

# 铁捕集富集料中铂族金属的深度富集技术

何啟濤<sup>1</sup>, 趙雨<sup>2</sup>, 張純熹<sup>1</sup>, 趙家春<sup>1</sup>, 白向林<sup>1</sup>, 董海剛<sup>1\*</sup>  
(1. 昆明貴金屬研究所, 昆明 650106; 2. 貴研資源(易門)有限公司, 雲南 玉溪 651100)

**摘要:** 铁捕集法从二次资源中回收铂族金属的工艺已经得到了工业化应用, 捕集过程在电炉或等离子炉中进行。等离子炉熔炼富集物硅含量高, 导致其结构致密、惰性、耐腐蚀, 需要先除硅才能获得高的溶解率, 除硅技术主要有碱融溶-浸出法、氧化分离法等; 电炉熔炼富集物硬度极高、难以破碎, 工艺上采用高压雾化-酸溶、碎化-酸溶、电解等工艺进行深度富集。本文综述了含铂族金属铁合金深度富集技术的研究现状, 并对主要技术存在的优缺点进行了评述。随着各行业对铂族金属需求量的增加, 对铂族金属回收率的要求将越来越高, 因此, 还需进一步完善铂族金属回收技术, 提高铂族金属回收率。

**关键词:** 铂族金属; 铁捕集; 含 PGMs 铁合金; 富集

**中图分类号:** TF837 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2024)01-0090-06

## Deep enrichment technology of platinum group metals in iron collector

HE Qitao<sup>1</sup>, ZHAO Yu<sup>2</sup>, ZHANG Chunxi<sup>1</sup>, ZHAO Jiachun<sup>1</sup>, BAI Xianglin<sup>1</sup>, DONG Haigang<sup>1\*</sup>

(1. Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650016, China;

2. Sino-Platinum Metals Resources (Yimen) Co. Ltd., Yuxi 651100, Yunnan, China)

**Abstract:** The process of iron trapping has been used in industry to recover platinum group metals from secondary resources, and the trapping process is carried out in electric furnace or plasma furnace. The concentrates obtained from plasma melting have high concentrations of silicon, leading to the formation of dense, inert and corrosion-resistant iron alloy. It is necessary to remove silicon first to facilitate the following dissolution process. The main silicon removal technologies include alkali melt solution-leaching method and oxidation-separation method. The enrichment material produced from electric furnace smelting has high hardness and is difficult to be broken, and high pressure atomization-acid dissolution, fragmentation-acid dissolution, electrolysis or other processes are adopted for deep enrichment. In this paper, the research status of deep enrichment technology of platinum group metal-containing ferroalloy has been reviewed, focusing on the comparison in the advantages and disadvantages of the main technologies. With the increasing demand for platinum group metals in various industries, greater recovery rate will be required. Therefore, it is important to further improve the present recovery technology.

**Key words:** platinum group metals; iron collection; ferroalloy containing PGMs; enrichment

铂族金属(PGMs)理化性能独特且优越, 广泛应用于航空航天、石油化工、汽车催化、珠宝等行业<sup>[1-3]</sup>。我国铂族金属资源占全球储量 0.58%, 但消费量却

占世界消费总量的 30%, 存在着严重的供需矛盾, 因此急需从二次资源中回收 PGMs<sup>[4-6]</sup>。金属捕集法是从二次资源中回收 PGMs 的主流技术, 常采用的

收稿日期: 2023-02-01

基金项目: 云南省科技项目(202102AB080007)

第一作者: 何啟濤, 男, 硕士研究生; 研究方向: 贵金属冶金; E-mail: hqt1070@163.com

\*通讯作者: 董海剛, 男, 博士, 研究员; 研究方向: 稀贵金属冶金; E-mail: donghaigang0404@126.com

捕集剂有铁、铜、铅、镍等，其中铁因廉价易得、污染小而被许多知名贵金属公司广泛应用，如日本 Tanaka 公司、英国 Johnson-Matthey 公司、贵研资源(易门)有限公司等<sup>[7-9]</sup>，捕集所得含铂族金属铁合金需进行深度富集以提高其品位。

