

引文格式:魏甲明,陈宋璇,付云枫,等.全产业链贯通布局下钒液流电池长时储能发展思考[J].中国有色冶金,2024,53(3):7-18.
WEI Jiaming, CHEN Songxuan, FU Yunfeng, et al. Strategic considerations for the development of vanadium redox flow batteries for long-duration energy storage within a fully integrated industry chain[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(3):7-18.

全产业链贯通布局下钒液流电池长时 储能发展思考

魏甲明,陈宋璇,付云枫,刘召波,曹迪,周博,刘海
(中国恩菲工程技术有限公司,北京 100038)

[摘要] 清洁能源的发展和“双碳”目标的实施推动了能源结构调整和电网系统升级,这必将催生巨大的万亿长时储能需求,麦肯锡预测2030年全球可再生能源占比将升至60%~70%,长时储能比2025年增加5~10倍(预计2025年30~40GW)。全钒液流电池相比其他电化学储能具有安全长寿、灵活可靠、资源丰富等优点,2018~2023年国家 and 地方发布了多项清洁能源储能配置标准的政策性文件,在此背景下钒储能电池行业企业持续高速增长,行业集中度提升,宏观领域表现为我国钒储能产业正处在加速发展期。目前,钒储能电池总体成本较高,主要原因是钒原料价格高,降低成本的核心环节是钒资源提取成本和电解液生产制造成本。中国恩菲研发的短流程制备钒电解液技术相对于传统钒电解液制备技术具有流程短、钒利用率高的特点,制造成本降低了30%~50%,后期随着钒资源开发和新工艺的研发成功,钒储能产业降本优势将愈发突出。在国家政策支持下,钒液流电池储能系统有望在短期内实现规模化、商业化应用,成为储能领域的重要选择。未来,钒液流电池储能系统仍需从多方面进行优化,如重视技术创新和研发、健全回收利用体系等,以实现钒液流电池长时储能产业的可持续发展。

[关键词] 钒液流电池;长时储能;清洁能源开发;新能源配储;制造成本;储能技术;钒电解液制备

[中图分类号] TM912 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)02-0007-12

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.03.002

0 引言

目前,全球能源结构正在经历深刻的转变,以应对气候变化、能源安全和可持续发展等挑战。我国作为全球最大的能源消费国之一,也面临着能源结构调整的迫切需求。中国的能源结构当前主要仍然依赖于煤炭,随着双碳政策实施,清洁能源(如风能、太阳能、水力)比重在逐渐增加。煤炭作为主要

能源来源,不仅对环境产生严重负面影响,还使中国面临能源安全风险;但是清洁能源的发展受限于其间歇性和不稳定性,例如太阳能和风能依赖于天气条件,无法稳定供应。因此,储能技术成为了当前能源结构调整的主要瓶颈之一。储能技术可以在清洁能源供应过剩时储存能量,供给电网在需求高峰时使用,平衡能源供需。目前,本征安全储能技术在国内仍处于起步阶段,主要问题包括技术成本高、存储效率低、规模化应用不足等。本文基于钒液流电池全产业链,综述分析我国钒液储能现状、市场、政策、技术、资源、商业运作等问题,对钒液流电池长时储能产业的可持续发展进行深度思考。

1 能源结构调整催生储能需求

图1为新型电力系统和传统电力系统的运行模

[收稿日期] 2024-02-21

[第一作者] 魏甲明(1981—),甘肃白银人,正高级工程师,中国恩菲工程技术有限公司董事、总经理,中国有色工程技术有限公司党委副书记。

[通信作者] 刘召波(1989—),四川广安人,博士,高级工程师,从事冶金与新能源材料领域技术研发工作。

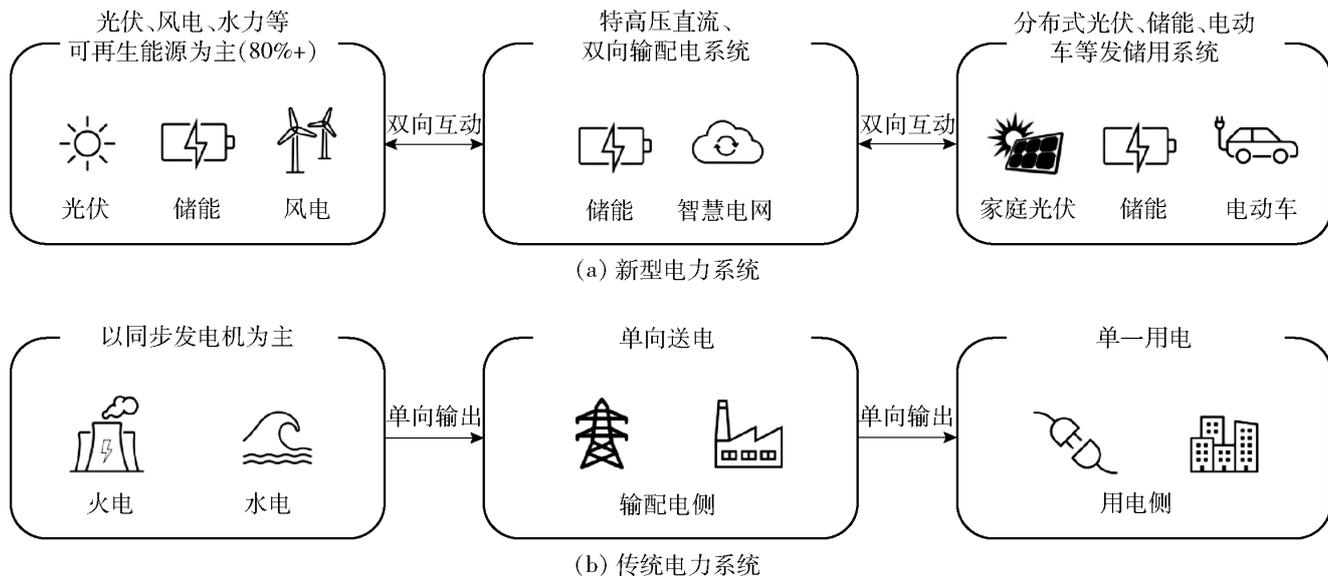


图1 新型电力系统与传统电力系统比较

Fig.1 Comparison between new and traditional power systems

式对比,可以发现随着中国风光能源的快速发展,储能在中国能源结构转变过程中扮演着重要角色^[1]。首先,储能能够解决可再生能源的间歇性和不稳定性问题。由于风光能源依赖于气候条件和地理位置等因素,供应波动性较大,通过储能技术可以将多余的风光能源储存起来,在需求高峰时释放能量,平衡电力供需之间的差异,保障电力供应的稳定性。其次,储能也有助于优化电力系统的运行和调度。储能可以在电力系统的不同层级中灵活使用,包括配电网、传输网和分布式能源系统等^[2],通过储能技术,可以实现对电力系统的调节和平衡,提高电力系统的可靠性和稳定性。同时,储能还能够提供灵活的功率调节能力,应对电力系统的峰谷负荷差异,提高电网的效率和可持续性。

