

矿业管理与经济

文章编号: 1004-4051(2024)12-0099-12

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241399

新型储能发展下钒资源需求趋势分析

陈志勇^{1,2,3}, 朱清^{1,2,3}, 武海炜^{1,2,3}, 邹谢华^{1,2,3}, 聂大海^{1,2,3}, 齐孝丽⁴

(1. 中国矿业报社, 北京 100083;

2. 中国地质调查局国际矿业研究中心, 北京 100083;

3. 中国地质调查局宣传教育中心, 北京 100083;

4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 随着全球能源结构的调整和可再生能源的迅速发展, 新型储能市场规模迅速扩张。其中, 钒电池因其安全性高、循环寿命长、易扩容、环保和易回收、全生命周期成本低等优势, 已经发展成为新型储能“新贵”, 备受市场关注。了解新型储能发展下钒资源需求趋势, 对我国钒资源合理开发利用及产业布局具有重要意义。本文通过收集和整理钒资源相关数据信息, 梳理了全球钒资源分布特征、供需格局等开发现状, 并对钒资源需求趋势进行分析。研究发现, 全球钒资源丰富, 以岩浆型(70%)和沉积型(30%)为主, 主要分布在澳大利亚(45.2%)、俄罗斯(26.6%)、中国(23.4%)和南非(4.0%)四国。在供需格局上, 全球钒资源供需均集中在钢铁行业, 生产原料主要为钒钛磁铁矿炼钢得到的钒渣(73%); 需求端主要应用在钢铁冶金领域, 长期占比 90% 左右。新型储能的快速发展, 以及钒电池技术成熟, 将带动钒资源需求快速增长, 钒产业转型发展态势初现。钒电池将成为钒资源需求主要增长点, 消费占比不断提升, 钢铁冶金领域消费占比不断下降, 打破主要在钢铁行业应用的钒产业格局。针对以上情况, 提出建议: 一是加大钒资源勘探投入, 放开钒渣进口; 二是加强石煤中钒资源开发利用; 三是加快推进钒资源循环利用; 四是优化钒资源开发布局, 加强钒资源生产规划、产业政策和标准的引导。

关键词: 新型储能; 钒资源; 钒渣; 钒电池; 产业转型**中图分类号:** TD-9 **文献标识码:** A

Vanadium resource demand trend analysis under the development of new energy storage

CHEN Zhiyong^{1,2,3}, ZHU Qing^{1,2,3}, WU Haiwei^{1,2,3}, ZOU Xiehua^{1,2,3},NIE Dahai^{1,2,3}, QI Xiaoli⁴

(1. China Mining News, Beijing 100083, China;

2. International Mining Research Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

3. Publicity and Education Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

4. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

收稿日期: 2024-07-21 **责任编辑:** 刘硕**基金项目:** 中国地质调查局二级项目“战略性矿产资源市场跟踪与矿业大数据分析”资助(编号: DD20211403); 中国地质调查局二级项目“矿业转型发展综合评价与服务”资助(编号: DD20230124)**第一作者简介:** 陈志勇(1995—), 男, 汉族, 江西浮梁人, 硕士, 工程师, 主要从事资源产业经济等方面的研究, E-mail: chen_zhiyong@mail.cgs.gov.cn。**通讯作者简介:** 朱清(1983—), 男, 汉族, 湖北松滋人, 工学博士, 硕士生导师, 研究员, 主要从事资源产业经济等方面的研究, E-mail: zhuq@mail.cgs.gov.cn。**引用格式:** 陈志勇, 朱清, 武海炜, 等. 新型储能发展下钒资源需求趋势分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(12): 99-110.

CHEN Zhiyong, ZHU Qing, WU Haiwei, et al. Vanadium resource demand trend analysis under the development of new energy storage[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(12): 99-110.

Abstract: With the adjustment of the global energy structure and the rapid development of renewable energy, the scale of new energy storage has expanded rapidly. Among them, vanadium batteries have developed into a new type of energy storage “upstart” due to their advantages of high safety, long cycle life, easy expansion, environmental protection and easy recycling, and low life cycle cost, and have attracted market attention. Understanding the demand trend of vanadium resources under the development of new energy storage is of great significance for the rational development and utilization of vanadium resources and industrial layout of our country. By collecting and sorting out related data information of vanadium resources, this paper reviews the distribution characteristics and supply-demand structure of global vanadium resources, and the demand trend of vanadium resources is analyzed. The study found that vanadium resources are abundant in the world, mainly magmatic type (70%) and sedimentary type (30%), which are mainly distributed in Australia (45.2%), Russia (26.6%), China (23.4%) and South Africa (4.0%). In terms of supply and demand pattern, the global supply and demand of vanadium resources are concentrated in the steel industry, the raw material for production are mainly vanadium slag obtained from vanadium titanium magnetite steelmaking (73%); the demand side is mainly used in the field of iron and steel metallurgy, accounting for about 90% for a long time. The rapid development of new energy storage and the maturity of vanadium battery technology will drive the rapid growth of vanadium resource demand, and the transformation and development trend of vanadium industry is emerging. Vanadium battery will become the main growth point of vanadium resource demand, the proportion of consumption continues to increase, and the proportion of consumption in the field of iron and steel metallurgy continues to decline, breaking the vanadium industry pattern mainly applied in the steel industry. In view of the above situation, the research puts forward: firstly, increase the investment in vanadium resource exploration, release the import of vanadium slag; secondly, strengthen the exploitation and utilization of vanadium resources in stone coal; thirdly, accelerate the recycling of vanadium resources; the fourth is to optimize the layout of vanadium resource development and strengthen the guidance of vanadium resource production planning, industrial policies and standards.

Keywords: new energy storage; vanadium resource; vanadium slag; vanadium battery; industrial transformation

0 引言

全球碳中和共识与地区冲突加剧的背景下,各国越来越重视能源安全与能源转型,推动能源革命、构建以新能源为主体的新型电力系统成为全球共识^[1-2]。然而,风能、太阳能等可再生新能源发电所固有的间歇性、波动性及不稳定性,须配置相应的储能才能实现大规模、可持续的开发利用^[3-4]。新型储能作为建设新能源体系和新型电力系统的关键技术,因其响应快、配置灵活、建设周期短和规避传统抽水蓄能的地理限制等优势,为实现全球“双碳”目标提供了重要支撑。钒作为一种集“稀有”“绿色”“能源”功能与特征于一身的关键金属元素^[5],已经发展成为长时稳定新型储能产业的必需品,被称为“新型储能金属”^[4],受到越来越多国家的重视,美国、加拿大、日本和欧洲等国家和地区相继将钒列入关键矿产清单^[6-9]。未来随着全球“双碳”目标推进,新型储能产业的快速发展,将对钒资源需求趋势产生重要影响。

钒作为我国优势矿种,资源储量居于全球前列。

进入21世纪后,我国已经发展成为全球钒资源第一大生产国、消费国和出口国,在国际钒市场占有重要地位^[10-11]。然而多年以来,国际钒价多保持低位,我国在国际钒市场影响力弱。在此背景下,本文通过收集和整理全球钒资源相关数据资料(由于数据来源或公布收集情况导致部分数据年份不一致),梳理了全球钒资源分布特征、供需格局等开发现状,并对钒资源未来需求趋势进行分析,并为我国合理开发钒资源,提出思考与对策建议。