## 1 含铂族金属铁合金性质

铁捕集法利用铁与废催化剂中 PGMs 间的亲和力形成铁基 PGMs 合金，载体造渣除去实现 PGMs 的富集，捕集过程中将废催化剂、造渣剂、还原剂等破碎混匀放入电炉或等离子炉中进行熔炼，工艺流程如图 1 所示。

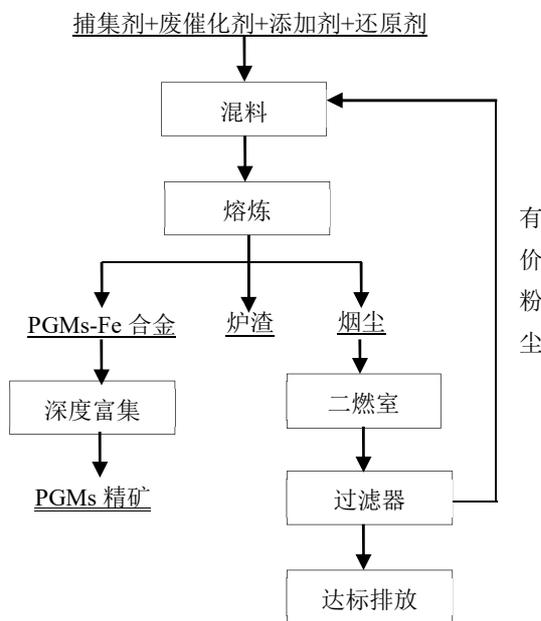


图 1 铁捕集铂族金属工艺流程

Fig.1 Process flow of iron trapping platinum group metals

电炉熔炼温度 1350~1600 °C，通过配料获得高流动性、低粘度的熔渣，促进渣金分离，提高 PGMs 回收率，熔炼所得合金相含铁约 90%、PGMs 0.3%~2%、Si 0.3%~1%，物相组成简单、易于酸溶除铁进行深度富集，但其硬度较大，难以破碎，工业上常采用雾化喷粉、球磨、碎化等方式进行制粉。

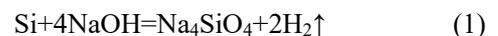
等离子炉熔炼温度高于 1600 °C，高温促使载体直接熔化释放出 PGMs 进入铁液中被富集，载体中的 SiO<sub>2</sub> 也因高温还原为单质 Si 进入铁液中，少量 C、P、Mg、Al 等杂质元素也会进入其中<sup>[10-11]</sup>，各元素发生微量多元合金化行为，形成结构致密、硬

度极高的含 PGMs 硅铁合金<sup>[12]</sup>；富集物含 PGMs 2%~7%、含 Si 6%以上；其次，该富集料还极其惰性且耐腐蚀，这是由于形成了 Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>Si、FeSi<sub>3</sub>P 等惰性组分，硅在铁基合金中是耐蚀的重要元素，硅的存在能生成致密的 SiO<sub>2</sub> 钝化膜，随硅含量的增加，这种钝化膜愈发致密和完整，致使合金相耐蚀性提高<sup>[13]</sup>。日本曾向美国购买等离子熔炼铁捕集富集料进行研究，最后因技术原因而放弃，国际上只有庄信万丰(Johnson Matthey)公司能处理该合金物料<sup>[14]</sup>。国内则对其研究较少，20 世纪末期我国学者对美国 Mascat Inc 公司等离子炉产生的铁合金富集料进行了物相分析，结果表明主体物相为以铁为基含 PGMs 的合金固溶体相、铂钯固溶体相和硅化物相等，各相中都赋存有 PGMs<sup>[15-16]</sup>。

铁富集料中 PGMs 的深度富集关键在于打开硅、铁等杂质元素对 PGMs 的包裹，释放出 PGMs 以便于后续分离提纯，以下将详细阐述处理铁合金富集料的各种方法。

