



SODIUM-ION

电池

一项技术简介

除非另有说明，本出版物中的资料可自由使用、共享、复制、再制作、印刷和/或存储，但需注明IRENA为资料来源和版权所有。本出版物中归第三方所有的资料可能受不同的使用条款和限制约束，并在使用此类资料前需要获得这些第三方的适当许可。

引用

IRENA (2025), 国际可再生能源机构, 阿布扎比. 钠离子电池：一项技术简介

978-92-9260-697-8

可供下载：www.irena.org/publications . 如需更多信息或提供反馈，请联系IRENA info@irena.org .

关于IRENA

国际可再生能源署（IRENA）是一个政府间组织，支持各国向可持续能源未来过渡，并作为国际合作的主要平台、卓越中心以及可再生能源政策、技术、资源和金融知识的宝库。IRENA促进各种形式的可再生能源的广泛采用和可持续利用，包括生物能源、地热能、水电、海洋能、太阳能和风能，以实现可持续发展、能源获取、能源安全和低碳经济增长与繁荣。www.irena.org

关于中电普瑞

中国电力科学研究院（CEPRI）是中国电力行业的多学科综合性研究机构，同时也是国家电网公司（SGCC）的下属研究机构。CEPRI活跃于与电力科学和业务相关的广泛研究领域，包括发电、输电和配电，供电和利用，电力项目设计、建设、调试、运行、监控和维护，以及可再生能源、新材料、能量转换、信息和通信技术等。



致谢

该报告由卡洛斯·鲁伊斯（前IRENA）、安克特琳·利普嫩（IRENA）、于冉、夏立兴和张力明（CEPRI）撰写。

valuable input was also provided by IRENA and CEPRI colleagues: Francisco Boshell (ex-IRENA), Luis Janeiro (ex-IRENA), Jinlei Feng, Zafar Samadov (IRENA), Isaac Elizondo García (ex-IRENA) and Bin Zheng (CEPRI).

该草案也受益于外部专家的输入和评论，包括 Rory McNulty 和 Catherine Peake（基准矿业情报）、Yonhuang Ye 和 Xinxin Zhang（宁德时代）以及 Maximilian Fichtner（卡尔斯鲁厄理工学院）。

国际能源署对中国电力科学研究院（CEPRI）为准备本报告提供支持表示衷心感谢。

编辑和制作由弗朗西斯·菲尔德管理，得到了斯蒂芬妮·克拉克的支持。该报告由贾斯汀·弗朗什-布鲁斯进行校对编辑，设计由米格尔·安赫尔·拉莫斯（萨本尼托）负责。

免责声明

本出版物及其中包含的材料均按“原样”提供。国际 Renewable 能源机构已采取一切合理措施核实本出版物中材料的可靠性。然而，国际 Renewable 能源机构及其任何官员、代理人、数据或其他第三方内容提供者均不提供任何形式的保证，无论是明示的还是暗示的，并且他们不承担或对使用本出版物或其中包含的材料所产生任何后果的责任或义务。

此处所含信息不一定代表IRENA全体成员的观点。提及特定公司或某些项目或产品并不表示IRENA优先认可或推荐它们，而非提及的其他类似性质的公司或项目或产品。此处采用的设计称谓和所呈现的材料内容不表明IRENA对任何地区、国家、领土、城市或地区的法律地位，或其当局，或其边界或疆界的划定，或对本文所载材料的可靠性所持的任何意见。然而，IRENA或其任何官员、代理人或其他第三方内容提供者均不提供任何形式的保证，无论是明示的还是暗示的，也不对使用本文或此处材料所造成的任何后果负责或承担任何责任。



© Shutterstock.com

内容

	图形 表格	4
		4
	缩写 4	
1	执行摘要	5
2	电池储能技术概述	6
	2.1 电池存储对能源转型的意义	6
	2.2 电池存储基础	8
	2.3 电池储能技术格局	9
3	钠离子电池	12
	3.1 建筑与材料	12
	3.2 供应链	14
	3.3 利弊	16
	3.4 应用	18
4	状态和展望	20
5	参考文献	22



图形

- 图1 2002-2022年年度发电装机容量 6
- 图2 各应用领域锂离子电池使用量，2015-2023 11
- 图3 钠离子电池原理图 12
- 图4 碳酸锂价格，2020-2024 15
- 图5 平均电池组成本比较 17
- 图6 钠离子电池的需求和生产能力预测 20

表格

- 表1 电动汽车部署和电池储能容量预测，2020-2050 7
- 表2 不同电池技术的当今性能参数 10
- 表3 sib的阴极和阳极材料 13

缩写

啊	安培小时	NaS	硫化钠
宁德时代	当代安珀克司科技有限公司	NMC	镍锰钴氧化物
中电普瑞	中国电力科学研究院	Ni-Cd	镍镉
C率	充放电速率	NiMH	镍氢
电动汽车	电动汽车	Pb-acid	铅酸
Fe-PBA	铁基普鲁士蓝类似物	PES	计划能源情景
GW	吉瓦	sib	钠离子电池
GWh	吉瓦时	TMO	过渡金属氧化物
ICE	内燃机	美元	美元
IRENA	国际可再生能源署	V	电压
km	千米	VRF	钒红ox流
千瓦时	千瓦时	W	瓦特
kWh/m	千瓦时每立方米	WETO	全球能源转型展望
LFP	磷酸铁锂	Wh	瓦时
LIB	锂离子电池	Wh/kg	每公斤瓦时
mAh/g	每克毫安时		



1. 执行摘要

能源转型不仅依赖于可再生能源的广泛部署，还依赖于电池储能容量的提升。储能技术，包括电池，对于提高电力系统灵活性同时保持电网稳定至关重要。随着能源结构中可再生能源的比重不断增加，它们的重要性将持续增长。

电池也是推动交通领域转型的重要因素。预计到2050年，电动汽车（EV）将主导道路运输。随着转型加速，对固定应用和电动汽车中电池存储的需求日益增长，加剧了对电池关键材料供应的担忧。

存在多种电动汽车电池类型，其中锂离子电池（LIBs）因其长寿命、高能量密度以及快速供能的能力而占据主导地位。然而，2021–2022年的供应链中断以及最近的地缘政治紧张局势加剧了对LIB供应链韧性和可负担性的担忧，从而推动了人们对钠离子电池（SIBs）等替代化学体系的兴趣日益增长。

sib结构类似于lib，这允许制造商利用现有的知识和经验。与lib不同，sib依赖于从丰富的原材料（纯碱）中提取的钠化合物。例如，其储量远超锂。这种丰富性表明SIBs可以帮助缓解供应链压力并多样化电池领域。

sibs是一种新兴技术，具有降低成本的潜力，并且性能参数正越来越多地与lib相当。作为一种不太成熟的技术，sibs仍有巨大的改进空间和更大的成本降低潜力，而lib则是一种更成熟和优化的技术，其潜在的效率提升空间可能有限。sibs的未来市场渗透将取决于其高效扩产的能力，同时与lib在成本和能量密度上相匹配。从长远来看，钠的更广泛地理分布也可能降低供应中断和价格波动风险。

SIB市场目前处于萌芽阶段，但在未来几年内可能会出现显著增长。到2025年，全球SIB生产能力可能达到每年70 GWh，并扩展到到2030年每年近400 GWh（BMI，2025）。根据IRENA的1.5°C情景，到2030年全球电动汽车电池需求将达到每年约4300 GWh（IRENA，2024a）。在符合1.5°C目标的情景下，根据当前假设，SIBs到2030年将占总电动汽车电池需求的不到10%。

仍需观察SIBs能否为LIBs发挥补充作用，或成为颠覆性替代品。它们最大的优势是钠的高天然丰度。材料供应广泛可以降低供应链风险，支持成本降低，并使SIBs成为LIBs的promising替代品。要充分开发这一潜力，在未来几年内改进关键性能指标——尤其是能量密度——至关重要。最近的公告表明进展迅速：2025年4月，CATL推出了其用于电动汽车的低电压和高电压SIBs量产系列Naxtra，能量密度为175 Wh/kg，并实现充电续航500公里。如果创新继续推动这项技术的快速发展，SIBs将在道路运输行业的脱碳化中发挥重要作用。



