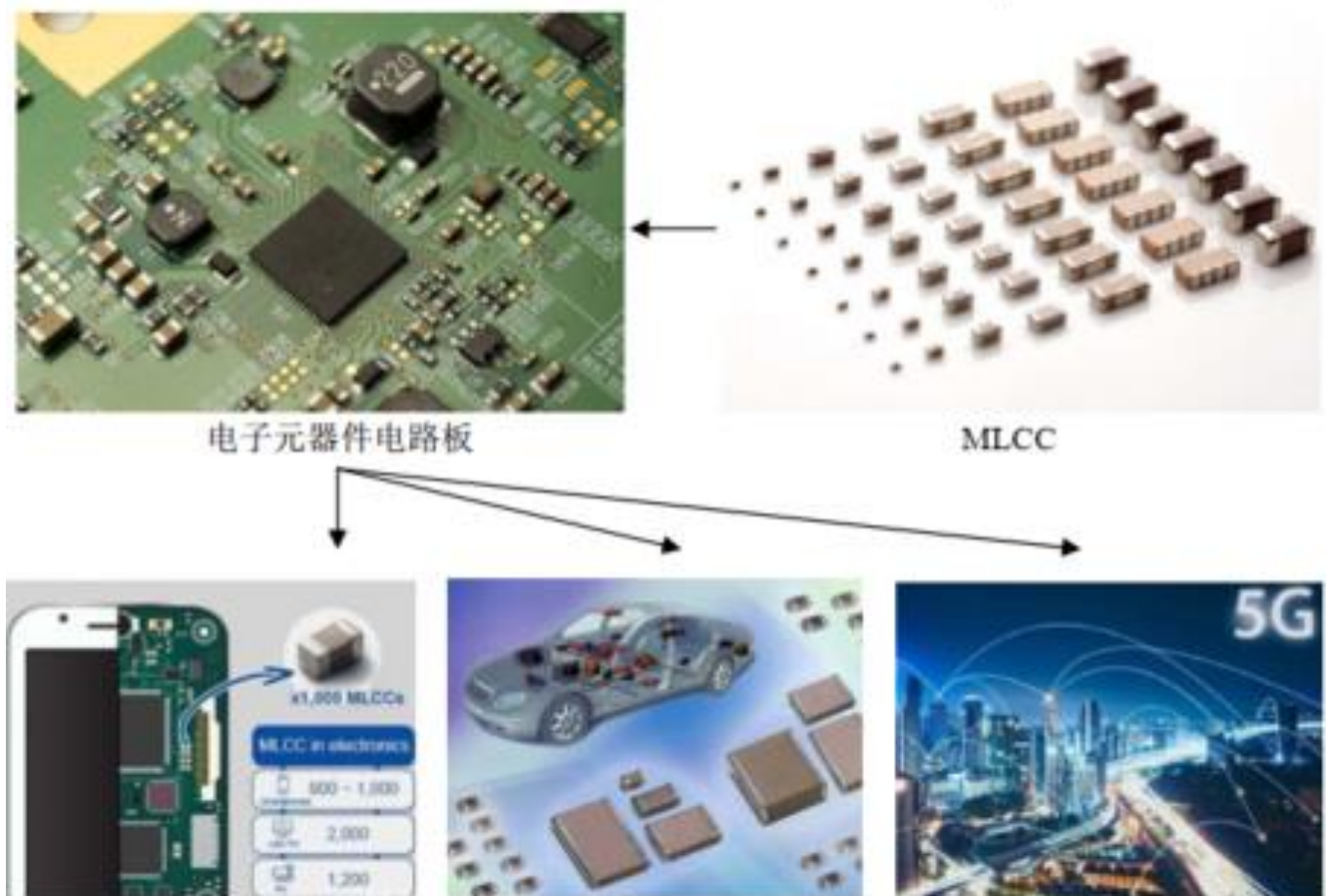


资料来源：CNKI，华安证券研究所

从需求端看，根据中国电子元件行业协会数据显示，2020 年全球 MLCC 行业市

场规模达到 1017 亿元,而中国 MLCC 行业市场规模约为 460 亿元,约占全球的 45.23%。MLCC 行业的发展主要受智能化消费电子产品的普及与更新、新能源汽车和无人驾驶技术等带来的汽车电子化水平的提高、5G 通信的推广和工业自动化不断深入等终端需求驱动。目前,消费电子产品在 MLCC 的下游应用领域中依然占据主导地位,但汽车的新能源化趋势将大大促进中高压、高容等高端 MLCC 产品的需求增长,因此新能源汽车的大力发展有望成为行业新的增长点。

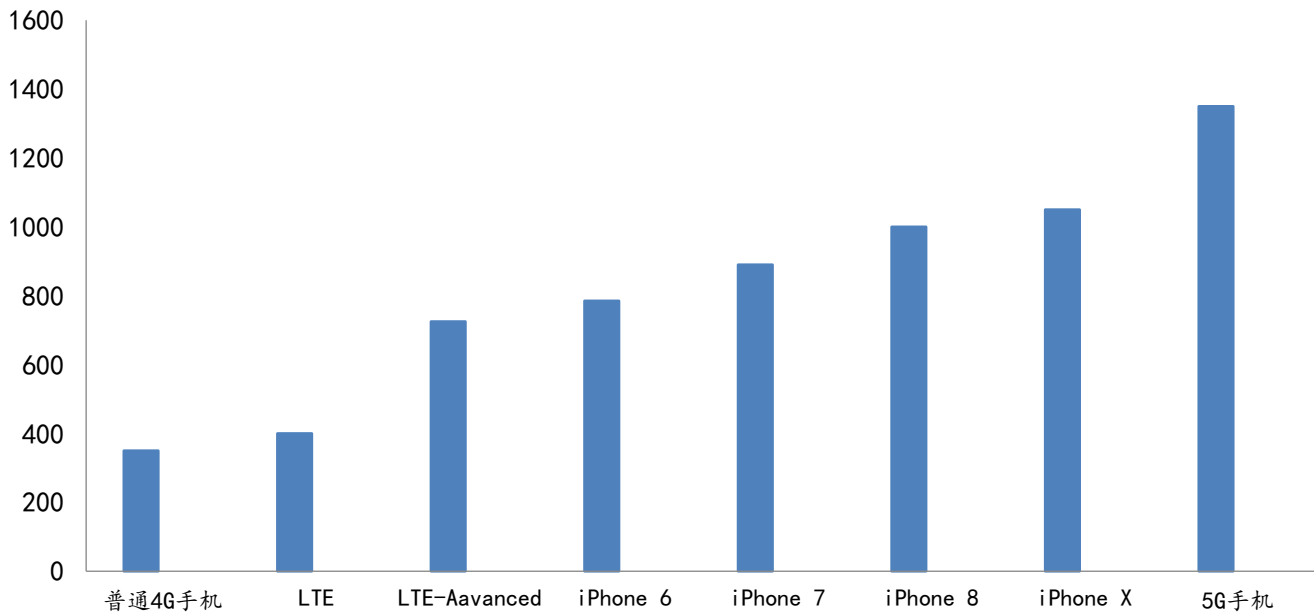
图表 13 MLCC 的应用



资料来源:博迁新材招股说明书,华安证券研究所

消费电子方面,高端手机 MLCC 的用量较 4G 时代约 700 个上升为 1000 个以上。5G 手机功耗更大,终端产品对更小尺寸、更大容量、更低功耗的高端 MLCC 需求持续增多,随着 5G 手机的渗透率不断提升,预计 2025 年智能手机对 MLCC 的需求量将达到 14000 亿颗。

图表 139 不同手机对 MLCC 的需求量 (颗)



资料来源：立鼎产业研究院，华安证券研究所

图表 140 全球 5G 手机渗透拉动的 MLCC 需求预测

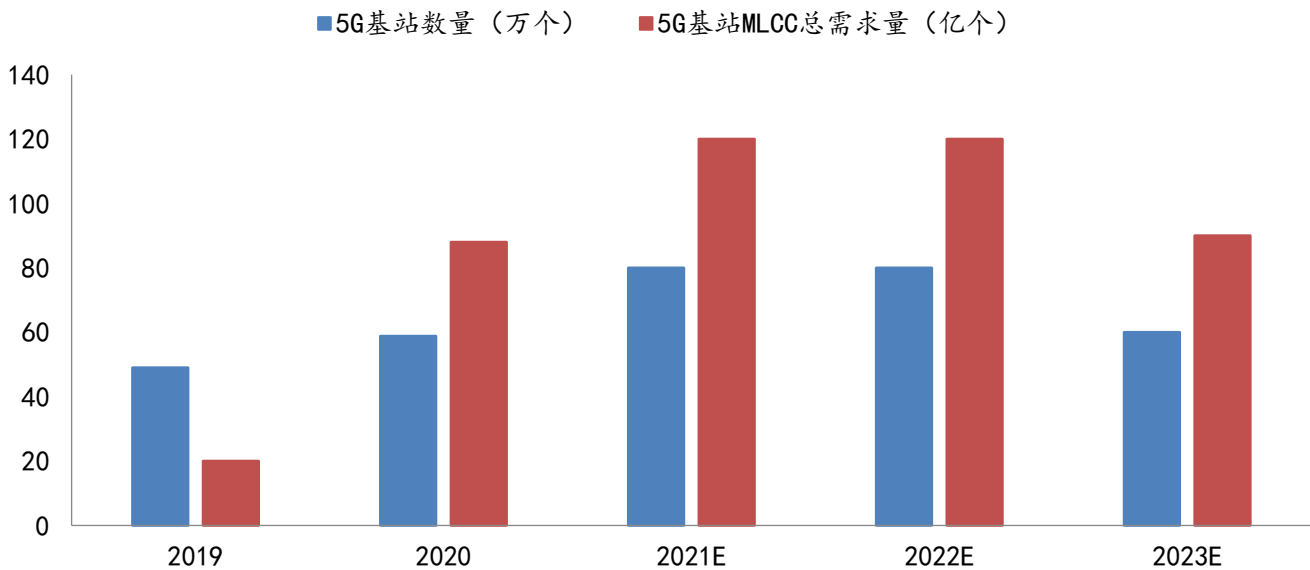
	2019	2020	2021	2022E	2023E	2024E	2025E
5G 手机 MLCC 增加量/颗	300	300	300	300	300	300	300
5G 手机出货量/万台	0.187	2.4	5.40	8.34	11.46	11.80	12.16
智能手机出货量/亿台	14.86	12.82	13.50	13.91	14.32	14.75	15.19
智能手机出货量同比/%		-13.73%	5.30%	3.00%	3.00%	3.00%	3.00%
5G 手机渗透率/%	1.26%	18.72%	40%	60%	80%	80%	80%
5G 手机 MLCC 增量/颗	56.1	720	1620	2503	3437	3540	3647
非 5G 类智能手机 MLCC 用量/颗	700	700	700	700	700	700	700
智能手机 MLCC 用量/颗	10458	9694	11070	12236	13463	13867	14283

注：IDC 预计智能手机出货量增速将维持在 3% 左右，同时 5G 手机渗透率在 2023 年末将会达到 80%

资料来源：IDC，华安证券研究所

5G 基站方面，单个 4G 基站 MLCC 需求量约 3750 个，5G 基站需求则大幅提升 4 倍至 15000 个电感需求方面。由于 5G 基站天线通道数增加，以及天线有源化对天线设计提出了更高的要求，被动元件需求量大幅增加。数据显示，2019 年，中国 5G 基站 MLCC 总需求量为 20 亿个，2020 年，中国 5G 基站 MLCC 总需求量为 88 亿个，较上年同比增长 340%，观研报告网预计 2022 年中国 5G 基站 MLCC 总需求量将达 120 亿个。

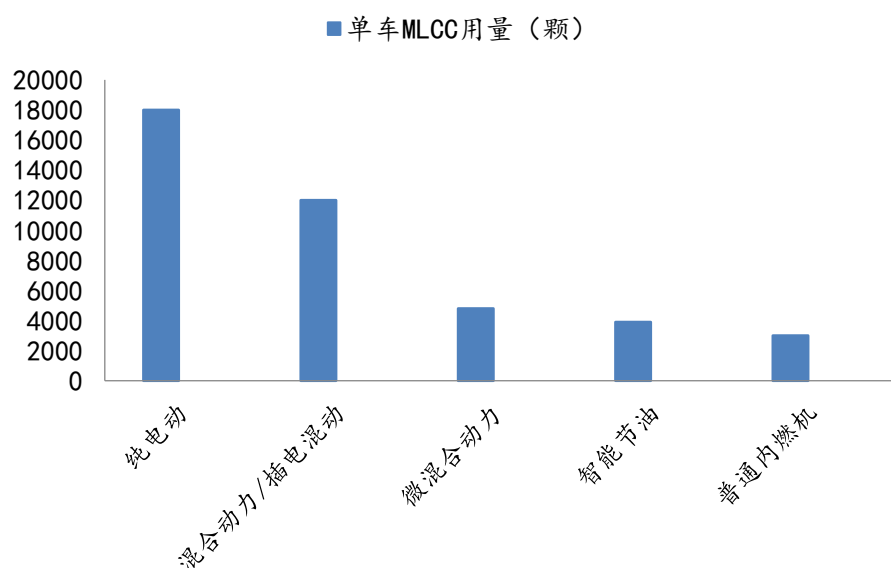
图表 141 2019-2023 年中国 5G 基站 MLCC 总需求量、增速及预测



资料来源：观研报告网，华安证券研究所

汽车方面，汽车电子发展对 MLCC 市场规模推动主要来自汽车电子化率和新能源汽车渗透率的提高。汽车电子化率方面，从使用量上来看，汽车领域对于 MLCC 的需求量显著高于消费电子，其中动力系统带来的 MLCC 增量较为显著。每辆汽车使用的电子元件，中端车平均为 6300 个，高端车为 8200 个，纯电动汽车增加到 14000 个，其中有一半是 MLCC，这意味着随着新能源汽车的不断普及，MLCC 需求量会不断增长。从发展方向上看，汽车电子正成为各大主流 MLCC 厂商的主要布局方向，电动车 (EV) 的需求亦有望迎来较快增长。

图表 142 不同汽车单车用 MLCC 量



资料来源：锐观网，华安证券研究所

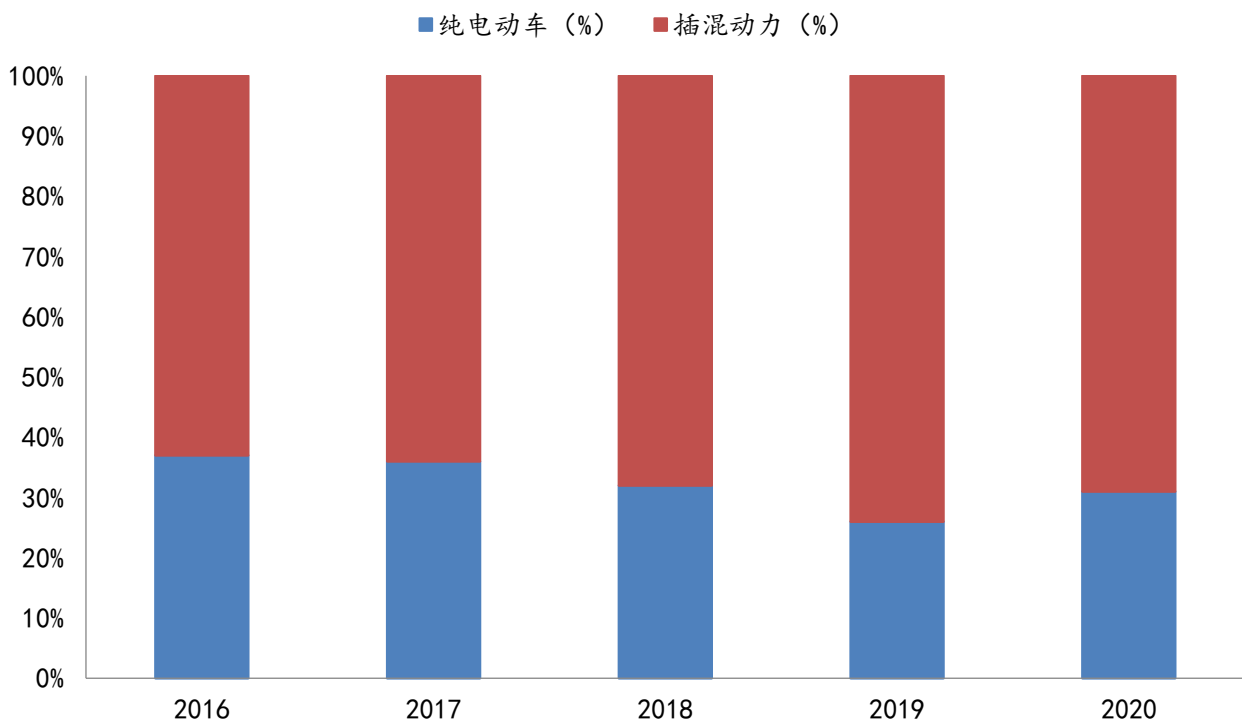
图表 143 汽车领域 MLCC 增量测算

	2020	2021	2022E	2023E	2024E	2025E
汽车电子化 MLCC 增量						
全球汽车销量 (万台)	7803	8105	8348	8599	8857	9122
全球汽车销量增速 (%)		4.4%	3%	3%	3%	3%
汽车电子化 MLCC 单车增量 (颗)	200	200	200	200	200	200
汽车电子化 MLCC 总增量 (亿颗)	156	162	167	172	177	182
新能源汽车增量						
全球新能源汽车销量 (万台)	331	675	946	1232	1535	1854
全球新能源汽车销量增速 (%)	4%	8%	11%	14%	17%	20%
新能源汽车 MLCC 单车增量 (颗)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
新能源汽车 MLCC 总增量 (亿颗)	66	135	189	246	307	371
汽车领域 MLCC 总增量 (亿颗)	222	297	356	418	484	553

注：全球汽车销量取过去五年增速均值；GGII 数据显示，预计到 2025 年全球新能源汽车渗透率将达到 20% 以上。

资料来源：汽车之家，产业信息网，EVTank，华安证券研究所

图表 144 2016-2020 年全球新能源乘用车销量结构



资料来源：观研报告网，华安证券研究所

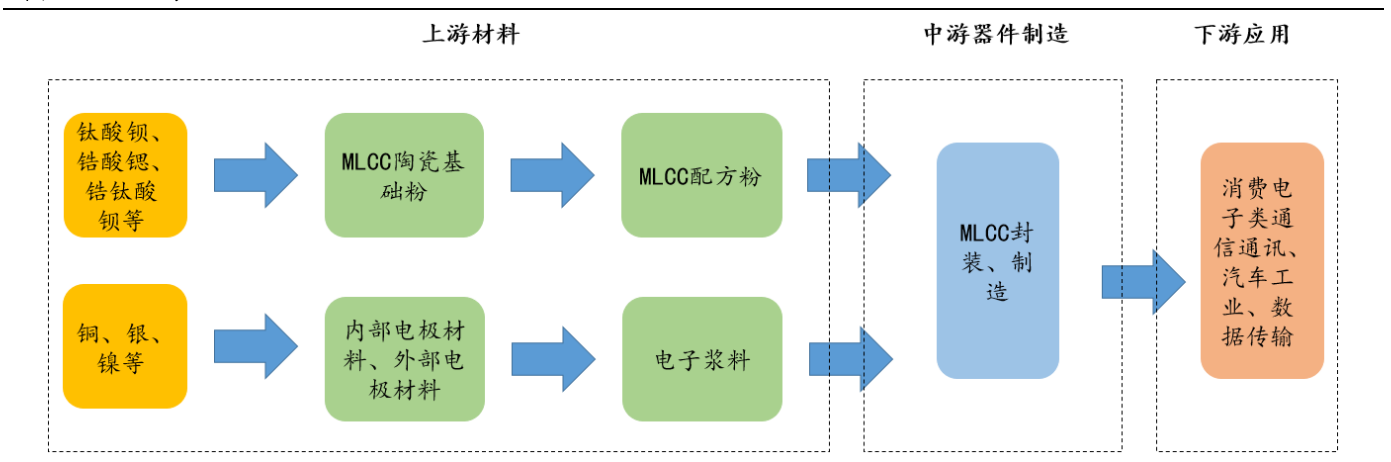
上游材料方面，MLCC 使用的陶瓷粉体是在钛酸钡基础粉上添加改性添加剂形成的配方粉。钛酸钡可以作为电介质材料的主要原因在于其常温条件下介电常数较高，在 MLCC 的成本结构中占比在 20%-45% 之间，粉体的自制直接影响 MLCC 的盈利。因而 MLCC 下游的高景气度也会催生大量陶瓷粉体的需求。

图表 145MLCC 成本拆分

成本构成	成本比重 (%)	
	低容量 MLCC	高容量 MLCC
陶瓷粉体	20-25	35-45
内电极 (主要是镍内浆)	5	5-10
外电极 (主要是铜内浆)	5	5-10
包装材料	20-30	1-5
人工成本	10-20	10-20
设备折旧及其他	20-35	20-30

资料来源: CNKI, 华安证券研究所

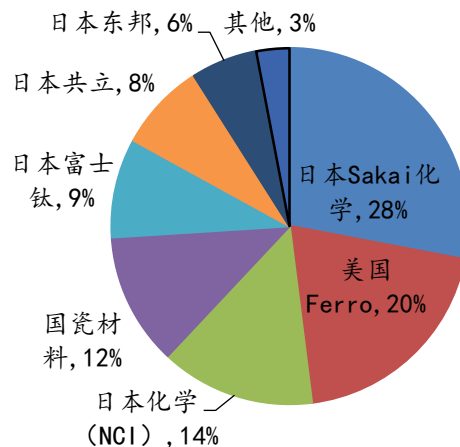
图表 146MLCC 产业链



资料来源: 前瞻产业研究院, 华安证券研究所

供给端, 目前能够实现高纯度、精细度和均匀度的钛酸钡粉体制备的厂商以日美厂商为主。日本 Sakai 化学、日本化学、日本 FujiTi、美国 Ferro 等占据 85%左右份额, 可以制备 100nm 粒径以下的钛酸钡粉体。

图表 1472019 年全球 MLCC 陶瓷粉末市场格局



资料来源: 智研咨询, 华安证券研究所

日本堺化学及日本化学合计占据了 42% 的市场份额, 美国 Ferro 占据了 20% 的市场份额。富士钛 (2005 年被石原产业收购)、日本东邦钛业厂商等也占据主要市场地位。高纯、超细陶瓷粉体的制造工艺是制约国产 MLCC 发展的瓶颈, 目前国内的陶瓷粉料厂商如国瓷材料、风华高科、三环集团已掌握相关纳米分散技术, 能够满足中低端 MLCC 的生产需求。但目前一部分特殊功能、超细高纯度粉料依旧依赖进口, 以满足高端 MLCC 的生产需要。国内厂商中国瓷材料处于领先地位, 占据世界 12%、全国 80% 的市场份额, 根据中国粉体网报道, 国瓷材料是国内首家、继日本堺化学之后全球第二家成功运用水热工艺批量生产纳米钛酸钡粉体的厂家, 打破了日本企业在 MLCC 陶瓷粉体上的垄断地位。

图表 148 MLCC 产业链中陶瓷粉体及陶瓷电容器相关企业



注: 标红色公司为 A 股上市公司

资料来源:《中国先进陶瓷产业大全 2020》, 华安证券研究所

3.1.2 片式电感器行业

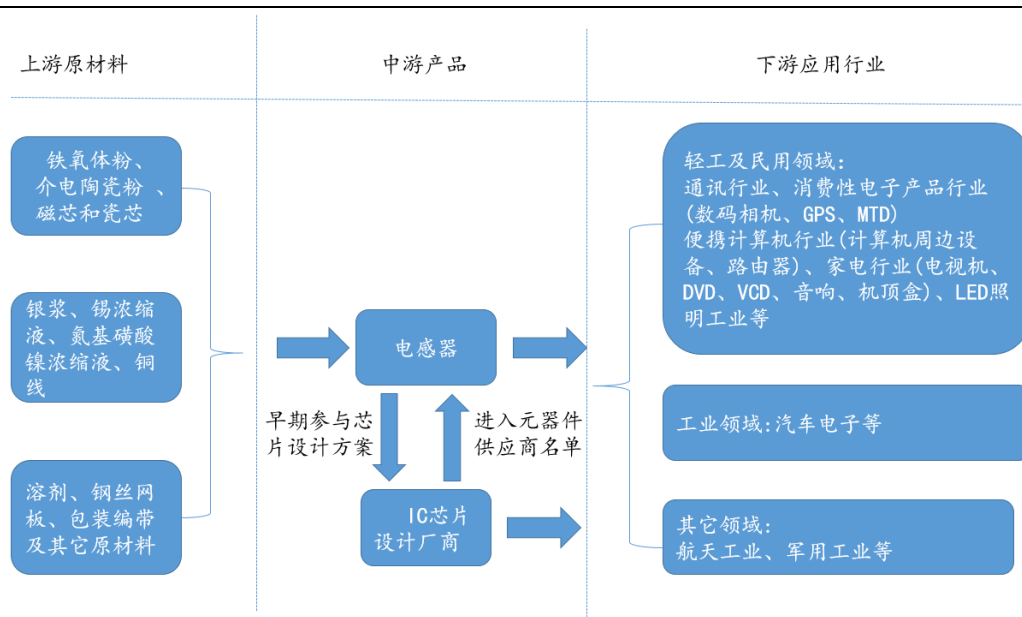
电感是三大被动元器件之一，由于电感较难被集成到集成电路上，集成上去后品质因素不好，因此作为被动元器件之一将长期存在。近年来，下游电子产品出货量增长不断带动电感器需求增长。目前我国电感器市场中传统插装电感器仍旧占据约 30% 的市场份额，片式电感器占据约 70% 的市场份额，其中，绕线片式电感期间的市场份额约为 7%，叠层片式电感器的市场份额约为 85%。相较日本、欧美等发达国家的片式化率达到 85% 以上的水平，我国约 70% 的片式化率水平仍较低，有较大拓展空间，未来片式原件对传统元件的替代进程将进一步加快。

图表 149 片式电感细分领域使用数量

应用领域	产品	数量
功能手机	片式电感、磁珠	20-30
智能机	片式电感、磁珠	40-60
LCD 显示器	片式电感、磁珠、功率电感	60-100
LCD 电视	片式电感、磁珠	80-120
PC 主机板	片式电感、磁珠	25-35
笔记本	片式电感、磁珠	50-60
机顶盒	片式电感、磁珠、功率电感	10-20
数码相机	片式电感、磁珠、功率电感	10-31
DVD	片式电感、磁珠	20-30
车载/汽车电子	片式电感、磁珠、功率电感	20-30
无线网络终端	片式电感、磁珠、功率电感	10-15
平板电脑	片式电感、磁珠、功率电感	10-20
XDSL/Cable Modem	片式电感、磁珠、功率电感	8-20