## 2 碱熔融-浸出法

碱熔融-浸出法是以 NaNO<sub>3</sub>、NaOH 等熔点低，碱性强的钠盐作为添加剂，一定温度下钠盐熔化和铁富集料充分反应，破坏其耐酸碱、致密的硅铁合金相结构，使其转变为易于溶解的钠盐。焙烧产物酸溶除铁，过滤分离得到反应活性很高的含铂族金属不溶渣，之后采用盐酸+氧化剂溶解使其转入溶液，便于后续的分选提纯。Dong 等<sup>[17]</sup>以 NaOH 焙烧-水浸-酸溶工艺处理等离子炉熔炼铁捕集富集物，工艺流程如图 2 所示。焙烧过程发生如下反应：



由上述反应可看出硅经碱焙烧转化为可溶性的 Na<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> 胶体，经热水浸出除去，避免影响后续的液固分离，铁转化生成 NaFeO<sub>2</sub> 采用稀硫酸能轻易溶解，通过上述工艺能差异化分离铁、硅，破坏铁硅合金相，实现 PGMs 的富集；经实验验证，在焙烧温度 600 °C、焙烧时间 2 h、碱料比 1.2，水浸温度 90 °C、时间 15 min，酸溶温度 90 °C、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浓度 104 g/L、液固比 15 条件下，PGMs 品位由 2.6% 提高至 23.4%，富集 9 倍；浸出过程中，约 0.68% PGMs 分散在浸出液，PGMs 总回收率 99.32%；酸浸渣活性很高，采用盐酸-氧化剂体系能轻易溶解转入溶液中进行分离提纯。该工艺条件温和、容易实施，但

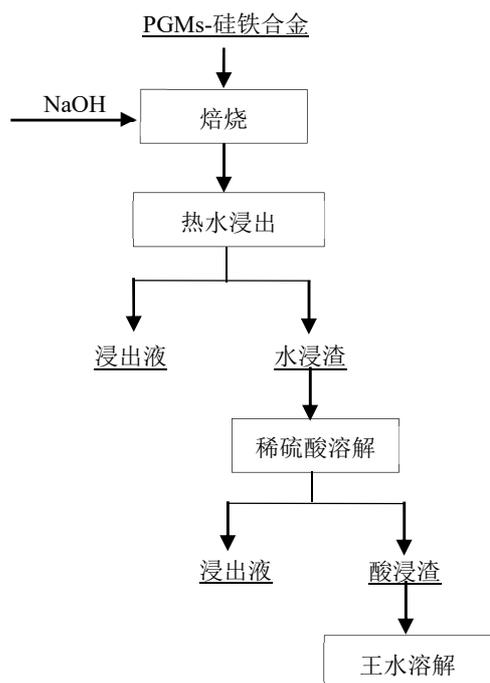


图 2 PGMs-硅铁合金碱焙烧-酸溶工艺流程图

Fig.2 Flow chart of alkaline roasting and acid dissolution of PGMs-ferrosilicon alloy

焙烧过程产生的硅酸钠胶体会造成水浸过程液固分离困难,且部分 PGMs 分散在酸浸出液中损失。专利[18]提出采用 NaOH+NaNO<sub>3</sub> 体系处理等离子熔炼失效汽车尾气催化剂所得铁合金,含 PGMs 5.68%,熔融盐与富集料反应使合金中稳定的 Fe-PGMs-Si-P 金属键被破坏,铂、钯、铑被 NaNO<sub>3</sub> 氧化生成不溶于水易于酸溶的 Na<sub>2</sub>PtO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>PdO<sub>3</sub>、Na<sub>3</sub>RhO<sub>3</sub>; 熔融物盐酸加热溶解,铂钯的溶解率大于 95%,铑溶解率大于 92%。此工艺有效缩短了工艺流程及生产周期,焙烧熟料单一酸既能溶解,避免强酸+氧化剂产生 Cl<sub>2</sub>、NO 等有毒气体,较为环保,但滤液成分复杂、离子浓度高,会导致铂钯铑难以分离提纯。陈景等[19]以美国进口等离子熔炼富集料为原料,含铁 55.41%、Si 8.73%; 实验通过浓硫酸浸煮物料,焙烧浸煮渣,焙烧产物碱融水洗,碱浸渣盐酸+氧化剂溶解,得贵金属富集液,后经铝粉+锌粉进行置换富集或采用传统溶剂萃取法进行分离提纯,该方法能使铂品位从 5.12%富集到 64.9%,钯从 0.953%富集到 10.4%,铑从 0.709 富集至 9.25%,实现了铂族金属的深度富集。该方法 PGMs 富集率高,设备投资低,操作简单,但回收周期长,难以实现工业化应用。文献[20]提到采用碱焙烧法破坏稳定致密的硅铁合金结构,该合金含硅 9.99%,经氢氧化钠

