



中国新一代清洁低碳技术展望





关于落基山研究所(RMI)

落基山研究所(RMI)，是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库。我们与企业、政策制定者、科研机构及创业者协作，识别并规模化推广能源系统转型解决方案，推动全球能源系统转型，践行1.5°C温控气候目标，创造清洁、繁荣的零碳共享未来。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、加州奥克兰及华盛顿特区设有办事处。

作者与鸣谢

作者

刘琦宇, 谭光瑀, 王广煦, 王喆

其它作者

李婷

作者姓名按姓氏首字母顺序排列。
除非另有说明, 所有作者均来自落基山研究所。

联系方式

刘琦宇, qliu@rmi.org; 谭光瑀, gtan@rmi.org

版权与引用

刘琦宇, 谭光瑀, 王广煦等, 中国新一代清洁低碳技术展望, 落基山研究所, 2023

鸣谢

本报告作者特别感谢以下来自企业和研究机构的专家对报告撰写提供的洞见与建议。

赵恒谊, 中国节能协会热泵专委会
张永杰, 宝武集团中央研究院

特别感谢ClimateWorks Foundation对本报告的支持。

本报告所述内容不代表以上专家和所在机构, 以及项目支持方的观点。

目录

导言 中国低碳清洁技术图景展望	5
第一章 迈向碳中和的“源动力”——中国动力电池技术现状及应用前景 8	
一、始于节能,盛于零碳——动力电池的前世今生.....	10
二、从技术到成本——动力电池的核心特性及发展趋势.....	11
三、新能源汽车——动力电池的关键应用场景	14
四、面向未来——动力电池的进阶之路.....	16
第二章 搭建建筑节能的“基石”——中国热泵技术应用现状及发展方向 17	
一、热泵:最具前景的低碳建筑供热技术.....	18
二、从现状到未来:掌握打开热泵市场的成功之钥	22
三、节能又节约:热泵的综合优势	30
四、挖掘潜力:洞察不同地域供热市场需求	23
第三章 铸造零碳钢铁的“核心”——中国直接电解铁矿石技术 的发展与展望	26
一、直接电解铁矿石——最具减碳潜力的颠覆性技术之一	28
二、聚焦直接电解技术的两种路线	28
三、中国直接电解铁矿石技术发展展望	30
第四章 积蓄零碳能量的“反应堆”——中国液流电池储能技术 的现状与前景.....	32
一、储能市场蓬勃发展,新型储能增长强劲	34
二、液流电池安全耐用,比较优势异军突起	36
三、液流技术百花齐放,全钒路线木秀于林	37
四、降本提效势在必行,市场引导亦不可少	38

导言

中国低碳清洁技术图景展望



2022年11月20日，联合国气候大会第二十七次缔约方会议（COP27）正式落幕，作为本次会议最具代表性的成果，“损失与损害”基金协议的达成不仅为发达国家和发展中国家在应对气候风险方面的进一步合作创造了新的平台，也再次将技术和投资对于应对气候变化和实现零碳转型的重要性推上了新的高度。

随着越来越多国家和地区陆续提出碳中和目标，针对转型路径和具体行动措施的分析和选择逐渐成为了各行业关注的焦点。由于碳中和目标实现的难度更高，对能源系统的挑战更大，在传统意义上政策和市场解决方案得到充分应用的基础上，全球应当也必须通过更多低碳清洁技术的创新和加速发展来充分挖掘零碳转型的潜力，在高效实现碳中和目标的同时，为市场创造新的增长空间。

国际能源署（IEA）近期发布的《世界能源投资报告》显示，在政府财政和可持续投资领域的支持下，自2020年以来，清洁能源投资的增长速度已经增加到了12%，远远超过2015-2020年的水平。不过由于受到疫情的影响，当前的投资增长很大程度上反映在了供应链成本的上涨以及劳动力、水泥、钢铁和关键矿物等材料的持续价格增长上。为了实现零碳转型，未来清洁能源领域的投资仍然需要持续加速才能满足减排的需求。

在碳达峰、碳中和宏伟目标的指导以及行业和市场的大力推进下，中国在清洁能源技术方面始终发挥着主导作用，其中2021年清洁能源投资总额达到了3800亿元，位居全球之首。特别是在可再生能源、电网和新能源汽车等领域，政策的支持和快速的技术研发迭代使得中国在这些领域不仅实现了自给自足，还通过大规模出口带动了全球能源转型。

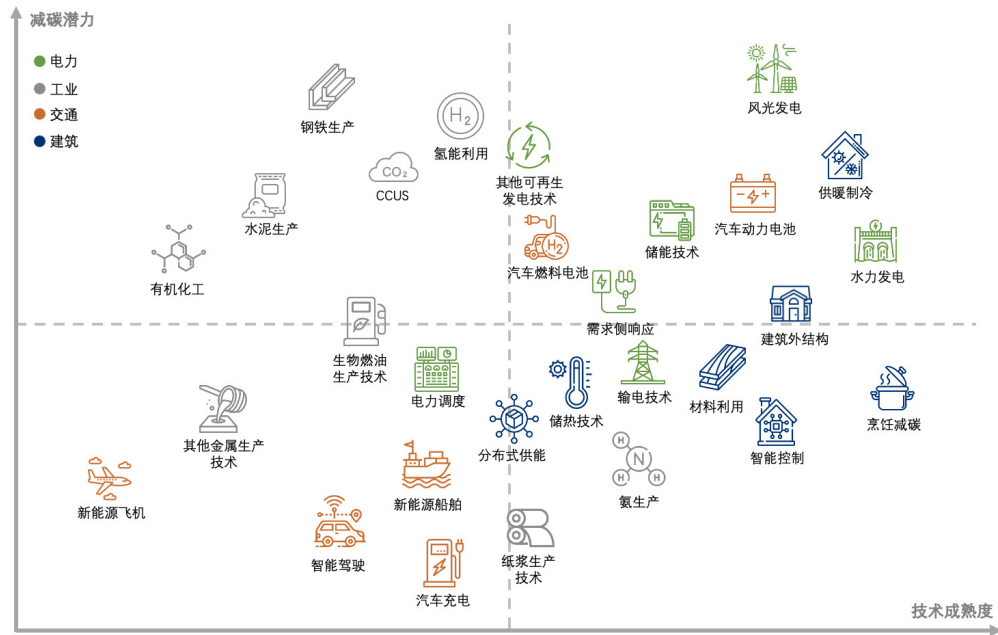
而另一方面，在零碳转型的情景下，当前清洁能源技术的发展规模和水平仍然远远不够。根据多家研究机构估算，中国碳中和目标的实现至少需要约100万亿元人民币的投资，其中大部分用于清洁能源和突创性减排技术等领域。尽管中国在过去的5-10年已经在可再生能源发电装机和新能源汽车等领域取得了突破性成就，但既有转型工作的持续发展以及储能、氢能、碳捕获和封存、柔性直流、车网互联等突创性技术的商业化和规模化仍然需要长期的投资和孵化。

为了帮助政策制定者、行业企业和投资者等利益相关方更加清晰地识别碳中和转型路径中各项清洁能源和低碳技术所发挥的作用，厘清不同技术的应用场景、核心成分、龙头企业、成本经济性和商业化应用时间，并定位各类技术加速发展的模式和所需的政策、投资支持，落基山研究所开展了《中国低碳清洁技术图景展望》的系列研究，希望在对未来中国零碳转型过程中需要的清洁能源和低碳技术进行系统性梳理的基础上，为不同利益相关方提供对技术发展方向和优化方案的建议。

在前期的基础性研究中，项目团队根据不同文献资料和信息综合分析，已经梳理出了国际上相对常见的约300项清洁能源和低碳技术，同时结合中国市场的实际需求，优选了电力、交通、工业、建筑等行业的数十项在中国更具发展前景的技术，并对各类技术的成熟度和碳减排潜力进行了综合评估（见下图）。



中国清洁能源和低碳技术成熟度及减碳潜力对比



在此基础上，本研究将持续对上述各项技术进行深入探索，并通过系列文章的形式逐一解析每项技术的特点、应用场景、成本经济性变化趋势、商业化应用的时间节点、主要利益相关方和加速推广的政策及投资建议等，力图通过系统性针对性的分析为行业阐明技术发展趋势，为企业提供技术应用场景和时间的参考，为政策制定者描绘加速技术突破的支持政策方向，为投资和金融机构呈现投资领域和规模的判断。

本报告包含《中国低碳清洁技术展望》系列文章前四篇的内容，分别为：

- 迈向碳中和的“源动力”——中国动力电池技术现状及应用前景
- 搭建建筑节能的“基石”——中国热泵技术应用现状及发展方向
- 铸造零碳钢铁的“核心”——中国直接电解铁矿石技术的发展与展望
- 积蓄零碳能量的“反应堆”——中国液流电池储能技术的现状与前景

希望从动力电池、热泵、电解铁矿石和液流电池储能这4项不同行业的清洁低碳技术出发，为加速行业低碳清洁技术的发展和應用提供参考和借鉴。研究团队将在后续持续发布其他技术种类专题的系列文章。

第一章

迈向碳中和的“源动力”—— 中国动力电池技术现状及应用前景



迈向碳中和的“源动力”——中国动力电池技术现状及应用前景

在碳中和的新纪元下，新能源汽车即将成为未来交通出行市场的主流，动力电池也因此顺理成章地成为了未来之路上的“动力之源”。正因如此，在当前动力电池技术蓬勃发展的初期阶段，关于其未来市场增长空间、技术性能、成本，特别是如何影响新能源汽车推广应用进程的讨论和关切也愈发热烈。作为《中国低碳清洁技术浅析汇编》的开篇之作，我们希望通过本文的分析和描述尽可能解答读者的上述疑问，并对动力电池技术未来的发展方向和所需要的支持进行简要梳理。关于动力电池技术的现状和应用前景，我们的基本观点如下：

- (1) 中国是全球最重要的动力电池市场，在碳中和目标的引领下，中国动力电池产销量将持续占据全球领先地位。
- (2) 过去10年，以锂离子电池为代表的动力电池在能量密度和成本两项特性上都已经取得了较为明显的突破，但仍然存在很大的增长空间。
- (3) 在当前技术发展趋势的基础上，动力电池技术能够支撑中国道路交通行业在2050年之前完成90%以上的车辆电动化转型工作，以乘用车为主；剩余10%左右以长途乘用车和中重型卡车为主的车辆，需要依靠电池技术的进一步突破或采用氢能等其他新能源技术、市场模式等才能完成转型。
- (4) 按照目前电池技术、基础设施和市场的发展速度，传统液态锂离子电池在2025年左右就能够满足城市内通勤私家车、公交车、网约车和出租车等车辆类型的全面电动化转型需求，届时这些车辆的总拥有成本将低于同等规格燃油车。
- (5) 钠离子电池、固态电池等新型电池技术将在加速车辆电动化转型中发挥重要作用，2030年后动力电池市场会呈现液态锂离子电池、固态电池和钠离子电池共存的局面。
- (6) 长期来看，动力电池产业具有广阔的增长潜力和前景，超前投资会加速新型技术的市场化进程，并可能引领整体电池和新能源汽车行业的发展。
- (7) 动力电池产业链是一个庞大的系统，其长远发展不仅需要多维度全领域的政策支持，也需要尽快有效地进行其产业链上下游的联通以及循环经济和全生命周期体系的建立，尽快在自身生产和末端处理环节实现彻底的零排放。

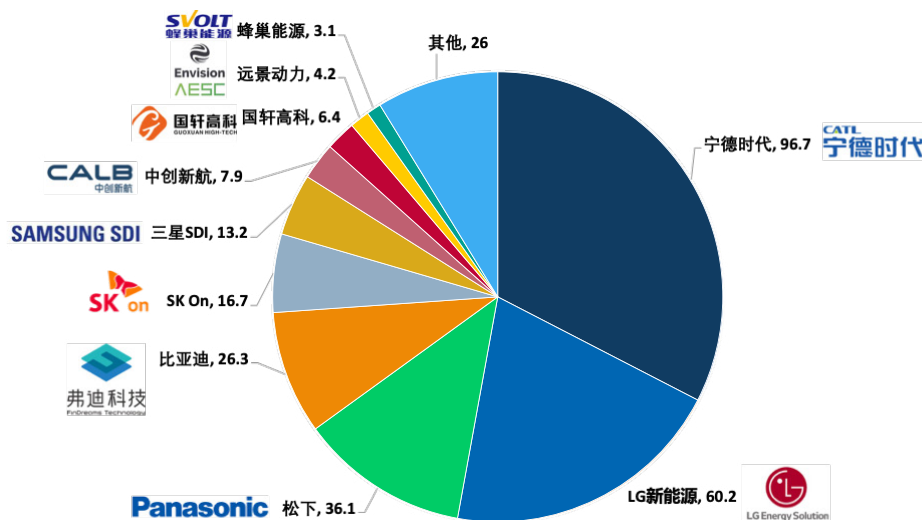
关于上述观点背后的逻辑和分析，请您继续阅读正文部分的内容，也欢迎您对感兴趣的内容和话题与我们进行讨论。

一、始于节能，盛于零碳—动力电池的前世今生

动力电池指被应用于交通领域、为交通工具提供动力的电池，是近年来新兴的电池种类。电动汽车和动力电池的发展历史可以追溯到19世纪，但由于受到电池性能、基础设施以及燃油汽车的快速发展等因素的影响，动力电池和电动汽车不得不逐渐退到了幕后。直到20世纪80年代，能源危机的出现大幅推进了电动汽车和动力电池研发的进程，而21世纪特斯拉、松下和宁德时代等行业先驱更是进一步推动了动力电池行业爆发式的增长。在新时代中国碳达峰、碳中和等低碳转型目标的大背景下，动力电池的应用前景已经不再局限于电动汽车和交通电气化，以动力电池技术为基础的化学储能也将成为新型电力系统的重要组成，为清洁能源的稳定、安全并网打好基础。因此可以说，以锂电池为代表的动力电池技术已经成为了中国能源转型和实现双碳目标的核心技术之一。

