

中国钒资源全生命周期动态物质流分析

简小枚^{1,2,3}, 汪鹏^{1,3,4*}, 陈玮^{1,3}, 段临林^{1,2,3}, 王鹤鸣^{5*}, 陈伟强^{1,2,3}

1. 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 厦门城市代谢重点实验室, 厦门 361021

4. 中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341100

5. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 沈阳 110819

摘要 钒在钢铁、化工和航空航天等领域的广泛应用持续推动钒物质流动和供需格局的变化, 特别是电池应用的商业化将影响未来能源转型及新能源存储领域的长期发展。为揭示中国钒物质流的变化和未来供需格局, 构建了钒的全生命周期物质流分析框架, 核算了2000—2019年中国钒的流量、存量和供需情况。研究显示: (1) 中国是钒生产和消费大国, 含钒钢铁、合金(钒铁合金)是金属钒的主要消费领域, 消费占比稳定在85%以上, 储能电池作为钒的前沿应用, 占钒消费总量的比例也在不断增加; (2) 2000—2019年中国是钒初级产品净进口国(5362 t), 也是钒制品净出口国(8284 t), 全钒液流电池处于出口状态, 钒储能技术研究将迎来高峰; (3) 2010—2019年钒在用存量增加了5倍, 达到120万t, 其中电池在用存量增加了24倍, 钒开始向电池等新兴行业发展; (4) 2000—2019年钒报废量为8.1万t, 仅有1.8万t被回收(回收率为23%), 提高钒的循环利用可以减少钒原矿资源的开采及其产生的环境影响。

关键词 钒; 物质流分析; 全钒液流电池; 新能源

钒被誉为“金属维生素”, 广泛应用于钢铁、化工与航空航天等领域^[1-2], 是现代工业与国防部门不可或缺的金属资源。由于金属钒在行业的突出地位, 其被西方国家列为关键金属(critical metal)。钒主要用于钢铁冶炼, 少量钒的添加能够大幅增加

钢铁的弹性与强度, 提高钢铁的抗磨性和抗爆性, 是钢铁行业不可或缺的金属材料。近年来, 钒在储能领域也展现出巨大的技术优势, 全钒氧化还原液流电池(vanadium redox flow battery, VRFB)具有能量转换效率高、循环寿命长、安全环保等突出特点,

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(71904182); 福建省对外合作项目(2020I0101); 中国科学院江西稀土研究院自主部署项目(E055B004)

作者简介: 简小枚, 博士研究生, 研究方向为产业生态学, 电子信箱: xmjian@iue.ac.cn; 汪鹏(通信作者), 副研究员, 研究方向为金属-能源关

联系统, 电子信箱: pwang@iue.ac.cn; 王鹤鸣(共同通信作者), 教授, 研究方向为产业生态学, 电子信箱: wangheming2006@gmail.

com

引用格式: 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[J]. 科技导报, 2022, 40(8): 127-136; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.08.012

是一种优良的储能装置,拥有广阔的市场前景。特别地,2020年储能产业被确定为国家战略性新兴产业,钒电池需求将迅猛增加,其资源的供需变化已经引起了各国的高度重视^[3-4]。因此,保障钒资源的安全供应,促进其高效可持续利用极为重要。

目前,中国已经发展成为世界最大的钒生产、消费与出口国。根据美国地质调查局(USGS)统计,2019年全球钒储量为2200万t,主要分布在中国(43%)、俄罗斯(23%)、澳大利亚(18%)和南非

(16%)。从钒矿生产情况来看,2019年中国钒矿产量为7.1万t,占全球总产量55%(图1),是全球最大的钒生产国。中国钒资源主要赋存在钒钛磁铁矿和含钒石煤中^[5]。其中,钒钛磁铁矿的经济效益较高,开发造成的环境污染较小,主要分布在四川攀西和河北承德。石煤主要分布在陕西、湖南、湖北、安徽、广西和甘肃等地。中国已经形成较为完整的钒产业,在国际钒市场占有重要地位^[6]。