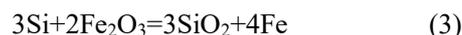
600 °C焙烧 2 h 后,水洗脱硅率 66.57%,有效破坏了铁、硅形成的致密合金结构,之后采用硫酸溶解,除铁率 99.24%,溶解效果好。

碱熔融-浸出法操作条件温和、回收效率高、能避免难处理元素的引入,但该方法辅料价格高昂,成本较高,溶解过程中会产生硅酸钠胶体,阻碍后续液固分离。

### 3 氧化分离法

富集料主要以铁、硅为主,PGMs 高度弥散分布在铁硅合金相中,分离除去铁、硅等元素即能使 PGMs 得以富集。常温下铁硅合金相性质稳定,表面结构致密,难以发生化学反应,高温熔融时合金中的硅能和氧化剂反应生成 SiO<sub>2</sub> 造渣除去,获得成分简单、易于酸溶的单质铁相,便于回收铂族金属。

贺小塘等[10]提出用高温熔炼脱硅工艺处理含 PGMs 铁合金,将富集料放入高频炉内升温至 1600~1800 °C使物料熔化,并向其中通入氧气吹炼,合金中的单质硅被氧化生成 SiO<sub>2</sub> 除去,脱硅物料 PGMs 含量 4%~7%,富集比大于 30 倍,回收率大于 97%。该工艺流程简单、废物排放量少,熔炼所得富集料成分简单;但存在熔炼温度高、吹氧难度大、存在一定安全隐患等问题。李勇等[21]以含 PGMs 5%、Si 9.5%~11%的铁硅合金为原料,向其中加入氧化剂 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和造渣剂 CaO 与合金相中的硅造渣除去,反应为:



经实验探究得到最优条件:Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为理论用量的 1.4 倍,CaO 用量为原料量的 20%,在 1600 °C熔炼 2 h,硅含量由 10%降低至 0.5%,去除率 95%,经过脱硅预处理后物料主体为易被酸溶的单质铁,有利于后续酸溶除铁和精炼工序的进行。该工艺采用氧化铁作为氧化剂,能避免吹氧熔炼过程中的喷溅问题,但氧化铁的加入会使得后续除铁酸用量增大。雷云等[22]还考虑到富集料中的磷及其他元素,将造渣精炼与真空精炼相结合对含铂族金属铁硅磷合金进行提纯,将合金料与造渣剂、氧化剂等混匀放入炉中在 1570 °C以上精炼除硅获得铁磷合金,之后升温熔化并控制真空度低于 0.005 Pa 除磷。此方法能使硅含量由 6.91%降低至 1%以下,磷含量降低至 1%~2%,Al、Mg、Ca 等杂质金属去除率 97%,实现难去除杂质的深度脱出;熔炼过程无废气产生,

