

中国金属铂的物质流分析

刘思杰^{1,2}, 李金惠¹, 耿涌², 曾现来^{1*}

1. 清华大学环境学院, 北京 100084

2. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240

摘要 作为矿产初级产品, 铂是重要的战略矿产资源, 主要应用在汽车、首饰、化工等领域。构建了2016—2020年中国铂动态物质流分析模型, 对铂的人为流动和社会库存进行了定量评估; 根据部门消费法选取汽车行业, 基于Weibull分布对铂的报废量进行测算, 提出铂的可持续发展 and 资源管理政策建议。结果显示: (1) 中国铂矿产量少且品位低, 铂矿可用储量、产量均下降, 全国铂平均品位仅为0.341 g/t; (2) 铂的消费量和进口依赖度逐年上升, 首饰行业是需求最大的产业, 汽车行业铂的存量和报废量也快速增加。分析表明, 中国未来铂资源回收潜力巨大, 因此, 需要对含铂产品使用后的回收管理体系进行改进, 加强铂二次资源的回收利用, 从而减少铂的进口依赖程度成为当务之急。

关键词 铂; 物质流分析; 回收利用; 报废量

铂既是战略性资源, 也是关键金属, 近年来成为了中国、欧洲及美国关注的技术性金属。目前铂被广泛应用于汽车、首饰、化工、石油、电子、玻璃、医疗、投资及燃料电池等多个领域, 其中汽车和首饰领域的铂需求较大, 约占全球铂需求总量的42%、32%。美国地质调查局(USGS)的数据显示, 目前全世界铂族金属储量为6.9万t, 而97%的铂族金属资源分布在南非、俄罗斯、北美洲与津巴布韦, 其中南非是全球铂族金属储量最大的国家, 占全球铂族金属储量的90.9%。中国铂族金属的储量仅

仅为全球铂族金属储量的 2.4×10^{-5} , 可见中国铂矿资源十分稀缺。从资源分布来看, 中国铂矿分布集中, 90.7%分布在甘肃, 但铂矿品味较低, 全国铂平均品位仅为0.341 g/t^[1]。

纵观近年来铂的消费情况, 2016—2020年全球铂消费量总体呈缓慢增长态势, 欧美及日本等发达国家和地区的铂消费量下降, 以中国为首的发展中国家对铂的消费需求与日俱增。中国的铂消费量占全球的28%, 是全球最大的金属铂消费国。受到新冠肺炎疫情的影响, 汽车、工业和首饰行业受

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2023-04-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1908501); 国家自然科学基金项目(92062111); 国家社会科学基金重大项目(21&ZD106)

作者简介: 刘思杰, 博士研究生, 研究方向为循环经济与资源效率, 电子信箱: liusijie18@sjtu.edu.cn; 曾现来(通信作者), 副研究员, 研究方向为物质循环与废物管理, 电子信箱: xlzeng@tsinghua.edu.cn

引用格式: 刘思杰, 李金惠, 耿涌, 等. 中国金属铂的物质流分析[J]. 科技导报, 2024, 42(4): 102-109; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.04.010

到打击,并且矿产供应和回收供应也受到影响^[2],使得铂消费量在2020年以来有所下降。

由于铂的关键性,国内外有很多学者对铂开展了研究。最早可以追溯到1989年关于铂族元素的物质流分析,张若然等^[3]分析了全球主要铂族金属需求预测及供需形势,李鹏远等^[4]运用部门消费法对中国2030年前的铂、钯、铑3种主要铂族金属需求总量进行了预测,张莓^[5]对全球及中国铂族金属资源的储量、分布、开发利用现状做了系统介绍。Rasmussen等^[6]开发了动态物质流分析模型来刻画1975—2016年的全球铂循环的特点,Hao等^[7]建立了一个技术丰富的自下而上的模型,评估当前的铂资源是否可以支撑140个国家2000—2100年期间的燃料电池汽车产业,Alonso等^[8]使用描述铂的地球物理限制、制度效率和动态响应能力的铂市场特征分析,评估了铂供应减少的潜在风险。李欣萍等^[9]量化追踪了2011—2020年中国大陆铂物质流,考察了贸易、使用及潜在需求。国外也有一些企业和政府部门对铂进行研究,如美国地质调查局^[10-11]2004年发布报告对全球铂族金属供需形势进行研究,庄信万丰公司每年都会针对全球铂族金属做市场报告,对当年铂族金属的供需形势分品种进行分析。