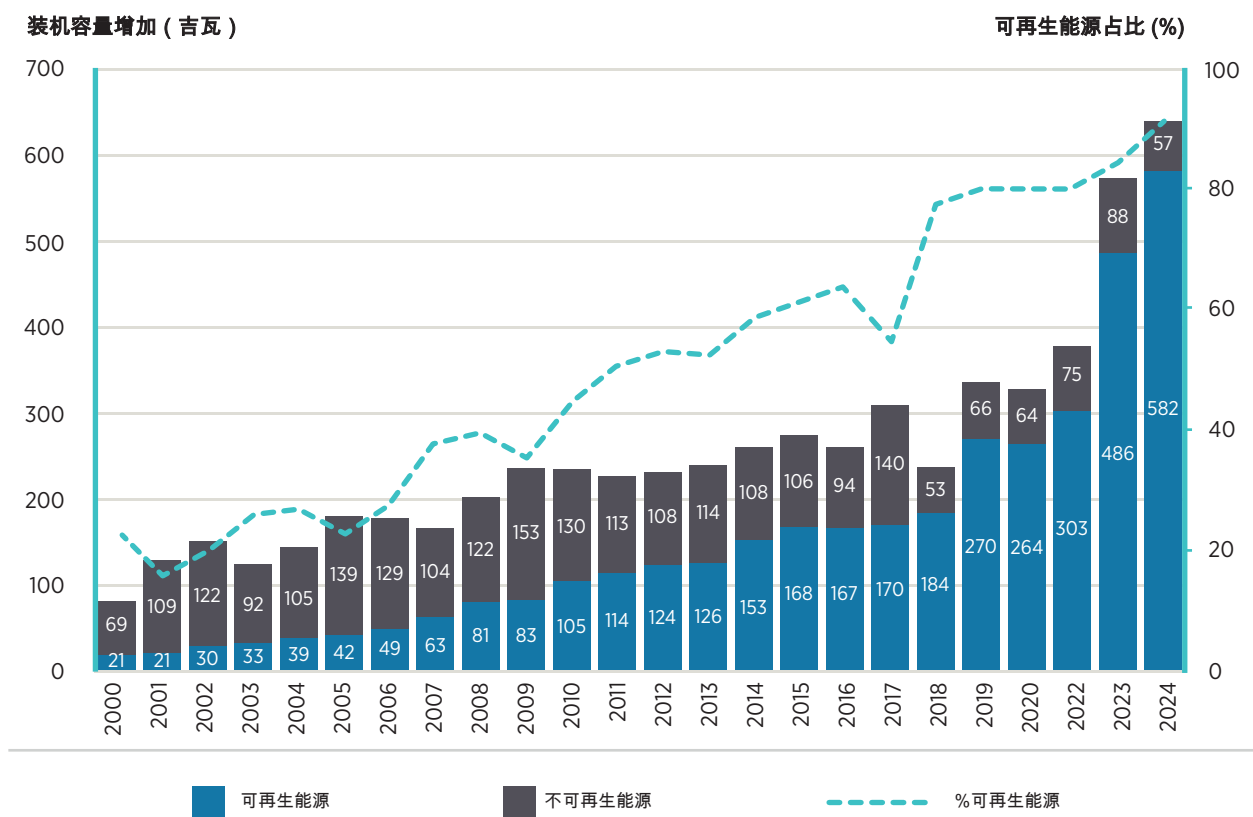


2. 储能电池技术的概述

2.1 电池存储对能源转型的意义

近年来可再生能源发电技术取得了显著进步，显著的成本降低为更可持续的能源未来打开了大门。图1显示的可再生能源装机容量逐年增长，证明了其相当的势头。

图1 2002-2022年年度电力装机容量



注意: gw = 吉瓦。

源:

(国际可再生能源机构, 2024b)

能源转型正在改变我们的能源生产和消费方式。国际可再生能源署（IRENA）的分析显示，到2050年，主要需求领域——建筑、交通和工业——的直接和间接电气化可能导致全球电力需求增长三倍（IRENA，2023a）。为应对由此产生的基础设施和系统挑战，电池储能技术至关重要。电力储能对于提高电力系统的灵活性和效率，同时保持电网稳定至关重要，尤其是在可变可再生能源的占比持续增加的情况下。在多种储能技术中，电池储能技术因其能够在各种地点和气候条件下部署、以模块化方式扩展以及快速响应能源需求变化而脱颖而出，按照电网的要求吸收、储存并重新注入电力。

IRENA的1.5°C情景要求全球电池储能容量从2020年的17吉瓦增加到2030年的360吉瓦和2050年的4100吉瓦，以提供基于可再生能源的电力系统所需的灵活性，如表1所示。除了电力部门之外，电池储能对于脱碳终端用能部门也至关重要。例如，在交通领域，电池是使电动汽车（EVs）成为可能的核心技术，预计到2050年，电动汽车将占道路运输的约90%（IRENA, 2023a）。

表1 电动汽车部署和电池存储容量预测，2020-2050年

		历史	1.5°C场景	
		2020	2030	2050
电动和插电式混合动力 轻型乘用车库存 (百万台)	全球	10	359	2 782
	G20	10	328	1 811
电池存储 (GW)	全球	17	359	4 098
	G20	16	278	2 925

来源：(IRENA, 2023a)。

2.2 电池存储基础

电池是能够将化学能转换为电能的装置。它们通常由一个负极（阳极）、一个正极（阴极）、电解质和隔膜组成。给电池充电时，离子通过电解质从阴极移动到阳极，储存电能。在放电过程中，离子流回到阴极，将储存的能量转换为电能。不同的电池类型利用不同的材料，以调整电池性能，使其满足目标应用的要求。

电池的性能可以通过以下参数定义：

- **容量** (安培小时[Ah])¹是指电池在特定时间段内可以提供的电流。电池可以储存的总能量可以通过将容量乘以标称电压(瓦特小时[Wh] = Ah × 电压[V])来获得。)
- **充放电速率** 定义了能量可以多快地充电/放电¹ 并且使用C-rate进行测量。C-rate是一个无单位的比率，它将充放电电流与电池的额定容量相联系，其中更高的C-rate意味着更快的充放电。
- **循环寿命** 一个存储系统的循环寿命是指电池在性能下降并达到一定健康状态之前可以完成的充放电次数；它通常与C率和工作温度密切相关。更高的放电率和工作温度会导致更低的循环寿命。
- **效率** (或往返效率，%)是指在储能系统一个循环中的能量输出与能量输入之比，表示在储能和放电过程中发生的能量损失 (IRENA, 2017)。
- **质量比能** (watt hour per kilogram [Wh/kg]) 衡量电池每单位质量所储存的能量，这对于像电动汽车和便携式电子设备这样的应用很重要，在这些应用中，重量是一个问题。
- **体积能量密度** (kWh/m³) 衡量了单位体积所储存的能量，这对于空间宝贵且电池有体积限制的应用很重要，如在电动汽车和手机中。 例如

电池可用于各种应用和服务，包括：

- **运输**，例如为传统内燃机(ICE)道路车辆的辅助系统或电动汽车中的电动机提供动力。此外，在道路货运领域以及海上运输和航空的一些领域也预见到其用途。

¹ 例如：1C速率表示充电或放电速率等于电池容量，意味着理论上需要一小时完全充电。2C速率表示充电或放电速率是电池容量的两倍，意味着需要30分钟完全充电。0.5C速率表示充电或放电速率是电池容量的一半，意味着需要2小时完全充电。

• 电力系统：

削峰填谷，这减少了高峰需求时段的发电需求。这是通过在低需求时段充电（当有过剩能源产生时）以及在高峰需求时段放电来实现的。这也促进了可再生能源来源的进一步整合。

> **支持网格，提供电压和频率调节等关键辅助服务。**

离网型/微电网系统 确保在偏远地区或未接入集中式电网的岛屿提供可靠的电力供应。

优化可再生能源的运行，例如当与水电站配套时，它可以提高其提供一次频率响应的能力，同时减少涡轮的磨损（Drommi，2024）。等

备用电源，提供即时且不间断的电源供应。



© Shutterstock.com

2.3 电池储能技术格局

近几十年来，在电池技术发展中取得了重大进展，研究重点在于延长其使用寿命和性能指标，同时降低成本（PNNL，无日期）。这导致了多种电池类型的开发，每种电池都具有不同的特性，使其适用于不同的应用；例如，铅酸（Pb酸）电池通常用于传统内燃机道路车辆和备用电源系统；镍镉（NiCd）和镍氢（NiMH）电池用于消费电子产品；钠硫（NaS）和钒液流（VRF）电池适用于固定储能应用；锂离子电池（LIBs）广泛应用于电动汽车、固定储能和消费电子产品；而钠离子电池（SIBs）与LIBs应用类似，但有一些将在后续章节中讨论的注意事项。下表2显示了不同电池技术的性能特征。