1 新型储能发展现状与展望

1.1 新型储能市场快速发展

2015年,《巴黎协定》提出后,随着全球碳中和目标持续推进,新型储能市场快速发展。2023年,全球新增投运电力储能项目装机规模突破50 000 MW,达到52 000 MW,同比增长69.5%。其中,新型储能新增投运规模创历史新高,达到45 600 MW,占比87.7%。新型储能累计装机规模由2016年的1 800 MW增长到2023年的91 300 MW(图1),年均增速高达77.4%,2023年新型储能市场份额占整个储能市场的

31.6%, 相比于 2020 年市场份额增加近三倍, 抽水储能累计装机规模占比大幅下降, 首次低于 70%(图 2)。中国、欧洲和美国引领全球新型储能市场发展, 新增装机规模合计占全球市场的 88%, 其中, 中国占比接近 50%^[12]。在能源危机、政策支持等因素影响下, 未来新型储能市场份额还将不断扩大。

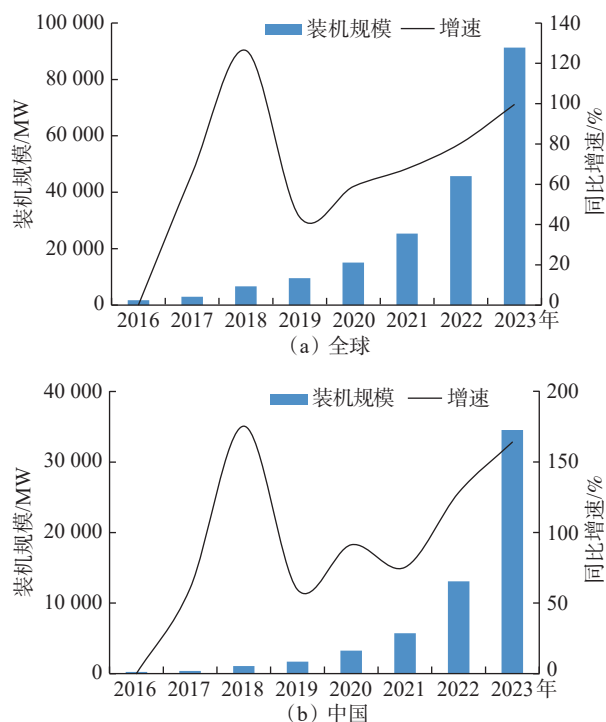


图 1 2016—2023 年全球和中国新型储能市场装机规模趋势

Fig. 1 Trend of installed capacity in the new energy storage market in the world and China from 2016 to 2023

1.2 钒电池引领新型储能发展

长时储能(持续放电 4 h 以上)是实现“双碳”目标关键技术之一。目前,长时储能技术主要为抽水储能,受选制条件限制,抽水储能市场占比逐渐下降。全钒氧化还原液流电池(以下简称“钒电池”)作为

新型储能液流电池中的一种,其电解液为钒离子的稀硫酸水溶液,以液体形态电解发电,不会发生热失控、过热、燃烧和爆炸,安全性大大提高。同时,钒电池因正负极都是钒,可通过周期性金属钒离子电解液共混实现对可逆容量的恢复,循环次数可达 12 000~18 000 次,约为锂离子电池的 2 倍,使用寿命可达 20 a 以上。随着未来储能安全性要求升级和储能时长的增加,钒电池的高安全性和随储能时长增加边际成本增加较小的特点(全生命周期成本低),钒电池会越来越受新型储能市场的青睐。另外,钒电池还具有易扩容、能量转换率高、环保和易回收等优势(表 1),将成为未来新型储能的首选技术。

2 全球钒资源概况

2.1 钒资源类型多样,以岩浆型和沉积型为主

钒是一种重要的稀有金属元素,自然界中钒资源丰富,在地壳中的丰度约为 0.02%^[10,13],高于铜、锌、镍、铬,按照地壳中金属的总含量排在第 22 位^[14-15]。虽然其地壳中含量高,但是没有发现单独的钒矿,以含钒矿物或类质同象的形式存在,通常与铁、钛、铀、钼、铜、铅、锌、铝等金属矿,以及碳质矿、磷矿共生。已发现含钒矿物有 65 种,主要有绿硫钒矿、钒铅矿、硫钒铜矿、钒钛铁矿和钒钛磁铁矿等^[14]。其中,钒矿主要赋存于钒钛磁铁矿、含钒磷酸盐页岩矿、铀钾钒矿、硫钒矿与铝土矿等;碳质的石煤、原油、沥青矿物中也含钒^[16]。

钒矿床按照成因划分主要为岩浆型(约 70%)和沉积型(约 30%)^[17]。其中,岩浆型钒矿床是与岩浆型铁矿相伴生的钒矿床,主要指铁-钛-钒氧化物矿床(即钒钛磁铁矿床),分布往往与全球大规模镁铁-超镁铁质大火成岩岩浆活动密切相关^[18-19],主要分布在中国川西和承德、俄罗斯乌拉尔和科拉半岛、南非布什维尔得、澳大利亚西部等地区。沉积型钒矿床

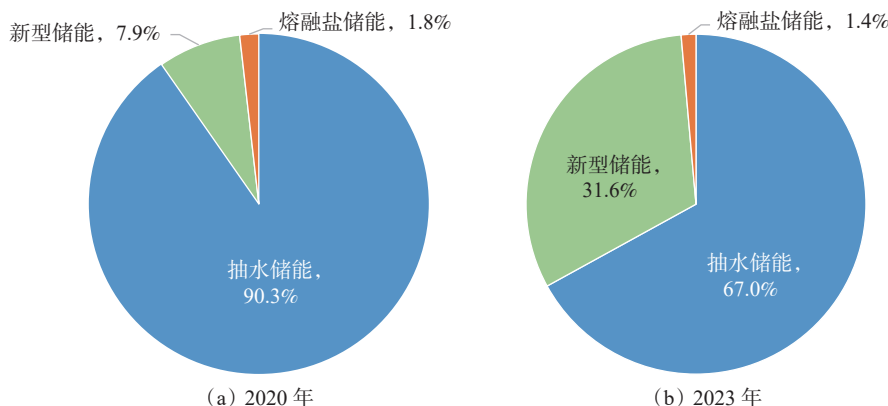


图 2 2020 年和 2023 年全球储能市场份额

Fig. 2 Market share of energy storage in the world in 2020 and 2023

表 1 不同新型储能技术的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of different new energy storage technologies

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/(W·h/kg)	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	1 000~10 000	500~1 200	2 500~4 000	2 500~4 000
寿命/a	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
800~1 000(磷酸铁锂电池)					
电池成本/(元·kW·h)	约 3 500	1 000~1 500(三元电池)	—	800~1 300	2 500~3 000
		2 000~3 000(钛酸锂电池)			
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

