

# 白钨矿分解工艺技术评价与发展方向展望<sup>①</sup>

李 军, 张秋江

(湖南柿竹园有色金属有限责任公司, 湖南 郴州 423037)

**摘 要:** 对白钨矿的湿法冶金分解工艺进行了概述, 对盐酸分解法、苏打烧结法、苏打压煮法、氢氧化钠分解法、氟盐分解法、硫磷混酸协同分解法、石灰烧结转化-碳铵分解法以及其他分解方法的优缺点进行了分析, 指出氟盐分解法、苏打压煮法、硫磷混酸协同分解法将逐步成为主流白钨矿分解工艺。

**关键词:** 钨; 钨冶金; 白钨矿; 分解; 氟盐分解法; 苏打压煮法; 硫磷混酸分解法

中图分类号: TF111

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.027

文章编号: 0253-6099(2023)06-0123-05

## Technical Evaluation and Development Prospect of Decomposition Technique of Scheelite

LI Jun, ZHANG Qiujiang

(Hunan Shizhuyuan Non-ferrous Metals Co Ltd, Chenzhou 423037, Hunan, China)

**Abstract:** Based on a summarization of decomposition techniques of scheelite by hydrometallurgical process, the advantages and disadvantages of several decomposition techniques, such as decomposition with hydrochloric acid, soda sintering, pressure boiling of soda, decomposition with sodium hydroxide, decomposition with fluorine salt, decomposition with mixture of sulfuric acid and phosphoric acid, as well as lime sintering conversion followed by decomposition with ammonium bicarbonate were all analyzed. It is concluded that those three techniques, including decomposition with fluorine salt, pressure boiling of soda and decomposition with mixture of sulfuric acid and phosphoric acid, will gradually become the mainstream decomposition techniques for scheelite.

**Key words:** tungsten; tungsten metallurgy; scheelite; decomposition; decomposition with fluorine salt; pressure boiling with soda; decomposition with mixture of sulfuric acid and phosphoric acid

目前可利用的钨资源以黑钨矿和白钨矿为主。我国从发现钨开始, 主要消耗的是黑钨矿, 其产量占钨总产量的90%以上。经过近百年的开采, 黑钨矿资源尤其是优质黑钨矿资源日渐枯竭。虽然我国近些年不断勘探发现钨矿资源, 但大多为难选冶的白钨矿。我国钨矿储量中, 白钨储量占全国钨储量的70%, 工业储量206.05万吨, 其中品位在0.4%以下的占85%。2010年以前, 钨冶炼基本以黑钨矿为原料, 而白钨精矿产量占比由2009年的38%增长至2018年的58%<sup>[1-3]</sup>。有效利用白钨矿资源是今后钨冶炼的趋势。

本文对白钨矿的主要分解工艺进行概述, 分析各分解工艺的优缺点, 以期研究开发新的绿色环保洁净的钨冶炼工艺奠定基础。

### 1 白钨矿分解工艺现状

白钨矿成分复杂且多为伴生矿, 除 $WO_3$ 外, 还有Mo、Mn、P、As、Si、Fe、Cu、S等杂质。从钨冶炼发展趋势来看, 钨冶金工业应从处理黑钨矿为主转为处理白钨矿为主, 从只能处理标准精矿转为既能处理标准精矿又能处理复杂的黑白钨混合次精矿甚至中矿。同时, 碱分解产生的钨渣中砷等重金属元素浸出毒性超标, 已被列入国家危险废物名录, 新的钨精矿分解工艺要由抑制杂质浸出转为强化重金属和钨同时浸出, 使重金属溶入溶液中集中回收处理, 以确保分解后的钨渣重金属元素浸出毒性不超标。

为实现上述转变, 同时考虑到我国钨冶金企业现

① 收稿日期: 2023-06-08

作者简介: 李 军(1980—), 男, 甘肃白银人, 硕士, 高级工程师, 主要从事钨选矿和冶炼方面研发与管理工作。

有的钨精矿分解技术主要是碱法工艺,一方面要求升级氢氧化钠分解法以实现处理复杂黑白钨混合矿或难选中矿,另一方面要求研究开发新的白钨矿分解工艺。近20年来,我国科技工作者在这方面做了许多开创性的工作,有些新工艺已在实际工业生产中得到应用。