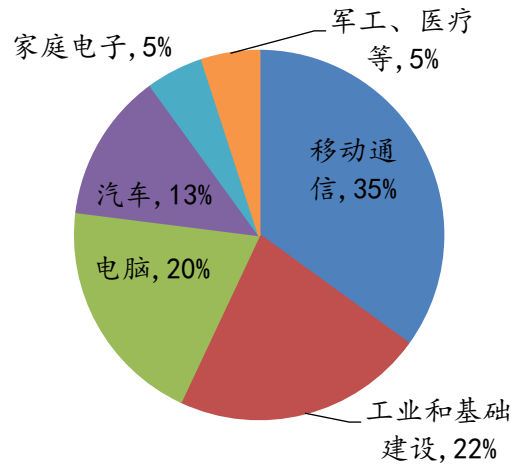
资料来源：前瞻产业研究院，华安证券研究所

图表 150 电感器产业链结构



资料来源：前瞻产业研究院，华安证券研究所

图表 151 全球电感终端应用市场占比分布情况

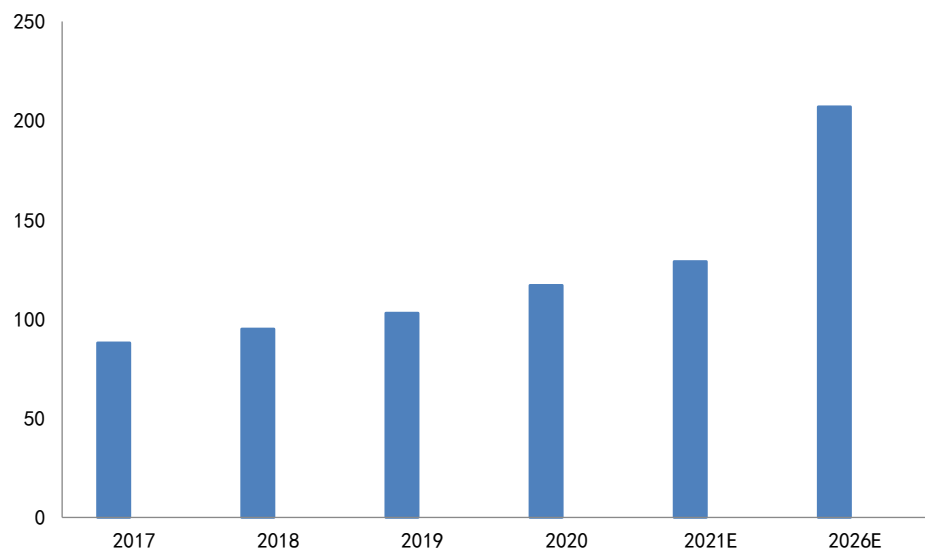


资料来源：华经产业研究院，华安证券研究所

片式电感的上游原材料包括银浆、铁氧体粉、介电陶瓷粉、磁芯、导线等。下游行业主要是通讯、电脑、消费类电子、小家电、卫星通讯以及汽车电子等领域的终端电子产品制造业。

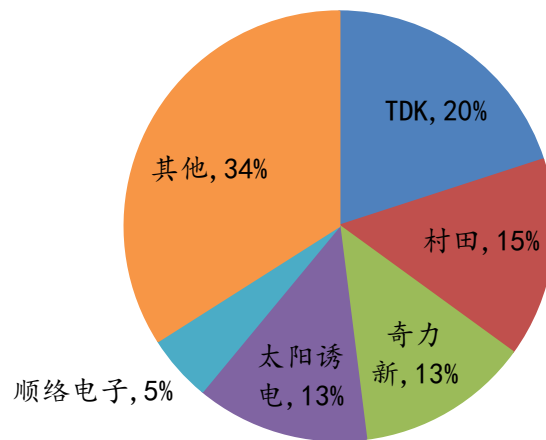
需求端，终端产品小型化和多功能化的发展趋势，为新型片式电感的应用提供了日趋广阔的前景。电感在电子设备(消费电子、汽车、工控、军工和医疗等)中必不可少，有过滤噪声、处理信号、稳定电流和抑制电磁波干扰的功能。随着中国通讯技术的快速更迭以及物联网、智慧城市等相关产业大规模建设，中国电感器市场规模递发展。2020 年，我国移动通讯、消费电子等行业快速增长，有利推动电感器件行业发展。由于尚未有官方机构公布中国电感器件行业市场规模，前瞻依据各机构公布的现有数据对中国电感器件行业市场规模进行测算。测算可得，2020 年，我国电感器件行业业务规模约达 117 亿元。

图表 1522017-2026 年中国电感器件市场规模测算（亿元）



资料来源：前瞻产业研究院，华安证券研究所

图表 153 2019 年电感器市场竞争格局



资料来源：前瞻产业研究院，华安证券研究所

图表 154 电感产业相关公司



注：标红色公司为 A 股上市公司

资料来源：前瞻产业研究院，华安证券研究所

供应端，村田及 TDK 是当前全球最大的两家电感供应商，以其为首的日本厂商总计约占据了电感全球市场的 50%。其中，村田在射频电感方面处于主导地位，而 TDK 及松下则在汽车领域的功率电感具备优势。从国内市场上看，国内电感器行业主要参与者包括日系厂商及中国本土厂商，中国厂商中，奇力新占据主要市场，优

势领域为电脑、网络及手机方面的功率电感；顺络电子是目前中国营收规模最大的电感企业。总体来看，国内电感器件行业的竞争者主要分为三个梯队，第一梯队以日系厂商为主，同时包括少部分中国厂商（奇力新、顺络电子）；第二梯队主要为国内中大型厂商，主要包括麦捷科技、风华高科、合泰盟方、铂科新材等企业；第三梯队为国内中小型企业，企业规模较小，竞争力较弱。

3.1.3 压电陶瓷行业

压电陶瓷是一种重要的换能材料，其机电耦合性能优良，在电子信息、机电换能、自动控制、微机电系统、生物医学仪器中广泛应用。为适应新的应用需求，压电器件正向多层化、片式化和微型化方向发展。近年来，多层压电变压器、多层压电驱动器、片式化压电频率器件等一些新型压电器件不断被研制，并广泛应用于电气、机电、电子等领域。同时，在新型材料方面，无铅压电陶瓷的研制已取得了较大的突破，有可能使得无铅压电陶瓷在许多领域替代锆钛酸铅（PZT）基的压电陶瓷，推动绿色电子产品的升级换代。此外，压电材料在下一代能源技术中的应用开始崭露头角。过去十年中，随着无线与低功耗电子器件的发展，利用压电陶瓷的微型能量收集技术的研究与开发受到各国政府、机构和企业的高度重视。

图表 155 压电陶瓷应用范围

具体部件	应用行业
压电阵子	滤波器、谐振器、振荡器
复合阵子	压电声叉、机械滤波器
压电变压器	静电复印、静电除尘、光电倍增管等高压电源
压电延迟线	电视、通信设备、计算机等用延迟装置
测量元件	压力计、振动计、加速度计
超声计	流量计、流速计、风速计、声速计、液面计
电声换能器	拾音器、传声器、扬声器、耳机助听器、蜂鸣器、电视、遥控、送/受话器
水声换能器	声呐
固体声换能器	超声探伤仪、厚度计、测震计
物理声学换能器	超声衍射光栅、超声波马达
大功率超声换能器	清晰、焊接、搅拌、乳化、混合、促进反应
医用超声换能器	听诊器、起搏器、压电泵

资料来源：《中国先进陶瓷产业大全 2020》，华安证券研究所

需求端，根据辰宇信息咨询披露，2020 年全球压电陶瓷技术市场规模达到了 576 亿元，预计 2026 年将达到 745 亿元，年复合增长率 (CAGR) 为 3.7%。

供给端，经过不断发展，我国压电材料企业数量众多，能够生产的产品种类较为齐全，涌现出一批优秀企业，例如天通股份、中科三环、无锡好达电子等。但我国压电材料行业集中度低，排名前三的企业合计市场份额占比仅为 10% 左右，大部分企业规模偏小，资金实力较弱，在研发、技术、人才等方面较为薄弱，以低端产品生产为主。在此背景下，我国压电材料行业结构发展不合理，高端产能不足，低端产能过剩。

图表 156 压电陶瓷产业相关公司

相关公司

MURATA	广东奥迪威	东莞科森电子塑胶	青州方圆电子
TDK	汉得利（常州）电子	深圳攀特时代	青州永欣电子
MORGAN	广东捷成科创电子	潮州金山声学器件厂	潍坊聚德电子
TAIYO YUDEN	苏州攀特电陶	保定倚天超声波	西安康弘新材料科技
KYOCERA	广东思威特智能	哈尔滨芯明天科技	上海联能科技
PI Ceramic	浙江嘉康	武汉航宇压电	上海博瓷电子
Exelis	南京瀚州	长沙鹏翔电子	上海纳动纳米位移技术
Sparkler Ceramics	无锡惠丰	湖州美斯特	成都菁华三才科技
APC International	昆山日盛	湖南嘉业达	新昌银河电子
Noliac	佛山亿强	宝应电子陶瓷厂	国英电陶厂
SensorTech	保定宏声声学电子	昆山晶丰电子	杭州瑞利声学器件
Meggitt Sensing	杭州雷声超声电子	无锡宏杰换能器	慈溪长河索唯机械厂
Johnson Matthey	中船六一二厂	汉宁电子	海宁赛达压电陶瓷
Kinetic Ceramics	慈溪国立压电陶瓷厂	常州武进天一电子	浙江耿坚电子
	北京东方金荣超声电器	昆山九华设备厂	新昌迪辉电子
	深圳鑫亚图	江苏江佳电子	蓝光电子实业
	广东斯威特智能	苏州景康电子	TRS
	佛山粤湾特种陶瓷	苏州攀特电陶	CeramTec
	广州番禺奥迪威	景德镇惠康电子	Konghong Corporation
	汕头先宁	景德镇景华健翔	Jiakang Electronics
	安之能电子	景德镇博莱德电子	Datong Electronic
	广州凯立达	景德镇同惠电子	Audiowell
	深圳通超电子	淄博宇通电子陶瓷	Honghua Electronic
	梅州大通电子	寿光飞田电子	Risun Electronic
	梅州双玉电子	淄博白灵功能陶瓷	Yuhai Electronic Ceramic

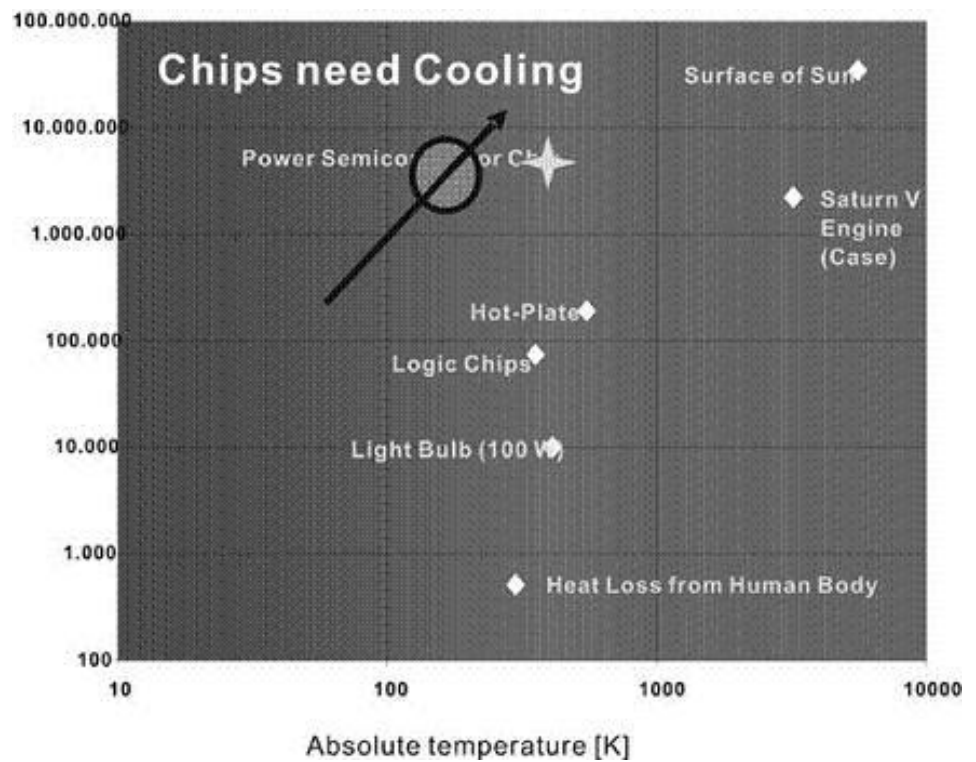
资料来源：《中国先进陶瓷产业大全 2020》，华安证券研究所

3.1.4 陶瓷基板行业

随着近年来科技不断升级，芯片输入功率越来越高，对高功率产品来讲，其封装基板要求具有高电绝缘性、高导热性、与芯片匹配的热膨胀系数等特性。伴随着功率器件（包括 LED、LD、IGBT、CPV 等）不断发展，散热成为影响器件性能与可靠性的关键技术。对于电子器件而言，通常温度每升高 10° C，器件有效寿命就降低 30% ~ 50%。因此，选用合适的封装材料与工艺、提高器件散热能力就成为发展功率器件的技术瓶颈。

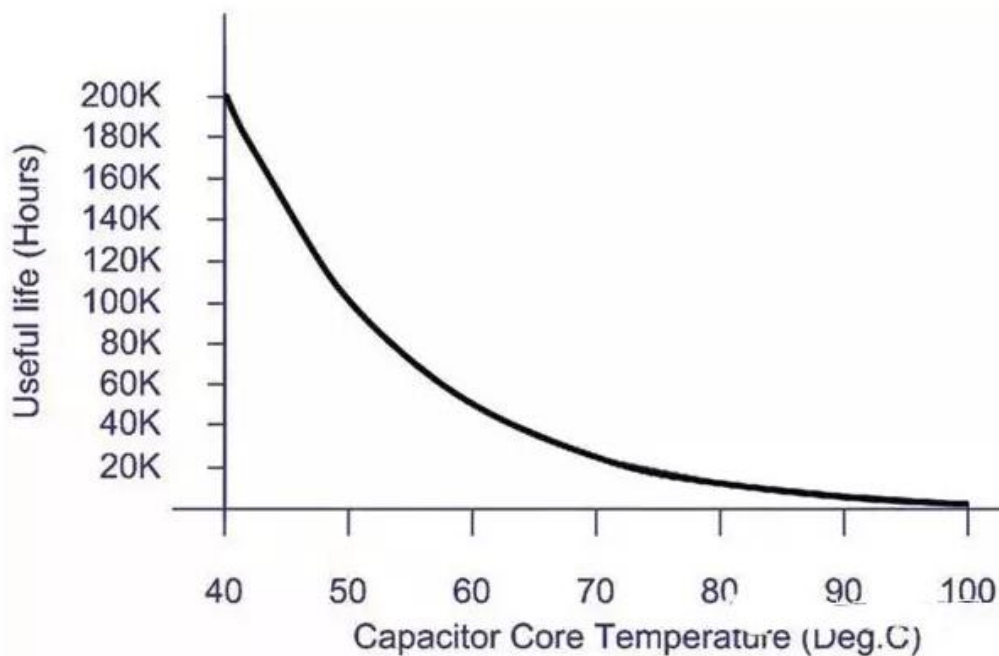
以大功率 LED 封装为例，由于输入功率的 70%-80% 转变成为热量（只有约 20%-30% 转化为光能），且 LED 芯片面积小，器件功率密度很大（大于 100W/cm²），因此散热成为大功率 LED 封装必须解决的关键问题。如果不能及时将芯片发热导出并消散，大量热量将聚集在 LED 内部，芯片结温将逐步升高，一方面使 LED 性能降低（如发光效率降低、波长红移等），另一方面将在 LED 器件内部产生热应力，引发一系列可靠性问题（如使用寿命、色温变化等）。

图表 157 电子元器件温度与功率密度成正相关



资料来源：CNKI，华安证券研究所

图表 158 电容器寿命与环境温度符合“十度法则”成反比



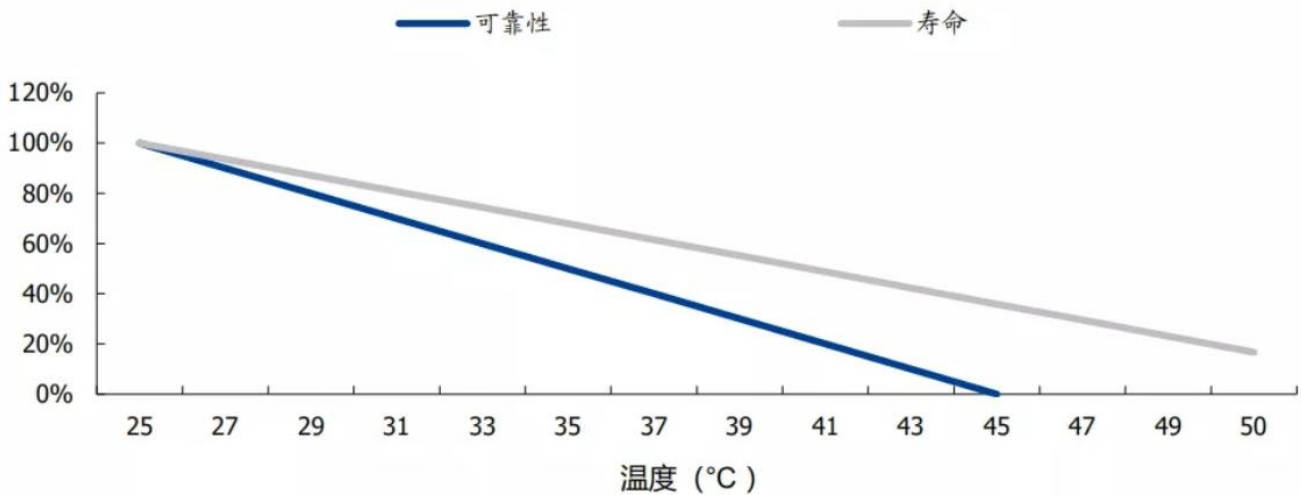
电容器寿命和环境温度的关系

资料来源：武汉尚测试验装备有限公司官网，华安证券研究所

陶瓷基板具有优异的热性能、微波性能、力学性能以及可靠性高等优点，作为电

子元器件在高频开关电源、半导体、IGBT、LD、LED、CPV、VCSEL 封装中电路板的应用越来越广领域起着非常重要的作用。

图表 159 电子元器件可靠性与温度成反比



资料来源：搜狐网，华安证券研究所

图表 160 陶瓷基板种类及其性能

性能		AlN		Al ₂ O ₃		BeO	SiC/BeO	BN	Si ₃ N ₄
一般性能	纯度/%	>99.6	>99.8	96.0	99.5	99.6	—	—	—
	密度/g·cm ⁻³	3.25	3.25	3.75	3.9	2.9	3.2	2.25	3.18
热学性能	热导率(25°C)/m ⁻¹ ·K ⁻¹	140	260	20	30	250	270	20-60	10-40
	热膨胀系数(25-400°C)/×10 ⁻⁶	4.4	4.4	7.2	7.4	7.5	3.7	0.7-7.5	3.2
电学性能	电阻率/Ω·cm	>10 ¹⁴		>10 ¹⁵	>10 ¹⁵	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹³	>10 ¹⁴
	介电常数/1MHz	8.9		9.3	9.7	6.7	40	4	9.4
	介电常数(×10 ⁻⁴ /Hz)	3-10		3	1	4	50	2-6	—
	耐压/KV·nm ⁻¹	15		10	10	10	0.07	300-400	100
力学性能	硬度/GPa	12		25		12	25	2	20
	弯曲强度/MPa	300-400		300-350		200	450	40-80	980
	弹性模量/GPa	310		370		350	450	98	320
毒性		无		无		有	一般	无	无

资料来源：CNKI，华安证券研究所

与塑封料和金属基片相比，其优势在于以下几个方面：

- 绝缘性能好，可靠性高。高电阻率是电子元件对基片的最基本要求，一般而言，基片电阻越大，封装可靠性越高，陶瓷材料一般都是共价键型化合物，其绝缘性能较好。
- 介电系数较小，高频特性好。陶瓷材料的介电常数和介电损耗较低，可以减少信号延迟时间，提高传输速度。
- 热膨胀系数小，热失配率低。共价键型化合物一般都具有高熔点特性，熔点越高，热膨胀系数越小，故陶瓷材料的热膨胀系数一般较小。

- 热导率高。根据传统的传热理论，立方晶系的 BeO、SiC 和 AlN 等陶瓷材料，其理论热导率不亚于金属的。因此，陶瓷基片材料被广泛应用于航空、航天和军事工程的高可靠、高频、耐高温、强气密性的产品封装。

陶瓷基板主要有平面陶瓷基板及多层陶瓷基板。制造高纯度的陶瓷基板是很困难的，大部分陶瓷熔点和硬度都很高，这一点限制了陶瓷机械加工的可能性，因此陶瓷基板中常常掺杂熔点较低的玻璃用于助熔或者粘接，使最终产品易于机械加工。Al₂O₃、BeO、AlN 基板制备过程很相似，将基体材料研磨成粉直径在几微米左右，与不同的玻璃助熔剂和粘接剂（包括粉体的 MgO、CaO）混合，此外还向混合物中加入一些有机粘接剂和不同的增塑剂再球磨防止团聚使成分均匀，成型生瓷片，最后高温烧结。

陶瓷基板按照工艺主要分为 DPC、DBC、AMB、LTCC、HTCC 等基板。目前，国内常用陶瓷基板材料主要为 Al₂O₃、AlN 和 Si₃N₄。Al₂O₃ 陶瓷基板主要采用 DBC 工艺，AlN 陶瓷基板主要采用 DBC 和 AMB 工艺，Si₃N₄ 陶瓷基板更多采用 AMB 工艺。近年来，随着半导体照明和新型传感器市场规模的不断扩大，陶瓷基板需求随之增加。特别是采用激光打孔与电镀填孔技术制备的 DPC 陶瓷基板，具有图形精度高、可垂直封装等优点，大大提高了电子器件封装集成度，有望在今后的功率器件封装中发挥更大的作用。

● 高温共烧多层陶瓷基板（HTCC）

HTCC 又称高温共烧多层陶瓷基板。制备过程中先将陶瓷粉加入有机黏结剂，混合均匀后成为膏状浆料，接着利用刮刀将浆料刮成片状，再通过干燥工艺使片状浆料形成生坯；然后依据各层的设计钻导通孔，采用丝网印刷金属浆料进行布线和填孔，最后将各生坯层叠加，置于高温炉（1600℃）中烧结而成。此制备过程因为烧结温度较高，导致金属导体材料的选择受限（主要为熔点较高但导电性较差的钨、钼、锰等金属），制作成本高，热导率一般在 20~200W/(m·℃)。

● 低温共烧陶瓷基板（LTCC）

LTCC，又称低温共烧陶瓷基板，其制备工艺与 HTCC 类似，只是在陶瓷粉中混入质量分数 30%~50% 的低熔点玻璃料，使烧结温度降低至 850~900℃，因此可以采用导电率较好的金、银作为电极材料和布线材料。LTCC 采用丝网印刷技术制作金属线路，有可能因张网问题造成对位误差；而且多层陶瓷叠压烧结时还存在收缩比例差异问题，影响成品率。为了提高 LTCC 导热性能，可在贴片区增加导热孔或导电孔，但成本增加。

● 厚膜陶瓷基板（TFC）

相对于 LTCC 和 HTCC，TFC 为一种后烧陶瓷基板。采用丝网印刷技术将金属浆料涂覆在陶瓷基片表面，经过干燥、高温烧结（700~800℃）后制备。金属浆料一般由金属粉末、有机树脂和玻璃等组分。经高温烧结，树脂粘合剂被燃烧掉，剩下的几乎都是纯金属，由于玻璃质粘合作用在陶瓷基板表面。烧结后的金属层厚度为 10~20 μm，最小线宽为 0.3mm。由于技术成熟，工艺简单，成本较低，TFC 在对图形精度要求不高的电子封装中得到一定应用。

● 直接键合铜陶瓷基板（DBC）

陶瓷基片与铜箔在高温下（1065℃）共晶烧结而成，最后根据布线要求，以刻蚀方式形成线路。由于铜箔具有良好的导电、导热能力，而氧化铝能有效控制 Cu-Al₂O₃-Cu 复合体的膨胀，使 DBC 基板具有近似氧化铝的热膨胀系数。DBC 具有导热性好、绝缘性强、可靠性高等优点，已广泛应用于 IGBT、LD 和 CPV 封装。DBC 缺点在于，其利用了高温下 Cu 与 Al₂O₃ 间的共晶反应，对设备和工艺控制要求较高，基板成本

较高；由于 Al_2O_3 与 Cu 层间容易产生微气孔，降低了产品抗热冲击性；由于铜箔在高温下容易翘曲变形，因此 DBC 表面铜箔厚度一般大于 100 μm ；同时由于采用化学腐蚀工艺，DBC 基板图形的最小线宽一般大于 100 μm 。

● 直接镀铜陶瓷基板 (DPC)

其制作首先将陶瓷基片进行前处理清洗，利用真空溅射方式在基片表面沉积 Ti/Cu 层作为种子层，接着以光刻、显影、刻蚀工艺完成线路制作，最后再以电镀/化学镀方式增加线路厚度，待光刻胶去除后完成基板制作。

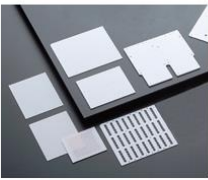
● 活性金属钎焊陶瓷基板 (AMB)

AMB 技术是指，在 800℃ 左右的高温下，含有活性元素 Ti、Zr 的 AgCu 焊料在陶瓷和金属的界面润湿并反应，从而实现陶瓷与金属异质键合的一种工艺技术。AMB 陶瓷基板，一般是这样制作的：首先通过丝网印刷法在陶瓷板材的表面涂覆上活性金属焊料，再与无氧铜层装夹，在真空钎焊炉中进行高温焊接，然后刻蚀出图形制作电路，最后再对表面图形进行化学镀。

与 DBC 陶瓷基板相比，AMB 陶瓷基板具有更高的结合强度和冷热循环特性。目前，随着电力电子技术的高速发展，高铁上的大功率器件控制模块对 IGBT 模块封装的关键材料——陶瓷覆铜板形成巨大需求，尤其是 AMB 基板逐渐成为主流应用。

日本京瓷采用活性金属焊接工艺制备出了氮化硅陶瓷覆铜基板，其耐温度循环 (-40~125℃) 达到 5000 次，可承载大于 300A 的电流，已用于电动汽车、航空航天等领域。特别是，该产品采用活性金属焊接工艺将多层无氧铜与氮化硅陶瓷键合，同时采用铜柱焊接实现垂直互联，对 IGBT 模块小型化、高可靠性等要求有较好的促进作用。

图表 161 几种常见陶瓷基板应用对比

高温共烧多层陶瓷基板 (HTCC)	低温共烧陶瓷基板 (LTCC)	厚膜陶瓷基板 (TFC)	直接键合铜陶瓷基板 (DBC)	直接镀铜陶瓷基板 (DPC)	活性金属钎焊陶瓷基板 (AMB)
					
• 高频无线通信领域 • 航空航天 • 存储器 • 驱动器 • 滤波器 • 传感器 • 汽车电子	• 各种制式的手机 • 蓝牙 • GPS模块 • WLAN模块 • WIFI模块 • 汽车发动机控制ECU模块 • 制动防抱死ABS模块 • 汽车各类传感器模块	• 汽车电子	• IGBT功率器件 • 汽车领域 • 聚光光伏 (CPV) • 航天航空领域	• 深紫外LED器件 • LED 车灯 • LED 植物照明 • 光固化/催化 • 医疗美容 • 紫外防伪 • 功率激光器	• IGBT功率器件 • 汽车行业 • 家用电器 • 航空航天

资料来源：华安证券研究所整理

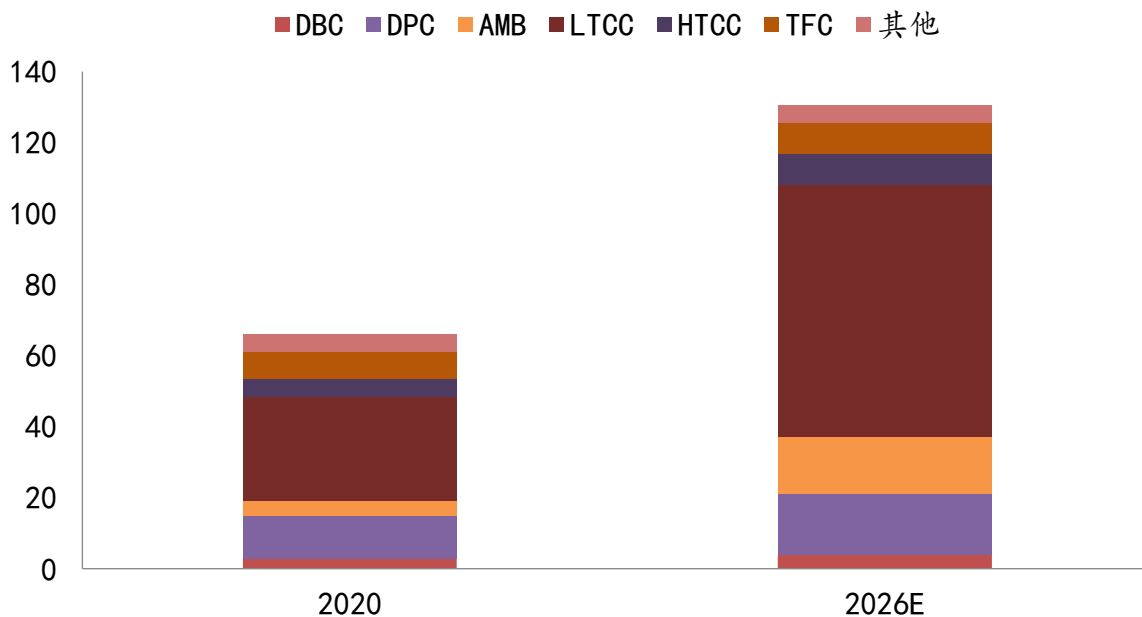
图表 162 几种常见陶瓷基板性能对比

	HTCC	LTCC	TFC	DBC	DPC
综合热导率/[W m ⁻¹ · K ⁻¹]	16-20	2.0-3.0	20-25	20-25	20-25
CET/10 ⁻⁶ °C	5.0-6.0	6.0-8.0	6.0-8.0	6.0-8.0	6.0-8.0
制备工艺温度/°C	1300-1600	850-900	800-850	1065	200-300
金属层厚度/μm	-	-	10-20	100-600	10-100
金属层附着力	-	-	强	强	较强
载流能力	良	良	良	优	良
表面平整度	-	-	良	一般	良
耐热冲击性能	优	优	优	良	良
图形精确度/μm	>200	>200	200	>200	10-30
耐热性/°C	500	500	300-500	500-800	500-600
通孔垂直集成	可以	可以	可以, 困难	不可以	可以
综合成本	很高	高	较低	高	较高