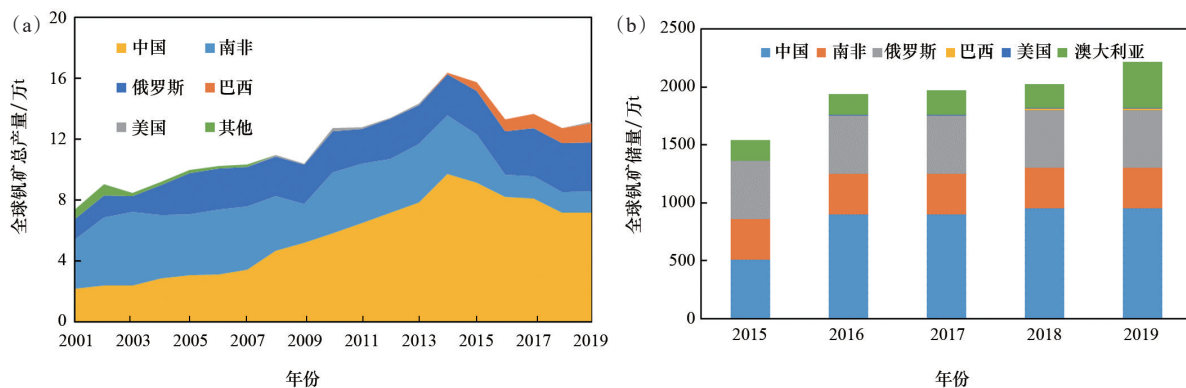


图1 全球钒矿产量(以 V₂O₅ 计)和钒矿储量

作为中国优势资源之一,钒产业仍面临一系列挑战与困境^[7]。尽管钒产量激增,但开采浪费严重,对共伴生稀有金属的回收难度大,资源利用率偏低,环境资源效益也不高。当前钒消费仍集中在钢铁等传统工业部门,缺乏更高层次的应用,迫切需要升级消费结构,将资源优势转变为产业优势。特别是随着储能技术的发展,钒在储能电池领域前景广阔,将引发人们对钒供需情况的关注与担忧。为解决上述问题,首先要摸清中国钒物质流动和资源代谢情况,深入分析钒在生产、使用、废物管理以及贸易的全生命周期过程中的存量和流量,厘清产业链中存在的问题,寻找解决方案,促进中国钒产业的可持续发展^[8-10]。

物质流分析(material flow analysis, MFA)是量化资源流动与促进产业可持续发展的重要工具,已广泛应用于钨^[11]、铁^[12-13]、钴^[14]、铜^[15]等金属的社会代谢分析^[16-18]。现有针对钒的物质流分析研究主要集中在静态的流量核算^[19-21],在钒金属供需格局的

动态演变方面研究较少。基于此,研究采用动态物质流分析方法,构建2000—2019年中国钒物质流核算框架,核算金属钒从开采、冶炼、加工、制造、使用和废物管理的全过程周期中的流动和存量,识别影响钒生产和消费的主要因素,为进一步完善中国关键金属管理提供参考。

1 研究方法

1.1 系统边界

金属钒物质流分析核算框架如图2所示,主要包括开采、冶炼、加工、制造、使用和废物管理的全生命周期阶段^[22]。其中,采矿阶段的产品主要包括钒钛磁铁矿、钒渣和石煤。生产阶段的产品主要包括 V₂O₅、其他氧化物和氢氧化物。加工阶段的产品主要包括含钒钢铁合金(钒铁合金)、钒氮和金属钒;制造和使用阶段的产品主要包括钢铁、非铁合金、钒氧化还原液流电池、催化剂和颜料等化学品;

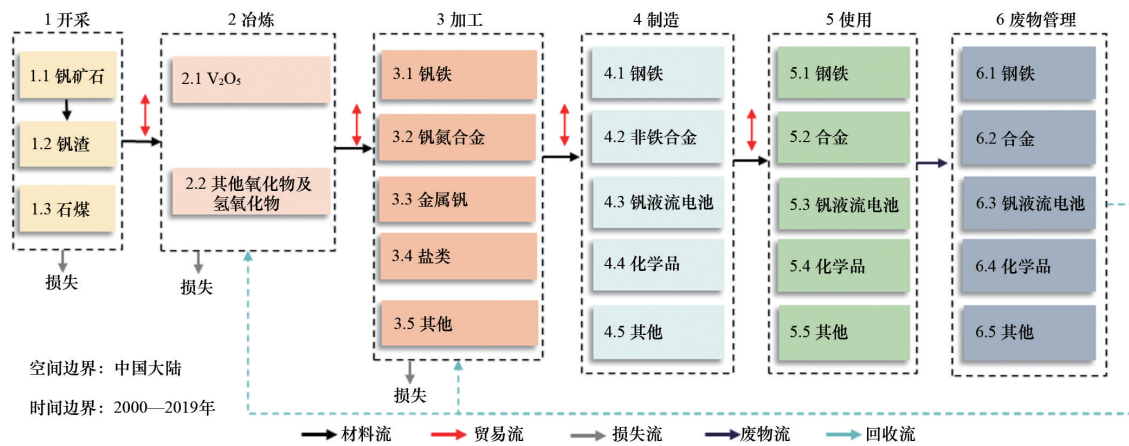


图2 中国钒的全生命周期动态物质流分析框架

废物管理的对象主要包括达到使用寿命后的各类含钒废弃物。本研究的空间边界为中国大陆,时间范围为2000—2019年,以上边界和范围能动态反映中国钒的历史流量和存量。

钒物质循环中各生命周期过程包含的工艺过程阶段如下。

开采阶段:钒在自然界中主要以共生矿或复合矿的形式存在,中国钒资源主要包括钒钛磁铁矿和含钒石煤2种形式。钒钛磁铁矿主要分布在四川、湖南、广西、甘肃和湖北等省份。石煤作为中国特色原料,总储量为619亿t,主要分布在湖南、广西和湖北等省份。

冶炼阶段:钒资源主要利用酸浸碱溶、钠化焙烧、直接焙烧和钙化焙烧等提钒技术提取。 V_2O_5 及其他氧化物(如 V_2O_3)是冶炼阶段的主要产物,是生产钒铁、钒氮和碳化钒等钒制品的主要原料,广泛应用于冶金和化工行业。

