

强于大市

核聚变系列报告——超导磁体

可控核聚变商业化加速实现，超导磁体未来应用前景广阔

随着技术的不断突破，尤其是高温超导材料的大规模应用，可控核聚变商业化渐行渐近，产业链或将进入快速发展期，超导磁体作为磁约束可控核聚变装置的核心部件有望充分受益。

支撑评级的要点

- **核聚变被视为人类理想的终极能源，其中托卡马克装置最具商业化潜力。**核聚变是几个较轻的原子核结合成一个较重的原子核，实现将质量转化为能量的过程。核聚变因其燃料资源丰富、能量密度大、清洁无污染、安全性高等突出的优点，被视为人类理想的终极能源。目前，磁约束聚变能量约束时间长、技术成熟度高、工程可行性强，是实现聚变能开发的最有效途径，其中又以托卡马克装置最为成熟，是目前最为主流的可控核聚变装置，也是最有可能首先实现商业化的技术路线之一。根据 IAEA 的统计，截至 2024 年中，全球共有 159 个核聚变项目，其中托卡马克装置 79 个，占比接近 50%。
- **磁体是磁约束聚变装置的核心部件，超导助力商业化加速实现。**在磁约束可控核聚变装置中，产生约束磁场的磁体系统扮演着核心角色，其磁场强度与均匀性对于整个装置的性能与效率均有着重要影响，以 ITER 项目为例，磁体系统是其最大成本项，成本占比达到 28.0%。早期的托卡马克装置采用的磁体材料为铜导体，铜导体的发热问题导致了磁约束核聚变无法长时间稳态运行，后续随着超导体的引入，尤其是高温超导的应用，由于超导体的零电阻效应，且承载电流密度更高有利于建造更加紧凑、更高场强的聚变装置，能够有效改善长脉冲稳态运行，大幅提升聚变能源的转化效率与能源输出，同时让成本持续下降，显著加快了可控核聚变商业化落地的预期。
- **超导磁体的材料制备与绕制工艺是关键，高温超导磁体制备壁垒较高。**低温超导材料发展较早，目前已经形成系统的商业化生产，而高温超导材料发展起步较晚，制备技术较为复杂，目前高温超导体正处于提升性能和突破应用的产业初期阶段，在这个过程中，高性能高温超导材料的批量化制备成为关键基础。而且将超导材料制作成磁体过程，需要完成超导材料的焊接、绕制等工艺流程，尤其是高温超导磁体的生产，工艺复杂，技术壁垒较高。
- **超导磁体应用前景广阔，有望充分受益于可控核聚变的商业化。**若核聚变完全商业化，根据 Ignition Research 的预计，到 2050 年可控核聚变行业将成为一个至少 1 万亿美元的市场，对应超导磁体空间超千亿美元，潜在市场规模庞大。另外，除了可控核聚变以外，超导磁体还在 MRI、NMR、感应加热设备、晶硅生长炉等设备中有应用，随着超导磁体的应用逐步拓展，超导磁体的应用前景广阔。

估值

- 随着技术的不断突破，尤其是高温超导材料的大规模应用，可控核聚变商业化渐行渐近，产业链或将进入快速发展期，超导磁体作为磁约束可控核聚变装置的核心部件有望充分受益，建议关注具备超导磁体制造能力的相关上市公司，推荐联创光电、西部超导，建议关注精达股份（上海超导）、永鼎股份等。

评级面临的主要风险

- 技术进展不及预期风险；技术路线更替的风险；资金投入不及预期的风险；行业政策不及预期的风险；相关项目进展不及预期的风险。

相关研究报告

《机械设备行业 2024 年年报和 2025 年一季报综述》20250518

《可控核聚变行业深度报告》20250410

《《2025 年政府工作报告》机械设备行业相关要点及解读》20250320

中银国际证券股份有限公司
具备证券投资咨询业务资格

机械设备

证券分析师：陶波

(8621)20328512

bo.tao@bocichina.com

证券投资咨询业务证书编号：S1300520060002

证券分析师：曹鸿生

(8621)20328513

hongsheng.cao@bocichina.com

证券投资咨询业务证书编号：S1300523070002

目录

磁体是磁约束聚变装置的核心部件，超导助力商业化加速实现	5
磁体是磁约束聚变装置的核心部件，在托卡马克装置中成本占比较高	5
磁体材料主要有铜导体和超导体，高温超导助力聚变商业化加速实现	8
材料制备与绕制工艺是关键，超导磁体未来应用空间广阔	11
低温超导材料已实现商业化生产，高温超导仍处产业化初期	11
CICC 导体为超导磁体首选导体类型，绕制工艺是关键	21
核聚变商业化或将带来巨大机遇，超导磁体未来应用前景广阔	26
相关上市公司	30
西部超导：全球唯一的低温超导 NbTi 锭棒、线材、磁体的全流程生产企业	30
联创光电：深耕光电领域，子公司拥有领先的高温超导磁体技术	31
上海超导：我国高温超导材料的技术引领者	33
永鼎股份：深耕光电领域数十年，高温超导发展加速	35
投资建议	37
风险提示	38
参考文献	39

图表目录

图表 1. 托卡马克装置示意图	5
图表 2. 托卡马克是目前主流的核聚变装置（单位：个）	5
图表 3. ITER 磁体系统及功能	5
图表 4. 部分托卡马克装置的磁体线圈数量	6
图表 5. ITER 装置成本拆分	6
图表 6. 核聚变发电厂 DEMO 成本拆分	6
图表 7. 合肥等离子物理研究所超导磁体部分相关招标信息	7
图表 8. 典型铜基托卡马克装置磁体系统的部分性能参数	8
图表 9. 我国首个超导托卡马克 HT-7 装置主机	8
图表 10. 典型低温超导托卡马克主要性能参数	8
图表 11. 从 ITER 到 SPARC，反应堆的尺寸不断缩小	9
图表 12. 部分商业化高温超导托卡马克装置	9
图表 13. 部分托卡马克装置的磁体材料情况	10
图表 14. 超导材料的特性	11
图表 15. 超导材料的分类	11
图表 16. 超导材料发展历程及临界温度	12
图表 17. 低温超导材料和高温超导材料特性对比的分类	12
图表 18. 国内部分低温超导材料中标及价格情况	13
图表 19. 国内部分高温超导材料中标及价格情况	13
图表 20. 上海超导高温超导带材价格逐年下降	14
图表 21. 典型的低温超导线截面	14
图表 22. NbTi 超导线生产流程	15
图表 23. 青铜法制备 Nb ₃ Sn 超导线材工艺流程	15
图表 24. 青铜法制备的 Nb ₃ Sn 超导线的截面图	15
图表 25. 内锡法制备 Nb ₃ Sn 超导线材工艺流程	16
图表 26. 内锡法制备的 Nb ₃ Sn 超导线的截面图	16
图表 27. 国内外主要低温超导公司及其布局	16
图表 28. 实用化高温超导材料参数	17
图表 29. 采用粉末装管法制备 Bi-2212 线材的工艺流程	18
图表 30. 采用粉末装管法制备 Bi-2223 带材的工艺流程	18
图表 31. 全球范围内 Bi-2223 超导带材生产的主要厂商及其技术水平	18
图表 32. 第二代高温超导带材结构示意图	19
图表 33. 几种典型 REBCO 超导层外延生长的薄膜制备方法	19
图表 34. 第二代高温超导带材工艺流程	19
图表 35. 全球主要二代高温超导带材生产商及其使用的生产技术	20
图表 36. 部分公司二代高温超导带材产品性能参数	20

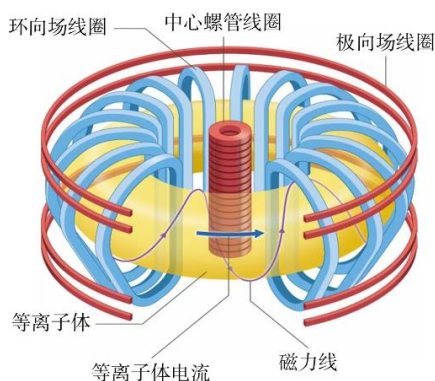
图表 37. CICC 导体结构 (ITER CS)	21
图表 38. 不同类型的 CICC.....	21
图表 39. ITER 项目 PF5 线圈 CICC 导体用超导电缆结构.....	21
图表 40. 采用堆叠带材方式的超导电缆.....	22
图表 41. CORC 电缆和 CORC-CICC 导体.....	23
图表 42. CORT 电缆.....	23
图表 43. RACC 导体结构	23
图表 44. 全球部分超导导体研究机构及其产品类型.....	24
图表 45. 超导磁体生产流程图.....	24
图表 46. 高温超导磁体相关企业.....	25
图表 47. 超导磁体产业链.....	26
图表 48. 2020 年中国超导磁体行业细分产品占比.....	26
图表 49. MRI 设备系统组成.....	27
图表 50. MRI 系统的体系结构图.....	27
图表 51. 我国超导型磁共振成像设备市场规模.....	27
图表 52. 传统交流感应加热与超导直流感应加热的性能对比.....	28
图表 53. 超导感应加热装备市场空间情况.....	28
图表 54. 超 70% 聚变公司预期 2035 年前实现并网发电.....	29
图表 55. 超半数公司预期 2035 年前满足聚变商业化条件.....	29
图表 56. 2025-2035 年预计完成的核聚变项目	29
图表 57. 西部超导的发展历程.....	30
图表 58. 西部超导的主要产品.....	30
图表 59. 联创光电发展历程.....	31
图表 60. 联创光电主要业务和产品.....	32
图表 61. 联创光电高温超导应用.....	32
图表 62. 上海超导大事记.....	33
图表 63. 上海超导的第二代高温超导带材产品.....	33
图表 64. 2024 年上海超导前五大客户情况.....	34
图表 65. 上海超导的第二代高温超导带材生产及总部基地项目开工.....	34
图表 66. 永鼎股份发展历程.....	35
图表 67. 永鼎股份产品布局.....	35
图表 68. 永鼎股份超导及铜导体产品收入和增速情况.....	36

磁体是磁约束聚变装置的核心部件，超导助力商业化加速实现

磁体是磁约束聚变装置的核心部件，在托卡马克装置中成本占比较高

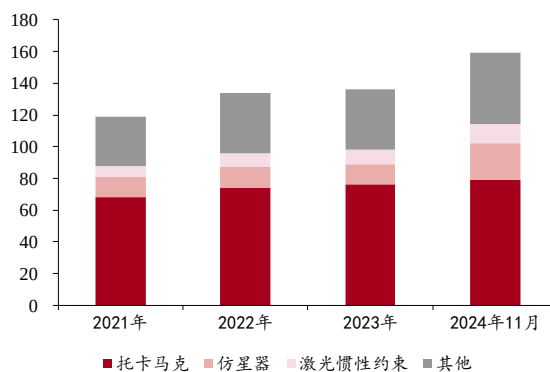
基于磁约束原理的托卡马克装置，是目前最为主流的可控核聚变装置。磁约束是通过加热等外部手段将燃料温度提升，极高的温度使得燃料完全电离形成等离子体，然后采用特殊结构的磁场形式把燃料离子和大量自由电子组成的处于热核反应状态的高温等离子体约束在有限的体积内，使之受到控制地发生核聚变反应，并在此过程中释放出能量。^[1]基于磁约束的基本原理，发展出了托卡马克、磁镜、仿星器、球形托卡马克、直线箍缩、环箍缩等多种类型磁约束核聚变装置，其中托卡马克装置因其具有高效的等离子体约束和稳定的平衡能力，并且工程上设计建造相对简单、运行维护方便，经过多年研究发展技术成熟且有多次成功的实验验证，再加上广泛的国际合作和强大的研究基础，逐步成为目前主流的核聚变装置。根据 IAEA 的统计，截至 2024 年 11 月，全球共有 159 个核聚变项目，其中托卡马克装置有 79 个，占比接近 50%。

图表 1. 托卡马克装置示意图



资料来源：聚变产业联合会微信公众号，中银证券

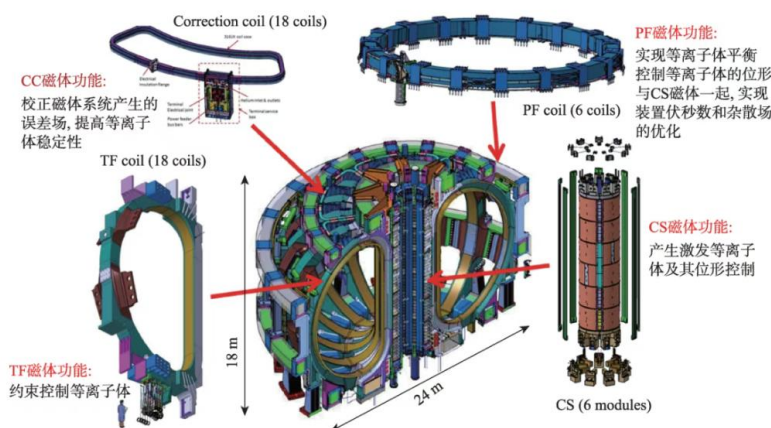
图表 2. 托卡马克是目前主流的核聚变装置（单位：个）



资料来源：IAEA 《World fusion outlook 2024》，中银证券

磁体系统是整个磁约束聚变装置的核心。在磁约束可控核聚变装置中，产生约束磁场的磁体系统扮演着核心角色，其磁场强度与均匀性对于整个装置的性能与效率均有着重要影响。托卡马克装置的磁体系统通常由多个线圈组成，最主要的线圈包括环向磁场(Toroidal Field, TF)线圈、极向磁场(Poloidal Field, PF)线圈和中心螺线管(Central Solenoid, CS)线圈，其中中心螺线管线圈用于产生激发等离子体，纵向场线圈用以约束高温等离子体，极向场线圈保证等离子体电流正常稳定运行，另外部分托卡马克装置还拥有校正场线圈(Correction Coil, CC)用以提高等离子体的稳定性。

图表 3. ITER 磁体系统及功能



资料来源：现代物理知识杂志微信公众号，中银证券

从全球主要的几个托卡马克装置的设计来看，根据装置的大小和不同的设计需要，各个托卡马克装置的线圈的种类和数量不尽相同，以 ITER 项目为例，其磁体系统包括 18 个 TF 线圈、6 个 PF 线圈、1 个包含 6 个独立绕包模块的 CS 线圈以及 18 个 CC 线圈。

图表 4. 部分托卡马克装置的磁体线圈数量

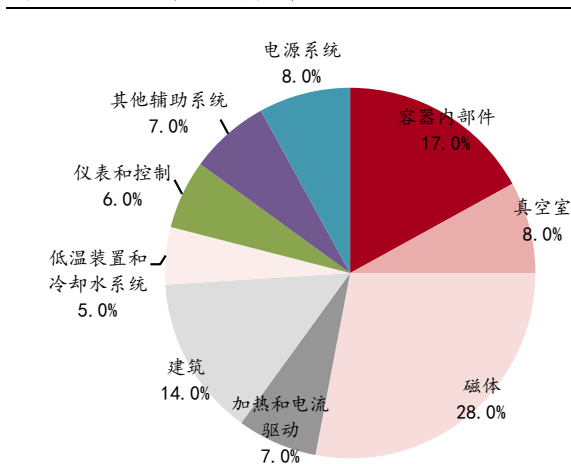
装置	国家	建成年份	TF 线圈	PF 线圈	CS 线圈	其他线圈
TFTR	美国	1982	20 个	4 组独立线圈 (OH、EF、HF、VC)	OH 线圈承担 CS 功能	
JET	欧盟	1983	32 个	8 个 OH 线圈+4 个形位线圈	OH 线圈承担 CS 功能	4 个矫正线圈
Alcator C-Mod	美国	1992	20 个	3 个 OH 线圈+5 对 PF 平衡线圈	OH 线圈承担 CS 功能	
EAST	中国	2006	16 个	4 个分流器线圈+4 个外环线圈	6 个	
KSTAR	韩国	2007	16 个	3 对外部 PF 线圈	8 个	
ST25(HTS)	英国	2015	6 个	2 个		
环流三号	中国	2020	20 个	8 对	8 个	
SUNIST-2	中国	2023	8 个	10 个	6 个	2 个 CC 线圈、2 个 MC 线圈、2 个 DF 线圈
洪荒 70	中国	2024	12 个	6 个	8 个	
SPARC	美国	2025 (预计)	18 个	8 个	6 个	4 个 Div 线圈、2 个 VS 线圈
ITER	国际	2033 (预计)	18 个	6 个	6 个	18 个矫正线圈
CFETR*	中国	2035 (预计)	16 个	7 个	8 个	

资料来源：张家龙等《磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述》，I. Barlow, et al. 《The Error Field Correction Coils on the JET Machine》，Chunlong Zou, et al. 《The Preliminary design of SUNIST-2: A Spherical Tokamak》，A.J. Creely, et al. 《overview of the SPARC tokamak》，核聚变与等离子体物理微信公众号，中银证券整理

注：*CFETR 的线圈数量基于 2014 年完成的概念设计稿，后续可能会有改动

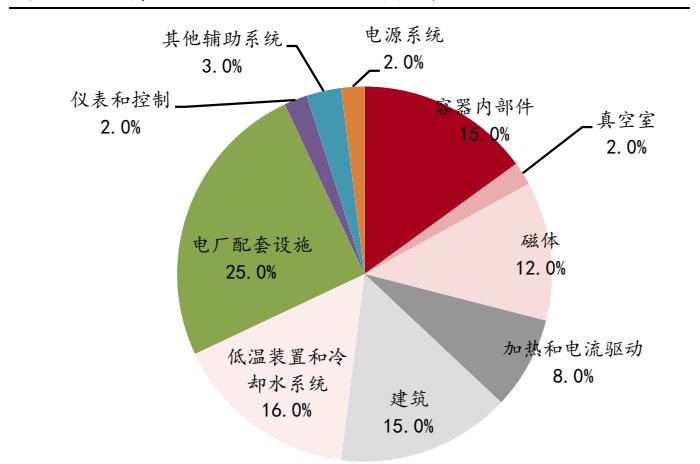
作为托卡马克装置最核心的部件，磁体成本占比较高。根据 Neil Mitchell 等对 ITER 装置和核聚变发电厂 DEMO 的成本拆分来看，磁体系统作为托卡马克装置的核心部件，是 ITER 装置的最大成本项，成本占比达到 28.0%；在聚变电厂 DEMO 中，尽管增加了电厂的配套设施，磁体系统的成本仍然占比达到 12.0%。