总体来说,目前已有的对中国金属铂的研究集中在对现状和历史的阐述分析上,缺乏近年来全生命周期可视化的图谱分析及物质流代谢机制刻画,鲜有对循环利用技术及政策的充分讨论分析。因此,本研究试图对近年来中国金属铂进行物质流分析,刻画生产加工、使用报废、循环再生等各个阶段的流量特征,厘清其中的驱动机制,探究切实可行的能提高金属铂循环利用的措施,缓解中国铂储量低、消费量大的紧迫形势,提出铂开采、进口、使用、回收的可持续性发展建议。

1 研究方法

1.1 系统边界

物质流分析(SFA)是评估特定系统内物质流量和存量变化的主流研究方法,这种方法遵循质量

守恒的原则,跟踪一种物质在其整个生命周期中的轨迹,从中发现人类活动、技术进步和环境变化等体现的驱动力。许多矿产和战略金属资源都用到SFA的研究手段,如铜、铝、锌、铁,这些研究包括全球层面、国家层面、区域层面等不同尺度的人为物质循环,并通过设置情景分析预测未来需求。本研究的空间边界是中国大陆(由于数据的可获取性,不包括香港、澳门和台湾),时间边界定义为2016—2020年,铂的主要生命周期阶段包括:铂的开采和冶炼、将铂加工制造成不同产品、不同产品的使用、产品使用后的铂的废物管理(图1)。

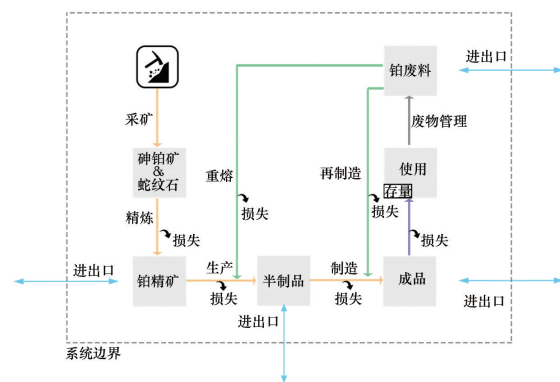


图1 中国铂流动的系统边界

1.2 数据来源

中国铂矿储量和回收量的数据通过购买CBC (China Bulk Commodity)金属网的数据获得,中国每年含铂产品的铂进出口量数据来源是海关总署,2016年中国含铂产品的进出口量数据来源也是CBC金属网,铂在各个领域的消费量数据来源为庄信万丰公司,汽车保有量和汽车销量数据从国家统计局和中国汽车工业协会每年发布的《中国统计年鉴》和《中国汽车工业年鉴》获得,详细数据如表1所示。

1.3 铂在汽车领域报废量的核算

汽车领域铂每年的报废量可以根据产品的寿命进行计算,汽车中的产品寿命大多服从Weibull分布,因此本研究使用双参数Weibull分布进行报废量的评估。双参数Weibull分布的概率密度函数 $f(t)$ 和累积分布函数 $F(t)$ 表达式为