表 2 不同电池技术的现代表现参数

	Pb-acid	NiCd	NiMH	NaS	VRF	锂离子	sib
重力测量 能量 密度 (Wh/kg)	25-50	30-80	40-110	150-240	10-130	150-300*	90-160
体积 能量 密度 (kWh/m ³)	70-135	15-150	40-300	150-350	10-33	200-700	250-375
终生 (年)	2-15	10-20	2-15	10-15	10-15	5-15	10-15
循环寿命 (周期数)	250-2 000	1 000-5 000	300-1800	2 500- 40 000	10 000- 16 000	1 000- 12 000	500-8 000
效率 (%)	63-90	60-90	50-80	75-90	75-85	85-95	≈92
工作 温度 (°C)	18-45	-40-50	-30-70	300-350	5-45	-20-60	-40-80

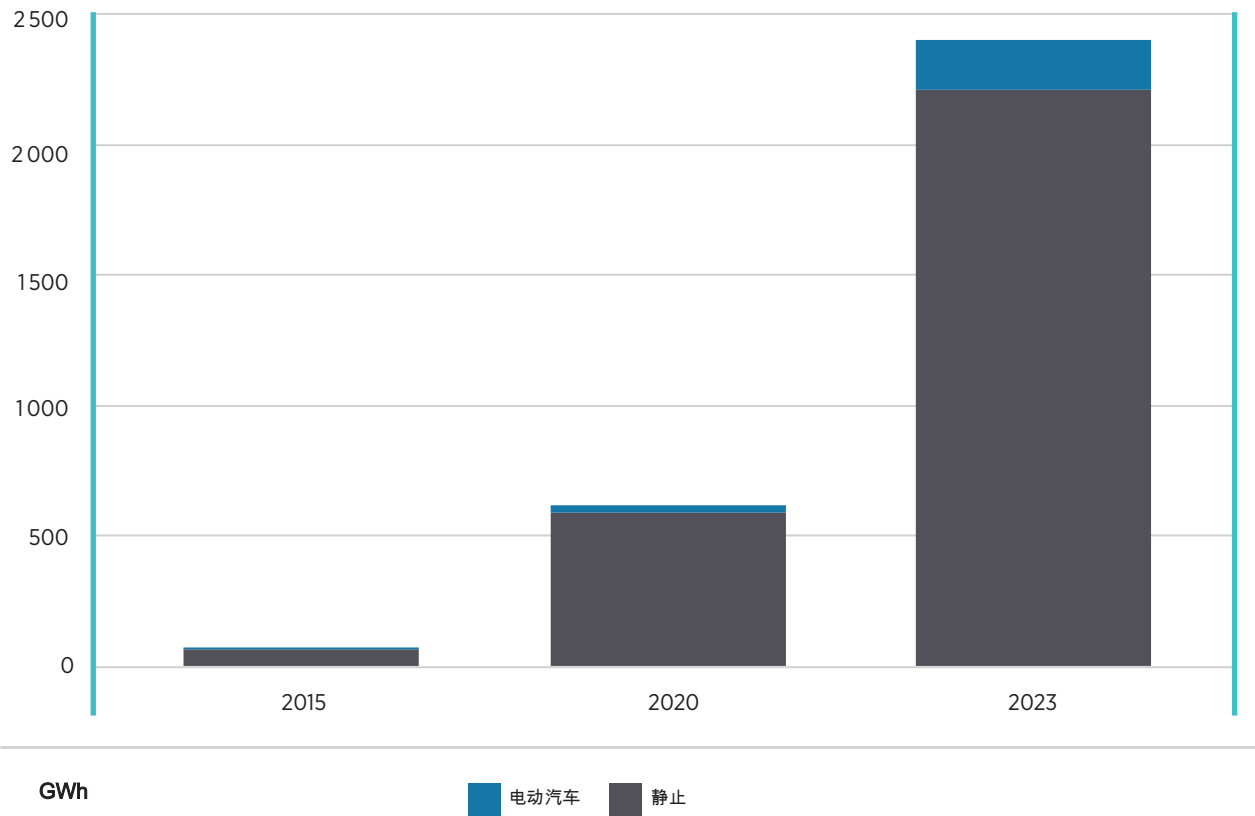
* 2023年4月，中国电池公司宁德时代宣布推出一种能量密度高达500 Wh/kg的紧凑型电池（宁德时代，2023a）。

注意：Pb = 铅酸电池; NiCd = 镍镉电池; NiMH = 镍氢电池; NaS = 硫钠电池; VRF = 钒流电池, Li-ion = 锂离子电池; SIB = 钠离子电
池。本表格包含截至撰写时正在大规模生产的电池。最新消息表明，到2025年底，将实现SIB电池的大规模生产，其比能量为175 W
h/kg。

来源：(亚伯拉罕，2020；法拉迪翁，无日期；华，2023；彼得斯等人，2021；西米奇等人，2021；杨等人，2022)

过去十年见证了电池在交通（即电动汽车）和固定储能方面的使用量前所未有的增长，如图2所示。主要由锂离子电池(LIB)技术的快速进步和成本暴跌推动，自2015年以来，锂离子电池的部署增长了近35倍，达到超过2400吉瓦时(GWh)（IEA，2024）。

图2 2015-2023年按应用使用的锂离子电池容量



基于：(BNEF, 2023; IEA, 2024)。

锂离子电池（LIBs）由于其高能量密度和多功能性，一直是现代储能解决方案的前沿；然而，对这些电池日益增长的需求已引发关于可持续性、资源可用性、地缘政治因素以及潜在供应链瓶颈的担忧（Gielen和Lyons，2021年；IRENA，2023b）。尽管包括锂在内的材料充足，足以支持能源转型，但人们仍担心电池供应链能否跟上不断增长的电动汽车（EV）需求，以及碳酸锂价格的波动性——该价格在2022年飙升（IRENA，2023b；Trading Economics，n.d.a）。此类担忧已促使市场探索替代技术，例如固态电池（SIBs）。