储能在能源结构转变过程中有助于实现能源的多元化和可持续发展。储能技术不仅适用于可再生能源,还可以与其他能源资源结合使用,如煤、石油、天然气等传统能源,通过储能的灵活运用,可以提高能源的利用效率,减少对传统能源的依赖,促进能源结构向清洁能源的转变,这使得储能成为实现中国能源转型和碳减排目标的一个重要工具。随着我国对清洁能源的重视和“双碳”目标的实施,风能、光伏等可再生能源的快速发展推动着能源结构调整和电网系统升级,这必将催生巨大的万亿长时储能需求。2022年我国电化学储能累计装机量达11 GW^[3],长时储能的潜在市场空间预计将从2025年开始大规模增长,全球累计装机量

将达到30~40 GW^[4],累计投资额约500亿美元。据麦肯锡预测(图2),2030年起,全球可再生能源渗透率将升至60%~70%,长时储能比2025年增加5~10倍,累计投资规模达到2000~5000亿美元。到2040年,长时储能将加速达到1.5~2.5 TW,累计投资额将达到3万亿美元^[5]。

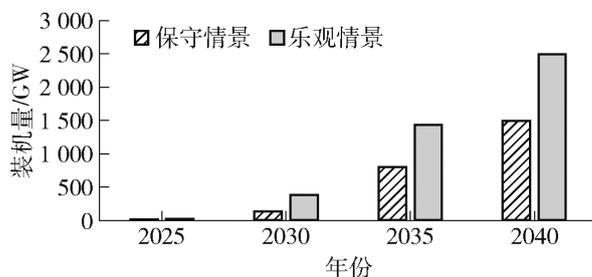


图2 全球长时储能累计装机量麦肯锡预测(GW)

Fig.2 McKinsey forecast: global cumulative installed capacity of long-duration energy storage (GW)

2 钒液流电池储能商业化潜力大

相较于其他常见储能技术,钒储能在本征安全性、循环寿命、扩充灵活性、环境适应性等多个维度上显示出独特的优势和巨大的商业化潜力。首先,钒电池水基电解液无爆炸、火灾隐患,安全性高。电解质以液态形式贮存在电堆外部的储液罐中,流动的活性物质使浓差极化减至最小,即使正负电解液混合,也无危险,不存在热失控问题;另外,钒电池还具有钒资源安全属性,我国钒原料资源储量丰富,资源储量居全球第一,原料价格能够相对稳定。其次,充放电过程中不存在复杂固相反应,耐受大电流充

放和深放电,循环次数 $\geq 20\ 000$ 次以上,电池使用寿命可达20年^[5]。再者,储能上限高且可控,功率也可自由调节,钒电池系统具有显著模块性优势,系统功率组件与容量组件可以独立设计。最后,钒电池封闭运行环境友好,电解液回收方便,除温度外对安装环境、间距没有过高要求。

钒液流电池储能与其他储能技术对标分析如表1所示^[2,6],钒电池与其他液流电池的优缺点分

析见表2。由表1和表2可以看出,钒液流电池的主要优点是寿命长、能量密度大、技术成熟度高,且大规模商业化进展最快。铁铬电池主要问题是容易交叉污染;全铁电池主要问题是电压效率较低;锌基电池主要问题是技术成熟度低,循环寿命短;有机电池主要问题是有机材料稳定性差,成本较高。总体来看,钒储能技术指标全面,可提供其他储能技术难以匹敌的独特优势。在国家政策支持下,钒储能有

表1 主流储能技术经济指标与优缺点对比分析^[2,6]

Table 1 Comparative analysis of economic indicators, pros, and cons of mainstream energy storage technologies

技术	优势	劣势	持续放电时间	循环次数/次	寿命/年	能量密度/(Wh·kg ⁻¹)	转换效率/%	投资成本/(元·kWh ⁻¹)	度电成本/(元·kWh ⁻¹)	低温充放电效率(-20℃)	安全性
锂电池	技术成熟;响应速度快,电源活性强;应用场景多;维护成本低,电池一致性好	寿命短;功率有限;供应链安全问题,原料紧缺,回收不易	2~4 h	>5 000	5~15	100~160	85~90	1 000~1 500	0.3~0.4	70%~75%	有隐患
钠电池	安全性好于锂电;长期成本低;能量转化效率高	产业化初期,性能尚待提升	2~4 h	>3 000	5~10	100~160	85~90	1 000~1 500	0.5~0.7	>90%	良
钒液流电池	安全性好;循环寿命长;灵活性强	能量密度低;转换效率低;钒属贵金属,但供应链好于锂电池	2~8 h	>20 000	>20	15~50	75~80	2 000~3 000	0.2~0.4	较差	优
压缩空气	储能容量大;安全可靠;成本低	能量转换率低;受地理位置限制;易出现气体泄露问题	5~20 h	>8 000	>20	3~100 Wh/L	30~70	2 000~5 000	0.2~0.3	好	优
抽水蓄能	技术成熟;储能容量大;成本低;安全可靠	投资规模大;建设周期长;受地理环境影响大,已充分建设;输电距离长	小时级~周级	>10 000	40~60	0.2~2 Wh/L	75	5 000~7 000	0.2~0.3	好	优

表2 液流电池技术指标与优缺点对比分析^[2-4,6]

Table 2 Comparative analysis of technical indicators, pros, and cons of flow batteries

技术路线	循环寿命/次	能量效率	商业化进展	代表性企业	优缺点分析
全钒	$\geq 20\ 000$	80%	百 MWh 级,正在迈入大规模商业化	大连融科、上气储能、星辰新能	技术成熟度高、应用广泛;能量密度高,节省占地面积;无枝晶等异常反应,真正做到安全可靠
铁铬液流	$\geq 10\ 000$	70%~75%	MWh 级商业示范	中海储能、国电投旗下北京和瑞储能	容易交叉污染,影响寿命;能量密度低,占地面积大
全铁液流	$\geq 20\ 000$	75%	技术开发	巨安储能、中科院大连化物所	技术成熟度低,处于测试阶段;库伦效率、电压效率低
锌基液流	$\geq 10\ 000$	70%~75%	技术开发	纬景储能	技术成熟度低,处于测试阶段;能量密度低,占地面积大;挥发、腐蚀强,枝晶问题严重
有机液流	$\geq 5\ 000$	75%	MWh 级商业示范	宿迁时代	容易交叉污染,近期该问题已初步解决;有机质不稳定,影响循环寿命