加工和制造阶段:钒主要以氧化物的形式被制造成钒铁合金、非铁合金(如钒氮、碳化钒等)和钒化合物等。在钢铁冶金行业中,添加少量的钒可有效提高钢铁的强度、延展性和韧性,大约80%以上的 V_2O_5 被用于生产钒铁,钒铁主要用作生产钢铁的添加剂,应用于钢铁和航空航天业。钒氮和钒钛等非铁合金作为新型的合金添加剂,可以提高合金钢和合金铸铁的强度和韧性。含钒化合物可以用于化工和电池行业,大部分以化合物或聚合物的形式

用于催化剂生产,也充当着色剂用于陶瓷和玻璃行业,此外含钒化合物也可以被加工成钒电解液用于制作钒液流电池,该电池是重要的新型清洁能源储能材料。

使用阶段:在使用寿命期限内,钒钢合金、非铁合金和钒液流电池等钒制成品留存于社会经济系统中,为人类社会提供服务。

废物管理阶段:含钒固体废弃物主要来源于石油精炼、硫酸生产和化工生产所产生的废物中,主要包括用于炼油的废催化剂和用于化工的废催化剂。废钒催化剂中钒的品位较高,可作为回收 V_2O_5 的原料,整体回收量约占固体废弃物总量的35%。

1.2 存量和流量核算

采用动态物质流分析的方法刻画2000—2019年中国钒的流量和存量,含钒产品流量和存量遵守物质守恒定律。流量方程如式(1)所示。

$$\sum[inflow(j) + import(j)] = \sum[outflow(j) + export(j)] + loss \quad (1)$$

式中, j 表示全生命周期的各个环节;某个环节的输入流量包括从上个环节传输过来的流量 $inflow(j)$ 和该环节产生的产品的进口流量 $import(j)$;输出流量包括传输给下一个环节的流量 $outflow(j)$ 、从该环节产生的排放到自然环境的损失流量 $loss$ 、该环节产生的产品出口流量 $export(j)$ 。

从制造环节进入使用环节的最终产品,由于具

有一定的使用时限而形成了在用存量。该在用存量等于上一年的存量加上该年的产品投入量减去该年的产品废弃量。每个阶段采用的存量方程及产品报废模型为

$$Stock(t) = Stock(t-1) + inflow(t) - outflow(t) \quad (2)$$

$$outflow(t) = \sum_{t'}^{t} inflow(t) \times L(t-t') \quad (3)$$

式中, $L(t-t')$ 为动态使用年限折旧函数, 本研究选择正态分布的概率密度函数进行计算。

1.3 数据来源

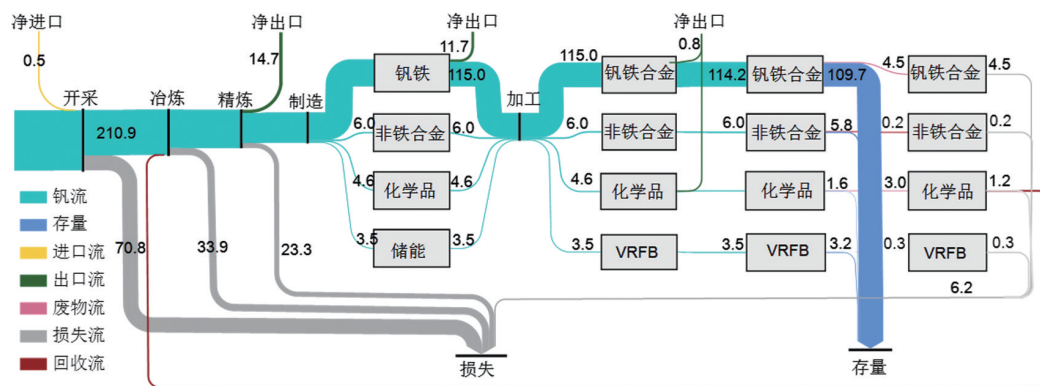
钒物质流核算数据主要来自统计年鉴、行业报告、出版的书籍和文献等。其中, 钒矿产量和消费量主要来自美国地质调查局^[23]; 含钒产品的生产和消费数据主要来自中国统计年鉴及中国有色金属统计年鉴; 钒矿、钒氧化物、钒铁合金和全钒氧化还

原液流电池等产品的进出口贸易数据主要来自联合国贸易商品统计数据库(UN Comtrade)^[24]。

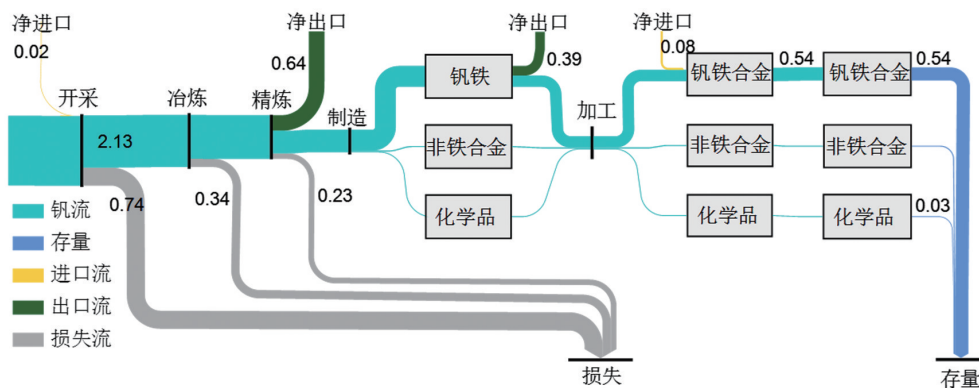
2 结果

2.1 钒动态物质流分析

模拟了2000—2019年中国钒金属全生命周期的物质流动情况, 如图3所示。中国钒矿总开采量为281.2万t, 钒精炼产品产量为155.5万t, 其中向其他国家出口了14.7万t。钒消费量为129.1万t, 主要包括钒铁合金(115万t)、非铁合金(6万t)、各类化学品(4.6万t)及钒液流电池(3.5万t)等。2000—2019年, 钒在社会经济系统的存量为120.3万t, 主要存在于钒铁合金(109.7万t)、非铁合金(5.8万t)、化学品(1.6万t)及钒液流电池(3.2万t)。钒的

