

新型储能金属钒资源需求预测与供应分析

陈仁凤^{1,2}, 龙涛^{1*}, 陈其慎^{1,2}, 张艳飞¹, 邢佳韵¹, 刘敏¹, 王琨¹, 任鑫¹,
商铖红^{1,2}, 王晓^{1,2}

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100032; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100089)

摘要: 随着全球太阳能、风能等新能源的快速发展, 储能作为解决其发电间歇性等问题的必备设施, 未来也将迎来爆发式增长。钒液流电池具有本征安全、全生命周期经济性好及环境友好等特点, 且已具备产业化应用条件, 在储能领域的重要性不断凸显。本文分析了未来钒液流电池的发展趋势, 设置了高速发展、参考和低速发展3种情景, 结合钒液流电池单位钒用量, 预测了未来不同情景下储能领域钒资源需求趋势。研究发现, 未来钒资源需求将快速增长, 尤其是在高增长情景下, 全球2040年钒资源需求将较2021年增长276~338倍; 分析全球钒资源的供应情况, 认为随着钒液流电池的迅速发展, 未来钒资源将供不应求。针对以上情况, 研究提出: 一是提高钒液流电池的技术研发力度; 二是加大钒矿的地质勘查力度, 积极探索新的钒矿资源; 三是创新钒钛磁铁矿的提钒方法和技术, 提高钒资源利用效率; 四是加大钒资源的回收利用; 五是重视境外钒钛磁铁矿的布局与开发。

关键词: 电化学储能; 钒液流电池; 钒资源; 供应保障; 需求预测

中图分类号: F416.1; F407.1 **文献标识码:** A

New Energy-Storage Metal Vanadium Resources: Demand Prediction and Supply Analysis

Chen Renfeng^{1,2}, Long Tao^{1*}, Chen Qishen^{1,2}, Zhang Yanfei¹, Xing Jiayun¹, Liu Min¹,
Wang Kun¹, Ren Xin¹, Shang Chenghong^{1,2}, Wang Xiao^{1,2}

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100032, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100089, China)

Abstract: As new energy sources such as solar and wind energy develop rapidly, energy storage will usher in explosive growth owing to its ability to solve the problems of intermittent power generation. Vanadium redox flow battery has the characteristics of intrinsic safety, excellent lifecycle economical efficiency, and environmental friendliness, and is ready for industrial application; therefore, such battery becomes increasingly important in the field of energy storage. This study analyzes the development trend of the vanadium redox flow battery. Considering the unit vanadium consumption of the vanadium redox flow battery, it predicts the demand trend of vanadium resources in the energy storage field under three scenarios: high-speed, reference, and low-speed development. The demand for vanadium resources will increase rapidly in the future, especially under the high-growth scenario, and the global demand for

收稿日期: 2024-03-16; **修回日期:** 2024-04-20

通讯作者: *龙涛, 中国地质科学院矿产资源研究所助理研究员, 主要研究方向为矿产资源调查评价、安全保障与管理;

E-mail: 240505451@qq.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“新能源矿产需求预测及安全评价技术”(2022-XY-82); 自然资源部中国地质调查局项目(DD20230040); 国家自然科学基金面上项目(42271281)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

vanadium resources in 2040 will increase by 276–338 times compared with that in 2021. With the rapid development of vanadium redox flow batteries, vanadium resources will be in short supply in the future. In view of the above situations, countermeasures for ensuring the supply of vanadium resources are proposed: (1) promoting technological research regarding vanadium redox flow batteries; (2) strengthening the geological exploration of vanadium mines to explore new vanadium resources; (3) innovating the methods and technologies for extracting vanadium from vanadium-titanium magnetite to improve the utilization efficiency of vanadium resources; (4) increasing the recycling of vanadium resources; and (5) emphasizing the layout and development of overseas vanadium-titanium magnetite.

Keywords: electrochemical energy storage; vanadium flow battery; vanadium resources; supply guarantee; demand forecasting

一、前言

目前,全球正在经历一场以低碳、零碳和负碳为技术特征的能源转型和科技革命,风能、太阳能等新能源快速发展。近五年,全球新增发电装机容量中新能源约占70%,全球新增发电量中新能源约占60%^[1]。根据国际能源署(IEA)预测,到2030年,在净零排放情景中,全球可再生能源发电容量约为11 008 GW,是2022年可再生能源发电容量的3倍多^[2]。然而,风能、太阳能等新能源的大规模利用还存在时间上的间歇性、不稳定性 and 空间上的分散性等挑战,如果不经过处理,新能源产生的不稳定电力直接并网会给电网稳定性带来巨大的压力,严重时将引发电网事故^[3]。储能可以平抑新能源波动,实现新能源平滑、稳定输出,提高新能源的实际利用率,因此,储能成为新能源发展的关键^[4]。

储能广泛应用于新能源体系的发电侧、电网侧和用户侧^[5-7]。我国高度重视储能的发展,2021年,国家发展和改革委员会、国家能源局发布通知,要求超过电网企业保障性并网以外的规模初期按照功率15%的挂钩比例(时长4 h以上)配建调峰能力,按照全资比例建设抽水蓄能、化学储能电站、气电、光热电站或开展煤电灵活性改造,按照20%以上挂钩比例进行配建的优先并网^[8]。随着国内外大规模储能项目的陆续启动,储能技术未来势必会迎来爆发式增长。

近年来,电化学储能产业快速发展^[9],其中钒液流电池储能技术以其本征安全、全生命周期经济性好及环境友好等特点,受到储能领域的广泛关注^[10-12]。钒具有优异的物理和化学性能,化合价有+2、+3、+4和+5,不同价态可形成相邻价态的电对;具有耐盐酸和硫酸的特性,是钒液流电池的关键金属材料。钒用途十分广泛,主要应用于钢铁、储能、化工和钛合金等领域,被中国、美国、欧盟、日本、澳大利亚等国家和地区列入战略性矿

产、危机矿产、关键矿产清单。

目前,业界对钒液流电池的研究主要集中在应用方面^[13-15],鲜有对钒金属的需求及供应保障的相关研究。本文在全球能源转型的背景下,围绕电化学储能技术及钒液流电池的发展趋势,研究储能领域对钒的需求和供应保障情况,以期为相关行业发展提供参考。

二、储能领域成为钒应用的新增长极

(一) 钒的应用领域

钒广泛应用于钢铁、储能、化工和钛合金(航空航天)等领域,是现代工业与国防部门所必须的重要资源,被誉为现代工业的“金属维生素”。

钢铁冶金是钒最主要的应用领域,据安泰科信息股份有限公司数据,2022年全球88.83%的钒用于钢铁冶金^[16](见图1),大部分含钒产品是由钒钛磁铁矿经选矿、高炉冶炼(电炉)、转炉还原、加工处理等工序获得。钒在钢铁领域主要作为合金添加剂,实现钢材的微合金化;钒的添加可提高钢材产品性能,也可以有效节约钢材使用量,实践表明,在结构钢中加入0.1%的钒,强度可提高10%~20%,结构重量减轻15%~25%,成本降低8%~10%;若采用含钒高强度钢时,可减轻金属结构质量40%~50%,比普通结构钢的成本低15%~30%,这对实现“双碳”目标具有积极作用。