表1 2016—2020年中国铂矿储量、回收量、进出口量及消费量

年份	储量/t	回收量/t	进口量/t	出口量/t	消费量/t								
					汽车	化工	首饰	玻璃	电子	医疗	石油	其他	合计
2016	198.4	15.6	114.9	19.7	4.7	3.8	47	4.2	1.3	0.6	2.4	2.2	66.2
2017	198.3	13.2	63.8	19.8	4.9	2.3	45.7	3.5	1.4	0.6	3.7	2.6	64.7
2018	217.7	11.8	83.3	16.6	4.5	6.4	40.9	12.1	1.6	0.9	7.9	2.7	77.0
2019	218.2	11.8	73.0	25.6	4.4	8.2	34.8	9.1	1.5	0.9	5.0	2.5	66.4
2020	126.7	10.0	89.7	26.3	6.4	9.0	29.4	10.5	1.6	0.9	6.5	2.2	66.5

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

式中, t 为产品投入使用的年限, β 为 Weibull 分布的形状参数; η 为标度参数, $t \geq 0, \beta > 0$ 。

参数的估计表达式为

$$\left(\frac{T_{\text{average}}}{T_{\text{max}}}\right)^\beta = \frac{\beta - 1}{-\beta \ln 0.01} \quad (3)$$

$$\eta = T_{\text{average}} \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

式中, T_{average} 为汽车催化剂寿命的平均使用年限, 对应 Weibull 概率密度函数曲线的中值点, 也是函数最大概率密度点; T_{max} 为催化剂的最长寿命年限, 通常指 99% 的汽车报废时的年限^[12]。

根据张安迎等^[13]的研究可知, 中国汽车报废的平均年限为 9 a, 最长报废年限为 15 a, $T_{\text{average}} = 9, T_{\text{max}} = 15$, 代入式(3)、式(4)可以估计出 Weibull 分布的形状参数 $\beta = 3.623$, 函数呈负偏态分布, 标度参数 $\eta = 9.839$ 。将汽车报废的年份定义为“ t ”, 则本研究中, $f(t)$ 指的是汽车在第 t 年报废的概率, $F(t)$ 指的是第 t 年累计报废汽车产生率, 因此, 第 t 年的报废汽车产生率 $F'(t)$ 为

$$F'(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-1}{\eta}\right)^\beta\right] - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (5)$$

将第 t 年产生的报废汽车量定义为 $P(t)$, 用 $T(n)$ 表示第 n 年汽车的销售量, 第 t 年产生的报废汽车量的推导过程为

$$\begin{cases} P(1) = T(0) \cdot F'(1) \\ P(2) = T(0) \cdot F'(2) + T(1) \cdot F'(1) \\ P(3) = T(0) \cdot F'(3) + T(1) \cdot F'(2) + T(2) \cdot F'(1) \\ P(t) = \sum_{k=0}^{t-1} T(k) F'(t-k) \\ = \sum_{k=0}^t T(k) F'(t-k), F'(0) = c \end{cases} \quad (6)$$

1.4 部门消费法

通过研究铂的消费规律, 发现铂的消费规律并不遵循传统的人均消费量与人均国内生产总值(GDP)之间的“S”形规律, 也不符合单位 GDP 消费量与人均 GDP 之间的倒“U”形规律^[14-15]。但是铂在一些领域的消费量远大于其他产业, 首饰和汽车是铂消费量最大的 2 个产业, 因此, 以部门消费法为思路, 选取了铂消费量第二大产业——汽车行业, 进行该领域铂资源报废量和库存量的评估。未选择消费量最大的产业首饰行业的原因是铂制首饰的寿命较长, 远远大于本研究所选取的时间跨度 5 a, 这 5 a 间生产的铂制首饰大部分仍在在使用, 每年因折旧报废的铂制首饰废料较少, 因此在本研究中忽略。

2 结果

2.1 中国铂物质流分析结果

图 2 显示了中国在 2016—2020 年整个生命周期中的铂流量。从图 2 可以看到中国铂矿的可用储量从 2016 年的 198.4 t 减少到 2020 年的 126.7 t, 年平均减少率为 10.6%。选矿过程后的铂精矿产