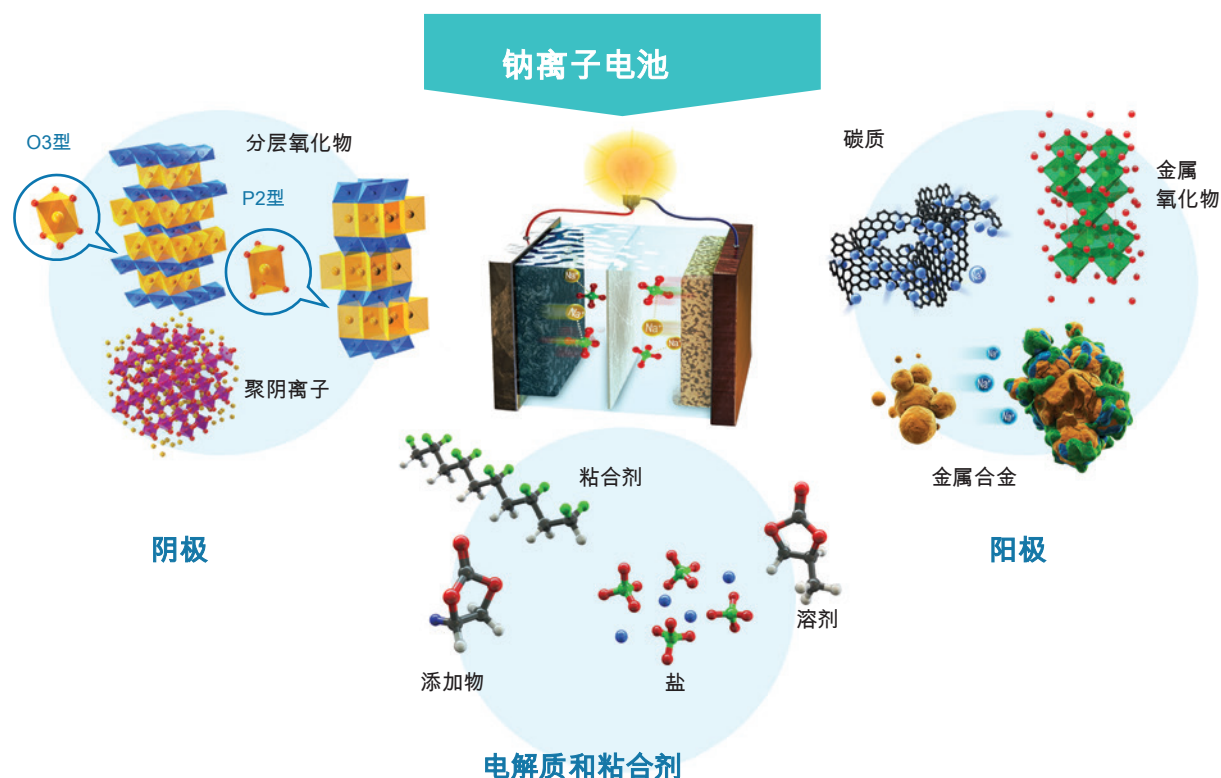
3. 钠离子电池

尽管在 20 世纪 70 年代和 80 年代与 LIBs 一起被探索，但由于 LIBs 的快速发展及商业成功、与 LIBs 相比性能较差以及当时的 技术局限性，SIBs 大部分被边缘化 (Hwang, 2017)。然而，21 世纪的发现表明，与石墨阳极不同，等硬碳负极材料具有优异的可逆钠存储容量，重新点燃了人们对硅基钠离子电池 (SIBs) 的科学兴趣。对锂资源稀缺性的日益关注进一步加速了 SIB 技术的发展，使其成为锂离子电池 (LIBs) 的一种潜在替代方案 (Wahid, 2018)。等

3.1 施工与材料

SIBs 的构建与 LIBs 相似 (见图 3)。然而，它们依赖钠化合物作为电解质，而非锂。SIB 技术的阴极材料通常分为层状氧化物、多阴离子和骨架材料。阳极材料通常分为碳质材料、过渡金属氧化物以及金属间化合物和有机化合物。对于集流体，SIBs 的阳极和阴极都可以使用铝，而 LIBs 的阳极集流体需要使用铜，因为在低电压下锂会与铝合金化 (Hwang, 2017)。等

图3 钠离子电池示意图



来源：(黄等人，2017)。

阴极

目前正探索多种负极材料用于SIBs。SIBs中目前使用的三种主要负极材料系列是层状氧化物、多阴离子化合物以及骨架材料 (如普鲁士蓝类似物) 。表3展示了它们的一些基本特性。

表3 SIBs的阴极和阳极材料

材料	家庭	比容量 (mAh/g)	平均电压 (V vs Na ⁺ /Na)	电压窗口 (V vs Na ⁺ /Na)
阴极				
Na _{2/3} Mn _{0.67} Co _{0.22} O ₂	分层氧化物	105	3.3 V	2.0-4.2 V
Na _{0.67} Co _{0.2} Mn _{0.6} O ₂	分层氧化物	132.2	3.4 V	1.5-4.2 V
Na _{2-x} Fe ₃ (PO ₄) ₃	聚阴离子	130	3.4 V	2.0-4.2 V
Na ₃ MnPO ₄ CO ₃	聚阴离子	125	3.5 V	2.5-4.5 V
Na _{1.89} Mn[Fe(CN) ₆] _{0.97}	普鲁士蓝	150	3.5 V	2.0-4.0 V
阳极				
硬碳	-	300	0.3	0.01-2.0

注意： mAh/g = 每克毫安时；V = 电压。比容量表示单位质量材料可以储存的电荷量。平均电压代表材料在充放电循环中工作的平均电压。电压窗口代表材料安全工作的电压范围。

来源： (陈等人，2013年；Essehli 等，2020；范 等，2024；傅和傅, 2020；米勒 等，2023；任 等，2017；宋 等，2015；王 等，2022)。

层状过渡金属氧化物 (TMOs) 的通式为Na^xMO，其中M代表一个或多个(过渡)金属，通常为铁(Fe)、锰(Mn)、镍(Ni)、锌(Zn)或铜(Cu)。TMOs具有相对较高的能量密度，被认为是一种有前景的SIBs(Wei，2024)的负极材料。 等

多阴离子化合物将一种过渡金属（通常是钒（V））与多阴离子（磷酸盐）结合 例如 $[\text{PO}_4^{3-}]$, 焦磷酸盐 $[\text{P}_2\text{O}_7^{4-}]$, 硫酸盐 $[\text{SO}_4^{2-}]$, 硅酸盐 $[\text{SiO}_4^{4-}]$ 和氟化物 $[\text{F}^-]$ 来获得一个平均值

循环过程中的电压。多阴离子化合物具有高钠扩散系数和钠插入/移除时体积变化小，这使得它们成为具有前景的高速充电正极材料（Salehi，2021）。等

基于铁的普鲁士蓝类似物（Fe-PBAs）是一系列具有与普鲁士蓝相似结构的骨架材料。它们由金属离子通过氰根（ CN^- ）基团连接而成。Fe-PBAs具有大功率能力和低成本（Li，2019; Reid, 2023）等

阳极

碳质材料是SIBs的首选负极材料，因为它们具有优异的导电性、多种制备工艺、低成本以及可再生前驱体的可用性。在各种碳质材料中，硬碳和软碳材料被认为对SIBs最具潜力（Hou，2017）。硬碳是商业SIBs中最常见的负极材料。它们是生产的等

通过生物质或酚醛树脂的固相热解，这些资源丰富且通常成本低廉，也可以由其他化石基的石化来源生产，尽管低效的碳化和复杂的后处理会增加它们的成本（BMI, 2024a）

电解质

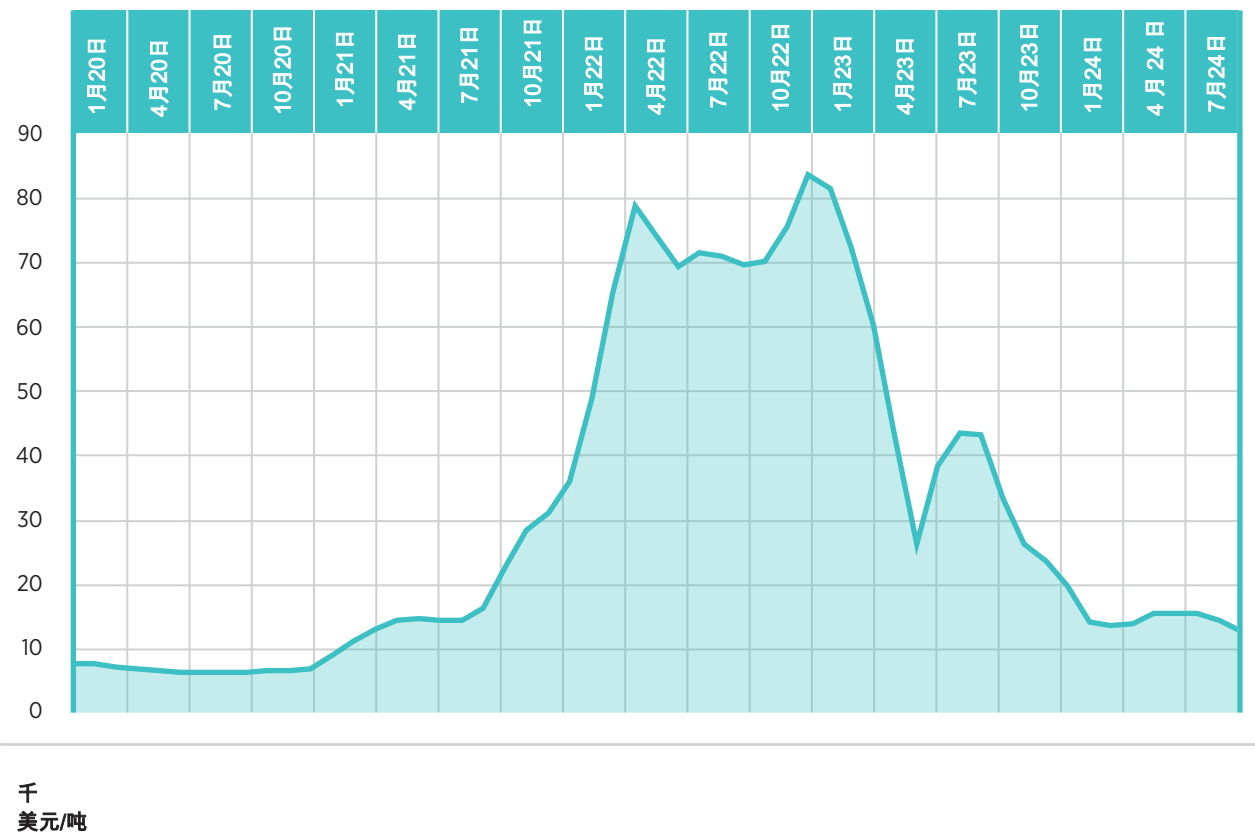
sibs依赖钠化合物作为电解液，与lib依赖锂类似。电解液需要具有电化学和热稳定性、离子导电性和电子绝缘性，以及低毒性。sibs最常用的电解液是六氟磷酸钠（ NaPF_6 ）