图表 5. ITER 装置成本拆分



资料来源：Neil Mitchell, et al. 《Superconductors for fusion: a roadmap》，中银证券

图表 6. 核聚变发电厂 DEMO 成本拆分



资料来源：Neil Mitchell, et al. 《Superconductors for fusion: a roadmap》，中银证券

磁体制造价格较高。从合肥等离子物理研究所近两年的公开招标和中标信息来看，磁体相关的制造和部件价值量较高，单个磁体线圈的价格均在百万级别以上。

图表 7. 合肥等离子物理研究所超导磁体部分相关招标信息

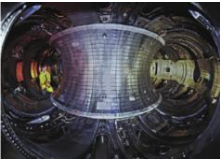
中标日期	采购项目	需求概况	预算金额 (万元)	中标价格 (万元)	中标企业
2025/7/21	PF1 线圈绕制及接头制造	PF1 绕制生产线改造, PF1-1、PF1-2、PF1-3、PF1-4 子绕组绕制各一个, 8 个 PF1 线圈端子, 3 个 PF1 线圈接头	430.0 万元	395.0 万元	合肥聚能电物理高新技术开发有限公司
2025/6/6	BEST CS 磁体 LTS Module 实验线圈制造	01: 2 个 LTS 实验线圈线圈关键工艺认证件, 16 个 LTS 实验线圈零件加工制造及检测, 5 个辅具设计制造, 1 个 LTS 实验线圈制造及检测	720.0 万元	695.7 万元	合肥国际应用超导中心
		02 包: 5 个 LTS 实验线圈接头加工制造及检测, 21 个 LTS 实验线圈接头加工工装及设备制造	430.0 万元	410.0 万	安徽电气集团股份有限公司
2025/6/5	PF2 线圈绕制及接头制造	1 个 PF2 绕制生产线改造 (包含绕制模具), PF2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 2-5, 2-6 子绕组绕制各一个, 12 个 PF2 线圈端子, 5 个 PF2 线圈接头	600.0 万元	560.1 万元	合肥科烨电物理设备制造有限公司
2025/4/21	BEST CS 线圈绕制生产线	1 套 BEST CS 线圈绕制生产线	500.0 万元	495.8 万元	合肥曦合超导科技有限公司
2025/2/17	D 型高温超导磁体系统	杜瓦、冷屏、线圈盒、支撑、导体、线圈绕组各 1 套	638.0 万元	615.0 万元	江西联创超导技术有限公司
2024/12/6	PF6 线圈绕制及接头制造	PF6 绕制生产线改造 (包含绕制模具) 1 个, PF6-1、6-2、6-3、6-4、6-5、6-6 子绕组绕制各 1 个, PF6 线圈端子 12 个, PF6 线圈接头 5 个	650.0 万元	585.2 万元	合肥聚能电物理高新技术开发有限公司
2024/11/22	高温超导上线圈	215mREBCO CICC 高温超导导体 (含材料) (六合一扭绞型), 1 个高温超导上线圈绕制 (螺管型)	1750.0 万元	1711.7 万元	合肥国际应用超导中心
2024/10/24	中心螺线管(CS)磁体高温超导 (HTS)实验线圈	4000m 超导材料, 28km 铜带, 600m 铜管, 70mDummy 电缆, 600m 螺旋状铜块, 5 件 G10 板, 1 套实验线圈制造	396.0 万元	389.6 万元	合肥核聚磁体科技有限公司
2024/9/19	校正场 (CC) 磁体制造	校正场 (CC) 线圈制造生产线搭建 1 套, 关键部件及工艺认证 1 套, CC1—CC8 线圈制造各 1 套	5600 万元	/	第一中标候选人: 淮南新能源研究中心; 第二中标候选人: 安徽电气集团股份有限公司; 第三中标候选人: 合肥科烨电物理设备制造有限公司。

资料来源: 中科院合肥等离子物理研究所官网, 中银证券整理

磁体材料主要有铜导体和超导体，高温超导助力聚变商业化加速实现

较为早期的托卡马克装置采用的磁体材料为铜导体。由于磁约束聚变主要靠磁场来约束高温等离子体，因此在高温、高压的极端环境中，磁体材料的性能尤为重要。较为早期的托卡马克装置采用的铜导体作为磁体材料，例如前苏联 T-3 托卡马克装置、美国 TFTR 装置、欧洲联合环（Joint European Torus, JET）装置、日本 JT-60 装置、中国环流三号装置等。铜导体在强大的电流下不可避免地存在发热问题，导致能量耗散严重，使得消耗的能量将超过核聚变产生的能量，而且要把铜线圈产生的热量及时带走，需要过于庞大的冷却系统，因此限制了磁约束核聚变的长时间稳态运行，因而无法满足未来商用聚变堆的安全性、高效性和经济性要求。

图表 8. 典型铜基托卡马克装置磁体系统的部分性能参数

参数	TFTR	JET	JT-60	HL-3
装置形貌				
首次运行年份	1982	1983	1985	2020
主半径/m	2.48	2.96	3.32	1.78
TF 线圈数量/个	20	32	18	20
TF 线圈电流/kA	73.3	67	52.1	140 (191)
中心磁场/T	5.2	3.45	4.5	2.2 (3)
等离子体电流/MA	2.5	4.8	2.7	2.5 (3)
国家或地区	美国	欧盟	日本	中国

资料来源：张家龙等《磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述》，中银证券

超导技术的应用，进一步加速了全人类对于聚变领域的探索进度。20 世纪后期，科学家们开始把超导技术用于托卡马克装置，由于其具有零电阻效应，且承载电流密度更高有利于建造更加紧凑、更高场强的聚变装置，能够有效改善长脉冲稳态运行，大大提升聚变能源的转化效率与能源输出。1979 年苏联建造了世界上第一台低温超导托卡马克 T-7 装置，将超导磁体技术引入聚变领域，其纵场磁体系统由 48 个超导线圈组成，为后续聚变装置的设计和运行提供了重要支持和创新。以 T-7 为原型设计制造的我国首个超导托卡马克装置 HT-7，从 1994 年建成运行到 2012 年最后一轮实验，HT-7 等离子体放电次数突破 14 万次，虽然 HT-7 装置只有纵场磁体采用超导体绕制，用以激发等离子体的中心螺管磁体和用以控制等离子体的极向场磁体仍采用铜导体绕制，但是仍然在 2008 年连续重复实现长达 400 s 的 1200 万℃高温等离子体运行，创造了当时最长放电时长记录，证明了超导材料在磁约束托卡马克装置中应用的先进性。随后，全球各国开始积极谋划全超导托卡马克装置，2006 年中国等离子体物理研究所自主研制并建成世界上第一个全超导托卡马克实验装置 EAST，标志着聚变能发展步入全超导托卡马克时代。^[2]

图表 9. 我国首个超导托卡马克 HT-7 装置主机



资料来源：王腾《超导磁体技术与磁约束核聚变》，中银证券

图表 10. 典型低温超导托卡马克主要性能参数

参数	EAST	KSTAR	CFETR	ITER
主半径/m	1.85	1.8	7.2	6.2
TF 线圈数量/个	16	16	16	18
TF 线圈电流/kA	14.5	35.2	84.6	68
中心磁场/T	3.5	3.5	6.5	5.3
等离子体电流/MA	1.0	2.0	13.78	15
国家或地区	中国	韩国	中国	国际

资料来源：张家龙等《磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述》，中银证券

低温超导线圈的磁场强度限制，使得 ITER 等装置不得不设计的庞大且昂贵。根据托卡马克聚变堆功率的相关公式，其单位体积的聚变功率密度正比于磁场强度的 4 次方：

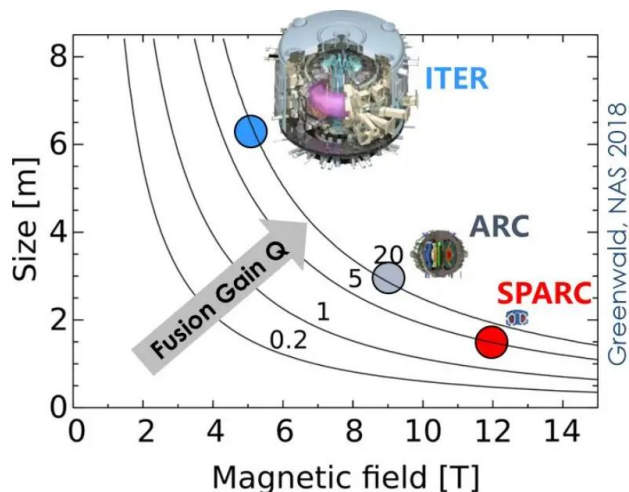
$$P_{\text{fusion}}/V \approx 8p_{\text{th}}^2 \propto \beta_n^2 \epsilon^2 q_{95}^{-2} B^4$$

如果磁场强度上不去，就只能通过提高体积的方式来获得所需的聚变功率，可见提高磁场强度 B 是缩小托卡马克聚变堆尺寸的关键。但是超导临界电流密度的限制使得低温超导线圈所能达到的最高磁场强度非常有限，低温超导体如 NbTi 和 Nb3Sn，当电流密度超过一定的值就会失去超导态，这使得 NbTi 和 Nb3Sn 磁体分别最高只能达到 8T 和 13.5T。ITER 采用 Nb3Sn 超导磁体，等离子体中心最高磁场强度只能达到 5.3T，这时线圈的高场侧达到 13T，因此要达到 500MW 聚变功率的目标，便不得不将 ITER 设计得很大，等离子体大半径 6.2m，造成 ITER 的成本居高不下。因为 ITER 采用了低温超导线圈，才如此庞大和昂贵，要降低成本，减小装置尺寸，最有效的办法就是增强磁场。

高温超导材料的出现，让聚变商业化出现曙光。近年来，以稀土钡铜氧 (Rare Earth Barium Copper Oxide, REBCO) 为代表的高温超导材料，在工业化生产能力和性能方面均获得显著提升，推动了其在磁体领域的应用。与传统低温超导材料相比，REBCO 材料具有更高的临界温度和热稳定性，并且在高磁场下仍能保持出色的载流能力，使得其在聚变领域中具有巨大的应用潜力。将 REBCO 材料引入聚变装置中，不仅能够显著提升其磁场强度和聚变性能，还能大幅缩减磁体尺寸，降低托卡马克装置的研发成本和技术难度，进而使聚变装置在设计上更加紧凑和高效，推动其商业化进程。美国麻省理工学院研究人员在《IEEE 应用超导汇刊》上发表 6 篇论文，宣布通过他们所研发的新型高温超导磁体，能够将可控核聚变装置托卡马克的体积和成本压缩至目前的 1/40，并成功通过了严格的科学测试和论证。

国内外同步进行高温超导材料在核聚变应用中的探索。基于二代高温超导带状导线 REBCO，小型聚变实验堆 SPARC 的设计聚变功率 $P > 50\text{MW}$ 、聚变增益 $Q > 2$ 、设计磁场 12T，等离子体大半径却只有 1.65m，等离子体体积只有 11m^3 ，与 EAST 差不多，是 ITER 的 1/80。2024 年 6 月 18 日，位于上海的聚变能源商业公司能量奇点宣布，由能量奇点设计、研发和建造的洪荒 70 装置成功实现等离子体放电，这是全球首台全高温超导托卡马克装置，也是全球首台由商业公司研发建设的超导托卡马克装置，这一装置的运行标志着我国在全球范围内率先完成了高温超导托卡马克的工程可行性验证。

图表 11. 从 ITER 到 SPARC，反应堆的尺寸不断缩小



资料来源：科学院微信公众号，中银证券

图表 12. 部分商业化高温超导托卡马克装置

公司名称	Common-wealth Fusion Systems	Tokamak Energy	能量奇点	星环聚能
托卡马克名称	SPARC	Demo4	洪荒 70	CTRFR-1
环向磁场/T	12.2	18	0.6	3-5
TF 数量/个	18	14	12	16
国家或地区	美国	英国	中国	中国

资料来源：张家龙等《磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述》，中银证券

从我们统计的部分托卡马克装置的磁体材料情况来看，磁体材料确实经历了从铜导体到超导的转变。进入 21 世纪之后，建成的托卡马克装置基本上磁体材料都是以超导体为主，而后续正在建设或者规划的托卡马克装置，采用 REBCO 高温超导带材的比例大大增加。

图表 13. 部分托卡马克装置的磁体材料情况

装置	国家	建成年份	TF 线圈	PF 线圈	CS 线圈	线圈外壳
TFTR	美国	1982	水冷式无氧铜导体	水冷式无氧铜导体	水冷式无氧铜导体	金属钛
JET	欧盟	1983	水冷铜导体	水冷铜导体	水冷铜导体	奥氏体球墨铸铁
JT-60	日本	1985	水冷式无氧铜导体	水冷式无氧铜导体	水冷式无氧铜导体	高锰非磁性钢
Alcator C-Mod	美国	1992	C-10700 含银无氧铜	C-10700 含银无氧铜	C-10700 含银无氧铜	
环流三号	中国	2020	水冷铜导体	水冷铜导体	水冷铜导体	
EAST	中国	2006	NbTi 超导体	NbTi 超导体	NbTi 超导体	
KSTAR	韩国	2007	Nb3Sn 超导体	1 对外部 PF 采用 Nb3Sn 超导体，其余采用 NbTi 超导体	Nb3Sn 超导体	316LN 不锈钢
ST25(HTS)	英国	2015	REBCO 二代高温超导带材	REBCO 二代高温超导带材		
洪荒 70	中国	2024	高温超导带材	高温超导带材	高温超导带材	
SPARC	美国	2025 (预计)	REBCO 高温超导带材	REBCO 高温超导带材	REBCO 高温超导带材	
星火一号	中国	2029 (预计)	高温超导	高温超导	高温超导	
ITER	国际	2033 (预计)	Nb3Sn 超导体	NbTi 超导体	Nb3Sn 超导体	316LN 不锈钢
CFETR*	中国	2035 (预计)	从低场到高场分别采用 NbTi 型、ITER 级 Nb3Sn 以及高性能 Nb3Sn 超导体	PF1 和 PF7 采用 Nb3Sn 型超导体，其余采用 NbTi 型超导体	Nb3Sn 超导体	

资料来源：张家龙等《磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述》，联创光电公告，中银证券整理
注：*CFETR 的线圈材质基于 2014 年完成的概念设计稿，后续可能会有改动

材料制备与绕制工艺是关键，超导磁体未来应用空间广阔

低温超导材料已实现商业化生产，高温超导仍处产业化初期

超导是某些物质在满足临界条件时（临界温度 T_c 、临界磁场 H_c 、临界电流 I_c ），电阻突然变为零的现象。超导材料具有零电阻、完全抗磁性、量子隧穿效应三大基本特性，可以实现大电流输运、产生强磁场等先进技术。由于其独特的物理性质，超导材料被广泛认为是支撑未来高能物理、能源工程和量子科技的重要基础材料。

图表 14. 超导材料的特性

特性	描述	图示
零电阻	超导材料最基本的性质，即当温度降至临界温度 T_c 以下时，其电阻变为零。	
完全抗磁性 (迈斯纳效应)	将超导体置于外磁场中时，超导体表现出完全抗磁性，即把原来处于体内的磁场排挤出去，其内部的磁感应强度为零，人们将此种现象称为“迈斯纳效应”。	
量子隧穿效应 (约瑟夫森效应)	在薄绝缘层隔开的两种超导体之间有电流通过，即有“电子对”能“穿过”薄绝缘层（量子隧穿），而超导结上并不出现电压	

资料来源：西部超导招股说明书，中银证券

目前已发现上万吨超导材料，但能够进行商用的不足十种。1911 年，荷兰物理学家昂内斯在实验中发现，在低温 4.2K 时，金属汞的电阻骤逝，此时电流流经导体时没有电能损耗，由此开始了超导的研究。截至目前已经发现的具有超导电性的物质有上万吨，其化学形态有单质、合金、金属间化合物、氧化物、硫化物等等，几乎涉及无机化合物中的各种类别，部分有机导体在高压下也能呈现超导电性，一些处于特殊结构(如无定形、非晶、二维)下的材料也可能超导。超导材料通常可以按照临界温度、化学成分、磁场响应行为等进行分类。虽然超导材料的种类繁多，但是超导材料大多对机械性能、加工特性、使用环境等有严格要求，因此目前可实用化、绕制成磁体的商用超导材料不足 10 种，包括 NbTi、Nb₃Sn、REBCO、Bi-2212、Bi-2223 等。^[3]