量从2016年的2.9 t减少到2020年的2.5 t,且这部分精矿属于低品位铂。随着科学技术水平的发展,各个产业对铂的需求急剧增长,2016—2020年中国铂消费总量从66.2 t增长至77.0 t,远大于中国

的铂产量。因此中国高度依赖从国外进口高品位的铂资源,进口依赖度从2016年的73.3%增加到2020年的83.8%,表明潜在的供应风险。

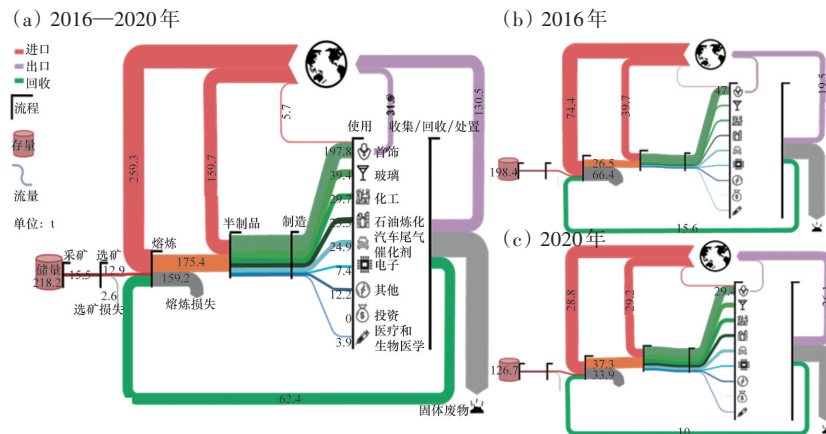


图2 中国铂金属的物质流分析

从行业角度来看,对含铂产品的需求主要来自首饰、汽车催化剂、化工、玻璃制造和石油炼化行业,其中首饰行业的需求量从2016年的71.0%下降到2020年的44.2%。1998—2017年,首饰一直是中国铂消费的主要市场,占铂消费量的70%以上。但从2018年开始,这一比例开始小于60%,表明中国铂在除首饰之外的行业领域应用逐年升高,玻璃制造、化工、石油炼化、汽车尾气催化剂等领域逐渐成为刺激铂消费增长的主要驱动力。铂在高新技术方面也有重要的应用,如生物工程、航天、信息技术、激光、自动化技术、军事等领域。目前中国对于铂的回收处理体系不完善,每年只有十几吨的铂得到了回收^[7,13],部分铂废料出口到了其他国家,大部分铂被丢弃到环境中,成为固体废物。其中有一些废料被非正规的作坊和用户拾取进行处理再利用,而其对废料处理的技术和设备落后,回收效率较低。

2.2 铂在汽车领域的报废量和库存量

自1970年至今,汽车领域是铂累计消费最大的行业^[16]。在普通的原厂汽车三元催化器中,每个催化器中会含有0~1 g的铂,具体质量会因制造商和型号而异。取0.5 g为每个汽车催化器中铂的质

量,则铂在汽车领域的报废量 $Q(t)=0.5P(t)$ 。第 t 年铂在汽车产业中的库存变化流量 $R(t)$ 可以从第 t 年产品的汽车总投入量和第 t 年的报废汽车产生量之间的差额计算出来,如式(7)所示。铂在汽车领域各个年份的库存量是根据不同年份的汽车保有量数据乘汽车催化器中的铂含量来估算的,汽车领域铂的报废量、库存变化量和库存量的计算结果如图3所示。

$$R(t) = 0.5 [T(t) - P(t)] \quad (7)$$

从图3可以看到2016—2020年间汽车领域铂的报废量、库存量是逐年递增的,库存变化量在这5 a也均为正值。虽然2016—2020年间汽车的报废量不断增加,但汽车销量的增长速度远远大于汽车报废的速度,使得应用在汽车尾气催化剂中的铂的库存量逐年递增。如果能将报废汽车中的铂加以回收利用,将在很大程度上改善汽车领域铂的自给率。