并与碳酸酯溶剂中的高氯酸钠（ NaClO_4 ）盐一起，尤其是丙碳酸（PC）（Hwang，2017）。等

3.2 供应链

锂电池由于其高能量密度和广泛适用性，引领着当今的电池市场。然而，不断增长的需求加剧了对可持续性、关键材料供应以及地缘政治和供应链风险的担忧（Gielen，2021年）。尽管关键材料（如锂）的可用性可能不是主要等约束，电池供应链可能在保持与电动汽车（EV）快速增长需求同步方面面临挑战（Gielen，2021年）。进一步的风险在于锂价格的波动性，在2022年和2023年锂价飙升，如图4所示的碳酸锂价格（Trading Economics，n.d.a）说明了这一点。这些担忧突显了开发替代技术和确保可持续优化的存储解决方案的必要性。

图4 碳酸锂价格，2020-2024



来源：(Trading Economics, n.d.a)

sibs可以缓解与锂电池相关的供应约束和价格波动，通过扩大可行的化学范围，降低对锂矿开采和加工的依赖。钠比锂丰富得多——在地壳中大约丰富1000倍，在海洋中大约丰富60000倍 (ncbi, n.d.a, n.d.b)。

SIB制造主要依赖纯碱（碳酸钠）作为主要的钠前体。纯碱在多个行业得到广泛应用，其储量远比锂丰富，因此不太容易受到资源供应问题及价格波动的影响。全球天然纯碱资源估计约为470亿吨，而储量估计约为250亿吨 (USGS, 2023)。² 纯碱也可以，而且已经是，通过盐和石灰石合成生产，这两种资源几乎都是无限的。这为其全球生产提供了可能性，尽管与天然纯碱相比，经济和环境成本更高，而更易获取的锂资源则更具地理集中性。尽管SIB技术在全球具有潜力，但截至今天，宣布的SIB生产能力中超过95%在中国 (McNulty和Williams, 2023)。

2 矿产资源是被发现和计量的矿物矿藏。矿产储量是资源中经济和法律上可开采的子集。

3.3 优缺点

sibs正成为成熟的电池技术的有前景的替代品。它们的技术属性、安全特性、可持续性以及成本考量对能源格局具有潜在的深远影响。

性能与安全

如表2所示，尽管硅负极电池是一种新兴电池技术，但其性能参数可与甚至优于其他电池技术相媲美。硅负极电池具有优异的容量保持性，即使在低温下也是如此，快速充电时间（15分钟充电至80%），以及具有竞争力的循环寿命（4000-5000次循环后仍保持80%容量）（CATL, 2023a; Faradion, n.d.）。

虽然目前SIBs的能量密度低于一些高端LIBs，但随着如今商业化电池的能量密度高达175 Wh/kg（见表1），需要注意的是，这与一些低端LIBs相当，并且已经显著高于铅酸和其他镍基电池等其他技术。此外，SIBs的发展轨迹充满前景，制造商预计下一代SIB电池将超过190-200 Wh/kg（CATL, 2023; Faradion, n.d.）。在其最新公告中，CATL宣布其计划于2025年大规模生产的Naxtra乘用车电池的能量密度为175 Wh/kg。这些进步，如果实现，可能使SIBs在各种应用中成为可行的替代方案，特别是在成本、安全和可持续性为首要考虑因素的领域。

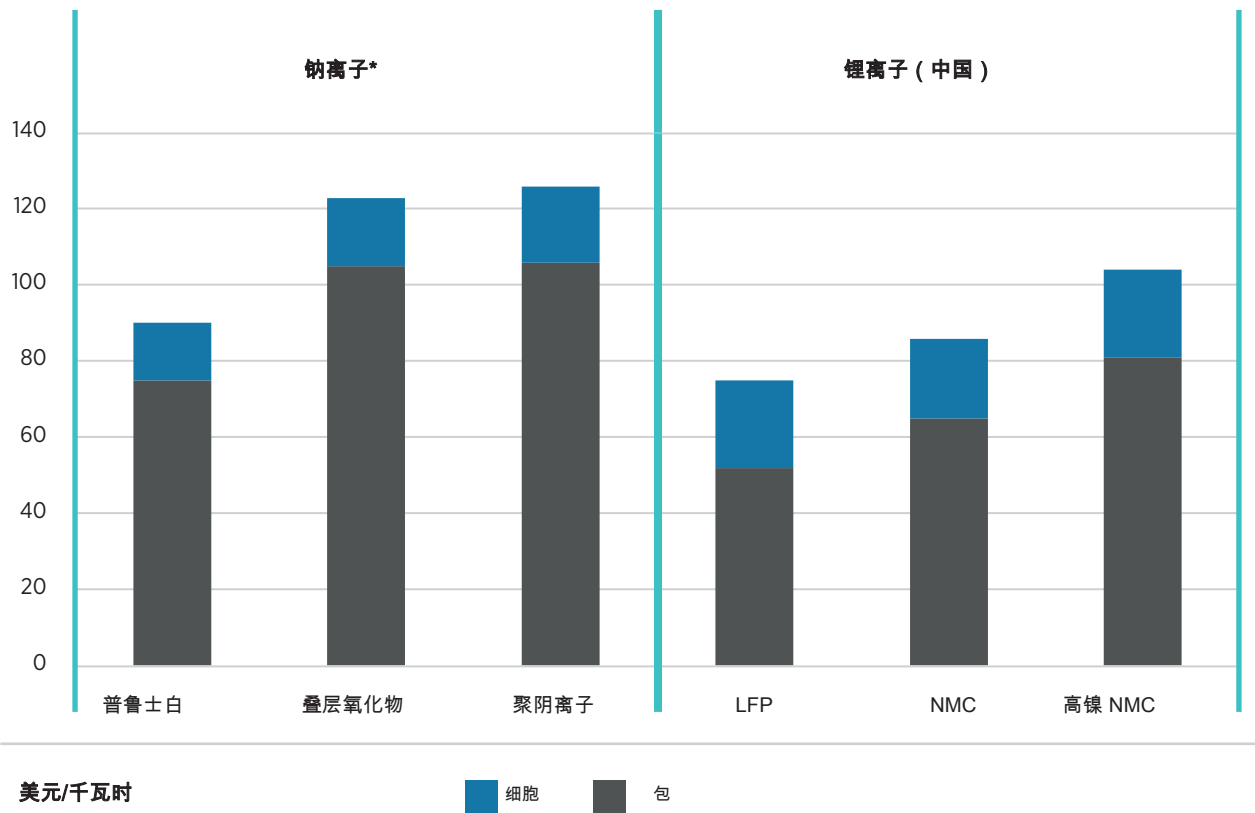
sibs在安全性方面也已显示出良好的效果，其工作温度范围比lib更宽，且阴极-电解质混合物更稳定，这有助于热稳定性、更好的滥用耐受性和完全放电后安全运输的可能性（chayambuka，2020; Desai，2022; zhao 等 等，2013）。这尤其适用于使用聚阴离子化合物和普鲁士蓝类化合物的SIBs。等
它们的光阴极。

成本

2021年，SIBs的优势凸显，当时碳酸锂价格开始飙升，SIBs开始被视为锂离子电池（LIBs）的一种潜在更便宜的替代方案，并且多家电池制造商宣布了他们的商业化计划。如图4所示，此后碳酸锂价格有所下降（Trading Economics，n.d.a），所以从长远来看，SIBs是否是LIBs（尤其是磷酸铁锂（LFP）电池）的更便宜替代方案还有待观察。一些来源将电池级碳酸锂的价格门槛设定为每吨20,000美元，以使SIBs在成本方面保持竞争优势（BMI，2024b）。

2022年SIB电池的平均成本在80-105美元/千瓦时之间，具体取决于其化学成分，对于电池组，这些成本上升到90-125美元/千瓦时（Reid，2023）。相比之下，2024年4月LIB电池的平均成本在52-81美元/千瓦时之间，电池组的成本则取决于电池化学成分，为75-104美元/千瓦时（BNEF，2024）。尽管SIB在2021年相对于LIB的成本优势已经消失，因为LIB原材料成本迅速下降，但一些制造商预计，一旦生产规模扩大，SIB电池的成本将降至40美元/千瓦时以下（Degen，2023）。等