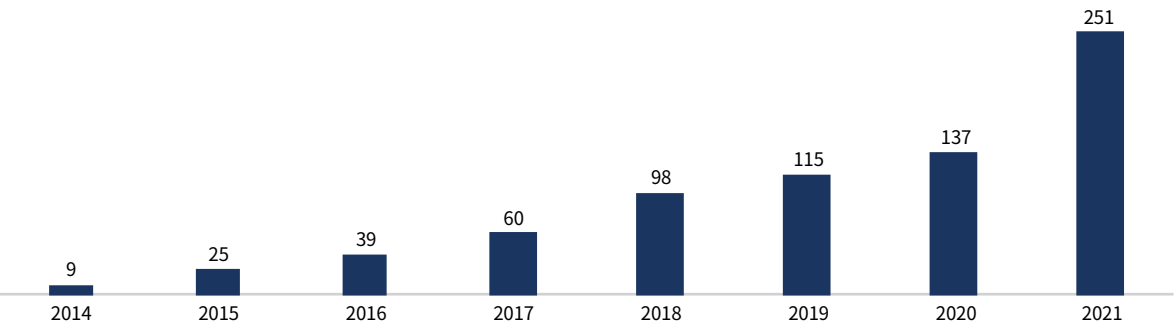
中国目前是全球最大的新能源汽车市场，2021年新能源汽车年销量已经超过了全球总量的60%，较为完善的基础设施布局、充分的政策支持以及成熟的动力电池产业链功不可没。自2015年起，我国公交车、出租车、轻型物流车、私家车等车型先后掀起了电动化的浪潮，2021年，在我国碳中和目标以及市场用户需求的双重推动下，11月电动汽车市场渗透率首次超过了20%。在电动汽车爆发式增长的背后，中国动力电池产业稳固而扎实的行业领军地位发挥了重要作用，2021年中国共生产锂电池219.7GWh（包括中国本土电池厂以及外国企业在中国建厂），占比超过全球总装机量的80%，而国内新增动力电池和储能电池装机分别达到了154GW和1.87GW，成为了世界动力电池生产和消费的主力军。在2021年全球动力电池装机量排名中，中国企业占据了装机量前10中的6个席位，其他名次上的外国企业也大多在中国设立了生产工厂。

图表 1 全球动力电池装机量（GWh）



未来几年中，整个电动车市场仍将呈现加速扩张的态势，同时储能电池也将迎来大规模的应用，因此BNEF预计到2030年时全球动力和储能电池需求将达到2.8TWh，是2021年的10倍。即便是在全球新能源汽车和动力电池产业全面蓬勃发展的趋势下，中国动力电池到2030年的市场份额仍然能保持在50%以上，约合1.5TWh左右。

图表 2 全球动力电池装机量逐年增长(GW)



二、从技术到成本—动力电池的核心特性及发展趋势

动力电池出现已经上百，而现代锂离子电池的基本原理则是在上世纪90年代形成的理论框架。以锂离子电池为例，其基本工作原理就是使锂离子在正极和负极分别进行镶嵌和脱出，以此形成电流来实现充放电。但即便原理相同，锂离子电池实际产品的具体设计思路仍然多种多样，制造厂商都极力在电池的化学材料、生产工艺、电池管理系统及其组装模式等方面加以尝试和创新，以此进一步提高电池的综合性能。

图表 3 不同动力电池产品及特性实例

电池名称	制造厂商	化学材料	特殊工艺	电池管理及组装	性能特点
4680电池	特斯拉/松下等等	高镍三元正极 + 硅基负极	无极耳	电池车壳设计(Cell to Chassis)	高能量密度
刀片电池	比亚迪	磷酸铁锂正极 + 石墨负极	叠片	无模组刀片设计	高安全性

在所有零部件和生产工艺中，对电池性能影响最大的因素是电池化学材料的选择。正极材料方面，经过多年的淘汰选择后，目前主流的动力电池种类通常使用两大类正极材料：磷酸铁锂正极，和三元（三元指镍锰钴NMC或镍钴铝NCA这三种金属的氧化物以不同比例混合而成的正极材料）正极。磷酸铁锂的优势在于成本低、寿命长、安全性好。三元的优势在于能量密度高、低温性能好。两者互为补充，占领了几乎全部的电动汽车市场。负极方面，大多数电池厂商都选择基于石墨的负极材料，同时也有头部厂商已经开始向比容量更高、技术难度也更大的硅基负极迈进。

图表 4 市场常见的电池电极化学材料

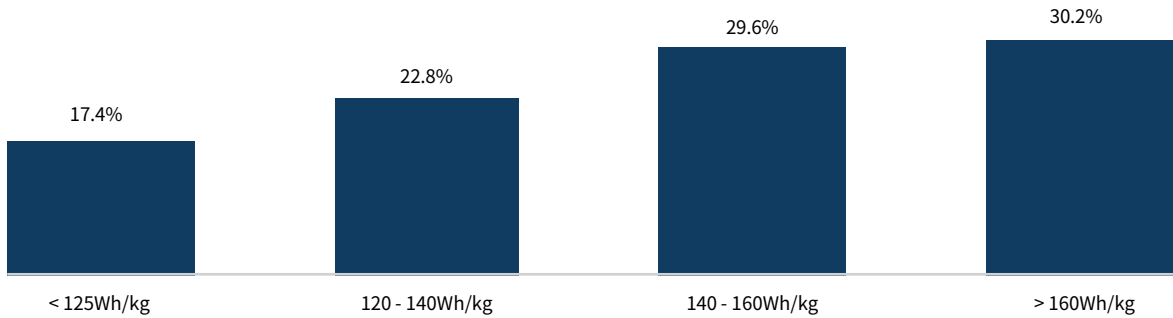
常见正极材料	磷酸铁锂	常见负极材料	石墨
	镍锰钴		掺硅石墨
	镍钴铝		硅基负极

电池的性能有多种影响因素，如安全性能、充电速度、寿命等，其中能量密度和成本影响着动力电池的应用前景。¹前者决定了新能源汽车的续航能力，是定位新能源汽车对燃油车使用场景替代能力的核心，后者关系到新能源汽车价格，影响着新能源汽车的市场吸引力和推广应用进程。两者的结合直接反映了新能源汽车的性价比，是交通行业电动化转型进程的重要影响因素。

能量密度

通常来讲，动力电池的正负极材料、生产工艺以及内部系统各元件间的相互作用模式决定了其能量密度的大小。过去十几年中动力电池能量密度的发展大致可以分为两个阶段。2010到2018年，动力电池市场中盛行着“唯续航论”的信念，部分厂商把能量密度作为衡量电池性能的最重要标准。在这一阶段，磷酸铁锂和三元锂电池以优越的整体性能，从锰酸锂、钛酸锂甚至镍氢电池等一众化学材料里脱颖而出，成为最主流的动力电池类型，电池平均单体能量密度也从100Wh/kg上下提升到170Wh/kg（磷酸铁锂）和250Wh/kg（三元）左右。²2018年之后，由于电池材料和制造工艺趋于稳定，金属材料价格不断提高，能量密度的突破性提升的技术难度逐渐加大，以及由电池导致的车辆事故频发等原因，动力电池的发展重心逐步向安全、廉价、长寿等方面转移。这一阶段电池能量密度的增长明显放缓，2021年时单体电池市场平均密度约为180Wh/kg，电池组约为144Wh/kg。头部厂商在努力完善和挖掘现有动力电池技术的同时，也开始逐步着眼于下一代电池技术的研发，来进一步突破能量密度上的瓶颈。

图表 5 2021年12月我国新产电动汽车电池组能量密度分布



来源：北极星储能网

但为了实现交通行业全面电动化和零碳转型的目标，动力电池的能量密度必须进一步增大，以满足不同车型多样化的使用需求。从2017年开始，国家在新能源汽车购置补贴的申领标准中已经开始容纳动力电池能量密度相关的限值要求。2021年底，工信部修订文件《锂离子电池行业规范条件》，进一步提高了电池新建产能的最低能量密度要求，其中三元锂电池提高到单体电池能量密度 $\geq 210\text{Wh/kg}$ ，电池组能量密度 $\geq 150\text{Wh/kg}$ ，其他锂电池提高到单体电池能量密度 $\geq 160\text{Wh/kg}$ ，电池组能量密度 $\geq 115\text{Wh/kg}$ 。类似的，由工信部支持的报告《节能与新能源汽车技术路线图2.0》中预测，到2030年时，普通型电池将实现单电芯250Wh/kg，高端型将超过400Wh/kg，相比2020年提升超过40%，将进一步增加新能源汽车在高端乘用车和轻、中型物流车中的竞争力。

¹ 能量密度，即单位重量下的电能，是最常用来衡量电池性能的指标。电池能量密度越大，车辆可携带的电池就越多，续航里程就越远，对充电网络的依赖就越低。

² 《车用动力电池产业发展促进政策研究报告》中国汽车技术研究中心 2013

图表 6 锂离子电池性能与成本预测

	目前平均水平	2030年预测
电池单体价格	0.65 元/Wh	< 0.4 元/Wh
电池组价格	0.87 元/Wh	> 0.54 元/Wh
电池单体能量密度	180 Wh/kg	> 250 Wh/kg
电池组能量密度	144 Wh/kg	> 210 Wh/kg

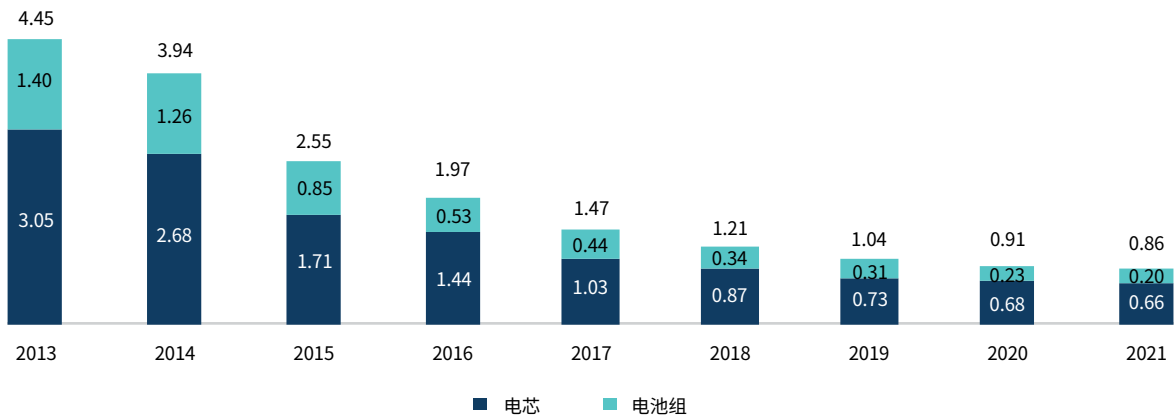
在目前的电池技术框架下，电池厂商可以从改进正负极材料、电芯设计等方面入手改善电池的能量密度，但由于受到电池材料化学特性的限制，传统液态电解质锂离子电池的单体能量密度很难超过350Wh/kg，因此为了实现新能源汽车续航性能上的突破，动力电池厂商已经开始将研发力量逐步投入到突创性新型电池技术当中。目前行业内普遍认为前景较为乐观的是固态电池技术，固态电池使用固态电解质取代液态有机电解液和隔膜，在机械强度、安全性、能量密度等方面都更为出色，其理论能量密度的最高值能够达到700Wh/kg，是目前锂离子电池的2倍。

成本

动力电池及其系统的成本通常是新能源汽车成本的最主要组成部分（40%左右），而在动力电池中，材料成本和研发投入则构成了其主要成本要素。随着新能源汽车产业规模的不断扩大，动力电池的研发成本得到充分的稀释，总成本也因此快速下降。根据北极星储能网数据显示，2010年，锂离子电池的单体平均价格和电池组价格分别在5元/Wh和7元/Wh左右，到了2020年，锂电池单体价格和电池组的平均价格分别为约0.65元/Wh和0.87元/Wh，相比10年前下降了近90%。

然而，目前的动力电池价格水平与实现新能源汽车与燃油汽车总拥有成本平价（购买和使用电动汽车的总成本与燃油车刚好相等）仍然有一定的差距。一般而言，动力电池电池组的价格需要至少达到0.65元/Wh才能满足电动汽车与同等规格的燃油汽车成本平价的目标。考虑到新能源汽车在续航能力、充电便利性等方面存在一定的劣势，且物流车特别是长途运输重型卡车等商用车对成本的敏感性更高，动力电池需要进一步拓展成本下降的空间，才能更好地满足电动化转型的需求。

图表 7 储能、新能源汽车应用场景下按容量加权平均计算的电池价格(元/Wh)



来源: BloombergNEF

可以预见的是，未来几年内锂离子电池价格下降趋势将有所放缓。一方面，在过去十年间规模效应是成本下降的主要驱动力，但随着规模效应带来的效益逐渐减少，未来锂离子电池成本削减将主要依赖正极材料、生产工艺、电芯设计等方面上的技术创新。另一方面，受到供需关系、地缘政治以及资源分布等多方面因素的影响，电池原材料的价格从2021年开始持续上涨，钴、镍、锂等金属价格都翻了数倍，受此影响2022年电池价格也有所回升。尽管长期来看金属价格不会持续上涨，但仍然很有可能保持高于2020年价格的高位状态，电池厂商也将因此承担更大的成本压力。

除了探索锂离子电池的成本缩减空间外，部分厂商也在着手研发下一代低成本电池，例如呼声很高的钠离子电池。钠离子电池将锂离子电池中的锂替换为钠，原理与锂离子电池基本一致，尽管能量密度略低，但由于钠金属资源丰富，钠离子电池的成本将更有优势，且更不易受到市场、政治的影响。产业成熟之后，钠离子电池的材料成本可以比锂离子电池低30%左右。

三、新能源汽车—动力电池的关键应用场景

作为动力电池最主要的功能载体，新能源汽车推广应用的进程决定着动力电池发展的方向和前景，而动力电池技术水平的高低则直接影响着新能源汽车的性能和市场接受度。由于应用场景不同，各种类型的新能源汽车对动力电池的性能和成本要求存在一定的差异。例如，城市内日常通勤的车辆对新能源汽车的续航里程要求相对较低，但对成本相对敏感，实现电动化转型难度较低；而重型长途卡车由于对配送里程和经济性较为敏感，需要动力电池在能量密度和成本两方面都发展到更加成熟的阶段才能实现新能源替代。