资料来源：新材料在线，华安证券研究所

需求端，根据 GII 报告显示，受到疫情影响，2020 年估算为 66 亿美元的陶瓷基板的全球市场，全球 PCB 产值为 652 亿美金，渗透率为 10%，预测在 2020 年~2027 年间陶瓷基板市场规模将以 6% 的年复合成长率成长，2027 年之前将达到 100 亿美元。随着微电子封装产业的蓬勃发展，电子封装技术走向小型化、高密度、多功率和高可靠性的方向发展，电子封装材料也逐渐成为一个高技术含量、高经济效益的，具有重要地位的工业领域。目前常用的基板材料主要有塑料基板、金属基板、陶瓷基板和复合基板四大类。

图表 163 各类陶瓷基板 2020 年市场规模及 2026 年预测市场规模（亿美元）



资料来源：GII，华安证券研究所

供给端，全球陶瓷基板市场竞争激烈。据 GII 调研数据显示，2019 年村田和京瓷的市场份额分列一二，营收合计占据全球总额的约 33.15%。日本是全球最大的陶瓷基板生产市场，核心厂商包括，村田、京瓷和九和。欧洲是第二大生产市场，核心厂商是罗杰斯，在全球排名第三。氧化铝陶瓷基板是营收最高的产品类型，其 2019 年的营收约占全球总额的 76.41%。

我国正成为世界电子元件的生产大国和出口大国。随着国际电子信息产品制造业加速向中国转移，下游企业出于相关采购和运输成本的考虑，势必会加大大地化采购比例。随着近年来大功率半导体元器件 LED、IGBT 等的迅速发展和使用，高端陶瓷线路板将有很好的发展前景。由于其具备的特殊技术要求，加上设备投资大、制造工艺复杂，目前，全球核心制造技术主要掌控于罗杰斯、韩国 KCC、申和、博世等少数几家知名企业手里。国内现有技术尚无法实现高端陶瓷基板的大规模产业化生产，但面对当前 LED、IGBT 功率器件、汽车领域、聚光光伏（CPV）、通信、航天航空及其他领域市场的迫切需求，无论是国家政府还是国产众企业，均希望能实现重大技术突破，改变陶瓷基板长期依赖进口的局面。

图表 164 陶瓷基板产业相关公司

相关公司			
Maruwa	三环集团	宁夏艾森达新材料科技	深圳嘉龙微电子
Murata	中瓷电子	淄博临淄银河高科技开发	深圳佳日丰电子材料
Kyocera	国瓷材料	山东盈和电子科技	深圳宏宇杰科技
日本株式会社	中材高新	富力天晟科技	珠海汉瓷精密科技
CoorsTek	同欣电子	赛创电气	珠海佳一陶瓷
KOA	Leatec Fine Ceramics	西安德驰机电	湖南恒裕新材料科技发展
日本NCI	TA-I Technology	北京钢研新冶精特科技	浙江新纳陶瓷新材
日本YOKOWO株式会社	ICP Technology	香河永泰电子器件	浙江正天新材料科技
Rogers	Holy Stone	东莞浩弘特种陶瓷	宜兴伟忠陶瓷
韩国Ecocera	ACX	东莞东思电子技术	苏州人为新材料
Toshiba	东莞凯昶德电子	东莞精陶科技	莱鼎电子材料
韩国NEO TechKCC	福建华清电子	佛山兴虹飞电子科技	众成三维电子
日本Ferrotec株式会社	浙江德汇电子陶瓷	广州铠虹电子	西安林会电子
德国Heraeus	无锡海古德新	广州北龙电子	廊坊高瓷新材料
日本NGK Electronics Devices	陕西镇安恒泰电子陶瓷	深圳佳捷特	沧州华顺电子材料
日本Adamant Namiki	厦门迈饰嘉科技	深圳金瑞欣	淄博尚迪特陶瓷
德国Micro Systems	南京锦懋电子	深圳光拓光电	苏州珂玛材料
Engineering	南京中江新材料科技	深圳中科源盛科技	西安双英电子
API Technologies	唐山隆达电子陶瓷	深圳新研陶瓷技术	宜宾金洋制冷陶瓷

注：标红色公司为 A 股上市公司

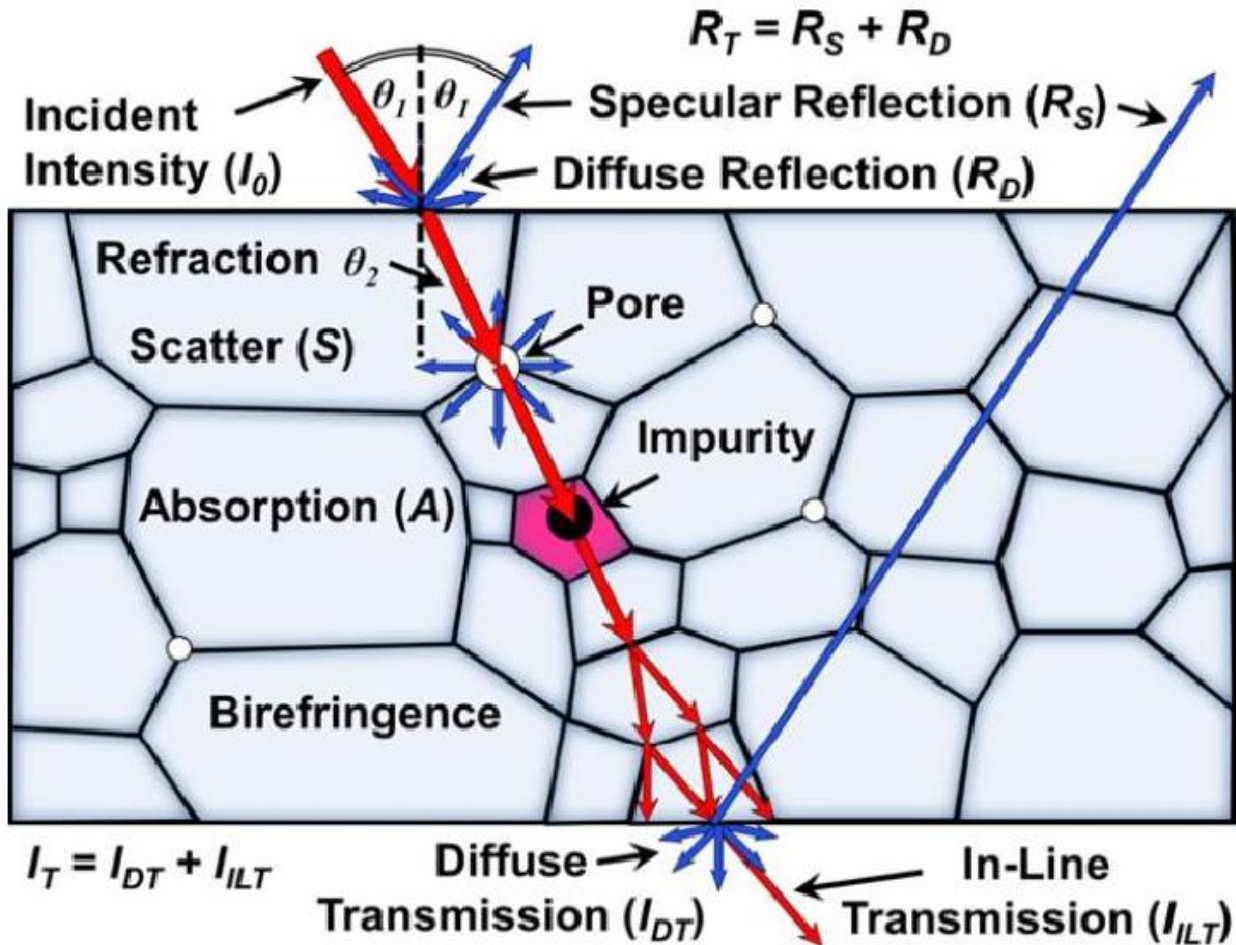
资料来源：《中国先进陶瓷产业大全 2020》，华安证券研究所

3.2 光学陶瓷行业：纳米晶显示陶瓷爆发在即

目前，对透明陶瓷尚无明确的定义，通常将直线透过率大于 40%的陶瓷概括为透明陶瓷。陶瓷是一种多晶材料，当光通过时，由于其内部的晶界、气孔或杂质的存在，会产生吸收、散射、双折射等效应，从而导致光强大幅度降低，因此一般陶瓷是

不透光的。透明陶瓷作为无机透明材料，与单晶和玻璃相比，单晶大多采用提拉法制备，难以制得大尺寸材料；玻璃制备工艺简单，容易制得大块，但其机械性能较差，且由于玻璃的无序环境，声子能量高，大大降低掺杂离子的发光效率；而透明陶瓷既具有陶瓷的高强度、耐高温，化学稳定性好等优点，又兼备玻璃良好的光学透过性，同时作为一种晶体材料，激活离子掺杂浓度高，其晶体场环境能有效改善发光离子的发光效率。

图表 165 光在陶瓷内部的传输路径



资料来源：《玻璃晶化法制备透明陶瓷和光纤的研究》，华安证券研究所

3.2.1 齿科正畸行业

齿科正畸是陶瓷材料的一大下游应用。正畸是矫正牙齿、解除错牙和畸形的一种方式。正畸托槽按照材料可分为金属类、陶瓷类、复合材料类以及塑料类；按外形可分为单翼类、双翼类、乳牙特制类等；按矫治技术可分为方丝弓矫治技术托槽、Begg 矫治技术托槽、Tip-edge 矫治技术托槽等。

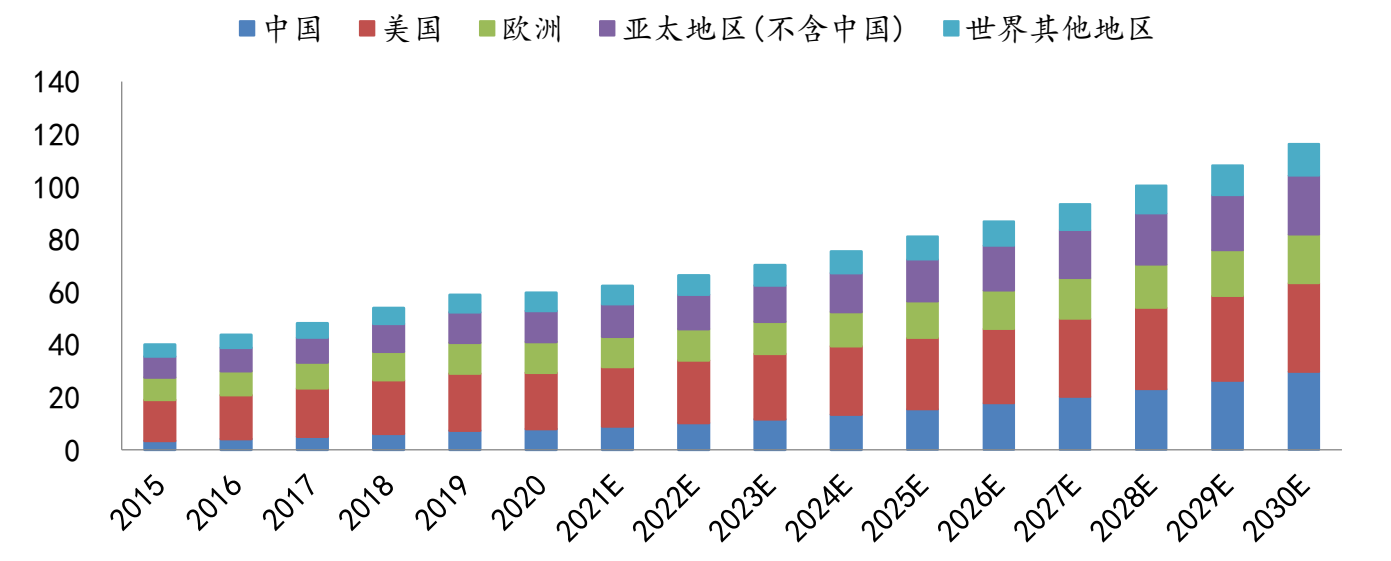
常见的口腔正畸方式有常规钢丝托槽矫治、透明陶瓷托槽半隐形矫治、舌侧隐形矫治、透明牙套隐形矫治。其中，在价格上，常规钢丝托槽矫治金额最少，舌侧隐形矫治金额最为昂贵；在隐蔽性上，透明陶瓷托槽半隐形矫治和透明牙套隐形矫治较为突出；在时间上，透明牙套隐形矫治时间最短。

图表 166 四类正畸治疗手段

	传统正畸矫治方法			隐形矫治器
	金属牙套	舌侧矫治器	陶瓷牙套	
示意图				
适应症（程度）	轻度+中度+严重	轻度+中度	轻度+中度	轻度+中度
美观度（是否可见）	牙套全可见（金属牙套和丝）	部分隐形（牙套置于牙齿舌侧）	不明显（牙套半透明）	难以看见（透明）
卫生状况	牙套固定且不可拆装，难以保证口腔卫生且感染牙龈炎等并发症	牙套容易残留食物碎末，增加龋齿可能性	牙套为食物残渣和细菌提供更大的隐藏和繁殖空间	矫治器可拆装并易清洁
舒适度	金属牙套在嘴里有强烈存在感，且刺激口腔组织或摩擦牙龈和嘴唇	牙套导致舌头受到一定程度的损伤	弓丝和牙套摩擦嘴里的伤疤	隐形矫治器非弓丝制造，因此不会造成不适感
治疗周期	1.5-2.0 年	1.5-2.0 年	1.5-2.0 年	0.8-2.0 年
后续就诊频率	4-6 周	3-5 周	4-6 周	8-12 周
每次后续就诊所花时间	45 分钟	60 分钟	45 分钟	15 分钟
零售价	0.5-3w	3.5-6w	2-3.5w	1.5-6w
对正畸医生/全科牙医的专业要求	高要求 研究生水平的专业正畸培训	极高要求 学习放置和调整牙内牙套的额外培训	高要求 研究生水平的专业正畸培训	相对较低要求 隐形矫治疗法的特定培训； 隐形矫治解决方案提供商医学服务团队的额外支持
使用材料	金属	陶瓷、金属	陶瓷	陶瓷、高分子材料

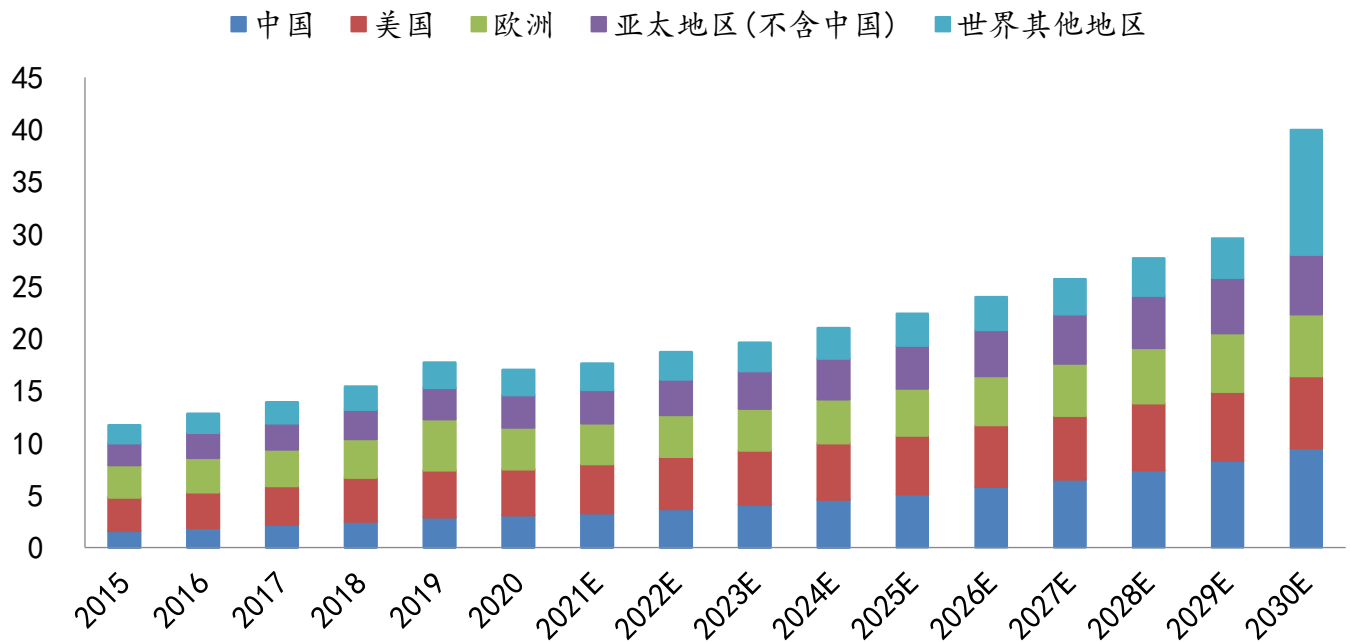
资料来源：时代天使招股说明书，华安证券研究所

图表 167 2015 年至 2030 年（估计）的全球正畸市场规模（单位：十亿美元）



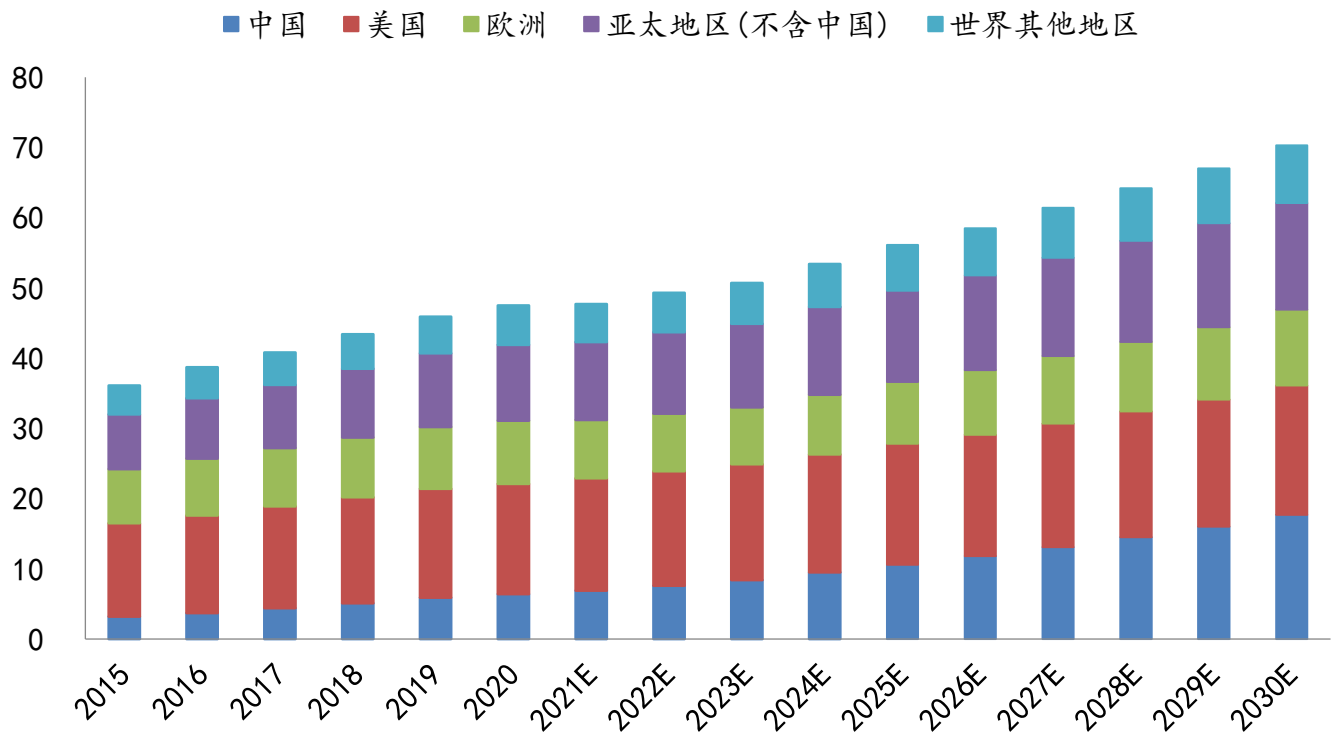
资料来源：时代天使招股说明书，华安证券研究所

图表 168 2015 年至 2030 年（估计）的全球正畸病例



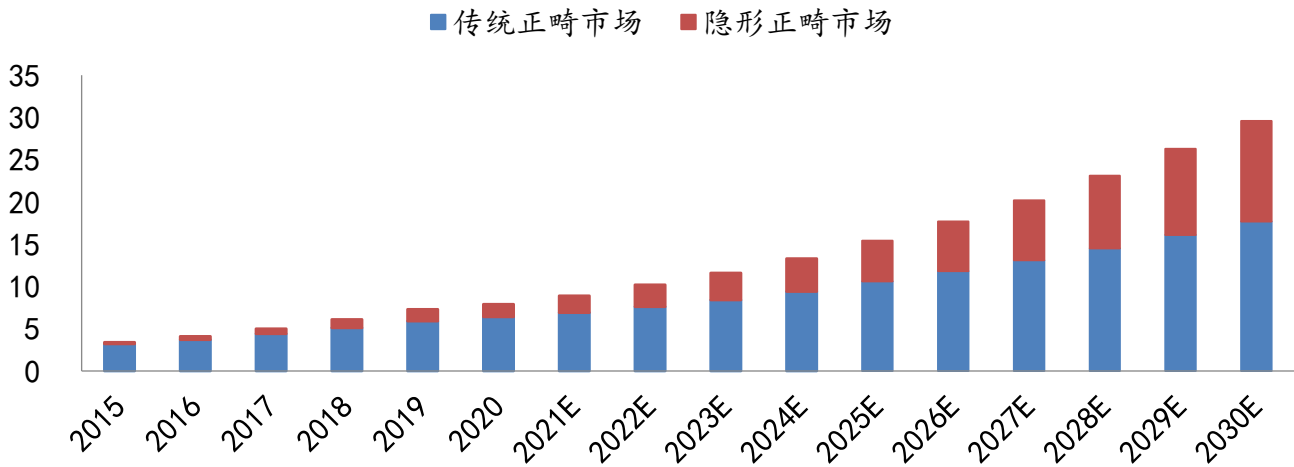
资料来源：时代天使招股说明书，华安证券研究所

图表 169 2015 年至 2030 年（估计）的全球传统正畸市场规模（单位：十亿美元）



资料来源：时代天使招股说明书，华安证券研究所

图表 170 2015 年至 2030 年（估计）的中国正畸市场规模（单位：十亿美元）



资料来源：时代天使招股说明书，华安证券研究所

需求端，假定传统正畸方案中陶瓷牙套选用的概率为 1/3，则 2030 年市场规模预计将达到 200 亿美元。就零售销售收入而言，全球口腔正畸市场收入由 2015 年的 399 亿美元增至 2020 年的 594 亿美元，年复合增长率为 8.3%。这主要得益于中国、美国、欧洲等正畸市场的高速发展。全球正畸市场规模有望于 2030 年达到 1164 亿美元，2020 年—2030 年的年复合增长率预计为 7.0%。我国正畸市场规模增速远超全球，由 2015 年的 34 亿美元增至 2020 年的 79 亿美元，年复合增长率为 18.1%，有望于 2030 年达到 296 亿美元，2020 年—2030 年的年复合增长率预计为 14.2%。此外，我国正畸案例数目由 2015 年的 160 万例增至 2020 年的 310 万例，年复合增长率为 13.4%，并预计 2030 年将达到 950 万例。我国正畸市场有望继续引领全球正畸市场规模快速增长。

图表 171 陶瓷托槽相关公司

相关公司	
3M	上海埃蒙迪
Henry Schein	浙江新亚医疗
American Orthodontics	浙江普特医疗器械
Ormco	星辰三比
GC	浙江亚宏
Orthodontics	创意牙科
G&H Orthodontics	金华格蓝姆医疗器械

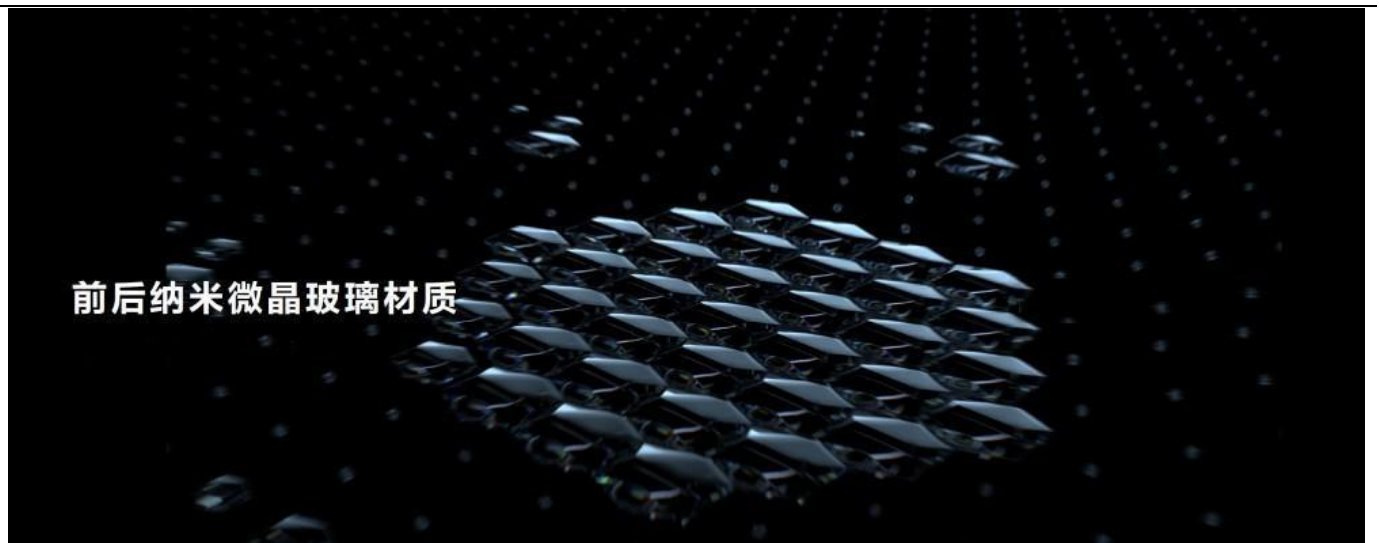
资料来源：华安证券研究所整理

供给端，目前以外资为主的高端正畸托槽品牌企业占据着国内的高端市场，国内正畸市场中主要的高端品牌有 3M、Dentaurum、Tomy、Ormco、Forestadent、Invisalign 等，其中 3M、Dentaurum、Ormco 在中端市场也有一定的市场份额，Tomy 和 Forestadent 等品牌主做高端市场。国内的综合性正畸托槽生产商，以生产金属类和陶瓷类托槽为主，研发较早，技术稳定，在国内牙齿托槽中端市场占据着较大的优势。目前，国内正畸行业中端市场的品牌主要有新亚、三比、奥杰、普特等，低端的正畸产品的产量在国内占据着较高的市场份额，低端的正畸产品生产工艺简单，质量较为一般，价格便宜，但低端正畸产品市场企业数量较多，市场竞争激烈，产品附加值低。