## 2 白钨矿主要分解工艺

### 2.1 盐酸分解法

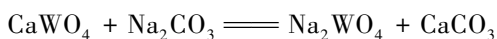
盐酸分解法<sup>[4]</sup>是处理白钨矿的经典方法。在60~80℃下,用浓盐酸先直接分解白钨矿生成粗钨酸,然后采用氨溶即可得到钨酸铵溶液。盐酸使用量为理论量的2.5~3.0倍时,白钨矿分解率可达99%。常温下盐酸与白钨矿反应的平衡常数达 $1 \times 10^4$ ,理论上反应能进行彻底,在动力学上阻止反应进行的主要原因是反应物固相即钨酸钙表面形成的钨酸,因此通过强化浸出条件,诸如提高酸浓度和温度、加强搅拌、减小粒度等,可以加快浸出速度。瑞典某厂采用热球磨与酸分解相结合的方法,加快了白钨矿反应速度,实际盐酸用量仅为理论量的1.5倍,分解时间4~5h,即可使分解率达到99%。

盐酸分解法的主要优点是一次作业就可获得粗钨酸。钨酸和钼酸在盐酸溶液中溶解度有较大差别,因此可以实现钨与钼的初步分离;同时白钨矿中的铁、铝可作为可溶性氯化物被除去。赣州荣德有色新材料有限公司和洛阳栾川县三甲钨钼科技有限公司就是采用盐酸分解法处理洛钼集团生产的低度白钨含钼中矿生产粗钨酸。美国华昌公司对韩国产的含钼1.15%的钨精矿进行盐酸浸出,产出了含钼低于0.02%的仲钨酸铵<sup>[5]</sup>。

盐酸分解法流程短、成本低,较适合于处理优质白钨精矿。此法对原料要求较高,要求含黑钨及磷、砷等杂质低<sup>[6]</sup>,不能除去硅;磷、砷在酸性条件下与钨形成杂多酸不利于钨形成钨酸沉淀,影响金属收率。由于该工艺对原料的适应性较差、操作条件差、设备腐蚀严重、环境污染较严重,且金属收率和产品质量难以达到国内外先进水平,随着我国钨矿资源日渐贫乏,矿源的多样化和复杂化以及环保的严格要求使得盐酸分解法的工业应用受到较大限制。因此盐酸分解法仅适用于处理高纯白钨精矿,或对最终产品杂质元素含量要求不高的场合。

### 2.2 苏打烧结法

苏打烧结法<sup>[7]</sup>处理白钨矿,在烧结过程中发生以下反应:

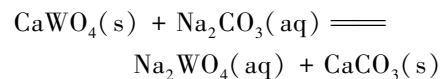


反应生成的 $\text{CaCO}_3$ 在高温下会继续分解成 $\text{CaO}$ 和 $\text{CO}_2$ ,在随后的水浸过程中 $\text{CaO}$ 又生成氢氧化钙,氢氧化钙和钨酸钠容易再次反应生成白钨矿,即有逆反应发生,从而降低了白钨矿的分解率。为了避免在浸出时出现重新生成钨酸钙的问题,通常在烧结前向炉料中加入石英砂,使它与白钨矿中的钙在烧结时生成难溶的硅酸盐 $\text{CaSiO}_3$ 、 $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ 和 $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ 。

苏打烧结法的优点是消耗相当少量的碳酸钠就能得到高的钨回收率。缺点是碳酸钠消耗量随所用精矿品位降低而迅速增加;磷、砷、硅等杂质几乎全部转变成可溶性的化合物随钨一起被浸出,所得粗钨酸钠溶液杂质含量较高,特别是硅含量高、钨与杂质分离难度大、成本和能耗高,其能耗是碱分解工艺的2倍<sup>[8]</sup>;金属综合回收率低,整个工艺过程产出纯 $\text{WO}_3$ 的回收率低于90%。

### 2.3 苏打压煮法

苏打压煮法<sup>[9]</sup>是处理低品位白钨矿的有效方法,其基本原理是白钨矿与苏打发生如下反应:



不同温度下的浓度平衡常数分别为: $k_{175^\circ\text{C}} = 1.21$ ,  $k_{200^\circ\text{C}} = 1.45$ ,  $k_{225^\circ\text{C}} = 1.56$ ,  $k_{250^\circ\text{C}} = 1.85$ 。

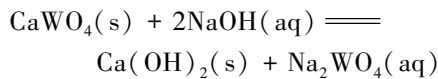
苏打压煮法是欧、美等大型厂家普遍采用的方法<sup>[10]</sup>。传统苏打压煮法的压煮温度较高(230~250℃)、工作压力较大(2.5~2.7 MPa)、试剂添加量高达理论量的3~4倍,白钨矿分解率可达99%,全流程总回收率96%以上,它是处理低品位白钨矿的合理方法<sup>[11]</sup>。

传统苏打压煮法的优点是:原料适应性强,矿分解效率高和杂质浸出率低,既可以用于高品位或复杂低品位的白钨矿,也可用于低锰( $\text{MnWO}_4$ 含量低于50%)的黑钨矿。缺点是:液固比高,导致设备利用率低、分解能耗高;苏打消耗量大,处理1t $\text{WO}_3$ 需消耗2~3t苏打,所得钨酸钠溶液中苏打剩余量大(80~100g/L),随后中和溶液时又需多消耗酸,并产生大量钠盐废液。基于苏打压煮法的优点,中南大学进行了苏打压煮-碱性萃取成套工业化技术的研究和应用推广,该技术采用季铵盐萃取剂直接从苏打压煮得到的钨酸钠溶液中萃取钨并分离磷、硅等杂质,萃钨后的含苏打余液利用石灰转化后回收利用<sup>[12]</sup>。该技术由郴州钻石钨制品有限责任公司与中南大学合作于2014年首次成功实现工业规模应用,之后推广应用到洛阳栾川钼业集团钨业有限公司。但中小型民营钨冶炼企业普遍存在钨原料来源复杂和技术消化吸收能力不足的问题,限制了碱性萃取工艺的推广应用。

2018年,郴州钻石钨制品有限责任公司开发了利用过热蒸气直接加热的低压苏打压煮新工艺,将苏打压煮工作压力降至1.1 MPa以下,并研制了钨矿连续苏打压煮和连续冷冻回收苏打全套工业设备和工艺。新设备和配套工艺的成功应用使苏打压煮法能耗相比传统间断苏打压煮工艺减少30%以上,苏打用量降至理论量2倍以下,压煮压力的下降使得生成的钨酸钠溶液中P、As、Si等杂质含量下降,净化除杂的试剂消耗也随之降低。新工艺既克服了传统苏打压煮法的缺点,又提高了苏打压煮法的竞争优势。随着国内钨矿原料向品位低、成分及组成复杂转变,苏打压煮法高分解率、溶液质量好的优势越来越凸显。

#### 2.4 氢氧化钠分解法

白钨矿与氢氧化钠会发生如下反应:



厦门钨业股份有限公司开发的苛性钠压煮法<sup>[13]</sup>,采用远红外加热技术,在高压条件下分解钨矿原料,早期用于黑钨精矿及高钙黑钨精矿的处理,具有分解率高、碱用量低、能耗低的优点。经过十几年工业实践积累的矿物处理、杂质抑制和分离技术,成功地将苛性钠压煮法应用于处理各种白钨矿。其工艺条件为:碱用量为理论量的1.8~2.3倍,反应温度210~230℃,同时加入适当添加剂,改善传质条件的同时抑制逆反应的发生,白钨矿分解率98.5%~99.0%,杂质P、As、Sn、Si浸出率低。工艺设备简单,易于实现规模化生产,投资少,灵活性强。

文献[14]提出对传统的碱分解法进行改进,添加 $\text{PO}_4^{3-}$ 等阴离子与 $\text{CaWO}_4$ 中的钙生成溶度积更小的钙盐,其中的 $\text{WO}_4^{2-}$ 则形成 $\text{Na}_2\text{WO}_4$ 进入溶液。这种方法在我国许多工厂得到实施,实践证明,它能在经典氢氧化钠分解法处理黑钨精矿时使钙含量由0.5%提高到2%~3%,此方法一定程度上提高了氢氧化钠压煮法对白钨矿的适应能力,降低了选矿难度,有利于提高钨资源利用率,但未彻底解决氢氧化钠分解白钨矿及黑白钨混合矿的问题,也不能解决在处理杂矿时因原料中杂质含量高而导致的分解溶液质量降低、钨杂分离负担重、成本高等问题。此外,有的工厂用其他钠盐亦能有效分解标准白钨精矿,这对解决我国白钨资源的处理难题无疑是一个较大贡献。