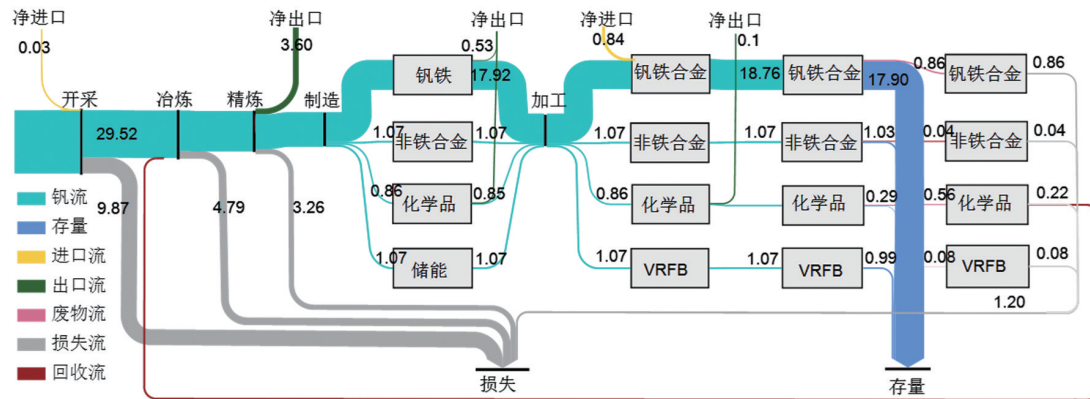


(a) 2000—2019年



(b) 2000年

图3 2000—2019年金属钒动态物质流分析(单位:万t)



(c) 2019年

图3 2000—2019年金属钒动态物质流分析(单位:kt)(续)

报废量为8.0万t,其中以废料的形式进入环境的有6.2万t,仅有1.8万t得到回收利用,回收率为23%。

从生命周期视角看,各级生产过程均造成钒资源的大量损失,钒资源的综合利用仅为32%。2000—2019年中国开采钒矿281.2万t,共造成134.2万t钒的损失,损失率高达47%,其中开采阶段的损失率最高,达到25%,其余如冶炼、加工阶段的损失分别为12%、8%。

2.2 钒制品消费特征分析

钒的消费结构包括钒铁合金、非铁合金、化学品以及钒电池,其中钒铁合金是钒最主要的消费品,2000—2019年中国在钒铁合金中的钒消费量平均占钒总消费量的90%(图4)。而随着钒铁合金的需求持续增加,钒的消费量也迅速增加,从2000年的0.6万t增长至2019年的21.7万t,增长了35倍。钒电池作为钒的前沿产品,其消费潜力巨大且占比逐渐增加。由于具有使用寿命长、电池容量可扩充性强、安全性好以及可实现100%放电等优势,钒电池在风能与太阳能等新能源储能领域备受青睐,相应钒在储能领域的消费量也不断增加^[6]。2010年钒在电池领域的消费量为0.1万t,2019年已增长至1.1万t,10年增长了11倍。

2.3 含钒产品贸易流分析

2000—2019年中国钒矿进口总量为5362 t,总体呈现波动增长,2014年钒矿进口量最大,达到

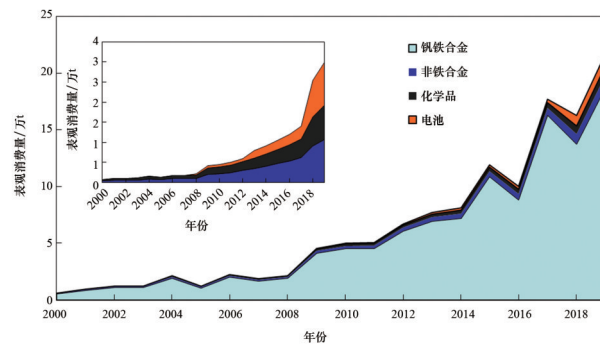


图4 钒制品消费情况

622 t(图5)。中国钒制品进出口总体平衡,钒铁合金处于进出口波动状态,20年间钒铁合金总出口量为7879 t。非铁合金早期处于出口状态,2008年经济危机后开始转为进口,2013年左右总体消费贸易转为出口状态。包括颜料和催化剂在内的含钒化学品,2000—2011年总体处于进口状态,但2011年后主要将制成品出口到其他国家。作为新能源技术主要应用领域的钒电池,早期研究较少,贸易基本没有,但2008年后开始有机构进行钒液流电池的研究。近几年,中国钒电池领域的贸易基本处于出口状态,钒储能技术研究将迎来高峰。数据显示,截至2019年,全球正在运行的钒电池项目达113个,总容量为209.8 MW·h,且项目主要集中在中国^[25]。根据《进口废物管理目录》,含钒的废催化剂和含钒的废弃料都为禁止进口废物,因此,2000—2019年废弃料进口量近乎为零。