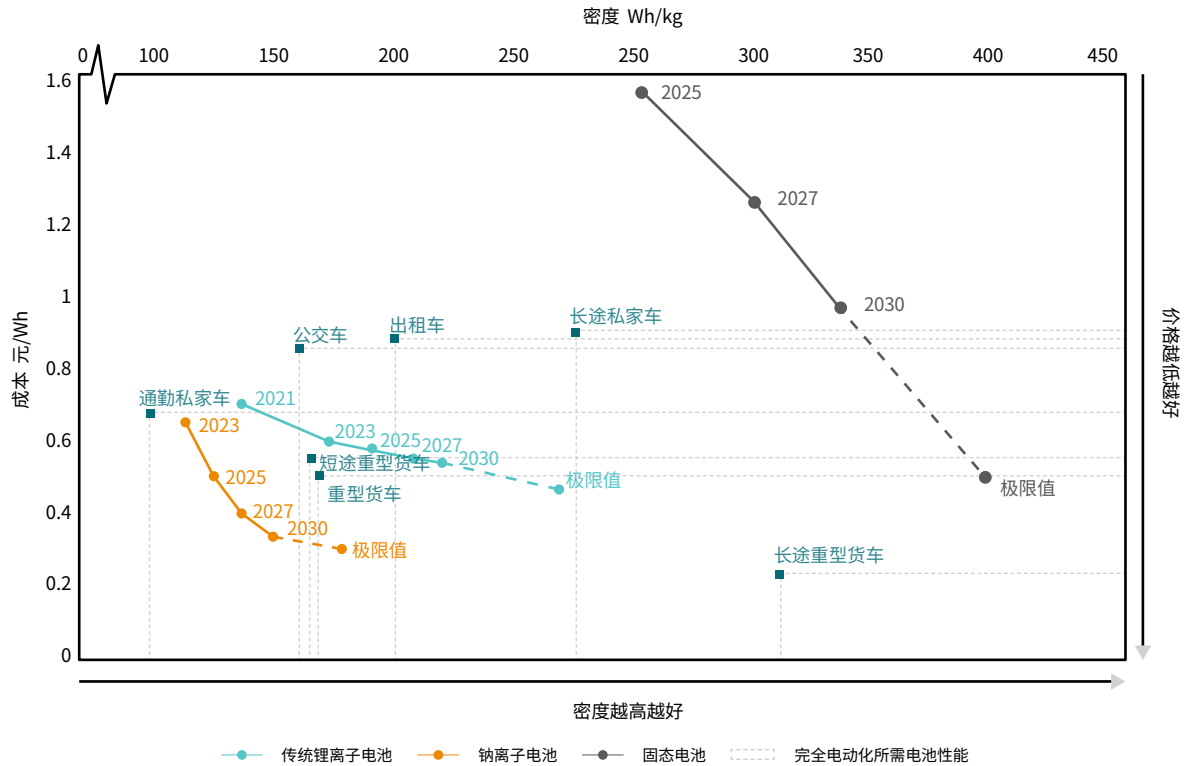
在这样的情况下，动力电池技术的发展方向和前景不仅会受到原材料和科技水平的影响，也与其市场定位和发挥作用的场景密切相关。因此在分析不同动力电池技术路线的性能和成本变化趋势的同时，系统性识别以新能源汽车为核心的动力电池应用场景、不同车型的电动化转型需求以及技术路线，对明确动力电池的技术方向和发展趋势至关重要。

为了更加清晰地展示动力电池未来的应用场景潜力，以及动力电池在发展到怎样的阶段和时期才能满足各车型电动化的基本性能要求，我们计算了各车型新能源车和燃油车的总拥有成本（即一定使用年限内购置成本、燃料成本和维护等成本的总和），并观察了在动力电池不同的能量密度和成本状态下新能源车和燃油车总拥有成本对比的变化。同时，结合对动力电池能量密度和成本变化趋势的预测，能够帮读者呈现出动力电池在满足车辆全面电动化转型目标过程中需要达到的技术性能水平，以及未来的核心应用场景。³

在进行模拟计算的过程中，我们假设各车型全面电动化转型的条件为新能源车总拥有成本低于燃油车总拥有成本，且能量密度和成本两个影响因素之间不具备显著的替代关系，需要尽可能同时满足转型条件。由此得出的分析结果显示如下图所示（图表8）。在所有车型中，城市内的通勤乘用车（主要包含通勤私家车、出租车、网约车）由于日常行驶里程较短，实现电动化转型对电池的能量密度和成本综合要求最低，因此这一领域将是未来锂离子电池最普遍的应用场景。同时由于钠离子电池具备较大的成本下降空间，在中远期同样具备占据一定市场份额的潜力。考虑到性价比仍然是这一场景下车辆车型推广应用效果的最主要影响因素，进一步通过技术研发和规模化拓展能量密度，降低成本，并兼顾安全性是该场景下动力电池突破的核心。

³ 电池技术进步仅仅是促成车辆电动化的因素之一，换电等其他充电模式的应用能够大幅缩减电动汽车的充电时间和对单次充电续航的，同样可以加速新能源汽车的推广应用。本文重点分析动力电池技术对电动化进程的影响，因此对充换电等其他技术领域的分析相对有限。

图表 8 动力电池性能变化趋势及不同车型对动力电池性能需求分析



城市公交车与城市内通勤车辆类似，但使用场景更加固定。电动公交车在过去几年中发展速度最快，但这主要是政府推动和大力补贴的结果，在过去几年中电动公交车的成本仍然高于燃油车。公交车的优势在于行驶路线、时间和频次都有较为清晰的计划，不确定性非常低，同时充电的时间和位置也相对容易安排，这就降低了车辆对电池容量的要求。考虑到公交车对电池电量的要求相对较高，下一代磷酸铁锂电池将在该场景中发挥重要的电动化转型支撑作用。

城市物流、轻型货车和短途重卡的应用场景类似，由于载货汽车耗电量更大，因此两者对于动力电池也提出了更高的要求。短途重型货车主要负责港口、园区物流、短倒等场景下的货运，尽管车辆载重大、耗电高，但行驶距离较短，对电池能量密度的要求并不高，但对电池成本和体积的要求比较苛刻，因此一定程度上实现技术突破的锂离子电池更适合该场景的电动化转型应用。

电动化难度最大的是有长距离出行需求的私家车和中长途重型卡车，两者在锂离子电池的时代均无法实现新能源车辆的成本经济性，可能需要其他动力电池或新能源技术帮助实现零碳转型的目标。随着研发的不断深入，固态电池在2030年左右可以接近达到满足长途出行私家车电动化需求的能量密度和成本水平，但依然无法完全解决长途重型卡车的问题，因此可能需要氢燃料电池的补充和支持。

总体来说，动力电池未来的应用场景将集中在城市内使用的乘用车以及用于短距离运输的商用车（公交车、轻型物流车、港口矿山泥头渣土重卡、短倒货运重卡等）。长途私家车由于电动化难度较高，很难压缩成本，未来可能成为高端电动车的代名词。长途重卡电动化难度最高，很难单纯依靠电池技术进步实现电动化。从电池技术分类的角度来看，固态电池将主要应用于高端乘用车和中长期短途重卡及部分轻型物流车领域；钠离子电池虽然在能量密度方面与锂离子电池存在一定的差距，但其成本下降速度更快，在未来通勤私家车领域大有可为；而液态电解质锂离子电池将覆盖其他乘用车和商用车。

四、面向未来—动力电池的进阶之路

动力电池未来发展的方向十分明确，即在进一步开发和突破现有电池的能量密度并降低成本的同时，积极探索钠离子电池、固态电池等新型电池技术的发展空间。由于市场基础大、性能相对稳定，短期内液态锂离子电池仍然将是新能源汽车加速推广的主要根基，因此2030年之前持续开发锂电池的技术潜力是确保城市内车辆逐步向全面电动化过渡的重点。与此同时，其他新型电池技术如果能逐渐加速其商业化进程，也将成为解决长距离中重型车辆电动化转型难题的重要手段。

除此之外，动力电池本身的全生命周期优化管理的重要性也将逐步凸显。一方面，由于动力电池的生产对金属原材料开采和进口的依赖性较强，国际地缘政治局势和金属材料市场的发展变化增加了动力电池产业的不确定性。短期来看，对采矿业的依赖限制了动力电池的产能扩张，也加剧了金属市场的供给压力和价格波动；长期来看，虽然金属矿产储量足够支撑新能源汽车未来数十年内的发展，但逐渐枯竭的资源仍然会导致开采成本逐渐升高，对动力电池和新能源汽车市场产生不利影响。另一方面，废旧电池的回收和处理创造了缓解上游原材料不足等问题的机遇，但同时也增加了环境污染的风险。由于目前动力电池的回收处置的产业规范尚不明确，没有得到妥善处理的废旧电池在报废过程中会消耗大量能量，并有可能造成环境污染。如何充分利用报废动力电池中的金属材料，通过循环经济清洁回收和再利用控制对环境的影响，同时将回收资源用于新电池的生产，缓解金属材料供给的压力，实现自身全生命周期零排放，将成为动力电池行业长远发展的关键。

综上，动力电池产业具备广阔发展前景，对于中国实现碳中和目标有重要价值和意义。未来的10-20年内，动力电池在技术性能方面仍将快速进步，成为引领中国新能源汽车大规模推广应用的基础。但动力电池发展仍受到原材料、资金、技术等多方面因素的影响，要充分发挥其作用，就必须建立良好的政策和市场环境，同时完善其全生命周期产业链。这其中既包括持续推进新能源汽车市场的发展，不断提高对电池能量密度的要求，也包括明确不同动力电池技术在新能源汽车各车型和使用场景中的需求和发展阶段，完善充电基础设施的配置，还包括建立电池全生命周期管理体系，明确电池回收责任，加强回收再利用，打通电池生产装配企业、用户、回收企业之间的信息屏障，保证退役电池可追查、可收集、可回收。

第二章

搭建建筑节能的“基石”—— 中国热泵技术应用现状及发 展方向



搭建建筑节能的“基石”——中国热泵技术应用现状及发展方向

作为人类“衣食住行”需求的重要载体，建筑满足了人民日常生产生活的大部分用能需求。2021年，中国建筑部门运行阶段二氧化碳排放量高达21.3亿吨，约占全国碳排放总量的20%，推动建筑行业的清洁能源替代和能效提升也因此成为了实现碳中和目标的关键。目前中国建筑日常运行过程中，约60%的能源消费来自采暖、热水和制冷。热泵技术作为建筑减碳最具前景的技术之一，能够有效通过电气化和效率提升等方式大大降低传统供热和制冷方式产生的能耗和排放，也是未来建筑行业向零排放转型过渡的最重要解决方案之一。由于热泵技术本身已经相对成熟，我们将从成本经济性和具体适用场景的角度在本文中对各类热泵产品竞争力和技术方向和中国各地区发展潜力进行简要梳理，希望帮助读者进一步了解热泵技术在中国的现状，定位下一阶段应用和推广的方向。我们的基本观点如下：

- (1) 热泵是建筑领域节能减碳的最佳方案之一。预计到2050年，在零碳情景下中国热泵占建筑采暖和热水供热的比例可达60%。热泵技术有效利用环境中的低温可再生热源，替代了传统的化石能源燃烧供热。此外，随着电网进一步脱碳及热泵性能提升，热泵技术的减碳潜力将进一步增强。
- (2) 在各类热泵中，空气源热泵占据90%以上市场份额为绝对主流，水地源热泵需在合理规划和规范管理的前提下因地制宜发展。此外，吸收式热泵技术的应用潜力主要在工业和电力余热利用供暖方面。
- (3) 在经济性分析中，部分热泵产品的综合成本已具备与传统供热产品相替代的竞争力，但由于初始成本较高、认知度不足等问题，仍需更强的政策激励来推广热泵。
- (4) 考虑到中国幅员辽阔且各地区气候条件差异较大，各地区应当因地制宜选择适合的热泵技术。例如，使用吸收式热泵替代原有集中供暖的化石燃料热源较为适合北方集中供暖地区；而商用或自用分布式热泵产品则更适用于北方分布供暖区和南方夏热冬冷地区。

关于上述观点背后的逻辑和分析，请您继续阅读正文部分的内容，也欢迎您对感兴趣的内容和话题与我们进行讨论。

一、热泵：最具前景的低碳建筑供热技术

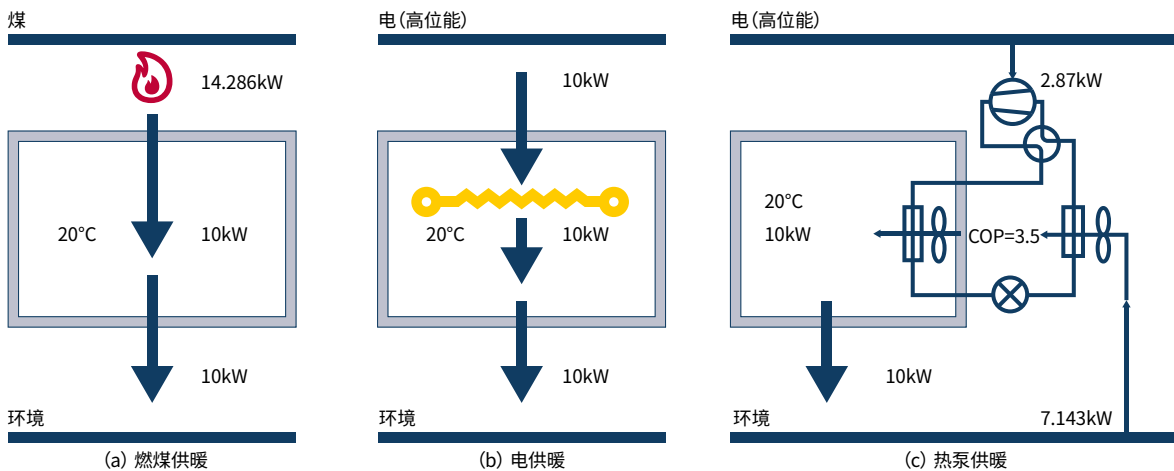
热泵技术在建筑低碳发展领域备受关注，其在采暖和热水两大建筑运行运用场景中对于传统化石燃料燃烧或电力直接供热的替代具有巨大的节能减碳潜力。在传统的供热方式中，热量遵循自然流动方向，即从高温侧（热源）流向低温侧（需求侧），通常需要通过燃烧化石能源的方式先释放热量制造高温热源，再向需求侧传递热量。这一过程中，热量通常来自于非可再生能源，造成了大量的碳排放；此外，化石能源的燃烧温度较高，通常在500摄氏度以上，远高于供热实际所需的温度（例如地暖热水温度通常不高于60摄氏度），造成了不必要的浪费。与之相比，利用制冷剂的相变特性，热泵设备可以从低温热源（如空气、浅层地热等）吸收热量并释放到温度相对较高的需求侧⁴。

相比传统的燃烧供热方式，热泵的节能减碳潜力体现为两方面：一方面，热泵通常由电力驱动，而在电网逐步脱碳的过程中可再生能源发电占比预计将逐步提高，供热热源将极大减少对化石燃料的依赖；另一方面，热泵所提供的热量大部分来自外界自然环境，大幅提升供热效率的同时还使得环境中的可再生热能⁵得到了有效利用。也因此，热泵技术在中国多省已被列入可再生清洁能源范畴。除了可以满足建筑的供热需求之外，热泵还可以由制热工况切换成制冷工况，在夏天为建筑制冷。