资料来源:据文献[4]整理。

包括黑色岩系(页岩)型和砂岩型,黑色岩系钒矿床以富钒黑色碳质泥岩、碳酸盐岩、硅质岩,以及浅变质岩为特征,因类似于煤矿,又称之为石煤^[20-22],是我国独特的含钒矿产资源,广泛分布于我国湖南、湖北、贵州、江西和浙江等地区(图 3)。砂岩型钒矿床较少,多作为砂岩型铀矿氧化带的伴生矿产出,主要分

布于美国犹他州和科罗拉多州等地区。除此之外,还存在火山岩-侵入岩型、表生风化型等钒矿床,火山岩-侵入岩型是指与火山-侵入岩有关的玢岩型磁铁矿相伴生的钒矿床,主要分布于挪威、芬兰和巴西东部等地区。表生风化型钒矿床主要是指与风化型铝土矿、钛磁铁矿相伴生的钒矿床,其资源量相对较少^[19]。

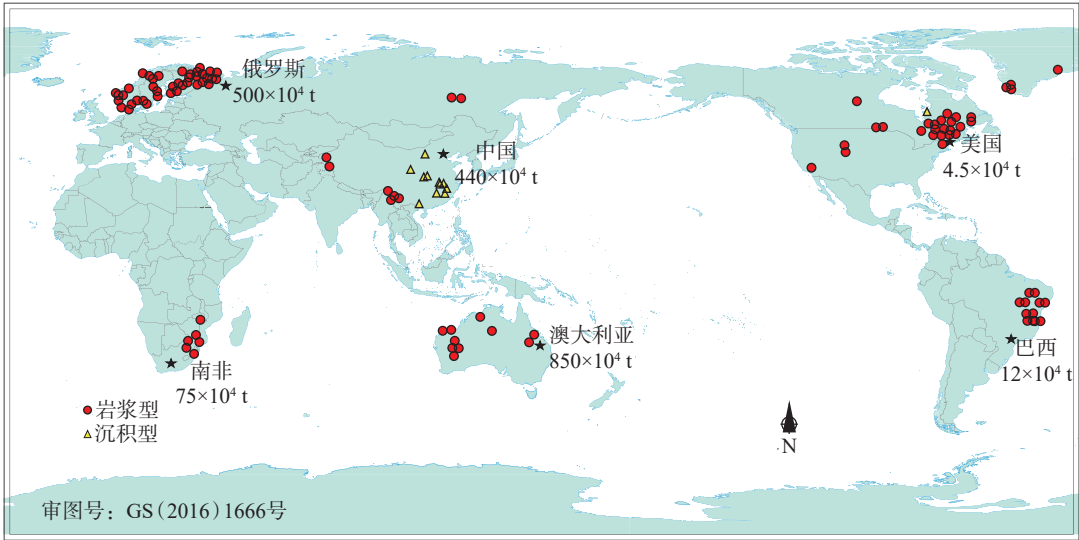


图 3 全球主要钒矿床及主要国家储量分布

Fig. 3 Major vanadium deposits in the world and reserves distribution in major countries

(资料来源:据文献[19]修改)

2.2 全球钒资源丰富,分布高度集中

根据美国地质调查局(USGS)不完全统计,截至 2023 年底,全球钒储量超过 6 300 万 t(金属量,同下),其中,已认定的钒资源中符合当前采掘和生产要求

的钒矿储量约为 1 882 万 t,主要分布于澳大利亚、俄罗斯、中国 and 南非,其中,澳大利亚 850 万 t(占比 45.2%)、俄罗斯 500 万 t(占比 26.6%)、中国 440 万 t(占比 23.4%)、南非 75 万 t(占比 4.0%),四国合计占

全球的 99.2%。另外,巴西和美国的钒矿储量分别为 12 万 t 和 4.5 万 t(图 4)。由于钒通常作为伴生资源或者副产品的形式存在,因此,世界上已探明的该元素储量并不能完全表明现有的资源供应情况。

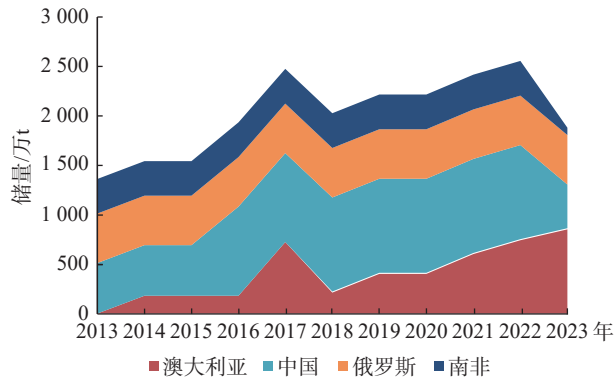


图 4 2013—2023 年全球钒资源储量

Fig. 4 Reserves of vanadium resource in the world from 2013 to 2023

2.3 钒资源生产原料广泛,以炼钢得到的钒渣为主
含钒原料主要包括钒渣、高品位钒钛磁铁矿、回收的含钒副产品、石煤等。目前,世界上 98% 的钒产品

的生产原料来自于钒钛磁铁矿(中国约为 63%)^[19,23]。根据统计,2022 年全球约 73.0% 的钒来自于钒钛磁铁矿经钢铁冶金加工得到的钒渣(中国约为 84.5%),以中国企业和俄罗斯企业为主;约 13.1% 的钒来自于钒钛磁铁矿直接提钒(中国约为 0.9%),以南非的布什维尔德矿业(Bushveld Minerals)和罗钒(Rhovan),以及巴西的拉戈资源(Largo Resources)为代表;约 13.9% 的钒来自二次回收的含钒副产品(含钒燃油灰渣、废化学催化剂等)及石煤等(图 5),以美国、日本及韩国等国的企业为主^[5,24](表 2)。

3 全球钒资源供需格局

3.1 钒资源供给集中于中国、俄罗斯、南非和巴西四国

近年来,全球钒资源供给整体呈现波动上涨的趋势。2014—2023 年,全球钒资源产量同比增长 2.8% 左右,其中,2019 年同比增长达 21.9%;2021—2022 年,全球钒产量受中国粗钢产能政策限制及结构调整等因素影响略有下滑。根据美国地质调查局(USGS)数据,2023 年全球钒矿产量约为 10.35 万 t,同比上升 1.5%(图 6)。

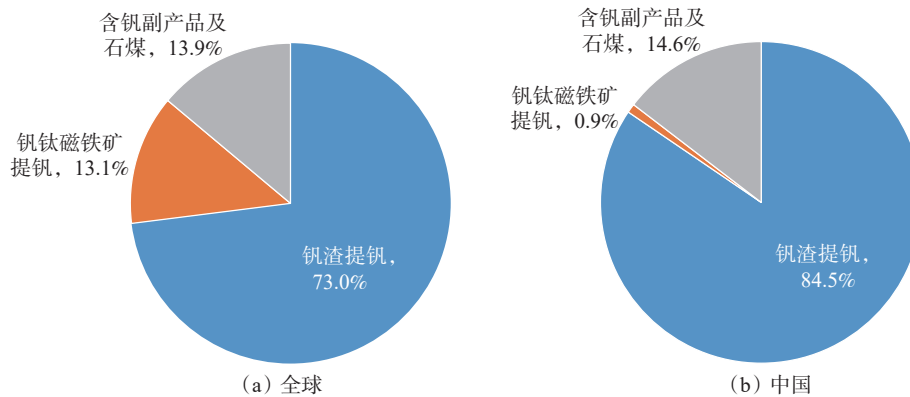


图 5 2022 年钒资源来源占比

Fig. 5 Sources proportion of vanadium resource in 2022

表 2 2022 年全球主要资源型钒生产企业及产量分布

Table 2 Distribution of major resource-based vanadium production enterprises in the world and their output in 2022