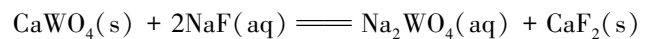
为克服高温高压下氢氧化钠分解钨精矿产生的碳钢碱脆现象导致反应釜体和搅拌装置设备使用寿命缩短的问题,2004年,郴州钻石钨制品有限责任公司使用了衬镍反应釜,实践证明,衬镍反应釜可以克服碱脆

现象,设备使用寿命大幅延长。

20世纪80年代,原中南工业大学对钨矿物原料碱分解的热力学和动力学以及过程中杂质的行为进行了深入研究,发明了“白钨矿及黑白钨混合矿碱分解的方法与设备”,即热球磨碱煮法<sup>[15]</sup>,其实质是在热球磨反应器中创造氢氧化钠分解白钨所必需的热力学条件,将磨矿过程对矿物原料的机械活化作用、强烈的搅拌作用与分解过程的化学反应有机结合,从而使各种钨矿都得以有效分解。对品位25%~45%的黑白钨混合矿,在碱用量为理论量的2.5~3.0倍、反应时间1.5 h条件下钨矿分解率达98%左右,杂质浸出率不到经典工艺的1/2。热球磨碱煮法是一种比较合理的工艺,被不少小型企业应用于工业生产,较适合于处理高钙高杂质的钨细泥。在用其处理白钨精矿时,碱用量达理论量的2.5倍以上,同时设备维护与操作不便,设备成本较高,安全性也有待改善,使得大型工业规模运用此法还有许多困难。

#### 2.5 氟盐分解法

氟盐分解法是利用氟盐(氟化钠或氟化氢溶液)与白钨矿发生交换反应,如氟化钠与白钨矿作用:



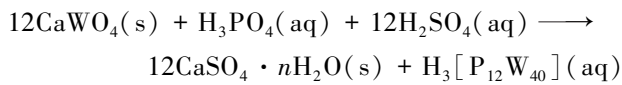
20℃时反应的浓度平衡常数为61.7,有利于反应向生成 $\text{Na}_2\text{WO}_4$ 的方向进行。氟化钠用量为理论计算量的170%~180%时,在225℃下分解2 h,白钨精矿分解率可达99.5%~99.7%,分解后所得钨酸钠溶液碱度低(pH=10左右)。与苏打压煮法相比,氟盐分解法不仅缩短了分解时间,而且减少了中和用的酸及中和产生的钠盐废液,废渣含有75%~80%的 $\text{CaF}_2$ ,可用于制造钢铁冶金工业所需的萤石球团。

200℃,用量为理论计算量170%~200%的氟化氢和氨水溶液分解白钨精矿,分解率为98%~99%,分解所得的溶液含硅、磷、砷杂质较少。

文献[16]报道了氟盐分解白钨矿的热力学,通过分析溶液中各个组分溶解平衡浓度对数图,发现在较大的pH值范围(pH>6.57)内都可用氟盐浸出白钨矿,而且溶液中应维持一定的游离氟离子。用氟盐分解白钨矿试剂用量少、浸出温度及压力适中、分解率高、杂质浸出较少;克服了氢氧化钠分解法中碱用量大、得到的钨酸钠溶液中游离碱含量高等缺点,实践证明它是分解高品质纯白钨矿的有效试剂。但氟盐分解法同样存在矿源适用性窄的缺点,不能处理黑白钨混合矿,白钨矿中的Fe和残余浮选剂等均影响分解效率;受辅料氟化钠价格居高限制,成本优势不足。

## 2.6 硫磷混酸协同分解法

硫磷混酸协同分解法<sup>[17]</sup>由中南大学提出,分解过程中白钨矿发生如下化学反应:



硫磷混酸协同分解法利用酸性条件下钨易与磷等形成溶解度大的杂多酸的优势促进白钨矿分解,分解时以硫酸为主浸出剂与白钨矿中的钙结合形成石膏进入固相渣中,钨与磷酸络合形成磷钨杂多酸进入溶液中。由于分解过程的热力学推动力大及形成的硫酸钙渣不易形成包裹,分解温度仅为80~100℃,在常压条件下就能进行,不需要高压分解设备。该工艺的优点,一是白钨矿分解过程能耗低、设备投资成本低;二是强酸条件下分解得到的石膏渣重金属元素浸出毒性不超标,不属于危险废物,高品质石膏渣甚至可作为建筑材料,有效解决了白钨矿分解废渣处置问题,具有较好的环保优势。目前该工艺已在厦门钨业股份有限公司实现工业化。实践证明,硫磷混酸协同分解法同样存在矿源适用性窄的瓶颈,该分解工艺对复杂白钨矿,尤其是对黑白钨混合矿分解效果不佳。试验发现Fe和K等元素会降低白钨矿分解率,该方法仅适用于高品质纯白钨矿,矿源适用性窄的劣势限制了其工业应用的推广和产能发挥。

## 2.7 石灰烧结转化-碳铵分解法

石灰烧结转化-碳铵分解法<sup>[18-19]</sup>由中南大学研发,该工艺将钨矿原料与石灰、氟化钙混合后磨细至粒度小于45 μm,在800~1000℃下烧结1~2h,使钨转化为具有良好浸出性能的Ca<sub>3</sub>WO<sub>6</sub>、Ca<sub>2</sub>FeWO<sub>6</sub>或Ca<sub>2</sub>MnWO<sub>6</sub>;然后使用碳酸铵盐溶液分解得到粗钨酸铵溶液,分解过程通入CO<sub>2</sub>、添加CaCO<sub>3</sub>晶种可获得高浓度钨酸铵溶液和高的钨分解率。该工艺可处理白钨矿、黑钨矿、黑白钨混合矿等,白钨矿焙烧气氛不受限制,黑钨矿、黑白钨混合矿焙烧气氛控制为中性或弱还原性。

石灰烧结转化-碳铵分解法的优点是:钨矿经转化后可一步制得钨酸铵,目前处于院校与钨冶炼企业联合工业应用研究阶段,未实现工业化应用。该工艺工业化应用存在几方面问题:一是矿焙烧转化条件控制苛刻,难以保证钨矿原料转化完全,特别是黑钨矿、复杂黑白钨混合矿的转化;二是钨矿原料带来的大量P、As、Si、K、Na、Ca、Mg等杂质进入钨酸铵溶液,配套的杂质分离工序较复杂及成本高;三是分解产生的含氨CaCO<sub>3</sub>渣和伴随生产全流程的高温含氨水气体环保治理难度大。

## 2.8 其他分解方法

葡萄牙化学工程中心研究人员对生物浸出技术进行了实验研究,所用白钨矿WO<sub>3</sub>品位2.4%,用一种可以分解硅酸盐的生物体,在锥形瓶中浸出8天,有9%的钨被浸出<sup>[20]</sup>。

文献[21]在酸浸过程中添加螯合剂来分解白钨矿。所用白钨矿WO<sub>3</sub>品位50%,酸浸液中添加含铵离子的有机或无机试剂使钨沉积下来,生成聚合钨多酸盐(NH<sub>4</sub>)<sub>x</sub>·P<sub>y</sub>O<sub>z</sub>·rWO<sub>3</sub>·tH<sub>2</sub>O,使钨与溶液中的其他离子分离。然后在600~1200℃下热分解得到纯WO<sub>3</sub>。浸出的最佳条件为:液固比1/10, W/PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>比7/1,温度80℃,搅拌速度900 r/min,浸出时间2h,所用螯合剂为磷酸,溶液中添加NH<sub>4</sub>OH或NH<sub>4</sub>Cl,60℃时钨达到最大的沉积率99%。

文献[22]通过转盘研究了在常压于碱性EDTA溶液中分解人造白钨,研究表明,分解率与转盘速度的平方根成正比,在实验温度24~99℃条件下,人造白钨溶解的活化能为22 kJ/mol,反应受传质过程控制。

