doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20250039

铜阳极泥氧压酸浸过程中铜、硒、碲的浸出规律

李晓恒[1,2]，熊领领[3]，刘奎仁[1]，韩战旗[2]
（1. 东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819；2. 河南中原黄金冶炼厂有限责任公司，河南 三门峡 472000；
3. 三门峡市有色金属科学研究中心，河南 三门峡 472000）

摘 要：本文基于热力学分析及X射线衍射（XRD）、扫描电子显微镜（SEM）和能谱分析（EDS）等表征方法，对某铜冶炼企业阳极泥进行了预处理脱铜研究，探讨了氧压酸浸工艺参数对铜、硒、碲浸出效果的影响．实验结果表明：随着浸出酸度、温度、压力、液固比的提高，铜、硒、碲的浸出率均提高；浸出时间的延长对铜、硒、碲浸出率的提高有限．当控制溶液中硫酸质量浓度为80 g/L，浸出温度为140 ℃，浸出压力为0. 8 MPa，浸出时间为60 min，浸出液固比为2时，铜、硒、碲的浸出率分别为93%，14%和45%. 本文研究可为铜冶炼企业阳极泥预处理工艺中，避免硒、碲分散或通过强化浸出条件提高硒、碲浸出率提供参考．

关 键 词：铜阳极泥；预处理；氧压酸浸；硒；碲
中图分类号：TF 822 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-3026(2026)03-0065-08

Leaching Regularity of Copper, Selenium, and Tellurium During Oxygen Pressure Acid Leaching Process of Copper Anode Slime

LI Xiao-heng[1,2], *XIONG Ling-ling*[3], *LIU Kui-ren*[1], *HAN Zhan-qi*[2]
（1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Henan Zhongyuan Gold Smelter Co., Ltd., Sanmenxia 472000, China; 3. Sanmenxia Nonferrous Metals Scientific Research Center, Sanmenxia 472000, China. Corresponding author: LIU Kui-ren, E-mail: liukr@smm.neu.edu.cn）

Abstract: Based on the thermodynamic analysis and characterization methods such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive spectroscopy (EDS), a study on the de-coppering from anode slime for a copper smelting enterprise was conducted, and the leaching effect of copper, selenium, and tellurium during the oxygen pressure acid leaching process was studied. The experimental results show that the leaching rates of copper, selenium, and tellurium are improved with the increase of leaching acidity, temperature, pressure, and liquid-to-solid ratio; the extension of leaching time has a limited influence on improving the leaching rates of copper, selenium, and tellurium. When the sulfuric acid mass concentration in the solution is controlled at 80 g/L, the leaching temperature at 140 ℃, the leaching pressure at 0. 8 MPa, the leaching time at 60 min, and the liquid-to-solid ratio at 2, the leaching rates of copper, selenium, and tellurium are 93%, 14%, and 45%, respectively. A reference is provided for copper smelting enterprises to avoid the dispersion of selenium and tellurium or to enhance leaching conditions to improve the leaching rates of selenium and tellurium during the anode slime pretreatment process.

Key words: copper anode slime; pretreatment; oxygen pressure acid leaching; selenium; tellurium

铜阳极泥是在铜电解精炼过程中产出的一种重要副产品，其产率一般为粗铜的0.2%~1.0%. 阳极泥的成分通常较为复杂，由铜阳极电解精炼过程中不能离子化进入电解液或与电解液形成

收稿日期：2025-03-27
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（N2425012）；辽宁省教育厅基本科研项目（JYTMS20230620）.
作者简介：李晓恒（1988—），男，河南汝州人，东北大学博士研究生．
通信作者：刘奎仁，E-mail：liukr@smm.neu.edu.cn.

不溶盐而析出的各种组分构成,其中富含贵金属和稀散金属,是稀散金属和贵金属的主要生产原料[1-3].近年来我国铜冶炼工业发展迅猛,氧压酸浸除铜工艺开始在大型铜冶炼企业中应用[4-5].氧压酸浸技术是一种先进的湿法冶金强化溶浸技术,具有高效、环保、处理能力大且易于实现自动化的特点.在铜阳极泥氧压酸浸过程中,大量的铜以硫酸盐的形式进入溶液,大部分金、银、铂、钯等贵金属留在浸出渣中,同时部分硒、碲和少量银也会被浸出[6-9].