钒的另外一个重要应用领域是钛合金行业,钛合金是一种广泛应用于航空航天领域的高级合金材料,含钒合金是钛合金最重要的添加剂,钛合金制作的关键原料就是各种牌号的含钒合金。2022年,全球约2.83%的钒用于钛合金领域;全球约4.37%的钒用于储能行业,3.97%的钒用于化工行业。钒在储能领域主要是用作钒液流电池,钒化合物在一些重要的化学工业生产中可用作催化剂。

根据安泰科信息股份有限公司的统计数据,近年

来全球储能领域钒消费量持续增长。2018年全球储能领域钒消费量占全球钒消费总量的1.8%，2022年迅速增长至4.37%（见图1）。

（二）钒液流电池的优势

随着储能行业的快速发展，钒液流电池需求前景良好。钒液流电池是一种以金属钒离子为活性物质的、呈循环流动液态的氧化还原可再生电池，正负极都是钒。钒液流电池已具备产业化应用的条件，且性价比高、经济性好；钒液流电池储能系统的储能时长越长，每千瓦时的实际成本就越低，是高功率、大容量、长时间储能技术的最佳选择（见表1）^[3,10,17,18]。

1. 本征安全

钒液流电池是水系循环体系电池，其电解液为钒离子的稀硫酸水溶液，在室温状态下即可工作（5~40℃），充放电过程中没有固相反应，只需控制好充放电截止电压，并确保电池系统存放空间通风良好，即可本征安全，没有起火爆炸等隐患^[10]，这是钒液流电池与其他电化学电池相比最为突出的优势。

2. 寿命更长

钒液流电池可通过周期性电解液共混实现对可逆容量的恢复，因此，钒液流电池具有更长的使用寿命^[3]。到目前为止，钒液流电池循环寿命可达到12 000~18 000次，约为锂离子电池的2倍以上，使

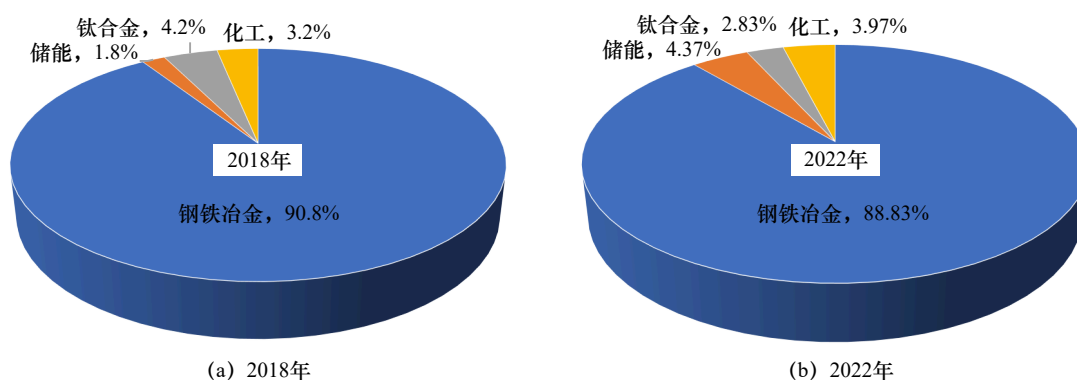


图1 全球钒消费结构

表1 不同电化学储能技术的优缺点

性能	钒电池	锂离子电池	铅蓄电池		钠硫电池
			铅酸电池	铅碳电池	
能量密度/(Wh·kg ⁻¹)	10~30	75~200	30~50	30~60	150~240
能量效率/%	60~85	85~89	70~90	80~90	70~90
循环寿命/次	12 000~18 000	1000~10 000	500~1200	2500~4000	2500~4000
寿命/年	15~20	5~15	5~15	—	10~15
放电深度/%	100	< 85	< 70	100	< 90
每日自放电率/%	小	0.1~0.3	0.1~0.3	—	0~20
适合储能周期	数小时~数月	数分钟~数天	数分钟~数天	数分钟~数天	数秒~数小时
电池成本/(元·kWh ⁻¹)	约3500	800~1000（磷酸铁锂电池）； 1000~1500（三元电池）； 2000~3000（钛酸锂电池）	—	800~1300	2500~3000
环境影响	小	中	大	大	中
工作温度/℃	5~40	-20~6	-30~60	-23~60	300~350
安全性能	安全	过热有爆炸危险	安全	安全	过热会爆炸，易引发重大事故
环境友好性	环保	环保	铅污染	铅污染	钠泄露风险

用年限在 15~20 年^[10]，也有研究认为其使用年限可长达 20 年以上^[3,19]。

3. 扩容简单，设计灵活

钒液流电池的输出功率和储能容量可进行独立设计，电堆是进行电化学反应的场所，其输出功率取决于电极的大小和电堆的数量；电解液是能量存储的介质，其储能容量取决于电解液的浓度和体积，因此可根据实际情况自由选择功率单元和能量单元数量。若想要增大输出功率，只需增大电极的面积和增加电堆的数量即可；若想增加储能容量，只需加大电解液的浓度和电解液的体积，因此钒液流电池适合于需要大规模、大容量、长时间储能装备的应用场所^[10]。

4. 强大的深放电能力

钒液流电池所使用的电极不含活性物质，只负责提供氧化还原反应的活性位点，电极本身并不发生氧化还原反应^[20]。因此钒液流电池与其他传统电池相比，充放电没有记忆效应，可以进行 100% 深度放电而不会损坏电池。

5. 对环境友好，易于回收利用

钒电解液是钒液流电池最核心的材料之一，是单一钒离子的硫酸溶液，减小了正负极电解液交叉污染的风险^[21]，充放电极少产生杂质，也无污染物，对环境友好。此外，钒液流电池回收率高，在系统使用寿命结束时，所有的电解质成分（包括钒资源、水和硫酸）都可以通过沉淀电化学氧化方法，借助于 pH 值变化很容易被分离出来^[22]。

6. 全生命周期成本较低，经济性好

钒液流电池初始投资成本较高，主要是由于离子交换膜和电解液等材料成本较高，而且钒液流电池能量密度低、体积大，因此电解液使用量会更大，导致其成本更高。但经过实际研究，不同储能时长的钒液流电池储能系统的实际价格不同，当储能时长越长时，电解液的储能系统价格就被单位分摊的更多，实际成本就越低。因此钒液流电池储能时长越长，其实际成本就越低^[10]。

三、储能用钒需求趋势分析

近年来，全球储能市场规模持续平稳增长，尤其是自 2019 年以来，全球清洁能源迅速发展^[23]，越

来越多的国家开始加速能源转型，储能产业成为全球经济复苏的抓手之一，全球储能累计装机规模逐年快速增长。根据中国能源研究会储能专委会/中关村储能产业技术联盟（CNESA）全球储能项目库的不完全统计，截至 2021 年年底，全球累计储能市场装机规模同比增长 9.58%，与 2017 年相比增长了 19.38%。