3.2.2 纳米微晶陶瓷行业

纳米微晶玻璃是微晶玻璃的升级版，是指玻璃内生长出来的晶体尺寸只有纳米级别，这样玻璃盖板，不但可以做的得很薄，强度还上升。微晶玻璃，又叫陶瓷玻璃，它就是在玻璃内部引入金属氧化物，然后玻璃内部可以有规则的生长一颗颗像水晶一样的东西，就像陶瓷的内部结构一样更加稳定，这样就有陶瓷硬度、韧性和强度优点，也有玻璃的透光的性能，所以被称作陶瓷玻璃。相比玻璃，玻璃陶瓷因为具有均匀的、一般小于 10 μm 的晶体，它比普通玻璃的强度高出一个数量级。

图表 172 纳米微晶玻璃



资料来源：腾讯新闻，华安证券研究所

华为 P 系列手机的推出意味着纳米微晶陶瓷技术正式走入国内市场。随着智能手机、平板电脑等大面积触屏电子产品的普及，消费者对显示屏抗破坏性能提出更高的要求，如抗冲击性、抗跌落性、抗划伤。保护用盖板材料需进一步增高其强度和硬度来满足要求，玻璃以其优异的透明性、硬度、耐腐蚀性、易加工成型等特性很快取代亚克力等高分子材料应用于屏幕保护领域。

玻璃陶瓷用于智能手机、平板电脑等大面积触屏电子产品具有广阔的前景。目前，市面上玻璃陶瓷产品是基于在玻璃熔制前加入一定量晶核剂，如 TiO_2 、 ZrO_2 、 ZnO 、 Cr_2O_3 、氟化物、硫化物等，晶核剂在熔制过程中先溶解在玻璃中，热处理过程中通过分相或直接析出晶核，并晶化，从而制备出高强度玻璃陶瓷。

图表 173 重庆鑫景特种玻璃公司纳米微晶玻璃生产线



资料来源：腾讯新闻，华安证券研究所

图表 174 华为 P 系列产品纳米微晶科技



资料来源：华为发布会，华安证券研究所

苹果 12 的推出则又带入了超瓷晶玻璃的概念，但本质上与纳米微晶玻璃技术大同小异，亦属于微晶玻璃范畴。随着苹果新一代 iPhone12 发布，除了 5G 升级之外，外观件的创新升级无疑也是新款 iPhone 最大的一次创新之一，四款手机全系应用了全新的超瓷晶玻璃盖板，不管是从第一位的展示顺序，还是从介绍所花费的时间篇

幅来看，这次超瓷晶玻璃所带来的外观革新对于 iPhone 12 而言非常重要。

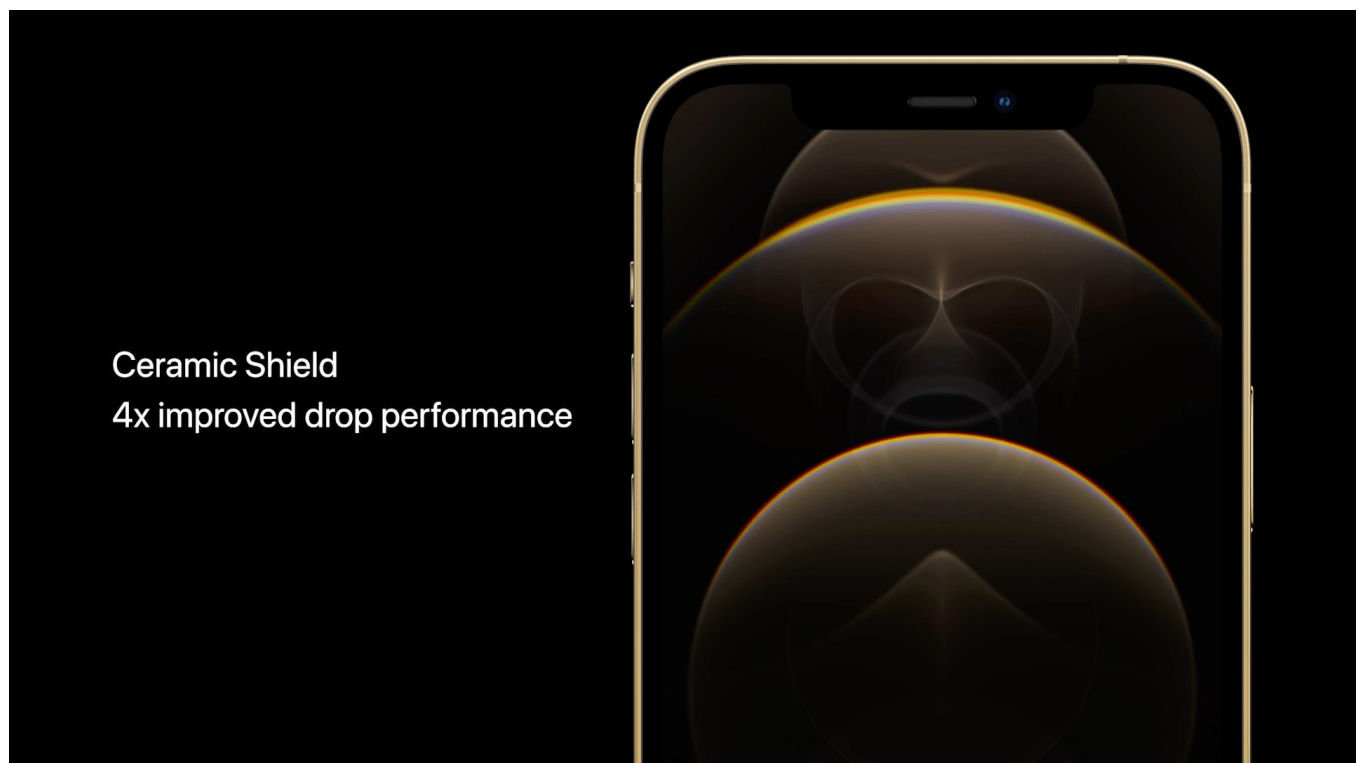
超瓷晶属于微晶玻璃，俗称玻璃水晶或者陶瓷玻璃，微晶玻璃的制造其实是一种玻璃改质工艺，在玻璃的生产过程中加入了金属氧化物晶粒作为晶种，通过增加新的高温结晶步骤使玻璃基体内的陶瓷晶体生长晶体化，改变玻璃态的非晶体结构比例，从而形成致密的微晶相与玻璃相结合的多相复合固体材料。由于微晶相和玻璃相的同时存在，微晶玻璃兼备了玻璃和陶瓷的双重特性，令超瓷晶玻璃具备更好的坚固性与表面硬度，而这次应用于 iPhone12 的“纳米级”改进则是把微晶玻璃内部的晶态晶粒做得很小，尽可能在体积态保留玻璃非晶态的特性，让其容易做薄，而在玻璃表面新增纳米级的微晶态，以获得微晶玻璃的表面特征，这也是其成功应用的关键。

图表 175 国内纳米微晶玻璃与苹果超瓷晶玻璃对比

技术名称	技术描述	应用
纳米微晶陶瓷	基于在玻璃熔制前加入一定量晶核剂，如 TiO_2 、 ZrO_2 、 ZnO 、 Cr_2O_3 、氟化物、硫化物等，晶核剂在熔制过程中先溶解在玻璃中，热处理过程中通过分相或直接析出晶核，并晶化，从而制备出高强度玻璃陶瓷。	华为 P50、荣耀 Magic3
超瓷晶玻璃	在玻璃的生产过程中加入金属氧化物晶粒作为晶种，通过增加新的高温结晶步骤使玻璃基体内的陶瓷晶体生长晶体化，改变玻璃态的非晶体结构比例，从而形成致密的微晶相与玻璃相结合的多相复合固体材料。	iPhone 12、iPhone13

资料来源：华安证券研究所整理

图表 176 苹果 iPhone 12 使用的超瓷晶玻璃技术



资料来源：苹果发布会，华安证券研究所

图表 177 华为纳米晶玻璃、第六代大猩猩玻璃与微晶玻璃、不锈钢、蓝宝石和钢化玻璃部分性能参数比较

	鑫景特玻华为 纳米晶玻璃	第六代大猩猩	微晶玻璃	不锈钢	蓝宝石	钢化玻璃
弹性模量/GPa	>75	77	80-100	190	343-370	76.7
维氏硬度 /kgf/mm ²	未强化	611	>700	<200	2300	622-701
	强化	678				
透光性/%	>90	>90.5	>90	0%	>87	>91

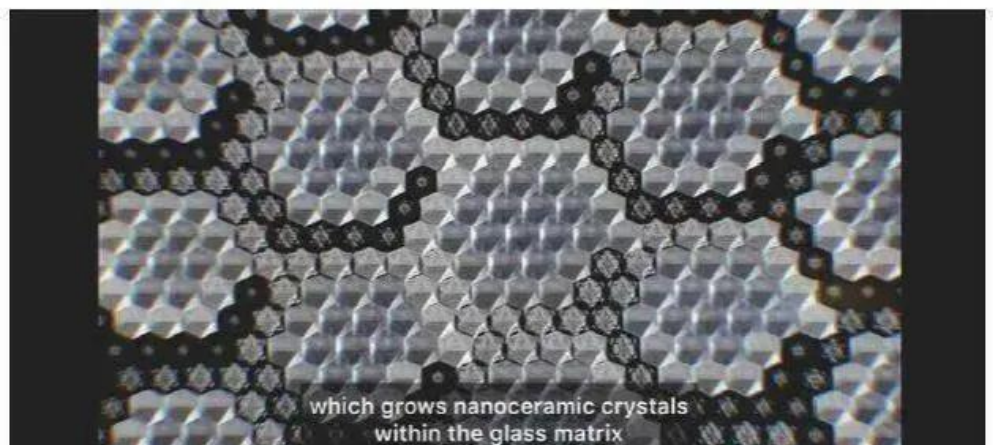
资料来源：CNKI，华安证券研究所

图表 178 超瓷晶玻璃防摔能力强



资料来源：腾讯新闻，华安证券研究所

图表 179 超瓷晶晶体结构展示



资料来源：腾讯新闻，华安证券研究所

图表 180 重庆特玻专利号 CN 110002760 A 所列纳米晶陶瓷玻璃生产流程

成分

组分	样品1	样品2	样品3	样品4	样品5	样品6
SiO ₂	55	60	65.2	70	72	56
Al ₂ O ₃	25	20	15	12	10	19
B ₂ O ₃	2	0	2.5	4.7	/	6
P ₂ O ₅	/	1.8	/	/	3	/
MgO	2	0.5	6	1	7.75	4
ZnO	0.5	2	/	/	3	/
ZrO ₂	0	0.5	/	2	/	/
Na ₂ O	6	7	5	3	2	4.2
Li ₂ O	9.35	8	6	7	2	10.5
SnO ₂	0.1	0.19	0.1	0.3	0.2	0.2
CeO ₂	0.05	0.01	0.2	0	0.05	0.1

	组分	样品1	样品2	样品3	样品4	样品5	样品6
离子交换工艺	NaNO ₃	94.75	87.85	90	82	76.5	90.5
	LiNO ₃	5	12	9.5	17	19	8
	AgNO ₃	0.25	0.15	0.5	1	4.5	1.5
	交换温度/℃	420	400	450	420	390	440
	交换时间/min	30	110	20	45	5	10

	组分	样品1	样品3	样品4	样品5		组分	样品2	样品6
紫外光照射核化工艺	紫外光波长/nm	220	280	330	270	热处理核化工艺	核化温度/℃	500	550
	紫外光照射时间/min	40	10	5	15		保温时间/h	1	0.5

工艺

	组分	样品1	样品2	样品3	样品4	样品5	样品6
热处理晶化工艺	晶化温度/℃	680	700	750	800	850	820
	保温时间/h	8	7	2	1	1	2

	组分	样品1	样品2	样品3	样品4	样品5	样品6
强化工艺/IOX1	NaNO ₃	100	75	85	6	100	8
	KNO ₃	0	25	15	94	0	92
	强化温度/℃	420	390	400	550	420	480
	强化时间/h	3.5	2	3	8	5	4

	组分	样品1	样品2	样品3	样品4	样品5	样品6
强化工艺/IOX2	NaNO ₃	5	10	6		2	
	KNO ₃	95	90	94		98	
	强化温度/℃	500	390	420		450	
	强化时间/h	3	1	1.5		7	

性能

组分	样品1	样品2	样品3	样品4	样品5	样品6
玻璃基板厚度/mm	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
基板维氏硬度/kgf/mm ²	560	590	610	605	620	590
玻璃基板4-PB/MPa	180	208	200	240	260	205
玻璃陶瓷中平均晶体尺寸/nm	9	20	40	60	70	90
玻璃陶瓷4-PB/MPa	630	660	675	665	685	700
强化后表面压应力/MPa	220	256	240	280	320	360
强化后压应力深度/um	860	875	820	720	680	780
强化后维氏硬度/kgf/mm ²	160	125	115	130	120	150
强化后4-PB/MPa	750	790	810	798	820	800
玻璃陶瓷可见光透光率/%	91.5	91.1	90.9	90.7	90.0	85
玻璃陶瓷的抗菌性/%	75	76	80	87	85	90

资料来源：《一种含有微纳米晶体的玻璃陶瓷及其制备方法》，华安证券研究所

需求端,玻璃盖板为主要应用领域,粗略估算智能手机端玻璃盖板市场规模在千亿级别。纳米微晶陶瓷是一种机械和化学性能优异的新材料,可在高温、腐蚀、无润滑等恶劣环境下用作耐磨结构材料,如陶瓷轴承、机械密封件、纺织瓷件、研磨体、管道、阀门、耐磨衬板、化工填料等,对提升传统结构陶瓷的可靠性和技术含量,推动机械制造、化工、冶金、能源等相关产业的技术进步有积极意义。同时,纳米微晶陶瓷也是一种优良的电子结构陶瓷,可替代滑石瓷和氧化铝陶瓷用作电子装置用各种绝缘子、管座、电阻基体和密封外壳等。

图表 181 各品牌手机盖板材质演变

华为 MATE		华为 P 系列		小米		苹果	
型号	材质	型号	材质	型号	材质	型号	材质
7/pro	正: 2D 玻璃	8	正: 2.5D 玻璃	8	正: 2.5D 玻璃	6/6s	正: 2.5D 玻璃
	背: 铝合金		背: 塑料		背: 3D 玻璃		背: 铝合金
8/pro	正: 2D 玻璃	9	正: 2.5D 玻璃	9/pro	正: 2.5D 玻璃	7	正: 2.5D 玻璃
	背: 铝合金		背: 铝合金+塑料		背: 3D 玻璃		背: 铝合金
9/pro	正: 2.5D 玻璃	10	正: 2.5D 玻璃	10/pro	正: 3D 玻璃	8	正: 2.5D 玻璃
	背: 铝合金		背: 铝合金		背: 3D 玻璃		背: 2.5D 玻璃
10/pro	正: 2.5D 玻璃	20/pro	正: 2.5D 玻璃	11	正: 3D 玻璃	X	正: 2.5D 玻璃
	背: 3D 玻璃		背: 3D 玻璃		背: 3D 玻璃		背: 2.5D 玻璃
20/pro	正: 3D 玻璃	30/pro	正: 2.5D 玻璃			XS	正: 2.5D 玻璃
	背: 3D 玻璃		背: 3D 玻璃				背: 2.5D 玻璃
30	正: 3D 玻璃	40/pro	正: 3D 玻璃			11	正: 2.5D 玻璃
	背: 3D 玻璃		背: 3D 玻璃				背: 3D 玻璃
30/pro	正: 2.5D 玻璃	50/pro	正: 3D 玻璃			12	正: 2D 玻璃
	背: 3D 玻璃		背: 3D 玻璃				背: 3D 玻璃
40/pro	正: 3D 玻璃					13	正: 2D 玻璃
	背: 3D 玻璃						背: 3D 玻璃

资料来源: 各公司官网, 华安证券研究所

图表 182 全球 5G 手机渗透拉动的玻璃基板需求预测

	2019	2020	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E
智能手机出货量/亿台	14.86	12.82	13.50	13.91	14.32	14.75	15.19
智能手机出货量同比/%		-13.73%	5.30%	3.00%	3.00%	3.00%	3.00%
玻璃盖板渗透率/%	41%	60%	70%	80%	80%	80%	80%
单台手机玻璃背板+玻璃盖板单价/亿元	180-240	180-240	180-240	180-240	180-240	180-240	180-240
玻璃背板+玻璃盖板市场规模/亿元	1279.446	1615.32	1984.5	2336.88	2405.76	2478.00	2551.92

注: 注: IDC 预计智能手机出货量增速将维持在 3% 左右, 同时玻璃材质渗透率在 2022 年末将会达到 80%

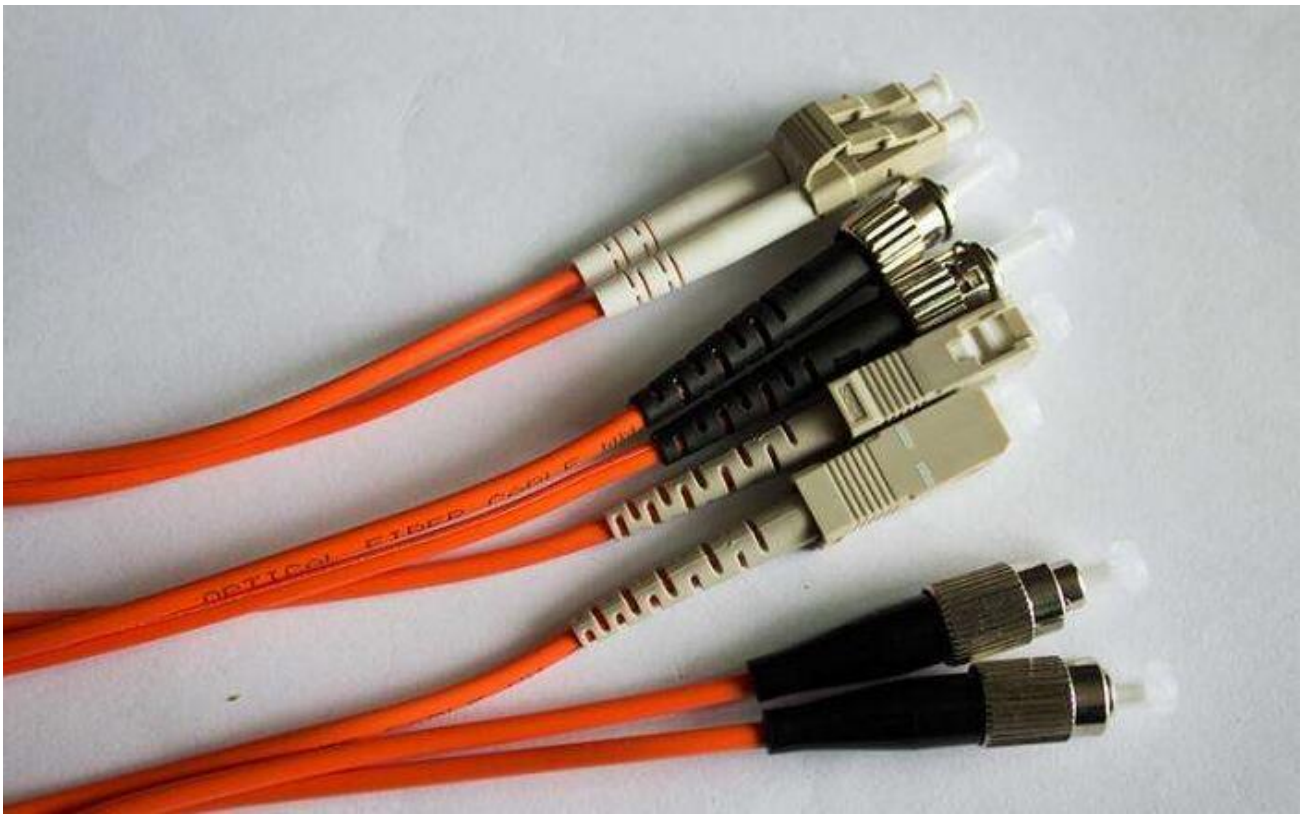
资料来源: IDC, 华安证券研究所

供给端, 美国的康宁公司、日本的小原光学及中国重庆鑫景特玻均有相关产品问世, 上市公司蓝思科技则主要负责玻璃陶瓷的后端加工环节。

3.2.3 光纤通讯行业

陶瓷套管又称陶瓷套筒，是重要的光通信元件之一，由氧化锆粉体烧制并加工而成，用于光纤之间的活动连接，两端插入带有电子陶瓷的光纤后，即可形成一条光通路。光通信是一种以光波为传输媒质的通信方式，是从电通信发展而来的，是成熟的电通信技术与先进的光子技术的结合。光通信与电通信相比，主要优点在于传输频带宽、通信容量大；传输损耗低、中继距离长；线径细、重量轻，原料为石英，节省金属材料，有利于资源合理使用；绝缘、抗电磁干扰性能强；还具有抗腐蚀能力强、抗辐射能力强、可绕性好、无电火花、泄露小、保密性强等特点。

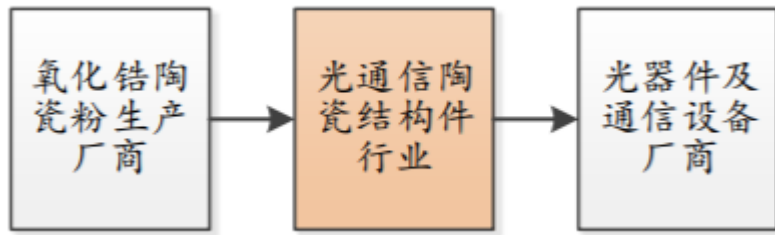
图表 183 光纤适配器产品图



资料来源：搜狐网，华安证券研究所

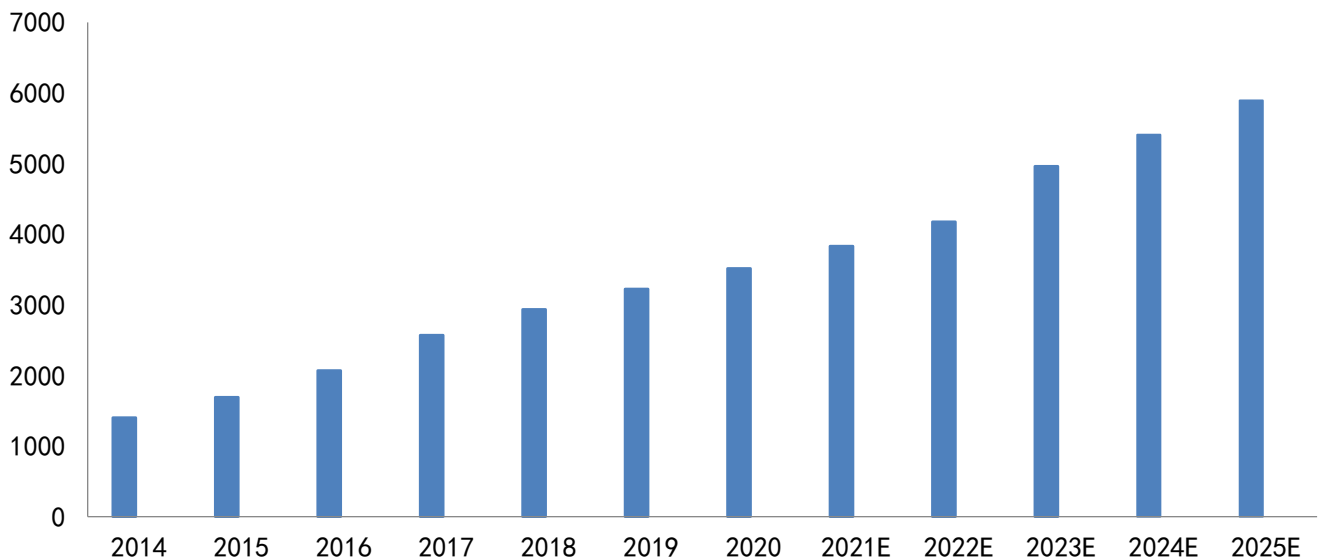
需求端，陶瓷套管主要用于生产光纤适配器和光收发模块的接口部分，其中光纤适配器应用占据了绝大部分市场。陶瓷套管主要用于光纤的活动连接，保证光纤跳线之间的精确对准，广泛应用于光纤适配器、光收发模块接口端等光器件中，是光通信网络通畅的基础。陶瓷套管属于光纤连接中的高精密度元件，误差稍大即会增加插入损耗，影响光信号传输质量。随着 5G 网络、IPTV（交互式网络电视）、网络游戏、网络视频、云计算和物联网等应用的推出与广泛使用，网络流量呈爆炸性增长，现有的带宽已经不能满足用户需求。电信运营商不得不加大光纤宽带和移动互联网的相关投资建设，新建网络并升级改造已有网络。随着全球电信业资本投资的增长，预计未来全球光纤适配器市场和光收发模块市场持续稳步增长，从而带动陶瓷套管市场持续增长。

图表 184 光通信陶瓷结构件行业产业链



资料来源：国瓷材料公告，华安证券研究所

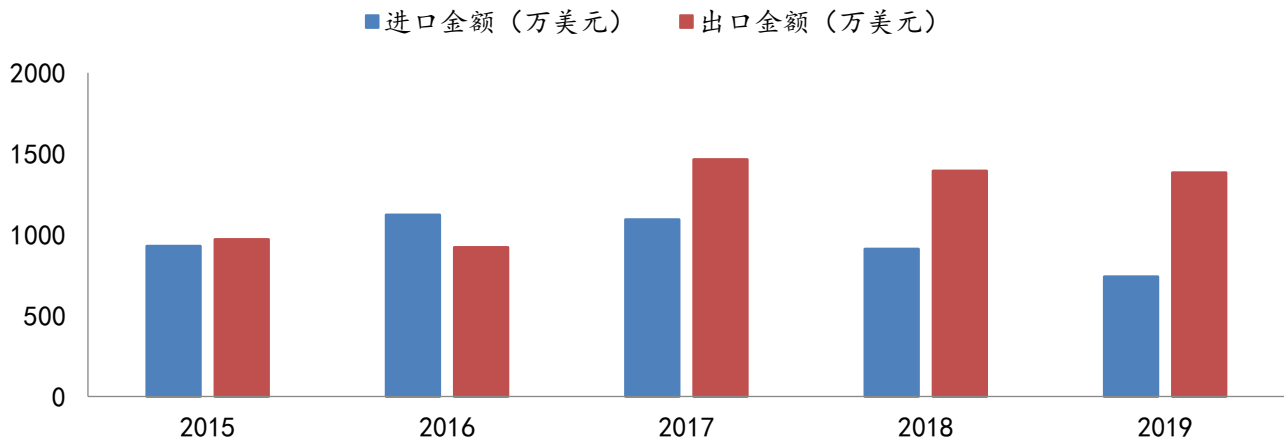
图表 185 2014-2025E 中国光纤光缆市场规模预测（单位：亿元）



资料来源：产业信息网，华安证券研究所

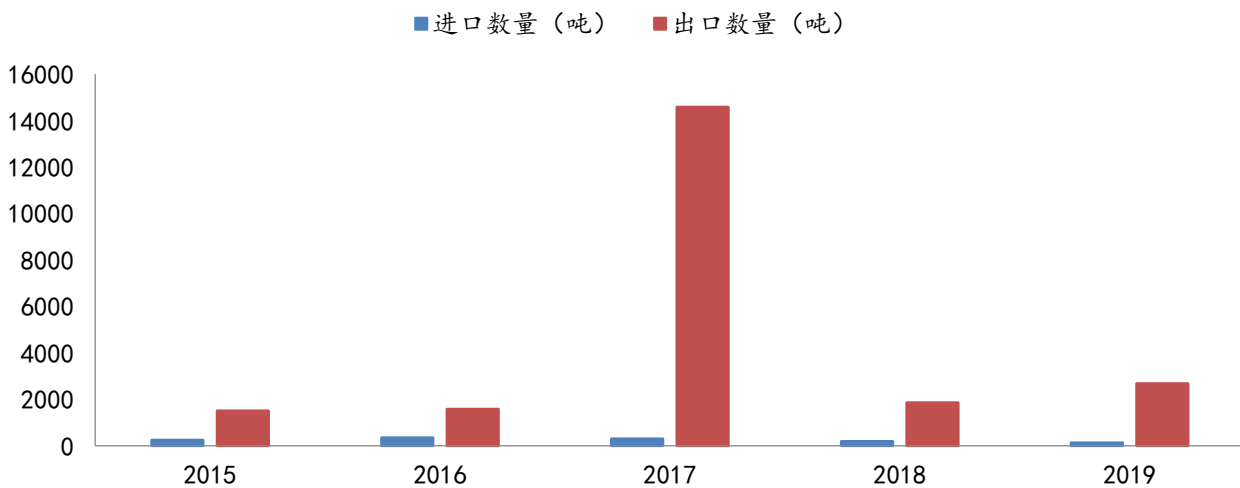
在光通信产业链中，电信运营商是终端需求方和消费者，在整个产业链中处于核心地位。陶瓷结构件产品的直接下游客户为通信设备厂商，目前华为、中兴等国内厂商已经逐步成为国际主流通信设备厂商，在国际竞争中占据了越来越高的市场份额，这也将有助于提升国内光通信元器件厂商的产品竞争力。在陶瓷结构件等基础元器件领域，目前市场竞争较为充分，生产厂商数量较多。国瓷材料的光通信陶瓷结构件产品主要为氧化锆陶瓷套管，目前国内外主要同行业公司包括苏州天孚光通信股份有限公司、深圳翔通光电技术有限公司、西比（湖州）通信科技有限公司、潮州三环（集团）股份有限公司、宁波福尔创光电科技有限公司以及日本京瓷公司（KYOCERA）、日本东陶公司（TOTO）等。