热泵的节能减碳潜力分析：

从节能的角度说，热泵相较于燃气燃煤以及普通电直热的供暖设备都有明显的优势。以室内供暖为例，见图表 9，若向室内供应 10kWh 热量⁶ 维持室温 20℃，燃煤供暖需要消耗约 14kWh 化学能（燃煤效率约 70%），电阻加热器直接加热室内空气，需要供电能约 10kWh，而电能驱动热泵只需要约 3kWh 电能，其余约 7kWh 的热量则由空气中的低温热能转化而来（热泵性能效率 COP⁷ 约 3.5）。

图表 9 不同供暖方案示意图



来源：中国节能协会热泵专业委员会，热泵助力碳中和白皮书2021

4 热泵工作的简单原理：通过低沸点“冷媒”物质在蒸发器中汽化吸热吸收环境中的热量，然后通过压缩机加压升温，流动至冷凝器中去液化放热，从而实现为用户侧室内空气或水箱加热，最后通过节流阀减压流入蒸发器重复这一过程。

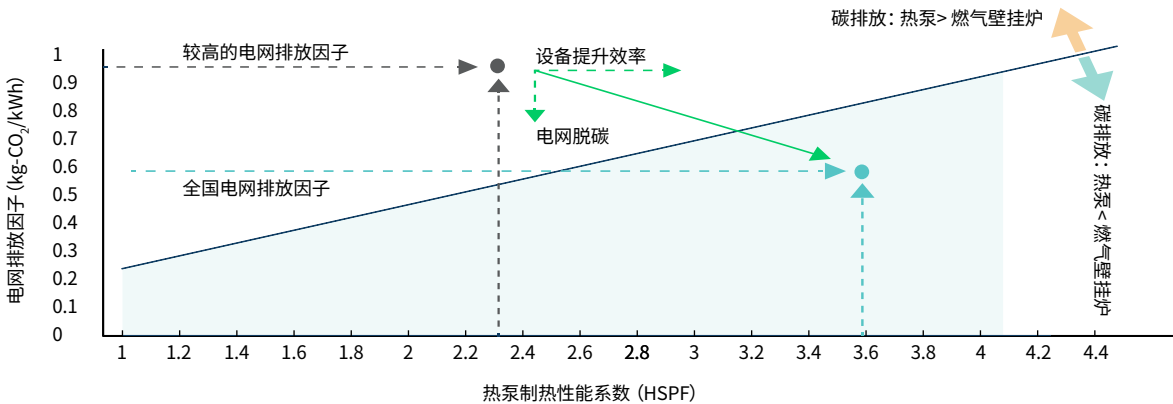
5 由于环境中的热能也主要来源于太阳、地热等可再生热源，因此也被纳入可再生能源的范畴。

6 这里及下文中用kW作为单位的热量指制热量，制热量是指空气调节系统在制热工况下或热水制备系统在单位时间内所提供的热量值的总和，通常以W、kW为单位。

7 COP：性能系数 (coefficient of performance)，用于衡量热泵效率，等于热泵系统所能实现的制热/冷量和输入功率的比值。

从减少碳排放的角度，由于热泵通常为电能驱动，热泵的碳减排潜力主要取决于热泵自身的性能效率以及电网的二氧化碳排放因子。我们以燃气壁挂炉供暖的二氧化碳排放作为对比进行分析研究⁸，得出了如图表10所示的结论：由热泵的热性能系数和地区的电网排放因子交汇找到的点，如果在黑色斜线下方（绿色阴影区域），则表示热泵较于燃气壁挂炉有减碳潜力，反之，热泵则会造成更多的碳排放。假如热泵的制热性能系数（HSPF）为3.5，按照生态环境部2022年公布的全国电网排放因子0.5810kg-CO₂/kWh计算，则热泵已经具备了相较燃气壁挂炉的减碳潜力。热泵制热性能系数的进一步提升，以及电网排放因子的进一步降低则能够帮助继续强化热泵的减碳能力。因此综合考虑热泵的性能效率和电网清洁程度，短期来看，在可再生电力丰富的地区和长江以南的夏热冬冷地区使用热泵能够获得更加明显的减碳效果；长期来看，随着全国范围的可再生电力迅速增长，电网排放因子将进一步降低，热泵的减碳潜力将逐渐被充分挖掘，且将愈发明显。

图表 10 不同供暖方案示意图



来源：案头研究

热泵的分类：
最常见的分类方式是以环境低温热源的来源分类，可以分为空气源热泵、地源热泵和水源热泵，分别以室外空气、地下常温土壤和地表或地下水为热源。此外，以实现热量流动的方式分类，可分为主要以电力消耗为主的蒸汽压缩式热泵和直接以热能代替电能作为主要驱动的吸收式热泵。

在中国热泵市场中，空气源热泵产品占据绝对主导地位。据产业在线数据统计，2021年中国空气源热泵（含天氟地水）行业销售额约238亿元，占总体热泵市场的约96%。与水地源热泵相比，空气源热泵受地理条件限制较小、初始投资也较少，从具体产品来看用于建筑供暖和热水的空气源热泵主要包括以下几类（见图表11）。

图表 11 空气源热泵产品对比

功能	品类	地区	标准号	特点描述	代表厂家
供暖	低温空气源热泵	不限北方为主	GB/T 25127	热水(辅以冷水)机组, 主要替代传统燃煤/气锅炉	
	常温空气源热泵	南方地区	GB/T 18430	冷水(辅以热水)机组, 可同时替代制冷空调和电/燃气暖气/地暖	
	低温热泵热风机	北方尤其高寒地区	JB/T 13573	加热迅速, 抗冻性强, 造价较低, 舒适度较差	
热水	空气能热水器	不限南方更佳	GB/T 23137	价格较高, 水箱体积大, 可替代传统电/燃气热水器	

来源：案头研究

8 研究部分数据参考了同济大学龙惟定于2022年发表在暖通空调杂志的文章《碳中和城市建筑能源系统》

而水地源热泵在实际运行的过程中相比空气源热泵显著表现出效率高、耗电低、噪音小等优势。虽一度由于不规范安装施工导致土壤或水体污染，但近年来在城市大型示范项目的因地制宜规范开发运行中，水地源热泵的发展也不容忽视。水地源热泵品牌集中度相对较低，主要原因是早期发展准入门槛低。但随着市场规范化和各主流品牌的产品延伸，市场品牌整合度近年有所提升，主要的内外资品牌包括美国特灵、美国约克、清华同方、山东科灵等。

吸收式热泵可以有效回收利用低温热源，广泛用于工业、电力等行业的余热回收应用。因此，在利用区域内或者跨区域余热资源实现为建筑提供供热方面具备巨大潜力。吸收式热泵的采购方一般为企业和机构，提供这类产品的热泵品牌与压缩式热泵类似，如美国约克、清华同方等。

二、从现状到未来：掌握打开热泵市场的成功之钥

热泵技术在运行耗能方面的表现相较于传统供热方式优势明显，但由于消费者对产品了解不足以及早期介入市场时成本偏高，目前热泵在建筑供热方式中渗透率仍然不高。但在产品成本竞争力增强和建筑行业降碳趋势的推动下，作为可再生能源技术的热泵被广泛认为是最具增长前景的清洁供热方案之一。

据IEA测算，2020年全球热泵供暖设备存量约为1.8亿台，占总供热需求的7%，在本世纪中叶实现零碳情境下，2030年将达到约6亿台。按此推测，2050年前全球热泵存量将达到约18亿台，热泵占总供热的需求约为50%，其中中国设备保有量约占全球的30%。落基山研究所预计到2050年，在零碳情景下中国热泵占建筑采暖和热水供热的比例可达60%。

从热泵的应用场景上看，中国各地区当前的供热条件和供热需求不尽相同。目前热泵供暖产品的主要需求包括新建或翻修住房供暖设备自采、“煤改电”和地产开发商精装集采等。据中国节能协会热泵专委会介绍，以空气源热泵水机为例，其中消费者自行采购的需求约占70%，主要来自南方夏热冬冷地区和少部分北方地区，一般通过热泵经销商零售渠道；“煤改电”需求约占20-30%，为政府统一采购；而地产开发商集采目前仅占5%-10%，但呈显著上升趋势。随着“煤改电”的政策窗口期接近尾声，零售和开发商将是热泵企业最应重点进攻的渠道。

影响热泵购买决策最重要的因素是成本经济性和产品适用性。从消费者角度，对比热泵与替代产品的成本是首要考量。此外，热泵能否在建筑中适用则需考虑地理环境、施工条件、使用习惯等具体因素。需要打通市场，除了因普及度不高导致用户对热泵了解不足这一因素外，经济性和适用性都是应该突破的重点。

三、节能又节约：热泵的综合优势

当分析部署热泵的经济性时，我们需要关注初始成本和运行成本两个方面，其中初始成本由设备费用和安装费用等构成，对于供暖和热水的热泵产品而言，影响费用因素主要包括：

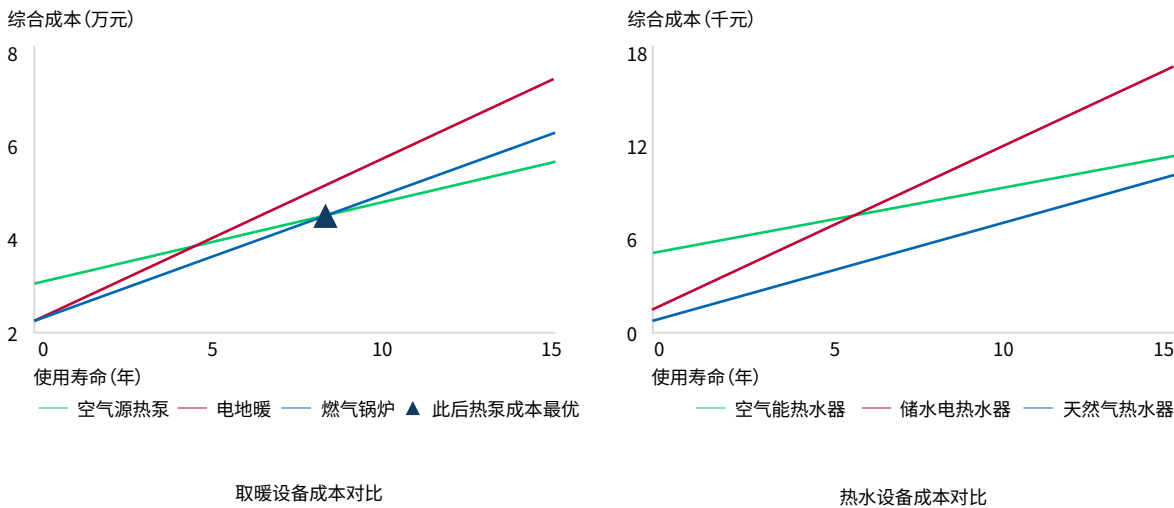
设备费用：在品牌、技术等条件都相近的情形下，产品价格主要取决于热泵功率。供暖用热泵功率大小的选择主要由供热面积、地区温度、建筑密闭性及采光等因素决定；而热泵热水器的功率大小的选择主要由水箱体积和地区温度等因素决定。

安装费用：供暖用热泵（主要是地暖或散热器型的热泵水机）的安装费用取决于原建筑是否有供热设施且设施的可改造利用程度，若建筑原本存在供暖管道系统可利用，安装费用也会相对较低。热泵热风机类似制冷空调，安装难度较低。若新建供暖设施，在各种热源种类的热泵中，空气源热泵由于无需打井埋管，安装费用相对水地源热泵显著更低。热泵热水器的安装难度不高，主要需考虑水箱体积对空间利用的影响。

运行费用：等于单位电价和总耗电量相乘。供暖用热泵耗电量影响因素包括供热时长、能效等级⁹、室内外温差、建筑保温性能等，其他条件一定的情况下，对于供热时间越长、能效等级越低、室内外温差越大、建筑保温性能越差的建筑，热泵供热耗电量会更大。而热泵热水器耗电量主要受热水温度、能效等级、外部环境温度等因素影响。

随着热泵技术的技术高度成熟和规模化发展，产品总体成本上的竞争力持续提升。

图表 12 一般家庭取暖和热水设备综合成本¹⁰比较(示意性)



来源：案头研究

供暖：对于新建户用供暖设施的消费者，从初始成本和运行成本综合考虑，目前热泵在与传统取暖方式的经济性对比方面实际上已经不相上下甚至更优。虽然安装热泵的初始成本比传统的电地暖和燃气锅炉高1-2万元，但在运行过程中节省的成本可以在5-10年的使用周期内回收多支出的初始成本。

热水：对于选择空气能热泵热水器的消费者而言，对于用水量不大的一般家庭而言，在不考虑补贴的情形下，空气能热水器的综合成本可在5-8年追平电热水器，但在10-15年的使用年限内很难追平天然气热水器。如果当日用水量足够多，且电费适用的价格为更高的商业电价时，空气能热水器的成本优势才会明显提升。

而在用户实际购买决策中，大部分用户受初始成本比综合成本的影响更大，且对于早期用户而言面临的新产品试错风险较高。在经济性方面，如果热泵初始成本能够进一步下降或者享受到更优惠的低碳补贴，消费者新购和替换热泵产品的意愿定会随之变强。

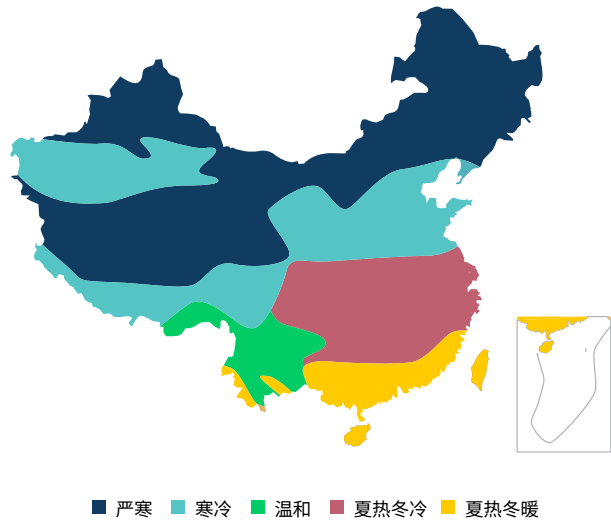
9 通常以名义工况制热性能系数(COPh)表示。

10 综合成本为初始成本和运行成本之和，运行成本未考虑未来能源价格变化和折现因素。

四、挖掘潜力：洞察不同地域供热市场需求

中国南北纬度跨度大，地跨不同温度带，不同地区的供热需求和现有供暖条件存在差异。如图表13，中国主要分为严寒、寒冷、温和、夏热冬冷和夏热冬暖五个气候区。严寒和寒冷地区基本处于秦淮线以北及青藏高原地区，该地区冬季寒冷漫长，需要长时间供暖，并在大中城市已基本实现了入户集中供暖；夏热冬冷地区则对于夏季制冷和冬季供暖同时兼具需求，且该地区传统上没有入户供暖管网等；而夏热冬暖和温和地区则对供暖设施的需求较弱。