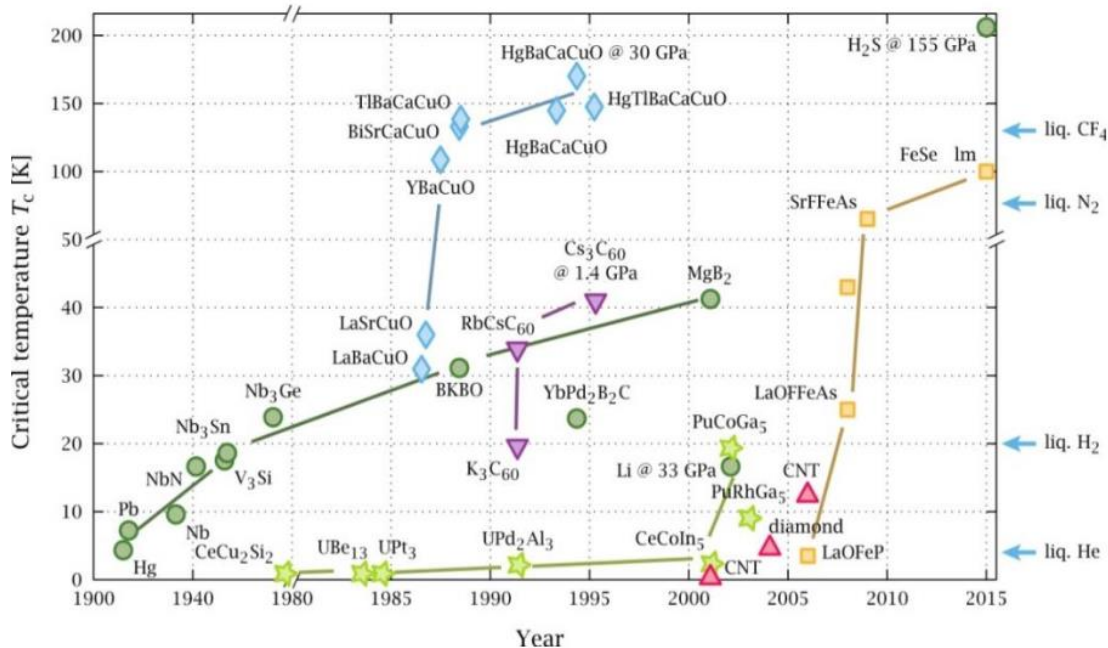
图表 15. 超导材料的分类

分类依据	具体分类	描述	代表材料
临界温度	低温超导	临界温度在液氮温区（4.2K）	NbTi、Nb ₃ Sn 等
	高温超导	临界温度在液氮温区（77K）	MgB ₂ 、REBCO、Bi-2212、Bi-2223
化学成分	金属超导	元素、合金、化合物等	Hg、Nb、NbTi 等
	超导陶瓷	指具有超导特性的功能陶瓷	铜基氧化物和铁基化合物等
	有机超导	有机分子或富勒烯材料组成的超导体	ClO ₄ 、PF ₆ 、AsF ₆ 等
磁场响应行为	第 I 类超导体	只有一个临界磁场 H_c ，超过即完全失超	Al、Zn、Ga、Ge、Sn、In 等
	第 II 类超导体	有两个临界磁场下临界场 H_{c1} 和上临界场 H_{c2} ，可进入混合态	金属化合物及其合金，以及陶瓷超导体
理论机制	常规超导体	可以用 BCS 理论解释	低温金属和合金超导体如铌、铅、铌钛合金
	非常规超导体	无法用 BCS 理论完整解释，通常具有复杂晶格结构、电子关联行为强	铜氧化物、铁基化合物、有机材料等

资料来源：邹芹等《超导材料的研究进展及应用》，中国物理学会期刊网微信公众号，中银证券

按照临界温度是最常用的分类,临界温度不断提升。在早期关于超导材料与现象的半个世纪研究中,众多科学家的努力使得超导材料的临界温度一直在缓慢地提升。直到 1986 年,德国科学家 Bednorz 和瑞士科学家 Müller 发现了具有 35K 临界转变温度的 LaBaCuO_x 氧化物陶瓷超导材料,这一发现将超导材料的研究范围从传统的金属和合金扩展到陶瓷氧化物,并显著超过了当时所有已知的最高临界温度的超导材料,开启了高温超导材料新纪元。^[4]此后随着研究的深入,超导材料的临界温度也在不断提高。因此临界温度作为超导材料最主要的指标之一,也是目前最为常见的分类方式。

图表 16. 超导材料发展历程及临界温度



资料来源: 吴北民《大型超导磁体复杂结构装配及运行过程中的多场力学问题研究》, 中银证券

低温超导材料已实现商业化生产, 高温超导产业化仍处产业化初期。根据国际电工委员会的分类标准, 按照临界温度 T_c 是否大于 25 K 而分为低温超导材料和高温超导材料, 另外也有以 40K 或者 77 K 为区分标准的, 值得注意的是, 这里的“高温”只是一种相对概念, 实际上高温超导材料临界温度仍然是极低温。低温超导材料发展较早, 目前已经形成系统的商业化生产, 且广泛应用于核磁共振成像、聚变堆以及大型粒子加速器等装置中, 但该类材料临界温度低, 导致其应用停留在液氮(4.2 K)温区, 并需要依赖昂贵的液氮冷却系统, 严重限制了超导应用的发展。高温超导材料极大地拓宽了超导材料的工程化应用范围, 它们可以在相对较高的温度下保持超导状态, 从而减少了制冷系统复杂性, 降低了应用成本, 并且高温超导材料因其在临界磁场方面的显著优势, 正逐步取代低温超导材料, 在高场超导磁体应用中展现出主导地位。但由于高温超导材料发展起步较晚, 制备技术较为复杂, 目前高温超导体正处于提升性能和突破应用的产业初期阶段, 在这个过程中, 高性能高温超导材料的批量化制备成为关键基础。

图表 17. 低温超导材料和高温超导材料特性对比的分类

项目	具体分类	描述
所涉材料	NbTi/Nb3Sn 等	BSCCO/REBCO 等
工作温区	液氮 (4.2K)	液氮 (4.2K) 至液氮 (77K)
磁场强度	0-15T	0-30T 以上
磁体体积及重量	制冷能耗较高, 且磁体体积及重量较大	制冷能耗较低, 且磁体体积及重量较小
主要应用领域	磁共振成像、核磁共振波谱分析、可控核聚变、超导磁控单晶炉等	可控核聚变、超导电力、超导磁控单晶炉、超导感应加热装置等

资料来源: 上海超导招股说明书, 中银证券

高温超导材料产品价格显著高于低温超导材料。高温超导材料的制备需要使用到稀土金属、银等价格较高的原材料，且制备工艺复杂，导致其生产成本较高。尽管随着技术的进步，当前生产效率和良率有所提升、成本有所下降，但目前高温超导材料的价格仍然较高，使得下游客户在选择高温超导材料时，需要综合考虑其性能提升带来的效益与高昂的采购成本之间的平衡，这在一定程度上制约了高温超导材料的大规模推广与应用。从近两年公开中标的信息来看，尽管不同型号规格的超导材料在价格方面有所差异，但是高温超导带材的价格基本在 100-300 元/m 之间，而 Nb₃Sn 超导线材的价格在 60 元/m 左右，NbTi 超导线材的价格在 20 元/m 以下，价格差距明显。

图表 18. 国内部分低温超导材料中标及价格情况

品类	型号规格	招标人	日期	中标单位	数量	金额	单价
NbTi 超导线材	规格 0.85*0.55mm	中国科学院电工研究所	2025/7/7	西安聚能超导	230km	149.3 万元	6.5 元/m
NbTi 超导线材	涂漆后尺寸 1.2±0.01mm	华中科技大学国家脉冲 强磁场科学中心	2025/3/12	西安聚能超导	7800m	15.2 万元	19.5 元/m
NbTi 超导线材	涂漆后尺寸 0.9±0.01mm	华中科技大学国家脉冲 强磁场科学中心	2025/3/12	西安聚能超导	8200m	9.2 万元	11.2 元/m
NbTi 超导线材	涂漆后尺寸 0.78±0.01mm	华中科技大学国家脉冲 强磁场科学中心	2025/3/12	西安聚能超导	19400m	12.0 万元	6.2 元/m
Nb3Sn 超导线材	铜超比及公差： 1.5±10%	中国科学院电工研究所	2024/12/16	西安聚能超导	14500m	90.0 万元	62.1 元/m
Nb3Sn 超导线材	铜超比及公差： 2±10%	中国科学院电工研究所	2024/12/16	西安聚能超导	92400m	508.3 万元	55.0 元/m
Nb3Sn 超导线材	铜超比及公差： 3±10%	中国科学院电工研究所	2024/12/16	西安聚能超导	90000m	491.2 万元	54.6 元/m
Nb3Sn 超导线材		中科院合肥等离子体物 理研究所	2024/11/15	西安聚能超导	4000kg	2192.0 万元	5480 元/kg
Nb3Sn 超导线材		中科院合肥等离子体物 理研究所	2024/9/11	西安聚能超导	25000kg	13700.0 万元	5480 元/kg
Nb3Sn 超导线材		中科院合肥等离子体物 理研究所	2024/8/2	合肥夸夫超导	15000kg	8220.0 万元	5480 元/kg

资料来源：合肥等离子体研究所官网，中国政府采购网，华中科技大学官网，中银证券整理

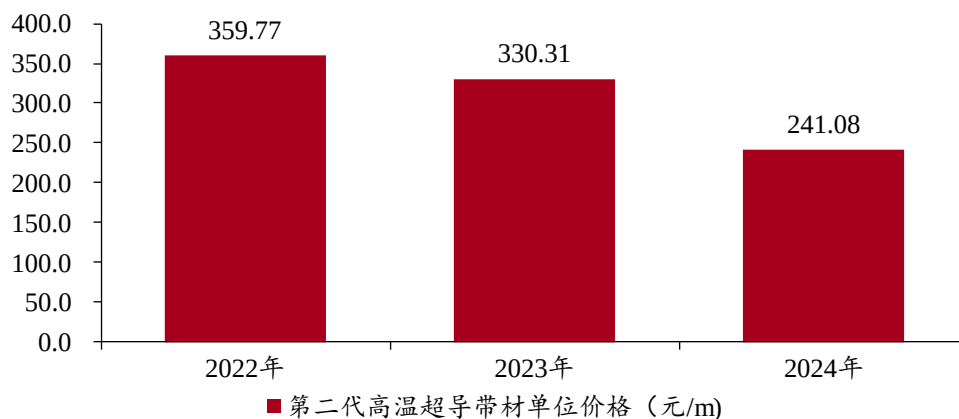
图表 19. 国内部分高温超导材料中标及价格情况

品类	型号规格	招标人	日期	中标单位	数量	金额	单价
YBCO 超导带材	ST-4-E	中国科学院电工研究所	2025/7/8	上海超导	18000m	324.0 万元	180 元/m
高温超导带材	ST-4-E	中国科学院电工研究所	2025/6/11	上海超导	31000m	418.5 万元	135 元/m
高温超导带材	ST-12-L	中国科学院电工研究所	2025/3/4	上海超导	7500m	210.0 万元	280 元/m
加强型二代高温 超导带材	ST-4.8-L	上海交通大学	2025/2/18	上海超导	36000m	504.0 万元	140 元/m
加强型二代高温 超导带材	ST-4-E	中国科学院合肥物质科 学研究院	2025/1/7	上海超导	200000m	2700.0 万元	135 元/m
高温超导带材		中科院合肥等离子体物 理研究所	2024/11/4	上海超导	200000m	2700.0 万元	135 元/m
高温超导带材	ST-4-E	中国科学院电工研究所	2024/11/1	上海超导	11070m	163.8 万元	148 元/m
高温超导带材	ST-4-E	中国科学院电工研究所	2024/9/3	上海超导	79200m	1093.0 万元	138 元/m
高温超导带材	XH-HTS	华中科技大学电气与电 子工程学院	2024/6/3	合肥曦合超导	1300m	35.1 万元	270 元/m
YBCO 超导带材	10mm 宽、30 微米 基底 YBCO 超导带材	中科院合肥等离子体物 理研究所	2024/3/29	上海超导	1800m	54.0 万元	300 元/m
YBCO 超导带材	4mm 宽、50 微米基底 YBCO 超导带材	中科院合肥等离子体物 理研究所	2024/3/29	上海超导	12000m	120.0 万元	100 元/m

资料来源：合肥等离子体研究所官网，中国政府采购网，华中科技大学官网，中银证券整理

随着高温超导材料产能的逐步释放，价格有望持续下降。随着下游需求的提升，国内外的高温超导带材生产商积极进行扩产，形成规模效应的同时，也牵引技术得到进步，生产工艺更加成熟、生产效率逐步提高，从而使得产品价格也有所降低，更加适应大规模商业化应用的趋势。根据上海超导招股说明书的数据，其第二代的高温超导带材单位价格呈现逐年下降的趋势，从 2022 年的 359.77 元/m 下降至 2024 年的 241.08 元/m。

图表 20. 上海超导高温超导带材价格逐年下降



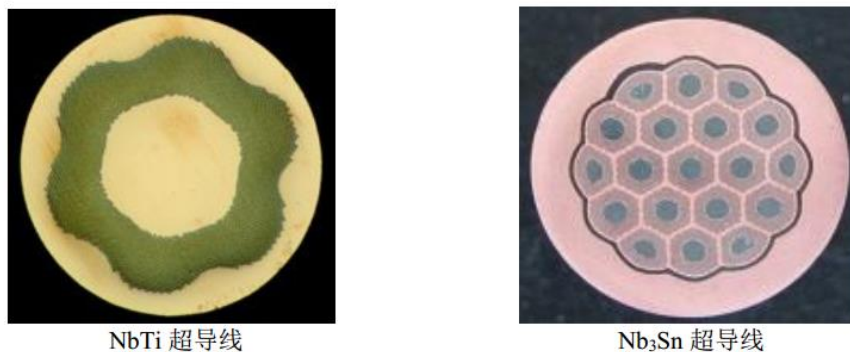
资料来源：上海超导招股说明书，中银证券

低温超导材料

目前已商用的低温超导材料主要是 NbTi 和 Nb₃Sn 超导线材。根据西部超导的招股说明书以及《实用化超导材料研究进展与展望》中的描述，NbTi 是二元合金，具有良好的加工塑性，很高的强度，制造成本低，临界温度为 9.7K，临界场 H_{c2} 为 12T，主要用于 10T 以下磁场；Nb₃Sn 是金属间化合物，属于脆性材料，加工性能差，制造成本高，临界温度为 18K，在 4.2K 时的上临界磁场可达 25T，主要用于 10T 以上的磁场。

NbTi 占据 90% 以上的市场。根据 NbTi 超导线材因为其制备工艺成熟、性价比高、稳定性强等优势，已经广泛应用于各种液氦温区服役的聚变堆磁体、核磁共振成像仪(MRI)、核磁共振波谱仪(NMR)和大型粒子加速器等设备的制造中。即使随着技术的发展，对磁体磁场强度的要求越来越高，目前大部分的磁体仍然采用 NbTi 线材进行背景场磁体的制备，根据现代物理知识杂志微信公众号的数据，目前 NbTi 占据了超导材料产业 90% 以上的市场。

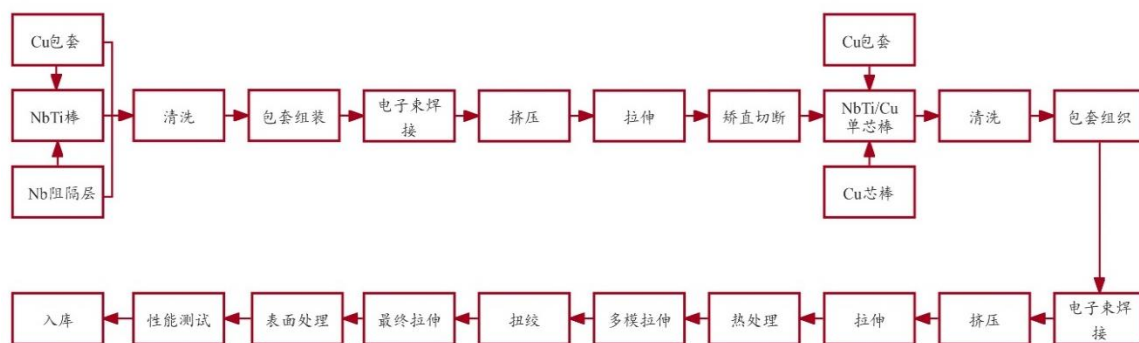
图表 21. 典型的低温超导线截面



资料来源：西部超导招股说明书，中银证券

NbTi 超导材料一般采用冷加工工艺。NbTi 线可用一般难熔金属的熔炼方法加工成合金，再用多芯复合加工法加工成以铜（或铝）为基体的多芯符合超导线，最后用时效热处理及冷加工工艺使其最终合金由 β 单相转变为具有强钉扎中心的两相 ($\alpha+\beta$) 合金的结构，以满足使用要求。^[5]

图表 22. NbTi 超导线生产流程

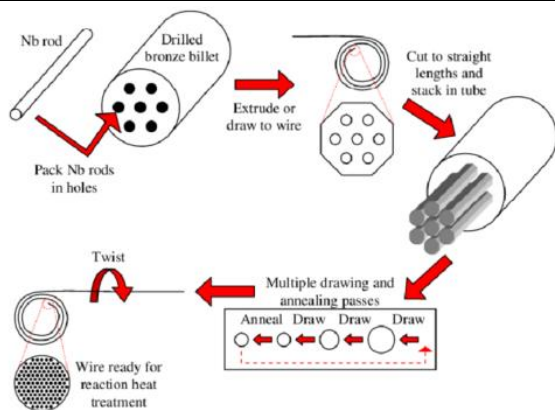


资料来源：西部超导招股说明书，中银证券

Nb₃Sn 超导线材的制备方法主要有内锡法和青铜法。对于 Nb₃Sn 线材的制备，由于 Nb₃Sn 为化合物，脆性较大，不能简单地采用集束拉拔的方法进行制备。目前 Nb₃Sn 超导线材的制备工艺主要有青铜法（Bronze process），内锡法（Internal tin process）和粉末装管法（Powder in tube process, PIT）等，其中最为广泛使用的是青铜法和内锡法，粉末装管法由于工艺成本较高，制备过程复杂，商业化应用较少。^[6] 三种制备工艺都是在铜管中装入铌纤维和锡，经过多次的高温淬火使其发生固态扩散形成 Nb₃Sn 超导体。