硒、碲均属于稀散元素,广泛应用于冶金、化工、电子电器、半导体产业等领域,尤其是硒和碲的特殊性能,使其在高科技产业、国防和尖端技术中变得不可或缺[10-12].硒和碲的单独矿床较少,绝大部分伴生于铜、铅、锌等矿石中,使得硒和碲的来源受限,每年所产硒和碲大部分来源于铜阳极泥[13-15].硒和碲在铜阳极泥中大多与铜、银等元素结合,以复杂化合物的形式赋存.因此,要从铜阳极泥中回收稀散的金属硒和碲,研究硒、碲在氧压浸出铜过程中的行为就显得十分必要.

国内外学者在阳极泥预处理阶段浸出硒、碲的研究,主要集中在常压预处理阶段采用不同的氧化剂[16-19]或改变浸出方式[20-22].常压酸性浸出采用硝酸、二氧化锰、双氧水、氯酸钠等作为氧化剂[16-19];改变浸出方式的研究有采用碱性浸出、微波或超声波辅助浸出等[20-22],但对氧压浸出时硒、碲的浸出行为研究较少.本研究以某铜冶炼企业的阳极泥为对象,进行了氧压酸浸预处理脱铜工艺研究,考察了浸出酸度、温度、压力、时间、液固比等反应条件对铜、硒、碲等元素浸出效果的影响,研究分析了铜、硒、碲在氧压酸浸预处理工艺中的浸出行为,对阳极泥氧压预处理生产工艺选择具有一定的指导意义.

1 实验原料与试验方法

1.1 实验原料

实验所用的阳极泥原料为某铜冶炼企业电解铜工序产出,外观呈灰黑色.利用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)技术对阳极泥的主要元素进行分析,其多元素分析结果如表1所示.

表1 铜阳极泥多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-element analysis results of copper anode slime (mass fraction) %

Au	Ag	Cu	Pb	S	As	Ba	Bi	Sb	Te	Se	Sn
1.29	10.1	14.6	30.9	6.66	0.35	6.78	1.36	1.27	2.09	6.8	0.20

从表1可以看出,实验用阳极泥中金和银的质量分数较高,分别达到了1.29%和10.1%;铜质量分数为14.6%,铅质量分数为30.9%;此外硒质量分数达到了6.8%,碲质量分数达到了2%,均具有较高的回收价值.该铜阳极泥属于高金高银型铜阳极泥.

1.2 实验试剂、设备及分析方法

实验中所用硫酸为分析纯,氧气为工业纯氧.实验采用威海鑫化GSH-2型高压浸出反应釜.固体物料元素分析:物料消解后定容稀释,利用ICP-OES检测各元素含量.X射线衍射物相分析:原料物相组成利用XRD分析,所得衍射峰数据采用HighScore Plus软件分析,并与标准卡片数据库(PDF-2004)进行比对.样品测试条件:测试电压和电流分别为40.0 kV和40.0 mA,扫描范围10°到90°,扫描速率10°/min.扫描电子显微镜和能谱分析:样品微观形貌采用扫描电子显微镜(SEM)观测(加速电压20.0 keV),结合能谱仪(EDS)分析样品的化学成分、元素分布及含量.

1.3 实验表征结果及浸出分析

1.3.1 原料物相分析及形貌表征结果

采用X射线粉末衍射仪对阳极泥中各元素的赋存状态进行分析,其衍射图谱见图1.该阳极泥中主要成分为硫酸铅、硫酸铜和硒化银,属于较为典型的含杂高的铜阳极泥.为准确分析铜阳极泥的形貌和结构,采用扫描电子显微镜、元素面扫描和点扫描对其进行分析,如图2所示.铜阳极泥主要由球形、棒形、球形凝聚型和少量无定形微粒组成.能谱分析表明:铜主要以硫酸铜形式存在,少部分以单质铜和硫化铜形式存在;硒、碲分布与银、铜的分布基本一致,为铜、银和硒、碲的化合物;铋和锑的结合较为紧密且与氧的分布一致,主要是以锑和铋的氧化物形式存在;铅和氧、硫的分布一致,主要以硫酸铅形式存在,这也佐证了图1中的XRD分析结果.