文献[23]提出了酸法焙烧思路,白钨矿与硫酸盐焙烧,焙烧产物经过钨钙分离得到的WO<sub>3</sub>富集物经氨溶得到钨酸铵溶液,白钨矿焙烧产生的主要杂质为Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、CaSO<sub>4</sub>,可采用盐酸溶解CaSO<sub>4</sub>实现钨钙分离。

文献[24]报道,在处理白钨矿矿石时使用大量过剩的熔化苛性碱,并掺入少量石灰,然后用水浸出熔化产物能够得到钨酸钠。

## 3 展 望

过度开采导致黑钨矿资源加速枯竭,我国钨矿供应已快速过渡到以白钨矿为主,传统的钨冶炼生产工艺已不能适应资源形势发展的需要。目前高温高碱加磷酸盐分解白钨矿仍然在钨冶炼行业应用,但高达理论量2.5~3.0倍的碱用量产生的系列问题难以解决;碱的回收率较低;对因地域、矿山不同而复杂变化、品质各异的白钨矿的适应性在逐步降低;杂质的高浸出率带来杂质分离净化、废水达标处理的技术难度和高成本,钨渣危险废物属性的环保问题突出,对钨冶炼企业生产和发展影响显著。可以预期氟盐分解法、苏打压煮法、硫磷混酸协同分解法将逐步取代高温高碱分解法,特别是矿山供应的白钨原料呈现低品位和高杂质发展趋势,现阶段苏打压煮法将会在钨冶炼行业得到广泛应用。

随着国家对生态环保工作的持续高度重视,再加上钨冶炼企业面临碱分解产生的钨渣被列入国家危险

废物名录后钨渣处置困难的现状,研究开发新的绿色环保洁净的钨冶炼工艺和成套设备迫在眉睫。

### 参考文献:

- [1] 王琨琳. 我国钨品生产和出口管理政策研究[D]. 北京:北京化工大学, 2002.
- [2] 赵中伟,李江涛,陈星宇,等. 我国白钨矿钨冶炼技术现状与发展[J]. 有色金属科学与工程, 2013,4(5):11-14.
- [3] 李仲泽. 中国钨产业高质量发展的思考[J]. 中国钨业, 2021,36(5):1-10.
- [4] 张训鹏. 冶金工程概论[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1998.
- [5] 叶帷洪,王崇敬. 钨——资源冶金性质和应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 1983.
- [6] Kulkarni A D, Cleary J G, Corp W E. Processing of ammonium paratungstate from tungsten ores: US4115513[P]. 1978-09-19.
- [7] 莫似浩. 钨冶炼的原理和工艺[M]. 北京:轻工业出版社, 1984.
- [8] 赵中伟. 新形势下钨提取冶金面临的挑战与发展[J]. 矿产保护与利用, 2017(1):98-102.
- [9] 彭少方. 钨冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社, 1981.
- [10] 李洪桂. 稀有金属冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社, 1990.
- [11] 孙培梅,李运姣,李洪桂,等. 白钨矿碱分解过程的热力学[J]. 中国有色金属学报, 1993,3(2):37-39.
- [12] 曾之琪,肖连生,张贵清. 碱性钨萃余液返回高压浸出的试验研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2013,41(6):1-6.
- [13] 方 奇. 苛性钠压煮法分解白钨矿[J]. 中国钨业, 2001,16(5-6):80-81.