图表 1862015-2019 年中国陶瓷套管、导管、槽管及管子配件 进出口金额统计图



资料来源：中国海关，华安证券研究所

图表 1872015-2019 年中国陶瓷套管、导管、槽管及管子配件 进出口数量



资料来源：中国海关，华安证券研究所

3.3 生物陶瓷行业：聚焦人体组织修复及植入

生物材料的发展，可分为以下四个阶段：①18 世纪：采用天然材料（如柳枝、木、麻、象牙及贵金属等）作为骨修复材料的人工骨研究启蒙阶段；②19 世纪：采用纯金、纯银、铂等贵金属的自然发展阶段；③20 世纪中叶：采用钴铬铝合金、纯钛、钛合金，以及有机玻璃等高分子材料用于临床的探索阶段；④20 世纪 60 年代：生物陶瓷崭露头角的迅速发展阶段。

生物陶瓷（Bioceramics）是指用作特定的生物或生理功能的一类陶瓷材料，即直接用于人体或与人体相关的生物、医用、生物化学等的陶瓷材料。广义讲，凡属生物工程的陶瓷材料统称为生物陶瓷。生物陶瓷材料根据与组织的结合情况分为生物活性陶瓷材料和生物惰性陶瓷材料。两者的根本区别在于植入体内后，植入体是否能够与活组织形成化学键合。

关节损伤的发生率上升和牙科治疗数量的增加等，成为推动生物陶瓷市场成长的主要要素。全球生物陶瓷市场在 2019 年~2024 年间，预测将以约 6.8% 的年复合成长率成长。生物适合材料的需求增加，起因于老年人增加的脊椎手术及 ortho-biological 手术的增加，在牙科医疗的使用增加，疾病的硬化组织置换的利用增加等，成为这个市场主要成长要素。根据全美脊髓损伤统计中心发表的资料，2019 年时，美国，每年报告的新脊髓损伤 (SCI) 是 17,730 件，这是国内每 100 万人口约有 54 案例。

3.3.1 口腔修复行业

牙缺失是口腔常见疾病。常见的缺牙原因包括：1) 早期的龋齿或意外事故造成，2) 牙齿受到压阻而无法长出牙龈（俗称智齿）牙缺失导致的后果不仅是咀嚼效率降低，通常还伴有面形凹陷、面形苍老、发音不清等困扰，生活质量因此严重下降。

图表 188 牙缺失的危害

类别	具体危害	
功能性危害	牙列的完整性遭到破坏	牙齿缺失后，若较长时间不修复，邻近的牙齿由于失去了依靠和约束，会变得倾斜，易造成咬颌功能紊乱
	牙槽骨萎缩	牙缺失后正常咬颌力对牙槽骨的生理性刺激不复存在，牙槽骨均会出现不同程度的废用性萎缩，并且会给后期假牙修复及维持口腔颌面部的平衡和稳定带来巨大困难
	咀嚼功能减退	牙齿缺失后，余留牙齿发生了一系列变化，使原本良好的咬颌关系发生变化，由于余留牙之间有效功能面积相应减少，咀嚼效能降低
	食物嵌塞	正常牙齿之间，排列得十分紧密，邻近的牙齿移动后，牙齿间会出现缝隙，容易使食物嵌塞到牙齿间隙里，引起口臭、龋齿、牙周病等
	牙齿脱落	由于缺牙左右两边的牙齿无法获得它们原先常有的支撑压力，它们会在牙龈中变得倾斜不正，使牙齿逐渐松动，导致部分牙齿脱落
美容性危害	颞下颌关节病变	长时间的缺损单侧牙齿还会养成偏侧咀嚼的习惯，从而出现面部不对称和关节症状
	影响面形	牙齿全部缺失后，整个人看起来会比同龄人苍老许多
	影响社交	牙齿缺损会使人的发音变得不标准，影响交际活动

资料来源：《牙齿缺损或缺失后对健康的危害》，华安证券研究所整理

成年之后，牙缺失后无法再生，活动义齿、固定义齿及种植牙为常规修复手段，适用人群不同。人的一生共有乳牙和恒牙两副天然牙齿，若因龋齿、牙周炎等口腔疾病导致恒牙脱落，便再无天然牙萌出替代，只能通过义齿来修复。

- **活动义齿**，即利用放在剩余牙齿上的卡环及支托来稳定义齿，通过口内剩余牙齿及牙床来承担咀嚼力。优点是价格便宜、制作简单、磨除牙体组织少，缺点是异物感明显且咀嚼效率较低，长期使用更会加速牙槽骨的萎缩；
- **固定义齿**，即是像“搭桥”一样把假牙套在缺牙两侧磨小的健康牙齿上。这种方式不需要频繁摘下清洗，咀嚼功能较强，无明显异物感，缺点是对剩余邻牙要求高，仅适用于少数牙齿的缺失；
- **种植牙**，即一种以植入骨组织内的下部结构为基础来支持、固位上部牙修复体的缺牙修复方式，优点是不损伤正常牙齿，咀嚼功能类似天然牙，舒适美观，使用周期长，但种植手术条件要求较高，种植牙费用高。

图表 189 活动义齿、固定义齿及种植牙对比

	活动义齿	固定义齿	种植牙
示意图			
适用人群	1): 修复一或两个缺失牙 2): 齿槽骨窄或有高血压等疾病, 不适宜种植牙方案 3): 最末端牙齿缺失	1): 缺牙数目多 2): 齿槽骨窄或有高血压等疾病, 不适宜种植牙方案	1): 齿槽骨宽 2): 无其他疾病 3): 牙根已损坏
使用寿命	5 年以下	5-10 年	半永久
价格/颗	约 200 元	约 2000-10000 元	约 6000-20000 元
优点	1): 价格便宜 2): 制作简单 3): 磨除牙体组织少	1): 不需要频繁摘下清洗 2): 咀嚼功能较强 3): 无明显异物感	1): 不损伤正常牙齿 2): 咀嚼功能类似天然牙, 舒适美观 3): 使用周期长
缺点	1): 异物感明显 2): 咀嚼效率较低 3): 长期使用会加速牙槽骨萎缩	1): 对剩余邻牙要求高 2): 仅适用于少数牙齿的缺失	1): 种植手术条件要求较高 2): 种植牙费用高 (国产替代)
材料组成	牙齿本体: 树脂、金属 基板: 树脂、金属 支托: 金属 固位体: 金属 连接体: 树脂、金属	牙齿本体: 陶瓷、金属 固位体: 金属 连接体: 树脂、金属	种植体: 钛合金、氧化锆 基台: 钛合金、氧化锆 牙冠: 氧化锆、钛合金、贵金属、树脂

资料来源: 华安证券研究所整理

氧化锆兼具优良的机械性能、生物相容性及美学效果, 被视为固定义齿及种植牙的最佳牙冠材料。口腔修复发展以来, 金属曾是口腔临床修复应用最早且使用最广泛的材料, 但长期临床观察发现, 金属义齿难以满足患者的美学修复要求, 特别是对前牙区的牙龈过薄患者。近年来, 陶瓷材料因其具有化学性质稳定、生物相容性良好等特点逐渐取代金属成为主流修复材料, 其中氧化锆相比其他陶瓷材料具有良好的韧性, 是最佳选择。

图表 190 不同牙冠材料的性能对比

材料	美观性	生物学性能	稳定性	机械性能	成本
氧化锆	最好	较好	最好	较好	较高 (国产替代)
普通合金	较差	较差	较好	较好	最低
贵金属合金	较差	较好	较好	较好	较高
树脂	较好	较好	较差	较差	较低
其他陶瓷	较好	较好	较好	较差	较高

资料来源: CNKI, 华安证券研究所

从临床应用端来看，氧化锆全瓷牙冠修复效果最佳。2021 年山东省聊城市人民医院口腔科及广西省柳州市蒋翠荣口腔在发表的《氧化锆全瓷冠与金合金烤瓷冠在上前牙牙体缺损修复中的效果及安全性比较》一文中指出，氧化锆全瓷冠修复更能获得患者认可，氧化锆全瓷牙冠修复效果优于金合金烤瓷牙冠。2020 年安徽医科大学第二附属医院口腔科对 231 例患者临床效果进行了评估，发现在 2~7 年临床回访过程中，氧化锆全瓷牙冠并发症明显低于金属烤瓷牙冠。

图表 191 齿科修复陶瓷材料相关的标准

序号	标准编号	标准名称	发布日期	实施日期	归口单位
1	GB 30367-2013	牙科学 陶瓷材料	2013-12-31	2015-06-01	SAC/TC99
2	YY 0621.1-2016	牙科学 匹配性试验 第 1 部分：金属-陶瓷体系	2016-01-26	2018-01-01	SAC/TC99
3	YY/T 0621.2-2020	牙科学匹配性试验 第 2 部分：陶瓷-陶瓷体系	2020-02-25	2021-03-01	SAC/TC99
4	YY/T 0967.3-2016	牙科旋转器械 杆 第 3 部分：陶瓷杆	2016-07-29	2017-06-01	SAC/TC99/SC1

资料来源：国家药品监督管理局，华安证券研究所

我们测算，到 2027 年，我国人口缺牙总数或达到 37 亿颗，新增假牙数量 1.8 亿颗，年均增速 6.6%；在假牙修复方案中，种植牙方案占比大幅提升，种植牙数量可高达 2835 万颗，年均增速 30.6%；其中牙冠作为国产品牌渗透率最高的部分，其市场规模可达 496 亿元。

- 关键假设 1：人口普查及第五次全国口腔健康流行病学调查尚未开展，考虑到各年龄段人数随着年份变化，所属年龄段阶段也会变化，故以 2017 年人口结构为基准进行测算；
- 关键假设 2：牙齿治疗比例方面，基于国内品牌已经与海外品牌差距不大，2018 年爱尔创市占率已经达到 42%，预计国产化牙冠的市占率将达到 50%；
- 关键假设 3：根据好大夫网站的数据，国产陶瓷牙冠的价格约为 2000 元，存量市场空间以三部分年龄区间的缺牙数价值计算；
- 关键假设 4：十年后，55-64 岁年龄段将变成 65-74 岁区间，因而增量市场空间以该年龄段新增缺牙数价值计算；
- 关键假设 5：按照成本比例，陶瓷牙根及基台价格为 8500 元及 1500 元，陶瓷牙根及基台正处于临床应用中，预计不久后可以投入使用，且牙槽骨窄患者亦可使用，故假定缺牙处均使用氧化锆全瓷陶瓷植入体系。
- 关键假设 6：2027 年的人均牙缺数量不变，人口结构考虑了不同年龄段的死亡率。
- 关键假设 7：不同年龄的缺牙修复比例依据 United Health Foundation 测算的美国缺牙修复比例进行适当调整。我们认为随着消费者人均可支配收入提升，随着消费者对美学和生活品质的追求，缺牙修复比例会提升。
- 关键假设 8：缺牙修复方案中使用假牙修复的比例不会有太大变化，因为医疗方案的变化预计不大。

- 关键假设 9：在假牙修复方案中种植牙的修复方案大幅提升。且存量市场的假牙会有一定比例复修，在平价种植牙普及下，会有一定比例转为种植牙。
- 关键假设 10：义齿中烤瓷牙 300 元~1000 元、全瓷牙 1000 元~2500 元每颗，考虑全瓷牙的普及推广，我们假设义齿的均价为 1750 元/颗。

图表 192 全国氧化锆义齿存量市场空间及增量市场测算

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2027E
35~44 岁人口数量 (亿人)			——				2.07	4.59
55~64 岁人口数量 (亿人)			——				1.55	2.07
65~74 岁人口数量 (亿人)			——				1.02	1.52
35~44 岁人均缺牙数 (颗)			——				2.40	2.40
55~64 岁人均缺牙数 (颗)			——				5.73	5.73
65~74 岁人均缺牙数 (颗)			——				9.50	9.50
35~44 岁未修复人数比例 (%)			——				18.6%	11.3%
55~64 岁未修复人数比例 (%)			——				38.9%	31.6%
65~74 岁未修复人数比例 (%)			——				47.7%	40.4%
35~44 岁未修复缺牙数 (亿颗)			——				0.92	1.24
55~64 岁未修复缺牙数 (亿颗)			——				3.46	3.74
65~74 岁未修复缺牙数 (亿颗)			——				4.63	5.84
总缺牙数量 (万颗)			——				235549	372987
总未修复的缺牙数量 (万颗)			——				90099	108232
牙缺修复比例 (%)			——				61.7%	71.0%
假牙数量 (万颗)	6210	6775	7420	8165	8650	9220	9819	18533
YoY (%) 2027 年为年均增速		9.1%	9.5%	10.0%	5.9%	6.6%	6.5%	6.6%
假牙修复比例 (%)			——				6.8%	7.0%
新增种植牙数量 (万颗)	13.4	18.3	30	50	98	142	196	1853
新增种植比例 (%)	0.2%	0.3%	0.4%	0.6%	1.1%	1.5%	2.0%	10.0%
存量假牙 10 年后转化率 (%)			——					10.0%
存量种植牙数量 (万颗)			——					982
种植牙数量 (万颗)	13.4	18.3	30	50	98	142	196	2835
YoY (%) 2027 年为年均增速		36.6%	63.9%	66.7%	96.0%	44.9%	38.0%	30.6%
义齿价格 (元/颗)			——					1750
义齿市场规模 (亿元)			——					496

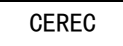
注：第五次全国口腔健康流行病学调查尚未开展

资料来源：United Health Foundation, CDC, 《第四次全国口腔健康流行病学调查报告》，产业信息网，华安证券研究所

供给端来看，国瓷材料/爱尔创/松柏资本是目前唯一打通了氧化锆粉体→氧化锆瓷块→机加工间→义齿/牙冠→数字化口腔→爱尔创品牌的种植牙→可内销松柏诊所体系全产业链的公司。氧化锆以锆英砂、氟氧化锆、稀土等为主要原料，经过水热法合成得到氧化锆粉体及配方粉，然后通过烧结工艺成为氧化锆瓷块，之后依据三维口腔扫描设备得到的数据模型，瓷块在机加工间被加工成义齿产品，最后通过经销商或者直接内销给诊所或医院临床端，专业口腔医生为患者进行义齿产品的安装与调节。国内企业氧化锆义齿的材料供应商营收体量都相对较小。2020 年，爱尔

创实现营收 5.79 亿元；爱迪特实现营收 2.04 亿元；沪鸽股份实现营收 0.91 亿元。而 2020 年财年，登士柏西诺德实现营收 8.95 亿美元；3M 实现营收 321.36 亿美元，远高于国内厂商。

图表 193 全球义齿主要供应商

属地	企业	品牌	产业链布局			
			粉体制造	义齿制造	经销商	内销诊所
美国	3M	 		●	●	
欧洲	义获嘉			●	●	●
	登士柏西诺德	 		●	●	
	德国阿曼吉尔巴赫	 		●	●	
中国	国瓷/爱尔创/松柏	“瓷倍健”“瓷优健”	●	●	●	●
	爱迪特	“赛瓷”“绚彩”		●	●	
	中航翔通			●	●	
	沪鸽口腔			●		●

资料来源：公司官网，华安证券研究所

3.3.2 骨修复行业

骨缺损是指骨的结构完整性被破坏。肿瘤、外伤、坏死、先天畸形等一系列病因往往会导致大体积的骨缺损产生。在我国，每年因交通事故和生产安全事故所致创伤骨折、脊柱退行性疾病及骨肿瘤、骨结核等骨科疾病造成骨缺损或功能障碍的患者超过 600 万人。骨移植是治疗骨缺损的主要方法，也是目前临床上除输血以外应用最广泛的组织移植，但骨移植中使用的骨修复材料的研发一直是世界性的难题。

除自体骨以外，按材料性质划分，骨修复材料可以分为天然骨修复材料及人工骨修复材料两大类，其中天然骨修复材料可以分为同种异体骨、异种骨、脱钙骨基质三类，人工骨修复材料主要可以分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料、组织工程材料。

图表 194 各类骨修复材料的特点

类别			特点
天然骨修复材料	同种异体骨		取自死亡或被截肢的人体，来源有限且存在法律和伦理问题，难以满足大规模临床应用的需求；具有良好的骨传导能力；具有引起免疫排斥反应、传播疾病、产生延迟愈合和感染等并发症的风险
	异种骨		取自牛、猪等动物，来源广泛；具有良好的骨传导能力；具有引起免疫排斥反应、传播疾病的风险；高温煅烧等处理方式能够去除免疫原性，但会导致生物可降解性下降
	脱钙骨基质		主要取自同种异体骨，由胶原蛋白、非胶原蛋白、生长因子、少量磷酸钙及细胞碎片等组成，来源有限且存在法律和伦理问题，难以满足大规模临床应用的需求；具有良好的骨诱导能力，但骨诱导能力在不同产品、相同产品的不同批次间存在较大差异，可能受到来源、制备工艺等因素的影响，尚不能控制治疗效果的稳定性；保留了大量蛋白成分，免疫原性较强，临床使用时产生免疫排斥的风险较高；机械强度较差，不适合用于承重部位
人工骨修复材料	金属材料		主要包括多孔钛及钛合金、钛镍合金、钽金属、不锈钢等，来源广泛；具有良好的机械强度，是考虑机械强度时的首选；受到腐蚀时会产生材料性质的改变，引起人体内重金属离子水平的变化，进而产生毒副作用；存在应力遮挡，人体自身的骨组织可能会由于得不到足够的力学刺激而产生骨质疏松等症状；不能形成骨整合，存在松脱并对周围组织形成磨损的风险；临床使用时可塑性较差
	无机非金属材料	生物陶瓷	主要包括羟基磷灰石陶瓷、磷酸钙陶瓷等，来源广泛；具有良好的生物相容性及骨传导能力；脆性较大，机械强度较差，不适合用于承重部位；降解速率通常难以控制或不降解，不利于新骨生长
		硫酸钙 骨水泥、磷酸钙骨水泥、生物玻璃等	来源广泛；具有良好的生物相容性；机械强度较差，不适合用于承重部位；材料降解过程以物理溶解为主，降解速率通常难以控制，不利于新骨生长
	高分子材料		种类众多，包括胶原蛋白、透明质酸、壳聚糖等天然高分子材料以及聚甲基丙烯酸甲酯、聚氨酯等合成高分子材料，来源广泛；具有良好的生物相容性及骨传导能力；可根据临床需要调节理化特性和力学特性；降解速率与新骨生长速率不匹配；部分高分子材料降解产物呈酸性，不利于新骨生长
	复合材料		采用两种或两种以上材料复合而成，通常是指无机材料与高分子材料复合形成的材料；能够兼具各组分材料的特性，同时可产生组分材料不具备的新特性
	组织工程材料		通过纳米工程技术、基因工程技术等丰富和提升上述骨修复材料的特性，主要包括以下两个方面：①通过纳米工程技术使上述骨修复材料具有与人体骨骼更为相近的微观结构，有利于加强上述骨修复材料的机械强度以及促进蛋白质吸附、细胞粘附和增殖分化的能力；②在以上述骨修复材料作为支架材料的基础上，复合种子细胞、生长因子等诱导和促进骨组织修复的活性物质，增强骨诱导能力。支架材料作为种子细胞、生长因子等的载体是构成组织工程材料的中心环节。种子细胞、生长因子具有良好的应用前景，但目前种子细胞在临床应用中仍受到较多政策限制，临床应用较少；生长因子在国外的临床应用中曾产生部分问题，作为载体的支架材料的种类以及生长因子与支架材料的结合方式、生长因子的临床使用方式和剂量等关键问题还在研究和发展当中

资料来源：奥精医疗招股说明书，华安证券研究所

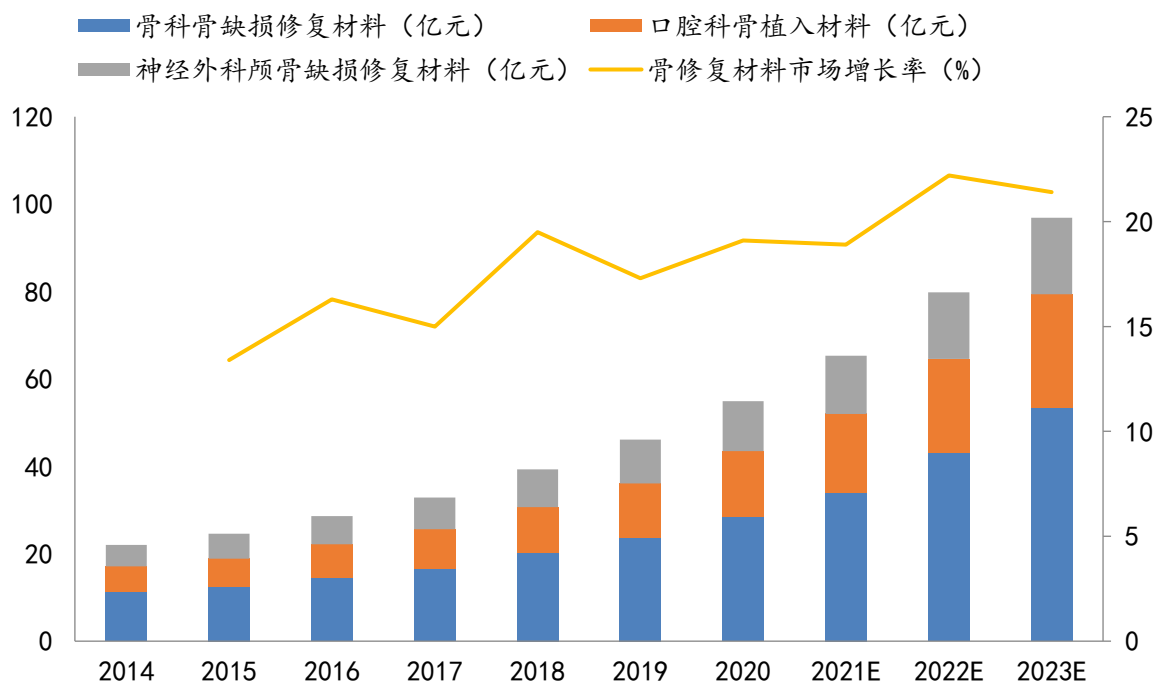
图表 195 人工骨修复材料的不同种类的技术路线差异、应用情况等对比

分类		技术路线	应用情况	我国市场占有率	主要优势	主要劣势
金属材料		高温烧结	骨科	较低	来源广泛；具有良好的机械强度，是考虑机械强度时的首选。	受到腐蚀时会产生材料性质的改变，引起人体内重金属离子水平的变化，进而产生毒副作用；存在应力遮挡，人体自身的骨组织可能会由于得不到足够的力学刺激而产生骨质疏松等状况；难以形成骨整合，存在松脱并对周围组织形成磨损的风险；临床使用时可塑性较差；不可降解，作为异物永久留存于人体内。
无机非金属材料	生物陶瓷	高温烧结	骨科、口腔科	较高	来源广泛；具有良好的生物相容性及骨传导能力。	脆性较大，机械强度较低；降解速率通常难以控制或不降解，不利于新骨生长。
	硫酸钙骨水泥、磷酸钙骨水泥	粉剂、液体术中调制，植入后固化	骨科、口腔科	中	来源广泛；具有良好的生物相容性；临床使用时可塑性较好。	机械强度较低；材料降解过程以物理溶解为主，降解速率通常难以控制，不利于新骨生长。
	生物玻璃	高温熔融后快速冷却	骨科、口腔科	较低	来源广泛；具有良好的生物相容性及引导骨再生能力。	机械强度较低；临床使用时可塑性较差。
高分子材料	天然高分子	提取和纯化	骨科、口腔科	较低	来源广泛；具有良好的生物相容性及骨传导能力。	机械强度较低；材料降解速率通常难以控制。
	合成高分子	聚合反应合成	骨科、口腔科、整形外科、神经外科	中	来源广泛；可根据临床需要调节理化特性和力学特性。	聚甲基丙烯酸甲酯、高密度聚乙烯等高分子材料不可降解，作为异物永久留存于人体内；部分聚酯类可降解高分子材料的降解产物呈酸性，不利于新骨生长。
复合材料	仿生复合材料	体外仿生矿化	骨科、口腔科、整形外科、神经外科	较高	来源广泛；具有高度仿生的成分和结构、良好的生物相容性及骨传导能力；材料在引导新骨再生的过程中被新生骨组织逐渐爬行替代，最终被完全降解吸收，材料降解速率与新骨再生相匹配；临床使用时可塑性较好。	机械强度较低。
	无机/有机复合材料	高温注塑、浇注成型、物理混合等	骨科、口腔科、整形外科、神经外科	中	来源广泛；能够兼具各组分材料的特性，同时可产生组分材料不具备的新特性。	材料合成工艺通常较复杂；不可降解的复合材料，如聚甲基丙烯酸甲酯/羟基磷灰石、聚酰胺/羟基磷灰石、聚乙烯/羟基磷灰石等，将作为异物永久留存于人体内。
组织工程材料		重组人骨形态发生蛋白与载体材料复合	骨科	较低	良好的引导骨再生能力。	生产成本较高；为保持重组人骨形态发生蛋白活性，需低温保存冷链运输，导致产品价格昂贵。

资料来源：奥精医疗招股说明书，华安证券研究所

按应用领域划分，骨修复材料主要包括骨科骨缺损修复材料、口腔科骨植入材料和神经外科颅骨缺损修复材料。根据 GrandViewResearch 的统计数据，预计 2026 年全球骨修复材料行业的市场规模将达到 35.6 亿美元，年均复合增长率为 4.1%。根据南方所的统计数据，2018 年我国骨修复材料行业的市场规模为 39.3 亿元，2014 年至 2018 年的年均复合增长率为 16.0%，远超全球骨修复材料行业的整体增长水平，其中骨科骨缺损修复材料行业的市场规模为 20.2 亿元，口腔科骨植入材料行业的市场规模为 10.5 亿元，神经外科颅骨缺损修复材料行业的市场规模为 8.6 亿元；预计 2023 年我国骨修复材料行业的市场规模将达到 96.9 亿元，其中骨科骨缺损修复材料行业的市场规模将达到 53.4 亿元，口腔科骨植入材料行业的市场规模将达到 26.0 亿元，神经外科颅骨缺损修复材料行业的市场规模将达到 17.5 亿元。