望在短期内实现规模化商业化应用,有效解决电网调节难题,成为储能领域的重要选择。

3 国家与地方发布的钒储能相关文件

近 10 年全球储能安全事故发生 70 余起,造成了人员伤亡和大量财产损失^[7]。钒液流电池储能具有本征安全属性,近几年国家出台多条储能与钒液流电池相关政策与标准,旨在要求储能安全与促进钒电解液流电池产业化。2018 年 4 月,国家能源局发布《全钒液流电池维护要求》《全钒液流电池安装技术规范》标准。2019 年 3 月,国家能源局再发布《全钒液流电池储能电站安全卫士技术规则(征求意见稿)》。2021 年 7 月,国家改革委和国家能源

局发布《加快推动新型储能发展的指导意见》,提出要坚持储能技术多元化,实现液流电池等长时储能技术进入商业化发展初期。2022 年 3 月国家发改委与国家能源局又印发《“十四五”新型储能发展实施方案》,文件中要求形成技术示范、加大液流电池等关键技术装备研发力度。在 2023 年国家能源局发布《防止电力生产事故的二十五项重点要求(2023 年版)》,明确提出中大型储能电站应选用技术成熟、安全性能高的电池,审慎选用梯次利用动力电池^[8-9]。在地方省、市、自治区层面,陆续出台新能源强制配储政策,汇总如表 3 所示,电源侧普遍要求配储,且配储比例最高至 30%,长时储能趋势明显,预计 2025 年前装机规模可达 30 GW。

表 3 全国各地新能源配储政策情况

Table 3 Overview of new energy storage and distribution policies by province in China

省份	风电项目配储标准(比例,时长)	光伏项目配储标准(比例,时长)	相关政策文件名
山东	未指出	30%, 2 h	《山东省风电、光伏发电项目并网保障指导意见(试行)》
江西	10%, 2 h	10%, 2 h	《关于做好 2023 年风电、光伏发电竞争优选工作的通知》
江苏	10%, 2 h	10%, 2 h	《关于进一步做好可再生能源发电市场化并网项目配套新型储能建设有关事项的通知》
广西	20%, 2 h	10%, 2 h	《关于申报 2023 年陆上风电、集中式光伏发电项目的通知》
广东	10%, 1 h	10%, 1 h	《关于印发广东省促进新型储能电站发展若干措施的通知》
云南	未指出	10%, 2 h	《关于进一步规范开发行为加快光伏发电发展的通知》
贵州	未指出	10%, 2 h	《关于开展我省 2023 年独立储能示范项目建设有关工作的通知》
河南	10%, 2 h	10%, 2 h	《关于 2021 年风电、光伏发电项目建设有关事项的通知》
陕西	10%, 2h	10% ~ 20%	《陕西省 2023 年风电光伏发电项目保障性并网规模竞争性配置办法》
福建	未指出	10%, 2 h	《关于公布 2022 年集中式光伏电站试点项目名单的通知》
甘肃	15%, 2 h	15%, 2 h	《关于“十四五”第一批风电、光伏发电项目开发建设有关事项的通知》
安徽	27%, 2 h	13%, 2 h	《关于 2022 年第一批次风电和光伏发电项目开发建设方案》
内蒙古	15%, 2 h	15%, 2 h	《关于推动全区风电光伏新能源产业高质量发展的意见》
青海	15%, 2 h	15%, 2 h	《2022 年青海省新能源开发建设方案》
河北冀北	20%, 2 h	20%, 2 h	《河北省风电、光伏发电年度开发建设方案拟安排项目情况公示》
河北冀南	15%, 2 h	15%, 2 h	
湖北	未指出	20%, 2 h	《关于发布 2023 年新型储能电站试点示范项目的通知》
西藏	未指出	20%, 4 h	《2023 年电、光伏发电等新能源项目开发建设方案》
宁夏	10%, 2 h	10%, 2 h	《自治区发展改革委关于加快促进储能健康有序发展的通知》
上海	20%, 4 h	未指出	《上海市发展改革委关于公布金山海上风电场一期项目竞争配置工作方案的通知》
湖南未阳	5%	5%, 2 h	《关于加快推动湖南省电化学储能发展的实施意见》
天津	15%	15%	《天津市 2023 年度风电、光伏发电项目开发建设方案的项目清单》

4 钒资源保障储能产业长远发展

我国钒资源储量非常丰富,是全球钒资源大国,这为钒储能产业的长期快速发展奠定了坚实的资源基础。据统计,我国可开采钒资源储量约 950 万 t (金属钒计),占世界总储量的 37.16%,居全球首位^[10],图 3 中中国、澳大利亚、俄罗斯、南非等 4 国钒资源储量占比超过 90%^[11-12]。2022 年全球钒产量(以 V_2O_5 计)22.87 万 t 左右,国内产量约 7.32 万 t (金属钒计),我国产量占全球比例为 57%。2023 年 10 月经中国地质科学院重新测算,我国钒资源量为 6 561 万 t,石煤矿占比 59.99%,钒钛磁铁矿占比 35.94%,四川、湖南、贵州、湖北、河南和陕西 6 省占全国的 80%。随着勘探工作的不断深入,预计钒矿石资源量还将有所增加。其中,湖南等地区石煤型钒矿储量丰富,是我国重要的钒资源来源之一^[13-14]。

目前我国钒矿石开采提取制备的钒产品量稳定在 10 万 t (金属钒计)左右,主要集中在四川、河北承德的钒钛磁铁矿和陕西等地的石煤型矿区^[11],开采技术日趋成熟,钒矿石产量可以满足当前工业需求。我国钒矿石资源储量可支持至少 100 年的大规模开采,完全能满足未来钒储能产业需求,而且我国已掌握了先进的钒冶炼技术,钒冶炼产量占全球 70% 以上,可为钒储能提供高质量、成本竞争力强的钒原料。

综上所述,中国钒资源储量大、分布广、质量好,钒冶炼技术世界领先,这为钒储能产业发展提供了坚实基础,充足的优质钒资源有力保障我国钒储能产业实现自主可控发展,在全球市场上具有明显的竞争优势。

5 钒液流电池商业化发展进入加速期

近年来,在国家政策支持和市场需求推动下,我国钒储能产业呈现加速发展态势,从宏观层面可以观察到钒储能订单快速释放、新注册企业增多、企业规模不断扩大等明显特征。具体来看,2022 年和 2023 年我国钒储能行业接收订单规模超过 11.3 GWh,较 2021 年及以前订单总量增长超过 10 倍,充放电功率最高达到 300 MW 级,其中国家电投、三峡能源等企业获得较大规模订单,预计 2024 年订单量还将继续高速增长。订单释放反映出电网