图表 13 中国的主要气候区



来源：清华建筑能源节能研究中心，中国建筑能源年度报告2019

为方便分类讨论，本章节中我们将中国大致按北方集中供暖区、北方分布供暖区、南方夏热冬冷地区三大重点区域分别展开。其中，北方分布供暖区和南方夏热冬冷地区为目前热泵产品最主要的销售市场。

1. 北方集中供暖区

该地区主要为华北、东北、西北地区的大中城市，中高层楼房建筑居多，由于已有完整的供暖管网设施由区域供热公司统一提供，且管理部门大多禁止自行改动供暖设施，以防止破坏系统水力平衡。另外，该地区的生活热水主要由居民或工商业自用电/燃气热水器供给。

供暖：现有的市面的零售型热泵产品较难渗透到该部分市场，供暖方面的主要机会为吸收式热泵替代原有集中供暖热源。区域供暖公司推广吸收式热泵回收烟气余热、汽轮机乏汽余热以及工业余热供热将极大减少化石燃料燃烧。据统计数据显示，当前全国电厂和工业余热可以实现约170亿平方米的供热需求，理论上完全可以覆盖中国集中供暖地区的供暖需求。吸收式热泵技术本身相对成熟，其进一步渗透主要有赖于余热利用管理机制的改善，和采热、储热、输热技术经济性问题的更好解决。

典型示例

为了减少污染物排放，“外热入京”项目在京津冀多方政府和热电系统的配合协调下，通过“4座燃气热电中心+燃气分布式调峰+N处余热回收”的方式，在大温差、远距离供暖技术保驾护航之下挖掘北京辖区内及天津、河北地区的余热，现已开始利用或正在对接包括燕山石化、蓟州大唐盘电、蓟州国华盘电等在内的多处资源。

热水：对于户用消费者而言在家中购买或替换热水器时很少选择空气能热水器。空气能热水器的设计工作温度一般在零度以上，由于北方冬季气温较低，所以热水器水箱需要安装在室内。因为水箱体积过大占用空间，所以这成为北方消费者选择的最大阻碍之一。另外，空气能热水器目前在市场中的普遍问题是消费者认知度偏低，加上相对于传统燃气和电热水器价格普遍高出好几倍，即使虽享受数百元节能补贴，消费者接受度仍不高。

以“冷、暖、热水”三联供的形式，独立供热的大型商用建筑可能为推广突破口。该类商业建筑自身体量大，自身需要打造供暖系统，如酒店、商场等，在商业电价高且热水需求量大的条件下，空气源热泵三联供或为更优选择，比如北京商业、酒店一体化建筑王府井东方新天地广场就在配备冷暖空气源热泵的基础上，配备了10吨的热水机组水箱，用以解决热水供应问题。

2. 北方分布供暖区

北方分散供暖主要为北方小城镇及广大农村地方，以民用建筑为主，居住较为分散，平房和低楼层建筑多，其中部分有条件地区可在部分乡镇、小区等人员密集区域进行热泵集中供暖改造。对于个人采暖的用户，该地区空气源热泵供暖在过去“煤改电”的补贴推动下已有一定的普及。

供暖：从技术研发方向上看，目前改善低温制热能力的主流技术路线包括喷气增焓、双级压缩、冷媒创新等。目前常规的变频加喷气增焓的空气源热泵产品在东北地区冬季-12℃以下的低温环境下工作COP仍可以达到2.2以上。

现阶段既已在技术上解决低室外环境温度下的使用效果和电耗问题，重点应放在产品推广和配套服务。由于补贴因素，该地区的空气源热泵产品具备相对性价比优势。但由于该区域居民居住地不如城市聚集，因此安装、售后等服务的可得性也是该区域最重要的竞争力。

典型示例

为保证北方农村地区热泵用户的售后服务，海尔集团将下沉维保网点，将售后网点细化进村，追求“48分钟响应、2小时上门服务”的服务速度，以快速解决用户热泵产品服务问题。

热水：该区域热泵热水器发展机会较小。该区域相对于北方大中城市而言，人均受教育水平和人均收入水平更低，对热泵热水器的市场认知度更低，价格更敏感，且商业楼宇数量小，因而市场的打开速度预计会慢于城市地区。

3. 南方夏热冬冷地区

秦淮以南地区并非集中供暖覆盖区域，而江苏、安徽、四川、贵州等南方省份冬季气温低且时间长。该区域2019年住宅供热比例约30%，商业供热比例约70%，落基山研究所预计2050年实现供热全覆盖，在零碳情境下热泵技术优越性明显，渗透率提升空间很大。

供暖：对于该地区新建住宅小区和商业楼宇，可因地制宜选择空气源热泵或集中式水地源热泵，而原本无供暖设施的老旧小区则可考虑空气源热泵。由于该地区冬季最冷月平均气温也通常在零摄氏度左右，选择常温空气

源热泵即可，该区域用户的购买决策应该考虑对“燃气锅炉/电地暖+制冷空调”的整体替代性。

对于住宅热泵的自采需求，空气源热泵仍然是主流的选择。为满足安装便利性，建议在建筑的设计施工阶段为热泵安装留出建筑设计空间；产品也应在操作系统方面尽量集成满足用户各方面功能需求。如果住宅中有条件部署水地源热泵，需要特别关注地下水回灌问题，保证泵管与井管的连接处密封良好。

对于开发商对小区和商业楼宇统一采购需求，设计院和地产公司对地块和建筑的规划尤为关键。比如空气源热泵空间和管网设计，水地源热泵埋管打井部署以及和供电单位的沟通合作等等为产品提供了更强的成本竞争力。

典型示例

南方精装交付的小区中提供热泵供热逐渐成为潮流，如上海虹桥某新建住宅小区在销售配备了热泵交付的新楼盘时，就向客户介绍热泵所带来的时尚、环保、舒适概念，并强调比传统空调节能40%-50%。此外，多个南方沿江城市如重庆、长沙、南京等江水源可再生能源站都已投入使用，以水源热泵为商务区提供集中冷暖两联供，成为城市践行绿色低碳的亮点项目。

热水：热水供应方面，由于冬季气温相对温和且经济发达，中国东南沿海地区的空气能热水器渗透率相对较高，进一步提高份额则需要更强的成本吸引力和更精准有力的营销手段。

此外，与北方城市相似，该地区的新建建筑，尤其是商业楼宇，根据自身对热水需求，从节能省电角度出发，亦可考虑部署冷暖热水三联供的热泵。

第三章

铸造零碳钢铁的“核心” ——中国直接电解铁矿石 技术的发展与展望



铸造零碳钢铁的“核心”——中国直接电解铁矿石技术的发展与展望

钢铁行业是全球最主要的碳排放部门之一，占全球总量的近 10%。中国作为最大的钢铁生产和消费国（产量及消费量占比均超过 50%），在 2019 年，中国钢铁行业的碳排放量占全国总量的 17%，而全行业 70% 以上的排碳环节则来自于传统长流程炼钢工艺中以高炉为代表的铁前环节。因此，双碳目标的达成离不开钢铁行业的深度脱碳，而改良和替代传统炼钢技术路线，积极研发低碳或零碳炼钢技术路线则是最重要抓手。本文将我们将着眼于一种极具颠覆性的钢铁脱碳生产技术——直接电解铁矿石技术，并对其在欧美市场的发展模式和现状进行梳理，并分析其在中国发展的挑战与机遇，希望引发读者对于这一技术的关注和思考，并帮助读者了解该技术在中国发展所面临的挑战与机遇。一些基本事实和观点如下：

- (1) 直接电解铁矿石技术作为一种减碳潜力巨大（可实现 95% 以上碳减排）的颠覆性初级钢生产技术，已经在欧洲和北美蓄力发展了近 20 年，但在中国的领先钢企中，尚未见到对该技术的明确试点或规划。
- (2) 高温熔融法和低温碱液法为两种最主流且具备商业化前景的直接电解铁矿石技术路线，分别由美国波士顿金属公司和欧洲 Siderwin 项目组牵头研发，其发展模式分别为研究者和业界专家创业融资，以及由钢铁巨头企业在官方低碳技术研究资助下协调各方开展工作。
- (3) 根据目前技术主要研究机构和企业规划，电解铁矿石技术在 2030 年后实现商业化部署，我们预计在碳价攀升和可再生电力成本进一步降低的情形下，到 2050 年该技术有望进一步扩大规模，在全球钢铁产量中占比最高达到 5% 左右。
- (4) 中国钢企对直接电解铁矿石技术部署主要存在来自技术成熟度、进入壁垒、电力配套供应等方面的挑战，应在未来密切关注技术动向、突破关键技术瓶颈、创新解决电力供应。

关于上述观点背后的逻辑和分析，请您继续阅读正文部分的内容，也欢迎您对感兴趣的内容和话题与我们进行讨论。

一、直接电解铁矿石——最具减碳潜力的颠覆性技术之一

从上世纪中叶以来至今，数十种新型炼钢技术路线被研究提出，其中部分技术，尤其在本世纪全球双碳趋势背景下，已经进入试点或者工业应用阶段。落基山研究所于2021年9月发布的《碳中和目标下的中国钢铁零碳之路》报告中对当前主流的钢铁脱碳技术进行了整理总结，从减排潜力看，最亮眼的莫过于颠覆性初级钢技术，包括氢气直接还原铁、氢等离子体熔融还原、直接电解技术等。其中，前两者在中国的钢企中均已有试点或规划，而直接电解铁矿石技术目前还未见明确的发展规划。

从2004年开始，欧洲超低碳排放炼钢工艺计划（ULCOS）的研究团队已经开始探索直接电解铁矿石技术。发展至今，当下主流的直接电解铁矿石技术包括高温熔融氧化物电解技术（MOE, Molten Oxide Electrolysis）和低温碱性溶液电解冶金技术（Low-temperature Electrowinning），后文简称为高温熔融法和低温碱液法。

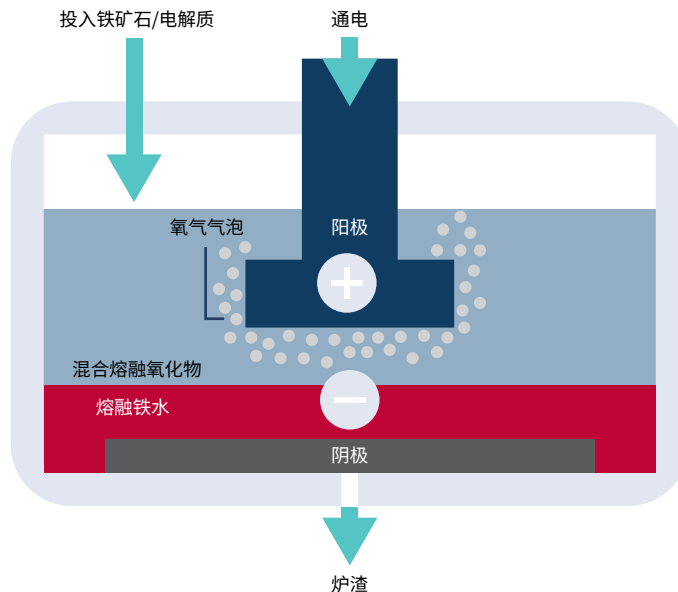
虽然直接电解铁矿石技术目前技术成熟度在各类低碳技术中相对较低，但由于对原矿品位降低要求，且具备实现经济竞争性的潜力，该技术近年来研究成果进展迅速，吸引了业界目光。从减碳潜力上看，在零碳电网情形下电解铁矿石技术的减碳潜力可与氢气直接还原铁等技术媲美，实现95%以上的碳减排。此外，电解铁矿石下的两种不同技术路线在成本竞争力和铁矿石品位要求方面各有亮点。其中，低温碱液法由于设备技术相对简单，能耗较低，因此吨钢综合成本在2050年预计可与氢气直接还原铁竞争。根据Agora预测，低温碱液法的吨钢综合成本在2050年约645-828欧元（约合人民币4500-5800元），基本接近落基山研究给出2050年30元/千克以上氢气价格下的粗钢价格情境。而高温熔融法工艺中超高温环境对于原矿品位的要求较低，根据波士顿金属公司介绍，与当前的氢气直接还原铁技术相比，高温直接电解铁矿石对原矿石的铁含量要求从65%以上降至55%左右。

二、聚焦直接电解技术的两种路线

高温熔融法（MOE）

高温熔融法的领先研究机构为波士顿金属公司，技术成熟度（TRL）介于4到5之间，目前处于工程验证阶段。这是一种在熔融盐中通电使得金属沉积于电极的冶金技术，是一种完全电气化的初级钢炼制技术，这项技术相比传统的高炉-转炉等路线相比，无需含碳还原剂原料添加，理论上可将范围一碳排放降至零，是一种颠覆性的低碳技术。可以预见该技术在未来电网深度脱碳的大趋势下减碳潜力巨大。