（一）电化学储能进入快速发展期

在全球储能技术中，抽水储能仍然占据主导地位，但电化学储能正异军突起，成为储能市场冉冉升起的一颗新星。近年来，电化学储能在储能领域占比逐年快速提升，累计装机规模大幅度攀升，成为储能市场的重要增量。根据中国能源研究会储能专委会、中关村储能产业技术联盟全球储能项目库的不完全统计，2021 年全球电化学储能累计装机规模比 2017 年增加了 7 倍多，电化学储能累计装机规模占全球储能市场累计装机规模比例从 2017 年的 1.67% 增长到 2021 年的 11.70%，实现了飞速发展（见图 2）^[24]。

电化学储能得益于高效的能量转化、受地理环境影响小和可再生能源整合的优势，随着技术的进步和成本的逐年下降，未来将持续增长。根据 IEA 和睿咨得能源（Rystad Energy）等综合预测，在可持续发展情景（即与实现《巴黎协定》目标相一致的发展轨迹所需的条件）下，预计到 2030 年全球电化学储能新增装机容量约为 169 GW·h，到 2040 年新增装机容量约为 426 GW·h（见图 3）^[24-26]，分别较 2021 年增加了约 8 倍和 21 倍；预计到 2030 年我国电化学储能新增装机容量约为 104 GW·h，到 2040 年新增装机容量约为 316 GW·h，分别较 2021 年增加了约 35 倍和 110 倍。

（二）钒液流电池发展潜力巨大

钒液流电池主要应用于持续时间较长（>4 h）的电网规模应用，目前电化学储能领域非液流电池占比大于 98%，其中锂离子电池占 90%，而钒液流电池占比小于 1%。根据 CRU 国际有限公司的预测，钒液流电池将快速发展，预计到 2030 年钒液流电池占电化学储能市场份额为 1%~25%，到 2040 年钒液流电池占电化学储能市场份额为 15%~40%（见图 4）^[27]。

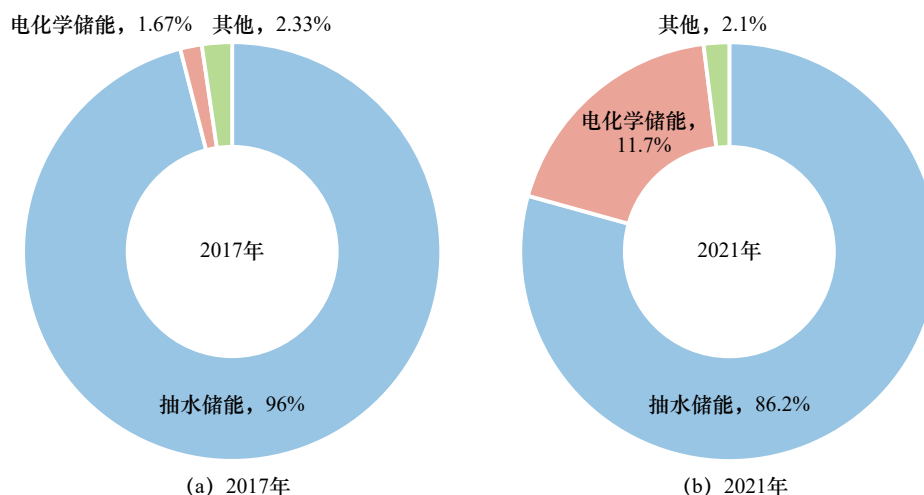


图2 全球电力储能市场累计装机规模

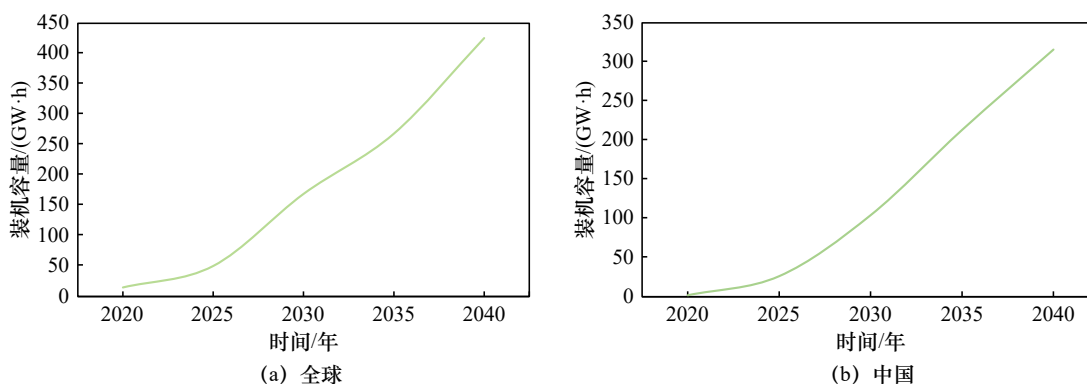


图3 电化学储能新增装机容量预测

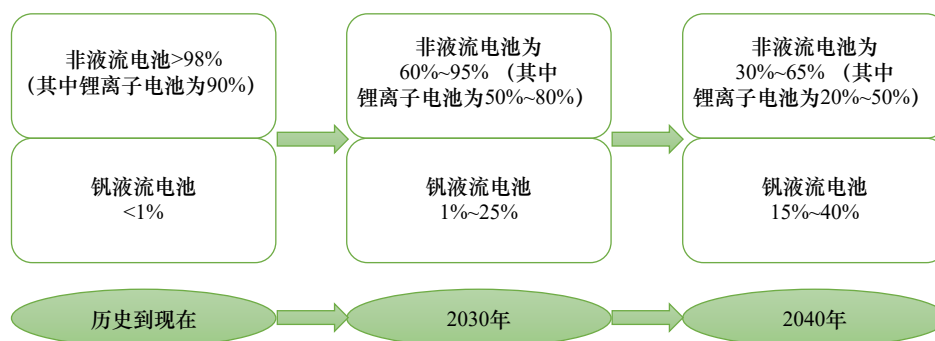


图4 电化学储能领域钒液流电池储能累计份额

基于对储能领域不同类型电池安全性、成本、环境友好性和技术性能的分析，考虑各类电池的发展具有诸多的不确定性，本文设置3种不同情景，分析电化学储能领域全钒液流电池的发展趋势，预测2022—2040年全钒液流电池新增装机容量（见表2、图5）。

表2 不同情景下钒液流电池在电化学储能领域的市场份额（单位：%）

情景	2025年	2030年	2035年	2040年
高速发展情景	5~15	10~20	20~30	30~40
参考情景	3~8	5~10	8~13	10~15
低速发展情景	1~3	2~4	3~5	4~6