1.3.2 浸出条件热力学分析

在硫酸介质中氧气存在的条件下,进行阳极泥氧压浸出铜、硒、碲实验,其中不同类型的铜物相在溶液中最终均转化为硫酸铜,其具体反应如

式(1)~式(6)所示.采用相关软件(HSC Chemistry 6.0)对该过程进行热力学分析计算,根据各个反应的吉布斯自由能变化趋势,判断在相应条件下铜、硒、碲的浸出反应是否具有自发性,以及最终反应所能达到的限度.浸出过程中各反应的热力学计算结果如图3所示,各反应的吉布斯自由能均为负值.依据热力学原理,这一结果表明上述反应均能够自发进行.与此同时,随着浸出温度逐步升高,各个反应的吉布斯自由能变化值均增大,说明该反应可能是放热反应,在高温下反应的自发性可能降低.

$$2Cu+2H_2SO_4+O_2=2CuSO_4+2H_2O, \quad (1)$$

$$2CuS+2H_2SO_4+O_2=2CuSO_4+2S+2H_2O, \quad (2)$$

$$Cu_2Se+2H_2SO_4+2O_2=2CuSO_4+H_2SeO_3+H_2O, \quad (3)$$

$$Cu_2Te+2H_2SO_4+2O_2=2CuSO_4+H_2TeO_3+H_2O, \quad (4)$$

$$2Ag_2Se+2H_2SO_4+3O_2=2Ag_2SO_4+2H_2SeO_3, \quad (5)$$

$$2Ag_2Te+2H_2SO_4+3O_2=2Ag_2SO_4+2H_2TeO_3. \quad (6)$$

图4为25 ℃时Cu-S-H_2O,Cu-Te-H_2O,Cu-Se-H_2O,Ag-Se-H_2O,Ag-Te-H_2O的电位-pH图.从图4中可以看出,氧压浸出铜必须在pH<3,且有氧气参与的情况下,才可将不溶的单质铜、硫化铜以及铜的硒、碲化合物溶解,此时发生反应(1)~(4),使铜浸出到溶液中.同时,在有氧气存在的情况下,氧气分压线位于这些不溶物的上方,在此pH条件下,有利于反应(4)~(6)向右进行,在浸出铜的同时,与硒和碲结合的银的化合物也会不可避免地进入到溶液中.