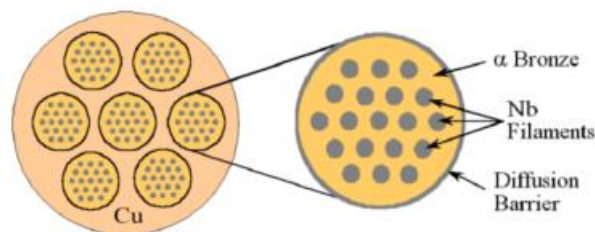
青铜法是最先被使用的 Nb₃Sn 线材的备方法。首先将铜和锡按照一定的比例混合后在高温下熔融成青铜基体，在锡青铜集体上轴向钻出一定数量六边形阵列排布的孔，将铌棒按照一定的比例嵌入青铜基体当中，铌棒全部插入后进行焊封并将其拉伸得到六方形的亚组元，将上百只六方亚组元封装在有阻隔层的无氧铜管中，通过热挤压、拉拔得到 Nb₃Sn 多芯丝超导线材。为防止青铜中的 Sn 扩散污染外层作为稳定体的铜，实际生产中会在青铜和铜中间加一层钽扩散阻隔层。此外，青铜基体加工硬化较快，对退火温度的要求也极高。青铜法具有制备工艺简单、制作成本低、超导性能可靠以及方便重复生产等优点，因此可大规模应用。^[7]

图表 23. 青铜法制备 Nb₃Sn 超导线材工艺流程



资料来源：肖霆锋《传导冷却型 Nb₃Sn 超导螺线管线圈的研制》，中银证券

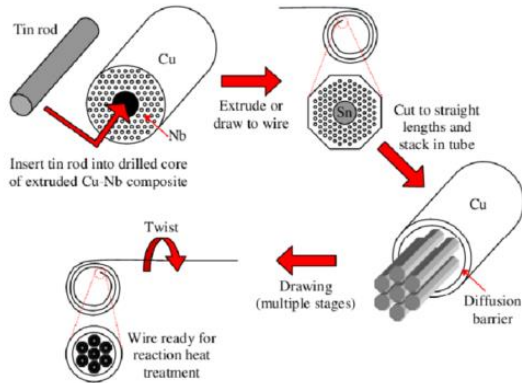
图表 24. 青铜法制备的 Nb₃Sn 超导线的截面图



资料来源：田栋《Nb₃Sn 复合超导线圈的热应力分析与断裂行为研究》，中银证券

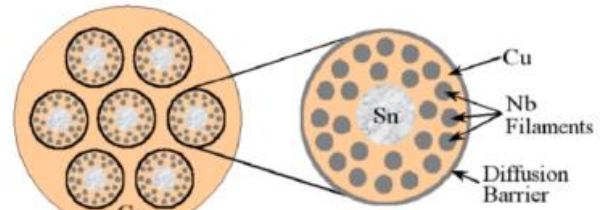
内锡法制备成的 Nb_3Sn 超导材料性能相比青铜法更优良。所谓内锡法是指相对于青铜法，在铜基体内内插锡棒，以锡棒作为 Nb_3Sn 超导相的锡源。在热处理过程中，锡棒先与铜基体反应生成中间体的铜锡合金，铜锡合金与铌反应生成 Nb_3Sn 超导相。首先在铜基体的除中心位置插入铌棒，再将锡棒插入在铌-铜复合管中心，锡棒完全插入后进行焊封、拉伸，得到铌-铜-锡复合亚组元，将多个复合亚组元装入带阻隔层的铜管中进行挤压、拉拔，得到 Nb_3Sn 多芯丝超导线材。^[6] 该法的优点在于直接利用纯铜和锡作原料，不需要中间多次退火，具有较高的制备效率，最终生产出的超导体中的锡含量较高，从而具有更强的载流能力。但是该法也有一些不足之处，由于亚组元之间的搭接，会在材料中形成芯丝，这些芯丝会导致材料的局部超导性能下降，磁滞损耗升高。

图表 25. 内锡法制备 Nb_3Sn 超导线材工艺流程



资料来源：肖建锋《传导冷却型 Nb_3Sn 超导螺线管线圈的研制》，中银证券

图表 26. 内锡法制备的 Nb_3Sn 超导线的截面图



资料来源：田栋《 Nb_3Sn 复合超导线圈的热应力分析与断裂行为研究》，中银证券

全球仅有少数几家企业掌握低温超导导线生产技术，主要分布在英国、德国、日本和中国。根据西部超导的招股说明书，在 $NbTi$ 铌棒领域，全球仅有西部超导和美国 ATI 两家公司，其中 ATI 公司的 $NbTi$ 合金产品长期以来供应于全球 $NbTi$ 超导线材生产商；在超导线材领域，主要厂商包括西部超导、英国 Oxford、德国 Bruker、英国 Luvata、日本 JASTEC，其中英国 Oxford、德国 Bruker、英国 Luvata 三家公司是全球最主要的低温超导线材生产商。西部超导的业务涉及 $NbTi$ 铌棒和线材、 Nb_3Sn 线材（包括“青铜法”和“内锡法”）和超导磁体的生产，是全球唯一的铌钛（ $NbTi$ ）铌棒、超导线材、超导磁体的全流程生产企业。

图表 27. 国内外主要低温超导公司及其布局

公司名称	NbTi		Nb ₃ Sn		超导磁体	超导设备	
	铌棒	线材	青铜法	内锡法		MRI	NMR
西部超导	✓	✓	✓	✓	✓		
宁波建信					✓	✓	
潍坊新力					✓		
成都奥泰					✓	✓	
苏州安科						✓	
东软医疗						✓	
上海联影						✓	
鑫高益						✓	
美国 ATI	✓						
英国 Oxford		✓	✓	✓	✓		
德国 Bruker		✓	✓	✓	✓		✓
英国 Luvata		✓	✓	✓			
日本 JASTEC		✓	✓		✓		
美国 GE					✓	✓	
德国 Siemens					✓	✓	
荷兰 Philips					✓	✓	
日本 JEOL							✓
美国 Varian							✓

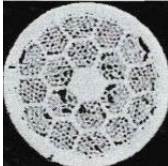
资料来源：西部超导招股说明书，中银证券

高温超导材料

实用化的高温超导材料主要包括 **Bi-2212**、**Bi-2223** 和 **REBCO**。由铋系超导体制备的线带材被称为一代高温超导带材，由 REBCO 制备的带材被称为二代高温超导带材：

- **Bi-2212** 是一种钙钛矿结构的材料，晶体结构为层状结构，包括两个铜氧层作为超导层，其 T_c 约 85 K， H_{c2} 大于 100 T (4.2 K)，Bi-2212 是目前唯一可以被制备成各向同性圆线的铜氧化物高温超导材料，使其在应用过程中，可以依托低温超导材料开发绞缆或磁体绕制技术，且无需考虑横截面方向上的各向异性问题，极大地简化了导体和磁体设计过程因此被认为是低温高场下最具应用前景的高温超导材料之一；^[8]
- **Bi-2223** 是当前已知的超导转变温度最高的铜基高温超导材料， T_c 约 110K，其晶体结构与 Bi-2212 相似，具有三个铜氧层，但由于其 c 轴长度极大，使其超导电性具有明显的各向异性，因此实际应用时往往需要制备成扁带的结构，正式由于其各向异性及制备所需的银基复合材料的成本偏高的原因，限制了相应的市场需求；^[4]
- **REBCO** (稀土钡铜氧化物, Rare earth barium copper oxide)，常见材料包括 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO)、 $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (GdBCO)、 $DyBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (DyBCO) 等，其中 YBCO 是首个被发现的临界温度达到 77 K 以上的铜氧化物超导体，其 T_c 约为 92 K，且目前应用最为广泛，REBCO 涂层导体因其较高的临界电流密度、良好的机械稳定性、高载流能力、高不可逆场以及采用廉价的生产原料等优势，已成为目前应用最广泛的超导材料之一。

图表 28. 实用化高温超导材料参数

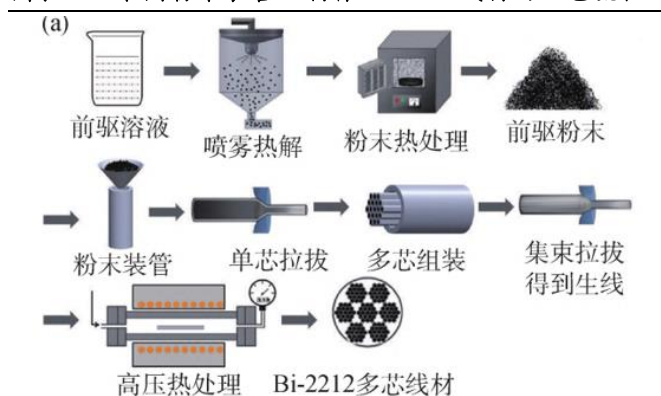
		Bi-2212	Bi-2223	REBCO
				
结构属性	超导材料名称	Bi2Sr2CaCu2O8+x	Bi2-xPbx Sr2Ca2Cu3O10-y	REBa2Cu3O7- δ
	超导材料含量	40%	25%	1%到 5%
	基底材料名称	Ag/Ag 合金	Ag/Ag 合金	高强度 Hastelloy 基底
	导体应用形式	多芯线材	多芯带材	多层结构带材
加工长度 (m)		>1000	>300	100-1000
电气属性	临界电流密度 (15T, 4.2K) (A mm-2)	580 到 1300	350 到 500a	400 到 1500a,b
	临界轴向拉伸应力 (MPa)	100 到 130 (裸线) >250 (增强线)	130 (裸带) 250 到 525 (增强带)	400 到 800
机械属性	可逆轴向应变范围	0%到 0.3%-0.6%	-0.1%到 0.25% (裸带) -0.1%到 0.57% (增强带)	-1.2%到 0.4%-0.7%
	临界横向压缩应力 (MPa)	70 (经浸渍落线)	70 到 100 (裸带) 150 到 250 (增强带)	300 到 750

资料来源：杨士葛《堆叠型高温超导导体的性能退化研究》，中银证券

注：a 垂直场下测试结果，即磁场 B 垂直于带材的宽面；b 包括 50 μm 厚镀铜。

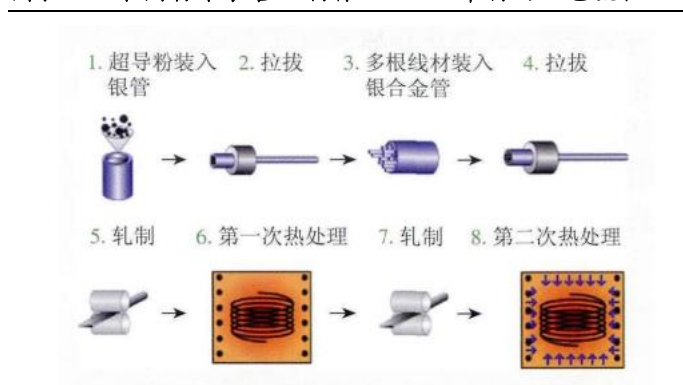
铋系超导体通常采用粉末装管法（Powder in tube, PIT）进行制备。铋系超导相是一种陶瓷结构，无法直接加工成线材或带材，因此通常采用粉末装管法进行制备。对于 Bi-2212 线材来说，先制备具有高 Bi-2212 含量的前驱体粉末，再将其装入纯银管中，经过旋锻、拉拔加工成单芯线材，然后按照设计结构，使用纯银管或银合金管经过多次组装得到多芯线材，最后经过拉拔加工成一定尺寸的具有各向同性圆形截面的线材。Bi-2223 的制备工艺与 Bi-2212 类似，不同点是在获得多芯线材后需要进行轧制获得多芯带材，最后通过高温热处理使前驱体中各组分发生相互反应，获得结构化排列的 Bi-2223 超导带材。^[8]

图表 29. 采用粉末装管法制备 Bi-2212 线材的工艺流程



资料来源：常佳鑫等《超导成“材”之路——实用化高温超导材料的制备及发展》，中银证券

图表 30. 采用粉末装管法制备 Bi-2223 带材的工艺流程



资料来源：马衍伟《实用化超导体研究进展与展望》，中银证券

国际上 Bi-2212 的主要供应商包括欧洲 Nexans 公司、美国牛津仪器公司(B-OST)和日本昭和电线电缆株式会社，其中，B-OST 能够批量制备千米级 Bi-2212 线材，其长度和性能处于世界领先地位。西北有色金属研究院是国内率先进行 Bi-2212 高温超导圆线制备技术研究的研发机构，近年来，其通过开发第三代 Bi-2212 纳米前驱粉末的制备技术，改进圆线结构设计和加工工艺，优化高压热处理技术等，实现了千米级长线的批量制备。

目前，日本住友电气工业株式会社是国际上唯一可稳定量产 Bi-2223 高温超导千米带材的公司，其开发的千米级带材高压热处理技术及装备，可实现千米带材的高压烧结，目前其批量化提供的千米带材在 77 K 自场的临界电流稳定在 200 A 以上。国内主要的 Bi-2223 带材研究单位有北京英纳超导技术有限公司和西北有色金属研究院两家。目前，国内 Bi-2223 带材的载流性能基本稳定在 150 A 左右，仍与日本住友生产的带材性能间存在较大差距。

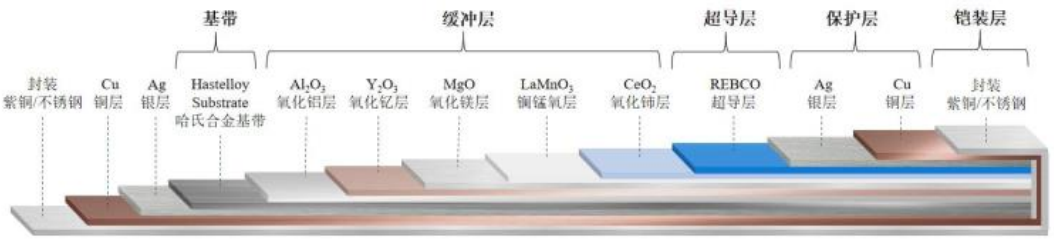
图表 31. 全球范围内 Bi-2223 超导带材生产的主要厂商及其技术水平

单位	技术水平 (77k, 自场)
日本住友电工公司	100-2000m, JE>200A/mm ²
美国超导公司 (已停产)	100-1000m, JE>150A/mm ²
德国布鲁克公司 (已停产)	100-2000m, JE>100A/mm ²
北京英纳超导技术有限公司	100-2000m, JE>120A/mm ²
西北有色金属研究院	100-2000m, JE>110A/mm ²

资料来源：现代物流知识杂志微信公众号，中银证券

REBCO 超导带材具备典型的多层复合结构，通常包含金属基带、缓冲层、超导层以及保护层。根据不同参数规格与封装要求，通常长数百米，宽 4-12 毫米，厚数十至数百微米，由金属基带、缓冲层、超导层、保护层和铠装层（或有）组成。以上海超导的产品为例，金属基带占整个带材厚度约一半，主要起支撑作用，为带材提供机械性能，一般为 Ni 或者 Ni 合金（如哈氏合金），甚至不锈钢；缓冲层介于金属基带和超导层之间，起联结作用，包含不同种类和厚度的氧化物，缓冲层顶部晶粒具有双轴织构特征，从而与超导层晶格匹配；超导层是整个带材的核心，厚度约 2 微米，发挥高温超导材料的特性；最后再用银层和铜层包裹带材，并可选用紫铜带或不锈钢带进行封装，从而完成保护及牢固。

图表 32. 第二代高温超导带材结构示意图



资料来源：上海超导招股说明书，中银证券

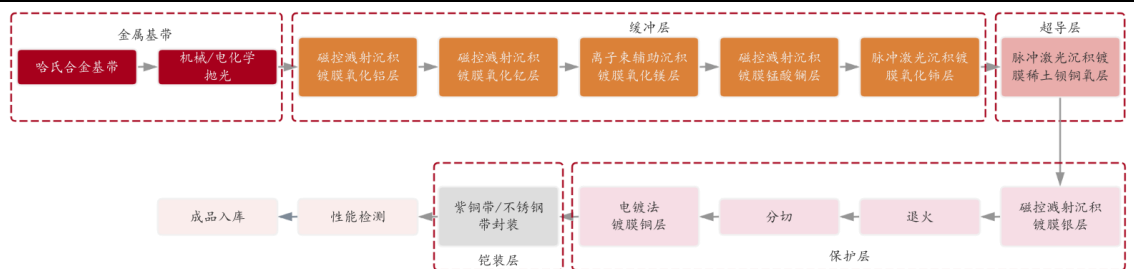
REBCO 超导带材的核心工艺是薄膜沉积的。REBCO 涂层导体的制备过程主要包括在柔性金属基带上沉积缓冲层，然后在缓冲层上沉积超导层，从而得到柔性的涂层超导带材，目前缓冲层和超导层均采用薄膜沉积的工艺进行制备。缓冲层镀膜技术主要包括轧制辅助双轴织构基带法（RABiTS）、离子束辅助沉积（ion beam assisted deposition, IBAD）和倾斜衬底沉积（inclined substrate deposition, ISD）3 种。超导层镀膜技术主要包括脉冲激光沉积（pulsed laser deposition, PLD）、金属有机化学气相沉积（metal organic chemical vapor deposition, MOCVD）、金属有机盐沉积（metal organic deposition, MOD）以及反应共蒸发（reactive co-evaporation, RCE）4 种。^[5,9]

图表 33. 几种典型 REBCO 超导层外延生长的薄膜制备方法

	化学法		物理法	
	金属有机化学气相沉积（MOCVD）	金属有机盐沉积（MOD）	脉冲激光沉积（PLD）	反应共蒸发（RCE）
特点	原位生长	异位生长	原位生长	异位生长
优点	设计面积大、薄膜密度高、生长速率快	设备成本低、计量容易控制、原来 100% 利用	靶材简单、薄膜密度高、工艺较简单	成材效率高、沉积面积大、材料密度高
缺点	成相温度高、原材料昂贵	技术难度大、缺陷相对多	设备成本高、薄膜生长慢	成相控制难、磁通钉扎弱