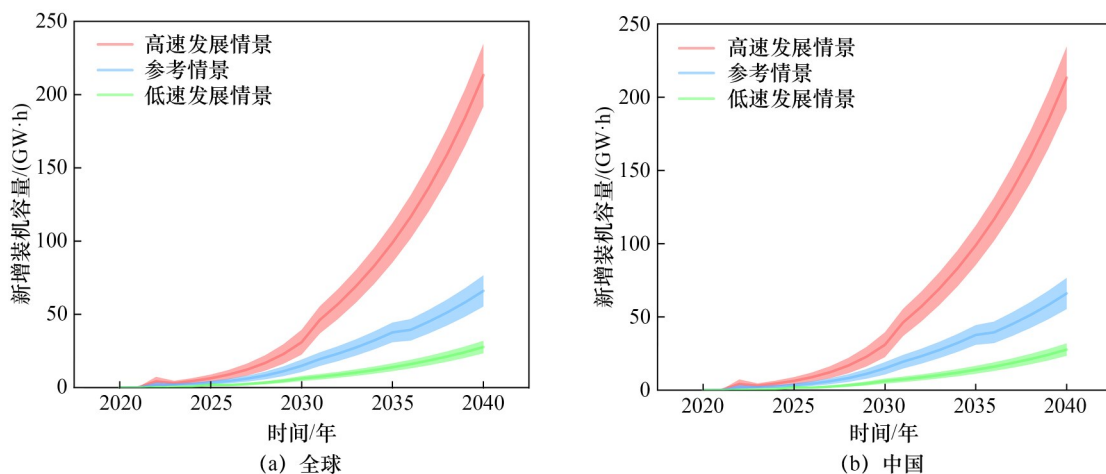


图5 不同情景下钒液流电池新增装机容量预测

(1) 高速发展情景。钒液流电池技术取得重大突破，在降低成本、能量密度、能量效率等方面大大提升，占地面积减少，运行维护成本下降，同时广泛应用于电力系统“发输配”等各个环节；预计到2040年，钒液流电池在电化学储能领域市场占有率将达到30%~40%。在此情景下，全球电化学储能领域钒液流电池新增装机容量将由2021年的0.16 GW·h增长至2040年的192~235 GW·h；我国电化学储能领域钒液流电池新增装机容量将由2021年的0.03 GW·h增长至2040年的144~176 GW·h。

(2) 参考情景。各种类型电池技术均有所突破，铅碳电池技术循环寿命大大提升，钠离子电池技术等迅猛发展，迅速占据较大的市场份额，钒液流电池技术也有突破，能量密度、能量效率等均有提升；预计到2040年钒液流电池在电化学储能领域的市场占有率为10%~15%。在此情景下，全球电化学储能领域钒液流电池新增装机容量将由2021年的0.16 GW·h增长至2040年的55~77 GW·h；我国电化学储能领域钒液流电池新增装机容量将由2021年的0.03 GW·h增长至2040年的42~57 GW·h。

(3) 低速发展情景。钒液流电池技术发展较为缓慢，成本居高不下，且由于原材料供应的制约，钒液流电池发展处于不温不火的状态。同时，锂离子电池技术的安全性大大提升，随着新能源汽车市场的规模效应其制造成本不断下降，锂电池始终占据较高的市场份额；预计到2040年，钒液流电池在电化学储能领域的市场占有率为4%~6%。在此情景下，电化学储能领域钒液流电池新增装机容量将

由2021年的0.16 GW·h增长至2040年的23~32 GW·h；我国电化学储能领域钒液流电池新增装机容量将由2021年的0.03 GW·h增长至18~24 GW·h。

(三) 储能用钒未来需求迅猛上升

理论上，储存1 kW·h的电能，需要5.6 kg V_2O_5 ，如果电解液的利用率为70%，则实际上储存1 kW·h的电能大约需要8 kg V_2O_5 （折合为4.48 kg 金属钒）^[10]，由于钒液流电池寿命为15~20年甚至更长，所以从现在到2040年暂不考虑电解液的回收情况。根据钒液流电池发展的3种不同情景，预测2022—2040年全球和我国钒资源的需求量（见表3、表4、图6）：① 高速发展情景下，全球电化学储能领域的钒需求量将由2021年的3100 t增长至2040年的 8.6×10^5 t~ 1.05×10^6 t，比2021年增长276~338倍；我国电化学储能领域的钒需求量将由2021年的2900 t增长至2040年的 6.5×10^5 t~ 7.9×10^5 t，比2021年增长223~271倍。② 参考情景下，全球电化学储能领域的钒需求量将由2021年的3100 t增长至2040年的 2.5×10^5 t~ 3.4×10^5 t，比2021年增长80~109倍；我国

表3 2021—2040年不同情景下全球电化学储能领域的钒需求量

时间/年	需求量 (单位: $\times 10^4$ t)		
	高速发展情景	参考情景	低速发展情景
2021	0.31	0.31	0.31
2025	1.73~3.99	0.98~2.11	0.41~1.28
2030	10~18	5~9	2~3.5
2035	38~50	14~20	5~7
2040	86~105	25~34	10.5~14

表4 2021—2040年不同情景下我国电化学储能领域的钒需求量

(单位: $\times 10^4$ t)

时间/年	高速发展情景	参考情景	低速发展情景
2021	0.29	0.29	0.29
2025	0.77~1.94	0.44~1.03	0.12~0.53
2030	6.68~11.35	3.14~5.47	1.34~2.27
2035	30~40	11~16	4~6
2040	65~79	19~26	8~11

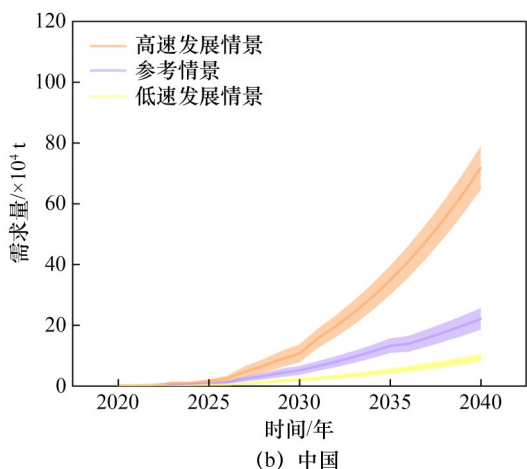
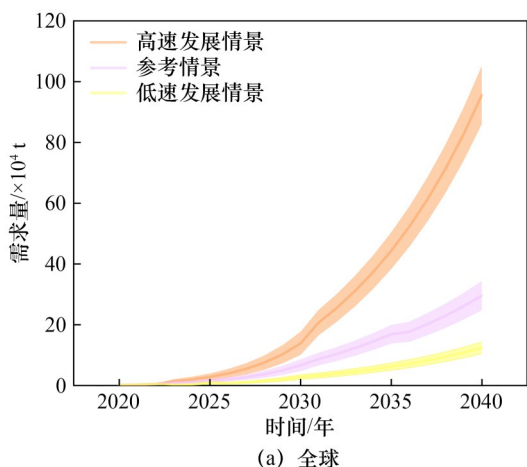