2.3 不确定性分析

使用蒙特卡洛模拟方法进行不确定性分析来验证结果是否可靠。输入参数的变异系数范围为2%~5%,由变异系数(CV)控制具体取值,若数据来源为官方统计口径,如本研究中不同年份汽车的销

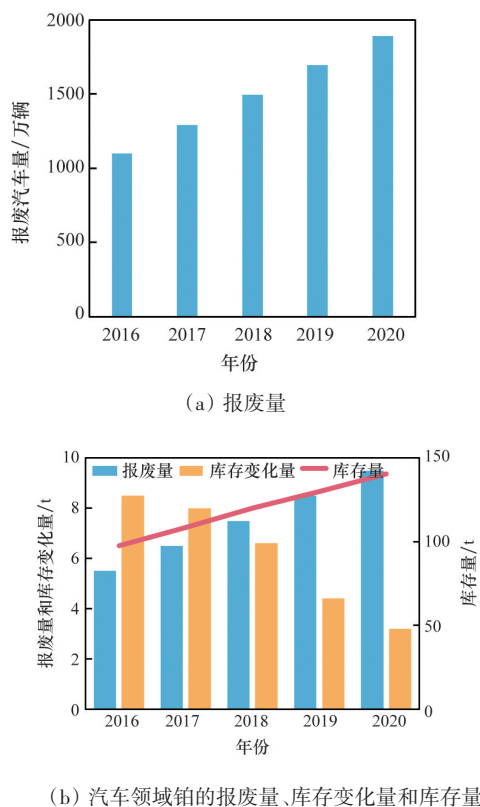


图3 2016—2020年中国汽车报废情况

售量、保有量等数据,它们的不确定性很低,不确定性系数取值为2%。不同汽车催化器中的铂质量在0~1 g,取0.5 g为最可能值,假设其服从三角分布。不确定性分析结果如图4所示,其中最值表示在假设报废量服从Weibull分布(位置取为0,形状参数 $\beta=3.623$,标度参数 $\eta=9.839$)、汽车销量服从正态分布(CV=2%)、不同汽车催化器中的铂含量服从三角分布(最小值为0 g,最大值为1.0 g,最可能值为0.5 g)的前提下运算10000次求出的铂的报废量的区间,取95%的置信区间,上述结果落在置信区间内(图4的蓝色区域内),表明假设是合理的。

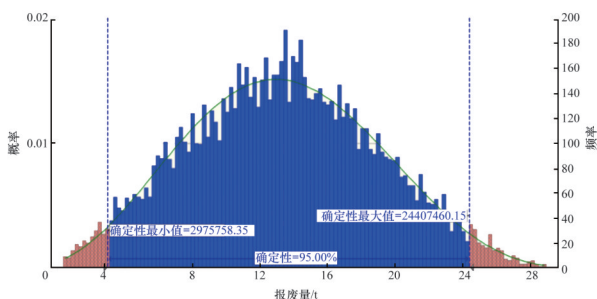


图4 不确定性分析结果

3 讨论

3.1 铂的部门需求和回收前景

中国的铂消费结构在2016—2020年期间经历了较明显的变化(图5)。首饰行业的铂消费一直占据主导地位,从2018年开始,玻璃行业的铂消费量在近20年来首次出现大幅上升。在“双碳”目标背景下,铂在氢能和燃料电池的应用方面对于实现碳达峰、碳中和的目标有着关键作用,具体表现在工业和新能源领域。铂能够催化氢气,使得氢在工业和交通领域发挥重要作用,特别是能够实现脱碳的效果,是氢能领域不可或缺的催化剂^[17-18]。