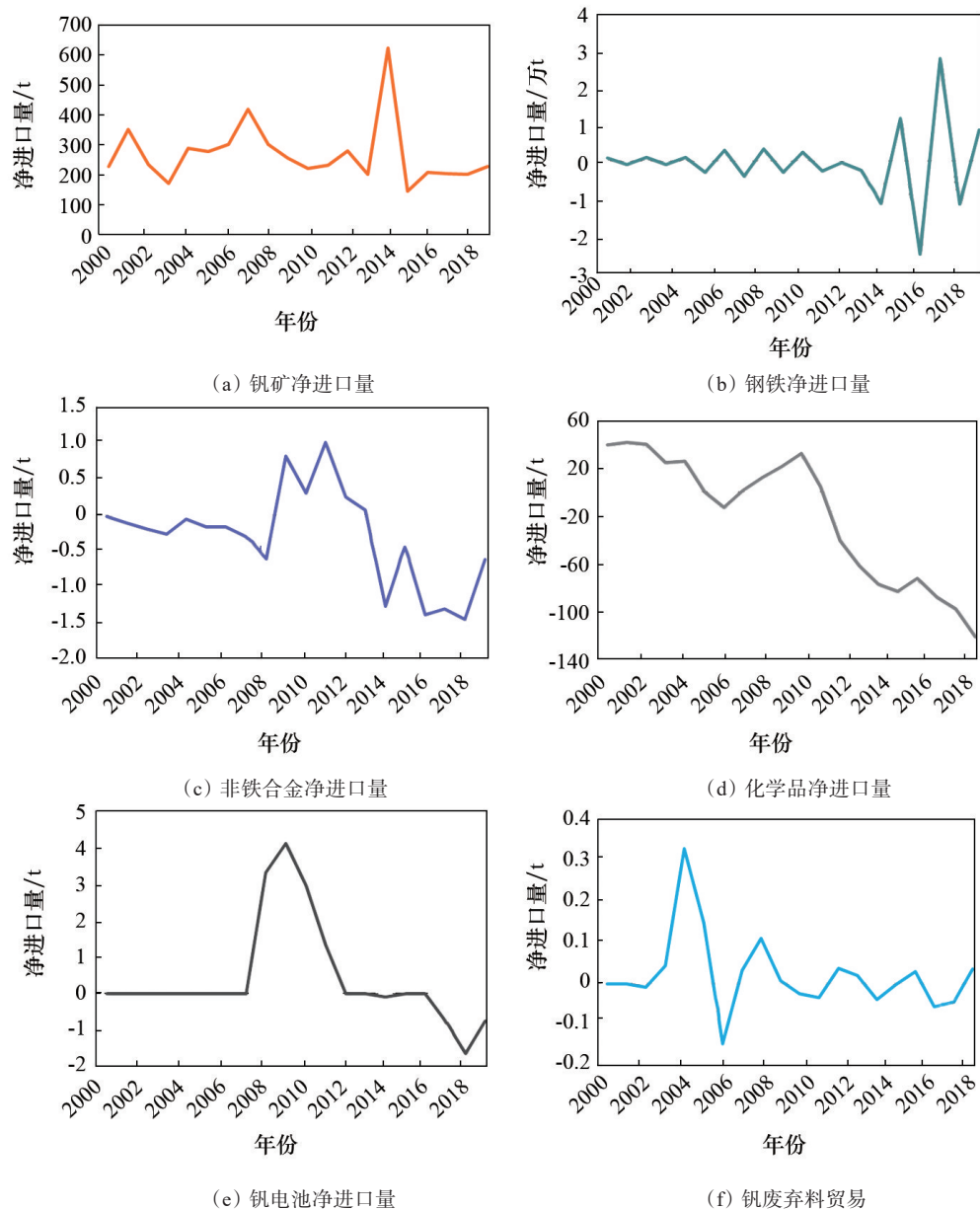


图5 钒产品贸易情况

2.4 存量及其驱动因素

如图6所示,2000—2019年中国钒在用存量增长迅速,由2000年的0.6万t增长到2019年的120.3万t。钒铁合金领域是钒在用存量最大的领域,该领域钒在用存量迅速增加,由2000年的0.5万t增加至2019年的109.7万t。钒的使用强度(每吨钢使用钒量)是衡量钢铁行业先进水平的指标,中国的钒使用强度远低于发达国家水平^[26],随着中国钒

使用强度的增加,钒在钢铁部门的在用存量也将逐渐增加。非铁合金领域也是钒使用较广的领域,2019年钒存量为5.8万t。一般来说,使用寿命较短的终端产品在用存量占比都较少,如钒在化学品中的在用存量仅为1.6万t,占比仅为1%。此外,随着电池应用越来越广泛,电池中钒存量也在逐渐增加,由2007年占总在用存量的0%逐渐增加至2019年的3%,表明钒使用领域开始向电池等新兴行业发

展。钒电池作为理想的储能电池,虽然存在体积大、不易搬运的缺点,但其使用寿命长(长达20年),电解液也可以循环使用。钒电池可用于建造千瓦级到百兆级储能电站,安全性好,具有较大的增长潜力^[25]。