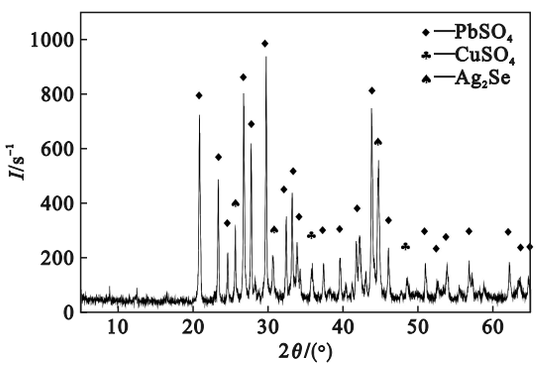


图1　铜阳极泥XRD谱

Fig. 1　XRD pattern of copper anode slime

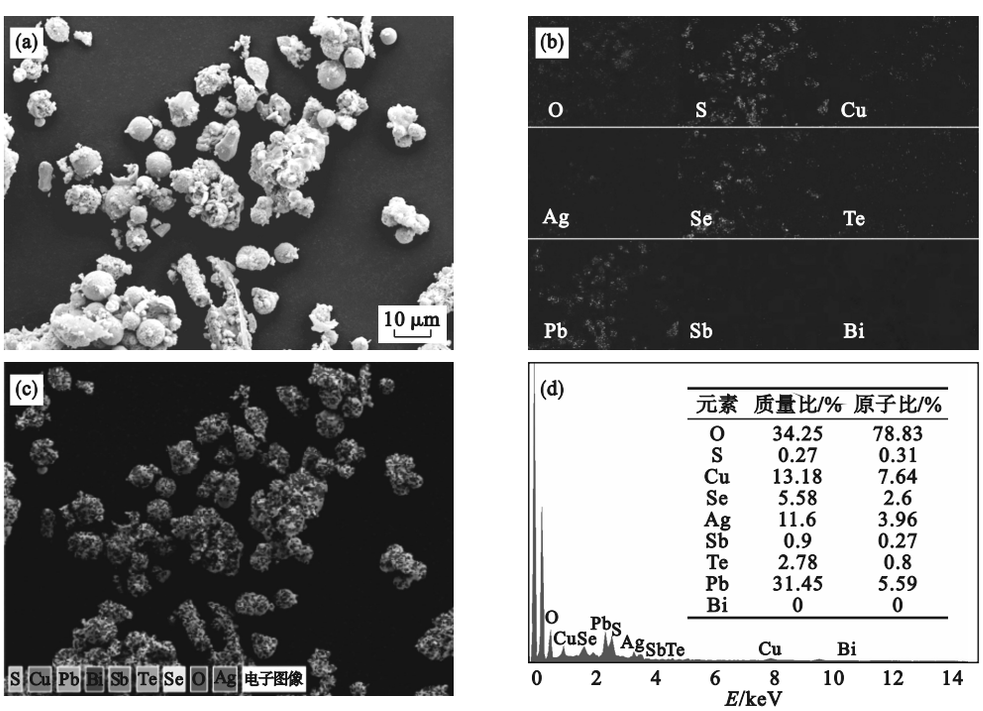


图2　铜阳极泥扫描电子显微镜图像、面扫描元素分布图谱以及能量色散谱图

Fig. 2　SEM image, elemental mapping images, and EDS spectrum of copper anode slime

(a)—SEM;(b),(c)—面扫描元素分布图;(d)—能量色散谱图.

2　结果及讨论

本研究中主要考察浸出温度、压力、酸度、液固比等因素对铜及稀散金属硒和碲浸出行为的影响,以探讨硒、碲在此条件下的浸出行为.

2.1　浸出酸度对铜、硒、碲浸出率的影响

控制浸出液固比为5∶1、压力为0.7 MPa、温度为140 ℃、时间为90 min,分别在不同酸度下进行反应,探究酸度对铜、硒、碲浸出率的影响,实验结果如图5所示.

从图5可以看出,随着浸出酸度的增加,铜、

硒、碲的浸出率呈逐步增加趋势,结合化学反应方程(1)~(6)可知,所有的反应均为耗酸反应.硫酸是氧压酸浸反应的主要反应物,酸度越高越有利于反应速率增加,硒和碲与铜结合的矿物也逐渐被浸出,实验结果也验证了这一现象.同时,为满足反应推动力的需要,防止进入溶液中的铜离子发生水解,酸度不能过低.随着酸度的增加,硒的浸出率增幅低于碲的浸出率增幅,主要原因在于在较高的酸度下,不利于Se(0)的进一步氧化生成亚硒酸根.

2.2 浸出温度对铜、硒、碲浸出率的影响

经查阅相关资料可知,浸出温度对铜的浸出效果影响较大,因此本文重点考察了多个浸出温度对铜、硒、碲浸出率的影响.控制液固比为5∶1,浸出质量浓度为100 g/L,压力为0.8 MPa,时间为90 min,探究浸出温度对铜、硒、碲浸出率的影响,实验结果如图6所示.