资料来源：常佳鑫等《超导成“材”之路——实用化高温超导材料的制备及发展》，中银证券

图表 34. 第二代高温超导带材工艺流程



资料来源：上海超导招股说明书，中银证券

目前能够实现 REBCO 长带批量化制备的企业主要包括 FFJ 公司，美国 SuperPower 公司，上海超导等。根据上海超导招股说明书，以供给能力进行划分，目前全球生产商大致可以分为三个梯队：第一梯队生产商有两家，分别为上海超导与 FFJ，年产量已超过 1,000 公里（12mm 宽）；第二梯队生产商主要包括 SuperPower、Fujikura、SuperOx、SuNAM、Theva、美国超导、东部超导和上创超导等，年产量数十至数百公里不等；第三梯队生产商主要包括 MetOx Technologies, Inc.、SupremaTape S.R.L.、High Temperature Superconductors, Inc. 等公司，整体处于研发或样品供给阶段。

图表 35. 全球主要二代高温超导带材生产商及其使用的生产技术

公司名称	国别	生产技术
Faraday Factory Japan	日本/美国	IBAD+PLD
Fujikura	日本	IBAD+PLD
上海超导科技股份有限公司	中国	IBAD+PLD
SuperPower-Furukawa	美国	IBAD+MOCVD
Theva	德国	ISD+RCE
SuNAM	韩国	IBAD+RCE
上海上创超导科技有限公司	中国	IBAD+MOD
东部超导科技（苏州）有限公司	中国	IBAD+MOCVD
High Temperature Superconductors	美国	IBAD+PLD
MetOx Technologies	美国	IBAD+MOCVD
Sumitomo Electric Industries	日本	IBAD+MOD
SWCC Showa	日本	IBAD+MOD
甚磁科技（上海）有限公司	中国	IBAD+PLD

资料来源：杨晓君等《上海高温超导磁体相关技术发展现状与对策建议》，中银证券

图表 36. 部分公司二代高温超导带材产品性能参数

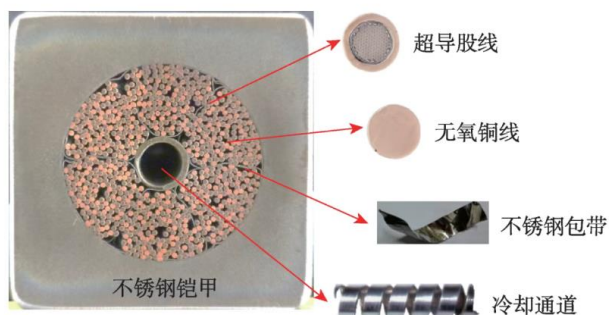
指标名称	上海超导	FFJ	SuperPower	Fujikura	SuNAM	上创超导
临界电流（77k, 0T）（A）	110-250	100-200	80-160	>130	200	130-350
临界电流（4.2k, 10T）（A）	350-800	900	420-1080	750	未披露	250-500
抗拉强度（MPa）	600-700	>500	550	800	>500	>600
临界弯曲直径（mm）	10	<10	6-11	10	30	11-15
接头电阻率（nΩ·cm ² ）	20-50	未披露	50	40-70	未披露	30-50
单根带材长度（m）	100-1000	<400	200-900	100-600	100-150	100-1000

资料来源：上海超导招股说明书，中银证券

CICC 导体为超导磁体首选导体类型，绕制工艺是关键

管内电缆导体（Cable-In-Conduit-Conductor, CICC）已成为大型超导磁体的首选超导体。自 20 世纪 60 年代起，研究人员便开始探索一种新的超导线材冷却技术，即将超导线材与铜线绕制在管道内，并通过管道内的特定冷却介质来实现冷却，这一思路催生了内冷超导体（Internally Cooled Conductor, ICC）的概念。管内电缆导体（Cable-In-Conduit-Conductor, CICC）作为 ICC 导体的一种类型，由 Hoenig 等人在 1975 年首次提出。按这种导体设计方案，电缆将穿入不锈钢管中，使用液氦等作为冷却介质在超导体间流动，显著增加了超导线材与冷却机制的接触面积，改善了传热条件，并提高了冷却效率。同时，由于电缆外部包裹有不锈钢铠甲，大大增强了机械稳定性，有效解决了在大电流和高磁场条件下的机械应力和电磁应力问题，从而满足了大型超导磁体的稳定运行要求。^[10]因 CICC 导体良好的自支撑、较低的交流损耗、所需低温冷却介质少、运行安全可靠、性能高等特点，已经成为了目前国际上公认的受控热核聚变装置中的大型超导磁体、强磁场磁体等装置的首选导体结构，例如 ITER、韩国 KSTAR、日本 JT-60SA 以及我国的 EAST 项目等都采用了 CICC 导体。^[11]

图表 37. CICC 导体结构（ITER CS）



资料来源：现代物理知识杂志微信公众号，中银证券

图表 38. 不同类型的 CICC

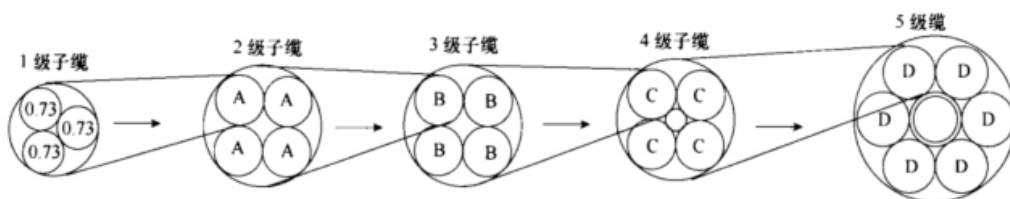


资料来源：郭子川《Nb₃Sn 铠装超导体性能退化及预测方法研究》，中银证券

NbTi、Nb₃Sn、Bi-2212 等圆线材可以通过多级绞扭的方式制成 CICC。针对超导体线材的 CICC 导体加工分三步完成，首先完成超导电缆的绞制，通过连续的绞制过程，可以逐级制作出更高级别的电缆，然后将整根超导电缆穿入不锈钢管，最后对不锈钢管及超导电缆同时进行整形紧压加工成为成品 CICC 导体，根据线圈设计不同，CICC 导体可设计为圆形或者方形。以 ITER 项目的 PF5 线圈为例，采用 NbTi 超导单线和铜单线，共由 5 级绞制而成，第 1 级子缆由 3 根超导单线绞制而成；第 2、3 级子缆分别由 4 根第 1、2 级子缆绞制而成；第 4 级子缆由 4 根第 3 级子缆和铜单线绞制而成，部分 CICC 导体超导电缆子缆中间还设计有单独的填充导体；成品超导电缆即第 5 级缆则由多根第 4 级子缆、中心冷却螺旋管绞制并绕包不锈钢钢带。^[12]

超导电缆绞制的主要技术难点，是过程中必须对股线放线张力加以实时、精准控制。绞制外径对于后续的不锈钢穿管加工有着直接影响，因而需要对各级子缆的外径进行有效控制。子缆绞制时放线张力太大，绞制直径较小，则次级子缆绞制时股线间不易滑动，变形困难，易造成单线的损伤甚至压扁。各级子缆绞制时放线张力太小，绞制直径偏大时，则次级子缆绞制时外径不易控制且结构松散，容易产生回弹，结构不稳定。

图表 39. ITER 项目 PF5 线圈 CICC 导体用超导电缆结构



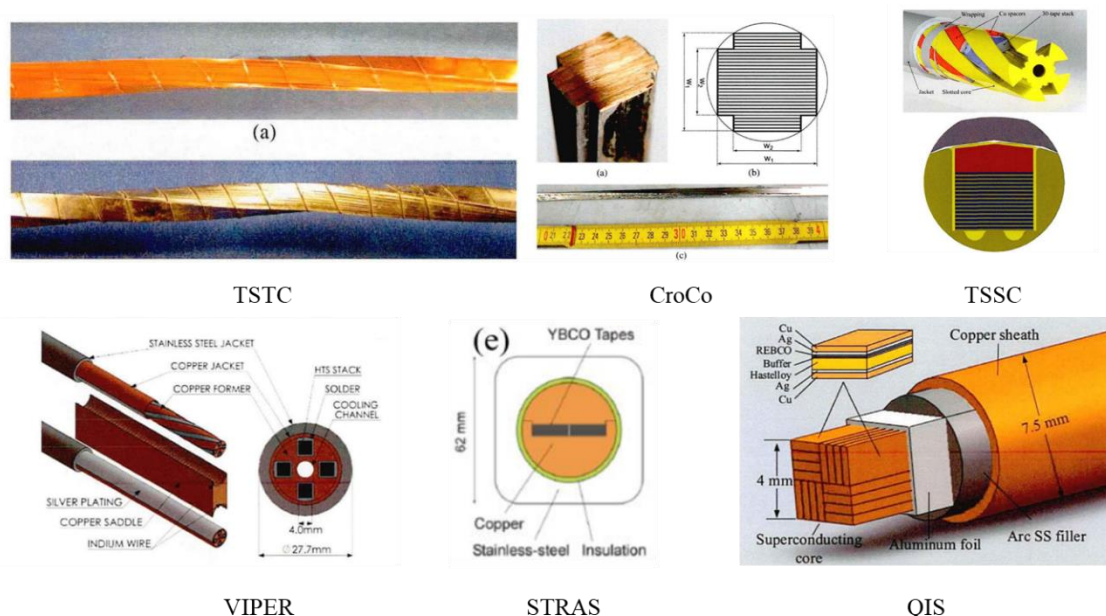
资料来源：滕玉平等《ITER 装置超导磁体线圈导体用超导电缆的绞制》，中银证券

高温超导带材主要的成缆方式包括堆叠、编制、螺旋缠绕。由于高温超导带材具有独特的截面形状，设计成电缆时无法采用目前已经商业化的低温超导电缆的布局结构。在过去几十年的研究中，学者们提出了多种关于新型高温超导电缆结构的设计方案。目前，主要的二代高温超导带材绕制电缆的布局方案可以根据不同的成缆方式分为堆叠、编织和旋转缠绕。

堆叠带材方式是通过将超导带材堆叠在一起来提高导体的载流能力。其概念最早由 MIT 提出^[13]，由此发展出了许多类型的电缆，例如 TSTC 电缆、TSSC 电缆、CroCo 电缆、准各向同性电缆（QIS）、VIPER 电缆等：

- TSTC (Twisted Stacked Tape Cable conductor) 导体结构由多层超导带材堆叠并扭绞制成，这种结构能够有效减轻带材在使用过程中的侧向弯曲，并显著提高临界电流密度及弯曲特性。然而，经过扭绞后的导体在承受侧向压力方面表现较差，因此在实际应用中需要特别注意其机械强度和可靠性；
- CroCo (Cross-Conductor cable) 导体结构采用宽度为 6mm 的超导带材，在两侧对称堆叠宽度为 4mm 的超导带材，并加以铜包套，铜包套与导体的间隙由焊锡填充并焊接。虽然 CroCo 导体受外界磁场的影响较大，但其可以制成较长的导体，这使得它在长距离输电和高功率应用中具有潜在的优势。对结构的进一步优化可以有效提升电流密度，从而增强其在实际应用中的表现；
- QIS (Quasi-isotropic) 导体结构由 4 股直接堆叠的子股对称排列而成，并用铜、铝或不锈钢等金属材料包裹。这种结构的设计旨在提升导体的各向同性特性，从而在各种操作条件下提供稳定的性能表现；
- VIPER 电缆 (Vacuum Pressure Impregnated, Insulated, Partially Transposed, Extruded, and Roll-formed) 导体电缆室 MIT 研发的一种先进高温超导电缆结构，旨在优化高电流和高磁场应用中的电缆性能。VIPER 电缆主要部分为铜骨架，铜骨架中心为冷却孔，通过低温冷却介质换热，铜骨架的外围设有矩形凹槽，用于填充堆叠的 REBCO 带材。REBCO 堆叠带材的扭绞设计有助于消除在制造过程中尤其是在电缆弯曲时对超导带材的应变累积，并通过扭绞换位减少在变化磁场下生成的瞬态热。^[10]

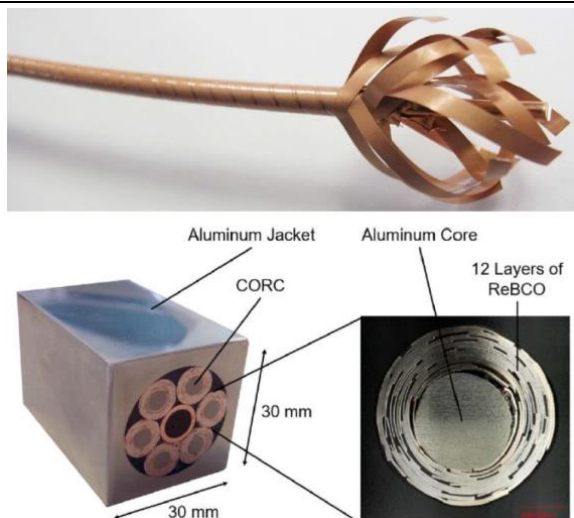
图表 40. 采用堆叠带材方式的超导电缆



资料来源：杨士葛《堆叠型高温超导导体的性能退化研究》，刘洋《典型高温超导带材及其电缆结构的力电行为研究》，中银证券

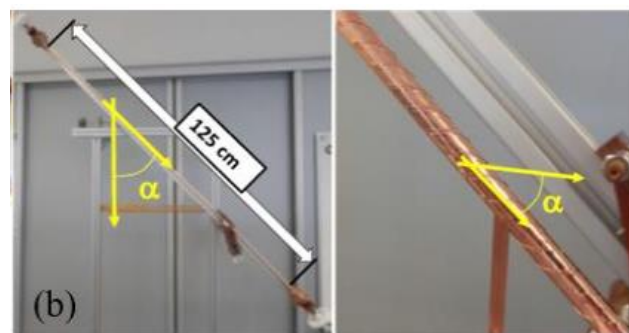
螺旋缠绕方式主要包括 CORC® (Conductor on Round Core)、CORT (Conductor On-Round-Tube) 和 CCE (Current Carrying Element) 等。CORC 导体结构通过在铜棒中心螺旋交替缠绕多根 REBCO 带材，完整的电缆可以包含几十层上百根的超导带，并在外侧包裹绝缘材料制成。这种导体结构具有较小的弯曲半径和较低的交流损耗，能够承受较大的压缩应变，非常适合需要高机械强度和低损耗的应用。然而，在载流量增加时，其紧凑性可能会降低。^[10]

图表 41. CORC 电缆和 CORC-CICC 导体



资料来源：吴俊峰《高温超导电缆的电磁和力学行为研究》，中银证券

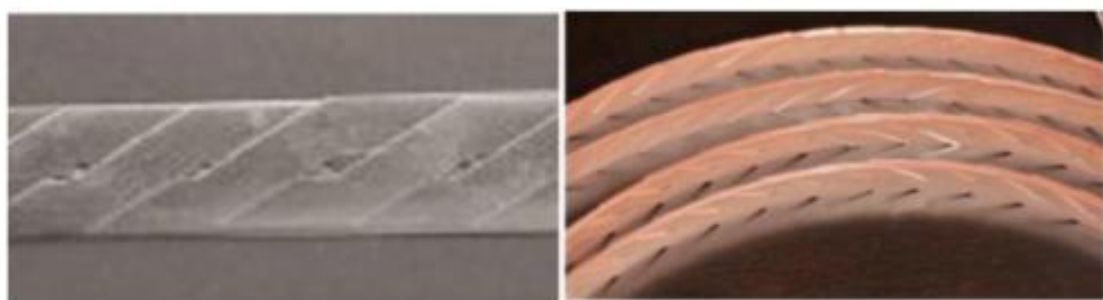
图表 42. CORT 电缆



资料来源：刘洋《典型高温超导导线带材及其电缆结构的力电行为研究》，中银证券

编织带材方式主要为 RACC (Roebel Assembled Coated Conductor) 电缆。RACC 导体结构是通过气动冲切或激光切割将超导带材裁剪成“梯形”形状，再交错编织而成。为了确保电流的均匀分布并增强导体的机械性能，这种结构还可以使用导电环氧树脂进行包覆。RACC 导体具有较低的交流损耗和较高的载流能力，适用于要求高性能和高稳定性的应用。然而，其制造工艺复杂且成本较高，并且在垂直于导体带面的磁场下，其临界电流会受到较大的影响。^[10]

图表 43. RACC 导体结构



资料来源：刘洋《典型高温超导导线带材及其电缆结构的力电行为研究》，中银证券

不同布局结构的高温超导电缆都有着各自的优势。例如，CORC 电缆具有柔性高、绕缆难度低的优势；RACC 电缆则具有交流损耗低的特点；TSTC 电缆则具有高电流密度等优势。实验研究已经论证了，堆叠型复合导体以及螺旋型导体均具有高机械强度、高稳定性和可接受的失超特性。^[9]在 CICC 导体的设计中，需要充分考虑材料、结构、力学特性、交流响应、低温性能、稳定性、失超保护等因素。

国际上多个研究机构同步开展了基于 REBCO 超导带材的 CICC 导体研制，比较具有代表性的有美国麻省理工学院(MIT)、美国联邦聚变系统公司(CFS)、美国先进导体有限公司(ACT)、能源和可持续发展署(ENEA)、中国科学院等离子体物理研究所等。

图表 44. 全球部分超导导体研究机构及其产品类型

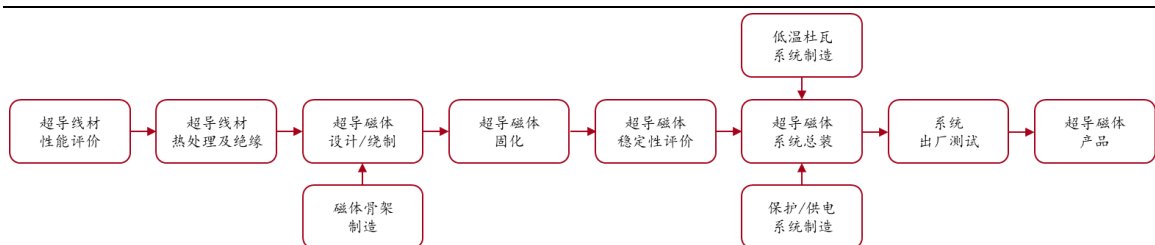
单位名称	国别	导体类型
麻省理工学院 (MIT)	美国	TSTC
联邦聚变系统公司 (CFS)	美国	VIPER
先进导体有限公司 (ACT)	美国	CORC
休斯顿大学	美国	STAR
卡尔斯鲁厄理工学院	德国	CroCo
ENEA 研究所	意大利	SECAS
中国科学院等离子体物理研究所	中国	CORC
上海交通大学	中国	CORC
华北电力大学	中国	QI-S