图5 平均电池组成本比较



注意： LFP = 磷酸铁锂；NMC = 锰酸镍钴锂。钠离子电池成本来自 2022 年，因此当前成本可能低于所描绘的成本。

基于：(BNEF, 2024; Reid, 2023)。

成本仍可能因多种因素成为SIBs相对于LIBs的竞争优势之一。其中首先是钠的丰富性和可及性，钠是一种比锂便宜得多的材料。2020年至2024年期间，碳酸钠的价格在每吨100美元至500美元之间，而同期碳酸锂的价格在每吨6000美元至83000美元之间（Trading Economics，n.d.a，n.d.b）。除此之外，钠的全球分布降低了供应链中断和价格波动的风险。另一个重要因素是SIBs在其结构中使用了更经济的材料，例如通常更便宜的阴极材料，如锰和铁，以及使用铝集流体而不是铜集流体（Abraham，2020；Casey，2024）。最后，由于技术处于早期阶段，SIBs的成本降低潜力高于LIBs。

可持续性

sibs 还在可持续性方面具有优势，利用比 lib 更丰富和更廉价的材料，例如用钠代替锂，或用铝代替铜。除此之外，一些 sib 正极化学成分，例如普鲁士蓝和白多阴离子，不含镍或钴等矿物（reid，2023）。所有这些都助于减少电池对关键材料的需求。

总体而言，每千瓦时的SIB生命周期环境影响可能与表现最佳的LIB相当，并且通常优于大多数锂镍锰钴氧化物（NMC）技术，尽管SIB的比能量密度较低（需要比LIB更多的材料才能达到相同的储能容量）和商业化程度较低（Peters，2016）。除此之外，SIBs的可持续性还可以进一步提高，因为 等例如若行业从含镍的层状氧化物正极中转移开，如果用作负极的硬碳是由有机废物（彼得斯），2016）。等

3.4 应用

sib是传统电池技术的可行替代品，其独特性能使其适合各种应用。其成本效益、安全性和可持续性使它们特别吸引人，用于大规模储能、电动汽车和各种工业用途。随着研究和开发不断拓展sib技术的边界，我们可以预期它们潜在的采用范围将扩大，为更可持续和多样化的能源未来做出贡献。

固定存储

SIBs最有前景的应用之一是固定式储能。对整合太阳能和风能等可变可再生能源的需求日益增长，这需要高效且经济的储能解决方案。这一点如今已经可见，如固定式电池储能（包括公用事业规模和户用规模）自2015年以来增长了超过60倍（见图2）（BNEF，2023；IEA，2024）。

sibs可能非常适合这个目的，因为它们提供了有前景的安全特性，在各种温度下表现出色，并且似乎具有有竞争力的寿命。此外，由于尺寸和重量在固定应用中不是关键限制因素，与lib相比，sibs较低的能量密度不是一个大问题。此外，由于安全性，sibs在低温和高温环境中也能发挥关键作用，在那里它们可以胜过lib。这些因素的结合使sibs成为快速增长固定储能市场中lib的有力竞争者。

如果制造商发布的规格准确，SIBs可以成为需要更宽工作温度范围的首选解决方案。然而，SIBs也可以与LIBs集成，以适应特定的地区要求，并兼顾两者的优点。根据(CATL, 2021)的数据，这两种电池技术可以组合并以各种配置排列，实现超过80%的系统集成效率（电池单元的重量或体积与电池包的重量或体积之比）。

电动汽车

由于它们的快速充电能力、安全性能和宽工作温度范围，SIB 的另一种潜在应用是电动汽车。特别是对于短程车型，鉴于 SIB 目前高达 160 Wh/kg 的比能量密度，这一点尤为明显。事实上，几家中国电池和汽车制造商已经宣布计划推出使用 SIB 供电的紧凑型电动汽车。³ 并且首批车型已投入市场。此外，SIBs 在快速渗透电动两轮和三轮车市场方面具有巨大潜力（BNEF，2024）。

3 包括来自：CATL (CATL, 2021), Chery (CATL, 2023b), BYD (Jiang, 2023), JAC/HiNa (JAC Motors, 2023), Faradion (Gupta, 2020), Natron (Businesswire, 2022) 和 PNNL (Hede, 2022), 等等。



© Shutterstock.com

采用SIB驱动的电动汽车续航里程约为250公里（Rho Motion，2024年），适用于城市环境。作参考，在部分欧洲国家，城市居民的平均日行驶距离在5-19公里之间（Eurostat，2021年），这意味着一款SIB驱动的电动汽车单次充电可使用数周。

两轮和三轮车是另一个适合SIBs的很有前景的市场细分。它们在发展中国家和新兴市场，特别是在亚洲，发挥着尤其重要的作用。2024年，中国、印度和东南亚共同占全球两轮和三轮车销量的约80%，而最近行业的公告突出了对这些车辆采用SIB日益增长的兴趣。中国制造商Yadea已经推出了配备SIB的电动滑板车。在印度，Jitendra EV等公司计划在2026年之前商业化使用SIB包的两轮车（Energetica India，2024；IEA，2025；Yadea，2025）。

与固定式应用类似，混合电池也可以通过集成锂和钠电池，并补偿SIB相对于LIB更低的比能量密度和体积能量密度，同时利用其高功率性能和低温性能，在电动化交通中发挥作用（CATL，2021）。2025年，CATL宣布了Freevoy双动力电池系统，其中包括钠-磷酸铁锂双动力选项。虽然仍处于宣布阶段，但这一概念展示了钠离子技术如何与基于锂的化学体系相结合，以结合两个系统的优势（CATL，2025）。

其他人

除了为电动汽车提供动力之外，固态电池（SIBs）还可以通过替换传统道路车辆中的铅酸电池，或者在电动两轮和三轮车等设备中，发挥改造升级的作用，例如使电池能量密度提高三倍，并在循环寿命、低温性能、安全性、可持续性和快充能力方面超越它们（见表2）。

SIBs也正在其他各种应用中找到用途，包括用于小型设备和电动工具的高功率电池。此外，它们的安全性和稳定性使它们成为为地面工业应用电气化的一种潜在合适选择，例如为工业卡车和机场地面设备供电（Degen，2023）。等