精煉渣可循環利用，對環境友好；但該工藝設備投資高，產生渣量大。McCullough 等<sup>[23]</sup>針對富集料中主要成分為單質鐵的特性，採用造渣精煉-氧化吹煉技術相結合的方法處理 Mintek 公司的低硫鉑族金屬鐵合金。將造渣劑(CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)和鐵富集料按比例混勻放入電弧爐中，升溫至 1600 °C 進行吹氧熔煉，使鐵氧化進入熔渣中，實現鐵與鉑族金屬的分离，鐵去除率 80% 左右；該方法減少了後續溶解所需的酸用量，但會產生大量爐渣。

氧化分離法能同時降低富集料中鐵、硅、磷等多種雜質元素的含量，有效解決了鐵合金富集料結構複雜、耐腐蝕等性質，後續溶解過程不會產生粘稠物質，固液分離方便。但在熔煉過程中會發生 PGMs 的夾雜損失且熔煉溫度高，操作难度大，對設備要求高。

#### 4 溶解分離法

該方法主要針對電爐熔煉所得鐵合金富集物。PGMs 對酸的化學穩定性遠高於鐵，而鐵屬於中等活潑金屬，能溶于稀酸，利用該差異，採用酸溶解破壞鐵合金富集料中的金屬鍵，使捕集劑鐵以離子狀態轉入溶液中，化學惰性的鉑族金屬不溶而富集在渣中，從而實現 PGMs 的深度富集。

童偉鋒等<sup>[24]</sup>採用硫酸溶解電爐熔煉鐵捕集廢汽車尾氣催化劑所得含 PGMs 鐵合金，合金塊通過高频感應爐熔煉-高压雾化制成粉體，物料含鐵 96.16%、PGMs 0.3%，除去鐵相既能使鉑族金屬得以富集。實驗採用兩段逆流工藝浸出除鐵，一段浸出溫度為常溫，硫酸濃度 1.7~1.8 mol/L，固液比 1:10，反應時間 0.5 h，二段浸出溫度 75 °C，硫酸濃度 2 mol/L，固液比 1:50 下浸出 4 h，此條件下 PGMs 富集 70.6 倍，品位達 21.18%，回收率 99.8%。該方法條件溫和，酸濃度低，鉑族金屬富集率高，但工藝流程較長，浸出過程浸出液多，容易造成鉑族金屬分散損失。丁雲集等<sup>[25]</sup>針對電爐熔煉鐵富集物硬度高，難以破碎的特性，提出鋅碎化-酸解工藝，碎化過程主要由於合金中碳化物氧化形成裂縫以及鋅蒸汽在裂縫中氧化生成氧化鋅致使內應力增大而破碎。在空氣氣氛下，Fe-PGMs 合金與鋅質量比為 4:1、碎化溫度 1300 °C、時間 2 h 條件下，實現了 Fe-PGMs 合金完全碎化，碎化產物主要為 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>，以及少量的 FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>，在 HCl 濃度 6.0 mol/L、固液比 1:20 酸解溫度 70 °C、時間 2 h 條件

下溶解，溶解率 97.87%，不溶渣採用王水溶解將 PGMs 轉入溶液，PGMs 總浸出率 99%，實現了 Fe-PGMs 合金高效碎化溶解。該工藝綠色環保，易于操作，但碎化過程引入了鋅，增加了後續溶解所需酸用量，溶解產生的濾液 PGMs 含量較低，不利于分离提純。吳喜龍等<sup>[26]</sup>以 HCl 溶解等離子體熔煉鐵捕集堇青石型廢催化劑所得富集料，物料含硅 10%~15%，在粉末粒度 180 μm，溫度 75 °C，鹽酸濃度 6 mol/L 的條件下，粗溶除鐵率約 50%，溶解過程中鉑鈾銻少量分散于溶液中；之後採用鹽酸+氯酸鈉氧化浸出鉑鈾銻，在液固比 10:1、浸出溫度 80 °C、浸出時間 2 h、鹽酸濃度 6.0 mol/L、氯酸鈉與鐵合金質量比 1:1 的條件下，鉑、鈾、銻的浸出率分別為 57%、62%、25%。Fe-PGMs 合金中硅含量的上升致使其耐腐蝕性增強，導致鉑族金屬浸出率低，難以溶解。