- [14] 李洪桂. 适应钨资源形势的变化开拓钨冶金的新工艺[J]. 中国钨业, 1999,14(5-6):136-139.
- [15] 李洪桂,刘茂盛,戴朝嘉,等. 钨矿物原料碱分解的新工艺研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 1987(增刊1):3-9.
- [16] 丁治英,赵中伟. 氟盐溶液浸出白钨矿的热力学分析[J]. 稀有金属与硬质合金, 2004,32(1):8-10.
- [17] 赵中伟,孙丰龙,杨金洪,等. 我国钨资源、技术和产业发展现状与展望[J]. 中国有色金属学报, 2019,29(9):1902-1916.
- [18] 李小斌,崔源发,周秋生,等. 一种钨矿物原料的预处理方法: CN201410527644.6[P]. 2016-07-13.
- [19] 李小斌,崔源发,周秋生,等. 由钨矿物原料零废水排放制备APT的方法: CN201410528246.6[P]. 2016-09-07.
- [20] Carvalho R A G D, Cruz M C, Gonçalves M C, et al. Bioleaching of tungsten ores[J]. Hydrometallurgy, 1990,24:263-267.
- [21] Sebahattin Gürmen, Servet Timur, Cüneyt Arslan, et al. Production of pure tungsten oxide from scheelite concentrates[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2002,31:221-228.
- [22] KE J J, YUE L D, LIU W D. Kinetic of dissolution of synthetic scheelite by an alkaline EDTA leach solution[J]. Hydrometallurgy, 1986,16:325-334.
- [23] 徐略渭,何秉轩,徐国钻,等.  $WO_3$ - $CaSO_4$  在  $HCl$ - $Na_2SO_4$  溶液中的平衡溶解[J]. 工程科学学报, 2023,45(6):883-889.
- [24] 钱景贤,薛饶伯 节译. 钨冶金学[M]. 北京:中国工业出版社, 1964.

引用本文: 李 军,张秋江. 白钨矿分解工艺技术评价与发展方向展望[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):123-127.

(上接第 118 页)

- [4] 景元涛. 铜冶炼烟尘浸出液处理新工艺探究[J]. 世界有色金属, 2022(23):1-3.
- [5] 赵思佳. 有色冶金工业含砷烟尘灰处理及利用研究进展[J]. 河南有色金属, 2012,28(3):20-24.
- [6] 蒋清元,周剑飞,杨 文. 铜吹炼白烟尘处理的研究及应用进展[J]. 湖南有色金属, 2019,35(4):33-35.
- [7] 吴艳新,曾 洪,解澄涛,等. 砷冰铜氧压酸浸选择性分离铜砷锑[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):128-132.
- [8] 王子彪,何贵香,占焕武,等. 高铜铅冰铜氧压浸出[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):122-126.

- [9] 周安梁. 白烟尘浸出液铜砷回收试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2019,37(12):13-16.
- [10] 田 静,赵亚峰,马喜功,等. 金铜冶炼高砷烟尘酸浸液铜砷分离回收工艺研究[J]. 中国有色冶金, 2018,47(3):33-34.
- [11] 王 磊. 铜冶炼电收尘灰浸出液与硫化砷渣综合处理工艺研究[J]. 硫酸工业, 2020(1):36-40.

引用本文: 马云聪,许 俊,余宗华,等. 铜冶炼电收尘酸浸液硫化砷渣沉铜行为研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):116-118.

(上接第 122 页)

- [2] 王其洪,邵剑华,林银河,等. 微型流化床内 CO 还原铁矿粉动力学试验[J]. 钢铁研究学报, 2012,24(4):6-9.
- [3] 延 黎,黄武胜,吴世超,等. 某高磷鲕状铁矿石气基直接还原-磁选提铁降磷研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(1):72-75.
- [4] 高恩霞,钟国万,蒋 曼,等. 硫酸渣与高炉灰共还原-磁选回收铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):95-99.
- [5] 徐其言,李志平,谷张涵,等. 巴西铁矿粉流态化还原条件优化研究[J]. 钢铁钒钛, 2020,41(3):99-104.
- [6] Spreitzer D, Schenk J. Fluidization behavior and reducibility of iron ore fines during hydrogen-induced fluidized bed reduction[J]. Particulate, 2020,52:36-46.

- [7] 刘明磊. 正交试验设计中的方差分析[D]. 沈阳:东北林业大学, 2011.
- [8] 练 强,张 杰. 锰渣硫酸浸出正交实验探究[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):108-110.
- [9] 林银河,郭占成,唐惠庆. 微型流化床中气氛对还原度的影响[J]. 钢铁研究学报, 2014,26(4):18-23.
- [10] 李 丽. 多因素多水平复杂正交试验的方差分析[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2018,37(3):27-31.

引用本文: 朱国民,丁 敬,黄金玉,等. 基于交互正交试验的铁矿粉流态化还原影响因素研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):119-122.