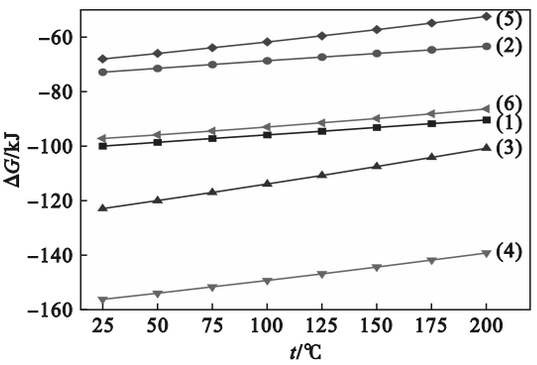


图3 反应方程式(1)~(6)吉布斯自由能△G-t关系图

Fig. 3 Gibbs free energy △G-t relationship diagram of reactions Eqs. (1)~(6)

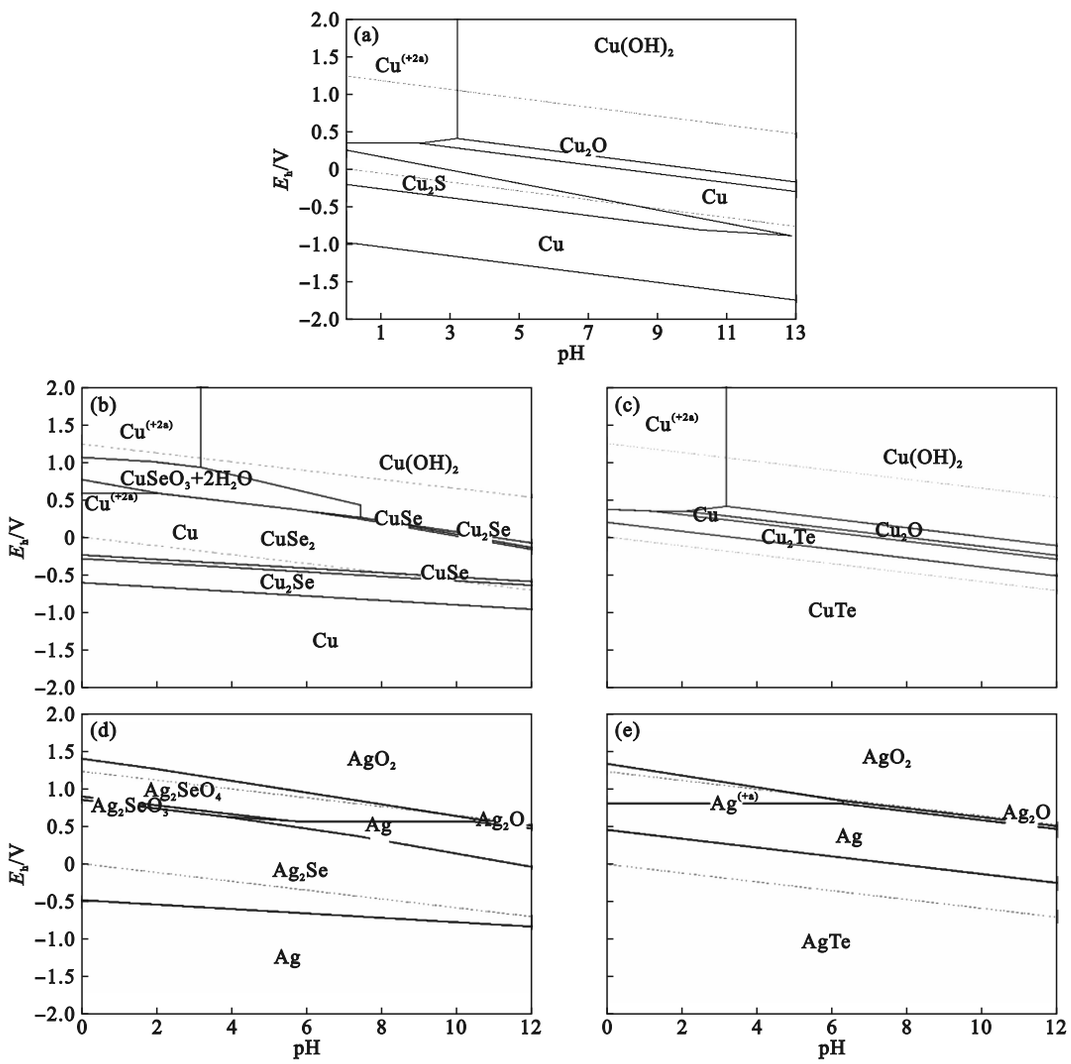


图4 电位-pH图

Fig. 4 Potential-pH diagrams

(a)—Cu-S-H_2O;(b)—Cu-Te-H_2O;(c)—Cu-Se-H_2O;(d)—Ag-Se-H_2O;(e)—Ag-Te-H_2O.

