

“金属维生素”——钒的来源及应用前景

Metallic Vitamin: Source and Application Prospect of Vanadium

供稿|富志生 / FU Zhisheng

内容导读

钒被世界各主要经济体列为关键金属和战略金属，在钢铁、有色冶金、化工、电子、储能、医药和航天航空等诸多国民经济领域有着广泛的应用。人类认识钒距今也不过 200 余年，我国是全球钒资源储存、生产和消费的第一大国，在实现钒资源高效利用的同时，钒在绿色能源领域发挥着越来越重要的作用。本文对钒的来源途径、钒及钒合金在国民经济领域的应用做了介绍，并简要展望了钒科技未来发展方向。随着我国提出建设民航强国战略构想以及“嫦娥计划”、“核电规划”等一系列高科技项目的实施，高端钒基新材料的应用前景将十分广阔。

钒是人及其他动物不可或缺的生命微量元素，是一种重要的稀有金属元素，同时因其在工业领域的重要作用，又有“金属维生素”、“现代工业味精”、“化学面包”之称。人类社会进入 21 世纪，全球钒产量（以 V_2O_5 计）已从 2000 年的 7.87 万 t 增长到 2023 年的 22.26 万 t，同期钒消耗量从 2000 年的 6.92 万 t 增长到 2023 年的 20.08 万 t。在“碳中和”、“碳减排”的大背景下，钒在太阳能光热转换、新型稀土光源、储氢金属材料及全钒液流储能电池等节能领域均得到了更多应用，钒已经成为具有绿色价值的金属，正式进入绿色“能源”金属的序列。构建能源“源-储-用”全链条高效转化和利用系统是推动社会高速、高质量和可持续发展的必要选择^[1]，钒在“源-储-用”三者的协调匹配中将发挥越来越重要的作用。

钒的来源途径

认识钒

人类认识钒距今也不过 200 余年。1801 年墨西哥城的矿物学家节烈里瓦在钒酸铅矿石中发现了一种未知红色粉末，然而在进一步研究时却误认为该粉末是一种被污染的铬矿石。直到 1830 年，瑞典化学家塞夫斯特伦在被酸溶解后的铁矿残渣中再次发现了钒。1869 年英国化学家亨利·罗斯科用氢气还原二氧化钒，人类才第一次制取纯净的金属钒^[2]。科学家几经“敲门”最终发现了钒，与古希腊神话美丽女神“凡娜迪丝”（Vanadis）的爱情故事相似，钒的化合物五颜六色、绚丽多彩，因此科学家将“凡娜迪丝”（Vanadis）这位美丽女神的名字赋予了它。

作者单位：甘肃酒钢集团宏兴钢铁股份有限公司钢铁研究院，甘肃 嘉峪关 735100

“钒”与“矾”的区别

“钒”与“矾”同音不同义，日常生活中，人们容易将其混淆，其实二者完全不同。钒是一种拥有高熔点和高沸点的银灰色金属，同时还具备无磁性和质地坚硬的特点^[3-4]。钒在元素周期表中位于第四周期第五副族，属于第一排过渡族金属，在自然界中存在 0、+2、+3、+4、+5 多种价态^[5]。矾在中国古代写作“燐”，意为一种通过焚烧得到的产物，是一种具有玻璃质状态表面或光泽的硫酸盐水合物。主要分白矾（又称明矾）、绿矾（又名青矾）、黄矾和胆矾等，在古代主要用于医药、方术、染色、净

水、食品加工等用途^[6]。

钒资源的分布

钒在自然界主要赋存于钒钛磁铁矿、磷酸盐岩、含铀砂岩和粉砂岩矿床中，至今尚未发现独立存在的钒矿物^[7]。据相关统计资料，2022 年世界钒矿基础储量总计 2556.5 万 t，中国钒矿基础储量占据世界第一，占比 37.2%，世界各国钒矿储量分布见图 1。中国钒资源主要赋存于钒钛磁铁矿和含钒石煤中^[8]，我国钒钛磁铁矿资源主要产区分布在四川和河北，石煤资源主要分布在陕西、河南、甘肃、湖北和湖南等地^[9]。