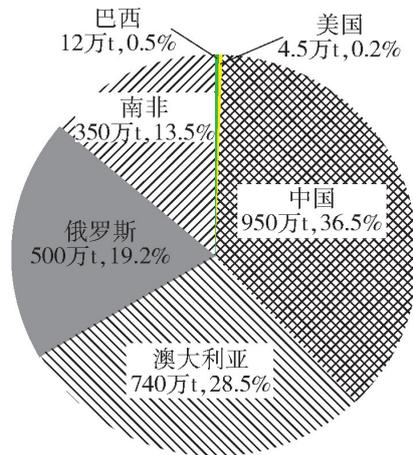


图 3 全球钒资源储量分布情况 (USGS)

Fig. 3 Global distribution of vanadium resources (USGS)

企业对钒储能应用需求的高涨,与订单增长相匹配,钒储能相关企业也在快速扩张。电堆产能达到或规划超过 100 MW 企业主要包括上海电气、液流储能、寰泰储能、星辰新能等。大连融科、江西银峰、兴欣钒科技积极布局钒电池电解液业务。2022 年 10 月融科储能与钒钛股份成立合资公司钒融储能,目前电解液产能 6 万 m^3/a 。现阶段电解液生产仍然存在技术壁垒,目前参与企业较少。湖南银峰电解液目前产能 3.3 万 m^3/a ,正在建设 6.6 万 m^3/a 项目;川威集团下属的兴欣钒能源科技公司正在规划产能 6 万 m^3/a ;攀钢集团产能 0.5 万 m^3/a ;承德新新钒钛产能 0.3 万 m^3/a ;河钢集团产能 0.1 万 m^3/a ,规划产能 5 万 m^3/a 。产业扩产速度预计逐步加快,市场竞争将逐步激烈,2023 年新进入企业数量增加较快,产业集群初步形成,如表 5 所示。

可以预见,在政策红利和巨大市场空间激励下,我国钒储能企业将持续高速增长,行业集中度提升,钒储能产业快速发展的态势将持续。总体来看,从宏观领域可以明显观察到我国钒储能产业发展正在加速,市场需求旺盛,前景广阔。

6 低成本短流程钒电池电解液制备技术进展

钒电解液占总成本 60% 以上(储能时长 4 h 及 4 h 以上,电池级高纯五氧化二钒按价格 13 万/t 计),并且随着电堆集成制造技术的成熟和系统储能时间的延长,电解液成本占比会更高,所有降本的核心环节应该是钒资源提取价格加电解液生产制造成本。

表4 近期钒电解液流电池签订项目情况

Table 4 Recent vanadium electrolyte flow battery projects

时间 (年·月)	进度	地区	项目名称	签约单位	功率/ MW	容量/ MW·h
2024.1	中标	北京丰台	中核汇能全钒液流电池储能系统	寰泰储能	250	1 000
2023.12	招标	广东惠州	广东惠州液流电池储能项目	中海储能科技(北京)有限公司	2	10
2023.12	招标	山西应县	国家电投山西应县全钒电解液流电池系统项目	国润储能	2.5	10
2023.12	并网	浙江温州	寰泰储能全钒液流电池用户侧储能项目	寰泰储能	1	12
2023.12	并网	山东诸城	国家电投诸城全钒液流储能项目	国家电投	1	6
2023.12	签约	云南丽江	华坪县全钒液流电池共享储能电站项目	北京绿钒	300	600
2023.12	招标	新疆吉木萨尔	三峡能源新疆全钒液流电池储能项目	暂无	200	1 000
2023.11	获批	山西朔州	朔州市全钒液流电池长时储能系统关键技术研究与示范项目	暂无	25	100
2023.11	签约	辽宁沈阳	康平县全钒液流独立储能电站项目	恒久安泰	100	400
2023.11	签约	安徽芜湖	安徽芜湖获港全钒液流电池项目	芜湖鸿兹海新能源	6	36
2023.10	招标	新疆察布查尔	新疆液流电池储能项目	大连融科	75	300
2023.7	签约	四川省内江市	内江全钒液流储能示范电站项目	国家电投	100	400
2023.7	签约	甘肃省兰州榆中县	榆中县全钒液流独立共享储能电站	开封时代新能源	300	1 200
2023.7	签约	甘肃省庆阳市	全钒液流共享储能电站项目	寰泰集团	240	960
2023.7	签约	四川省攀枝花市	全钒液流储能示范电站项目	国家电投	100	500
2023.6	签约	湖南省怀化市	鹤城高新区全钒液流储能项目	普能世纪、华电新能源	25	100
2023.6	开工	山东海阳	海阳储能电站液流电池项目	国家电投	100	200
2023.5	签约	湖北长阳土家族自治县	龙坪镇全钒液流化学储能项目	法电优能、国家电投	70	280
2023.5	签约	湖北洪湖曹市镇	洪湖曹市镇全钒液流储能项目	中节能、华润电力	100	200
2023.5	签约	湖北省枣阳市	湖北枣阳全钒液流储能电站项目	枣阳新能源、华润电力	100	200
2023.5	签约	湖北省枣阳市	全钒液流混合钛酸锂储能电站试点示范	中钒储能、睿能世纪、绿矾新能源	100	205
2023.3	签约	宁夏中卫市沙坡头区	全钒液流电池项目	国家电投	50	300
2023.2	签约	河南省开封市杞县	中核汇能杞县独立共享储能项目	中核集团	100	200
2023.2	签约	河南省开封尉氏县	中电建尉氏独立共享储能项目一期	中国电建	100	200
2023.2	签约	浙江杭州临平	浙江大有实业全钒液流储能项目	大有实业、意丰歌服饰	0.5	2.5
2023.1	签约	甘肃省西昌市	电网侧百兆瓦级全钒液流电池储能示范	上海电气、华能集团	100	400
2022.12	并网	安徽枞阳	枞阳海螺全钒液流电池储能项目	海螺集团	6	36
2022.10	开工	新疆吉木萨尔县	新疆吉木萨尔县全钒液流储能项目	三峡能源	250	1 000
2022.9	签约	湖南吉首	红坪全钒液流电池储能电站项目	湖南京科控股、湖南汇锋高新	100	400
2022.9	开工	新疆察布查尔	新疆察布查尔县全钒液流电池储能项目	三峡能源	250	1 000
2022.9	签约	湖北襄阳	枣阳风电钒电池储能电站项目	华润集团	100	400
2022.9	开工	山东潍坊	全钒液流电池储能项目	海化集团	30	60
2022.8	开工	河南开封	开封时代全钒液流电池储能示范电站项目	开封时代	6	24
2022.5	招标	宁夏中宁	大唐中宁共享储能项目	大唐中宁	100	400
2022.3	签约	江苏盐城	盐城立凯储能电站	上海电气	100	300
2016.4	并网	辽宁大连	大连液流电池储能调峰电站国家示范项目	大连融科	200	800