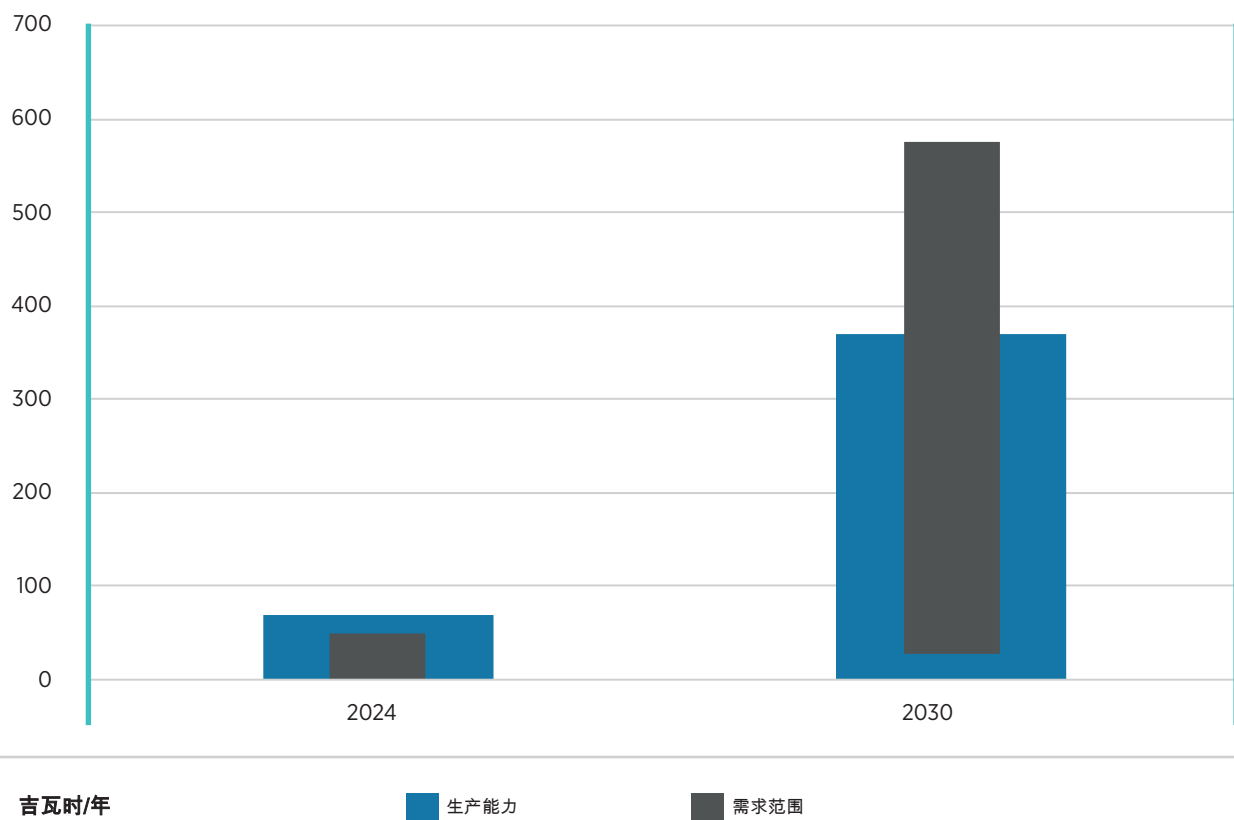




4. 状态和展望

SIB市场目前处于萌芽阶段，但在未来几年可能会出现显著增长。预计到2025年底，全球SIB的年生产产能将达到70 GWh，主要集中在 中国，并以层状金属氧化物正极化学体系（BMI，2023a）为主导。虽然与LIB相比，SIB的市场份额仍然相对较小，但生产能力预测为生产商提供了乐观的前景，预计到2030年生产能力将超过370 GWh/年（BMI，2024c）。同时，SIB的未来市场渗透率似乎存在不确定性，不同来源的需求预测在2030年之间广泛波动，为50-600 GWh/年（Degen，等 2023年），如图6所示。作为比较基准，整个铅酸电池市场约为400-450 GWh（Degen，2023）。等

图6 钠离子电池的需求和生产能力预测



来源：(BMI, 2024c; Degen 等人, 2023)。



SIBs的未来产能部署目前尚不明确。仍存在需要克服的挑战。例如，在确保充足的需求和强大的供应链方面。新硬破产能的公告跟不上SIBs的步伐。如果这种情况持续下去，它可能成为SIBs增长的限制因素（BMI，2023b）。

尽管固态电池（SIBs）的潜力巨大，如生产能力及需求预测所示，但它们不应被视为对锂离子电池（LIBs）的完全替代，而应被视为一种辅助技术，有助于缓解围绕电池供应链的可持续性和可用性方面的某些问题。固态电池的长期成功可能取决于多种因素，包括成本和材料的可用性。锂供应链中的瓶颈、锂短缺或更高的锂成本都可能导致固态电池的渗透率提高，而锂离子电池的进一步成本降低则可能对固态电池的需求产生负面影响。

SIBs的未来成功也与其持续的研发工作相关，这些工作旨在提高其性能并解决其局限性。创新预计将带来显著提升的能量密度，例如预计将使其从160 Wh/kg提升至200 Wh/kg（CATL，2021）。此外，还有混合电池配置（如钠锂电池和钠离子超级电容器混合体）*例如*正在被探索以利用不同技术的优势，并进一步增强SIBs（KAIST，2024）的性能。



5. 参考文献

亚伯拉罕, k. m. (2020), “钠离子电池与锂离子电池相比如何?” ACS , 卷 5/11, 第 3544–7 页, 美国化学会, <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.0c02181> 能源快报

BMI (2023a), “钠离子电池生产商瞄准储能市场”, 基准源 基准矿物情报 <https://source.benchmarkminerals.com/article/sodium-ion-battery- producers-target-the-energy-storage-market> (访问于2024年8月20日)。

BMI (2023b), “硬碳负极生产需要扩大规模以满足钠离子电池的雄心”, 基准源 基准矿物情报 <https://source.benchmarkminerals.com/article/hard- carbon-negative-production-needs-to-expand-to-meet-the-ambitions-of-sodium-ion-batteries> (访问于2024年8月20日)。

BMI (2024a) “钠离子电池101” 基准矿产智能 https://source.benchmarkminerals.com/downloads/special-issues/1317717?mc_cid=20671f1e1e&mc_eid=391d14ae6b (访问于2024年8月20日)。

BMI (2024b) “钠离子电池在储能中能发挥什么作用?” 基准源 基准矿物智能 <https://source.benchmarkminerals.com/article/what-role-can-sodium-ion-batteries-play- in-energy-storage> (访问于2024年8月20日)。

BMI (2024c) “新进入者推动钠离子电池产能增长”, 基准源 基准矿产情报 <https://source.benchmarkminerals.com/article/new-entrants-drive-sodium-ion-battery- capacity-growth> (访问于2024年9月24日)。

bmi (2025), , 基准矿业有限公司。更便宜、更好、更小：电池技术的未来

BNEF (2023), 彭博新能源财经, 伦敦, <https://about.bnef.com/blog/2h-2023-energy-storage-market-outlook/> (访问于2024年8月20日)。

BNEF (2024), 彭博新能源财经, 伦敦, <https://about.bnef.com/电动汽车展望/> (访问于2024年8月20日)。

商业线 (2022) “Natron和Arxada宣布全球首次大规模生产电池级普鲁士蓝材料” <https://www.businesswire.com/news/home/20221017006023/en/Natron-and-Arxada-Announce-Worlds-First-Large-Scale-Production-of-Battery-Grade-Prussian-Blue-Materials>

凯西, T. (2024), “钠电池在成本和供应链上挑战锂离子电池”, <https://cleantechnica.com/2024/01/14/低成本钠电池储能电动汽车电网/> (访问于2024年8月20日)。

CATL (2021), “宁德时代发布其最新突破技术，推出第一代钠离子电池” <https://www.catl.com/en/news/665.html> (访问于2024年8月20日)。

CATL (2023a), 宁德时代发布能量密度高达500Wh/kg的固态电池, 赋能客机电动化 <https://www.catl.com/en/news/6015.html>

CATL (2023b), “宁德时代首款钠离子电池为奇瑞电动汽车车型供电” <https://www.catl.com/en/news/6013.html>

CATL (2025), 纳克斯特拉电池突破与双电源架构: 宁德时代引领多能时代 https://www.catl.com/en/news/6401.html?utm_source=chatgpt.com (访问于2025年9月9日)。

Chayambuka, K.等(2020), “从锂离子电池迈向钠离子化学: 挑战与机遇”, 第10/38卷, 第2001310页, <https://doi.org/10.1002/aenm.202001310> 先进能源材料

陈, H. 等. (2013), “Sidorenkite ($\text{Na}_3\text{MnPO}_4\text{CO}_3$): 一种用于钠离子电池的新型插层正极材料”, 第25/14卷, 第2777-86页, 美国化学学会, <https://doi.org/10.1021/cm400805q> 材料化学

Degen, F等(2023), 钠离子电池2023年环境报告: 现状与展望
[环境报告: 钠离子电池 2023: 现状 沿着未来的价值链
Quo和沿未来价值链的视角], 弗劳恩霍夫研究所研究制造电池单元FFB, 明斯特, https://www.ffb.fraunhofer.de/en/publications/White_papers_environment_reports_studies/Environmental_report_on_sodium-ion_batteries (访问于2024年8月20日)。

Desai, P.等(2022), “零伏存储钠离子电池: 性能与电池化学的关系!”, 第551卷, 第232177页, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232177> 电源学报

Drommi, J.-L., 等. (2024), “当灵活性延长电厂寿命: 电池存储和径流式”, 洛桑, <https://www.xflexhydro.com/knowledge/when-flexibility-extends-power-plant-life-battery-storage-and-run-of-river> (访问于2024年8月20日)。

energetica印度 (2024) “Jitendra EV即将推出钠离子电池驱动的电2ws” https://www.energetica-india.net/news/jitendra-ev-to-launch-sodium-ion-battery-powered-e2ws-soon?utm_source=chatgpt.com

艾塞利, R., 等人. (2020), “用于钠离子电池的 $\text{Na}_2\text{-xFe}_3(\text{PO}_4)_3$ 正极中选择性钠离子扩散通道”, 第24卷, 第343-50页, <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.07.040> 储能材料

Eurostat (2021), “乘客出行统计”, <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=乘客移动性统计> 欧洲统计局 (访问于2024年8月20日)。

潘, X. 等. (2024), “先进钠离子电池中硬碳材料的研究进展”, 卷.69, pp.103386, <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103386> 储能材料