2.5 报废特征及回收现状

图7展示了2000—2019年报废的含钒制品的

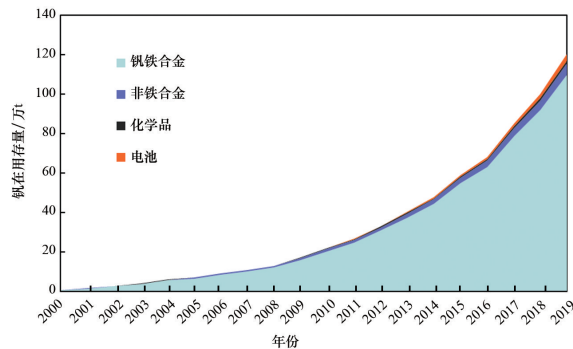


图6 钒制品在用存量情况

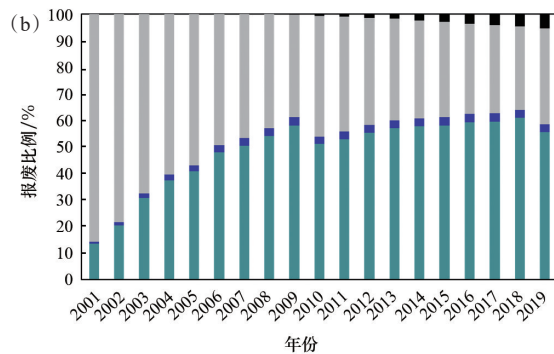
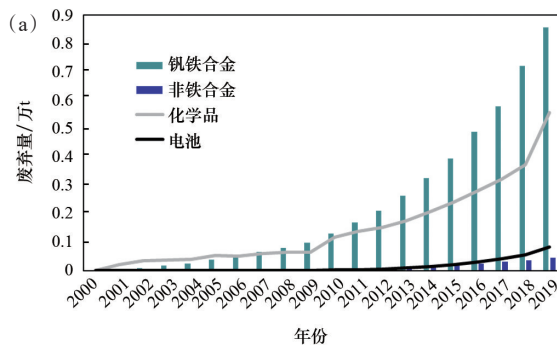


图7 含钒制品报废量(a)及报废比例(b)

3 讨论

钒是一种具有极大回收潜力的元素,作为钒生产和消费大国,中国钒回收水平相对较高。和其他国家相比,中国钒的回收率高于全球平均水平,根据联合国环境规划署估计,全球钒回收率小于1%^[27],不同国家的钒回收水平具有明显差异。钒制品的化学组成极大影响钒的回收水平,大多数钒与其他金属一起制造加工成钒制品,如非铁合金中含有钒、铝和钛等金属,给钒的回收带来了难度。除了废颜料和催化剂,报废后的钒金属一般没有得

产生量,总报废量为8.1万t,钒铁合金和化学品是报废量最大的2类产品。20年间钒铁合金、非铁合金、钒化学品和钒电池中的钒报废量分别为4.6万、0.2万、3万、0.3万t,占比分别为57%、3%、37%、3%。产品寿命是影响报废量的重要因素,钒铁合金使用寿命相对较长,早期报废量少,而化学品的使用寿命相对较短,报废量较多,因此早期化学品报废量高于钒铁合金。2001年,含钒报废产品中化学品占比为86%,钒铁合金占比为13%。随着时间的累积,钒铁合金逐渐迎来产品报废高峰期,由于钒铁合金消费基数大,其报废量也开始增加。2019年,钒铁合金的报废比例为56%,而化学品为36%。从回收情况来看,由于钢铁行业中钒添加量较少,钒主要随着钒铁一并回收,并没有单独回收。废催化剂和废颜料是钒回收的原材料,回收率在23%左右。

到回收。提高钒的循环利用能减少钒矿的开采及钒的环境暴露,但由于回收技术和收集设施没有跟上现代产品更新的步伐,且缺乏经济回收的激励措施,目前钒的回收仍具有较大困难。因此,中国钒产业应加快建立有效的钒回收体系。

钒作为炼钢过程中的添加剂,能提高钢的抗拉强度和韧性,目前钒在钢铁中的消费量占钒总消费量的90%,特别是2017年中国颁布了国家标准GB/T 1499.2—2018《钢筋混凝土用钢 第2部分:热轧带肋钢筋》,增加钢中钒的含量能改善其抗拉性能,使中国钒需求逐年增加^[28]。除了在钢铁行业中的

应用,钒液流电池作为一项绿色和有前景的技术,近几年来得到越来越多的重视。由于较高的钒电解液成本以及较低的能量密度,使得钒液流电池不适合小规模应用,主要应用于大中型存储系统,能够缓解太阳能和风能供应风险,具有巨大的应用前景,但由于钢铁部门的高需求以及钒矿山开采量的环境限制^[29],中国钒液流电池的市场占有率仅为1%,未来随着钒在能源转型中的潜在重要性逐渐加强,保障钒资源的稳定供应成为钒液流电池产业可持续发展的主要挑战^[30]。研究表明,采矿活动和其引起的环境健康风险是影响德国钒断供的主要风险,基于此,欧洲委员会也将钒列入了关键金属清单^[31]。