图表 14 高温熔融法电解铁矿石电解器工作示意图

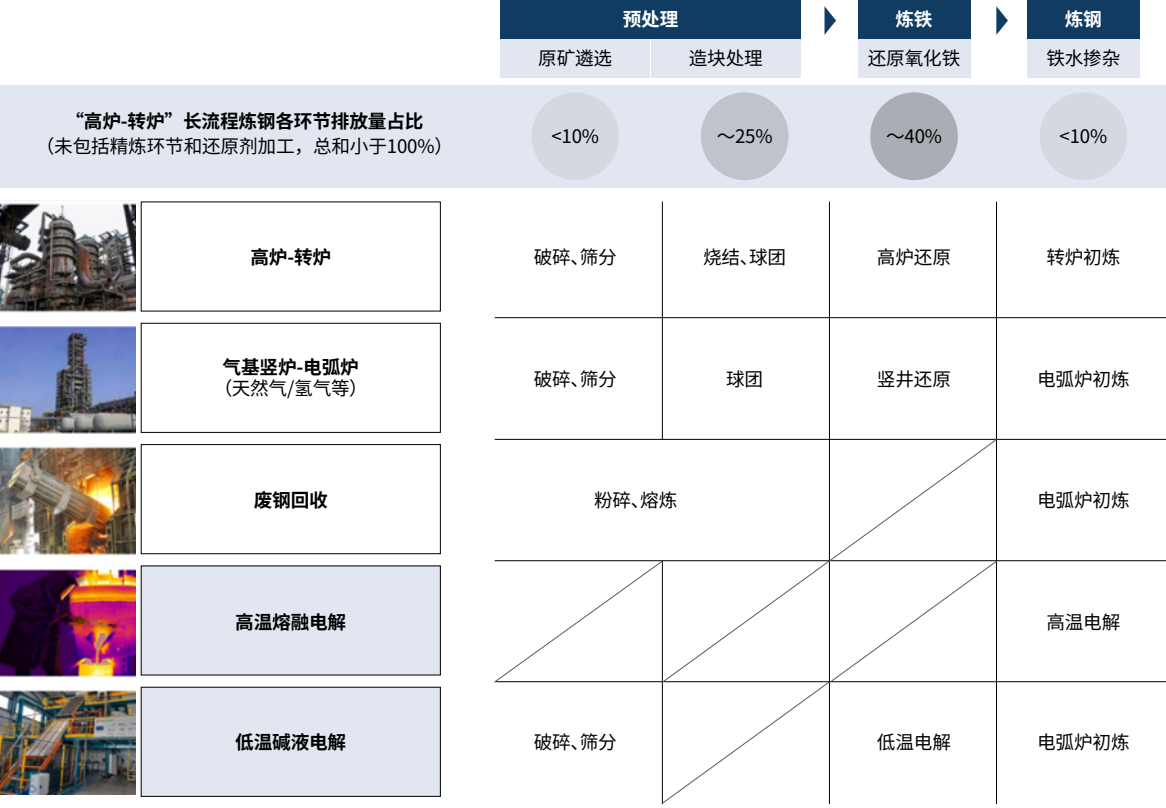


电解过程无需对铁矿石进行前期的破碎、筛分、选矿、造块等预处理，直接将其和部分氧化物电解质（如硅、镁、钙的氧化物）投入电解池内，通电加热至1600度左右的熔融状态。阳极和阴极分别位于容器的顶部和底部，在电流作用下，熔融物中的氧离子在阳极反应生成氧气逸出；铁离子在阴极还原成熔融的铁水，可在炉内精炼成钢或者直接利用。

熔盐电解金属的工艺原理并非首创，在铝、镁等金属冶炼行业中早已普遍使用，而这种技术运用到钢铁炼制上实属突破。但由于铁的熔点高，保证电解池内电极材料在高温易腐蚀的条件下保持稳定性一直以来是该工艺的最大挑战之一。波士顿金属公司的创始人之一 Donald Sadoway 及其团队开发出了一种铬铁合金阳极材料，可以在近1600度极端高温的反应条件下在表面形成一层氧化膜，以保护底层的金属，从而与池内熔融物和阳极附近生成的氧气基本不发生反应。这项突破性的技术使得铁矿石的高温熔融电解有了相对平价可得的电极材料选择，为走向规模化发展奠定了基础。

虽然电解环节的化学反应问题得到了解决，但该技术的大规模推广仍然面临很多具体问题。比如目前惰性阳极材料还在经历更大规模的工程验证，探索更佳电极材料的研究一直在持续；此外，由于加热和保温过程耗电量巨大且难以中断，导致不仅炼钢能耗成本高昂，且在规模化发展的过程中可能会使电力紧张地区的电网承压。在部分电网清洁度不高的地区，若比较全生命周期减碳潜力，该技术相比其他低碳路线甚至不具备明显的减碳优势。

图表 15 各钢铁生产工艺从铁矿石到钢水的主要环节



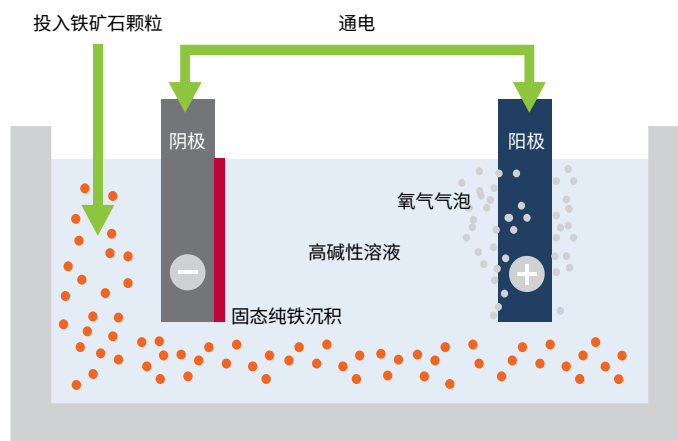
但值得一提的是，由于高温熔融法的工艺流程于传统炼钢路线相比有颠覆性的创新，所以该技术在相对较低品位的原矿利用方面具有独特优势。由于铁矿石无需预处理环节，且极端高温环境可以创造更好的还原反应条件，因此对于铁矿石含铁比例的要求的严苛程度较低。在低碳炼钢技术路线中，相比当前最热门的氢气直接还原铁配合电弧炉炼钢路线，高温熔融法对于铁矿石的品位要求可以放低约10%，有利于降低对高品位进口铁矿石的依赖，加强原料供应链安全稳定。

低温碱液法 (Low-temperature Electrowinning)

低温碱液法现阶段的主要研究机构为ArcelorMittal钢铁公司牵头的Siderwin项目组，技术成熟度 (TRL) 介于5到6之间，目前工程规模的试点项目正在建设中。这是一种在110℃左右的碱性溶液电解池内，将铁矿石直接电解沉积在电极上的一种炼铁技术。由于所需加热温度不高，所以该技术路线的能耗水平不到高炉的70%，且无需持续加热保温，可以间歇性错峰利用电力。该技术与高温熔融法同为完全电气化的钢铁生产路线，减碳潜力非常可观。

在该路线下，钢铁生产流程大致可以分为以下几个步骤。在进入电解还原步骤前，铁矿石需要历经研磨、筛分、洗矿等预处理流程，以保证在电解反应的充分进行，在电解完成后，得到接近纯铁的固态沉积物，随后进入电弧炉加热完成掺杂炼制成钢。其中核心步骤在于电解，电解池内为110℃左右的高碱性氢氧化钠溶液，阴极和阳极左右排列，其材质分别为不锈钢和纯镍，在其中投入磨洗处理过的铁矿石颗粒，然后控制电流通过电解质溶液发生反应。溶液中的铁离子发生还原反应，沉积生长在阴极表面；而氢氧离子在阳极反应产生水和氧气。

图表 16 低温碱液法电解铁矿石电解器工作示意图



一直以来，该技术的研究方向在于提高该电解反应的法拉第效率¹¹和反应速率。通过在实验室项目中对不同的电流强度、电压水平、电解质配比、矿石精度等条件进行测试，目前该电解反应的法拉第效率可以达到90%以上，已达到较理想水平。为了提高电解反应的速率，Σiderwin项目的一大主要工艺突破方向在于如何使得阳极不断生成的氧气气泡迅速排出，从而防止溶液导电性受其影响减弱带来的反应速率下降。项目组通过计算流体力学模拟技术，对电解器的部署角度、排气装置、压力控制等方面做了专门设计，提高了氧气排出的速度。

据欧洲绿钢联合项目组（Green Steel for Europe Consortium）介绍，低温碱液法后续重点研发方向为扩大当前电解器的规模 and 解决多个电解器共同运行的问题。虽然已开始从实验室向工业规模迈进，但目前Σiderwin项目的全部产能仍然低至每48小时产出100千克纯铁。因此，未来如何在保证反应效率和速率的前提下提高单次反应产量是达到扩产最终达到工业化级别的关键。此外，未来的其他研发方向也包括通过优化设计智能控制、氧气回收、除渣机制等进一步提高设备的易用性和经济性。

根据目前技术主要研究机构和企业规划，电解铁矿石技术在2030年后实现商业化部署，我们预计在碳价攀升和可再生能源成本进一步降低的情形下，到2050年该技术有望进一步扩大规模，从欧美国家的试点向其他地区拓展，在全球钢铁产量中占比最高达到5%左右，成为除氢冶金以外的重要零碳钢铁生产方案之一。

从技术发展上看，2030-2040年直接电解铁矿石技术有望实现商业化。欧洲绿钢联盟的观点认为到2040年前后直接电解铁矿石炼铁的技术成熟度（TRL）可达9以上，能完全符合客户交付水准，进入商业化部署阶段，虽然成本竞争力还有提升空间，但会成为全球钢铁产能的重要技术路线之一。企业的观点则相对乐观，对商业化工厂部署的时间点预测均在2030年左右。据波士顿金属公司对于高温熔融电解炼钢技术的规划，公司在2023年将完成中试验证项目，2025年前将建成示范工厂（年产能达约2.5万吨），最迟在2030年开始商业化工厂部署。Σiderwin项目组对于碱液电解法的预估也是最迟在2030年左右进入商业化工厂部署的阶段，年产能拉升到5万吨左右，2030年之后继续提升至100万吨（2021年ArcelorMittal钢铁公司年产量约7900万吨）。

从成本比较上看，即使在直接电解技术实现商业化之后，吨钢成本仍是竞争力短板。目前传统长流程工艺粗钢综合成本约为每吨3000-4000元。在Agora预测中低温碱液法的吨钢综合成本在2050年约为4500-5800元，其中资本成本和运营成本比例约为1:3。而高温熔融法目前的吨钢电耗在4000度左右，该能耗水平在工艺优化后的提升空间不大，按照全球平均工业电价约0.9元/度计算，加上其他辅料的运营成本估计约4000元，假设资本成本也占1/3左右，吨钢综合成本估计也将达5000元以上。

¹¹ 法拉第效率：在电化学领域用以衡量反应效率的比值之一，等于实际生成物和理论生成物的百分比。

从减碳潜力上看，直接电解技术具有绝对优势，未来碳价攀升的情境下或更具吸引力。目前长流程（高炉-转炉）炼钢的吨钢二氧化碳排放约为2吨。相对该技术路线而言，Siderwin项目当前吨钢减碳水平在30%左右，2050年的减排潜力在50%-80%（取决于电网脱碳水平）；根据落基山研究所测算，在零碳电网的假设下，波士顿金属公司的高温熔融法电解铁矿石技术可实现高达95%减排水平。因此在2050年钢铁碳市场完全生效的情境下，直接电解技术的吨钢可贡献1-1.5吨碳排放减量，在市场碳价1000元/吨以上时基本可与传统长流程炼钢路径实现平价。

三、中国直接电解铁矿石技术发展展望

中国钢企在世界上产量处于领先地位，在低碳钢铁技术的发展上具备资金和政策优势。直接电解铁矿石技术在钢铁脱碳和保障供应链安全等方面具备巨大潜力，我们认为这项技术应当获得中国钢企的密切关注并加入到待研发技术名录。对于中国钢铁公司而言，如果希望自建直接电解铁矿石的低碳技术能力，波士顿金属公司和Siderwin项目的发展模式则是两种可供参考却又截然不同的典型模式。

波士顿金属公司是一家由研究者和业界专家于2013年共同建立的初创企业，其创立时间不到十年，目前已经完成两轮融资，累计总募集资金约8500万美元。波士顿金属公司是典型的“研究型企业”，其创始人之一麻省理工学院教授Donald Sadoway于2010年与团队在实验室中研发出适合高温熔融电解铁矿石的惰性阳极材料，为技术发展奠定了基石；2013年该研究成果在《自然》杂志发表；2014年电解炼钢中试线开始运作并取得专利；2015年波士顿金属公司获得美国国家科学基金会的60万美金资助；此后分别于2018年和2021年获得约2000万美元和约6000万美元两轮融资，员工人数也由2018年的8人增长到2021年的65人。随着投资机构的增加，目前波士顿金属公司的董事会中已有多位来自投资基金的高级管理者；此外，我们看到潜在客户宝马汽车旗下的风投基金也参与了去年的融资轮次。可以预见波士顿金属公司未来对于商业模式、客户关系、管理效率等方面的能力将得以快速提升。

Siderwin项目是一项由欧洲地平线计划资助的低碳技术研究，为期五年（2017-2022年），由卢森堡钢铁巨头ArcelorMittal公司负责牵头协调，资助金额共计680万欧元，其上下游12家合作伙伴来自7个不同欧盟国家。该项目负责人是来自ArcelorMittal的Hervé Lavelaine，他十余年来历任各项欧洲低碳炼钢技术研究项目（ULCOS, ASCoPE, IERO, VALORCO等）的电解铁版块或整体项目牵头负责人。Siderwin项目也属于低碳钢铁技术系列项目的延续，所以对于低温碱液法电解技术而言，其前期积累的总研发投入也远超该期资助金额，但在Siderwin项目该技术期间取得了重要进展。2019年低温碱液法电解铁试点项目在法国城市Maizières开工建设，2020年初开始了试点设备调试，并于2022年开始试点运行。

中国钢铁行业仍然是巨头主导的竞争格局。头部钢企是行业内产能、资金、人才、技术等资源集聚地，也是目前引领钢铁行业低碳转型的中坚力量。作为新兴工业国家，中国钢铁行业还处于高消费期，碳排放尚未达峰。加之由于已部署的长流程炼钢资产较为年轻，所以目前的低碳技术方向以节能增效和改良现有高炉冶炼工艺为主，以避免资产大面积搁浅。

与此同时，部分头部钢企也开始长远布局，与国外企业或者科研机构展开合作，都获得了积极反馈。目前宝武、河钢和建龙在国内颠覆性初级钢低碳生产技术研发方面处于领跑地位。今年宝武钢铁湛江工厂百万吨级别氢基竖炉开建，预计2023年建成投产，集成了焦炉煤气和氢气作为还原气在竖炉内直接还原铁的功能，总投资近20亿元。2020年底河钢与全球领先的工业炉制造商Tenova签署合作协议，共同建设中国第一个Energiron直接还原厂，还原气体将由焦炉煤气在后期逐渐转为绿氢，建成后将实现炼钢原料年产能120万吨。2019年建龙钢铁联合北科大等机构，投资逾10亿元，借鉴对标国内外各类领先技术，开发出了氢基熔融还原工艺，成功将该技术路线的关键设备和零部件国产化，并于2021年一次开炉成功出铁150余吨。