法拉第恩 (n.d.),
“强劲性能 - Faradion”, <https://faradion.co.uk/technology-benefits/strong-performance/> 法拉第恩网站
<https://faradion.co.uk/technology-benefits/strong-performance/> (访问于2024年8月20日)。



付, F., 和 付, X. (2020) “一种用于钠离子电池的高容量和超长寿命P2型层状钠氧化物的一锅合成”, 卷 346, 第 115211 页, <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.115211> 固态离子学

吉伦, D. (2021), , 国际可再生能源机构 能源转型关键材料
(国际可再生能源署), 阿布扎比, <https://www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition>

吉伦, D.和萊昂斯, M. (2021) 国际可再生 能源转型关键材料：锂
能源署 (IRENA) , 阿布扎比 www.irena.org/技术文件/能源转型关键材料-锂

U.古普塔 (2020) “印度钒酸钠电池制造”, <https://www.pnnl.gov/news-光伏杂志>
媒体/更持久的钠离子电池-前景

何德, K. (2022), “前景中的更长寿命钠离子电池” 太平洋西北国家
实验室, <https://www.pnnl.gov/news-media/longer-lasting-sodium-ion-batteries-horizon>

侯, H., 等. (2017), “用于先进钠离子电池的碳负极材料” 高级能源
材料, 第7/24卷, 第1602898页, <https://doi.org/10.1002/aenm.201602898>

华, Z. (2023) , “商业化钠离子电池与锂离子电池的比较研究”, , 第26卷, 第233–9页, <https://doi.org/10.54254/2755-2721/26/20230838> 应用与计算工程

黄, J.-Y., 等人. (2017,) “钠离子电池：现状与未来”, 化学社会评论, 卷.46/12, 页.3529–614。

IEA (2024), ,国际能源署,巴黎, <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions> 电池与安全能源转型
(访问于2024年8月20日) 。

IEA (2025) ,国际能源署,巴黎, www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025 2025年全球电动汽车展望

IRENA (2017) , , 国际可再生 储能与可再生能源：成本与市场至2030年
阿布扎比能源署 https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf

IRENA (2023a), ,国际可再生能源 世界能源转型展望2023：1.5°C路径
代理机构, 阿布扎比, www.irena.org/Publications/2023/Jun/世界能源转型展望2023

IRENA (2023b), ,国际可再生能源 能源转型中的地缘政治：关键材料
代理机构, 阿布扎比, www.irena.org/Publications/2023/Jul/能源转型中的地缘政治-关键材料

IRENA (2024a), ,国际可再生能源机构,阿布扎比 关键材料：电动汽车电池
达希 www.irena.org/Publications/2024/Sep/关键材料-电动汽车电池

IRENA (2024b), ,国际可再生能源机构,阿布扎比, 可再生能源统计2024
<https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Renewable-energy-statistics-2024>

JAC汽车 (2023), “捷豹汽车推出世界首款钠离子电池电动汽车” <https://jacmotors.co.za/jac-motors-unveils-worlds-first-sodium-ion-battery-vehicle/>

江, P. (2023), “比亚迪将在徐州建设钠离子电池生产基地”, <https://cnevpost.com/2023/06/10/比亚迪将建钠离子电池基地徐州/>

KAIST (2024), “韩国科学技术院开发出仅需几秒钟即可快速充电的钠离子电池” https://news.kaist.ac.kr/newsen/html/news/?mode=V&mng_no=36310 (访问于2024年8月20日)。

李, W.-J.等.(2019), “普鲁士蓝类似物的化学性质、结构性质和储能应用”, 第15/32卷, 第1900470页, <https://doi.org/10.1002/sml.201900470> 小型

麦纳蒂, R., 威廉姆斯, E. (2023), “观点：为什么钠离子电池比人们预想的要花更长的时间”, <https://source.benchmarkminerals.com/article/opinion-why-sodium-ion-batteries-基准源>
需要比人们想象的要长时间 (访问于2024年8月20日)。

müller, c., 等. (2023), “影响高负载电极中硬碳可靠容量测量的因素”, 第6/11卷, 第e202300322页, <https://doi.org/10.1002/batt.202300322> 电池与超级电容器

NCBI (n.d.a), “PubChem 元素概览对于原子序数 3, 锂” 国家生物技术中心
, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Lithium> (访问于2024年8月20日)。 信息

NCBI (无日期b) “PubChem 元素摘要, 原子序数为11的钠” 国家中心
, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Sodium> (访问于2024年8月20日)。 生物技术信息

彼得斯, J. 等 (2016), “钠离子电池生命周期评估”, 卷 能源与环境科学
9/5, pp. 1744–51, 英国皇家化学学会, <https://doi.org/10.1039/C6EE00640J>

彼得斯, J., 等人. (2021), “基于全生命周期视角下钠离子电池的环境竞争力——一种针对电池化学的专业建模方法”, 第5/24卷, 第 可持续能源与燃料
6414–29, 皇家化学学会, <https://doi.org/10.1039/D1SE01292D>

PNNL (无日期), “电池类型”, <https://www.pnnl.gov/explainer-太平洋西北国家实验室>
文章/电池类型 (访问于2024年8月20日)。

里德, M. (2023), “钠离子电池：颠覆与征服？”, 伍德麦肯兹, <https://www.woodmac.com/news/opinion/sodium-ion-batteries-disrupt/> (访问于2024年8月20日)。

任文, 等. (2017), “通过表面蚀刻激活普鲁士蓝类似物的钠储存位点”, , 卷. 17/8, 第 4713–8 页, 美国化学学会
, <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b01366> 纳诺快报

Rho Motion (2024), “两辆钠离子汽车进入中国市场”, <https://rhomotion.com/罗姆运动>
news/liang-ge-liu-ye-chun-ju-huo-chu-zai-hen-zhou-de-shi-chang/ (访问于2024年8月20日)。

salehi, a. h., 等. (2021), “简便合成具有高性能钠存储性能的层状多孔Na₃V₂(PO₄)₃/C复合材料”, 第481卷, 第22882
8页, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228828> 电源学报

Šimić, Z., 等 (2021), “电池储能技术概述” *国际电气*
第12卷第1期, 第53-65页, <https://doi.org/10.32985/ijeces.12.1.6> *计算机工程系统*

宋, J., 等人. (2015), “用于制备高性能钠离子电池正极的六氟ometallates中间隙水的去除”, 第 137 卷/第 7 期, 第 26
58-64 页, *美国化学 美国化学学会志*
社会 <https://doi.org/10.1021/ja512383b>

Trading Economics (n.d.a), “锂 - 价格走势 - 历史数据”, Trading Economics 网站 <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium> (访问于2024年8月22日)。

Trading Economics (n.d.b), “纯碱 - 价格图表 - 历史数据”, 贸易经济学网站 <https://tradingeconomics.com/commodity/soda-ash> (访问于2024年8月22日)。

USGS (2023), 美国地质调查局, <https://doi.org/10.3133/mcs2023> 《2023年矿产资源摘要》

瓦希德, M. 等. (2018), “用于钠离子电池负极的硬碳：合成策略、材料性能和存储机制”, 第11期第3卷, 第
506-26页, <https://doi.org/10.1002/cssc.201701664> *化学SusChem*

王, X, 等. (2022), “用于稳定和低温钠离子存储的Na_{0.67}Ni_{0.2}Co_{0.2}Mn_{0.6}O₂微球正极材料的理性设计”, 第428
卷, 第130990页, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130990> *化学工程杂志*

魏, X等人 (2024), “钠离子电池P2-Na₂/3Ni₁/3Mn₂/3O₂正极材料的改性策略概述”, 第41卷, 第e01059页, <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01059> *可持续材料和技术*

Yadea (2025) “亚德纳推出钠电池电动两轮车, 引领电动出行行业革命” <https://yadea.com/news-and-events/news/Yadea%20Launches%20Sodium%20Battery%20Electric%20Two-Wheelers%2C%20Leading%20a%20Revolution%20in%20the%20Electric%20Mobility%20Industry> (访问于2025年9月9日)。

杨, Y. C., 等人. (2022), “储能电池最新技术发展” *东方*
第36卷, 第1432页, <https://doi.org/10.13661/j.cnki.电气评论>

赵, J., 等. (2013), “钠离子电池硬碳型负极材料的电化学和热性能” (第16届锂离子电池国际会议 (IMLB)), 第244
卷, 第 电源学报
752-7, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.109>