单位: t/a			
国家	生产商	主流工艺	产量
中国	攀钢集团、承德钢铁集团、北京建龙重工集团、四川省川威集团、四川德胜集团、陕西五洲矿业股份	(钒渣、石煤、废渣、废催化剂)提钒	79 700
俄罗斯	耶弗拉兹集团(Evraz)	钒渣提钒	17 220
南非	布什维尔德矿业(Bushveld Minerals)、嘉能可-斯特拉塔(Glencore-Xstrata)	钒钛铁精矿提钒	8 873
巴西	拉戈资源(Largo Resources)	钒钛铁精矿提钒	5 846
美国	钒合金钒业(AMG Vanadium)、美国钒业(U.S. Vanadium)	二次钒资源提钒	5 500
新西兰	新西兰钢铁(New Zealand Steel)	直接还原流程提钒	950

资料来源:据文献[5]修改。

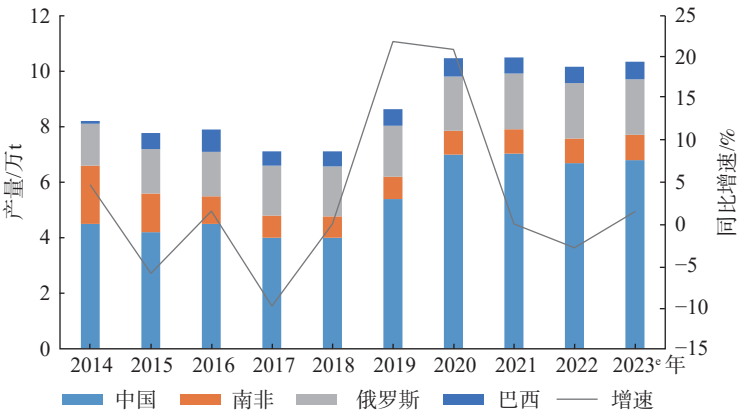


图 6 2014—2023 年全球钒资源产量
Fig. 6 Production of vanadium resource in the world from 2014 to 2023
(注: e 代表评估矿产量)

从钒资源产量分布来看,全球钒资源产量主要分布在中国、俄罗斯、南非和巴西四国,2014—2023 年,四国钒资源产量合计占全球总产量比例均在 99% 以上。澳大利亚作为全球钒资源最丰富的国家,由于其钒资源需求下游钢铁行业薄弱,其钒资源产量相对较低。自 2014 年以来,中国钒资源产量占全球比重均在 50% 以上,作为全球最大的钒资源产量大国,全球钒资源产量受中国钒资源相关政策影响比较大。2016 年,中国全面取缔“地条钢”环保政

策,禁止石煤提钒,许多企业因此关停,全球钒资源产量出现明显下滑。

从钒资源生产商来看,全球钒资源生产商主要集中在 中国,产能排名前 10 位的生产商中,中国企业 5 家、南非 2 家、俄罗斯 1 家、奥地利 1 家、巴西 1 家,前十大生产商产能约占全球总产能的 74.9%,前五大生产商产能约占全球总产能的 43.8%,生产集中度高(表 3)。国外大约有 20 余家钒制品生产企业,除利用钒钛磁铁矿为原料生产的企业外,还有企业利用

表 3 2022 年全球自有资源型钒生产企业概况
Table 3 Overview of self-owned resource-based vanadium production enterprises in the world in 2022

单位: t			
名称	产能(折 V ₂ O ₅)	产品	原料
攀钢集团	43 000	FeV、VN、氧化钒、钒铝合金	钒渣
耶弗拉兹集团(Evraz)	35 000 (钒渣折产)	FeV、氧化钒	钒渣、燃油灰渣、 废能化剂
承钢集团	25 000	FeV、VN、氮化钒铁、氧化钒、钒铝合金	钒渣
北京建龙重工集团	22 000	VN、氧化钒	钒渣
奥地利特里巴赫工业(Treibacher Industrie)	13 000	V ₂ O ₅ 、V ₂ O ₃ 、钒铁	钒渣、废催化剂等
嘉能可(Glencore)	12 000	FeV、氧化钒	钒钛磁铁矿
四川省川威集团	18 000	V ₂ O ₅	钒渣
四川德胜集团	16 000 (钒渣折产)	钒渣、氧化钒(外加工)	钒渣
拉戈资源(Largo Resources)	12 000	V ₂ O ₅	钒钛磁铁矿
布什维尔德矿业(Bushveld Minerals)	16 000	VN、氧化钒、Fev 钒电解液、催化制	钒钛磁铁矿
方大集团达州钢铁集团	9 000	钒渣、氧化钒(外加工)	钒渣
钒合金钒业(AMG Vanadium)和 美国钒业(U.S. Vanadium)	10 000	氧化钒、钒铝合金、钒铁等	废催化剂、燃油灰渣等
陕西五洲矿业股份	5 000	VN、氧化钒、钒铝合金、金属钒	石煤(碳质页岩)
德国、加拿大、日本、印度、中国台湾、奥地利、 泰国等国家或地区的钒生产商	17 000	氧化钒、钒铝合金、钒铁等	矿渣、废催化剂、 燃油灰渣等
中国其他钒生产商	30 000	V ₂ O ₅ 、钒铝合金、钒酰胺、VN、钒铁等	钒渣、废催化剂、 富钒磷铁、石煤
合计	283 000	—	—

注: 奥地利特里巴赫工业(Treibacher Industrie)为加工型企业; 资料来源: 据文献[5]和文献[24]修改。

废催化剂、石油残渣等含钒废物为原料, 或者利用氧化钒深加工生产钒铁、钒电解液、催化剂及其他钒功能材料等^[25]。2022 年, 全球钒产量超过 6 000 t(以 V_2O_5 计算, 下同)的企业有 10 家, 中国的攀钢集团钒渣产量以 49 800 t 排名第一位, 前十位中中国企业还有北京建龙重工集团、承钢集团、四川德胜集团和四川省川威集团; 而俄罗斯的耶弗拉兹集团(Evraz)的钒产能和产量均排名第二, 并未受到俄乌战争和国际制裁影响(表 4)。

3.2 钒资源消费集中于钢铁行业

钒属于高熔点金属, 因其熔点(1 887 °C)和沸点(3 337 °C)高, 常与铌、钽、钨、钼等元素并称为难熔金属, 且具有延展性强、质坚硬、无磁性、耐盐酸和硫酸等特性, 广泛应用于钢铁、冶金、化工、储能、颜料、环保、医药等诸多重要领域, 被称为“现代工业的味精”^[26]。