图6 不同情景下电化学储能领域的钒需求量

电化学储能领域的钒需求量将由2021年的2900 t增长至2040年的 $1.9 \times 10^5 \sim 2.6 \times 10^5$ t, 比2021年增长65~89倍。③ 低速发展情景下, 全球电化学储能领域的钒需求量将由2021年的3100 t增长至2040年的 $1.05 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^5$ t, 比2021年增长33~44倍; 我国电化学储能领域的钒需求量将由2021年的2900 t增长至2040年的 $8 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^5$ t, 比2021年增长27~37倍。

四、钒资源供应趋势分析

(一) 全球钒资源储量丰富

全球钒资源量超过 6.3×10^7 t, 2010年以来, 全球钒矿储量持续增长。据美国地质调查局数据, 截至2021年年底, 全球钒储量为 2.4×10^7 t^[28], 主要分布在中国、澳大利亚、俄罗斯、南非、巴西和美国等国家, 相比于2010年增长76.5% (见图7)。

近年来, 随着勘查技术的进步, 我国钒矿储量迅速增长。根据美国地质调查局数据, 2021年我国钒矿储量为 9.5×10^6 t, 与2010年相比增长86.3%, 我国的钒钛磁铁矿床主要分布在攀枝花矿区、红格矿区、白马矿区、太和矿区和承德地区等地。澳大利亚政府一直把重点放在增加关键矿产资源储量方面, 2014年以来, 澳大利亚钒矿储量持续稳步增长, 2021年澳大利亚钒矿储量为 6×10^6 t, 相较于2014年增长了 4.2×10^6 t, 增幅达到233.3%, 其钒钛磁铁矿床主要分布在巴拉姆比、文多维等地区。除中国和澳大利亚外, 俄罗斯、南非、巴西以及美国等主要资源国的钒矿储量基本维持稳定, 2021年, 俄罗斯的钒矿储量为 5×10^6 t, 南非的钒矿储量为 3.5×10^6 t, 巴西的钒矿储量为 1.2×10^5 t, 美国的钒矿储量为 4.5×10^4 t。

(二) 全球绝大部分的钒资源来自于钒钛磁铁矿床

钒是地壳表层中赋存最为丰富的元素之一, 钒在地壳中的总含量位于金属的第22位, 比铜、铅的含量还多^[29], 在地壳中的丰度约为0.02%。虽然其含量较多, 但是比较分散, 因此至今没有发现单独的钒矿, 主要和一些金属矿共生^[30]。

钒钛磁铁矿是钒的主要来源^[31-33], 分布广泛,

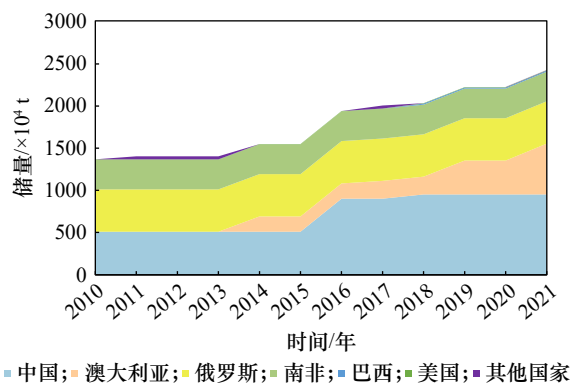


图7 2010—2021年全球钒矿储量变化情况

但主要分布在中国、俄罗斯、南非、加拿大、美国、挪威、芬兰和新西兰等国家（见表5）^[34-39]。目前世界绝大部分钒通过钒钛磁铁矿及其矿渣经焙烧、浸出等工艺进行提取。钒还以化合物的方式存在于磷酸盐页岩矿、铀钾钒矿、硫钒矿与铝土矿中，碳质的石煤、原油、沥青矿物中也含有钒^[40]。2021年，全球约有13.03%的钒产量是从钒钛磁铁矿中直接提取（我国约为0.89%），约76.2%的钒产量是通过钢铁冶金过程中产生的富钒钢渣得到的（我国约为89%）。另外，约10.77%的钒产量来自

于回收的含钒副产品，如含钒燃油灰渣和废化学催化剂，以及含钒页岩的生产^[41]。

（三）全球钒矿产量增长缓慢

近年来，全球钒矿产量整体呈波动上升的态势，但增长缓慢。根据美国地质调查局数据，2010年以来全球钒矿产量波动上升，2021年全球钒矿产量约为 $1.05 \times 10^5 \text{ t}$ ^[28]，比2010年增长了82.29%（见图8）。

钒主要生产国包括中国、俄罗斯、南非、巴西

表5 全球主要钒钛磁铁矿分布情况

国家/地区	矿床名称/所在地	储量/ $\times 10^4 \text{ t}$	精矿 V_2O_5 含量/%
中国	攀枝花矿区	120 000（保有量）	0.29（原矿含量）
	红格矿区	354 800（探明量）	0.24（原矿含量）
	白马矿区	149 600（保有量）	0.26（原矿含量）
	太和矿区	—	—
	河北承德地区	22 000	0.22（原矿含量）
	辽宁朝阳地区	—	0.055（原矿含量）
	陕西洋县	—	—
美国	圣弗尔德·列克	20 000	0.6~0.9
	纽约州桑福德胡	20 000	0.45
	阿拉斯加西南部	100 000	0.3~0.5
加拿大	魁北克马格皮矿床	100 000	0.5~0.54
	魁北克阿德湖	—	0.27~0.35
	摩林	200 000	0.3~0.5
俄罗斯	古谢沃	—	0.5
	第一乌拉尔	—	0.5~1.0
	恰津	—	0.5~0.6
	斯瓦兰茨	—	0.2~0.6
	沃林	—	0.7~1.0
	库格达	—	0.1~0.22
	科夫多尔	—	—
	谢布里雅夫尔	—	0.2
	格列木雅哈	—	0.4
	维亚姆	—	0.3~0.7
	朱格朱尔	—	0.06~0.3
南非	布什维尔得	200 000	1.5~2.0
芬兰	奥坦马可	3 500	1.1
	木斯塔瓦拉	3 800	1.6
瑞典	塔贝格	150 000	0.5~1.0
挪威	特尔尼斯矿床	300 000	0.1~1.0
	勒德萨德矿床	10 000	0.31
印度	辛格布胡姆	—	1.5~5.0
	梅尔布罕兹	800	0.5~1.8
澳大利亚	巴拉姆比	400	1.2
	文多维	40	1.6
新西兰	北岛	65 400	0.3~0.5

等国。我国是钒资源大国，是世界上最大的钒生产国，近年来我国钒矿产量持续增长，2021年我国钒矿产量约为 7.03×10^4 t，相比2010年增长了219.55%；2021年俄罗斯钒矿产量约为 2.01×10^4 t，相比2010年增长了34%；巴西钒矿产量从2014年才有相关数据统计，2021年钒矿产量约为5800 t，相比2014年增长超过4.6倍；2010—2021年南非钒矿产量迅速下降，2011年南非钒矿产量达到顶峰，为 2.2×10^4 t，此后波动下降，2021年为8800 t，相比顶峰时期（2011年）下降了60%。