图表 19 2014-2023 年我国骨修复材料行业市场规模（亿元）



资料来源：南方所，华安证券研究所

在我国人工骨修复材料市场，无机非金属材料（生物陶瓷）以及复合材料产品为行业内的相对主流产品。虽然自体骨从 20 世纪初开始广泛使用并成为骨移植临床应用的金标准，但由于自体骨的骨量有限，难以满足大规模临床应用的需求，且会造成患者的额外失血与创伤、取骨部分存在潜在并发症等风险，伴随着骨缺损修复材料的发展，自体骨在国内外的临床使用比例均逐步下降。根据南方所的统计数据，我国自体骨在骨科手术中的临床使用比例已由 2007 年的 81% 下降至 2017 年的 62%，呈现出明显的下降趋势；目前我国骨科临床使用骨缺损修复材料的每年 133 万例手术中，使用人工骨的约 53 万例，使用同种异体骨的约 80 万例。同时，在医疗技术发展水平相对较高的美国，根据 Orthopaedic Biomaterials 的统计数据，2017 年自体骨的临床使用比例为 45.51%，远低于我国。进入 21 世纪后开始研发出的聚酰胺/羟基磷灰石复合材料、聚醚醚酮/羟基磷灰石复合材料及生物陶瓷材料等，

逐渐开始替代自体骨或同种异体骨。

图表 197 美国骨科临床获批使用的胶原/羟基磷灰石类人工骨修复材料情况

产品名	制造商, 国家	材料组成	孔隙率	孔尺寸	产品形态	510(k) 号, 批准日期
Bongold	Allgens Medical, China	自组装的牛 I 型胶原蛋白和羟基磷灰石复合材料, 具有与天然矿化胶原相似的成分和微观结构	70-88%	50-550 μm	颗粒、块、条	K141725, 2015/7/9
CopiOs	Zimmer, USA	热交联的牛真皮胶原和 67% 的钙磷盐	93.39%	N/A	海绵、面团	2003/11/20 K033679.
HEALOS	Johnson & Johnson, USA	70% 的牛 I 型胶原蛋白和羟基磷灰石	>95%	4-200 μm	条	2001/8/15 K012751,
MOZAIK	Integra, USA	20% 的 I 型胶原蛋白和 80% 的 β 磷酸钙	N/A	12-350 μm	条、面团	2007/1/19 K063124,
MASTERGRAFT Strip/Putty	Medtronic, USA	牛 I 型胶原蛋白和双相生物陶瓷 (15% 羟基磷灰石和 85% β 磷酸钙)	89%	N/A	条、面团	K082166, 2009/6/2; K081784, 2008/9/17
OssiMend	Collagen Matrix, USA	45% 牛 I 型胶原蛋白和 55% 合成磷酸钙	N/A	N/A	条、块、面团	K052812, 2016/1/25
Vitoss FOAM	Stryker, USA	牛 I 型胶原蛋白和磷酸钙	90%	1-1000 μm	面团、条	2003/12/19 K032288,

资料来源: 奥精医疗招股说明书, 华安证券研究所

骨科骨缺损修复材料行业方面, 天然骨修复材料占据了我国骨科骨缺损修复材料行业约三分之二的市场份额, 同种异体骨占据了其中 90% 以上的市场份额, 主要生产企业包括山西奥瑞生物材料有限公司、北京鑫康辰医学科技发展有限公司、北京大清生物技术股份有限公司、湖北联结生物材料有限公司、上海安久生物科技有限公司、上海亚朋生物技术有限公司等国内企业; 异种骨、脱钙骨基质的市场份额较小。人工骨修复材料已占据了我国骨科骨缺损修复材料行业约三分之一的市场份额, 主要生产企业包括奥精医疗、上海瑞邦生物材料有限公司、杭州九源基因工程有限公司、四川国纳科技有限公司、上海贝奥路生物材料有限公司等国内企业以及百赛、Wright、强生等外国企业。

口腔科骨植入材料行业方面, 我国口腔医疗行业起步较晚, 大众的口腔健康意识较为薄弱, 使得我国口腔医疗行业的发展与国外有较为明显的差距。目前, 我国口腔科骨植入材料行业的市场份额主要被进口产品所占据, 国产产品仅占据我国口腔科骨植入材料行业约 15% 的市场份额, 进口替代程度较低。瑞士盖氏 (Geistlich) 的 Bio-Oss 骨粉与 Bio-Gide 可降解胶原膜系列产品占据了我国口腔科骨植入材料行业约 70% 的市场份额, Bio-Oss 骨粉取自牛骨, 系经高温煅烧处理的异种骨产品。

神经外科颅骨缺损修复材料行业, 与我国骨修复材料行业、口腔医疗行业类似, 我国神经外科高值耗材行业起步亦较晚。目前, 除了人工硬脑 (脊) 膜产品完成了进

口替代以外，其他各类产品仍以进口产品为主，进口替代程度较低。目前，我国已上市的神经外科颅骨缺损修复材料产品中，神经外科颅骨缺损修复材料以金属材料（钛合金、钛网）为主，由于金属材料存在因易受温度影响而可能引起患者的不适反应、在进行医疗影像检查时因容易产生伪影而对检查结果产生影响等缺点，高分子材料、复合材料等其他材料发展较快。神经外科颅骨缺损修复材料的主要生产企业包括强生、美敦力、史塞克等国外企业以及奥精医疗、西安康拓医疗技术股份有限公司、天津市康尔医疗器械有限公司、上海双申医疗器械股份有限公司等国内企业。

图表 198 骨修复领域相关公司



注：红色为上市公司

资料来源：华安证券研究所整理

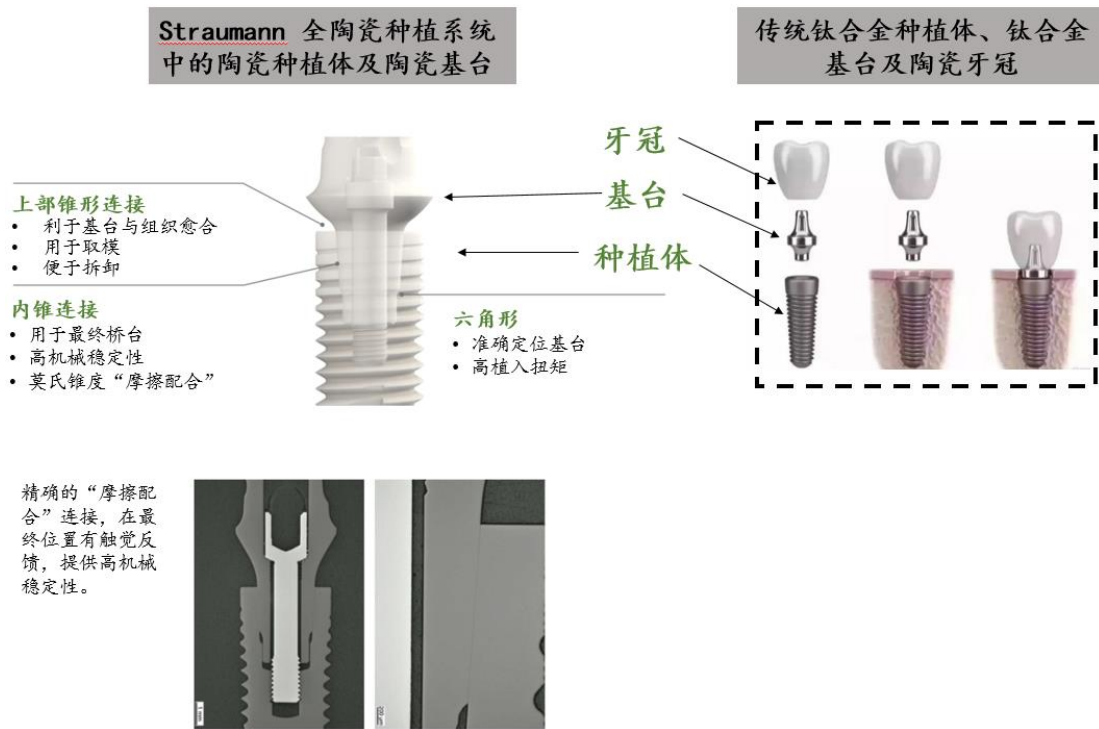
3.3.3 人体植入体行业

氧化锆还可以被用来制造种植牙的种植体和基台。种植牙由种植体、基台及牙冠组成。其中种植体按照植入深度可分为骨水平种植体、软组织水平植入体等两种，前者种植体与牙槽骨齐平，适用范围广但手术难度较高，后者种植体与牙龈组织齐平，仅适用牙龈较厚患者，手术难度较低。Straumann SNOW 是第一个在骨水平上可拆卸螺钉固定的全陶瓷种植体系统，包括陶瓷种植体，陶瓷基台和陶瓷连接螺钉。其特征是在种植体基台的重要过渡区域具有出色的粘膜适应性，可植入各类牙槽骨质量的患者。

氧化锆种植体已被证明可以作为传统钛合金种植体的替代品。瑞士 Straumann 在 2014 年时已经成功将氧化锆种植体植入一名患者口中，并分别在植入手术后 6 个月和 1 年时，安排患者进行复诊检查。从两次复诊结果看，种植体上的全瓷牙冠功能正常，两次均未发现并发症。从种植体植入手术 1 年后的根尖 X 光片可以看出，种植体周围骨结合正常，且粗糙种植体表面的边界附近骨水平保持稳定，患者对其

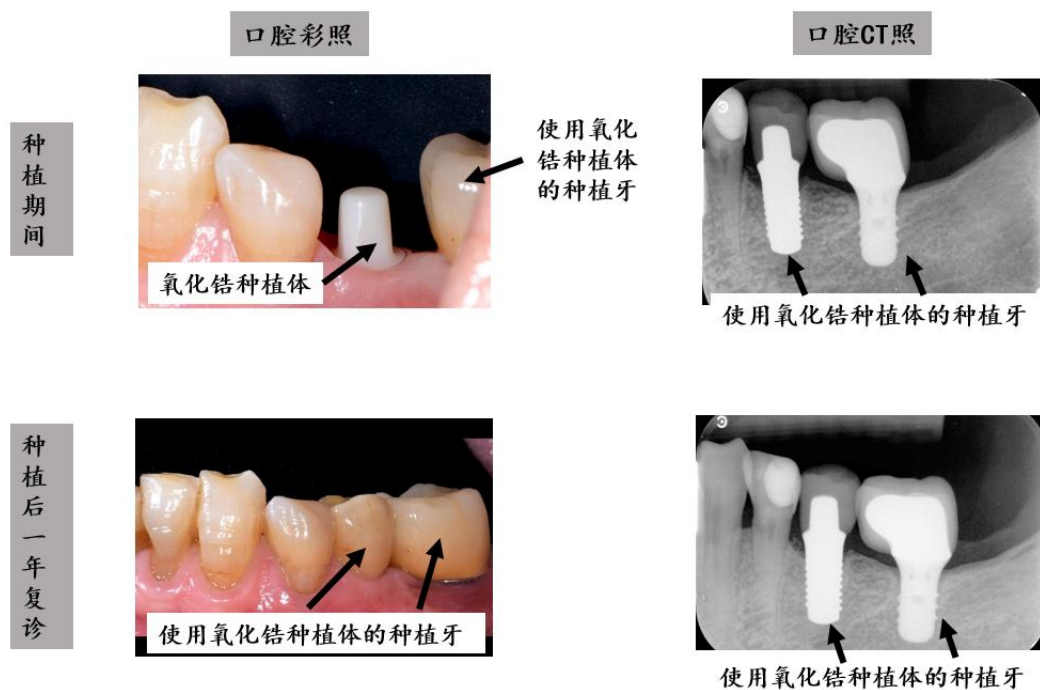
功能和美观方面的治疗效果非常满意。

图表 199 Straumann SNOW 氧化锆陶瓷种植系统



资料来源：Straumann 官网，华安证券研究所

图表 200 使用 Straumann 氧化锆陶瓷种植系统的患者种植期间及种植一年后复诊效果对照图



资料来源：Straumann 官网，华安证券研究所

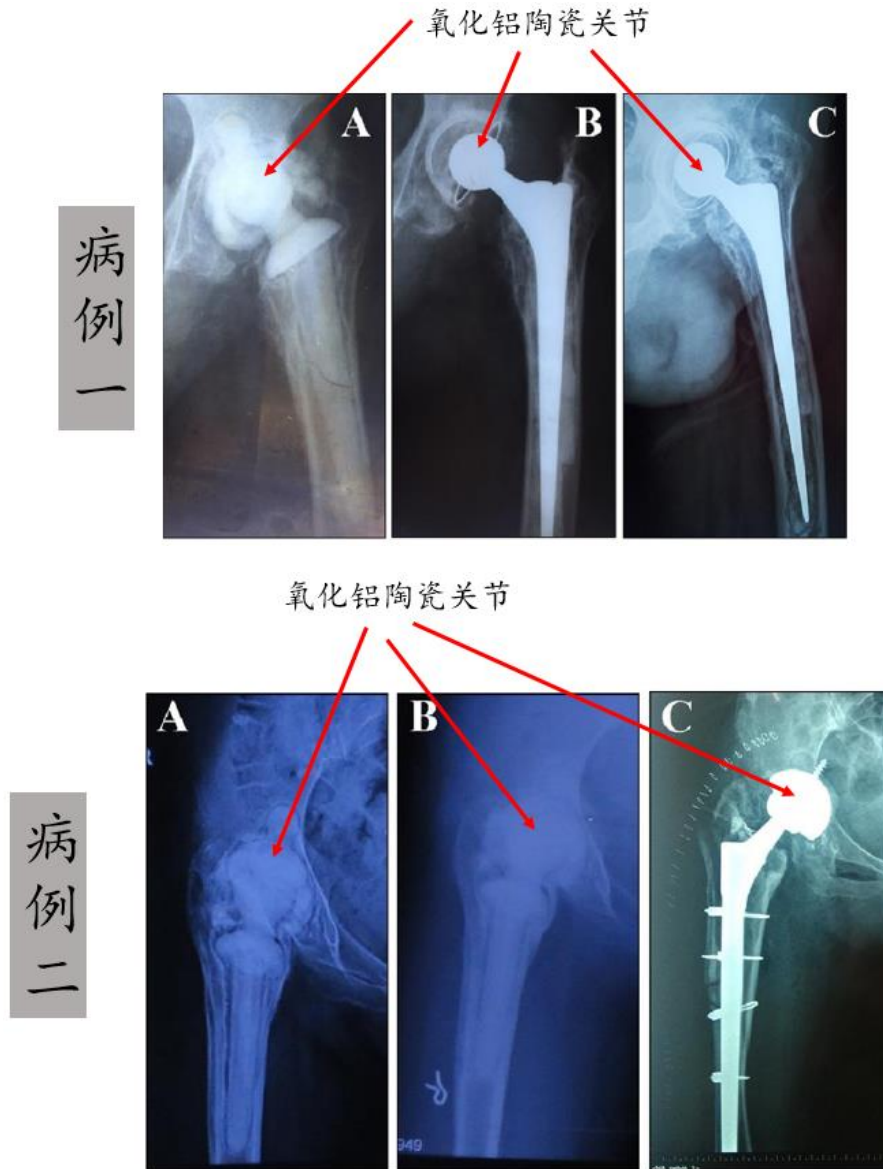
阻碍氧化锆种植体应用的因素主要有两点，其一是氧化锆种植体仍需更多临床数据，其二是目前医疗标准中尚未对陶瓷种植体有明确测试标准。与其他氧化物陶瓷相比，氧化锆已经显示出优越的生物力学性能。自从引入到牙科领域以来，氧化锆已被用作所有陶瓷牙冠和固定牙修复体(FDP)以及种植体基台的骨架材料。由于其材料特性及与牙齿相似的颜色，氧化锆是目前牙种植体的首选材料。此外，人类研究已表明，与钛相比，氧化锆的细菌粘附减少，且氧化锆的种植体周围软组织中的炎性细胞更少。在最近的一项系统综述 (Hashimetal, 2016 年) 中，植入 1 年后一段式和两段式氧化锆种植体的总体成活率为 92%，氧化锆种植体可以作为钛种植体的非金属替代品。但目前氧化锆种植体尚未获大范围临床应用，据 2019 年 Katarina Frigan 指出，其原因在于 ISO 14801 和 ISO 13356 尚未对氧化锆义齿植入设定专门的测试标准。

图表 201 植入体领域陶瓷材料相关的标准

序号	标准编号	标准名称	发布日期	实施日期	归口单位
1	GB/T 22750-2008	外科植入物用高纯氧化铝陶瓷材料	2008-12-30	2009-12-01	SAC/TC110
2	YY/T 1294.2-2015	外科植入物 陶瓷材料 第 2 部分：氧化锆增韧高纯氧化铝基复合材料	2015-03-02	2016-01-01	SAC/TC110
3	GB 23101.1-2008	外科植入物 羟基磷灰石 第 1 部分：羟基磷灰石陶瓷	2008-12-30	2010-03-01	SAC/TC110
4	GB 23101.2-2008	外科植入物 羟基磷灰石 第 2 部分：羟基磷灰石涂层	2008-12-30	2010-03-01	SAC/TC110
5	GB/T 23101.3-2010	外科植入物 羟基磷灰石 第 3 部分：结晶度和相纯度的化学分析和表征	2010-09-02	2011-08-01	SAC/TC110
6	GB/T 23101.4-2008	外科植入物 羟基磷灰石 第 4 部分：涂层粘结强度的测定	2008-12-30	2010-03-01	SAC/TC110
7	YY/T 0683-2008	外科植入物用 β -磷酸三钙	2008-10-17	2010-01-01	SAC/TC110
8	YY/T 0964-2014	外科植入物 生物玻璃和玻璃陶瓷材料	2014-06-17	2015-07-01	SAC/TC110
9	YY/T 1558.3-2017	外科植入物 磷酸钙 第 3 部分：羟基磷灰石和 β -磷酸三钙骨替代物	2017-09-25	2018-10-01	SAC/TC110
10	YY/T 1715-2020	外科植入物 氧化钇稳定四方氧化锆 (Y-TZP) 陶瓷材料	2020-06-30	2021-06-01	SAC/TC110
11	YY/T 0809.2-2020	外科植入物 部分和全髋关节假体 第 2 部分：金属、陶瓷及塑料关节面	2020-09-27	2021-09-01	SAC/TC110/SC1
12	YY/T 1705-2020	外科植入物 髋关节假体陶瓷股骨头抗冲击性能测定方法	2020-02-21	2021-01-01	SAC/TC110/SC1
13	YY/T 0924.2-2014	外科植入物 部分和全膝关节假体部件 第 2 部分：金属、陶瓷及塑料关节面	2014-06-17	2015-07-01	SAC/TC110/SC1
14	YY/T 1716-2020	组织工程医疗器械产品 陶瓷和矿物质支架的表征	2020-06-30	2021-06-01	SAC/TC110/SC3
15	YY/T 1744-2020	组织工程医疗器械产品 生物活性陶瓷多孔材料中细胞迁移的测量方法	2020-09-27	2021-09-01	SAC/TC110/SC3

资料来源：国家药品监督管理局，华安证券研究所

图表 202 氧化铝基复合微晶陶瓷人工关节病例显示假体多年后周围均无骨溶解现象



资料来源：《新型氧化铝基复合陶瓷骨组织生物应答效应的实验研究》，华安证券研究所

陶瓷作为植入物材料除用于口腔修复外，还可用于人工关节。从生物学因素角度来看，陶瓷人工关节相较于高分子聚乙烯关节具有优越性。1967 年来自瑞士研究者报道了一种具有生物相容性的玻璃陶瓷，其主要由 SiO_2 、 Na_2O 、 CaO 、 P_2O_5 、La 系元素或其氧化物构成。从 1974 年开始我国对陶瓷人工关节进行了研究并通过大量的实验确定了 SiO_2 - Al_2O_3 - Li_2O 系统，其中以 Ag 为晶核剂，生成 $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ 为主要晶相和少量 SiO_2 、 β - Li_2O 、 Al_2O_3 - 4SiO_2 晶体的玻璃陶瓷材料。动物实验表明，这种玻璃陶瓷人工关节具有良好的生物相容性，并且机械性能较好，耐腐蚀、抗氧化、无毒。Hench 和 Wilson 发明了部分降解含磷和钙的硅玻璃，其中一类具有特殊结构，称为生物活性玻璃。表面部分在水溶液中可形成富含氧化硅和钙、磷离子的胶样层，有利于羟基磷灰石 (HA) 的形成和沉积，然后 HA 晶体可吸附胶原粘多糖和糖蛋白，从而在生物活性玻璃表面直接形成。有很多研究者在生物陶瓷的骨诱导试验中发现，

其表面均能形成一种非定比性的骨样磷灰石，这种骨样磷灰石的形成与生物陶瓷周围环境的共同作用有关，是骨整合的重要条件。另外，有研究证实陶瓷表面骨样磷灰石表面骨样磷灰石表层的形成，可选择性的吸收注入纤维蛋白等血清蛋白，有利于细胞吸附的成骨细胞表型的表达，并且能直接促使干细胞转化为成骨细胞。

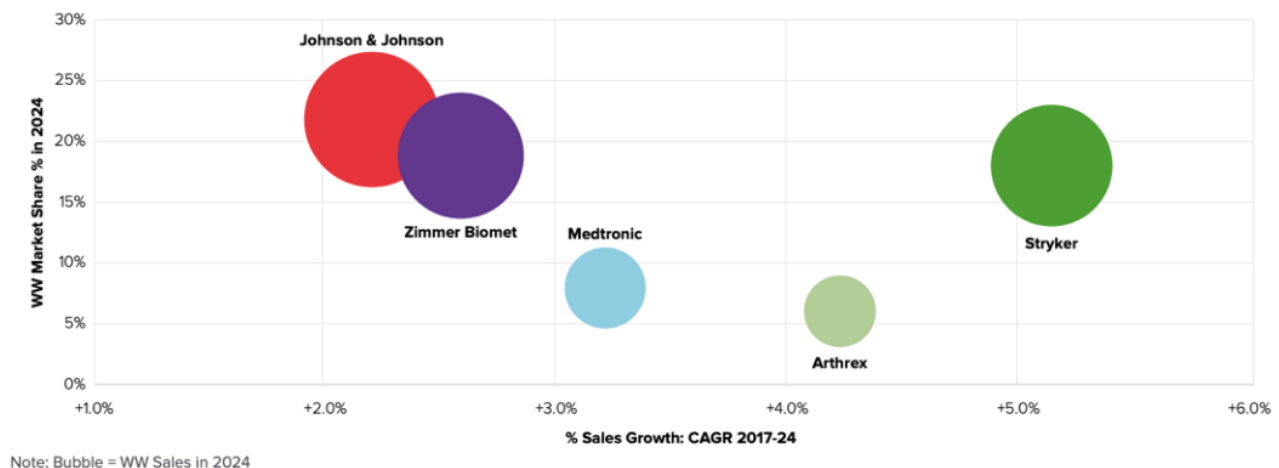
氧化铝可作微晶陶瓷人工关节。南昌大学《新型氧化铝基复合陶瓷骨组织生物应答效应的实验研究》通过原位修饰法、纳米 ZrO₂ 包覆、热等静压等技术方法制备新型氧化铝基复合陶瓷材料，随后进行材料处理及假体制作，最后进行临床应用。

- **材料处理：**将微晶陶瓷熔化并置于模具中来制备陶瓷关节假体。在模具中冷却后，髋关节假体将会呈现一个如透明玻璃般的状态。然后将髋关节暴露在紫外线、X 射线或 γ 射线下并逐渐加热，在通过热处理后，透明玻璃状的关节假体将转变为不透明状的陶瓷关节假体。与我们所知的工艺陶瓷不同的是，微晶陶瓷有着数以万计的微晶结构，使得其有很高的强度和韧性。最后，对所有关节进行表面抛光后，制备成微晶陶瓷假体，以供临床使用。

图表 203 全球骨科关节市场规模

Worldwide Orthopedics Sales, Market Share & Sales Growth (2017-2024)

Source: Evaluate, September 2018



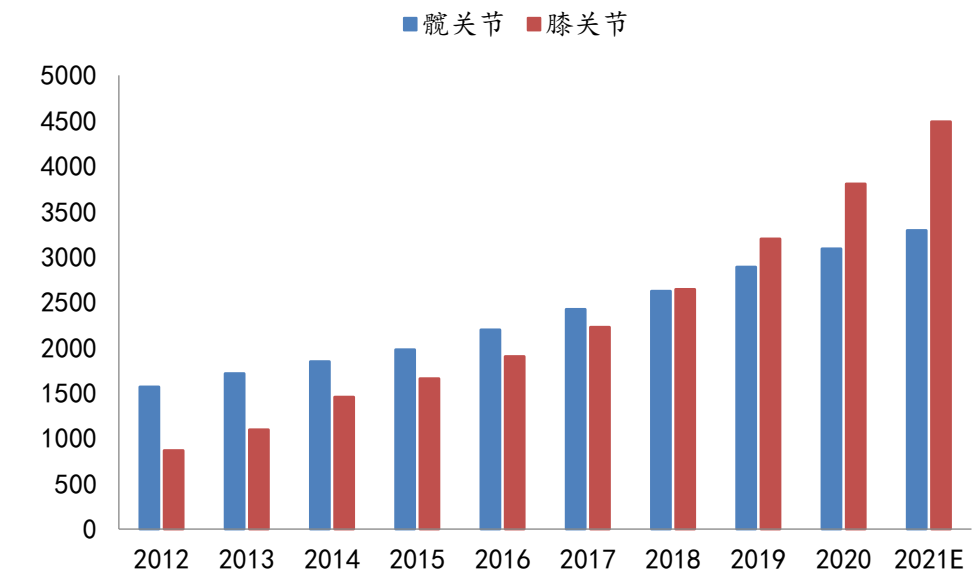
资料来源：EvaluateMedTech，华安证券研究所

需求端，预计骨科关节 2021 年市场空间将达 9000 亿元。2018 年 9 月 EvaluateMedTech®发布的《World Preview 2018, Outlook to 2024》预测，2017-2024 年间的骨科领域的年复合增长率为 3.7%，2024 年市场规模为 471 亿美元，其中强生将继续保持龙头地位，2024 年的销售额预期会达到 103 亿美元，占市场份额 21.8%。2020 年 3 月 IQVIA 发布的《前沿视点》更加乐观，预测 2022 年骨科器械的市场会达到 498 亿美元。

国内骨科植入物各细分市场的渗透率均不足 5%，远低于美国的 40%-70%，市场发展空间巨大。根据锐观网数据，中国骨关节植入物市场由 2012 年约人民币 24 亿元增长至 2016 年的人民币 41 亿元，复合年增长率为 13.9%，预计将于 2021 年进一步增长至人民币 78 亿元，2016 年至 2021 年期间的复合年增长率为 13.7%。而髋关节 2016 年市场为 21.96 亿元，并预计 2016-2021 年复合增长 8.4%；膝关节 2016 年市场规模为 19.01 亿元，并预计 2016-2021 年复合增长 18.7%，膝关节的增速处于快

速发展的阶段。

图表 204 2012-2021E 我国骨科关节植入物市场规模（百万元）



资料来源：锐观网，华安证券研究所

供给端，德国赛琅泰克占据了全球植入陶瓷市场约 95% 的份额，全球骨科植入手术中的陶瓷部件绝大多数都来自这家公司，包括强生、施乐辉、史赛克、捷迈邦美、爱康医疗、春立医疗等主流国内外关节厂商所使用的陶瓷材料均采购自该公司的 BIOLOX delta。

图表 205 生物陶瓷植入相关公司

相关公司

强生
 史赛克
 赛琅泰克
 施乐辉
 捷迈邦美

爱康医疗
春立医疗
 北京安颂
 武汉华威生物材料
 湖南共创生物功能材料
 上海贝奥路生物材料
 西安博恩生物
 河北越尚增材制造科技

注：标红色公司为港股上市公司

资料来源：《中国先进陶瓷产业大全 2020》，华安证券研究所

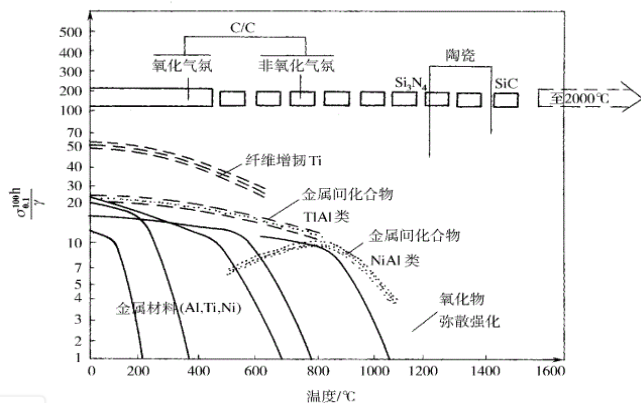
3.4 高温陶瓷行业：发力发动机及新能源领域

超高温陶瓷材料（Ultrahigh-Temperature Ceramics，简称 UHTCs）指高温环境（2000℃以上）和反应气氛中（如原子氧环境）能够保持化学稳定的一种特殊材料，通常包括硼化物、碳化物、氧化物在内的一些高熔点过渡金属化合物，由上述化合物组成的多元复合陶瓷材料统称为超高温陶瓷材料。这些高熔点过渡金属化合物中，TaC、ZrB₂、HfB₂、HfC 等的熔点超过了 3000℃，从而使得它们在极端高温条件下具有很大的应用潜力。