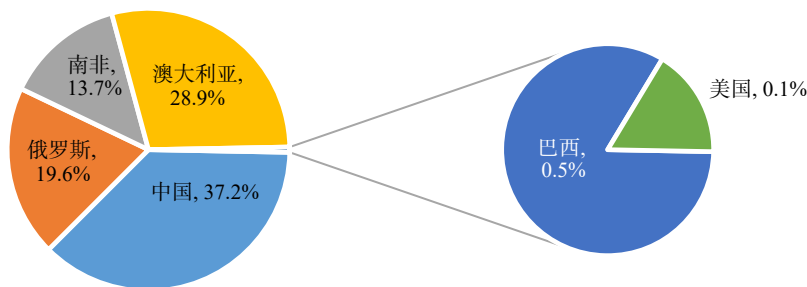


图 1 2022 年世界钒矿储量分布

钒的来源与消费

据不完全统计，2022 年全球钒的来源主要有 3 个途径：一是钒钛磁铁矿钢铁冶金，全球约 66% 的钒由该途径获得，中国约 85% 的钒来源于炼钢产生的钒渣；二是原矿，如钒钛磁铁矿、石煤等，全球约 15% 的钒来源于原矿，中国约 13% 的钒

来源于原矿；三是固废，如通过回收重油灰、废催化剂等产生，全球约 19% 钒来源于固废，中国约 2% 钒来源于固废中钒回收利用。2022 年全球生产钒 21 万 t，消费 21 万 t；中国生产钒 13 万 t，消费 12 万 t。可见中国是全球钒生产与消费大国，当前国内钒产业结构见图 2。

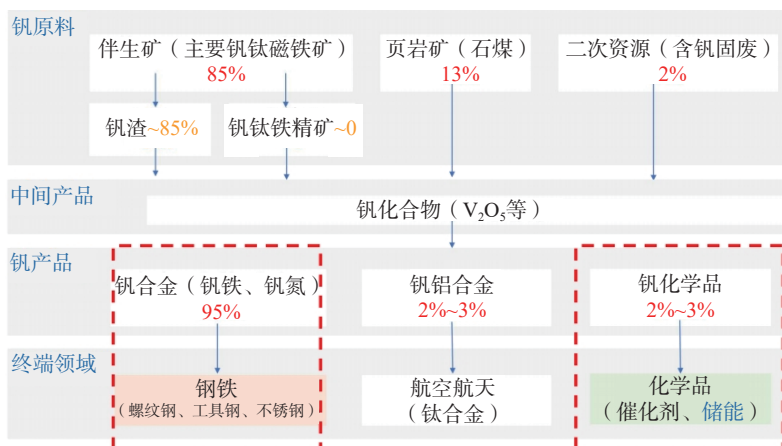


图 2 国内钒产业结构

钒的应用领域

钒长期以来作为钢铁的“绑定”产品存在，据相关

统计 2021 年钒的下游市场主要消费结构比例为：在钢铁领域消费的钒铁及钒氮合金等铁合金类产品约占 91.4%；用于钛等有色金属氧化钒产品消费约占 2.1%；用于

化工、催化剂等领域的氧化钒、钒酸铵、硫酸氧钒等约占 3.4%；用于储能领域约占 2.4%^[10-11]。“双碳”背景下，钒在全球脱碳和实现能源转型中用于储能的比例逐渐提高，绿色作用越来越显著。

钢铁的“绑定”产品

钒钛磁铁矿经过高炉炼铁得到含钒铁水，转炉炼钢时利用碳与钒的选择性氧化，将铁水中的钒富集后进入炉渣（钒渣），从钒渣中提取钒，这是目前国内主流的提钒途径。在钢中添加微量钒元素能大幅度提高钢的耐磨性、耐腐蚀性和抗爆性。可见钒的生产与消费都与钢铁紧密相关，所以钒被认为是钢铁的“绑定”产品。2022 年全球吨钢钒消费强度达到 0.060 kg，中国则达到 0.064 kg。钒主要添加到螺纹钢、工模具钢及特钢中，2022 年螺纹钢钒消费强度达到吨钢 0.162 kg。“双碳”背景推动了钢铁产业的高质量发展，随着钢材强度和性能的升级，在石油天然气管线、无缝钢管、高强度船舶海洋工程用钢、厚板，耐热钢，粉末高速钢和高耐磨铸钢、铸铁等钢种中添加钒已成为提高钢材品质的一种重要手段。未添加钒元素的钢制品在某些性能方面远不如添加钒元素的钢制品，图 3(a) 和 3(b) 所示为不含钒的磨矿钢球因强度不足在静置时爆裂飞入墙体及不含钒的磨矿钢球示意图，图 3(c) 与 3(d) 所示为不含钒制品与含钒制品的外观对比。