近十年来，全球钒产量总体呈现增长态势，增长较为缓慢（见图9）。根据国际钒技术委员会数据，2021年全球钒产量约为 1.157×10^5 t^[42]，同比仅增长了4.77%。2011年全球钒产量为 7.62×10^4 t，2021年比2011年增长了51.87%。

（四）钒液流电池高速发展情景下，未来全球钒资源将面临供需不平衡

2017年，随着钢铁行业的复苏、钢价的上涨，钒需求量大大增加，叠加环保政策《进口废物管理目录》的出台，限制钒渣进口导致钒资源供给紧张，

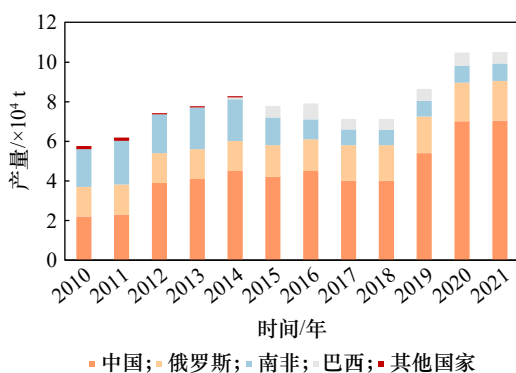


图8 2010—2021年全球钒矿产量变化情况

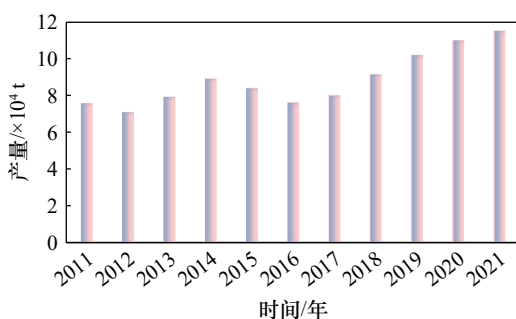


图9 2011—2021年全球钒产量情况

需求增长与供给下降带来供需紧平衡的局面，因此，2018年以来钒价格持续增长。五氧化二钒市场价格在2018年12月达到最高将近50万元/t；2019年由于钢铁新国标执行不到位或者使用钒替代品的情况，钒需求实际增量有限，供需失衡导致钒价格开始出现持续下降；受疫情影响，2020年以来五氧化二钒价格稳定在10万元/t左右^[43]（见图10）。2018—2021年电池级碳酸锂价格始终低于五氧化二钒价格，在5~16万元/t，2021年9月由于新能源汽车快速发展等原因电池级碳酸锂价格飞速增长，2022年11月达到顶峰（约为57万元/t），此后由于全球锂产业从上游矿产到中游材料下游电池均处于过剩状态等原因，电池级碳酸锂价格下降（见图10）。

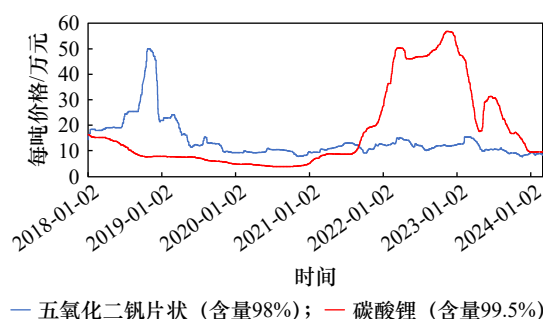


图10 我国五氧化二钒和电池级碳酸锂的价格
注：数据来源于CBC金属网、Wind经济数据库。

根据目前的情况，全球2021年钒资源的储产比约为207年，然而在高速发展情景下，到2040年全球钒资源的储产比仅为23年左右；参考情景下，到2040年全球钒资源的储产比也仅为60年左右。以目前钒供应形势来看，随着储能行业钒液流电池用钒量的爆发式增长，粗略估计，按照目前钒产能及钒产量增加缓慢的情况，到2030年全球钒资源将面临供需不平衡，且会供不应求。

五、结论与建议

（一）结论

（1）到2040年，全球电化学储能新增装机容量约为426 GW·h，高速发展情景下钒液流电池新增装机容量约为192~235 GW·h，对钒的需求量迅猛增长，约为 $8.6 \times 10^5 \sim 1.05 \times 10^6$ t；参考情景下钒液流电池新增装机容量约为55~77 GW·h，对钒的需求量

约为 $2.5 \times 10^5 \sim 3.4 \times 10^5$ t; 低速发展情景下, 钒液流电池新增装机容量约为 $23 \sim 32$ GW·h, 对钒的需求量约为 $1.1 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^5$ t。

(2) 到2040年, 我国电化学储能新增装机容量约为 316 GW·h。高速发展情景下钒液流电池新增装机容量约为 $144 \sim 176$ GW·h, 对钒的需求量迅猛增长, 约为 $6.5 \times 10^5 \sim 7.9 \times 10^5$ t; 参考情景下钒液流电池新增装机容量约为 $42 \sim 57$ GW·h, 对钒的需求量约为 $1.9 \times 10^5 \sim 2.6 \times 10^5$ t; 低速发展情景下, 钒液流电池新增装机容量约为 $18 \sim 24$ GW·h, 对钒的需求量约为 $8 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^5$ t。

(3) 目前制约钒供应的问题主要有: 钒产量和钢铁产业发展息息相关, 未来我国钢铁产量增长预计将维持在相对稳定的水平, 产量增长有限, 这制约了钒产量的增长; 钒的生产工艺流程复杂, 能耗大且收率低; 钒资源开采和提炼的成本较高, 使得钒的市场价格相对较高, 这也限制了钒的大规模应用和开发。

(4) 从目前钒的供应形式来看, 随着储能行业钒液流电池用钒量的爆发式增长, 按照现有的钒产能情况及钒产量缓慢增长的情况, 到2030年以后钒资源将面临供需不平衡, 且会供不应求。

(二) 发展建议

1. 提高钒液流电池的技术研发力度

(1) 提高电解液的浓度, 增大钒液流电池的能量密度。如改变传统的 H_2SO_4 支撑电解液, 使用 HCL / H_2SO_4 混合支撑电解质, 可以大幅度提高钒电解液浓度, 增大电池能量密度^[44]。

(2) 对电极、膜及双极板等配件材料进行开发与优化, 研发高性能、低成本的关键材料。如制备更薄、偏向三维结构、高活性的电极材料; 提升国产膜的稳定性和离子选择性, 促进国产膜的产业化应用^[45]。

2. 加强我国钒资源的利用和保障力度

(1) 加大钒矿的地质勘查力度, 积极探索新的钒矿资源。结合现代科技手段, 进行广泛的地质调查和勘探, 包括地质勘查、遥感技术、地球化学测试等, 以确定潜在的钒矿床位置和规模。在勘查过程中, 需要注意环境保护和可持续发展, 采用科学合理的开采技术和管理措施, 确保资源的可持续利用。