含钒固废种类繁多,一种来源于钒矿加工过程中产生的钒渣和提钒尾渣等,另一种是含钒制品使用后产生的废催化剂等^[32]。含钒冶炼渣(钒渣)作为提取钒的主要原料,主要由氧(31.42%)、铁(28.94%)、钒(9.44%)、钛(7.39%)、铬(2.83%)和其他化学物质组成^[33]。目前主要的综合利用方法包括钠焙烧-水浸和钙化焙烧-酸浸提取法,但这些提取技术需要较高的焙烧温度,具有能耗大、效率低和环境影响大的特点^[34]。此外,提取 V_2O_5 后,残渣中的金属资源如果不进一步回收,也会引起系列环境问题。钒渣的有效利用是钒产业可持续发展的有效途径,随着科技创新,钒提取技术得到不断提高,低温焙烧工艺作为一项清洁技术,钒提取率能够达到96.2%^[33]。提高钒提取的工艺水平,能够减少钒矿的开采,避免造成二次污染。

4 结论

核算了2000—2019年中国钒的全生命周期流量和存量,结果显示:(1)钒钛磁铁矿和石煤等的开采量和精矿产量呈现波动式增长。钒的各类制品量占总产品量的比例分别为钒铁合金(90%)、非铁合金(5%)、化学品(4%)和电池(1%);(2)中国是钒初级产品的净进口国(5362 t),也是主要的钒制品的净出口国,净出口量从2000年的887 t增长到8284 t;(3)钒电池作为钒的新兴应用

领域,消费规模大幅度上升,从2010年的0.01万t逐渐上升到2019年的1.1万t,总消费量达3.5万t;钒在用存量增长迅速,由2000年的0.6万t增长到2019年的120万t;(4)2000—2019年,流入废物管理阶段的钒废弃物达到8.1万t,但仅有废颜料和废催化剂等化学品(1.8万t)得到回收,回收率为23%。

中国作为钒的生产和消费大国,钒产业需要往高效、清洁和循环利用方向发展,基于此,提出3点政策和研究建议。

1) 提升中国钒产业高质量发展水平。中国的钒矿资源储量世界第一,但目前钒钛企业普遍存在“散乱”现象,资源利用率不高,产品较低端。因此,需要提高钒冶炼工艺,确保钒矿资源的合理有序开发,引导相关企业规模化、集约化生产;同时,随着世界各国钒资源的开发利用,市场竞争逐渐激烈,中国作为钒制品出口大国,未来应加大出口高端产品,开发利用境外资源,扩大钒矿经营范围,提高钒资源的可持续利用。

2) 促进中国钒产业向储能及“双碳”方向延伸。中国大约85%以上的钒用于钢铁行业,钢铁对钒的需求决定了钒产业的命运。2018年,钢筋新国标要求提高钒使用强度,促使钒产量和消费量得到一定增长。但钒价格上涨也影响着钒需求,应控制钒的价格,提高市场竞争力并降低风险。此外,中国钒产业链可以多元化延伸,开发高附加值的钒产品,提升钒产业价值。特别地,洁净、低碳、安全、高效的能源体系关系着“双碳”目标能否实现。因此,钒电池作为重要的储能电池,有必要进行钒需求预测,从流量、存量和贸易角度分析钒的供应和需求,助力政策决策。

3) 提升中国钒资源的清洁生产与高效利用。中国钒资源损失相对较大,利用效率较低,产出率不理想。尾矿、矿渣是钒资源损失的主要途径,不仅制约了钒产业的可持续发展,还会带来许多环境问题。为了提高钒的利用率,应从全生命周期的角度降低钒在各环节的损失率,钒先进清洁提取技术的开发应得到更多的重视。特别地,钒渣制钒、石煤提钒和二次资源提钒产业都还未实现全流程绿

色制造,钒产业仍面临着众多环境问题,因此,应建立有针对性的钒资源回收渠道,有效地促进废旧钒资源的再利用。未来,随着资源利用率和产出率的提高,钒产业的环境影响将不断降低。

参考文献(References)