图 3 (a,b) 不含钒的磨矿钢球在静置时爆裂飞入墙体及不含钒磨矿钢球; (c) 不含钒制品外观; (d) 含钒制品外观

“飞天之材”的添加剂

由于钛合金的优异性能及其在海洋工程和军事

领域中的重要应用，钛及钛合金被誉为“未来金属”、“第 3 种金属”、“海洋金属”及“飞天之材”等，钒铝合金是制备含钒钛合金的重要中间合金，金属钒的加入可以细化晶粒，提高钛合金的塑性^[12-15]。生产喷气发动机、高速飞行器骨架和火箭发动机机壳等应用最广泛的是 Ti-6Al-4V 和 Ti-8Al-1Mo-1V 2 种合金，约占钛合金市场的 50%。在我国北斗卫星的建造材料中，使用了国际通用的高强度航空合金——钒铝合金和钒钛合金材料，图 4 为我国北斗导航卫星的照片。

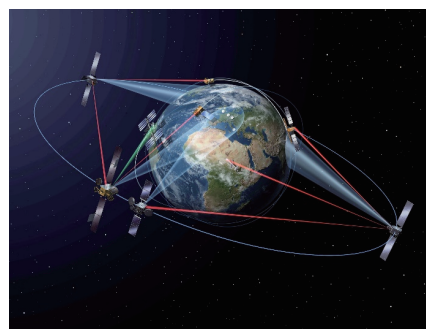


图 4 导航卫星（图片来源于搜狐网）

储能“银行”

全钒氧化还原液流电池，简称钒电池（Vanadium redox battery, VRB）由澳大利亚 Skvllas-Kazacos 在 1985 年首次提出，国内中科院大连化学物理研究所从 2005 年开始 VRB 的研究。钒电池储能系统由正、负极碳电极，正、负极电解液储能罐，离子交换膜组件等构成，其示意图如图 5 所示^[16-18]。钒电池具有可瞬间充电、大功率、大容量、安全性高等优点，能解决大规模新能源发电并网需要、合理配置储能系统，满足大容量电能的存储和转换对储能电池的特殊需求。因而钒电池“当仁不让”地成为新能源储能、电网调峰、备用电源等领域的首选，被

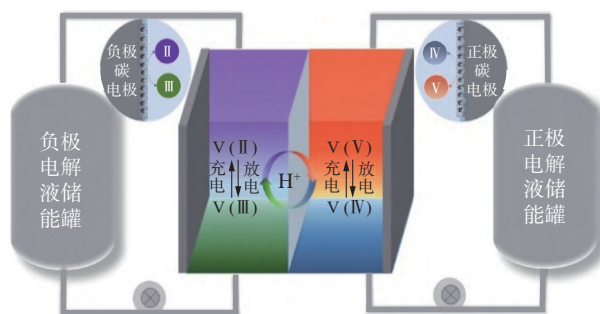


图 5 全钒氧化还原液流电池结构示意图

形象的称为储能“银行”。据《中国钒电池行业发展白皮书（2022年）》预计，2025年钒电池新增规模将达到2.3 GW，2030年将达到4.5 GW，当年新增市场规模约405亿元^[19]。

“化学面包”——钒系催化剂

催化剂是指本身不参与化学反应，但在其参与下却可以加速化学反应进行的物质。工业上最早使用昂贵的铂作为催化剂，1900年德国科学家埃恩首先发现钒可代替铂用于生产硫酸，之后钒盐作为“平民”催化剂得到了广泛应用。钒系催化剂是工业上最重要的氧化催化剂之一，常用钒系催化剂的活性组分包括钒的氧化物、氯化物和配合物等多种形式，以V₂O₅为主要成分的钒系催化剂几乎对所有的氧化反应均有效^[20]。钒系催化剂已广泛应用在硫酸制备、有机化工原料合成、烟气脱硫脱氮及环境催化等工业领域^[21]，因而钒又有“化学面包”之称。

生命的微量元素

钒于1876年进入了生命科学的研究领域，研究表明钒是人和动物不可或缺的一种微量元素，缺乏钒会导致生长发育受阻，死亡率增加，脾脏肿大，蛋白质代谢紊乱，红细胞的渗透性增加。现代医学认为钒的生物学功能多种多样，在糖代谢和胆固醇代谢中都有重要作用。深入研究钒的生物效应机理，发现钒化合物还具有抗炎作用和抗癌作用，利用高纯V₂O₅研制的相关药物已用于治疗糖尿病^[22]。