根据国际钒技术委员会(Vanitec)数据, 自 2016 年起全球钒消费量逐年增加, 2019 年突破 10 万 t,

2021 年达到顶峰, 全球钒消费量达到 12.04 万 t, 2022 年全球钒消费量为 11.56 万 t, 同比减少 3.99%; 中国钒消费量为 6.56 万 t, 同比下降 4.49%, 主要受新冠肺炎疫情、中国粗钢产能过剩限产及“能耗双控”的影响, 钢铁产品减产波及钒消费减量。中国是全球最大的钒消费国, 从 2019 年起, 中国的钒消费量占全球总消费量比例超过 50%, 2020 年更是达到 60%(图 7)。另外两大钒消费区域为欧洲地区和北美地区^[27]。从消费结构来说, 钒作为一种重要的合金添加剂, 能提高钢铁的硬度和抗拉强度。钢铁冶金为其主要下游应用领域。2022 年, 全球约 88.83% 的钒应用于钢铁冶金领域, 约 2.83% 的钒应用于钛合金领域, 约 4.37% 的钒应用于储能领域, 约 3.97% 的钒应用于化工领域(图 8)。

4 钒资源需求趋势

4.1 钒电池或将成为钒需求主要增长点

在“双碳”背景下, 世界各国为更好地促进风能、太阳能等可再生能源开发利用, 出台了一系列新型

表 4 2022 年全球主要非加工型钒生产企业产量

Table 4 Output of the major non-processing-based vanadium production enterprises in the world in 2022

单位: t

名称	钒渣产量(以 V_2O_5 计)	钒产品产量(以 V_2O_5 计)
攀钢集团	49 800	45 140
耶弗拉兹集团(Evraz)	34 821	22 313(钒产品)+8 426(钒渣折产)
承钢集团	17 752	14 960
北京建龙重工集团	24 000	20 730
四川德胜集团	17 160	钒产品全部来自于自产钒渣的外委加工
四川省川威集团	14 166	13 340(自有钒渣产)
拉戈资源马拉卡斯钒厂(Largo Resources Ltd. Maracas)	—	10 436
嘉能可(Glencore)	—	8 981
方大集团达州钢铁集团	3 638	钒产品全部来自于自产钒渣的外委加工
布什维尔德矿业(Bushveld Minerals)	—	6 859

资料来源: 据文献[5]和文献[24]修改。

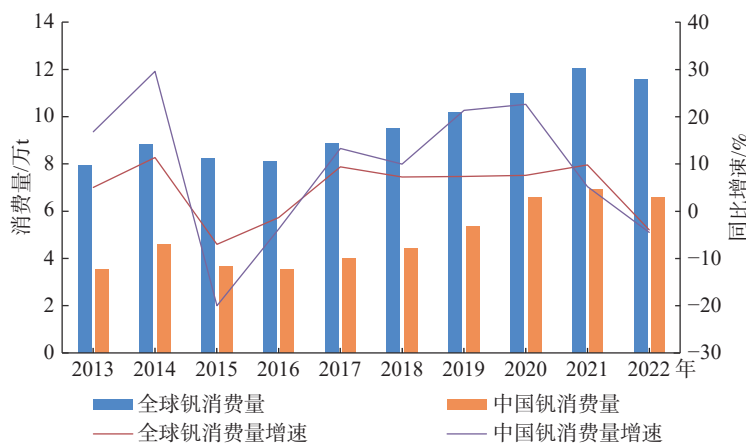


图 7 2013—2022 年全球和中国的钒消费量趋势

Fig. 7 Trends of vanadium consumption in the world and China from 2013 to 2022

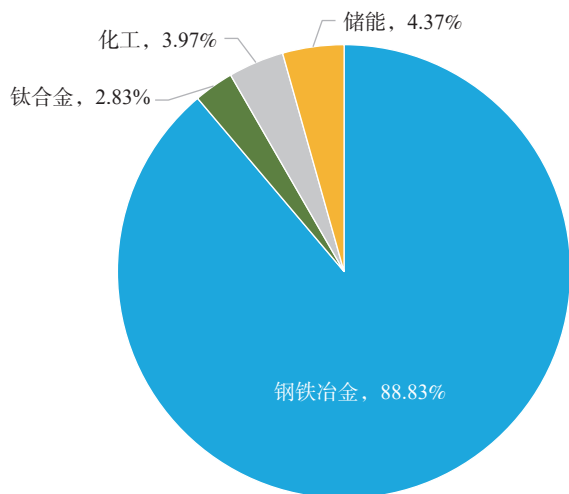


图8 2022年全球钒资源消费结构

Fig. 8 Consumption structure of vanadium resource in the world in 2022

储能利好政策,支持钒电池产业的发展。国外方面,2020年2月,澳大利亚援助澳大利亚钒业125万美元资金,以促进钒电池全产业链一体化开发;2021年6月,美国能源部启动长时储能攻关计划,以实现十年储能成本降低90%的目标。国内方面,2012年起,全国及各省份从总体规划、实施细节、安全规范等多方面积极推出各类细则,加快钒电池产业化进程;2022年6月,国家发展和改革委员会、国家能源局等九部委发布《“十四五”可再生能源发展规划》,提出重点建设钒液流电池产业(表5)。截至2023年底,全球液流电池(以钒液流电池为主)累计装机规模为

365.2 MW,在全球新型储能中占比0.4%。其中,中国液流电池累计装机规模为207 MW,在国内新型储能中占比0.6%^[12]。总体来看,钒电池发展依旧处于早期阶段。

在全球各国利好政策推动下,钒电池产业化加速推进,近年来钒电池储能对钒的消费持续上涨。根据国际钒技术委员会(Vanitec)数据,2022年,全球钒电池储能用钒占比上升至4.37%,而中国钒电池储能用钒占比上升到6.66%,中国钒电池储能用钒的消费增速大于全球增速。2020年,受中国螺纹钢新标应用,钢筋产量进一步提升,储能用钒停滞、减量等因素影响,中国钢铁冶金领域用钒占比达到96.60%^[29],钒电池储能用钒占比出现大幅下降(图9)。未来随着新型储能装机规模的不断扩大和钒电池渗透率提升,钒电池储能对钒需求占比将逐渐提升。根据中信证券预测,未来十年全球钒电池年均复合增长率(CAGR)有望达到40%,2025年和2030年全球钒电池的新增装机量将达到9.6 GWh和32.9 GWh,基于单位用钒量7 000 t/GWh(以 V_2O_5 计),对应储能领域用钒量将增长至3.7万t和12.9万t,中国储能领域用钒量将增长至2.3万t和5.7万t^[27]。预计到2030年,钒电池储能对钒需求占全球钒消费结构的比例将有望上升至40%左右,届时形成以钢铁冶金和钒电池储能为主导的需求“二元消费”格局^[30-31]。