- [1] National Research Council. Vanadium supply and demand outlook[M]. Washington, D.C: The National Academies Press, 1978.
- [2] 李鹏, 向国洪, 王勇军, 等. 钒的应用研究综述[J]. 化工管理, 2021(1): 72-73.
- [3] Mccullough E, Nassar N T. Assessment of critical minerals: Updated application of an early-warning screening methodology[J]. Mineral Economics, 2017, 30(3): 257-272.
- [4] 高永璋. 中国钒矿资源及供需形势分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(增刊2): 5-10.
- [5] Petranikova M, Tkaczyk A H, Bartl A, et al. Vanadium sustainability in the context of innovative recycling and sourcing development[J]. Waste Management, 2020, 113: 521-544.
- [6] 陈东辉. 钒产业 2019 年年度评价[J]. 河北冶金, 2021(1): 1-11.
- [7] 崔文婧. 我国钒矿资源开发利用现状及建议[J]. 合作经济与科技, 2019(11): 54-56.
- [8] 陈东辉. 钒产业 2015 年年度评价[J]. 河北冶金, 2016(11): 1-9.
- [9] 陈东辉. 钒产业 2016 年年度评价[J]. 河北冶金, 2017(10): 8-17.
- [10] 陈东辉. 钒产业 2017 年年度评价[J]. 河北冶金, 2018(12): 1-80.
- [11] Tang L, Wang P, Graedel T E, et al. Refining the understanding of China's tungsten dominance with dynamic material cycle analysis[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 158: 104829.
- [12] Chen W Q, Graedel T E. Dynamic analysis of aluminum stocks and flows in the United States: 1900-2009[J]. Ecological Economics, 2012, 81: 92-102.
- [13] Chen W Q. Dynamic product-level analysis of in-use aluminum stocks in the United States[J]. Journal of Industrial Ecology, 2018, 22(6): 1425-1435.
- [14] 刘立涛, 赵慧兰, 刘晓洁, 等. 1995—2015 年美国钼物质流演变[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 524-534.
- [15] Hao M, Wang P, Song L L, et al. Spatial distribution of copper in-use stocks and flows in China: 1978-2016[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121260.
- [16] Hao H, Liu Z W, Zhao F Q, et al. Material flow analysis of lithium in China[J]. Resources Policy, 2017, 51: 100-106.
- [17] Restrepo E, Lovik A N, Wager P, et al. Stocks, flows, and distribution of critical metals in embedded electronics in passenger vehicles[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(3): 1129-1139.
- [18] Song L L, Wang P, Hao M, et al. Mapping provincial steel stocks and flows in China: 1978-2050[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262: 121393.
- [19] Goonan T G. Vanadium recycling in the United States in 2004[R]. Reston: United States Geological Survey, 2011.
- [20] Zhang F F, Li H Q, Chen B, et al. Vanadium metabolism investigation using substance flow and scenario analysis[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2014, 8(2): 256-266.
- [21] Hilliard H E. The materials flow of vanadium in the United States[R]. Reston: United States Geological Survey, 1994.
- [22] Moskalyk R R, Alfantazi A M. Processing of vanadium: A review[J]. Minerals Engineering, 2003, 16(9): 793-805.
- [23] USGS. Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey[R]. Reston: United States Geological Survey, 2020.
- [24] UN Comtrade. United Nations commodity trade statistics database[R/OL]. [2022-03-30]. <https://comtrade.un.org>.
- [25] 丁瑞锋, 张大伟. “十三五”钒行业市场分析与发展趋势预测[J]. 冶金经济与管理, 2021, (2): 11-15.
- [26] 陈东辉. 钒产业 2018 年年度评价[J]. 河北冶金, 2019(8): 5-15.
- [27] International Resources Panel. Recycling rates of metals a status report[R]. New York: United Nations Environment Programme, 2011.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢筋混凝土用钢 第 2 部分: 热轧带肋钢筋: GB 1499.2—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [29] Watt J A J, Burke I T, Edwards R A, et al. Vanadium: A re-emerging environmental hazard[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(21): 11973-11974.
- [30] Ciotola A, Fuss M, Colombo S, et al. The potential supply risk of vanadium for the renewable energy transition in Germany[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102094.

- [31] European Commission. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions on the 2017 list of critical raw materials for the EU[R]. Brussels: European Commission, 2017.
- [32] 胡佩伟, 谢志诚, 胡兵, 等. 含钒固废综合利用现状及发展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(5): 144-152.
- [33] Wang Z H, Chen L, Qin Z F, et al. A green and efficient route for simultaneous recovery of low valence of vanadium and chromium, titanium and iron from vanadium slag[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 178: 106046.
- [34] Gouveia J, Mendes A, Monteiro R, et al. Life cycle assessment of a vanadium flow battery[J]. Energy Reports, 2020, 6: 95-101.

Material flow analysis of vanadium in China from 2000 to 2019

JIAN Xiaomei^{1,2,3}, WANG Peng^{1,3,4*}, CHEN Wei^{1,3}, DUAN Linlin^{1,2,3}, WANG Heming^{5*}, CHEN Weiqiang^{1,2,3}

1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China
4. Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341100, China
5. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract The wide application of the vanadium resources in the fields of the steel, the chemicals, the aerospace and others promotes the vanadium flow and the change of the supply and demand pattern, especially, the commercialization of the battery applications will affect the energy transformation and the long-term development of the new energy storage field. To reveal the supply and demand pattern, this paper analyzes the dynamic material flow of vanadium during the whole life cycle of mining, smelting, refining, manufacturing, processing, use and waste management in China from 2000 to 2019. It is shown that: (1) the steel industry is the main consumption field of vanadium, with the consumption stable at more than 85%. The vanadium redox flow battery, as the frontier application of vanadium, accounts for an increasing proportion of the vanadium consumption; (2) from 2000 to 2019, China is a net importer of the primary vanadium products (5.4 kt) and a larger net exporter of the final vanadium products (8.3kt). The battery is in the export stage, and the research of the vanadium energy storage technology will help to push the export to the peak stage; (3) from 2010 to 2019, the vanadium in-use stock is increased 5 times, reaching 1.2 million tons, of which the in-use stock of the battery is increased 24 times, the production of vanadium begins to develop into emerging industries such as the batteries; (4) the scrap amount is 80.9 kt, of which 18.3 kt is recycled, with a recycling rate of 23%, and the improvement of the recycling can reduce the mining and environmental impact of the vanadium mines in the future.

Keywords vanadium; material flow analysis; vanadium redox flow battery; energy storage ●



(责任编辑 刘志远)