资料来源：杨晓君等《上海高温超导磁体相关技术发展现状与对策建议》，中银证券

高温超导磁体生产工艺复杂，技术壁垒较高：

- **高温超导带材质地较脆，受应力应变影响大，绕制技术存在较大挑战。**由于高温超导材料超导层为氧化物陶瓷质地，其拉伸和弯曲等机械特性比传统低温超导带材差，且高温超导带材为层状结构，不仅受轴向张应力，还受横向张应力，因此在带材受到应力应变时，临界电流衰减速度更快。高温超导磁体可应用于高场强，需要面对大电流、强磁场、高应力、极低温等考验，这便给高温超导磁体的绕制带来挑战；
- **高温超导磁体接头需做到低电阻，高接头电阻将加大磁体失超风险。**高温超导带材由于工艺限制，制造长度较短，在磁体绕制时，需进行带材焊接，焊接接头需做到低电阻，如果电阻过高，通电产生的焦耳热容易使线圈失超，同时也会增大制冷负荷；
- **高温超导磁体失超传播速度慢，失超检测难度较大。**由于高温超导材料失超传播速度较慢，电压上升速度较慢，缓慢的失超传播速度可能导致检测信号和失超保护动作滞后，从而引起局部热量积累，如果仅靠电压检测装置对磁体进行监测，将无法在磁体严重发热前监测到磁体的失超临界电压，到监测到电压时，超导带材已烧坏，因而需要光纤或声波技术来检测失超，失超检测技术存在挑战。

图表 45. 超导磁体生产流程图



资料来源：西部超导招股说明书，中银证券

图表 46. 高温超导磁体相关企业

公司	成立年份	总部地址	公司介绍
Canyon Magnet Energy	2023 年	美国纽约	CME 是一家专注于高温超导磁体开发与制造的公司。公司目标是通过高温超导技术的创新，推动清洁能源、医疗设备和交通等领域的磁体应用，为全球能源危机提供解决方案。
Commonwealth Fusion System	2017 年	美国麻州	CFS 是一家从 MIT 等离子体科学与聚变中心（Plasma Science and Fusion Center, PSFC）分拆出来的聚变能源公司，致力于利用高温超导磁体技术加速商业聚变能源的实现。
Cryomagnetics,INC.	1983 年	美国田纳西州	CMI 是一家成立于 1983 年的美国公司，专注于超导磁体、低温恒温器、低温测量系统、低温电源及磁体控制系统的设计与制造，产品广泛应用于高能物理、医疗成像（MRI/NMR）、量子计算、低温研究及其他科研与工业领域。
Energy to Power (E2P) Solutions	1999 年	美国佛罗里达州	E2P 是由 Christopher M. Rey 博士于 1999 年创立，在高温超导和低温超导高场磁体系统、低温技术、真空系统、电子系统、计算机科学、机电一体化以及组件设计和制造领域拥有超过 50 年的综合经验。产品包括完全定制的高温超导磁体，电流引线，低温电压套管和低温电连接器，用于公共和私营部门研究客户的大电流承载能力超导电缆。
General Atomics	1955 年	美国加州圣地亚哥	通用原子公司是一家国防高科技企业，1955 年作为通用动力的分支成立，1986 年被 Blue 家族收购。在聚变领域，该公司现为美国能源部聚变研究的核心合作方，运营着全球知名的 DIII-D 托卡马克装置；参与 ITER 项目，制造中央螺线管模块；建造全球 24 国 60 余座 TRIGA 研究堆等。
HTS-110	2004 年	新西兰	HTS-110 起源于新西兰皇家研究院（Industrial Research Limited, IRL）及其前身科学与工业研究部（DSIR），最初作为政府科研机构的分支，专注于超导技术研发，历经多次战略转型最终发展为专注于高温超导磁体设计与工程解决方案的独立企业。
TE Magnetics	2024 年	英国牛津	TE Magnetics 是英国核聚变能源公司 Tokamak Energy 于 2024 年 9 月正式成立的高温超导（HTS）磁体业务子公司。该公司脱胎于 Tokamak Energy 十余年的核聚变核心技术研发，专注于将聚变衍生技术商业化，目标成为全球 HTS 磁体领域的设计与供应领导者。
翌曦科技	2022 年	中国上海	由上海交大高温超导团队与国内外顶尖名校及国家实验室人才组建的高温超导磁体公司，专注于超导磁体技术突破与行业应用拓展。目前，翌曦已加入中核集团的聚变创新联合体。
联创超导	2019 年	中国江西南昌	国内首家深耕高温超导电工装备研制及生产的企业，是国际上为数不多的高温超导应用技术综合性解决方案提供商，面向市场提供基于高温超导磁体技术的系列高端电工装备，已形成“3+N”产品矩阵，主要产品包括高温超导感应加热装置、高温超导磁控硅单晶生长装置、高温超导可控核聚变装置及定制化高温超导设备。
曦合超导	2022 年	中国安徽合肥	2022 年 6 月成立，为合肥综合性国家科学中心能源研究院（安徽省能源实验室）技术孵化公司，已为全球 60+用户提供超导磁体产品，并实现多台海外销售。

资料来源：核聚变商业化微信公众号，各公司官网，中银证券整理

核聚变商业化或将带来巨大机遇，超导磁体未来应用前景广阔

除了可控核聚变以外，超导磁体应用领域众多。超导磁体行业产业链上游主要为超导原材料，低温超导原材料主要为钛矿、铌矿和锡矿，高温超导原材料主要为钇钡矿、镁矿等；中游主要为超导线材和超导磁体的厂商；下游主要为众多的应用领域，主要包括核磁共振仪、粒子加速器、核聚变、磁悬浮列车、感应加热设备、磁控单晶炉等等。

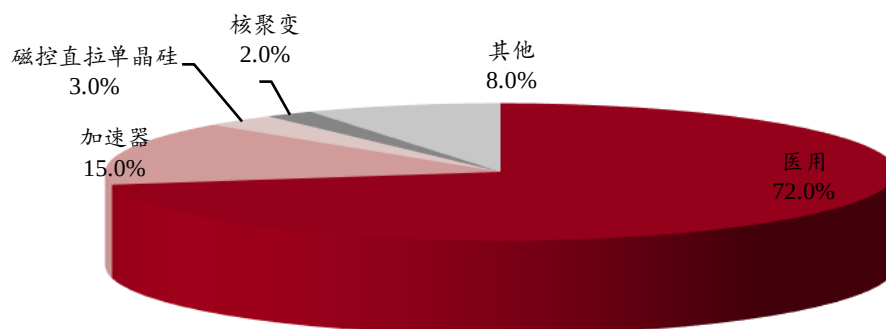
图表 47. 超导磁体产业链



资料来源：西部超导招股说明书，上海超导招股说明书，联创光电公告，各公司官网，中银证券

下游最主要的应用来自医用设备。根据吴堃峰《高场超导磁体无骨架线圈设计及其低温机械性能研究》中的数据显示，2020 年我国超导磁体主要的应用领域在医用（占比 72%），其次是加速器（占比 15%）。

图表 48. 2020 年中国超导磁体行业细分产品占比

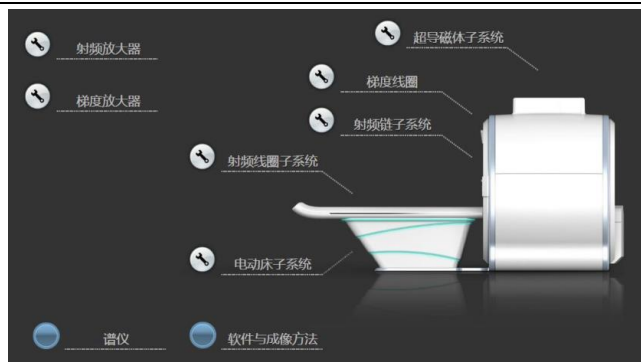


资料来源：吴堃峰《高场超导磁体无骨架线圈设计及其低温机械性能研究》，中银证券

核磁共振仪：超导磁体为 MRI 系统核心部件，国内人均保有量仍有较大提升空间

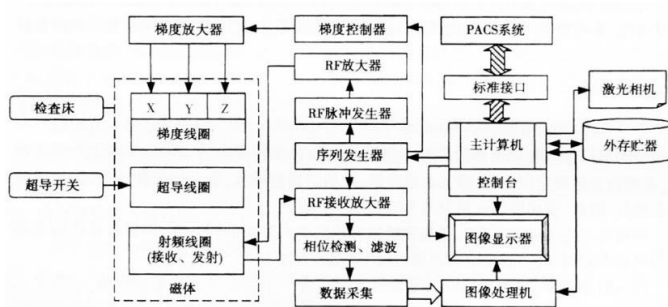
超导磁体为 MRI 系统中工艺最为精密、成本最高的核心部件。磁共振成像技术(Magnetic Resonance Imaging, 简称 MRI)是一种先进的人体无损成像技术，广泛应用于人体各个部位疾病的诊断，由于 MRI 没有辐射影响，具有更高的软组织分辨率，在临床运用中尤其适用于脑组织成像，在帕金森氏症、阿尔茨海默氏症、癌症等疾病的诊断方面可发挥重要作用。根据辰光医疗的招股说明书，MRI 设备主要有五大部分组成，即主磁体、梯度系统、射频系统、谱仪系统和计算机及其他辅助设备，其中主磁体、梯度系统、射频系统为 MRI 设备的核心硬件，覆盖 MRI 设备成本达 90%以上。主磁体是设备的核心组成部分，提供强大静磁场，保持均匀的磁场强度。一般可分永磁体、常导磁体和超导磁体。永磁体和常导磁体的磁场强度较低，一般在 0.5T 及以下，且在能源消耗、重量、体积、稳定性和操控性等方面具有难以克服的缺陷。超导磁体通过低温超导原理产生高强磁场，在各方面性能均具有明显优势。

图表 49. MRI 设备系统组成



资料来源：辰光医疗招股说明书，中银证券

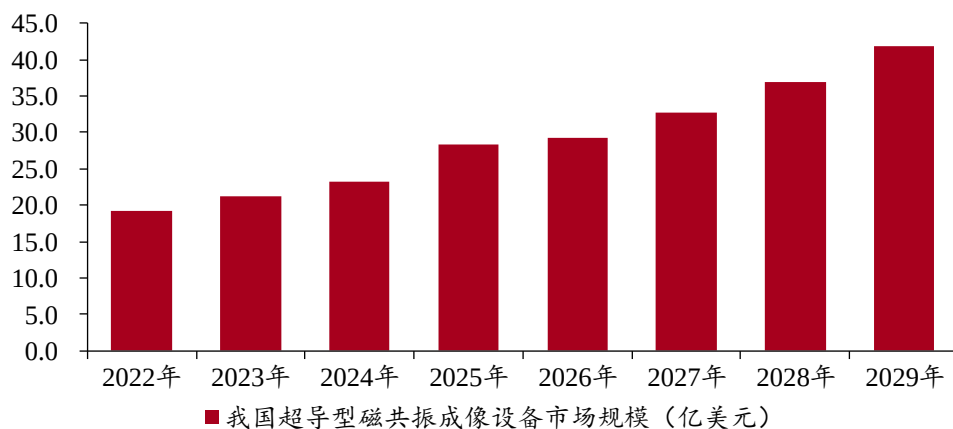
图表 50. MRI 系统的体系结构图



资料来源：辰光医疗招股说明书，中银证券

我国人均 MRI 保有量相比发达国家仍有较大差距，国内市场空间较大。据华经产业研究院数据，当前我国 MRI 设备缺口较大，2022 年我国 MRI 设备人均保有量仅为每百万人 9.38 台，远低于日本每百万人 57.4 台及美国、希腊、韩国等国家每百万人 30 台以上的水平。随着 MRI 等高端医疗设备国产化的加速推进，将带动超导磁体的需求。根据智研瞻产业研究的数据，2022 年我国超导型磁共振成像设备市场规模为 19.21 亿美元，预计到 2029 年将达到 41.94 亿美元，年均复合增长率 11.80%。

图表 51. 我国超导型磁共振成像设备市场规模

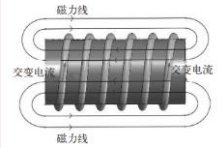
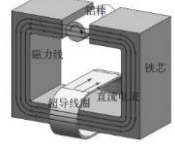


资料来源：智研瞻产业研究院微信公众号，中银证券

超导感应加热设备：具备节能降耗、加热均匀等优点，开始进入放量阶段

超导感应加热具备节能降耗、加热均匀、升温迅速、温控精准等优点。超导感应加热技术利用超导材料在临界低温下呈现零电阻的特性，建立直流磁场约 0.5-1T，铰料在直流磁场中通过驱动电机带动旋转，切割磁力线，产生感应电流，加热铰料。加热的基本原理与传统感应加热相同，都是法拉第电磁感应定律、涡流效应与焦耳定律。与传统的交流感应加热相比，高温超导感应加热凭借零电阻、强磁场、极低频的特性，在节能降耗、加热效率、加热均匀性、温度可控性等方面表现优异，适用于生产高性能材料，同时降低了加热成本，根据联创光电的公告显示，一台 MW 级高温超导感应加热炉比一台相同处理能力的工频炉，一年课节约可达 600 万度电。

图表 52. 传统交流感应加热与超导直流感应加热的性能对比

性能参数	传统交流感应加热	超导直流感应加热
示意图		
加热频率 (Hz)	>50	4-12(240-720rpm)
电流穿透深度 (mm)	15	50
加热效率 (%)	40-45	80-85
能耗 (kWh/t)	280 (含冷却)	140
芯表温差 (°C)	±20	±5
无功补偿	需要	不需要
电力谐波污染	严重	无

资料来源：黄建民等《高温超导感应加热技术及其应用浅谈》，中银证券

高温超导感应加热设备进入放量阶段，下游市场潜力大。高温超导感应加热设备可广泛用于铝、铜、镁、钛、特种钢材、高温合金等非磁金属加工热成型领域（包括挤压、锻造、轧制等）以及金属熔炼及半导体熔融等领域。根据联创光电的公告，随着 2023 年世界首台兆瓦级高温超导感应加热设备投产，高温超导感应加热商用设备进入规模化放量阶段，在大型铝挤压设备、军工和航空航天领域的金属挤压设备领域具有近千亿的市场空间。此外，高温超导感应加热设备可大规模用于金融熔炼加工，金属熔炼市场是比金属挤压锻造加工市场更大的一个市场，估计总产值在万亿元以上，其中可使用高温超导感应加热设备进行熔炼工作的预估在五千亿元以上，是高温超导感应加热设备的未来发展的一个极其重要的方向。

图表 53. 超导感应加热装备市场空间情况

未来市场	市场容量
大型铝挤压设备：全球范围现有直径 300mm 以上的铝型材挤压机的预热炉的替换及新增	约 4290 台，合 500 亿规模
军工和航空航天领域金属挤压设备：航空铝合金、镁铝合金、钛合金等其他金属压延成型行业	约 570 台，合 180 亿规模

资料来源：联创光电公告，中银证券

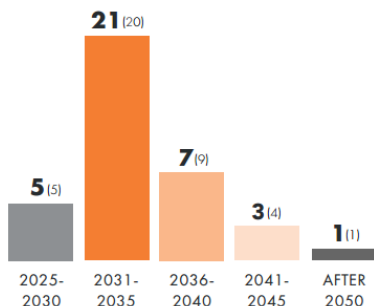
可控核聚变：商业化进程加速，或将带来庞大的超导磁体需求

超 70%核聚变公司预期 2035 年前实现并网发电，核聚变商业化可期。根据 FIA 最新的《The global fusion industry in 2024》报告显示，在参与调查的 37 家商业核聚变公司中，有 26 家认为在 2035 年前第一台核聚变机组将实现并网供电；而在报告中的另一项调查显示，在参与调查的 35 家公司中，有 19 家认为在 2035 年之前第一台核聚变机组将满足商业化运行的低成本/高效率的条件。

图表 54. 超 70%聚变公司预期 2035 年前实现并网发电

When will the first fusion plant deliver electricity to the grid? (37 responses)

*Last year's response in brackets

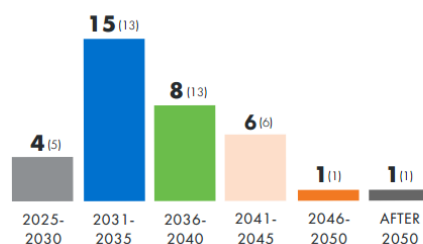


资料来源：FIA 《The global fusion industry in 2024》，中银证券

图表 55. 超半数公司预期 2035 年前满足聚变商业化条件

When will the first fusion plant demonstrate a low enough cost/high enough efficiency (Q) to be considered commercially viable? (35 responses)