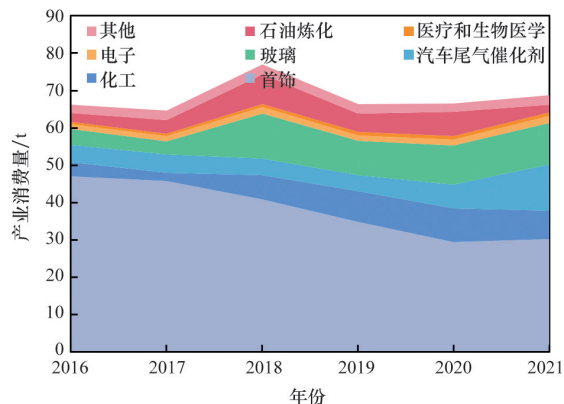


图5 中国2016—2020年铂的消费结构

从资源循环利用方面来说,汽车排气管中的含铂催化器是除冶金行业之外的所有行业中最适合回收二次利用铂的产业,中国每年会生产和进口大量的混合动力汽车、运动型多用途汽车(SUV)和皮卡车,这些车有的配备了2个催化转化器,方便进入汽车底盘,且混合动力汽车的废气排放低于一般内燃机的汽车,当发动机老旧达到报废之后,其中镶嵌的催化剂品质较高。因此如果中国注重并加紧对汽车排气管中的三元催化器进行回收,不仅可以提高铂的回收利用率,也在一定程度上节约经济价值,减少中国铂的对外进口依赖度。

目前中国报废汽车催化器中的铂负载主要有2种处理方式,一种是拆解再加工,用于二次供应^[19],另一种是焚烧、填埋消失在环境中。根据Nassar^[20]对铂族金属的流量和存量估计结果,由于

缺乏完善的回收措施,中国大部分报废的汽车尾气催化剂未进入合适的废物管理系统,使得这部分铂被焚烧、填埋或丢失在环境中,导致重金属污染。因此,中国也开始逐步发展汽车尾气催化剂中金属铂的回收技术,包括火法富集、湿法富集和火法-湿法联用富集技术,其中火法富集技术包括金属(铜)捕集法和氯化气相挥发法^[21]。火法富集技术对铂的回收率高且能处理的量大,国外一些国家已开始运用火法富集技术对铂进行回收,但具体内容对外保密,使得中国关于铜捕集技术方面的研究刚刚起步;湿法富集技术简单且成本低廉,但存在金属回收率低、产生废水废气等问题;火法-湿法联用技术继承了火法和湿法富集的优点,能够从成分结构复杂的催化剂中回收金属铂,但不可避免的是工艺的复杂性,在实际生活中应该综合考虑选择恰当的工艺进行回收。

3.2 政策建议

以上研究结果表明,中国为实现资源的可持续利用,需要改进含铂产品的废物管理体系,提出以下政策建议。

1) 大力研发并推广含铂废料的回收技术。需要与生产企业合作,鼓励厂内自设回收技术,从源头提高铂的回收利用率。同时在消费末端的废物处理部门设立专门的金属回收环节,减少直接进入焚烧厂和填埋场的废料量。特别是注重并加紧对汽车排气管中三元催化器的回收拆解再利用。

2) 制定全国性的废品收集和回收标准,采用经济手段促进企业回收。甘肃、云南、四川是铂的主要产地,因此这些地区也是产生含铂废料最多的地方。目前除了冶金厂外,铂废料的收集和回收并没有得到高度重视,大部分收集和回收工作由非正规的拾荒者和拆解者进行处理,由于这些人并没有专业的设备,落后的回收技术使得回收的产品质量不高,回收率偏低^[22]。还有一部分含铂废料(铂含量约3%)直接出口国外,引起一定的损失;大部分铂制废品被焚烧和填埋,导致了二次污染和资源损失。因此,中国应制定全国性的废品收集和回收标准,提升含铂废料的收集水平,加强相关回收政策和标准的执行力度,以便能够逐步淘汰低效的回收