溶解分离过程在酸性介质中进行，试剂消耗量小、浸出液成分相对简单，工业应用前景良好，但該法不適合于等離子體熔煉所得高硅鐵合金的處理，合金中硅含量過高時，需要先分离除硅，再進行溶解分离除鐵，否則難以取得高的溶解率。

#### 5 其他方法

鉑、鈾、銻價電子層結構分別為 5d<sup>9</sup>6s<sup>1</sup>、4d<sup>10</sup>、4d<sup>8</sup>5s<sup>1</sup>，ns 軌道只有 1 個電子或沒有，價電子有從 ns 軌道躍遷到(n-1)d 電子層的強烈趨勢，最外層電子不易失去，導致鉑鈾銻化學性質極其穩定，而鐵則容易失去最外層電子發生氧化還原反應，可通過二者間穩定性的差異分离鐵及鉑族金屬。

中國專利[27]提出採用氧化銹蝕-重選分离法除鐵，採用稀酸+銨鹽混合體系促進鐵發生銹蝕反應，生成鐵氧化物，之後重選分离鉑族金屬，通過該方法能除去 85% 以上的鐵，避免了溶解法酸消耗量大，PGMs 易分散在酸溶液中造成損失的缺點。

電解法則是根據鉑鈾銻電位比鐵高的特點，將鐵合金富集物作為陽極，惰性材料作為陰極構成一個電解裝置，電解過程中，陽極鐵遷移到陰極板，惰性鉑族金屬富集在陽極泥中，實現了鐵和 PGMs 的分离。文獻[28-29]中探究了含 PGMs 鐵合金電解的可能性，向煮沸除氧的水中加入硫酸亞鐵、表面覆蓋劑等作為電解液，將鐵合金富集物制作成一定厚度的陽極板，以石墨等惰性材料作為陰極板，以該體系來溶解鐵合金，電解後得到陰極純鐵和富

含铂族金属的阳极泥, 实现了铁和铂族金属的同时回收。

上述方法不耗酸, 无废液产生, 能同时回收捕集剂铁和 PGMs, 较为环保, 但目前研究相对较少, 还未实际应用于工业当中。

## 6 结语

从含 PGMs 二次资源中高效绿色回收 PGMs 是十分必要的, 国内外普遍采用火法熔炼-铁捕集技术进行熔炼富集。铁捕集富集料中 PGMs 的分离富集在于硅含量的高低, 当含硅量较高时, 重点在于除硅, 以破坏合金料的致密结构及耐蚀特性, 氧化分离法和碱焙烧法能有效达到该目的; 对于硅含量低的铁富集料, 溶解分离法、电解法等较为便捷环保。目前, 上述方法在生产周期、环境污染、PGMs 回收率等方面存在着一些问题, 实际生产中需根据原料的来源及性质进行方法选择, 实现环保高效的规模化生产。随着工业技术发展, 铂族金属需求量将会持续增高, 这将要求未来对铂族金属有较高的回收率, 甚至达到百分之百的回收, 今后还需进一步研发出更加高效简洁的回收技术, 以避免铂族金属分散损失, 实现铂族金属的高效循环利用。