(2) 创新钒钛磁铁矿的提钒方法和技术, 提高

钒资源利用效率。传统钒钛磁铁矿的提钒方法目前还有很多不足, 资源浪费严重。通过创新钒钛磁铁矿的提钒方法和技术, 可以增加提取钒的收率、降低成本、减少资源浪费和降低环境污染, 从而更有效地利用钒资源, 提高钒资源利用效率, 推动行业可持续发展, 同时对环境造成的影响也将得到有效控制。

(3) 加大钒资源的回收利用。为了确保钒液流电池的可持续发展和钒资源的持续稳定供应, 做好钒液流电池的回收利用至关重要。在规划钒液流电池产业布局时, 做好每块电池的数字化和智能化管理, 建议将回收利用装置产业布局纳入其中, 形成完整的产业链。在生产环节, 将回收利用装置与生活流程相结合, 实现资源的最大化利用; 在使用环节, 通过合理布局回收站点和定期回收计划, 确保废旧电池能够及时、有效回收。

(4) 重视境外钒钛磁铁矿的布局与开发。积极开发境外钒钛磁铁矿资源, 并提前进行战略布局, 加强与相关国家和地区的合作与交流, 分享技术和经验, 共同开展钒资源勘探、开采和加工, 实现资源共享、风险共担、合作共赢。同时积极参与国际钒市场的规则制定和资源价格的形成, 提升我国在全球钒产业中的话语权和竞争优势, 推动我国钒资源战略布局的全球化部署。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 16, 2024; **Revised date:** April 20, 2024

Corresponding author: Long Tao is an assistant researcher from Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. His major research fields include mineral resources investigation and evaluation, security and management. E-mail: 240505451@qq.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “New Energy Mineral Demand Prediction and Safety Assessment Technology” (2022-XY-82); Project of China Geological Survey, Ministry of Natural Resources (DD20230040); General Project of National Natural Science Foundation of China (42271281)

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发“十四五”可再生能源发展规划的通知[EB/OL]. (2022-06-01)[2023-11-25]. https://www.ndrc.gov.cn/xwtd/tzgg/202206/t20220601_1326720.html. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Notice on issuing the 14th Five Year Plan for the development of renewable energy [EB/OL]. (2022-06-01)[2023-11-

- 25]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720.html.
- [2] IEA. World energy outlook 2023 [R]. Paris: IEA, 2023.
- [3] 孟祥飞, 庞秀岚, 崇锋, 等. 电化学储能电网中的应用分析及展望 [J]. 储能科学与技术, 2019, 8(S1): 38–42.
Meng X F, Pang X L, Chong F, et al. Application analysis and prospect of electrochemical energy storage in power grid [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(S1): 38–42.
- [4] 赵天寿. 太阳能终将照亮人类未来 [J]. 中国石油企业, 2022 (6): 13, 127.
Zhao T S. ISolar energy will eventually illuminate the future of mankind [J]. China Petroleum Enterprise, 2022 (6): 13, 127.
- [5] 陈洪明. 电力储能技术现状及发展趋势研究 [J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2022 (12): 188–190.
Chen H M. Research on the present situation and development trend of electric energy storage technology [J]. Chinese Sci-tech Journal Database (Citation Edition) Engineering Technology, 2022 (12): 188–190.
- [6] 裴春兴, 王蓝, 王聪聪, 等. 电力系统储能应用场景研究综述 [J]. 电气应用, 2022, 41(9): 1–8.
Pei C X, Wang L, Wang C C, et al. Survey of application scenarios of energy storage in power system [J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(9): 1–8.
- [7] 张文建, 崔青汝, 李志强, 等. 电化学储能在发电侧的应用 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 287–295.
Zhang W J, Cui Q R, Li Z Q, et al. Application of electrochemical energy storage in power generation [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 287–295.
- [8] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委 国家能源局关于鼓励可再生能源发电企业自建或购买调峰能力增加并网规模的通知 [EB/OL]. (2021-08-10)[2024-02-18]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202108/t20210810_1293396.html?eqid=f12390200001e16800000002646dc89d.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Notice of National Energy Administration and National Development and Reform Commission on encouraging renewable energy power generation enterprises to build or buy peak regulation capacity to increase the scale of grid connection [EB/OL]. (2021-08-10)[2024-02-18]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202108/t20210810_1293396.html?eqid=f12390200001e16800000002646dc89d.
- [9] Li L C, Wang B W, Jiao K, et al. Comparative techno-economic analysis of large-scale renewable energy storage technologies [J]. Energy and AI, 2023, 14: 100282.
- [10] 张华民. 全钒液流电池的技术进展、不同储能时长系统的价格分析及展望 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2772–2780.
Zhang H M. Development, cost analysis considering various durations, and advancement of vanadium flow batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2772–2780.
- [11] 牟俊, 肖艳, 毛柠. 浅析国内钒电池产业现状及发展趋势 [J]. 四川化工, 2023, 26(4): 4–8, 20.
Mou J, Xiao Y, Mao N. Analysis of the current situation and development trend of vanadium redox battery industry in China [J]. Sichuan Chemical Industry, 2023, 26(4): 4–8, 20.
- [12] 缪平, 姚祯, Lemmon John, 等. 电池储能技术研究进展及展望 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 670–678.
Miao P, Yao Z, John L, et al. Current situations and prospects of energy storage batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 670–678.
- [13] 赵天寿, 蒋浩然, 李文甲. 流体电池的化工工程科学问题 [J]. 中国科学基金, 2023, 37(2): 170–177.
Zhao T S, Jiang H R, Li W J. Chemical engineering scientific issue in flow cells [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2023, 37(2): 170–177.
- [14] 朱厚军, 郎俊山. 全钒液流电池研究进展 [J]. 船电技术, 2012, 32(6): 5–8.
Zhu H J, Lang J S. Research progress of vanadium redox flow battery [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2012, 32(6): 5–8.
- [15] 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 J M, Liu Z B, Chen S X, et al. Progress of research on full vanadium liquid flow battery technology [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(3): 14–21.
- [16] 北京安泰科信息股份有限公司. 2022年有色金属市场发展报告——钒 [R]. 北京: 北京安泰科信息股份有限公司, 2022.
Beijing Antaiko Information Co., Ltd. Development report of non-ferrous metals market in 2022—Vanadium [R]. Beijing: Beijing Antaiko Information Co., Ltd., 2022.
- [17] 吴皓文, 王军, 龚迎莉, 等. 储能技术发展现状及应用前景分析 [J]. 电力学报, 2021, 36(5): 434–443.
Wu H W, Wang J, Gong Y L, et al. Development status and application prospect analysis of energy storage technology [J]. Journal of Electric Power, 2021, 36(5): 434–443.
- [18] 梅简, 张杰, 刘双宇, 等. 电池储能技术发展现状 [J]. 浙江电力, 2020, 39(3): 75–81.
Mei J, Zhang J, Liu S Y, et al. Development status of battery energy storage technology [J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(3): 75–81.
- [19] 韦媚媚, 项定先. 储能技术应用与发展趋势 [J]. 工业安全与环保, 2023, 49(S1): 4–12.
Wei M M, Xiang D X. Application and development trend of energy storage technology [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2023, 49(S1): 4–12.
- [20] 徐泽宇. 高性能钒液流电池用电极的结构设计与制备 [D]. 合肥: 中国科学技术大学(博士学位论文), 2021.
Xu Z Y. Structural design and fabrication of electrodes for high-performance vanadium flow batteries [D]. Hefei: University of Science and Technology of China (Doctoral dissertation), 2021.
- [21] Choi C, Kim S, Kim R, et al. A review of vanadium electrolytes for vanadium redox flow batteries [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 263–274.
- [22] Trovò A, Rugna M, Poli N, et al. Prospects for industrial vanadium flow batteries [J]. Ceramics International, 2023, 49(14): 24487–24498.
- [23] 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 等. 矿产资源安全巨系统理论方法与实践 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(6): 191–201.
Chen Q S, Zhang Y F, Xing J Y, et al. Theoretical method and practice of giant system for mineral resource security [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(6): 191–201.
- [24] IEA. The role of critical world energy outlook special report min-