反应速率的快慢与反应温度有着密切的关系,氧压酸浸的氧化剂为氧气,溶解进入溶液中的氧气会吸附于矿粒表面,随后经过反应裂解生成氧原子.在整个氧化反应进程中,裂解反应占

据关键地位,对氧化反应的推进速度起着决定性作用.但不容忽视的是,裂解反应的发生需要克服极高的活化能障碍.鉴于此,适当提升温度对裂解反应极为有利,升高温度不仅有利于裂解反应的进行,还能增加氧化反应速率并加快反应物扩散速率.然而,温度过高会增加动力和能源消耗,使生产成本增加,同时会加快设备的腐蚀速率,不利于设备的长期稳定运行.

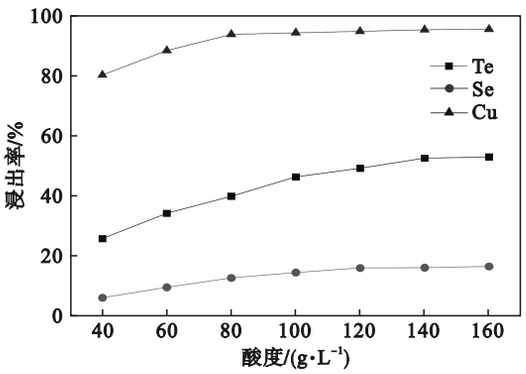


图5　浸出率受浸出酸度的影响情况

Fig. 5　Effect of leaching acidity on leaching rate

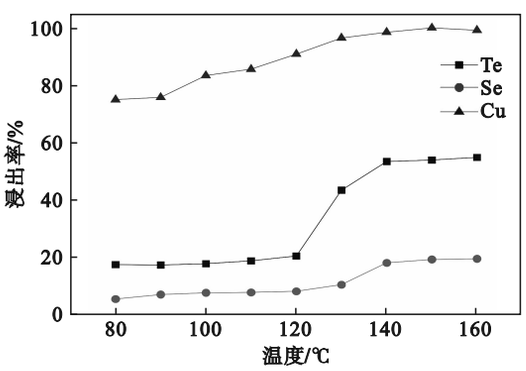


图6　浸出率受温度的影响情况

Fig. 6　Effect of temperature on leaching rate

由图6可知,在浸出压力为0.8 MPa的情况下,随着浸出温度的升高,铜、硒、碲的浸出率逐渐增加.当浸出温度达到120 ℃时,碲的浸出率快速增加;继续升高温度至130 ℃以上时,硒的浸出率增加明显,而此时铜的浸出率则增加较为缓慢.经检测发现浸出液中的银含量有所增加,推测可能是阳极泥中的碲化银和硒化银在此时开始反应,造成反应式(3)~式(6)的反应量增加,此时铜质量分数可降至0.5%以下.随着反应温度的进一步升高,铜浸出率的增加趋势减缓,浸出温度在150 ℃时,渣中铜含量降至微量,此时硒的浸出率接近20%,碲的浸出率达到50%左右.对于硒和碲含量高的阳极泥,提高反应温度会提高硒和碲的浸出率.

2.3　浸出压力对铜、硒、碲浸出率的影响

为探究浸出压力对铜、硒、碲浸出率的影响,控制浸出条件如下:液固比为5∶1,溶液中硫酸质量浓度为80 g/L,温度为140 ℃,时间为90 min,实验结果如图7所示.