3.4.1 航空发动机行业

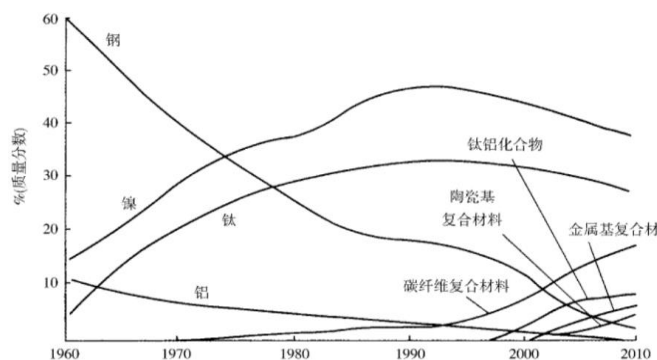
高性能特种陶瓷材料也被称作先进陶瓷、新型陶瓷，主要是指以高纯度人工合成的无机化合物为原料，采用现代材料工艺制备，具有独特和优异性能的陶瓷材料。因此，该材料被用于陶瓷基复合材料（CMC）的制备，具有低密度、高温抗氧化、耐腐蚀、低热膨胀系数、低蠕变等优点，在航空/航天/兵器/船舶等高新技术领域有着广泛应用。其中碳化硅基陶瓷复合材料是目前研究最为深入、商业化最好的高性能特种陶瓷材料。

图表 206 陶瓷材料最耐高温



资料来源：《航空航天材料》，华安证券研究所

图表 207 航空发动机选材趋势（重量占比）



资料来源：《航空航天材料》，华安证券研究所

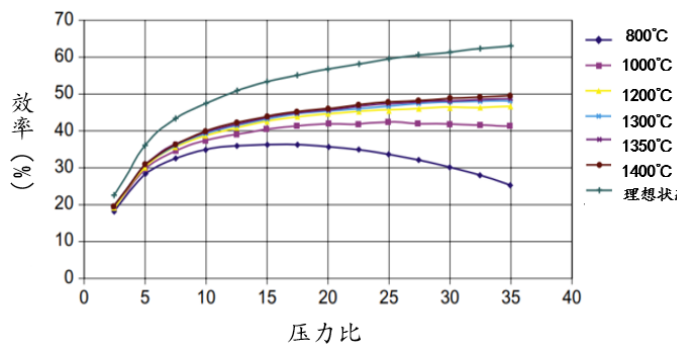
飞机的最大平飞速度、爬升率、升限、机动性等都与飞机推重比有关。喷气发动机推重比的跨越往往会带来新一代战斗机的出现。随着推动比的不断提升，航空发动机的温度也逐步提升，目前第三代航空发动机的温度就已经轻松超过 1200℃，达到当前镍基高温合金的极限温度。

图表 208 陶瓷基复合材料之碳化硅纤维和高温合金性能对比

业务类型	工作温度 (°C)	热膨胀系数 (10 ⁻⁶ /K)	密度 (g/cm ³)
镍基高温合金	1100	10	8-9
一代碳化硅纤维	1000-1100	6-7	3-4
二代碳化硅纤维	1250-1400	4-5	2.5-3.5
三代碳化硅纤维	1400-1500	3-4	2-3

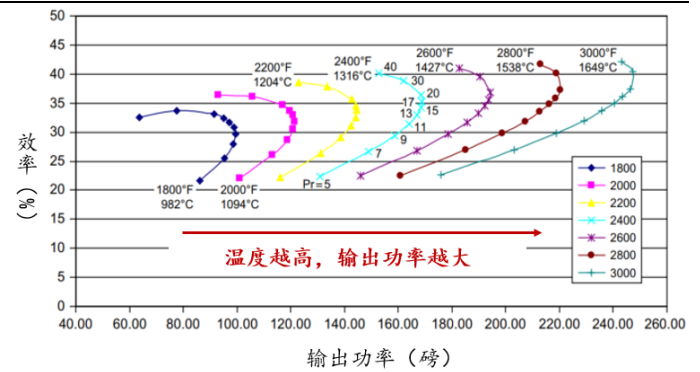
资料来源：《碳化硅的特性》，华安证券研究所

图表 209 同一温度下，压力越大发动效率越高



资料来源：《Boyce》，华安证券研究所

图表 210 效率相同情况该，发动机温度越高，推力越大



资料来源：《Boyce》，华安证券研究所

从热力学第二定律出发可知，相同的压比情况下，透平入口温度越高，内燃机效率越高；相同的透平入口温度，压比在一定范围内与效率成正比。其中温度的影响最为显著，根据《Boyce》一书显示，温度每升高 100F (55.5°C)，功输出增加约 10%，效率提高约 0.5-1%。为了提高燃机输出效率，航空航天发动机、燃气轮机的热端部件需承受 600°C~1200°C 的高温以及复杂应力的交互作用，材料要求非常苛刻。

相较于高温合金，碳化硅不仅能够承受高温，其密度仅有高温合金的 1/4~1/3，这意味着发动机重量可以进一步降低，相同载油量情况下，飞机的航程及载弹量可大幅提升。

图表 211 陶瓷基复合材料在航空领域中的应用



资料来源：《陶瓷基复合材料在欧美军民航空发动机上的发展》，华安证券研究所

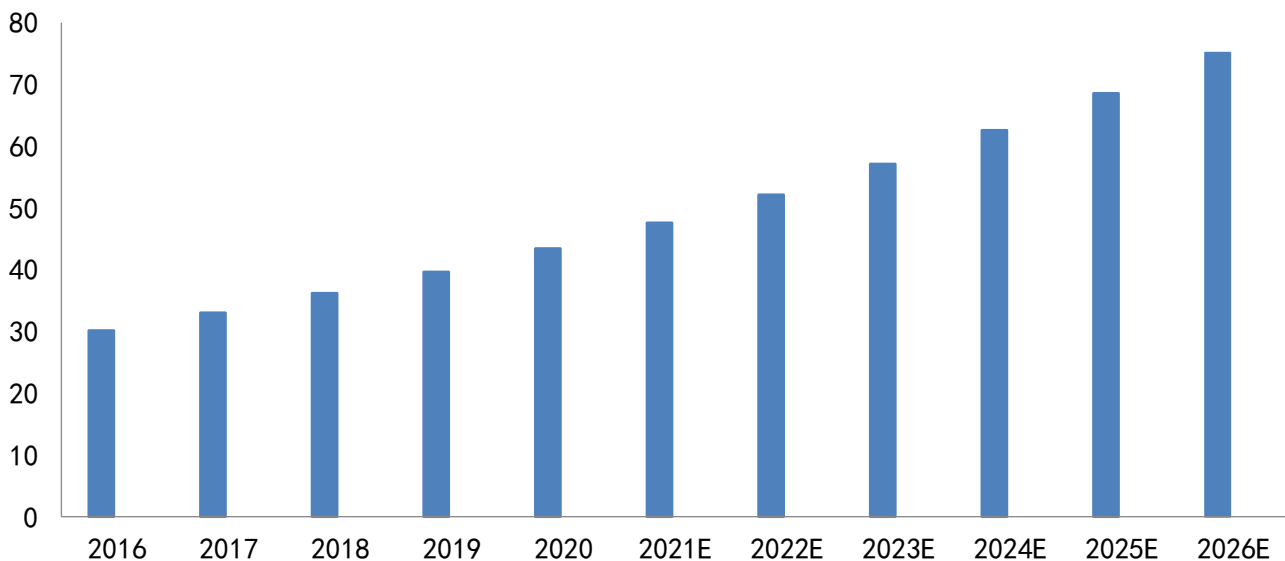
图表 212 各代航空发动机关键指标及叶片主要材料

代制	第二代	第三代	第四代	第五代	第六代
推重比	4-6	7-8	9-10	12-15	15-20
涡轮前温度 (K)	1300-1500	1680-1750	1850-1980	2100-2200	2250-2350
典型发动机	斯贝 MK202	F110	F119	F115	研制中
服役年代	1960s	1970s	2000s	2010s	2020s 研制
叶片主要材料	定向合金和高温合金	第一代单晶高温合金	第二代单晶高温合金	第三代单晶高温合金	陶瓷基复合材料

资料来源：《航空航天材料》，华安证券研究所

需求端，随着高推重比航空发动机的定型、空间飞行器技术的迫切需求和快速发展，CMC 作为新一代材料，已经在军用、民用领域已经展现出巨大的发展潜力。根据 MarketsandMarkets 预测，2016-2026 年 10 年间，全球陶瓷基复合材料市场将以 9.65% 的 CAGR 迅速增长，在 2026 年前将达到 75.1 亿美元。

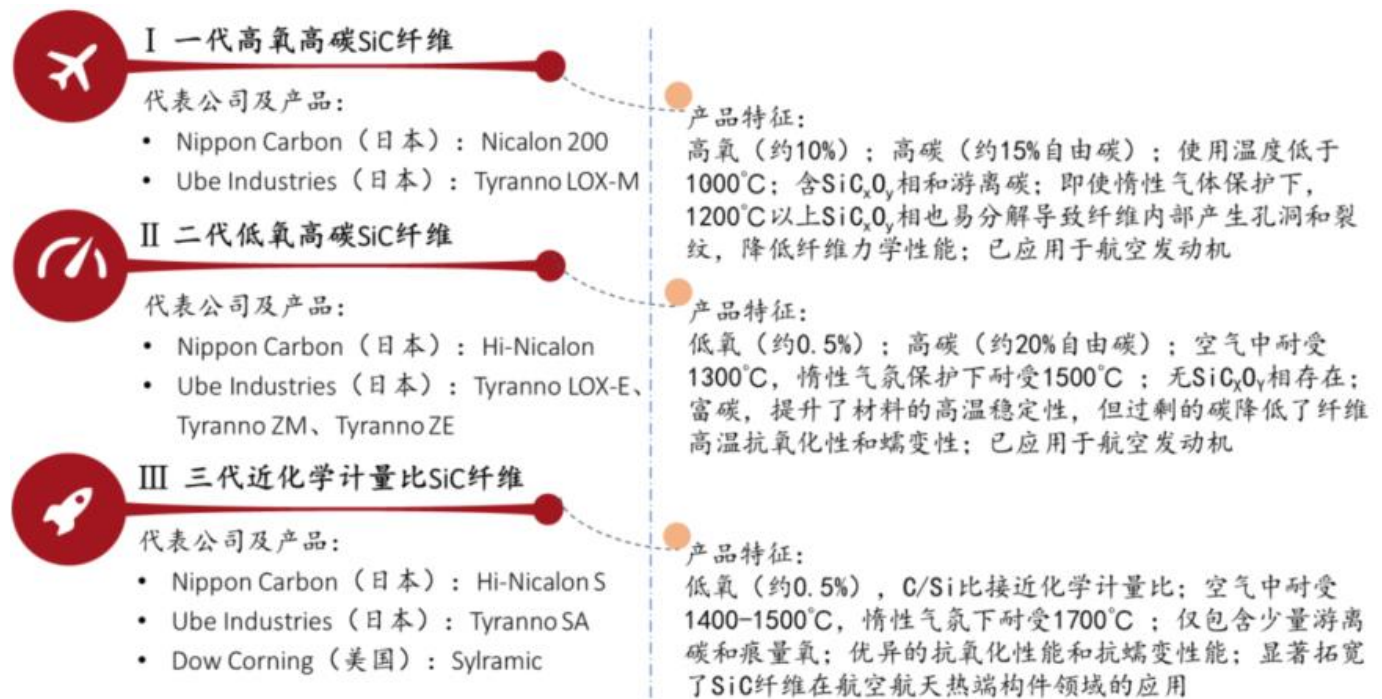
图表 213 2016-2026 年陶瓷基复合材料市场规模（亿美元）



资料来源：MarketsandMarkets，华安证券研究所

国外碳化硅纤维起步早，技术储备雄厚，由于技术壁垒极高价格一致居高不下，且一致对中国禁运。日本 Nippon Carbon 公司和 Ube Industries 公司是国际市场最主要的 SiC 纤维生产厂家，总产量占到全球的 80% 左右。目前第一代、第二代和第三代 SiC 纤维均实现了工业化生产，其中 Nippon Carbon 公司的纯 SiC 纤维（牌号 Nicalon）和 Ube Industries 公司的含钛、含锆、含铝等类型的 SiC 纤维（牌号 Tyranno）产量均达到 100 吨级，且基本保持稳定。据报道，美国 Dow Corning 公司研制成功含硼的 SiC 纤维，牌号为 Sylramic，目前该技术已转给美国 COI 陶瓷公司。德国 Bayer AG 公司通过聚硼硅氮烷聚合物先驱体的热分解反应制备了 SiBN₃C 纤维，尚未有工业化生产的报道。

图表 214 国外碳化硅陶瓷基复合材料主要厂商



资料来源:《陶瓷基复合材料在欧美军民航空发动机上的发展》, 华安证券研究所

国内上市企业中仅有火炬电子能够量产第三代碳化硅纤维。国内具有规模化生产能力的企业包括苏州赛力菲、宁波众兴及国防科大, 但这三家含氧量较高, 勉强能达到二代半的标准。火炬电子 CASAS-300 特种陶瓷材料含量则完全全达到了第三代的标准。

图表 215 国内碳化硅陶瓷纤维主要厂商及产能

业务类型	公司/研究所	产品商标	产能 (t/year)
一代碳化硅纤维	国防科大	KD-1	1
	苏州赛力菲	-	-
二代碳化硅纤维	国防科大	KD-11	1
	宁波众兴	-	10
三代碳化硅纤维	火炬电子	CASAS-300	10

资料来源: 各公司官网, 华安证券研究所

3.4.2 机械轴承行业

轴承是机械设备中一种极其重要的零部件, 使用十分普遍。其主要功能是支撑机械旋转体, 降低其运动时的摩擦系数, 并保证其回转精度。其作用与人体关节相似, 素有“机械的关节”之称, 它是一切旋转机械的灵魂, 故又被称为机械工业的“芯片”。

氮化硅(Si₃N₄)材料属于高强度人工晶体, 具有密度小、硬度高、耐高温、耐腐蚀、电绝缘、不导磁、抗压强度高、自润滑性能好等诸多点。以氮化硅球作为滚动

体、以合金钢为套圈制成的混合陶瓷轴承，最充分利用了氮化硅材料抗压强度高、合金钢抗弯强度高、韧性好等优点，与普通钢球轴承相比，具有重量轻、极限转速高、摩擦力矩小、运转精度好、使用寿命长等一系列优点，各方面性能均衡、优异、全面，堪称轴承界的“六边形战士”。氮化硅陶瓷球轴承是目前世界上研究最热门、性能最优异、应用最广泛的高端陶瓷轴承。氮化硅陶瓷球轴承几乎就是陶瓷轴承的代名词。

图表 216 氮化硅陶瓷轴承球



资料来源：搜狐网，华安证券研究所

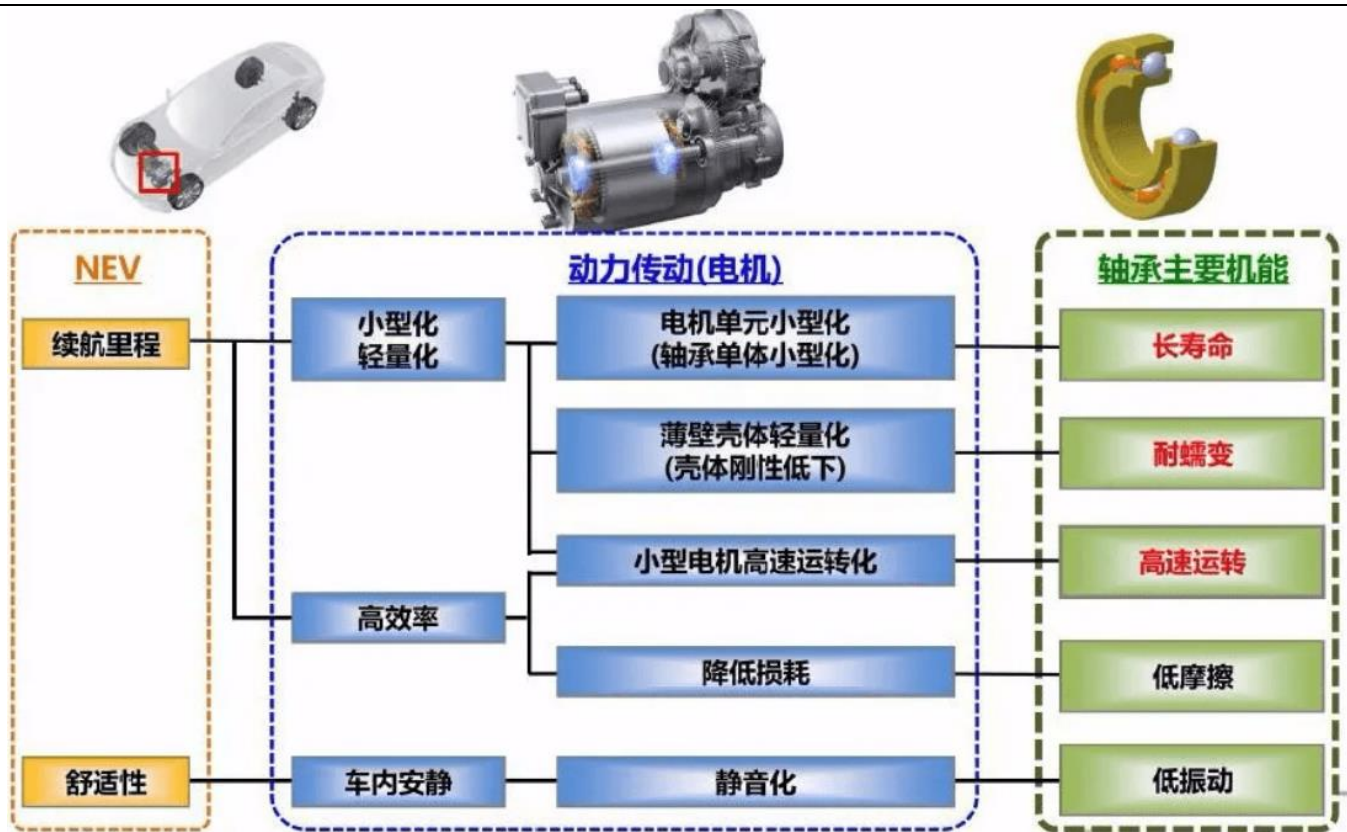
图表 217 氮化硅轴承和轴承钢性能对照表

	氮化硅陶瓷轴承球	轴承钢
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	3.25	7.85
线膨胀系数/ $10^{-6}/\text{K}$	3.25	11
弹性模量/ kN/mm^2	320	208
硬度/HV110	1500	700
电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	1018	0.1-1
使用温度/ $(^\circ\text{C})$	≥ 800	120
耐酸碱腐蚀	强	弱
磁性	无	有
运转离心力	小	大
运转温升	低	高
无润滑摩擦	小	大
绝缘性	绝缘	不绝缘

资料来源：CNKI，华安证券研究所

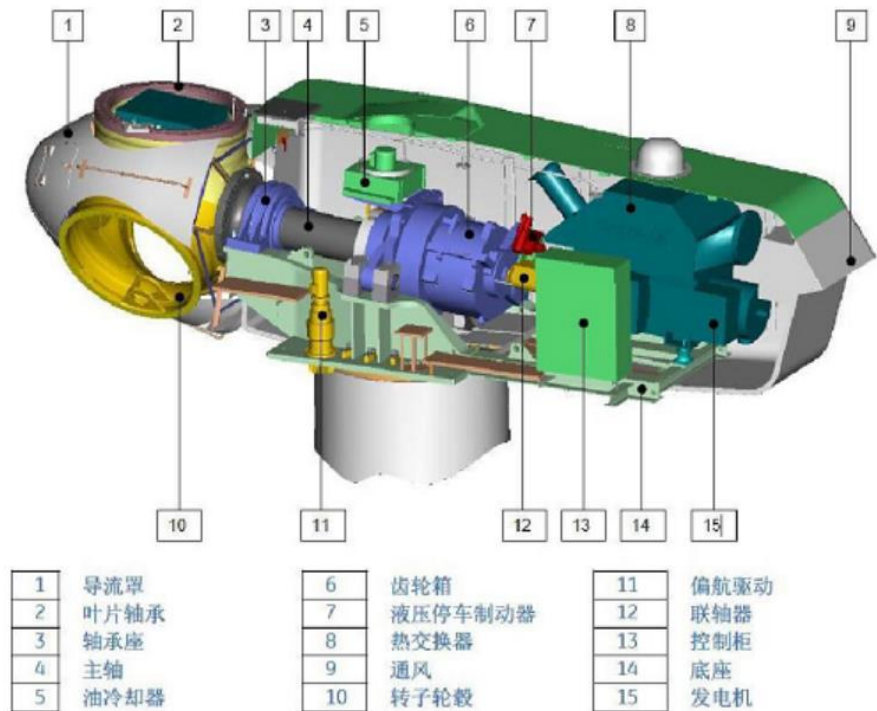
需求端，根据前瞻产业研究院数据，2020 年氮化硅陶瓷轴承球市场零售规模达到 701 亿元，预计 2021 年市场规模将达 723 亿元，未来五年年均复合增长率为 11.26%，2025 年预计将达到 1108 亿元，其中新能源汽车为主要增长点。

图表 218 新能源汽车轴承



资料来源：汽车之家，华安证券研究所

图表 219 氮化硅陶瓷球应用在风力发电轴承座中



资料来源：粉体网，华安证券研究所

图表 220 新能源汽车领域可创造数十亿市场空间

	2019	2020	2021E	2022E	2023E
全球新能源汽车销量 (万辆)	221	331	480	672	874
全球汽车销量 (万辆)	9042	7797	8343	8760	9023
全球新能源汽车渗透率 (%)	2.44%	4.25%	5.75%	7.67%	9.69%
单辆新能源汽车用陶瓷球价值/元	100-150	100-150	100-150	100-150	100-150
新能源汽车用陶瓷球总价值/万元	27625	41375	60000	84000	109250

资料来源：观研报告网，华安证券研究所

供给端，全球氮化硅球的主要生产商包括 Toshiba、Tsubaki、Nakashima、CoorsTek、AKS 和 Industrial Tectonics Inc，这几家生产商占到全球氮化硅球市场份额的 45%。目前亚太地区是最大的氮化硅球市场，市场份额达到 48%，再者是欧洲和北美地区。

图表 221 国内外陶瓷球相关生产企业

公司	陶瓷球种类
国外企业	
日本 NMB 公司	氮化硅陶瓷球
日本东芝陶瓷	
美国 Norton 公司	
法国圣戈班集团	氧化锆陶瓷球
意大利 RGPBALLS 公司	碳化硅陶瓷球、氧化铝陶瓷球
德国 CeramTec 公司	碳化硅陶瓷球
国内企业	
江苏金盛陶瓷科技有限公司	碳化硅陶瓷球
上海泛联科技股份有限公司	氮化硅陶瓷球
中材高新材料股份有限公司	
北京中材人工晶体研究院有限公司	
国瓷材料	氮化硅陶瓷球、氧化锆陶瓷球、碳化硅陶瓷球

资料来源：嘉裕检测网，华安证券研究所

3.4.3 新能源行业

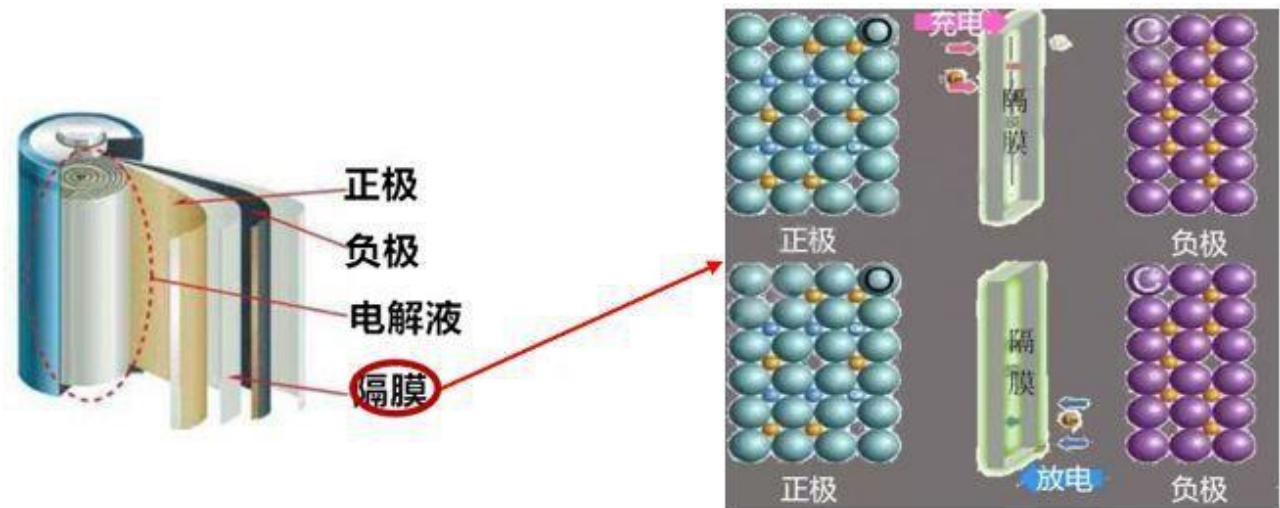
伴随着电子科技技术的快速发展和全球对新能源汽车的需求，锂离子电池凭借着容量高、重量轻，可反复充电，自放电小等优势不仅被广泛应用在手机、笔记本电脑、照相机等 3C 类产品中；更是被储能电源、飞机、电动汽车等大型设备所看重，独占市场鳌头。目前，中国是世界上最大的锂电池生产制造基地，中国锂电池的发展潜力巨大；但是，在大的发展中也会面对大的问题，目前锂离子电池还存在安全，循环寿命等问题，例如发生的众多手机自燃、电动汽车火灾、爆炸等事故给人们敲响了安全的警钟。

陶瓷隔膜涂覆材料一般选择氧化铝及勃姆石。锂离子电池是由电极（正负极）、隔离物（隔膜）、电解质和外壳四个部分组成，其中隔膜是关键的 inner 组件之一，它不仅能使锂离子在正极和负极之间进行嵌入与脱嵌工作，保证电池的循环性能，而且还要在工作工程中，使得正极和负极处于隔离状态，保证电池的安全性能。出于循环性能和安全性能的考虑，国内外隔膜生产商都瞄准了陶瓷隔膜，因为陶瓷隔膜

耐有机溶剂，与电解液相容性好，吸收率高，拉伸强度高、穿刺强度高，热收缩率低，破膜温度高，热收缩率低。

- 高纯氧化铝作为一种无机物，具有很高的热稳定性、化学惰性以及良好的电解液相容性，是一种很好的锂电池陶瓷隔膜的涂层材料。
- 勃姆石涂层，能够在较低的涂层厚度的前提下，显著的提升隔膜的热稳定性，提升锂电池的安全性，改善电池的倍率性能和循环性能，同时较薄的涂层厚度有助于提升锂离子电池的体积能量密度和重量能量密度