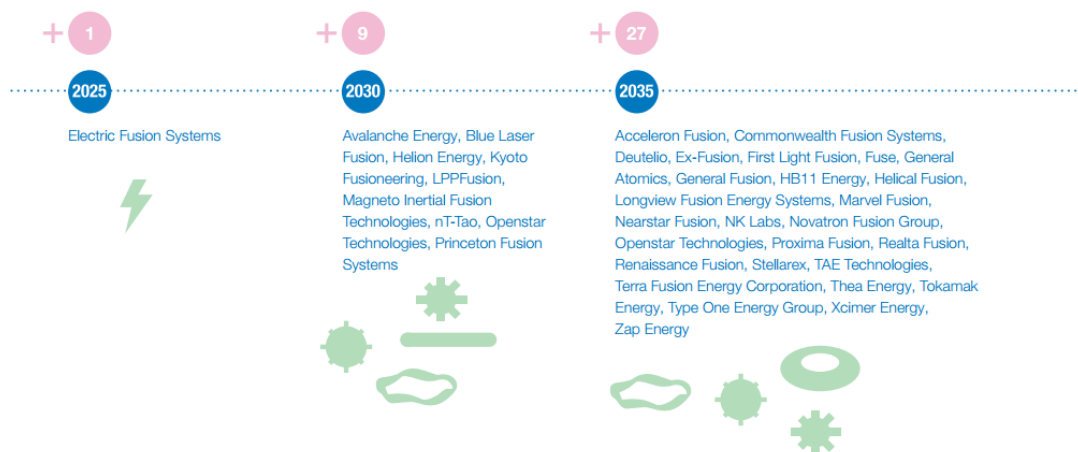
*Last year's response in brackets



资料来源：FIA 《The global fusion industry in 2024》，中银证券

核聚变或将带来庞大的超导磁体市场机遇。按照 IAEA 在《World Fusion Outlook 2024》中的统计，按照目前已经规划了的聚变项目的进度来看，预计在 2025 到 2030 年间有 10 个聚变项目建成，若保守的按照单个项目 30 亿美元的设备投资额进行粗略估算，其中磁体占比 30%，则未来五年预计有约 100 亿美元的超导磁体的潜在市场；在 2030 年至 2035 年预计会有 27 个项目建成，带来约 240 亿美元的超导磁体潜在市场。若核聚变完全商业化，根据 Ignition Research 的预计，到 2050 年可控核聚变行业将成为一个至少 1 万亿美元的市场，对应超导磁体空间超千亿美元。

图表 56. 2025-2035 年预计完成的核聚变项目



资料来源：IAEA 《World fusion outlook 2024》，中银证券

相关上市公司

西部超导：全球唯一的低温超导 NbTi 锭棒、线材、磁体的全流程生产企业

背靠西北有色金属研究院，西部超导的成立与 ITER 项目密切相关。西部超导材料科技股份有限公司成立于 2003 年，总部位于陕西省西安市，控股股东为西北有色金属研究院，其下属超导材料研究所是国家 863 项目、973 项目的主要研究单位，也是我国实用超导材料研究与开发的重要单位，该研究院早在 20 世纪 60 年代就开始从事超导材料的研究，具备深厚的技术积累。成立初期，公司主要专注于超导材料的研发与生产，填补了国内空白，为 ITER 项目提供了关键的超导材料，成为中国参与 ITER 项目的重要支撑力量。随着技术积累和市场拓展，西部超导逐步将业务从单一的超导线材扩展到高端钛合金材料和高性能高温合金材料领域。目前是中国领先的高端钛合金材料、超导材料和高性能高温合金材料研发、生产和销售企业。公司于 2019 年 7 月 22 日在上海证券交易所科创板上市。

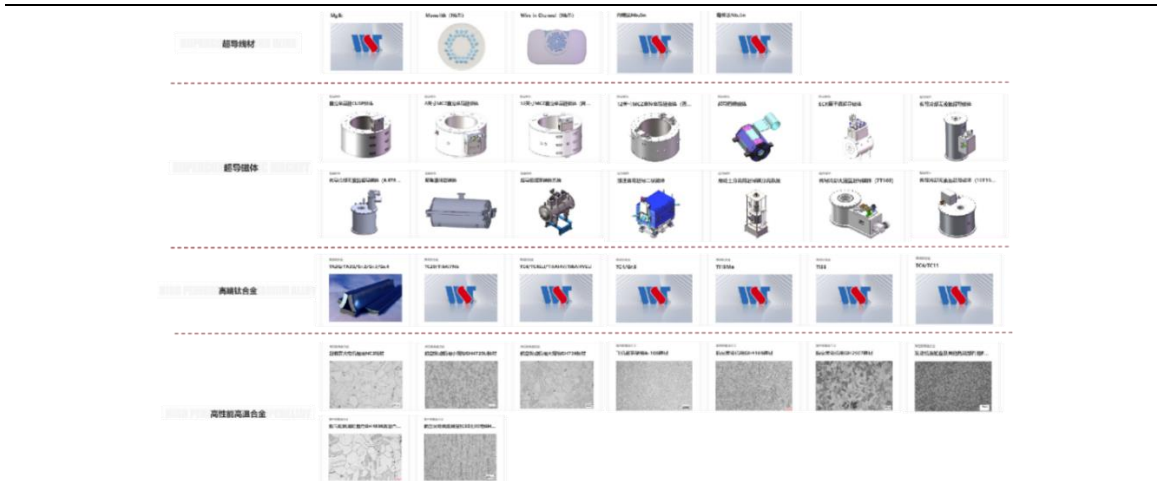
图表 57. 西部超导的发展历程



资料来源：西部超导官网，西部超导招股说明书，中银证券

国内超导材料及高端合金领域领军企业，技术实力全球领先。公司主要的产品包括超导材料、高端钛合金材料和高性能高温合金材料三类，广泛应用于航空航天、医疗、能源、半导体及科研等高端制造领域。超导产品方面，主要包括NbTi 锭棒、NbTi 超导线材、Nb₃Sn 超导线材、MgB₂ 线材和超导磁体等；高端钛合金材料，主要包括棒材、丝材等，公司产品已广泛应用于商用飞机、军用战机、航空发动机等关键装备，突破多项高温钛合金和钛铝合金关键技术，填补国内空白；高性能高温合金材料，主要包括变形高温合金和高温合金母合金等，公司成功突破 GH4169、GH738 等高温合金的国产化应用。

图表 58. 西部超导的主要产品



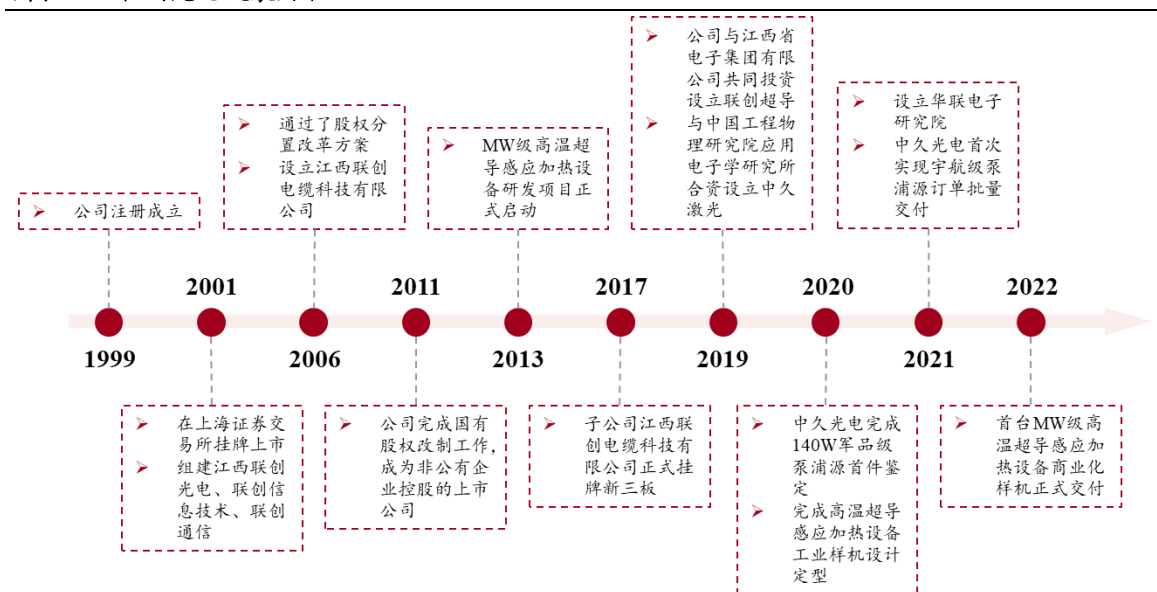
资料来源：西部超导官网，中银证券

超导材料领域，公司是目前国际上唯一的 NbTi 铸锭、棒材、超导线材生产及超导磁体制造全流程企业。低温超导材料方面，根据公司 24 年年报，公司已经掌握了低温超导线材导体设计、高均匀合金熔炼、大变形塑性加工、磁通钉扎调控、热处理等全套核心技术。公司已成功取得 GE、SIEMENS、飞利浦、上海联影、宁波健信、上海辰光等国内外主要 MRI 设备生产商的 NbTi 超导线材批量供货订单，是世界上能够批量生产并销售超导用 NbTi 锭棒的两家公司之一，代表我国完成了 ITER 项目的超导线材交付任务，实现了 MRI 超导线材的批量生产。高温超导材料方面，公司侧重 MgB₂ 和 Bi-2223 的研发和产业化，目前已掌握其核心制备技术，未来将突破并引领在智能电网中输电电缆、无液氮磁体装备等领域的运用，并已经开始为我国研发的世界首台 10MJ/5MW 高温超导储能装置提供 MgB₂ 线材。

联创光电：深耕光电领域，子公司拥有领先的高温超导磁体技术

背靠江西省电子集团，光电子器件领域具备深厚的技术积累。江西联创光电科技股份有限公司成立于 1999 年 6 月，由江西省电子工业局整合旗下部分优质资产成立，并于 2001 年 3 月在上交所挂牌上市。公司成立之初为国有控股，控股公司为江西省电子集团，2011 年完成非国有制股份制改制后转为民营企业。公司始终坚持以科技创新推动产业升级，走出高端装备、自主产权的高质量发展道路，目前产品布局包括大功率激光器件及装备、高温超导磁体及应用、智能控制部件、背光源及应用、电线电缆等产业板块，这些产品不仅覆盖了民用市场，还深入到军工领域，体现了联创光电在光电子领域的深厚技术积累和产业布局。

图表 59. 联创光电发展历程



资料来源：联创光电官网，联创超导官网，中银证券

提出“进而有为，退而有序”战略，积极布局激光和超导两大前沿科技产业。设立之初，公司以背光源产品、LED 器件、电线电缆产品等为主营业务。近年来，公司提出并实施“进而有为、退而有序”的战略，不断调整业务结构，通过清理、整顿等方式逐步收缩特微、电缆、背光源等发展空间较小的产业，集中精力向高科技、高壁垒、高利润的行业转移，重点发力激光和高温超导两大新兴业务。目前来看，公司已形成以智能控制器、光耦、电缆、LED 等传统业务为基础，以激光器、高温超导作为“进而有为”的两大增长动力的战略布局。

图表 60. 联创光电主要业务和产品



资料来源：联创光电官网，联创超导官网，中银证券

联创超导拥有领先的高温超导磁体技术，是国际上为数不多的高温超导应用技术综合性解决方案供应商。公司超导业务依托的是参股子公司江西联创光电超导应用有限公司，成立于 2019 年，截至 2024 年底公司持股 40%。联创超导是国内领先能够制造 15T 以上高场磁体的企业之一，已将磁体技术在光伏 N 型晶硅炉和工业金属热处理领域实现商业化应用，公司科学家团队是国内对饼式结构、螺管结构、无感结构、跑道结构、D 型结构等现有系列化磁体结构均有实际应用，突破系列化高温超导磁体技术并且全面应用于超导能源领域的团队，具有技术领先性。

在可控核聚变应用领域，联创超导先后完成了 REBCO 集束缆线及基于集束缆线的高温超导 D 型磁体的设计。2023 年 8 月，联创超导完成了百米级大电流高温超导集束缆线的研制。2024 年 4 月，成功完成了基于集束缆线的 D 型高温超导磁体制备和低温测试，该磁体采用新型高温超导材料 REBCO，并创新性地采取高温超导集束缆线的制备方式，磁体线圈高度超过 1m，在液氮温区下实现了稳态运行电流超过 1.5kA。这是国内首个基于高温超导集束缆线的 D 型超导线圈，为紧凑型核聚变堆用大口径高场超导磁体的自主研发提供了有力支撑。

图表 61. 联创光电高温超导应用



资料来源：联创超导官网，中银证券

上海超导：我国高温超导材料的技术引领者

上海超导是全球领先的高温超导材料生产商之一，国内市占率遥遥领先。上海超导科技股份有限公司成立于 2011 年，自成立以来就一直专注于高温超导材料的研发、生产和销售。2013 年，公司自主建成国内首条公里级二代高温超导带材生产线。到目前为止，公司是国际上唯二已经实现批量年产千公里级以上（12mm 宽）第二代高温超导带材的生产商之一，2024 年产量超过 1000 公里。根据上海市新材料协会 2025 年 2 月出具的证明，公司第二代高温超导带材国内市场占有率超过 80%，2022-2024 年连续 3 年排名第一。2025 年 6 月 18 日，上交所官网显示，上海超导的科创板 IPO 申请正式获得受理。

图表 62. 上海超导大事记

年份	事件
2010 年	成功研制国内首条百米级第二代高温超导带材，奠定带材产业化的基础；
2011 年	上海超导科技股份有限公司成立；
2012 年	完成基于自主基带的超导带材制备工艺，并布局自主装备；
2013 年	自主建成国内首条公里级二代高温超导带材生产线；
2014 年	自主研发世界一流的低阻/无阻接头技术，使高温超导带材的产业化进程得以进一步加速；
2015 年	中标中国科学院电工研究所超导磁体用 YBCO 超导带材采购项目，是公司在国内的首个中标项目；
2016 年	先后获得德国 KIT、瑞士 PSI、英国 Tokamak Energy 等单位的采购合同，开始探索国际市场；
2017 年	再获英国 Tokamak Energy 订单，正式开始向国际核聚变应用批量供货；
2018 年	成为全国超导标准化技术委员会成员单位； 向中科院电工所团队提供高温超导带材，用于 32.35T 全超导磁体的端部线饼，该磁体打破了 32.0T 超导磁体的世界纪录
2019 年	国产基带完成第一个长带镀膜实验，基带国产化研究进程加快； 获得英国剑桥大学超导磁体订单，是上海超导在国际市场获得的首个磁体订单；
2020 年	开始向联创超导批量供应超导带材，用于国际上首台兆瓦级高温超导感应加装置，该装置于 2023 年成功投运；
2021 年	荣获上海市"专精特新"中小企业称号、工信部重点专精特新"小巨人"企业称号；
2022 年	完成股权重组，形成以上市公司、管理团队、国有资本及主流投资机构为股东主体的新的股权结构； 获得能量奇点大型采购订单、并于 2023 年完成供货，用于全超导托卡马克装置洪荒 70；
2023 年	完成整体搬迁，康桥一期厂房投入使用，并开启全面扩产计划； 成为上海市未来产业先进核能专家委员会委员单位
2024 年	荣获 2023 年度中国电工技术学会科技进步一等奖，电力科学技术奖一等奖；
2025 年	科创板 IPO 申请正式获得受理。

资料来源：上海超导官网，上海证券交易所官网，中银证券

公司主要产品为第二代高温超导带材。基于物理气相沉积法制备的 REBCO 带材具有全球领先的低温高场电性能，一流的自场电流密度、优异的磁体绕制性能、极低的交流损耗，可广泛应用于电力、交通、能源、医疗、高能物理等各个领域。根据不同参数规格与封装要求，公司产品长度可以达到数百米，宽度从 4-12 毫米，厚数十至数百微米。

图表 63. 上海超导的第二代高温超导带材产品



资料来源：上海超导官网，中银证券

公司已拥有稳定多元化的优质客户群体。根据公司招股说明书，公司与下游众多国内外知名企业或科研机构建立了良好的合作关系，客户覆盖了南方电网、中国科学院、联创超导、能量奇点、星环聚能、中车长客、CFS 公司、TE 公司等。

图表 64. 2024 年上海超导前五大客户情况

序号	客户名称	主要销售内容	金额(万元)	占营业收入比例(%)
1	中国科学院	第二代高温超导带材、超导线圈等	7,247.76	30.26
2	联创超导	第二代高温超导带材	5,795.66	24.20
3	能量奇点	第二代高温超导带材	3,536.74	14.77
4	VEIR 公司	第二代高温超导带材	1,818.26	7.59
5	南方电网	第二代高温超导带材	1,224.97	5.11
合计			19,623.39	81.93

资料来源：上海超导招股说明书，中银证券

高温超导材料市场供不应求，公司积极扩充产能。根据公司招股书的数据，2024 年全球年产高温超导材料 3,100km，市场需求量 3,400km，整体处于供不应求状态。根据公司官网，上海超导的一期扩产项目已于 2024 年底顺利完成，产能达到 2000km/年，二期扩产项目正在推进当中，建成后产能将达 4000km/年，后续的三期扩产项目已完成备案，建成后总产能将达到 20,000km/年。2025 年 6 月 29 日，规划投资 25 亿元的上海超导带材及总部基地正式开工建设。

图表 65. 上海超导的第二代高温超导带材生产及总部基地项目开工

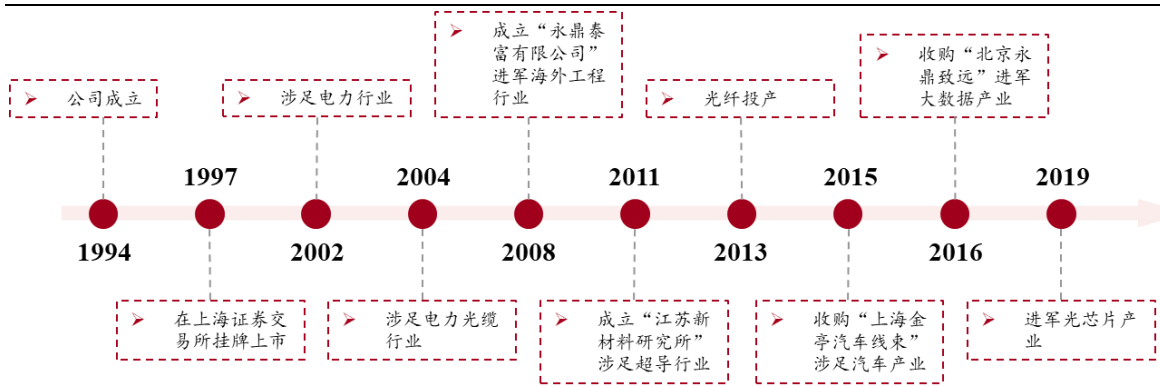


资料来源：张江发布微信公众号，中银证券

永鼎股份：深耕光电领域数十年，高温超导发展加速

深耕光电领域数十年，业务稳健发展。江苏永鼎股份有限公司创建于1994年，并在1997年于上海证券交易所上市，是中国光缆行业首家民营上市公司。历经多年的创新与发展，永鼎股份已从最初的单一通信线缆制造，发展成为如今涵盖光纤光缆、电线电缆、特种光电缆、光器件、通信器件及设备、通信大数据及工程服务、系统集成方案提供等通信全产业链覆盖的企业。