## 参考文献:

- [1] HOSSEINZADEH F, RASTEGAR S O, ASHENGROPH M. Biorecovery of rare earth elements from spent automobile catalyst as pretreatment method to improve Pt and Pd recovery: Process optimization and kinetic study[J]. *Process Biochemistry*, 2021, 105.
- [2] CORTI C W. The evolution of platinum jewellery alloys: From the 1920s to the 2020s[J]. *Johnson Matthey Technology Review*, 2022, 64(4): 418-434.
- [3] 杨壮, 郭宇峰, 王帅, 等. 铂族金属二次资源火法回收技术现状及进展[J]. *贵金属*, 2022, 43(1): 76-85.  
YANG Z, GUO Y F, WANG S, et al. Status and progress of fire recovery technology for platinum group metals secondary resources[J]. *Precious Metals*, 2022, 43(1): 76-85.
- [4] WANG L, CHEN M. Policies and perspective on end-of-life vehicles in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 44: 168-176.
- [5] GUO J M, HE X T, WANG H. Reviews of metallurgical technology to recovery platinum group metals from secondary resource in china[J]. *Precious Metals*, 2012, 33(S1): 18-23.
- [6] 姬长征, 田孝光. 我国铂族金属产业现状及战略储备研究[J]. *中国有色金属*, 2022(9): 48-49.  
JI C Z, TIAN X G. Present situation and strategic reserves of platinum group metals industry in China[J]. *China Non-ferrous Metals*, 2022(9): 48-49.
- [7] 朱小平, 孙树臣, 涂赣峰, 等. 失效氧化铝载体催化剂中钯的铁捕集研究[J]. *贵金属*, 2021, 42(1): 1-6.  
ZHU X P, SUN S C, TU G F, et al. Recovery of palladium in spent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based catalyst by iron collecting[J]. *Precious Metals*, 2021, 42(1): 1-6.
- [8] GEORGIOS K, EFTHYMOS B, IOANNA G, et al. Behavior of platinum group metals during their pyrometallurgical recovery from spent automotive catalysts[J]. *Open Access Library Journal*, 2014, 1(5): 736.
- [9] 张福元, 张广安, 徐亮, 等. 火法 Bi 捕集废汽车催化剂中的 Pd、Pt、Rh[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(9): 2162-2170.  
ZHANG F Y, ZHANG G A, XU L, et al. Enrichment of Pd, Pt and Rh from spent automotive catalyst by pyrometallurgical bismuth capture[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(9): 2162-2170.
- [10] 贺小塘, 吴喜龙, 赵雨, 等. 等离子炉富集料回收铂族金属前的预处理方法: CN105603193A [P]. 2016-05-25.  
HE X T, WU X L, ZHAO Y, et al. Pretreatment method before recovery of platinum group metals from plasma furnace: CN105603193A [P]. 2016-05-25.
- [11] ZHENG H D, DING Y J, WEN Q, et al. Slag design and iron capture mechanism for recovering low-grade Pt, Pd, and Rh from leaching residue of spent auto-exhaust catalysts[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 802: 149830.
- [12] 马艳平, 郑友进, 郑世钊, 等. 高压下硅铁合金合成探究[J]. *黑龙江科技信息*, 2010(36): 10.  
MAY P, ZHENG Y J, ZHENG S Z, et al. Study on synthesis of ferrosilicon alloy under high pressure[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2010(36): 10.
- [13] 李具仓, 赵爱民, 王丽娜. 硅对铁基合金组织和耐蚀性能的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2006(10): 492-495.  
LI J C, ZHAO A M, WANG L N, et al. Effect of siligcon on microstructure and corrosion resistance of iron-base alloys [J]. *Corrosion & Protection*, 2006(10): 492-495.
- [14] 黄焜. 加压氰化法提取铂族金属新工艺研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.  
HUANG K. Research on extraction of platinum group metals by pressure cyanidation[D]. Kunming: Kunming