4.2 钢铁领域钒需求稳步增长,但占比下降

钢铁冶金是钒消费的最主要领域。根据世界钢

表5 国内外钒电池相关政策

Table 5 Domestic and foreign policies related to vanadium batteries

政策名称	日期	发布主体	政策要点
《全钒液流电池储能电站安全卫士2019年3月技术规则》(征求意见稿)	2019年3月	国家能源局	从设计、管理、运行等方面设定详细的安全技术规则,促进全钒液流电池的规范化
《储能大挑战计划》	2020年1月	美国能源部	加速液流电池、钠系二次电池在内的下一代储能技术的开发、商业化和应用到2025年,实现新型储能从商业化初期向规模化发展转变。到2030年,实现新型储能全面市场化发展
《关于加快推动新型储能发展的指导意见》	2021年7月	国家发展和改革委员会、国家能源局	资助开发液流电池。争取在未来十年实现超过10h时长的电网规模储能系统储能成本降低90%
《长时储能攻关计划》	2021年7月	美国能源部	开展液流电池关键核心技术、装备和集成优化设计研究。加快液流电池重大技术创新示范
《“十四五”新型储能发展实施方案》	2022年1月	国家发展和改革委员会、国家能源局	为部署液流电池在内的电池储能项目提供了税收抵免的重要支持
欧洲可再生能源计划	2022年5月	欧盟委员会	发展低成本、高能量密度、安全环保的全钒、铬铁、锌溴液流电池。促进电堆关键部件产业化
《工业和信息化部等六部门关于推动能源电子产业发展的指导意见》	2023年1月	工业和信息化部等六部门	

资料来源:据文献[28]整理

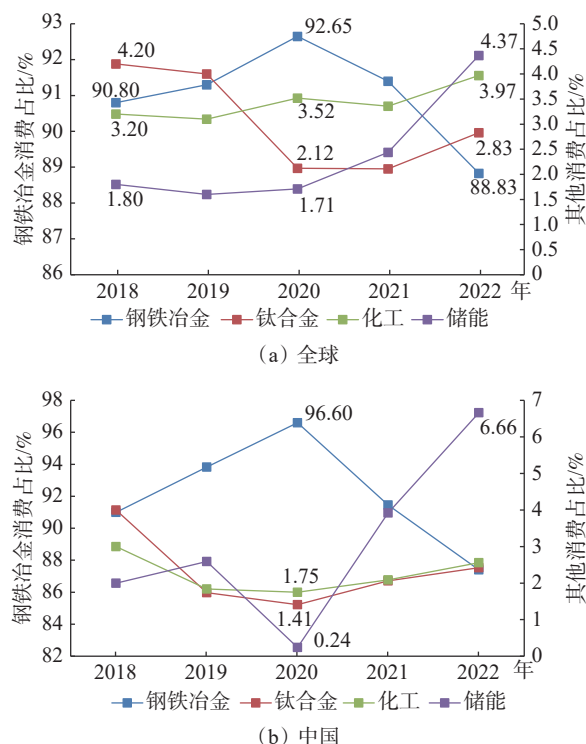


图 9 2018—2022 年钒在各应用领域消费占比

Fig. 9 Vanadium consumption ratio in various application fields from 2018 to 2022

铁协会(Worldsteel)数据, 2022 年, 受中国钢铁产能减产影响, 全球粗钢产量下降至 18.85 亿 t, 同比下降 3.93%; 2023 年, 全球粗钢产量合计 18.882 亿 t, 同比基本持平。全球主要粗钢生产国家有中国、印度、日本、美国、俄罗斯、韩国, 产量占全球比例分别为 53.97%、7.43%、4.61%、4.27%、4.01%、3.53%。借鉴发达国家钢铁需求变化的规律性经验——人均钢铁消费量与人均 GDP 关系呈现“S”形理论模型(图 10), 中国作为全球第一大钢铁生产国, 正在由快速工业化进程转向后工业化时期, 人均钢消费量将趋于稳定, 但长期看钢铁需求呈现逐渐下降趋势^[31]。印度、东南亚等地区国家人口众多, 正在逐渐步入快速工业化时期, 未来将成为全球钢铁需求的主要增长点。目前全球钢铁市场呈现出复苏迹象, 世界钢铁协会(Worldsteel)预测, 随着全球经济复苏和基础设施建设的推动, 钢铁需求逐渐增长。

从钒在钢铁中消费强度来看, 北美、欧盟等地区钒在钢铁中消费强度为 0.089 kg/Mt、0.078 kg/Mt, 中国钒在钢铁中消费强度约为 0.056 kg/Mt, 独联体国家仅为 0.045 kg/Mt, 而印度、东南亚、非洲等地区国家逐渐步入快速工业化发展的国家远不及世界平均值 0.056 kg/Mt。虽然中国钒在钢铁中消费强度接近于世界平均值, 但是与北美、欧盟等地区的发达国家仍存在 0.022~0.330 kg/Mt 的差距(图 11)。随着中国

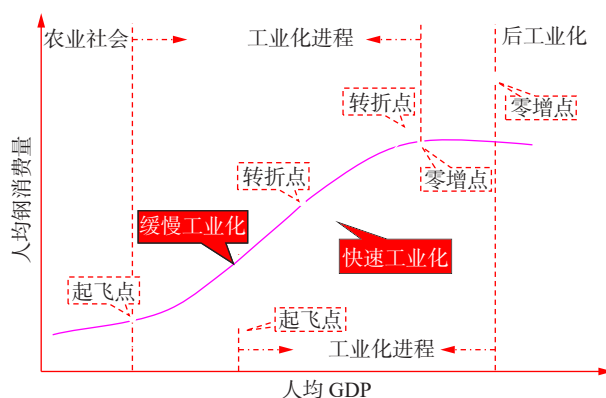


图 10 人均钢材消费水平与人均 GDP “S” 形规律

Fig. 10 The S-shaped relationship between per capita steel consumption level and per capita GDP

(资料来源: 据文献[32]修改)

钢铁工业绿色低碳转型, 高强钢需求增长带动其产量持续增长, 钒在钢铁中的消费强度将出现结构性增加。印度、东南亚等地区的新兴国家逐渐步入工业化初期, 城镇化进程不断加速, 不仅人均钢消费量将快速增加, 且钒在钢铁中的消费强度也将持续增加。

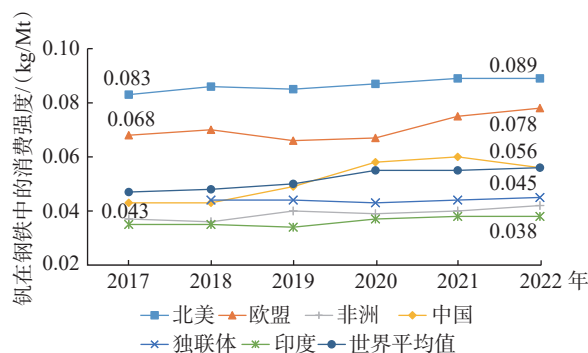


图 11 2017—2022 年钒在钢铁中的消费强度

Fig. 11 Consumption intensity of vanadium in steel from 2017 to 2022

(资料来源: 据文献[5]整理)

综上所述, 短期全球钒在钢铁领域消费量受中国影响出现了下滑, 但长期来看, 全球钢铁需求, 以及钒在钢铁中的消费强度持续增长, 钒在钢铁领域的需求仍将保持稳定增长。根据中信证券预测, 2025 年和 2030 年全球钢铁行业用钒量将增至 12.45 万 t 和 13.67 万 t; 中国单位用钒量提升被粗钢产量下滑抵消, 2025 年和 2030 年中国钢铁行业用钒量将达到 6.55 万 t 和 6.59 万 t。预计到 2030 年钢铁领域用钒量占比将下降到 54.8%。