结束语

我国是全球钒资源储存、生产和消费的第一大国，钒已被广泛应用于钢铁、化工等领域，但钒资源开采浪费严重，高精技术领域如航空航天用钒铝合金等关键技术的研究应用还十分有限，尤其是在非钢铁领域的钒材料大规模工业化还需要提高。“双碳”目标下，在储能领域发展全钒液流电池产业已成为钒资源开发的一个主要方向。未来随着我国在关键材料、高性能电堆、大规模储能系统集成等方面的技术性突破，建设民航强国战略构想的提出，以及“嫦娥计划”、“核电规划”等一系列高科技项目的实施，高端钒基新材料在航空航天装备、海洋工程装

备、新能源等技术含量高、产业价值高的领域应用前景将十分广阔。

参考文献

- [1] 夏德宏, 蒋滨繁. 能源与人类社会. 金属世界, 2020(5): 70
- [2] 林水啸, 林默君. 不平“钒”的金属元素. 化学教育(中英文), 2020, 41(7): 1
- [3] 吴起鑫, 王建平, 车东, 等. 中国钒资源现状及可持续发展建议. 资源与产业, 2016, 18(3): 29
- [4] 何佳, 姜鑫, 纪恒, 等. 钒钛磁铁矿直接提钒的研究进展. 中国冶金, 2023, 33(3): 29
- [5] 黄方, 吴非. 钒同位素地球化学综述. 地学前缘, 2015, 22(5): 94
- [6] 李海涛. 近代安徽庐江矾矿资源开发研究. 山东科技大学学报(社会科学版), 2015, 17(1): 14
- [7] 王晨雪. 简述国内钒资源开发利用情况. 新疆有色金属, 2023, 46(5): 19
- [8] 简小枚, 汪鹏, 陈玮, 等. 中国钒资源全生命周期动态物质流分析. 科技导报, 2022, 40(8): 127
- [9] 吴优, 陈东辉, 刘武汉, 等. 2021年全球钒工业发展报告. 钢铁钒钛, 2022, 43(5): 1
- [10] 陈东辉. 钒产业2021年年度评价. 河北冶金, 2022(12): 19
- [11] 吴晴, 张照志, 潘昭帅, 等. 2020—2035年我国钒需求预测. 中国矿业, 2021, 30(5): 48
- [12] 李楠, 马力言, 曹瑞, 等. 钛合金用钒铝中间合金技术概述. 金属世界, 2021(4): 25
- [13] 任学佑. 稀有金属钒的应用现状及市场前景. 稀有金属, 2003, 27(6): 809
- [14] 莱因斯 C, 皮特尔斯 M. 钛与钛合金. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005
- [15] 雍岐龙, 阎生贡, 裴和中, 等. 钒在钢中的物理冶金学基础数据. 钢铁研究学报, 1998(5): 67
- [16] 刘涛, 葛灵, 张一敏. 全钒液流电池关键技术进展与发展趋势. 中国冶金, 2023, 33(4): 1
- [17] 计东东, 姜奇, 蒋龙, 等. 大容量长时储能技术及其在油气行业的应用前景. 石油管材与仪器, 2023, 9(1): 6
- [18] 魏甲明, 刘召波, 陈宋璇, 等. 全钒液流电池技术研究进展. 中国有色冶金, 2022, 51(3): 14
- [19] 陈邦祺. 储能之神, “钒”来了!. 国企管理, 2023(1): 84
- [20] 杜光超. 钒在非钢铁领域应用的研究进展. 钢铁钒钛, 2015, 36(2): 49
- [21] 陈东辉, 李九江, 赵备备, 等. 战略资源金属钒的绿色价值概述. 世界有色金属, 2018(20): 1
- [22] 陈亚西, 王向阳, 张旭, 等. 高纯五氧化二钒应用及制备概况. 安徽化工, 2022, 48(5): 1

作者简介: 富志生(1969—), 男, 甘肃省嘉峪关市人, 高级工程师, 主要研究方向: 炼钢工艺及新产品研发. 通信地址: 甘肃省嘉峪关市酒钢公司炼轧厂109室; E-mail: fontname@163.com。