- University of Science and Technology, 2005.
- [15] 赵怀志. 铂族金属二次资源等离子体冶金产物的物相分析[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(2): 127-130.  
ZHAO H Z. Phase analysis of plasma metallurgical products from secondary resources of platinum group metals[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(2): 127-130.
- [16] 贺小塘, 李勇, 吴喜龙, 等. 等离子熔炼技术富集铂族金属工艺初探[J]. 贵金属, 2016, 37(1): 1-5.  
HE X T, LI Y, WU X L, et al. Study on the process of enrichment platinum group metals by plasma melting technology[J]. Precious Metals, 2016, 37(1): 1-5.
- [17] DONG H G, WU Y D, LI Y, et al. Concentrating PGM from a PGM-containing ferroalloy by a roast-leach process[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2021, 38(4): 1731-1738.
- [18] 贺小塘, 赵雨, 王欢, 等. 等离子熔炼富集料回收贵金属前的预处理方法: CN104073625A[P]. 2016-06-29.  
HE X T, ZHAO Y, WANG H, et al. Pretreatment method before recovering precious metal from plasma melting preconcentration: CN104073625A[P]. 2016-06-29.
- [19] 陈景, 陈奕然, 谢明进. 从熔炼捕集料中回收铂族金属的方法: CN101575674[P]. 2009-11-11.  
CHEN J, CHEN Y R, XIE M J. Method for recovery of platinum group metals from smelting and trapping aggregates: CN101575674[P]. 2009-11-11.
- [20] 徐志峰, 月日辉, 严康, 等. 复杂高硅钴白合金碱焙烧脱硅预处理[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(10): 2916-2923.  
XU Z F, YUE R H, YAN K, et al. Alkali-roasting and desilication pretreatment of refractory high-silicon cobalt white alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2916-2923.
- [21] 李勇, 刘文, 王欢, 等. 含铂族金属硅铁合金熔炼脱硅预处理工艺研究[J]. 贵金属, 2021, 42(2): 32-36.  
LI Y, LIU W, WANG H, et al. Study on the pretreatment process of smelting desilicization of Si-Fe alloy containing platinum group metals[J]. Precious Metals, 2021, 42(2): 32-36.
- [22] 雷云, 杨清源, 杨东方, 等. 一种从含铂族金属的铁硅磷合金中去除硅和磷的方法: CN113621869A[P]. 2022-06-21.  
LEI Y, YANG Q Y, YANG D F, et al. A method for removing silicon and phosphorus from iron-silicon-phosphorus alloys containing platinum group metals: CN113621869A[P]. 2022-06-21.
- [23] MCCULLOUGH S D, GELDENHUYS I, JONES R. Pyrometallurgical iron removal from a PGM-containing alloy [C]//3rd International Platinum Conference 'Platinum in Transformation', The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2008: 169-176.
- [24] 童伟锋, 董海刚, 吴晓峰, 等. 两段逆流浸出从铁捕集物中富集铂族金属的研究[J]. 贵金属, 2015, 36(1): 21-24.  
TONG W F, DONG H G, WU X F, et al. Study on enrichment of platinum group metals in iron-trapping material using two-stage countercurrent leaching[J]. Precious Metals, 2015, 36(1): 21-24.
- [25] 丁云集, 崔言杰, 张深根. 铁捕集铂族金属富集物的锌碎化-酸解原理及工艺研究[J]. 稀有金属, 2022, 46(1): 57-66.  
DING Y J, CUI Y J, ZHANG S G. Mechanism and process of zinc fragmentation-acid leaching of platinum group metals concentrates from iron capture method[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46(1): 57-66.
- [26] 吴喜龙, 贺小塘, 李红梅, 等. 含铂钨铈的铁合金富集物溶解试验研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(3): 52-54.  
WU X L, HE X T, LI H M, et al. Dissolution research of platinum, palladium and rhodium enriched ferroalloy[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(3): 52-54.
- [27] 董海刚, 陈家林, 吴跃东, 等. 一种从熔炼铁捕集物料中除铁富集铂族金属的方法: CN103184345A[P]. 2013-07-03.  
DONG H G, CHEN J L, WU Y D, et al. A method for iron removal and enrichment of platinum group metals from smelting iron trapping materials: CN103184345A[P]. 2013-07-03.
- [28] 张深根, 丁云集, 温泉. 一种 Fe-PGMs 合金电解回收铂族金属的方法: CN110656353A[P]. 2020-01-07.  
ZHANG S G, DING Y J, WEN Q. A method for electrolytic recovery of platinum group metals from Fe-PGMs alloy: CN110656353A[P]. 2020-01-07.
- [29] WEN Q, DING Y J, ZHENG H D, et al. Process and mechanism of electrolytic enrichment of PGMs from Fe-PGMs alloy[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 271: 122829.