虽然钢企对颠覆性初级钢技术的探索实践当前的体量有限，但行业低碳转型的方向不会改变，对于中长期低碳技术的储备在未来或成为企业最核心竞争力。中国在直接电解铁矿石技术方面的发展尚处于萌芽期，但我们相

信头部钢企会持续布局。目前从公开资料查询看到宝武钢铁在2021年年底发布低碳冶金创新基金项目征集中提到熔融氧化物无碳电化学炼铁技术。此外，由宝武牵头全球低碳冶金创新联盟也于去年年底成立，这也为钢铁行业的学术和技术交流正式搭建起了平台。

与直接还原铁和氢基熔融还原等颠覆性技术不同，直接电解法目前在中国被应用和探索还刚刚起步，现在面临的主要障碍包括：

- 国际技术成熟度低：无论是高温熔融法还是低温碱液法，当前技术成熟度都在6以下，仅在实验室或者小规模产线中跑通，其规模化还面临不确定性，尚处于技术和工程攻关的关键时期。
- 存在较高进入壁垒：波士顿金属公司和ArcelorMittal长期在该技术上的积累筑牢了进入壁垒，对于后发企业想要通过复制此路径势必面临专利、人才、供应链等障碍。
- 电力供应条件较高：由于电解铁矿石方案能耗要求高，对于电力供应的要求较高，尤其是高温电解路线需要不间断电力供应，因此建立大规模试点项目或商业化工厂均需要综合考虑本地电价、可再生能源的可获得性以及电力负荷（如需使用网电）。

参照中国钢企引入氢冶金技术的切入时间点差不多在技术成熟度处于在5-9之间，类比可以得出对于直接电解技术的合作或者引入的技术成熟度门槛即将触发，对于想要在此技术做中长期布局的中国钢企而言，可以重点以下几个方向展开行动：

- 密切关注技术动向：建立技术情报监测能力，掌握全球前沿技术的最新研发进程，从而在切入技术的时机上做到快人一步。
- 突破关键技术瓶颈：当决定部署技术之后，可通过投资或者与国外设备供应商合作的形式在关键技术和专利上取得突破，或者考虑建立自研关键设备和零部件的团队。
- 创新解决电力供应：在项目规划早期需充分考虑项目用电总量与强度，可考虑可再生能源资源丰富且便宜的地区进行布局。低温技术路线对于电力稳定性要求较低可考虑自建发电设施；高温技术路线需依赖不间断电源，在当地电价政策和电网条件较好的地区部署更具优势。

第四章

积蓄零碳能量的“反应堆”——中国液流电池储能技术的现状与前景



积蓄零碳能量的“反应堆”——中国液流电池储能技术的现状与前景

储能行业是能源转型的战略性支点。中国在“双碳”目标的实现过程中，势必面临大规模风电光伏上量发展的阶段，而一种既经济适用又安全可靠的储能技术则是保证在风电光伏的快速发展过程中的电力系统稳定运行的重要基础。储能这一领域近来也得到了来自政府、市场、学界的格外关注，关于各类储能技术的探索层出不穷，关于成本、安全、容量、适用性等因素的讨论也在一直持续。通过对关于储能市场资料和观点的梳理，本文我们将层层聚焦，从新型储能技术到电化学储能，再到液流电池技术的种种技术路线和应用场景，希望帮助读者了解液流电池之一储能技术在中国的现状，并定位未来的发展方向。一些基础事实以及我们的基本观点如下：

- (1) 储能市场的快速发展与可再生电力的大力开发密不可分，储能被认为是用于调节可再生电力波动性的有效解决方案。而在众多储能技术中，新型储能技术，尤其是电化学储能技术在当下的增长趋势及预期最为强劲。
- (2) 液流电池作为当前电化学储能中的小众技术路线，以其安全性和耐用性两大特点脱颖而出，即使在价格相对昂贵的情况下，也正在向多种应用场景中渗透。
- (3) 在各类液流电池的主流技术路线中，全钒路线最为成熟，市场占有率最高，商业化程度相对领先，其在供应链稳定性、关键部件国产替代等方面的优势一时难以被其他技术路线颠覆。
- (4) 在液流电池在中国未来发展过程中，进一步推动规模化和关键部件替代降本是中重中之重，此外，积极引导政策的释放及其连续稳定性对于行业快速规模化发展的助推也不容忽视。

关于上述观点背后的逻辑和分析，请您继续阅读正文部分的内容，也欢迎您对感兴趣的内容和话题与我们进行讨论。

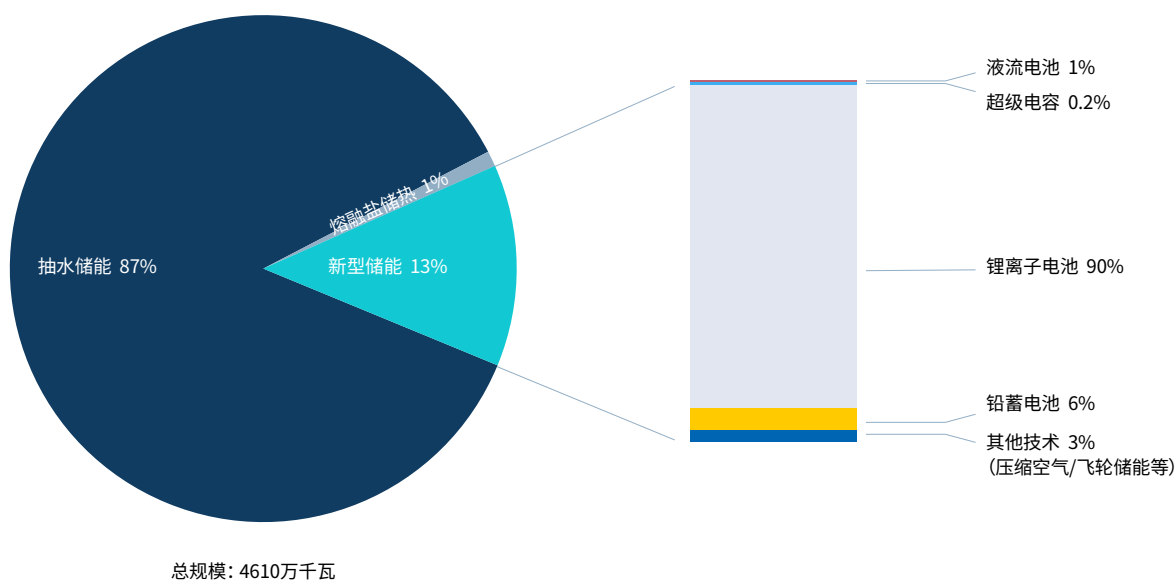
一、储能市场蓬勃发展，新型储能增长强劲

近年来中国可再生电力装机快速增长，2021 年新增风光装机量已经超过了 1 亿千瓦，占新增装机总量的 58%。随着新能源发电比例不断提高，风光的随机波动属性对电网的安全稳定运行带来了巨大挑战。而储能设备就如“蓄水池”，是目前用以平滑间歇性电源功率和保证电网运行灵活性和稳定性的最有效解决方案之一。

截至目前，全国多数省份陆续出台了对于新能源发电配置储能设施的要求，其中发电侧的配储规模通常占总装机的 5-30% 不等（一般为 10%），储能时长通常为 1-4 小时不等（一般为 2 小时），为储能市场未来大规模发展奠定了基础。除此之外，电网侧、用户侧的储能需求也会随新能源电力比例提升而被逐步放大。国务院在《2030 年前碳达峰行动方案》中提出全国 2030 年风光发电总装机容量达到 12 亿千瓦的目标，国家电网总工程师陈国平预估在这一目标下需要至少配备 2 亿千瓦的储能设施。而业界普遍认为实际装机量或远超规划，落基山研究所在《电力增长零碳化（2020-2030）》中预测到 2030 年风光发电总装机量将有希望超 16 亿千瓦，按此预估与之匹配的储能规模或将超过 2.5 亿千瓦。

从当前储能类型上看，据中关村储能产业技术联盟发布的《储能产业研究白皮书 2022》数据显示（如图表 17），截至 2021 年底已投运的 4610 万千瓦电力储能项目装机中主要储能类别为抽水蓄能和新型储能。其中，抽水蓄能累计装机规模绝对领先，达到了 3980 万千瓦，占总量的 87%；新型储能共 573 万千瓦，占比 13%，且相比 2020 年同期增长了 74%，发展势头更为强劲。报告预测在保守假设下 2026 年中国新型储能累计装机规模将达 4850 万千瓦，年复合增长率超过 50%。

图表 17 中国电力储能项目累计装机规模(截至 2021 年底)



来源：中国能源研究会储能专委会 / 中关村储能产业技术联盟，《储能产业研究白皮书 2022》

对市场规模增长贡献最大的新型储能装机包括电化学储能、压缩空气、飞轮储能等多种技术路线。其中，电化学储能包含多种主流技术（如图表 18），虽然目前成本较高，但由于地理限制小和建设周期短，主要运用在一些规模较小或者抽蓄条件较差的储能场景。锂离子电池作为代表性的电化学储能技术，在过去十年内大幅降本实现商业化，率先抢滩电化学储能市场，市占率超过九成，在份额上遥遥领先于其他技术；铅蓄电池技术成熟，但由于污染问题已处于淘汰下行的发展阶段。其他各类电化学储能和物理储能（如压缩空气、飞轮储能）技术均处于商业化早期阶段，市场份额较小，但技术特点各有千秋。

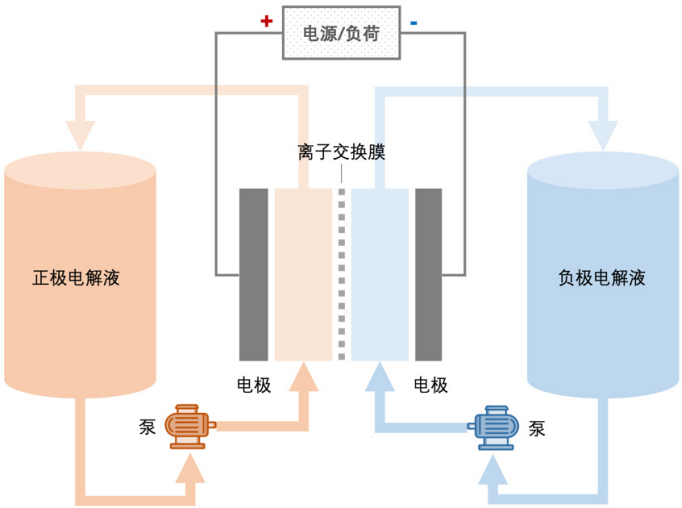
图表 18 主要新型储能技术特点比较

新型储能(非完全列举)		描述	优势	劣势	中国代表企业
电化学	锂离子电池	最广泛使用的高度商业化电池技术,应用场景包括消费电子、电动汽车、电力储能等	能量密度高、输出功率大、启动速度快	消防安全隐患大、成本偏高、回收成本高	   
	铅蓄电池	高度商业化的成熟电池技术,应用场景包括各类交通工具电源和电力储能等	系统造价低、输出功率稳定	能量密度低、使用寿命短、污染严重	   
	液流电池	尚处于早起商业化阶段的电池技术,目前主要的应用领域在电力储能方面	安全性高、使用寿命长、容量易扩建	能量密度低、系统成本高	   
	超级电容	介于传统电容器和电池之间的化学电源,目前处于商业化早期,主要用于交通、制造、电力等	使用寿命长、充放电功率高、启动速度快	能量密度低、系统成本高、自放电严重	   
压缩空气		规模较大,需专门建造储气室,将电能转化为空气内能进行储存,国内处于商业化早期,应用场景主要为电力储能	使用寿命长、储能周期长、系统效率高	地理条件要求严苛、建设周期较长	   
飞轮储能		电能转化为高速旋转的飞轮机械动能进行储存,国内处于商业早期,主要应用在交通工具、电力储能等场景	功率密度高、使用寿命长、环境适应性强	能量密度低、静态损失大	   

二、液流电池安全耐用，比较优势异军突起

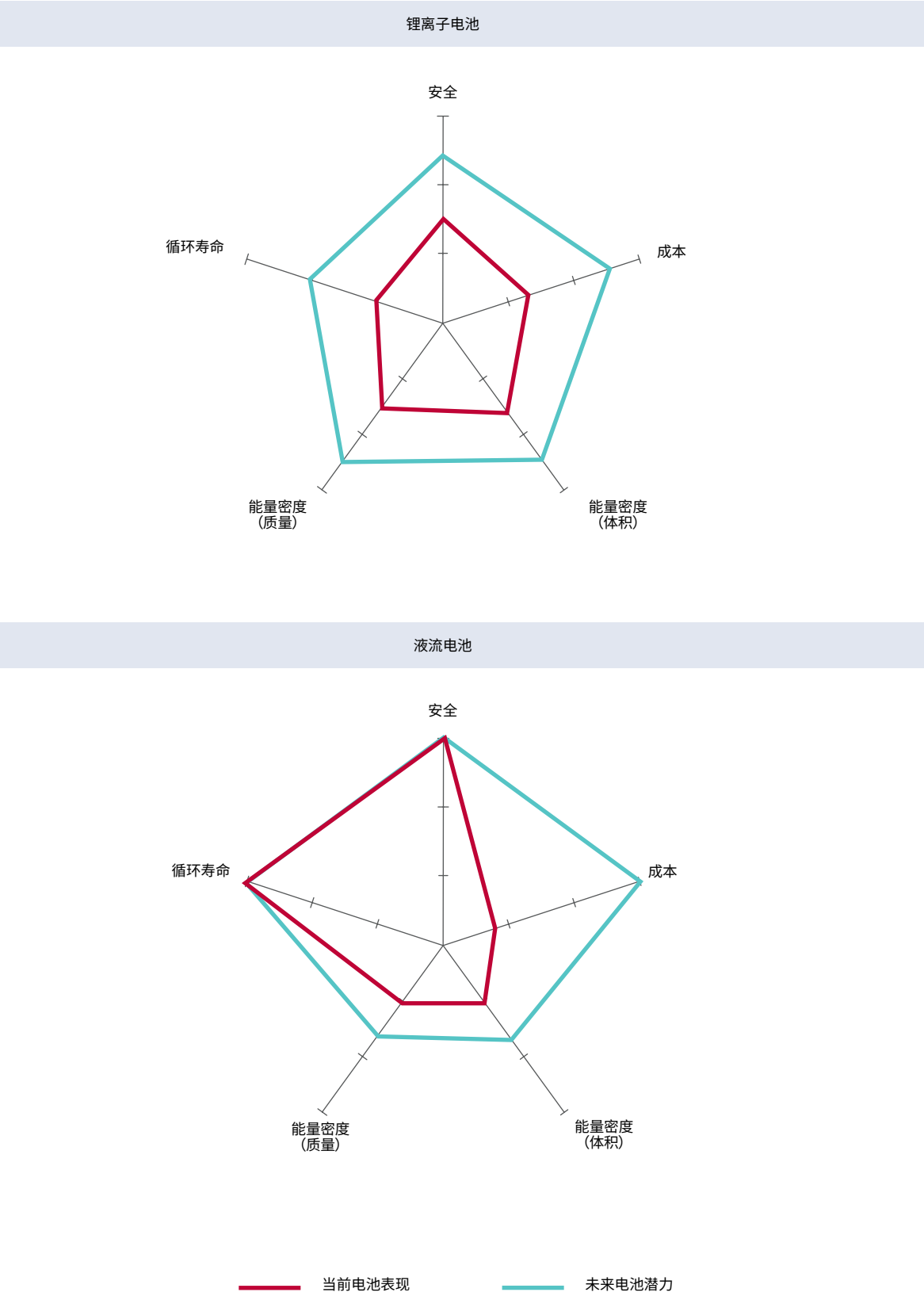
作为电化学储能方式的一种，液流电池有时也被称为可充电的燃料电池，其工作原理和燃料电池类似。如图表 19 所示，正负极电解液储存在两个独立容器内，中间连接部位为发电区，该区域被离子交换膜隔开。当电解液被泵送至发电区时，隔膜两侧的电解液发生离子交换反应从而实现放电，将储存的化学能转化为电能。与传统燃料电池不同的是，若对液流电池中的回收电解液通电则可以通过可逆反应将其还原，使电能转化为化学能进行储存。因此，液流电池凭借其发电储能空间分离和可完全循环利用的技术特点，在安全性和使用寿命方面优势突出。