表5 中国全钒液流电池相关生产企业地图

Table 5 Geographic distribution of VRFB manufacturers in China

省份	钒液流电池企业及相关信息	省份	钒液流电池企业及相关信息
四川	上海电气 全钒液流电池全产业链及钒资源综合利用 伟力得 钒电池产业园项目	黑龙江	建龙集团 黑龙江钒产品及钒储能集群
	永甫储能 年产100MWh全钒液流电池系统 四川化工 年产100MWh全钒液流电池系统		吉林
	宁夏	浙江	
			林源集团 1.2 GWh 全钒液流电池项目 伟力得 全钒液流装备制造项目
新疆	液流储能 全钒/铁铬液流电池生产项目	河北	建龙集团 钒钛高端装备制造产业园
青海	陕西建工 建设年产1 GW 钒电池生产项目		内蒙古
甘肃	林源集团 4 GWh 全钒液流电池生产制造项目	山东	
安徽	海螺集团 全钒液流电池储能项目		江苏
	上海电气 1 GWh 储能液流电池生产线 力新国科 全钒液流装备制造项目	融科储能 全钒液流电池装备产业化项目 上海电气 江苏盐城第二生产基地 招商项目 5 GWh 全钒液流储能电池制造 星辰新能 星 G 制造基地	
云南	中广通能源、银峰新能源 全钒液流电池生产基地	陕西	华兴电能 全钒液流电堆生产线 华峰新能源
贵州	聚能世纪 10 MW/40 MWh 钒电池产业化项目		麟游县 100 WM400 WMh 钒电池 陕西建工 3 GW 钒电池生产项目 海越能源 全钒液流电池产业园项目
湖北	华润电力、大力电工 华润大力枣阳风电钒液流电池产业园项目 钒电新能源 钒电池全产业链项目		
	星辰新能 全钒液流储能装备智能生产基地 金岭矿业 800 MWh 电池组项目		
辽宁	大连融科 金普新区装备生产与花园口材料生产基地 金谷炭材料 液流电池碳毡生产基地		

钒电解液制备主流技术包括化学还原法和电解法。化学还原法利用还原剂(如硫单质、醇、草酸

等)将高价的钒氧化物或钒酸盐还原制备电解液。电解法可进一步分为直接电解和间接电解两种方

式。直接电解是将溶解在硫酸中的五氧化二钒在电解池或槽的负极发生还原反应得到等量三价和四价钒离子。间接电解法则利用还原性物质(如 S 单质)与硫酸中溶解后的 V_2O_5 进行氧化还原反应,得到 VO^{2+} 溶液,随后通入负极电解得到等量三价钒离子和四价钒离子。两种方法均有高能耗与动力学缓慢的特点,其中,电解法由于用电而不采用其他还原剂,比化学法更不易引入新杂质,但两种方法无论是电解法还是还原法均需以高纯五氧化二钒为原料。

近几年,中国恩菲工程技术有限公司(简称中国恩菲)在短流程制备钒电解液技术方面实现突

破,在资源端突破低品位石煤钒绿色提取技术,形成钒矿选冶联合技术,提高了低品位钒矿的综合回收率,该技术在加工端已形成 4 条钒制品技术路线。近年来,中国恩菲在钒电解液降本增效方面做了大量科研工作,取得了短流程制备钒电解液新技术(图 5)。以中国恩菲短流程技术为例,相较化学沉淀除杂工艺,恩菲短流程技术单元工艺数量减少了 4~6 项,钒资源综合利用率提高约 18%,电解液或五氧化二钒纯度提高一个等级或数量级,加工成本降低至少 30%。传统电解液与恩菲短流程电解液的制备技术指标对比见表 6。

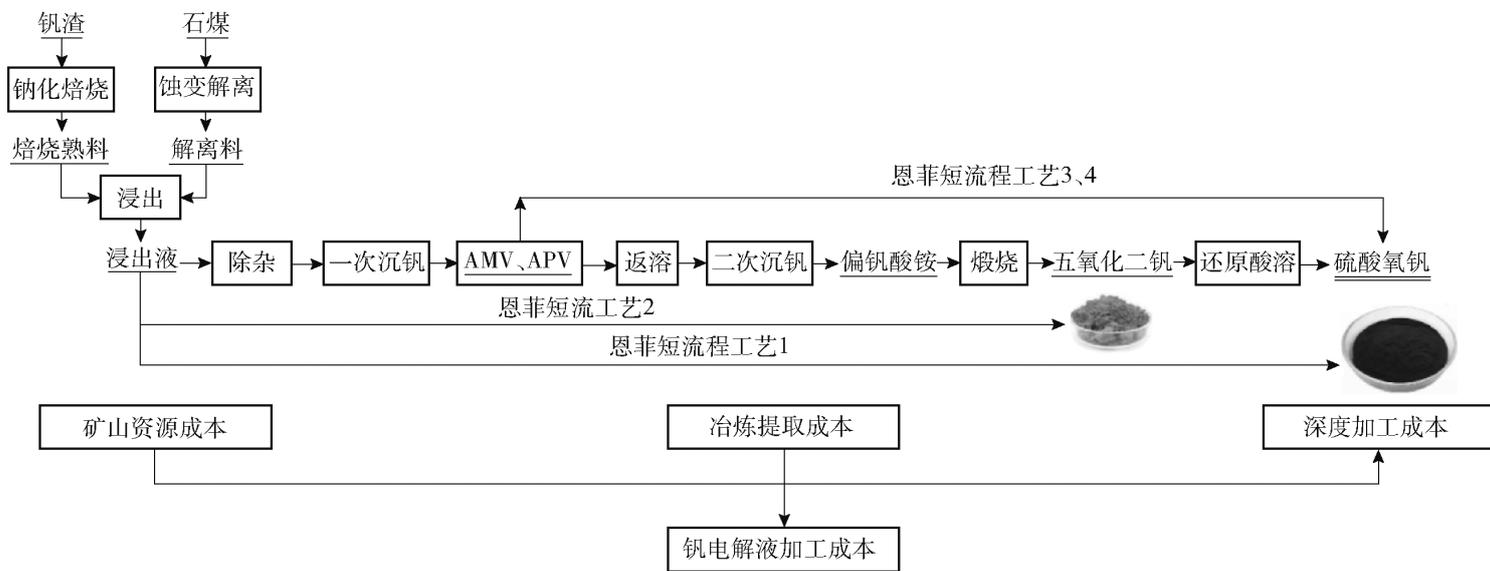


图 4 恩菲短流程制备钒电解液技术路线

Fig. 4 Technical route of ENFI's short-process technology for vanadium electrolyte preparation