操作。

3) 与铂出口国建立合作关系,提升探勘力度寻找国内潜在的铂矿。中国铂资源高度依赖进口表明该资源较容易受到地缘政治因素的影响,因此中国应与铂主要出口国建立长久稳定的合作关系,鼓励企业从政治和经济形势稳定的国家购买高品位铂矿,从而使这些原材料能够稳固地供应给中国。同时应进一步勘探中国的铂资源,寻找高品位的铂矿,从开采方面缓解铂的高进口依赖度。国内铂矿区位于西部地区,地势规模复杂,且规模较小,大部分铂作为铜镍硫化物矿床的伴生元素得到,据研究估计未来中国主要的铂矿产地依旧是甘肃铜镍硫化物型矿床,限制了铂的大规模开发。因此要研发相关勘探和开采技术,提高铂自产自销的能力和将铂从主矿产品分离的选矿率。目前中国熔炼损失较多,如何减少冶炼过程中的损失量也是未来需要努力攻克的方向。

4) 此外,可以加强能力建设,让整个铂流量中涉及到的所有利益相关者更好地理解提高铂资源效率的重要性,共同探索回收潜力。例如,建立铂信息统计平台,收集共享和铂有关的信息、技术、数据、专业知识等。目前中国在铂领域的相关信息不健全,在矿产资源报告中铂族金属只有一个总储量的记录,且数据在部分年份会缺失,可以借鉴庄信万丰公司编写年报等方式,提高信息的透明度,帮助企业及时了解中国金属铂的有关信息,提高运营效率。

4 结论

构建了铂动态物质流分析模型,对2016—2020年期间中国铂的人为流动和社会库存进行了定量评估。通过部门消费法选取汽车行业作为铂的重点使用产业,运用Weibull寿命分布对铂的报废量进行评估,得到如下主要结论。

1) 中国铂产量少且品位低。2016—2020年间铂矿的可用储量从2016年的198.4 t减少到2020年的126.7 t,铂产量从3.5 t下降到每年开采3.0 t,全国铂平均品位仅为0.341 g/t,属于低品位。各个

产业对铂的消费量却在逐年增长,从 66.2 t 增长至 77.0 t。因此中国高度依赖进口的铂资源,进口依赖度从 2016 年的 73.3% 增加到 2020 年的 83.8%,表明潜在的供应风险。

2) 从行业角度来看,消费需求最高的产业是首饰行业,占消费量的 70% 以上。汽车行业铂的使用存量从 2016 年的 97.5 t 增长到 2020 年的 140.5 t,报废量从每年 5.5 t 增长到 9.5 t。根据逐年增长的汽车保有量可以推断,未来中国会面临有大量报废汽车尾气催化器需要处理的局面,其中的金属资源回收潜力巨大。

3) 中国对于含铂废品的回收不足,废料处理的技术和设备落后,每年只有十几吨的铂得到了回收;目前中国的铂回收主要来自冶金行业在冶炼过程中产生的阳极泥、尾矿和催化剂中进行回收。因此对含铂催化器使用后的回收管理技术进行改进,可以有效减少弃置到环境中的铂废料。