4.3 钒产业转型发展态势初现

从产业链看, 钒产业链上游原料主要为含钒矿产(钒钛磁铁矿、石煤等)、钒渣、含钒固废; 中游钒

制品主要为五氧化二钒、三氧化二钒等氧化钒;下游应用领域包括钢铁冶金、储能、钛合金和化工等(图12)。长期以来,全球钒市场消费应用领域集中在钢铁冶金,占比一直大于90%。然而,从生产端来看,全球约86.1%的钒资源来源于钒钛磁铁矿(钒钛磁铁矿直接提钒、钒渣提钒),作为钒钛磁铁矿伴生资源产出。钒资源生产消费紧紧与钢铁行业绑定在一起,同步发展。近年来,随着全球“碳达峰、碳中和”的推进,

各国出台各类政策支持新型储能产业快速发展。钒作为新型储能金属的绿色价值越来越凸显,在风能、太阳能等清洁能源占比进入快车道发展的情况下,钒电池作为新型储能的首选载体之一,将带动钒产业实现由传统钢铁冶金向新型储能领域的快速发展转型,打破主要在钢铁行业应用的钒产业格局。未来,钒电池储能用钒占比将不断增大,钢铁冶金钒需求占比将呈现下降趋势。

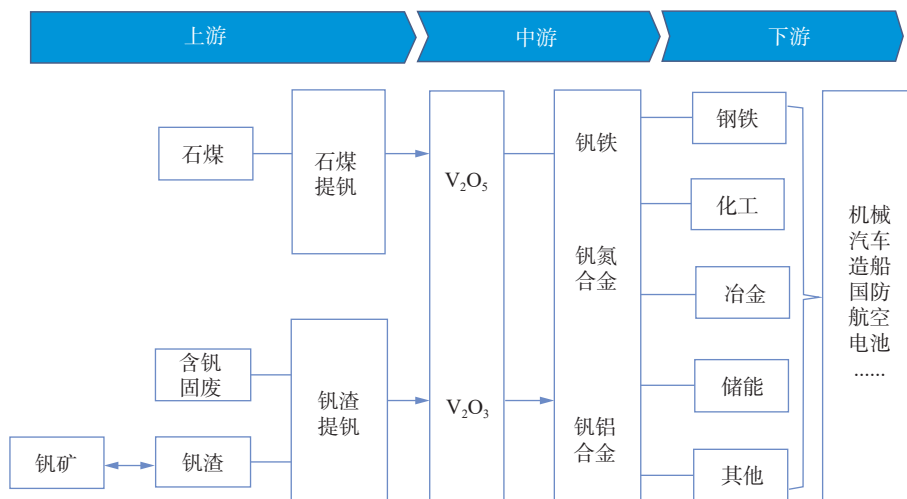


图12 钒产业链

Fig. 12 Vanadium industry chain

5 结论与建议

5.1 主要结论

1)全球钒矿资源类型多样,以岩浆型和沉积型为主。其中,岩浆型钒矿床主要指钒钛磁铁矿;沉积型包括黑色岩系(页岩)型和砂岩型等。全球钒资源丰富,主要分布在澳大利亚、俄罗斯、中国和南非四国,四国钒资源合计占全球的99%以上。从原料来源看,钒资源生产原料主要为钒钛磁铁矿,占比86.1%,其中,钒钛磁铁矿炼钢得到的钒渣提钒占比73.0%,钒钛磁铁矿直接提钒占比13.1%,而其他来源占比13.9%。钒资源主要作为钒钛磁铁矿伴生资源提取。

2)全球钒资源供需均集中在钢铁行业。供给端,全球钒资源产量呈现稳步上升趋势,中国、俄罗斯、南非和巴西四国产量合计占全球总产量比例均在99%以上,主要为钢铁企业从钒钛磁铁矿冶炼过程中产生的钢渣中提取;需求端,钒因为其物理特性,主要应用于钢铁冶金领域,长期以来占比90%左右。近些年,全球钒资源消费量总体呈现稳步上升趋势。2022年,受新冠肺炎疫情、中国粗钢产能过剩限产及政策影响,全球钒资源消费量出现下滑。

3)全球“双碳”战略驱动能源革命,助推新型储

能的快速发展。钒电池因具备安全性高、扩容性强、循环寿命长、全生命周期成本低等优点,将成为未来新型储能的首选技术,引领新型储能发展。2020年起,全球钒电池储能对钒需求快速增长,消费占比不断提升,且钢铁冶金领域消费占比不断下降,钒产业转型发展态势初现,未来将形成以钢铁冶金和钒电池储能为主导的需求“二元消费”格局。

5.2 发展建议

1)加大钒资源勘探开发,放开钒渣进口。钒作为一种重要的稀有金属,主要伴生资源产出。积极探索新的钒矿资源,加大钒矿的地质勘查力度,扩大钒矿资源储量规模。同时,由于国内钒主要来源于钒钛磁铁矿炼钢生产过程中的钒渣且目前国内仍禁止钒渣进口,钒钛磁铁矿冶炼经济性及钢铁行业收缩可能影响钒渣长期供给。对此,可针对钒渣禁止进口政策进行调整,扩大国内钒资源获取能力。

2)加强石煤中钒资源开发利用。石煤是我国特有的钒矿资源,资源储量丰富。目前,已查明资源量占全国总量的47%,且分布广泛,在我国陕西、湖南、湖北、安徽、浙江、江西、贵州等省份均有分布,资源可获取性好。由于石煤中钒主要以吸附、类质同

象赋存在黏土矿物、有机质及硅酸盐矿物中,分选难度大,一直未得到大规模有效利用。建议加大石煤中钒的分选和提取技术研究力度,解决石煤提钒工艺上能耗高、成本高和环境污染等问题,提高石煤钒矿资源综合利用水平。

3)加快推进钒资源循环利用。目前,我国钒资源回收利用份额占比较小。在工业生产过程中会产生大量的含钒废弃物,如不能得到合理应用,对环境造成危害的同时,也会对钒资源造成浪费。未来随着钒电池大规模列装将产生大量废旧钒电池,加强钒电池电解液和电极钒资源的回收,有利于钒液流电池的可持续发展和钒资源的持续稳定供应。

4)优化钒资源开发布局。我国是钒资源储量和产量最大的国家,不同程度存在开采过量、一矿多采、大矿小开、采富弃贫等现象,生产商集中度不高。建议加强钒资源生产规划、产业政策和标准的引导,推进大型钒资源生产商组成钒资源联盟,从全产业链视角推进钒产业合作,保障钒产业链安全和高质量发展。

参考文献(References):