表 6 传统电解液制备方法与恩菲短流程电解液制备技术对比

Table 6 Comparison of the traditional electrolyte preparation method with ENFI's short-process technology

对比指标	化学沉淀除杂技术	中国恩菲短流程技术
单元工艺数量	>10 项	4~6 项
钒资源综合利用率	约 80%	≥98%
高纯五氧化二钒纯度	98%~99%	≥99.9%
硫酸氧钒电解液纯度	硫酸氧钒 1.7 mol/L; 杂质含量 $(20 \sim 100) \times 10^{-6}$ g/L	硫酸氧钒 1.7~2.5 mol/L, 可调; 杂质含量 $<5 \times 10^{-6}$ g/L
加工成本	0.8~1.0 万元/m ³	降低 30%~50%

7 钒电解液储能可持续发展亟需解决全流程制造成本难题

钒电池总体成本较高,导致初始投资偏高,钒原料价格居高不下是导致成本高企的主因,为增强钒电池储能技术应用推广需要进一步降低成本。2023 年前,以五氧化二钒价格 10 万元/t 计算,1 W·h 储

能需支付的钒资源成本为 1 元,传统电解液制造成本折合为 1 W·h 储能 0.6 元,钒电解液综合成本为 1.6 元/W·h。石煤等大宗原料提钒开发可降低钒资源成本至 0.4 元/W·h,短流程电解液制造进一步降低电解液加工成本至 0.21 元/W·h。后期如果扩大钒资源开发利用,并研发新型低成本电堆关键材料,同时,采用新工艺和设备降低钒电解液和电堆制造成

本,实现产业化规模化,预计在2030年后钒液流电池系统初始投资成本为1.09元/W·h。相较于磷酸铁锂电池,钒电池具有以下优势:初期投资成本虽然较高,但钒电池循环次数是锂电池的两倍以上,摊薄了全生命周期储能成本;钒液流电池回收率较高,可以达到55%,而磷酸铁锂均在25%以下;在容量方面,钒电池基本没有衰减,磷酸铁锂每年至少衰减2.5%。综合测算,钒储能全生命周期成本为0.2元/W·h,比磷酸铁锂全生命周期成本0.28元/W·h更具经济优势。未来,随着钒资源的开发,钒储能产业降本优势将愈发突出。

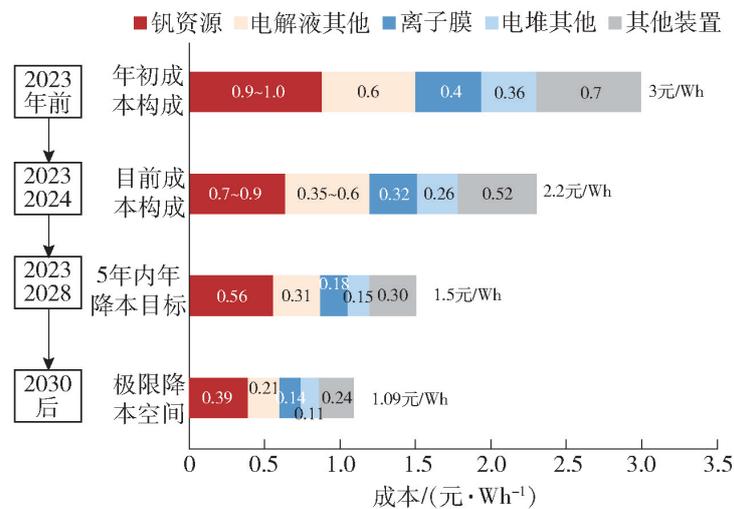


图5 钒电解液流系统初始投资成本及潜在降本空间(元/Wh, 4 h 储能)

Fig. 5 Initial investment costs and potential cost reductions for vanadium electrolyte flow systems (RMB/Wh, 4-hour storage capacity)

钒储能电池虽然相对于其他储能产品具有寿命长、能量密度高、技术成熟度高的优点,但仍然需要从多个方面进行优化。

1) 电池系统功率密度和能量密度仍需优化。目前钒电池功率密度和能量密度指标并不突出,限制了高效率应用^[15-16],需要开发新型电解液体系,优化电池堆、电力管控系统设计等要素,以显著提升钒电池的单位体积、单位质量的功率和储放能力,使整体储能效率达到80%以上。

2) 回收利用体系有待健全。目前钒电池报废量小,回收通道不畅,迫切需要建立信息化的钒电池回收网络,并研发高效的资源再生利用技术,实现钒的循环使用^[17]。

3) 钒电堆关键材料需实现自主可控。当前膜材料等还依赖进口,须提升自主研发生产能力,以降

低成本,保障产业链安全。

4) 钒储能系统工程化和系统集成能力仍需提高。产业化进程缓慢,系统集成和运维管理水平有限,要加强工程技术人才培养,提升钒电池规模化应用的整体解决方案能力。

5) 此外,钒电池标准体系有待进一步完善。目前行业标准不健全,制约规模化应用,要积极完善钒储能产品、系统和工程技术标准体系,推动产业良性发展。

增强钒电解液储能产业发展核心竞争力,首先需考虑融合核心技术、资本、资源等关键要素,从上游矿产资源端,中游冶炼端、材料制备端,下游系统集成、应用端等纵向一体化布局整个钒电解液储能产业链,用产业链各环节上下支撑、融合、宽量优势去应对降价竞争的冲击,应对锂电等低成本储能的横向竞争;其次,在产业链相关环节中,需要快速储备和拥有能释放资源、降低成本的核心技术,比如石煤钒资源开采和冶炼技术,吨五氧化二钒矿冶加工成本降低到5~7万元,高品质电解液加工成本降低到0.5~0.8万元/m³,质子膜、碳毡电极等配件大规模国产化,电堆集成制造的大规模化、机械化、无人化、智能化等均能降低制造成本,使钒液流电池千瓦时成本在3年内降低到1.5元左右,并具有长远进一步降价空间;最后,构建资源端、制造端和市场端的深度合作,整个产业链生态需要各端企业的共同维护,使用金融工具手段,以钒金属期货、电解液金融租赁等手段,平稳发展价格及降低初始投资,防止热钱、快钱对钒资源、钒金属的恶意炒作,造成行业快速涨价、快速降价所带来的大面积企业消亡。

8 总结与建议

1) 储能是国家能源结构重构、新能源发挥基础性作用的关键支撑,将催生万亿级别的市场需求。钒电解液储能因安全性高、持续放电时间长、扩充灵活、资源供给量充足、低碳环保等因素,而且商业化规模逐步成熟,将逐步成为储能行业发展的热点。

2) 政策响应是推动钒液流电池长时储能发展的重要因素。钒电解液储能企业需要密切关注国家和地方政府对储能技术的支持政策,并与政府、能源公司、研究机构和其他相关行业的合作伙伴建立紧