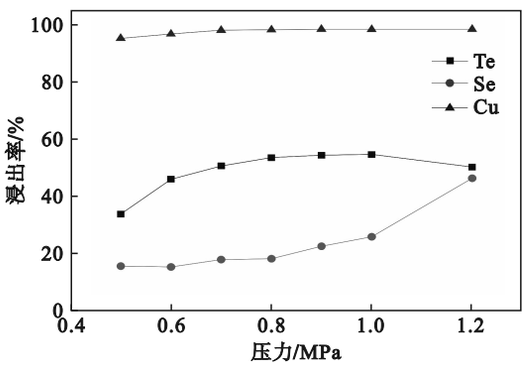


图7　浸出率受压力的影响情况

Fig. 7　Effect of pressure on leaching rates

浸出压力在铜阳极泥的氧压酸浸过程中起着重要作用.浸出压力主要由水的饱和蒸汽压和氧分压两部分组成.在一定反应温度下,水的饱和蒸汽压是固定的,随着浸出压力的增大,氧分压随之增大.提高氧分压一方面有利于增加氧气在溶液中的溶解度,使参与反应的氧增加,从而提高反应速率;另一方面,从反应热力学角度能使反应更容易向正向移动.

从图7中可以看出,总体来看随着浸出压力的增加,铜、硒、碲的浸出率也随之增加,但浸出压力对铜的浸出率影响较小,对硒和碲的影响较大.从图8水在不同温度下的饱和蒸汽压图中可以看出,在浸出温度为140 ℃时水的饱和蒸汽压p_0为0.36 MPa,当氧压浸出压力为0.7 MPa时,氧分压为0.34 MPa,此时氧分压随着压力的增加而增加,尤其是在浸出压力达到1.0 MPa时,硒的浸出率增加明显,硒的浸出率可达到26%;但是当浸出压力达到1.2 MPa时,硒的浸出率超过了40%,可能发生了反应式(7),而碲的浸出率稍有下降,可能是由于发生了反应式(8),生成了高价的TeO_4^{2-},会与溶液中的金属离子结合生成沉淀又进入到了浸出渣中,导致碲的浸出率有所下降.

$$Se+O_2+H_2O=SeO_3^{2-}+2H^+, \quad (7)$$

$$2TeO_3^{2-}+O_2=2TeO_4^{2-}. \quad (8)$$

2.4　浸出时间对铜、硒、碲浸出率的影响

浸出时间为达到指定压力和温度后的反应时间.为探究浸出时间对铜、硒、碲浸出率的影

响,在液固比为5∶1,溶液中硫酸质量浓度为80 g/L,浸出温度为140 ℃,压力为0.8 MPa的条件下进行实验,结果如图9所示.

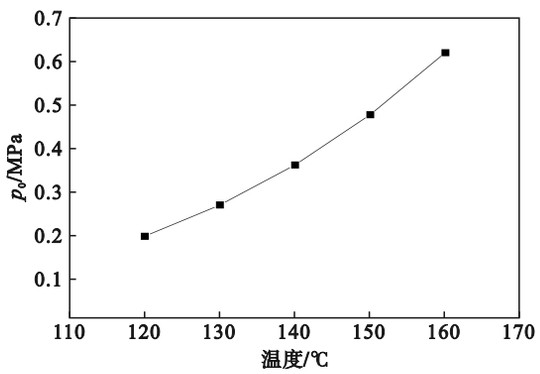


图8 水在不同温度下的饱和蒸汽压[3]

Fig. 8 Saturated vapor pressure of water at different temperatures[3]

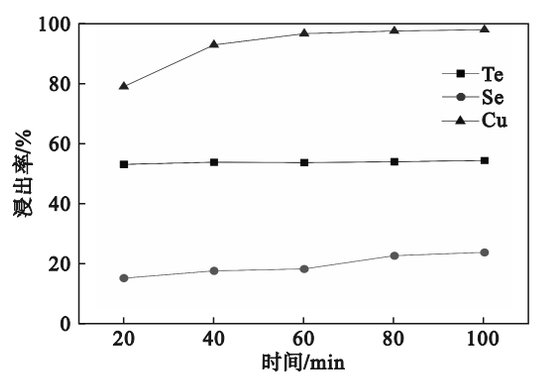


图9 浸出率受时间的影响情况

Fig. 9 Effect of leaching time on leaching rate

由图9可知,铜、硒、碲的浸出率随着浸出时间的延长呈逐步增加趋势.但浸出时间对硒和碲的浸出率影响有限,随着浸出时间的延长,硒和碲的浸出率增加不明显.反应60 min后,铜和硒的浸出率增加缓慢,碲的浸出率则趋于稳定.当浸出时间达到60 min时,铜的浸出率已经达到了96%,硒的浸出率接近20%.控制浸出时间为60 min,既有利于能耗的降低[23-24],又能实现阳极泥中铜的大量浸出,同时控制有价金属硒的损失,有利于后续卡尔多炉火法硒的回收.