图表 222 锂离子电池结构



资料来源：北极星网，华安证券研究所

图表 223 不同涂覆材料的特点和主要应用领域

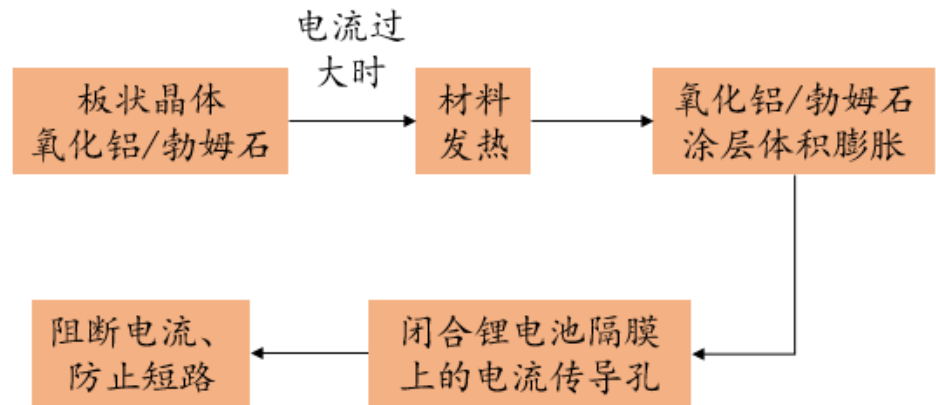
涂覆材料	涂覆隔膜种类	产品主要特点	主要应用领域
陶瓷（勃姆石、氧化铝）	无机涂覆	①提高隔膜的耐热性，增强隔膜的抗穿刺性 ②改善电池的倍率性能和循环性能 ③提升电芯的良品率 ④减少电池在使用过程中的自放电	动力锂电池、消费电子电池
陶瓷+聚偏氟乙烯	有机+无机涂覆	①耐高温、降低热收缩 ②提升粘接性和电池硬度 ③增强吸液性，提升循环寿命	消费电子电池
聚偏氟乙烯、芳纶	有机涂覆	①提升粘接性和电池硬度 ②提高隔膜的耐热性 ③提高隔膜的抗氧化性	消费电子电池、动力锂电池

资料来源：GGII，华安证券研究所

根据比亚迪申请的锂电池隔膜发明专利“一种电池隔膜及其制备方法”（CN201310750910.7），在无机涂覆浆料中，水的质量占比为 76%，固体材料陶瓷涂覆颗粒与树脂材料的质量占比分别为 22%、2%。因此，以勃姆石为代表的陶瓷涂覆颗粒为锂电池涂覆材料的最主要原材料。由于各锂电池生产商、锂电池隔膜生产商的涂覆浆料配方不同，所采取的树脂种类也会有所差别，因此成本比重也会有所差别。

根据下游行业经验，陶瓷涂覆颗粒（勃姆石或氧化铝）也占锂电池涂覆材料成本的最大比重。

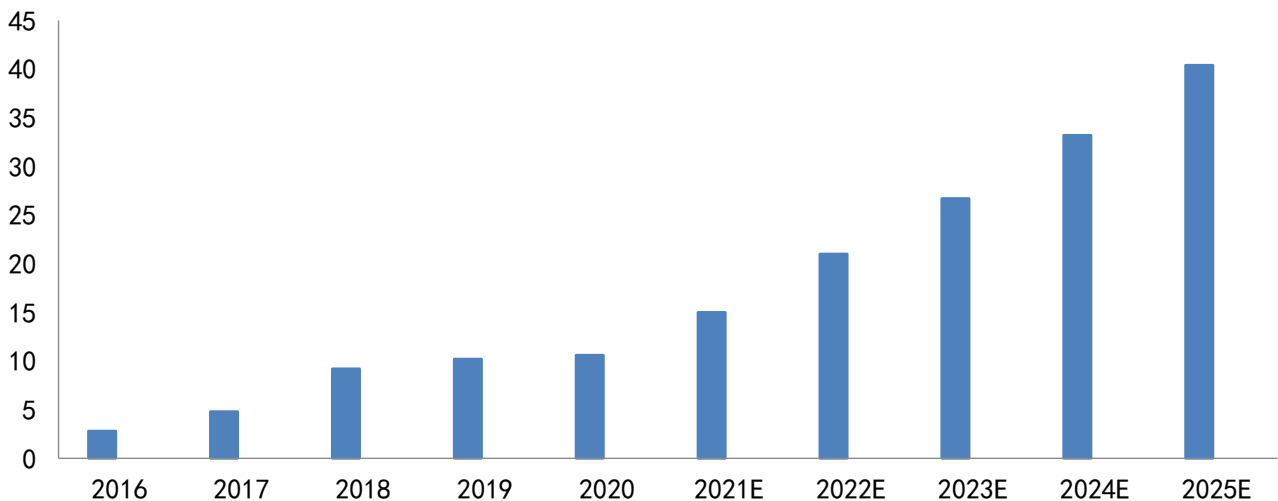
图表 224 氧化铝/勃姆石涂覆的功能



资料来源：新材料在线，华安证券研究所

需求端，根据研究机构 EVTank 联合伊维经济研究院共同发布的《中国锂离子电池隔膜行业白皮书（2020 年）》，2019 年中国锂电池涂覆材料出货量为 1.55 万吨，其中无机涂覆材料出货 1.4 万吨，占比达 90.32%，有机涂覆材料、有机和无机结合的涂覆材料占比不到 10%，无机涂覆材料为市场主流的涂覆材料。预计 2025 年无机涂覆材料用量将达到 40.4 亿平方米。

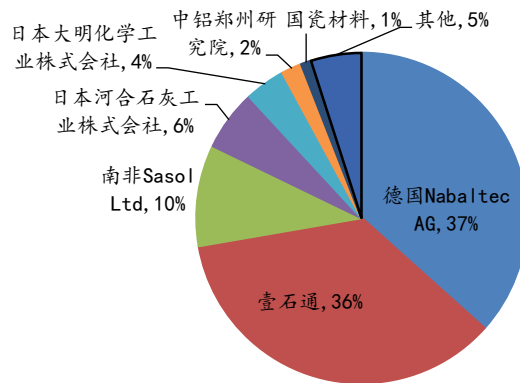
图表 225 中国 2016-2025 年无机涂覆膜用量（亿平方米）



资料来源：壹石通招股书，华安证券研究所

供给端，随着国瓷材料的扩产，国内陶瓷涂覆领域将呈现两大多小的竞争格局。在锂电池涂覆材料领域，据统计，2019 年德国的 Nabaltec AG 锂电池用勃姆石出货量为 0.48 万吨，占比 37%，位居全球第一，壹石通锂电池用勃姆石出货量为 0.47 万吨，占比 36%，位居全球第二，国内第一。

图表 2262019 年全球锂电池用勃姆石/氧化铝出货量分布

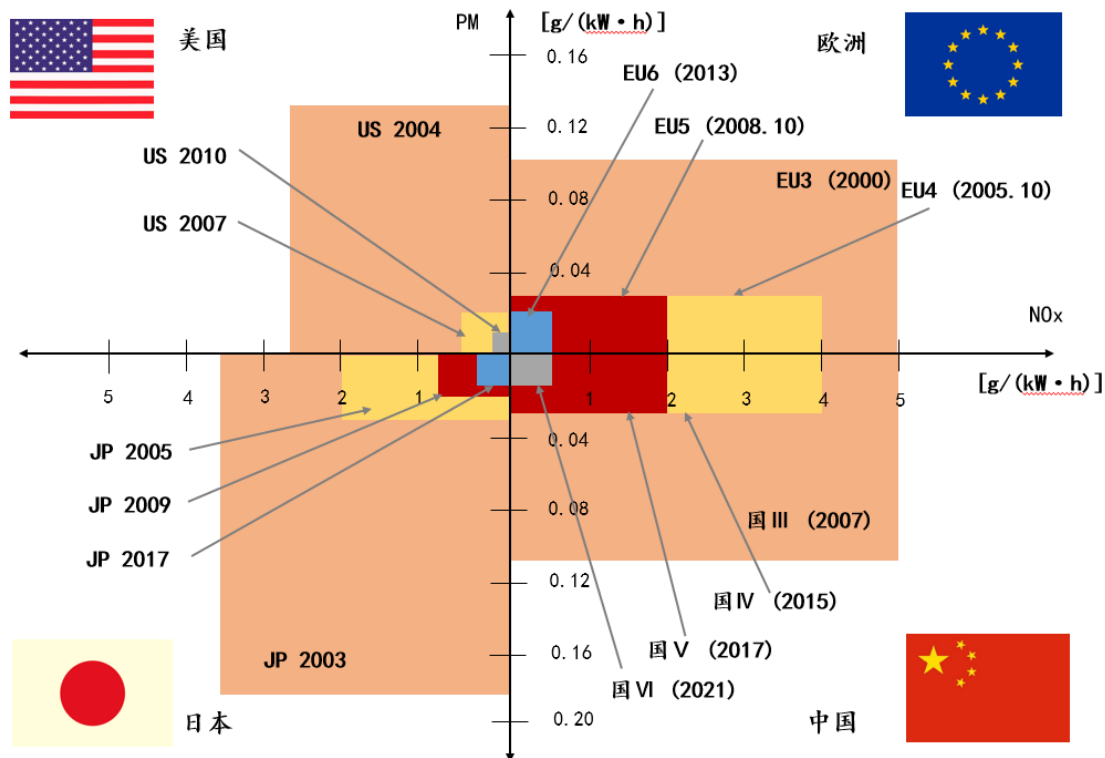


资料来源：壹石通招股书，华安证券研究所

3.4.4 汽车尾气吸附行业

美国、欧洲和日本排放法规已形成了全球最具代表性的三大排放法规体系，主要对 PM 和 NO_x 排放限值不断加严。从上个世纪中叶，西方等国家开始颁布一系列针对重型柴油机的排放法规，以限制重型柴油机的尾气排放。21 世纪初，参考欧洲的法规以及根据中国国情相结合制定出来的符合中国的排放标准。经过几十年的努力和发展，我国制定的排放法规已经能和欧洲法规相提并论，甚至在部分要求，比欧洲制定的更加严格。

图表 227 美国、欧洲、日本及中国重型柴油机法规进程



资料来源：《重型柴油机尾气后处理技术研究现状及趋势》，华安证券研究所

即将实施的国六标准被认为是目前世界上最严格的排放标准之一。近年来，随着我国政府对环保问题的高度重视，重型柴油机排放法规不断升级，限值愈加严格。即将全面实施的《重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》在欧洲标准的基础上融合了美国标准的相关要求，对 NO_x 和 PM 的限值较国五阶段削减 60% 以上，并增加了对颗粒数量 PN 的限制。该标准中采用全球统一重型发动机测量循环，循环工况与车辆实际运行更为接近，增加了低速低负荷工况占比，工况整体排温低，加严了对催化剂低温性能的考核，并对柴油车冷启动排放提出了新的要求，同时引入了整车道路车载法试验测试方法。

图表 228 我国重型柴油车尾气限值

标准等级	等同标准	开始实施时间/年	试验工况	NO_x / g kWh^{-1}	PM/ g kWh^{-1}	CO/ g kWh^{-1}	HC/ g kWh^{-1}
国 I	欧一	2001	ECE	8.000	0.360	4.500	1.100
国 II	欧二	2004	ECE	7.000	0.150	4.000	1.100
国 III	欧三	2007	ECE/ELR	5.000	0.100	2.100	0.660
			ETC	5.000	0.160	5.450	2.380
国 IV	欧四	2010	ECE/ELR	3.500	0.020	1.500	0.460
			ETC	3.500	0.030	4.000	1.650
国 V	欧五	2018	ECE/ELR	2.000	0.020	1.500	0.460
			ETC	2.000	0.020	4.000	0.550
国 VI	欧六	2021	WHSC	0.400	0.010	1.500	0.130
			WHTC	0.460	0.010	4.000	0.160
			WNTC	0.600	0.016	2.000	0.220

注：蓝色为即将开始实施的标准，土黄色为重型柴油车主要排放的污染物

资料来源：华安证券研究所整理

图表 229 柴油机尾气净化作用及所用主要材料

类型	净化器名称	目标污染物	主要反应方程式	所用材料
主流	DPF（柴油颗粒捕捉器）	PM	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ $\text{C} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{NO}$	蜂窝陶瓷、氧化铝
	SCR（选择性催化还原器）	NO_x	$4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $4\text{NH}_3 + 2\text{NO} + 2\text{NO}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $8\text{NH}_3 + 6\text{NO}_2 \rightarrow 7\text{N}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$	蜂窝陶瓷、分子筛
	DOC（柴油氧化催化器）	HC、CO	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$ $4\text{C}_m\text{H}_n + (4m+n)\text{O}_2 \rightarrow 4m\text{CO}_2 + 2n\text{H}_2\text{O}$ $2\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$	蜂窝陶瓷、铈锆固溶体、氧化铝
配套	EGR（废气再循环）	NO_x	$2\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$	—
	ASC（氨氧化催化器）	NH_3	$4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	蜂窝陶瓷、分子筛

资料来源：《浅谈柴油机国六阶段后处理方法及技术路线选择》，华安证券研究所整理

尾气净化器通常由载体、涂层、助剂和活性组分等四部分组成。

- 载体通常以蜂窝陶瓷为主，起到装载固定催化剂的作用，同时又能提高比表面积，载体占净化器总成本的比例约为 10%；
- 涂层通常以氧化铝和分子筛为主；

- 助剂一般起到辅助催化的作用，通常以铈锆固溶体为主；
- 活性组分是起到催化氧化还原反应以降低有害气体浓度的核心部分，柴油车以钒基催化剂和分子筛负载 Fe、Cu、Ce 等为主。通常活性组分需要附着在涂层上，以保证一定的分散性、热稳定性和机械强度。

国六标准要求生产、进口、销售的发动机，以及生产、进口、销售和注册登记的汽车需要满足符合性检查标准要求。其中生产、进口、销售争议较少，仅指国六标准时间节点之后新增车辆需严格满足符合性检查标准要求。主要引起市场争议的是注册登记的汽车是否为存量汽车。一方面，虽然购买新车后没有明确要求多长时间内必须办理注册登记，如果购买汽车较长时间未办理注册登记，环保标准后车辆无法达到新的标准，将无法上牌。另一方面，国产机动车要通过国家批准通告才能生产销售，如果买了车长期不上牌，通告有可能取消或发生变更，这种情况也会影响机动车的注册登记。因此，我们认为车辆购买后通常会在较短时间内完成注册登记，未完成注册登记且不满足国六标准的车辆占比很小。

● **蜂窝陶瓷方面，我们测算 2021 年需求将达 8754 万升**

蜂窝陶瓷是内部拥有大量蜂窝状贯通通道的陶瓷材料。蜂窝陶瓷具有孔密度大、比表面积大；热膨胀系数低、热稳定性好；耐酸耐碱和有机溶剂，抗腐蚀性好；机械性能优异；优良的抗菌性能等优势，主要作为催化器件的载体进行活性催化剂及催化助剂的负载作业，是最为常见的尾气处理催化器用催化剂载体。

图表 230 国六阶段蜂窝陶瓷应用情况

催化器名称	类型	蜂窝陶瓷优点	国六阶段需求
SCR（选择性催化还原器）	直通式载体	比表面积大，能覆盖较多的催化剂，催化剂催化氧化还原反应，将 CO、HC、NO _x 反应成无毒的水、二氧化碳、氮气	孔密度提高（400~600 孔/平方英寸）；壁厚 3~4mil；产品规格尺寸较大（直径范围 190~330mm）；耐热冲击性较高（700℃）
DOC（柴油氧化催化器）			
ASC（氨氧化催化器）			
DPF（柴油颗粒捕捉器）	壁流式载体	通过交替堵住蜂窝状多孔质陶瓷的孔两段，利用陶瓷的壁孔来过滤除去微粒。对碳粒的过滤效率可达 90%以上，部分 SOF 也能被捕获	对称孔或非对称孔结构（孔密度：300 孔/平方英寸，壁厚 9~12mil）

资料来源：生态环境部，华安证券研究所

根据以下假设，我们测算 2018-2022 年的需求量为 3998 万升、4186 万升、6183 万升、7190 万升及 9309 万升，2022 年蜂窝陶瓷需求量将是 2018 年的 2.3 倍，年复合增长率达到 24%。

关键假设 1：在国五标准下，柴油车需求 15L/辆。国六标准下，排放要求的加严，汽车尾气催化系统将进一步升级。根据蜂窝陶瓷协会统计，预计蜂窝陶瓷在柴油车需求为 25L/辆。

关键假设 2：2018-2022 年重型车国六标准执行率分别达到 0.2%、4.2%、40%、60%、100%；

关键假设 3：2021 用车中客车产量 50.8 万辆、货车产量 416.6 万辆。对于客车，由于乘用车中已包含微型客车和部分轻型客车，因此估算商用车全为重型车。对于货车，微型货车质量小于 1800kg，属于满足《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》的轻型车；轻型货车质量小于 4500kg，其中部分轻型货车属于满足《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》的轻型车，假定占比

70%。因此，2021 年我国重型柴油货车 342.4 万辆；

关键假设 4：2022 年柴油车销量增速假定为 2018-2021 年的复合增速 8.6%。

图表 231 蜂窝陶瓷市场空间测算

蜂窝陶瓷	2018		2019		2020		2021		2022E
	国五	国六	国五	国六	国五	国六	国五	国六	国六
柴油车单车用量 (L/辆)	15	25	15	25	15	25	15	25	25
重型柴油货车产量 (万辆)	266.2		271.5		325.4		342.4		372.4
重型车标准执行率 (%)	99.8%	0.2%	95.8%	4.2%	60%	40%	40%	60%	100%
柴油货车新增市场 (万升)	3985	13	3901	285	2929	3254	2054	5136	9309
新增市场 (万升)	3998		4186		6183		7190		9309

资料来源：生态环境部，华安证券研究所

● 氧化铝方面，我们测算 2022 年需求将达 11171 吨

高纯氧化铝粉呈白色微粉，粒度均匀，易于分散，化学性能稳定，高温收缩性能适中，具有良好的烧结性能；广泛应用于汽车尾气的陶瓷涂层。汽车尾气催化剂中的活性组分通常需要附着在涂层上，以保证一定的分散性、热稳定性和机械强度。在氧化铝的各晶型中， γ - Al_2O_3 具有较强吸附能力和大比表面积，是目前主要使用的涂层材料。

国六标准下，柴油车的 DOC、DPF 均将用到氧化铝涂层，根据蜂窝陶瓷协会统计，其涂覆体积约为蜂窝陶瓷的体积的 20%，可计算出柴油车中用量在 120g/L 左右。经我们测算，2018-2022 年国内氧化铝需求量为 15.6 吨、342 吨、3905 吨、6163 吨和 11171 吨。

图表 232 氧化铝市场空间测算

蜂窝陶瓷	2018		2019		2020		2021		2022E
	国五	国六	国五	国六	国五	国六	国五	国六	国六
柴油车涂覆量 (g/L)	0	120	0	120	0	120	0	120	120
重型柴油货车产量 (万辆)	266.2		271.5		325.4		342.4		372.4
柴油货车新增蜂窝陶瓷市场 (万升)	3985	13	3901	285	2929	3254	2054	5136	9309
柴油车新增氧化铝市场 (吨)	0	15.6	0	342	0	3905	0	6163	11171
新增市场 (吨)	15.6		342		3905		6163		11171

资料来源：生态环境部，华安证券研究所

SCR、TWC、DOC 及部分 DPF、GPF 首先送至催化剂厂商完成涂覆，然后由封装厂进行封装，封装后销售给主机或整车厂；部分 DPF、GPF 无需涂覆，直接送至封装厂商进行封装，然后供主机厂、整车厂商使用。产业链具体分工如下：

①载体厂商主要生产用于内燃机尾气后处理系统中承载涂覆催化剂或捕捉颗粒物的各类载体；

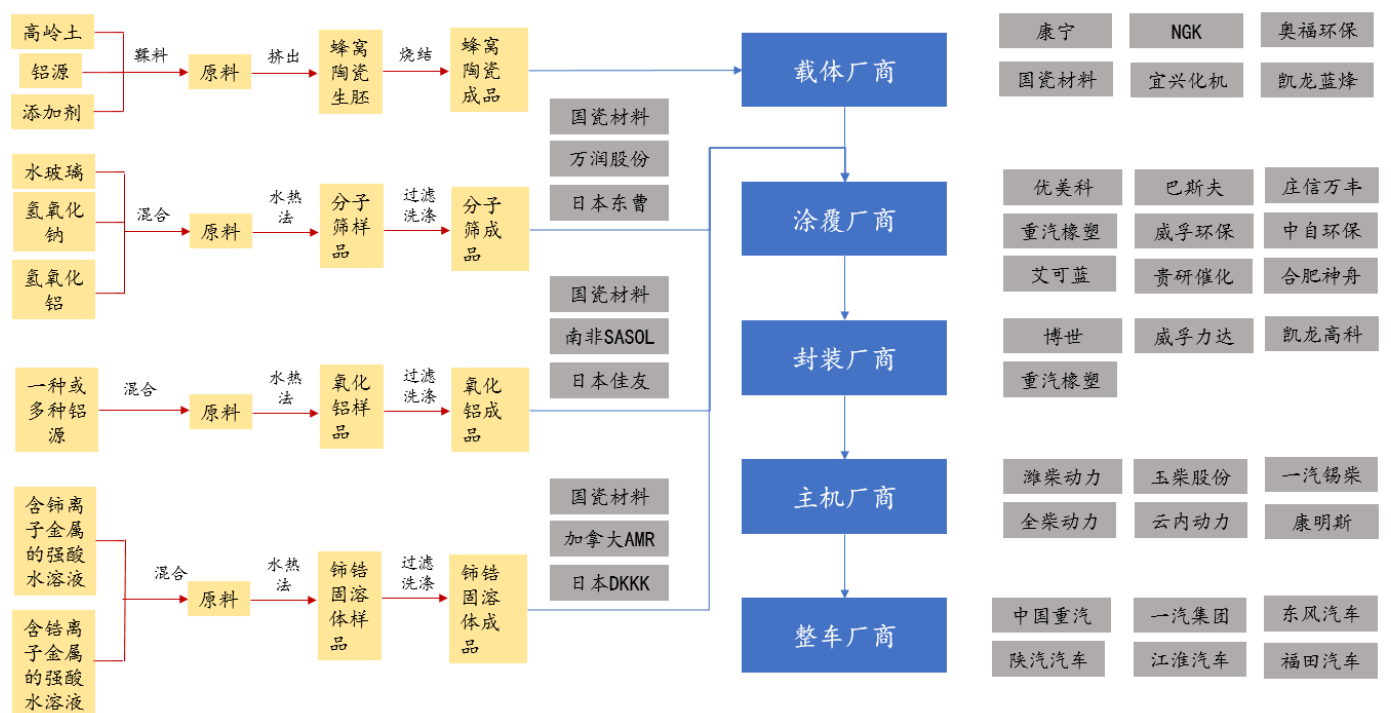
②催化剂涂覆厂商主要对载体进行活性组分及催化剂的涂覆处理，进而完成催化器产品的整体化；

③封装厂商利用金属外壳和无机纤维衬垫对涂覆后的载体进行包裹，并添加其他组件形成内燃机尾气后处理系统后销售给主机厂、整车厂商使用。

蜂窝陶瓷竞争格局：国内蜂窝陶瓷市场仍然被国外企业垄断，国内该业务领域具有广阔的进口替代空间。NGK 及康宁公司是绝对龙头公司，二者合计占据了 86.18% 市场份额。国内厂商除国瓷材料和上市公司奥福环保以外，还有宜兴化机和凯龙高科两家蜂窝陶瓷生产企业。其中，江苏省宜兴非金属化工机械厂于 1984 年开始研制蜂窝陶瓷，是国内较早研发和生产蜂窝陶瓷的企业，目前年产能约 800 万升；凯龙高科开发生产了满足国六标准的车/船用柴油机选择性催化还原 SCR 系统、主/被动再生颗粒捕集系统(DPF)、CNG/LNG/LPG 后处理器、汽油机三元催化器等产品，具备蜂窝陶瓷的生产能力。国内厂商整体产能相对较小，国瓷材料和奥福环保市场份额仅占 0.84%和 0.77%，未来增长空间较大。

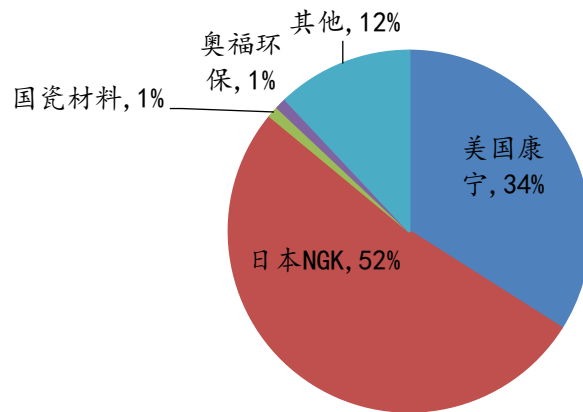
产品布局方面，除日本 NGK 专注于 DPF 外，其他国内外厂商均实现了全种类覆盖。日本 NGK 公司则运用 HONEYCERAM 陶瓷技术，开发出了收集柴油汽车发动机排出的微粒子收集滤清器，最多可除去 99%的 PM，是唯一一家将由堇青石与碳化硅(SiC)这两种材料制成的柴油汽车尾气微粒子陶瓷滤清器 DPF 量产的厂商。在柴油车领域，康宁公司的 Celcor LFA 载体在重型车辆每天使用柴油发动机的严苛条件下仍能实现可靠的性能，通过选择性的组合载体的背压和几何表面积使得系统性能增强。而国内的奥福环保、凯龙蓝烽、宜兴化机及国瓷材料均制造出直通式及壁流式蜂窝陶瓷，可满足各类催化器使用。

图表 233 尾气净化产业链



资料来源：华安证券研究所整理

图表 234 蜂窝陶瓷竞争格局



资料来源：奥福环保招股书，华安证券研究所

氧化铝竞争格局：高纯纳米氧化铝的国外主要生产企业有住友、沙索等，其中住友化学是市场份额最大的企业，占据全球高端市场 60%的份额。国内主要生产企业包括国瓷材料、宣城晶瑞新材料、上海铤铭材料等。

图表 235 助剂及涂层主要企业及技术路线

助剂及涂层类型	企业	技术路线
氧化铝	日本住友	溶剂热法
	沙索	热分解法
	国瓷材料	水热法
	宣城晶瑞新材料	溶剂热法
	上海铤铭材料	溶剂热法

资料来源：CNKI，华安证券研究所

4 重点关注公司

我们推荐关注“内生增长+外延并购”双轮驱动的陶瓷材料平台型企业国瓷材料及高可靠电子元器件平台型企业鸿远电子，建议重点关注振华科技、中瓷电子、火炬电子、宏达电子、三环集团、风华高科、奥福环保等。

风险提示：

技术研发不及预期；

疫情导致消费电子销量下滑；

MLCC 下游需求不及预期；

生物陶瓷方面进展缓慢。

重要声明

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，以勤勉的执业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，本报告所采用的数据和信息均来自市场公开信息，本人对这些信息的准确性或完整性不做任何保证，也不保证所包含的信息和建议不会发生任何变更。报告中的信息和意见仅供参考。本人过去不曾与、现在不与、未来也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接收任何形式的补偿，分析结论不受任何第三方的授意或影响，特此声明。

免责声明

华安证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。本报告由华安证券股份有限公司在中华人民共和国（不包括香港、澳门、台湾）提供。本报告中的信息均来源于合规渠道，华安证券研究所力求准确、可靠，但对这些信息的准确性及完整性均不做任何保证。在任何情况下，本报告中的信息或表述的意见均不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司、本公司员工或者关联机构不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。投资者务必注意，其据此做出的任何投资决策与本公司、本公司员工或者关联机构无关。华安证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

本报告仅向特定客户传送，未经华安证券研究所书面授权，本研究报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。如欲引用或转载本文内容，务必联络华安证券研究所并获得许可，并需注明出处为华安证券研究所，且不得对本文进行有悖原意的引用和删改。如未经本公司授权，私自转载或者转发本报告，所引起的一切后果及法律责任由私自转载或转发者承担。本公司并保留追究其法律责任的权利。

投资评级说明

以本报告发布之日起 6 个月内，证券（或行业指数）相对于同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准，A 股以沪深 300 指数为基准；新三板市场以三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以纳斯达克指数或标普 500 指数为基准。定义如下：

行业评级体系

- 增持—未来 6 个月的投资收益率领先市场基准指数 5%以上；
- 中性—未来 6 个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至 5%；
- 减持—未来 6 个月的投资收益率落后市场基准指数 5%以上；

公司评级体系

- 买入—未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 15%以上；
- 增持—未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 5%至 15%；
- 中性—未来 6-12 个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至 5%；
- 减持—未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 5%至 15%；
- 卖出—未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 15%以上；
- 无评级—因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。