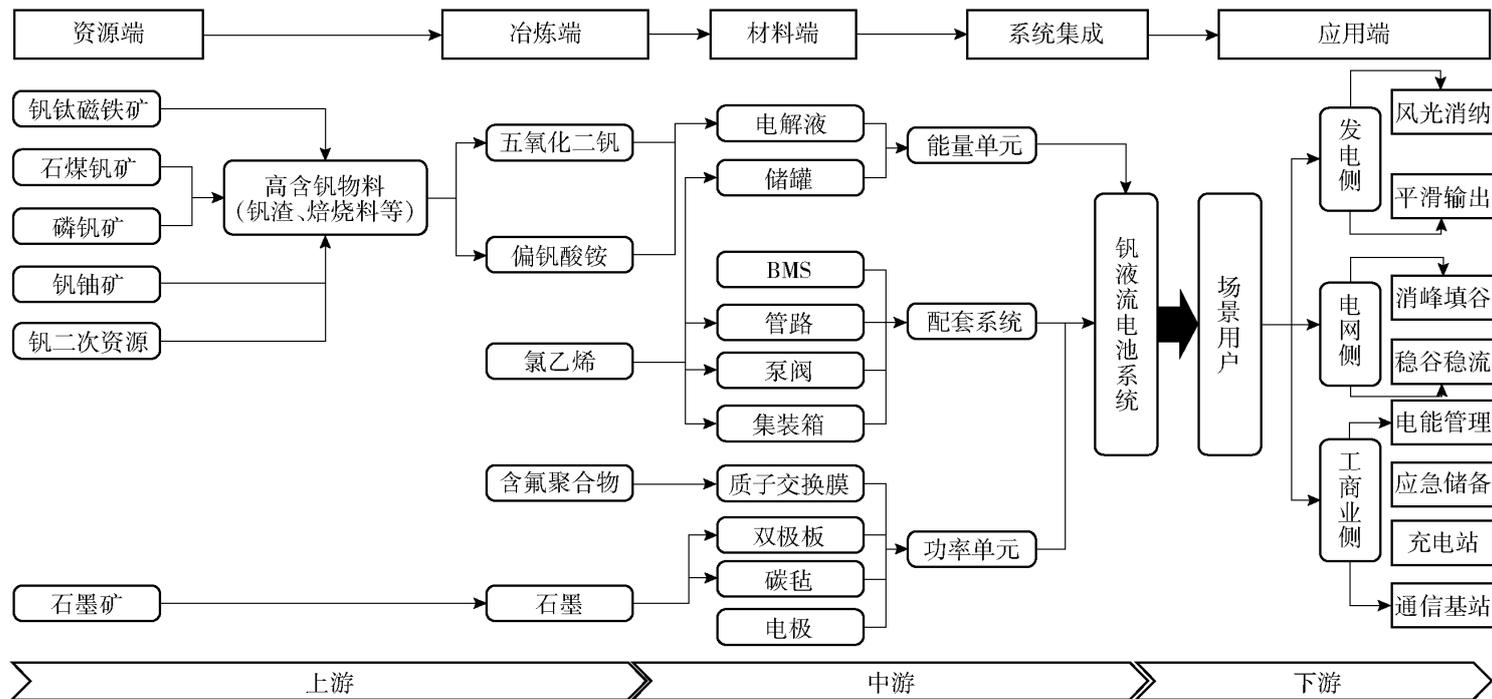


图6 上中下游钒液流电池产业链

Fig.6 VFB industry chain: upstream, midstream, and downstream

密的合作关系,通过政策支持和合作伙伴关系,可以获得专业知识、技术支持和市场渠道,加快钒液流电池长时储能的市场推广和应用。

3) 要实现钒液流电池长时储能的可持续发展,需要在整个价值链上进行技术创新和研发。首先,需要关注电解液、质子膜等关键技术的创新,以提高能量密度和能量转换效率等性能指标。其次,还需要关注电堆制造工艺的优化,以降低成本并提高生产效率。技术创新和研发是实现钒液流电池长时储能的可持续发展的关键。

4) 市场需求和商业模式的理解和把握是实现钒液流电池长时储能商业化的关键。企业应紧密关注市场需求和商业模式的变化,了解各个领域的储能需求,并开发相应的应用场景;同时,还需要研究商业模式,探索如何将钒液流电池长时储能与其他能源系统和服务相结合,提供更灵活和可持续的解决方案。

5) 钒液流电池长时储能的发展必须注重环境影响和人才队伍建设。应该对钒电解液储能电池的制备流程进行全面的生命周期评估,了解钒液流电池的制造、运输、使用和处理等各个环节对环境的影响,并采取相应措施降低负面影响。同时,还需要加强产业链相关领域人才培养,重视产业工程技术人才的培养,以确保钒液流电池长时储能的可持续发展。

[参考文献]

[1] 裴森. 多重应用场景下的新能源电力系统储能技术[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(34): 112-114.
PEI Miao. Energy storage technology for new energy power systems in multiple application scenarios[J]. Urban Construction Theory Research (Electronic Edition), 2023(34): 112-114.

[2] 杨海森. 多重应用场景下的新能源电力系统储能技术[J]. 照明电气, 2021(7): 99-100, 138.
YANG Haisen. Energy storage technology for new energy power systems in multiple application scenarios[J]. Lighting Electrical, 2021(7): 99-100, 138.

[3] 中商产业研究院. 2023年中国电化学储能行业市场前景及投资研究报告[J]. 电器工业, 2024(1): 8-13.
Zhongshang Industry Research Institute. Market outlook and investment research report on China's electrochemical energy storage industry in 2023[J]. Electrical Industry, 2024(1): 8-13.

[4] 曾其权, 马驰, 冯彩梅, 等. 储能产业发展现状和机遇的研究与探讨[J]. 中国能源, 2022(7): 59-65.
ZENG Qiquan, MA Chi, FENG Caimei, et al. Discussion of the current situation and opportunities for the development of the energy storage industry[J]. China Energy, 2022(7): 59-65.

[5] McKinsey Company. Net-zero power long duration energy storage for a renewable grid[R]. LDES Council, 2021.