参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告. 2021 [M]. 北京: 地质出版社, 2021.
- [2] 王怀国, 史文方, 聂祥仁, 等. 中国稀贵金属材料技术发展[J]. 科技导报, 2016, 34(17): 33-41.
- [3] 张若然, 陈其慎, 柳群义, 等. 全球主要铂族金属需求预测及供需形势分析[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 1018-1029.
- [4] 李鹏远, 周平, 齐亚彬, 等. 中国主要铂族金属供需预测及对策建议[J]. 地质通报, 2017, 36(4): 676-683.
- [5] 张莓. 世界铂族金属矿产资源及开发[J]. 矿产勘查, 2010, 1(2): 114-121.
- [6] Rasmussen K D, Wenzel H, Bangs C, et al. Platinum demand and potential bottlenecks in the global green transition: A dynamic material flow analysis[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(19): 11541-11551.
- [7] Hao H, Geng Y, Tate J E, et al. Securing platinum-group metals for transport low-carbon transition[J]. *One Earth* 2019, 1 (1): 117-125.
- [8] Alonso E, Field F R, Kirchain R E. Platinum availability for future automotive technologies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(23): 12986-12993.
- [9] 李欣萍, 王宇. 量化追踪 2011-2020 年中国大陆铂物质流: 洞察贸易、使用及潜在需求[J]. 市场周刊·理论版, 2021(50): 0118-0120.
- [10] Wilburn D R, Bleiwass D I. Platinum-group metals-world supply and demand[R]. Virginia: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey, 2017.
- [11] Wilburn D R. Global exploration and production capacity for platinum-group metals from 1995 through 2015 [R]. Virginia: U.S. Geological Survey, 2012.
- [12] 刘光富, 林锦灿, 田婷婷. 新能源汽车动力电池报废量估算和资源潜力分析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(1): 96-99.
- [13] 张安迎, 童昕, 曾现来. 中国报废汽车中铂族金属回收潜力估算[J]. 中国环境科学, 2020, 40(11): 4821-4830.
- [14] 王安建, 王高尚, 张建华. 矿产资源与国家经济发展 [M]. 北京: 地震出版社, 2002.
- [15] 王高尚, 韩梅. 中国重要矿产资源的需求预测[J]. 地球学报, 2002(6): 483-490.
- [16] Tong X, Dai H, Lu P, et al. Saving global platinum demand while achieving carbon neutrality in the passenger transport sector: Linking material flow analysis with integrated assessment model[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 179: 106110.
- [17] Sovacool B K, Ali S H, Bazilian M. et al. Mulvaney, D. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future [J]. *Science* 2020, 367(6473): 30-33.
- [18] Murakami S, Shimizu K, Tokoro C, et al. Role of resource circularity in carbon neutrality[J]. *Sustainability* 2022, 14 (24): 16408.
- [19] Xun D, Hao H, Sun X, et al. End-of-life recycling rates of platinum group metals in the automotive industry: Insight into regional disparities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 266: 121942.
- [20] Nassar N T. Global stocks and flows, losses, and recoveries of platinum-group elements [D]. New Haven: Yale University. 2015.
- [21] 薛虎, 董海刚, 赵家春, 等. 从失效汽车尾气催化器中回收铂族金属研究进展[J]. 贵金属, 2019, 40(3): 76-83.
- [22] Dong H, Zhao J, Chen J, et al. Recovery of platinum group metals from spent catalysts: A review[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 145: 108-113.

Material substance flow analysis of platinum in China

LIU Sijie^{1,2}, LI Jinhui¹, GENG Yong², ZENG Xianlai^{1*}

1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract As a primary mineral product, platinum is an important strategic mineral in China, which is mainly used in the fields of automobile, jewelry, and chemical industry. In this study, a dynamic material flow analysis model of platinum in China for the period of 2016–2020 was constructed to quantitatively assess the anthropogenic flow and social inventory of platinum. Then the automotive industry was selected based upon the sectoral consumption approach to measure the end-of-life of platinum, and policy recommendations were made for the sustainable development and resource management of platinum based upon the findings. We found that: (1) China's platinum minerals are small and of low grade, and the available reserves and production of platinum ores are declining, with the national average grade of platinum being only 0.341 g/t; (2) the consumption and import dependence of platinum is largely increasing year by year, with the jewelry industry being the industry with the highest demand, and the stock and scrap of platinum in the automotive industry is also growing dramatically. All these findings indicate that we should explore new high-grade platinum mines and enter cooperative relationships with major platinum exporting countries; and that the future recycling potential in China is tremendous, while the improvement of the collection system of platinum-containing products after consumption can enhance the recycling of secondary resources to effectively recover platinum scrap, thus reduce the import dependence and well foster the sustainable use of platinum.

Keywords platinum; material flow analysis; recycling; end-of-life volume ●



(责任编辑 刘志远)