图表 66. 永鼎股份发展历程



资料来源：永鼎股份官网，中银证券

围绕光和电两大产业板块，产业链协同发展。经过多年发展，公司已形成了“光电交融，协同发展”的战略布局。光通信产业方面，立足“光棒、光纤、光缆”等网络基础通信产品，延伸光芯片、光器件、光模块等产品及大数据采集分析应用与信息服务，以细分行业的全产业链布局为核心竞争力，实现从芯到线到设备传输到数据收集的全产业链布局；电力传输产业方面，经过多年的统筹布局，形成了“海外电力工程—汽车线束—超导带材—电线电缆”协同发展的产业格局，并不断推动新能源、新材料的创新发展和转型升级。

图表 67. 永鼎股份产品布局



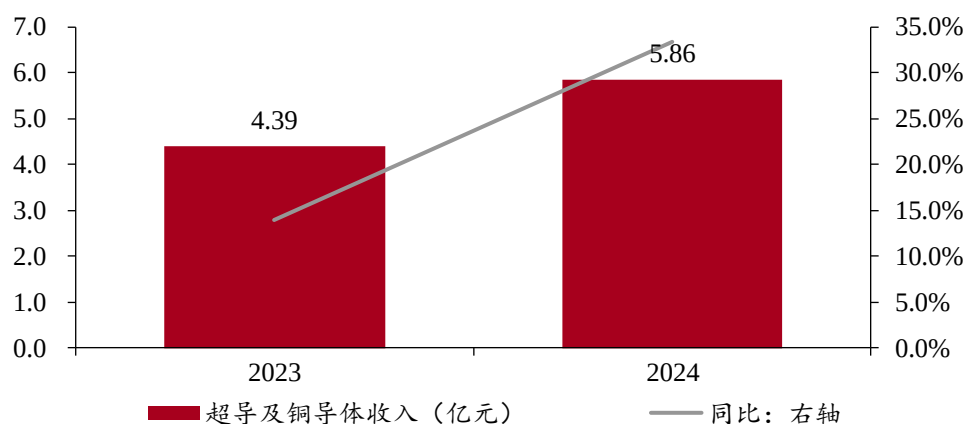
资料来源：永鼎股份公告，中银证券

子公司东部超导主营产品是第二代高温超导带材及超导应用产品。东部超导成立于2017年12月，地处吴江开发区，主要致力于超导材料、超导电缆、超导磁体、超导限流器、超导电机等技术的研发和产业化，现已形成以超导材料制备、超导应用研发、超导检测为核心的超导微生态产业链，全力打造超导产业化基地。公司在第二代高温超导带材上采用了国内独有的IBAD+MOCVD技术路线，研发出多种稀土替代和掺杂技术，所制备的超导材料磁通钉扎性能优异，在带材长度以及低温强磁场下性能方面达到了国内外领先水平。目前产品主要应用于超导感应加热、超导磁拉单晶、可控核聚变磁体、超导电力装备等领域，保持与中科院、江西联创光电、能量奇点、新奥能源、星环聚能、核工业西南物理研究院等客户密切合作关系。

公司超导产品处于起步期。根据公司年报显示，公司 2023 年超导及铜导体板块实现营业收入 4.39 亿元，同比增长 13.99%，其中超导板块营业收入 2,525 万元；2024 年超导及铜导体板块实现营业收入 5.86 亿元，同比增长 33.30%，超导板块营业收入并未单独披露。

由于公司的超导产品正处于起步期，后续随产能释放带来的规模效应与下游需求扩张，有望实现持续的业绩增长和盈利能力分析改善，为公司贡献新增长极。

图表 68. 永鼎股份超导及铜导体产品收入和增速情况



资料来源：永鼎股份公告，中银证券

投资建议

核聚变被视为人类理想的终极能源，其中托卡马克装置最具商业化潜力。核聚变是几个较轻的原子核结合成一个较重的原子核，实现将质量转化为能量的过程。核聚变因其燃料资源丰富、能量密度大、清洁无污染、安全性高等突出的优点，被视为人类理想的终极能源。目前，磁约束聚变能量约束时间长、技术成熟度高、工程可行性强，是实现聚变能开发的最有效途径，其中又以托卡马克装置最为成熟，是目前最为主流的可控核聚变装置，也是最有可能首先实现商业化的技术路线之一。根据 IAEA 的统计，截至 2024 年中，全球共有 159 个核聚变项目，其中托卡马克装置 79 个，占比接近 50%。

磁体是磁约束聚变装置的核心部件，超导助力商业化加速实现。在磁约束可控核聚变装置中，产生约束磁场的磁体系统扮演着核心角色，其磁场强度与均匀性对于整个装置的性能与效率均有着重要影响，以 ITER 项目为例，磁体系统是其最大成本项，成本占比达到 28.0%。早期的托卡马克装置采用的磁体材料为铜导体，铜导体的发热问题导致了磁约束核聚变无法长时间稳态运行，后续随着超导体的引入，尤其是高温超导的应用，由于超导体的零电阻效应，且承载电流密度更高有利于建造更加紧凑、更高场强的聚变装置，能够有效改善长脉冲稳态运行，大大提升聚变能源的转化效率与能源输出，同时让成本持续下降，显著加快了可控核聚变商业化落地的预期。

超导磁体的材料制备与绕制工艺是关键，高温超导磁体制备壁垒较高。低温超导材料发展较早，目前已经形成系统的商业化生产，而高温超导材料发展起步较晚，制备技术较为复杂，目前高温超导体正处于提升性能和突破应用的产业初期阶段，在这个过程中，高性能高温超导材料的批量化制备成为关键基础。而且将超导材料制作成磁体过程，需要完成超导材料的焊接、绕制等工艺流程，尤其是高温超导磁体的生产，工艺复杂，技术壁垒较高。

超导磁体应用前景广阔，有望充分受益于可控核聚变的商业化。若核聚变完全商业化，根据 Ignition Research 的预计，到 2050 年可控核聚变行业将成为一个至少 1 万亿美元的市场，对应超导磁体空间超千亿美元，潜在市场规模庞大。另外，除了可控核聚变以外，超导磁体还在 MRI、NMR、感应加热设备、晶硅生长炉等设备中有应用，随着超导磁体的应用逐步拓展，超导磁体的应用前景广阔。

随着技术的不断突破，可控核聚变商业化渐行渐近，产业链或将进入快速发展期，超导磁体作为磁约束可控核聚变装置的核心部件有望充分受益，建议关注具备超导磁体制造能力的相关上市公司，推荐**联创光电**、**西部超导**，建议关注**精达股份（上海超导）**、**永鼎股份**等。

风险提示

技术进展不及预期的风险：可控核聚变技术仍处于早期阶段，如果技术的研发和落地进度不及预期，可能会导致商业化进展后延；

技术路线更替的风险：可控核聚变技术路线多样，不同技术路线的可行性尚需时间验证，技术路线的多样性增加了投资的不确定性，若未来出现更高效、更经济的技术路线，将会导致现有投资的贬值；

资金投入不及预期的风险：作为一项尚处于早期的技术，仍需要长时间较大资金的投入支持，如果政府资金的配套或者相关公司融资能力不及预期，可能会对整个产业的发展带来影响；

行业政策不及预期的风险：目前可控核聚变处于商业化早起，行业的发展仍需要政策端的支持和推进，若政策落地力度不及预期，可能对行业进展造成影响；

相关项目推进不及预期的风险：目前相关可控核聚变项目仍处于启动或者刚开始建设的前期阶段，推进进度仍存在较大的不确定性。

参考文献

- [1]王志斌,沈炆,余羿,等.我国磁约束核聚变能源的发展路径、国际合作与未来展望[J].南方能源建设,2024,11(3):1-13.
- [2]王腾.超导磁体技术与磁约束核聚变[J].南方能源建设,2022,9(4):108-117.
- [3]吴北民.大型超导磁体复杂结构装配及运行过程中的多场力学问题研究[D].兰州大学,2021.
- [4]王淑丹.高温超导 YBCO 材料的失超多场演化机制及其耦合行为研究[D].兰州大学,2024.
- [5]马衍伟.实用化超导材料研究进展与展望[J].物理,2015,44(10):674-683.
- [6]肖霆锋.传导冷却型 Nb3Sn 超导螺线管线圈的研制[D].广州大学,2024.
- [7]田栋.Nb3Sn 复合超导线圈的热应力分析与断裂行为研究[D].长安大学,2023.
- [8]常佳鑫,张胜楠,刘吉星.超导成“材”之路——实用化高温超导材料的制备及发展[J].物理,2024,53(10):691-700.
- [9]杨晓君,赵跃,陈红光,等.上海高温超导磁体相关技术发展现状与对策建议[J].应用技术学报,2025,25(01):1-8.
- [10]杨士葛.堆叠型高温超导导体的性能退化研究[D].中国科学技术大学,2024.
- [11]熊芬芬.聚变堆高场 (>14T) 超导导体稳定性及失超特性研究[D].中国科学技术大学,2023.
- [12]滕玉平,戴少涛,魏周荣,等.ITER 装置超导磁体线圈导体用超导电缆的绞制[J].电工技术学报,2013,28(04):7-12.
- [13]刘洋.典型高温超导线带材及其电缆结构的力电行为研究[D].兰州大学,2024.

披露声明

本报告准确表述了证券分析师的个人观点。该证券分析师声明，本人未在公司内、外部机构兼任有损本人独立性与客观性的其他职务，没有担任本报告评论的上市公司的董事、监事或高级管理人员；也不拥有与该上市公司有关的任何财务权益；本报告评论的上市公司或其它第三方都没有或没有承诺向本人提供与本报告有关的任何补偿或其它利益。

中银国际证券股份有限公司同时声明，将通过公司网站披露本公司授权公众媒体及其他机构刊载或者转发证券研究报告有关情况。如有投资者于未经授权的公众媒体看到或从其他机构获得本研究报告的，请慎重使用所获得的研究报告，以防止被误导，中银国际证券股份有限公司不对其报告理解和使用承担任何责任。

评级体系说明

以报告发布日后公司股价/行业指数涨跌幅相对同期相关市场指数的涨跌幅的表现为基准：

公司投资评级：

买 入：预计该公司股价在未来 6-12 个月内超越基准指数 20%以上；
增 持：预计该公司股价在未来 6-12 个月内超越基准指数 10%-20%；
中 性：预计该公司股价在未来 6-12 个月内相对基准指数变动幅度在-10%-10%之间；
减 持：预计该公司股价在未来 6-12 个月内相对基准指数跌幅在 10%以上；
未有评级：因无法获取必要的资料或者其他原因，未能给出明确的投资评级。

行业投资评级：

强于大市：预计该行业指数在未来 6-12 个月内表现强于基准指数；
中 性：预计该行业指数在未来 6-12 个月内表现基本与基准指数持平；
弱于大市：预计该行业指数在未来 6-12 个月内表现弱于基准指数；
未有评级：因无法获取必要的资料或者其他原因，未能给出明确的投资评级。

沪深市场基准指数为沪深 300 指数；新三板市场基准指数为三板成指或三板做市指数；香港市场基准指数为恒生指数或恒生中国企业指数；美股市场基准指数为纳斯达克综合指数或标普 500 指数。

风险提示及免责声明

本报告由中银国际证券股份有限公司证券分析师撰写并向特定客户发布。

本报告发布的特定客户包括：1) 基金、保险、QFII、QDII 等能够充分理解证券研究报告，具备专业信息处理能力的中银国际证券股份有限公司的机构客户；2) 中银国际证券股份有限公司的证券投资顾问服务团队，其可参考使用本报告。中银国际证券股份有限公司的证券投资顾问服务团队可能以本报告为基础，整合形成证券投资顾问服务建议或产品，提供给接受其证券投资顾问服务的客户。

中银国际证券股份有限公司不得以任何方式或渠道向除上述特定客户外的公司个人客户提供本报告。中银国际证券股份有限公司的个人客户从任何外部渠道获得本报告的，亦不应直接依据所获得的研究报告作出投资决策；需充分咨询证券投资顾问意见，独立作出投资决策。中银国际证券股份有限公司不承担任何由此产生的任何责任及损失等。

本报告期内含保密信息，仅供收件人使用。阁下作为收件人，不得出于任何目的直接或间接复制、派发或转发此报告全部或部分内容予任何其他人，或将此报告全部或部分内容发表。如发现本研究报告被私自刊载或转发的，中银国际证券股份有限公司将及时采取维权措施，追究有关媒体或者机构的责任。所有本报告期内使用的商标、服务标记及标记均为中银国际证券股份有限公司或其附属及关联公司（统称“中银国际集团”）的商标、服务标记、注册商标或注册服务标记。

本报告及其所载的任何信息、材料或内容只提供给阁下作参考之用，并未考虑到任何特别的投资目的、财务状况或特殊需要，不能成为或被视为出售或购买或认购证券或其它金融票据的要约或邀请，亦不构成任何合约或承诺的基础。中银国际证券股份有限公司不能确保本报告中提及的投资产品适合任何特定投资者。本报告的内容不构成对任何人的投资建议，阁下不会因为收到本报告而成为中银国际集团的客户。阁下收到或阅读本报告须在承诺购买任何报告中所指之投资产品之前，就该投资产品的适合性，包括阁下的特殊投资目的、财务状况及其特别需要寻求阁下相关投资顾问的意见。

尽管本报告所载资料的来源及观点都是中银国际证券股份有限公司及其证券分析师从相信可靠的来源取得或达到，但撰写本报告的证券分析师或中银国际集团的任何成员及其董事、高管、员工或其他任何个人（包括其关联方）都不能保证它们的准确性或完整性。除非法律或规则规定必须承担的责任外，中银国际集团任何成员不对使用本报告的材料而引致的损失负任何责任。本报告对其中所包含的或讨论的信息或意见的准确性、完整性或公平性不作任何明示或暗示的声明或保证。阁下不应单纯依靠本报告而取代个人的独立判断。本报告仅反映证券分析师在撰写本报告时的设想、见解及分析方法。中银国际集团成员可发布其它与本报告所载资料不一致及有不同结论的报告，亦有可能采取与本报告观点不同的投资策略。为免生疑问，本报告所载的观点并不代表中银国际集团成员的立场。

本报告可能附载其它网站的地址或超级链接。对于本报告可能涉及到中银国际集团本身网站以外的资料，中银国际集团未有参阅有关网站，也不对它们的内容负责。提供这些地址或超级链接（包括连接到中银国际集团网站的地址及超级链接）的目的，纯粹为了阁下的方便及参考，连结网站的内容不构成本报告的任何部份。阁下须承担浏览这些网站的风险。

本报告所载的资料、意见及推测仅基于现状，不构成任何保证，可随时更改，毋须提前通知。本报告不构成投资、法律、会计或税务建议或保证任何投资或策略适用于阁下个别情况。本报告不能作为阁下私人投资的建议。

过往的表现不能被视作将来表现的指示或保证，也不能代表或对将来表现做出任何明示或暗示的保障。本报告所载的资料、意见及预测只是反映证券分析师在本报告所载日期的判断，可随时更改。本报告中涉及证券或金融工具的价格、价值及收入可能出现上升或下跌。

部分投资可能不会轻易变现，可能在出售或变现投资时存在难度。同样，阁下获得有关投资的价值或风险的可靠信息也存在困难。本报告中包含或涉及的投资及服务可能未必适合阁下。如上所述，阁下须在做出任何投资决策之前，包括买卖本报告涉及的任何证券，寻求阁下相关投资顾问的意见。

中银国际证券股份有限公司及其附属及关联公司版权所有。保留一切权利。

中银国际证券股份有限公司

中国上海浦东
银城中路 200 号
中银大厦 39 楼
邮编 200121
电话: (8621) 6860 4866
传真: (8621) 5888 3554

相关关联机构:

中银国际研究有限公司

香港花园道一号
中银大厦二十楼
电话: (852) 3988 6333
致电香港免费电话:
中国网通 10 省市客户请拨打: 10800 8521065
中国电信 21 省市客户请拨打: 10800 1521065
新加坡客户请拨打: 800 852 3392
传真: (852) 2147 9513

中银国际证券有限公司

香港花园道一号
中银大厦二十楼
电话: (852) 3988 6333
传真: (852) 2147 9513

中银国际控股有限公司北京代表处

中国北京市西城区
西单北大街 110 号 8 层
邮编: 100032
电话: (8610) 8326 2000
传真: (8610) 8326 2291

中银国际(英国)有限公司

2/F, 1 Lothbury
London EC2R 7DB
United Kingdom
电话: (4420) 3651 8888
传真: (4420) 3651 8877

中银国际(美国)有限公司

美国纽约市美国大道 1045 号
7 Bryant Park 15 楼
NY 10018
电话: (1) 212 259 0888
传真: (1) 212 259 0889

中银国际(新加坡)有限公司

注册编号 199303046Z
新加坡百得利路四号
中国银行大厦四楼(049908)
电话: (65) 6692 6829 / 6534 5587
传真: (65) 6534 3996 / 6532 3371