[6] 王曦, 凌黎明, 杨俊峰, 等. 钒电池储能产业发展现状分析[J]. 中国金属通报, 2022(12): 156-158.
WANG Xi, LING Liming, YANG Junfeng, et al. Analysis of the development status of vanadium battery energy storage industry

- [J]. *China Metal Bulletin*, 2022(12): 156–158.
- [7] 王贝, 李宾宾, 孙广星, 等. 新型储能技术与产业发展研究[J]. *能源与节能*, 2023(11): 8–13.
WANG Bei, LI Binbin, SUN Guangxing, et al. Technologies and industrial development of new-type energy storage[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2023(11): 8–13.
- [8] 康荔. 金融支持我国储能产业发展情况的分析[J]. *北方金融*, 2023(9): 50–54.
KANG Li. Analysis of Financial support for the development of China's energy storage industry[J]. *Northern Finance*, 2023(9): 50–54.
- [9] 中国储能网新闻中心. 储能电站事故统计 [EB/OL]. Available: <https://www.escn.com.cn/20230923/a8eb07fed8364f55b3b75cc6383fe96d/c.html>.
ESCN News Center. Accident statistics of energy storage power station [EB/OL]. Available: <https://www.escn.com.cn/20230923/a8eb07fed8364f55b3b75cc6383fe96d/c.html>.
- [10] 魏甲明, 刘召波, 陈宋璇, 等. 全钒液流电池技术研究进展[J]. *中国有色冶金*, 2022, 51(3): 14–21.
WEI Jiaming, LIU Zhaobo, CHEN Songxuan, et al. Progress of research on full vanadium liquid flow battery technology [A]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2022, 51(3): 14–21.
- [11] 陈东辉. 钒产业 2022 年年度评价 [J]. *河北冶金*, 2023(12): 1–14.
CHEN Donghui. Vanadium industry 2022 annual evaluation[J]. *Hebei Metallurgy*, 2023(12): 1–14.
- [12] 吴优, 陈东辉, 刘武汉, 等. 2022 年全球钒工业发展报告 [J]. *钢铁钒钛*, 2023, 44(6): 1–8.
WU You, CHEN Donghui, LIU Wuhan, et al. Global vanadium industry development report 2022 [J]. *Steel, Vanadium and Titanium*, 2023, 44(6): 1–8.
- [13] US Department of the Interior, US Geological Survey. Mineral commodity summaries 2023 [R]. USGS, 2023.
- [14] 张一敏, 薛楠楠, 郑秋实, 等. 钒页岩资源全产业链利用研究现状及发展 [J]. *中国有色冶金*, 2023, 52(5): 2–17.
ZHANG Yimin, XUE Nannan, ZHENG Qiushi, et al. Research status and development of the full industrial chain utilization of vanadium shale resources [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2023, 52(5): 2–17.
- [15] 高永璋. 中国钒矿资源及供需形势分析 [J]. *中国矿业*, 2019, 28(S2): 5–10.
GAO Yongzhang. Vanadium resources and its supply and demand situation in China [J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(S2): 5–10.
- [16] 林亮, 禹争光, 张红亮, 等. 大功率全钒液流电池系统效率优化分析 [J]. *东方汽轮机*, 2023(3): 61–65.
LIN Liang, YU Zhengguang, ZHANG Hongliang, et al. Efficiency optimization analysis of high-power vanadium battery system [J]. *Dongfang Turbine*, 2023(3): 61–65.
- [17] 刘涛, 葛灵, 张一敏. 全钒液流电池关键技术进展与发展趋势 [J]. *中国冶金*, 2023, 33(4): 1–8, 133.
LIU Tao, GE Ling, ZHANG Yimin. Advances and development trend in key technologies for all-vanadium redox flow battery [J]. *China Metallurgy*, 2023, 33(4): 1–8, 133.
- [18] 崔旭梅, 丁虎标. 钒液流电池电解液研究综述 [J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(5): 15–19.
CUI Xumei, DING Hubiao. Research progress of electrolyte for vanadium redox flow battery [J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2018, 37(5): 15–19.

Strategic considerations for the development of vanadium redox flow batteries for long-duration energy storage within a fully integrated industry chain

WEI Jiaming, CHEN Songxuan, FU Yunfeng, LIU Zhaobo, CAO Di, ZHOU Bo, LIU Hai
(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The advancement of clean energy and the implementation of “dual-carbon” goals are reshaping energy structures and upgrading grid systems, precipitating a massive demand for long-duration energy storage, projected to increase five to ten times by 2030 compared to 2025. Vanadium redox flow batteries (VRFBs), known for their safety, longevity, flexibility, and abundance of resources, have seen a surge in development, driven by several policy frameworks aimed at clean energy storage standards. Currently, the high cost of VRFBs, primarily due to the expensive vanadium raw materials, poses a significant challenge. A key cost reduction strategy involves optimizing the extraction of vanadium resources and manufacturing of electrolytes. The short-process technology for preparing vanadium electrolyte, developed by China ENFI, reduces manufacturing costs by 30% to 50% and is characterized by a streamlined process and higher vanadium utilization. With continued advancements in resource extraction and

process innovation, the cost-reduction potential of the VRFB industry is set to enhance markedly. Supported by national policies, vanadium flow batteries are poised for rapid commercialization and scalability, positioning them as a vital technology in the energy storage sector. Future development will require a multi-faceted approach, including significant emphasis on technological innovation, research, and an effective recycling system, to ensure the sustainable growth of the long-duration vanadium flow battery energy storage industry.

Key words: vanadium flow battery; long-duration energy storage; clean energy development; new energy storage integration; cost reduction in manufacturing; energy storage technology; vanadium electrolyte preparation

中国恩菲三项成果荣获“绿能星”奖项

5月10日,能源产业品牌宣传周暨能源产业品牌建设年会在北京召开。中国恩菲工程技术有限公司三项成果荣获“绿能星”奖项,展现了该公司在能源领域的数字化、智能化技术实力。

“孤网型源网荷储一体化技术”获得绿能星奖一等奖。该技术以孤电网型或市电停电较多的海外工矿企业为背景,基于稳定、可靠的前提,提出了光伏、储能、风电、光热等多能互补和源网荷储一体化的方案,为企业连续稳定生产、碳减排和降本增效提供了绿色方案,具有较高的经济和环保效益。

“尾矿库智能管理系统”获得绿能星奖优秀奖。该系统针对尾矿库安全隐患管控和安全风险预警双重预防机制研发,可实现上级集团与厂矿企业安全分层分级管控和风险预测预警,提高尾矿库运营效率,降低安全风险,确保稳定运行。

“矿山智能通风关键技术”入选能源产业品牌成果典型案例。该技术采用先进可靠的融合网络和优化控制技术,可实现井下所有风机设备自动变频调速、风机站无人值守、通风构筑物自动调节、矿井环境实时监测、人员设备和作业面按需供风,达到节能减排、提高经济和社会效益的目的。

能源品牌宣传周由中国能源研究会联合中国农村能源行业协会、中国工业报社、中国质量万里行杂志社、中国能源产业发展网举办,以“中国能源、世界品牌”为主题,通过主题大会、系列专题会、成果发布等多元化内容,充分展示我国能源产业卓越品牌成果,为产业发出品牌强音。

(资料来源:中国恩菲)