图表 19 液流电池工作原理示意图



项目团队对锂电池和液流电池在储能表现做了多维度对比（见图表 20）。从统计数据上看，锂电池消防安全隐患大、循环次数少；而同属电化学储能技术，但目前市占率仅不足 1% 的液流电池从产品属性上正好弥补了这两大缺陷。由于占地空间在发电侧和电网侧等场景中相对充裕，液流电池能量密度较小的劣势不会成为关键的限制因素。此外，受安全性和成本的限制，锂电池在储能 4 小时以上时长方面的提升潜力有限，而液流电池可以简单通过增加电解液的方式扩充容量，从而提供最长达 12 小时的储能时长，大大增加储能灵活性方面的贡献。加上可观的降本空间，液流电池近来在逐渐国内市场被推广为新一代突创性技术解决方案。尤其是在新能源电力并网和辅助服务等快速增长的应用场景中，液流电池被认为在未来将成为和锂离子电池规模相当的主流电力储能技术路线之一。

图表 20 锂离子与液流电池性能表现对比雷达图



三、液流技术百花齐放，全钒路线木秀于林

液流电池一般按照电极的活性物质进行分类，从当前商业化进程上看，发展较好的四类液流电池分别为全钒液流电池、铁铬液流电池、锌基液流电池和全铁液流电池。其中，全钒液流电池商业化水平最高，是目前装机量最大的液流电池技术，占全部装机的 70% 左右，其余几种技术目前规模均较小。中国在全钒和铁铬两种路线上在国际上均处于相对领先的水平。

各类液流电池的商业化发展程度主要取决于成本竞争力和技术适用性。电池总成本由初始成本、维护成本和使用寿命等要素共同决定，而技术适应性则主要由电解质的特性、能量密度、安全性等因素综合决定。

在不同液流电池技术中，全钒液流电池技术最成熟，但适宜工作温度区间较窄，无调节的情况下无法在零度以下的环境中稳定工作。由于金属钒离子活性物质的价态丰富，高低价态钒离子溶液天然适合用在正负极作为储能介质重复可逆氧化还原反应。另一方面，钒为稀有金属，和其他提供同等能量的电解质相比，钒离子电解质的价格远高过锂、铁、锌等，相对其他物质而言未来降本空间相对有限，成本经济性可能不具备明显的优势。最后，考虑到中国在全世界钒矿产储量上全球领先，出于供应链安全的角度，全钒液流电池很可能更加适合在中国市场进行更长远的布局和发展。中国全钒液流电池企业的技术在全球处于领先地位，代表性企业有大连融科、北京普能等。

典型示例

全球最大液流储能项目于2022年底在辽宁大连电网并网并开始商业化运行，用以提供电力调峰服务。该项目总设计规模达200MW/800MWh，第一期预计启用设计容量的50%。若按家庭平均用电10度/天，这一巨型电池完全建成后的储电量可供8万户家庭备用一天。

铁铬液流电池技术发展起步早，但目前商业化程度还较低。从安全性和使用寿命的角度看，铁铬液流电池都和全钒电池较为相似，同时铁铬原材料的特性决定了其具备电解质成本低，更加耐寒，但能源密度相对低下等特点。铁铬液流电池的研发一直缓慢，由于存在负极可逆性差和析氢反应较难控制等问题，其能量效率低下，且过去的交换膜技术落后难以避免溶液互相污染。但近年技术发展迅速，液流电池隔膜技术的进步以及混合电解质和催化剂的使用已经大大突破了铁铬电池的技术瓶颈。中国在这一技术领域也相对领先，代表性企业为国家电投。

典型示例

行业龙头企业国家电投在“容和一号”项目中运用了铁铬液流电池技术在冬季的张家口地区为冬奥会提供储能服务，成功为低温地区的储能场景提供了液流电池解决方案。国家电投拥有“容和一号”的自主知识产权，并在2022年初宣布年产5000台30kW“容和一号”电池堆量产线开始投产。

锌基液流电池路线的商业化程度同样偏低，该技术包括以锌作为负极侧活性物质的多种液流电池。这种技术的原料成本相对较低且无毒害，但耐低温能力偏弱。该技术发展最大的障碍在于锌基液流电池存在特有的锌枝晶累积和面容量较为有限，从而影响电池的能量效率和使用寿命，在早期发展过程中阻碍了商业化应用。近年来，锌基液流电池技术研发围绕电极、隔膜材料或电池结构改良为方向，已有成功实验证明可减少锌枝晶的生成和提升负极沉积溶解反应的可逆性。国外锌基液流电池商业化进程相对较快，有公司已经推出锌基液流电池产品，如 Primus Power 的 EnergyPod2 等；而中国该产业目前还处于研究开发阶段，代表性机构有中科院金属研究所、大连化学物理所等。

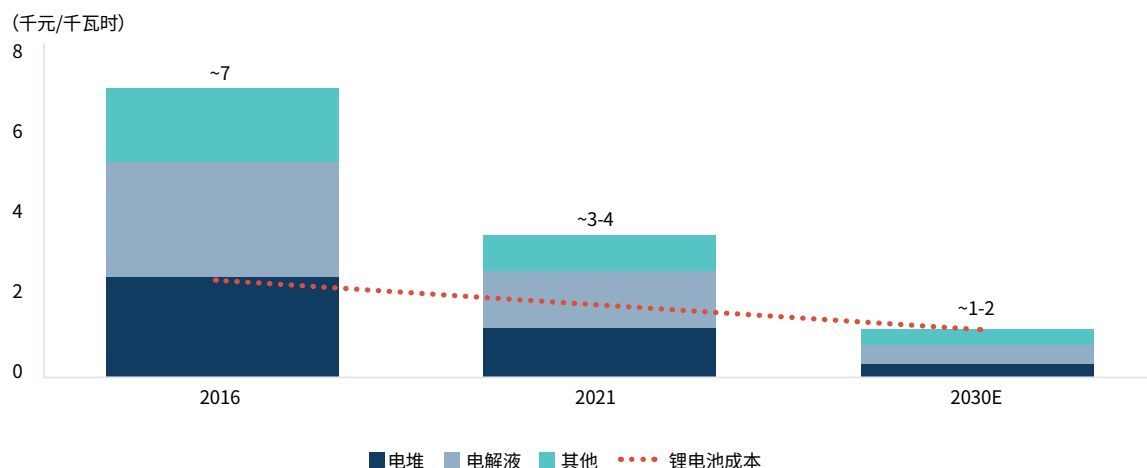
全铁技术同样是近年来热门液流电池技术路线，该电池的正负极分别封装不同价态的铁离子溶液，具有电解液成本低廉和耐低温能力强等优势。但和铁铬液流电池的问题类似，此前由于电极析氢反应严重的问题无法解决，这一技术的商业化应用进度缓慢。但近年来有数家电池厂家在这一技术瓶颈上实现了突破，比如 ESS 公司创新地将电极附近反应产生的氢气保存在电池系统内部，从而实现了电池使用寿命的显著延长，ESS 已在去年建成了电网级装机的储能项目。此外，Form Energy 也是该领域的领先企业，预计在明年完成兆瓦级的全铁液流电池项目部署。而国内在全铁液流电池技术路线上目前的研发还较少，在该技术快速发展的过程中，中国储能市场的玩家对这一趋势也应当保持密切关注。

虽然其他技术路线液流电池不断涌现，但全钒液流电池仍然在商业化进程方面大幅领先。优势主要体现在产业链成熟度方面，全钒技术主要的原材料如电解液、离子交换膜和电极等供应链更为稳健，关键部件的国产化替代降本进程也更快。此外，虽然从电解液成本角度全钒技术不占优势，但考虑创新工艺投入、使用寿命、能量效率等因素，全钒技术当前的全生命周期成本还是优于其他几种技术路线，且这种优势在中短期还难以被颠覆。

四、降本提效势在必行，市场引导亦不可少

市场对于液流电池未来发展前景乐观，认为在未来爆发式增长的新建储能场景中将逐渐实现对铅蓄电池和锂离子电池的替代。由液流电池技术商业化水平进程推测，未来中短期国内市场出货将以全钒液流电池路线为主。多家投资研究机构预测到 2025 年前后，中国钒电池每年新增装机量将达到 213-350 万千瓦。伊维智库 EVTank 在《中国钒电池行业发展白皮书（2022 年）》中预测 2030 年全钒液流电池累计储能装机将达 2400 万千瓦。中科院大连化物所首席研究员张华民则给出更加积极的预估，他认为全钒液流电池装机将占电化学储能市场的 30%。按届时电化学储能装机 1.2 亿千瓦预估，相当于约 3600 万千瓦。2021 年全国液流电池总装机仅 5 万千瓦左右，按此发展目标观之则还需扩大数百倍规模。

图表 21 全钒液流电池初装成本降本预测(示意性)



来源：IRENA，《Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030》

目前液流电池在成本竞争力方面尚处于明显下风。据钛媒体统计，2021 年全钒液流电池初始成本在 3000 元 / 千瓦时以上，是锂电池的两倍多。浙商证券给出预测认为，全钒电池成本可以在五年内降至 2000 元 / 千瓦时，十年内降至 1300 元 / 千瓦时。在 2000 元 / 千瓦时以下成本区间的全钒液流电池的初装成本有望追平锂离子电池水平，叠加更长使用寿命的因素，液流电池的全生命周期拥有成本将呈现显著优势。但由于锂电池能量密度的优势，其最主要的应用场景在电动汽车的动力电池，实际应用中相当部分用于发电侧和电网侧储能场景的锂电池是通过回收梯次利用技术改造的。出于安全性考虑，当前国家并不鼓励回收利用锂电池进入储能场景。然而一旦梯次利用技术安全性问题取得重大突破的情况下，全钒液流电池的经济性势必面临与回收锂离子电池竞争的巨大挑战，因此降本压力或许比当前的分析更为严峻。

全钒液流电池的降本抓手可以从成本结构的具体展开中看出，主要来自于材料成本的降低和系统性能的提升。根据 IRENA 分析指出，全钒液流电池的初始成本中约 35% 来自电堆（主要为离子交换膜）、约 40% 来自钒电解液，约 25% 来自周边设备成本。深圳中和储能的专家将降本抓手总结为三个方面：提高材料化学循环稳定性、降低材料成本和提高系统整体性能。目前各机构和公司的研发创新方向基本都集中于改良电解液、电极和隔膜材料，以实现更长的使用寿命、更便宜的替代材料和更高效反应性能。

与此同时，液流电池在电解质选择方面的探索亦为主要的创新方向之一。前文中已提到除全钒液流电池以外的锌基、铁铬和全铁等技术路线，均具有电解质成本更加低廉的优势，在降本空间上更具有潜力。在电池工程技术实现突破的情形下，这些电池的反应效率和材料稳定性将显著提升，也存在未来超越全钒液流电池成为主流的技术路线的可能性。此外，目前的主流电解质均为金属和无机物小分子溶液，因此对于电解质离子交换膜的隔离性和导电性要求高，导致电堆成本较高。有研究机构尝试使用大分子有机物溶液作为电解质，以降低交换膜的成本和贵金属的使用，以及通过寻找不混溶的电解液或固相电解质起到天然隔离作用以精简交换膜的使用。但这些路线目前都还处于试验研究阶段，尚未出现竞争力足够强的产品撼动全钒液流电池的市场地位。但在中远期，液流电池玩家还需密切关注来自技术路线更迭和替代技术的发展等带来的挑战。

对液流电池的乐观预期的确具备强大的需求场景支撑，然而“罗马终非一日建成”，若要实现数百倍的规模增长，液流电池行业的发展仍需面临诸多考验。因此，政策方向的引导是促进行业发展的必然选择，只有提振市场信心和规模上量，才能更好的推动工艺改进降本，在经济性上追赶其他储能技术，从而取得突破市场份额。从政策制定者角度，如下几个方面可以作为对液流电池市场引导的部分参考角度。

- 对于自然条件不允许部署抽水蓄能的地区（如西北干旱地区），建议发电企业在未来新增用于新能源电力并网、辅助服务等储能设备优先采购液流电池；
- 引导消防安全要求较高的地区（如干燥多风气候区、森林密集地区、人口密集城区等）在配备储能设施优先选择以液流电池为主的储能方式；
- 加强对于储能电池回收利用环节监管执法，防止回收环节环保不达标电化学电池（如铅蓄电池和锂离子电池）通过释放负外部性控制成本与液流电池竞争。

刘琦宇, 谭光瑀, 王广煦等, 中国新一代清洁低碳技术展望, 落基山研究所, 2023

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



除特别注明, 本报告中所有图片均来自iStock。



RMI Innovation Center

22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

© 2023年9月, 落基山研究所版权所有。Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所的注册商标。