- [1] 邹才能,熊波,李士祥,等.碳中和背景下世界能源转型与中国式现代化能源革命[J].石油科技论坛,2024,43(1):1-17.
ZOU Caineng, XIONG Bo, LI Shixiang, et al. World energy transformation and China's modern energy revolution under carbon neutrality background[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2024, 43(1): 1-17.
- [2] 鞠建华.“双碳”目标背景下矿业发展新机遇与实现路径[J].中国矿业,2022,31(1):1-5.
JU Jianhua. New opportunities and implementation path of mining development under the background of “double carbon” goal[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(1): 1-5.
- [3] 严川伟.大规模长时储能与全钒液流电池产业发展[J].太阳能,2022(5):14-22.
YAN Chuanwei. Large energy storage and vanadium flow battery industrialization[J]. Solar Energy, 2022(5): 14-22.
- [4] 陈仁凤,龙涛,陈其慎,等.新型储能金属钒资源需求预测与供应分析[J].中国工程科学,2024,26(3):74-85.
CHEN Renfeng, LONG Tao, CHEN Qishen, et al. New energy-storage metal vanadium resources: demand prediction and supply analysis[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(3): 74-85.
- [5] 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 annual review of year 2022[J]. Hebei Metallurgy, 2023(12): 1-14.
- [6] 王安建,袁小晶.大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考[J].中国科学院院刊,2022,37(11):1550-1559.
WANG Anjian, YUAN Xiaojing. Security of China's strategic and critical minerals under background of great power competition[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1550-1559.
- [7] 梅燕雄,裴荣富,魏然,等.关键矿产与能源资源安全[J].中国矿业,2022,31(11):1-8.
MEI Yanxiong, PEI Rongfu, WEI Ran, et al. Critical minerals and energy resources security[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(11): 1-8.
- [8] 张艳飞,陈其慎,邢佳韵,等.中国“新能源矿产目录”厘定研究[J].中国矿业,2024,33(1):1-11.
ZHANG Yanfei, CHEN Qishen, XING Jiayun, et al. Research on the determination of “list of new energy minerals” in China[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 1-11.
- [9] 鞠建华,张照志,潘昭帅,等.我国战略性新兴产业矿产厘定与“十四五”需求分析[J].中国矿业,2022,31(9):1-11.
JU Jianhua, ZHANG Zhaozhi, PAN Zhaoshuai, et al. Determination of mineral resources in China's strategic emerging industries and analysis of the demand of the “14th five year plan” [J]. China Mining Magazine, 2022, 31(9): 1-11.
- [10] 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 it's supply and demand situation in China[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S2): 5-10.
- [11] 吴晴,张照志,潘昭帅,等.2020—2035年我国钒需求预测[J].中国矿业,2021,30(5):48-56.
WU Qing, ZHANG Zhaozhi, PAN Zhaoshuai, et al. Forecast of China's vanadium resource demand from 2020 to 2035[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(5): 48-56.
- [12] 中关村储能产业技术联盟.储能产业研究白皮书(2024)[R/OL].(2023-04-06).<https://www.docin.com/p-4643637036.html>.
- [13] 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 Haiyan. Analysis of vanadium resources utilization and demand for vanadium in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2014(2): 54-58.
- [14] 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 Qixin, WANG Jianping, CHE Dong, et al. Situation analysis and sustain - able development suggestions of vanadium resources in China[J]. Resources & Industries, 2016, 18(3): 29-33.
- [15] 周家琮.中国钒工业的发展[R].北京:国际钒技术会议报告,2001.
- [16] 唐光荣,刘靖,欧德宇.中国钒产业发展影响因素及趋势预测分析[J].攀枝花学院学报,2012,29(5):98-104.
TANG Guangrong, LIU Jing, OU Deyu. Analysis of influence factors and trends of China's vanadium industry development[J]. Journal of Panzhihua University, 2012, 29(5): 98-104.
- [17] 丁建华,张勇,李立兴,等.中国钒矿成矿地质特征与资源潜力评价[J/OL].中国地质:1-26[2024-07-18].
DING Jianhua, ZHANG Yong, LI Lixing, et al. The characteristics and potential of vanadium resources in China[J/OL]. Geology in China: 1-26[2024-07-18].
- [18] KELLEY K D, SCOTT C T, POLYAK D E, et al. Critical mineral resources of the United States: economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. USGS, 2017.
- [19] 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 Lifei, LI Zenghua, OUYANG Yongpeng, et al. Research progress and prospect of vanadium deposits[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2023, 43(1): 48-58.
- [20] 胡岳华, 孙伟, 王丽, 等. 黑色岩系石煤钒矿和镍钼矿的选矿[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2015.
- [21] 赵鑫鑫. 江西省彭泽县阳家山矿区钒矿地质特征与成因浅析[J]. *世界有色金属*, 2020(21): 82-83.
- ZHAO Xinxin. Geological characteristics and genesis of vanadium deposit in Yangjiashan Mining Area, Pengze County, Jiangxi Province[J]. *World Nonferrous Metals*, 2020(21): 82-83.
- [22] BIAN L B, SCHOVSBO N H, CHAPPAZ A, et al. Molybdenum-vanadium geochemistry in the lower Paleozoic alum shale of Scandinavia: implications for vanadium exploration[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2021, 239: 1-12.
- [23] 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: 681-691.
- [24] 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]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2023, 44(6): 1-8.
- [25] 包申旭, 张一敏, 刘涛, 等. 全球钒的生产、消费及市场分析[J]. *中国矿业*, 2009, 18(7): 12-15.
- BAO Shenxu, ZHANG Yimin, LIU Tao, et al. Global production, consumption and market analysis of vanadium[J]. *China Mining Magazine*, 2009, 18(7): 12-15.
- [26] 华宝证券. 工业味精增效+绿色价值凸显, 钒需求迎来快速增长[R]. 2023.
- [27] 中信证券. 有色金属钒行业研究报告: 储能领域消费扩容, 钒价或率先受益[R]. 2022.
- [28] 国信证券. 储能行业专题研究: 钒液流电池, 兼具安全与灵活的长时储能技术, 未来前景可期[R]. 2023.
- [29] 吴优, 陈东辉, 刘武汉, 等. 2020年全球钒工业发展报告[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(5): 1-9.
- WU You, CHEN Donghui, LIU Wuhan, et al. Global vanadium industry development report 2020[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(5): 1-9.
- [30] 邢佳韵, 张晓鹤, 陈其慎, 等. “二元消费”影响下的镍供需形势分析[J]. *地球学报*, 2020, 42(2): 251-257.
- XING Jiayun, ZHANG Xiaohe, CHEN Qishen, et al. Analysis of the nickel supply and demand situation under the influence of “dual consumption” [J]. *Acta Geosciences*, 2021, 42(2): 251-257.
- [31] 陈志勇, 朱清, 邹谢华, 等. “双碳”背景下镍资源产业链发展趋势研究[J]. *中国矿业*, 2024, 33(10): 54-63.
- CHEN Zhiyong, ZHU Qing, ZOU Xiehua, et al. Research on the development trend of nickel resource industry chain under the background of “dual carbon” [J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(10): 54-63.
- [32] 杨轶. 简析钒市场需求结构及未来发展趋势[J]. *冶金管理*, 2023(18): 113-120.
- YANG Yi. Vanadium market demand structure and future development trend[J]. *Metallurgical Management*, 2023(18): 113-120.