- erals in clean energy transitions [EB/OL]. (2021-01-30)[2024-02-18]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>.
- [25] Rystad Energy. New battery storage capacity to surpass 400 GW·h per year by 2030—10 times current additions [EB/OL]. (2023-06-14)[2024-02-18]. <https://www.rystadenergy.com/news/new-battery-storage-capacity-to-surpass-400-gwh-per-year-by-2030-10-times-current>.
- [26] Zhang Y, Weng Y W, Li H R, et al. Research on China's electricity market and photovoltaic and electrochemical energy storage industry [R]. Tianjin: 2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), 2023.
- [27] CRU. Battery demand for vanadium from vrbf to change vanadium market [EB/OL]. (2022-11-17)[2024-02-18]. <https://www.crugroup.com/knowledge-and-insights/spotlights-blogs/blogs-2022/battery-demand-for-vanadium-from-vrbf-to-change-vanadium-market/>.
- [28] USGS. Vanadium statistics and information [EB/OL]. (2023-01-01)[2024-02-18]. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-vanadium.pdf>.
- [29] 孙朝晖. 钒新技术及钒产业发展前景分析 [J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(1): 1-7.
Sun Z H. Analysis on new vanadium technologies and prospects of vanadium industry [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2012, 33(1): 1-7.
- [30] 吴起鑫, 王建平, 车东, 等. 中国钒资源现状及可持续发展建议 [J]. 资源与产业, 2016, 18(3): 29-33.
Wu Q X, Wang J P, Che D, et al. Situation analysis and sustainable development suggestions of vanadium resources in China [J]. Resources & Industries, 2016, 18(3): 29-33.
- [31] Bai Z J, Zhong H, Hu R Z, et al. World-class Fe-Ti-V oxide deposits formed in feeder conduits by removing cotectic silicates [J]. Economic Geology, 2021, 116(3): 681-691.
- [32] European Commission. Report on critical raw materials and the circular economy [R]. Brussels: European Commission, 2018.
- [33] 杨立飞, 李增华, 欧阳永棚, 等. 钒矿床研究进展与展望 [J]. 沉积与特提斯地质, 2023, 43(1): 48-58.
Yang L F, Li Z H, Ouyang Y P, et al. Research progress and prospect of Vanadium deposits [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023, 43(1): 48-58.
- [34] 于宏东, 王丽娜, 曲景奎, 等. 中国典型钒钛磁铁矿的工艺矿物学特征与矿石价值 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 275-281.
Yu H D, Wang L N, Qu J K, et al. Process mineralogical characteristics and ore value of typical vanadium titanium magnetite in China [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(2): 275-281.
- [35] 杨鑫, 李奕东. 陕西某矿区低品位钒钛磁铁矿选矿试验研究 [J]. 中国金属通报, 2021 (2): 80-82.
Yang X, Li Y D. Experimental study on beneficiation of low-grade vanadium-titanium magnetite in a mining area in Shaanxi [J]. China Metal Bulletin, 2021 (2): 80-82.
- [36] 杨耀辉, 惠博, 颜世强, 等. 全球钒钛磁铁矿资源概况与综合利用研究进展 [J]. 矿产综合利用, 2023 (4): 1-11.
Yang Y H, Hui B, Yan S Q, et al. Overview of global vanadium-titanium magnetite resources and comprehensive utilization [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023 (4): 1-11.
- [37] 汪镜亮. 国外钒钛磁铁矿的开发利用 [J]. 钒钛, 1993 (5): 1-11.
Wang J L. Development and utilization of foreign vanadium-titanium magnetite [J]. Vanadium-titanium, 1993 (5): 1-11.
- [38] 赵国君, 赵祺彬, 兰井志, 等. 攀西地区钒钛磁铁矿资源特点及选矿新技术 [J]. 现代矿业, 2017, 33(7): 198-200.
Zhao G J, Zhao Q B, Lan J Z, et al. Characteristics of vanadium-titanium magnetite resources in Panxi Area and new beneficiation technology [J]. Modern Mining, 2017, 33(7): 198-200.
- [39] 董岩峰, 简彦涛, 安灵慧. 承德地区钒钛磁铁矿成矿地质特征及找矿方向 [J]. 河北地质, 2014 (2): 20-22.
Dong Y F, Jian Y T, An L H. Metallogenic geological characteristics and prospecting direction of vanadium-titanium magnetite in Chengde area [J]. Hebei Geology, 2014 (2): 20-22.
- [40] 赵海燕. 钒资源利用概况及我国钒市场需求分析 [J]. 矿产保护与利用, 2014 (2): 54-58.
Zhao H Y. Analysis of vanadium resources utilization and demand for vanadium in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2014 (2): 54-58.
- [41] 陈东辉. 钒产业2021年年度评价 [J]. 河北冶金, 2022 (12): 19-30.
Chen D H. Vanadium industry annual review of year 2021 [J]. Hebei Metallurgy, 2022 (12): 19-30.
- [42] VANITEC. Production & consumption 2011—2022 vanadium statistics [EB/OL]. (2023-01-30)[2024-02-18]. <https://vanitec.org/vanadium/production-consumption>.
- [43] CBC金属网. 中国五氧化二钒(片状)走势图 [EB/OL]. (2024-03-27)[2024-03-29]. <https://www.cbci.com/db/price/11426.html>.
CBC Metal Mesh. Vanadium pentoxide (flake) trend chart of China [EB/OL]. (2024-03-27)[2024-03-29]. <https://www.cbci.com/db/price/11426.html>.
- [44] 朱兆武, 张旭堃, 苏慧, 等. 全钒液流电池提高电解液浓度的研究与应用现状 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(11): 3439-3446.
Zhu Z W, Zhang X K, Su H, et al. Research and application of increasing electrolyte concentration in all vanadium redox flow battery [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(11): 3439-3446.
- [45] 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 T, Ge L, Zhang Y M. Advances and development trend in key technologies for all-vanadium redox flow battery [J]. China Metallurgy, 2023, 33(4): 1-8, 133.