2.5 浸出液固比对铜、硒、碲浸出率的影响

探究浸出液固比对铜、硒、碲浸出率的影响,控制溶液中硫酸质量浓度为80 g/L,浸出温度为140 ℃,浸出压力为0.8 MPa,浸出时间为60 min,实验结果如图10所示.

由图10可知,液固比增加使得铜、硒、碲的浸出率呈增加趋势.较低的液固比(1.5∶1)下,铜的浸出率不到70%,硒的浸出率为10%,碲的浸出率为30%,此时达不到后续阳极泥处理工艺对铜的要求;提高液固比后,铜、硒、碲的浸出率增加明显,继续增加液固比对铜、硒、碲的浸出效果影响有限.随着液固比的增加,浸出矿浆的黏度减小,液固两相的传质得到强化,同时溶液中溶解氧的总量也随之增加,更加有利于反应的顺利进行.但液固比过高会使反应体系的体积过大,增加投资成本和动力消耗,后期需要处理的液量较大从而增加水处理成本[22].液固比为2时,铜、硒、碲的浸出率分别为93%,14%和45%.液固比大于2之后,铜、硒、碲的浸出率缓慢提高.浸出液固比不能小于2,否则无法满足后续阳极泥处理工艺对铜的要求.

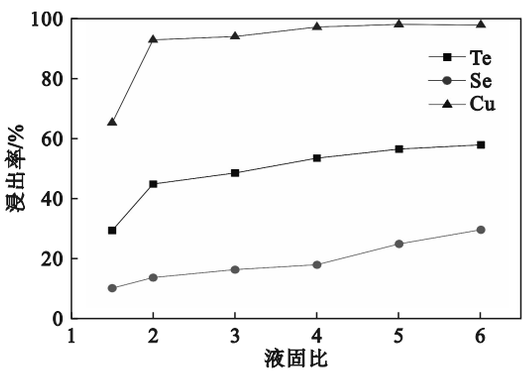


图10 浸出率受浸出液固比的作用情况

Fig. 10 Effect of liquid-to-solid ratio on leaching rate

为了探究浸出前后阳极泥的物相以及形貌变化,对浸出后的阳极泥进行了XRD和SEM分析,结果如图11和图12所示.

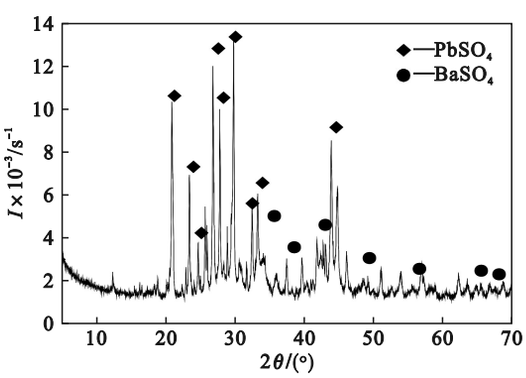


图11 浸出后铜阳极泥XRD谱

Fig. 11 XRD pattern of copper anode slime after leaching

从图11中可以看出,经过预处理后的铜阳极泥XRD谱主要为硫酸铅和硫酸钡的衍射峰.与原料的XRD谱的对比可以看出,未出现银硒化合物和硫酸铜的衍射峰,说明经过氧压处理后,铜阳极泥中主要成分转变为硫酸铅和硫酸钡.从图12氧压浸出后阳极泥的SEM和元素面扫描分布图

可以看出,经过处理后,阳极泥的整体形貌未发生明显变化,而阳极泥的表面变为多孔状结构,这是由于铜和部分硒、碲被浸出到液体中所致,从面扫描元素分布图上能证实这一点.

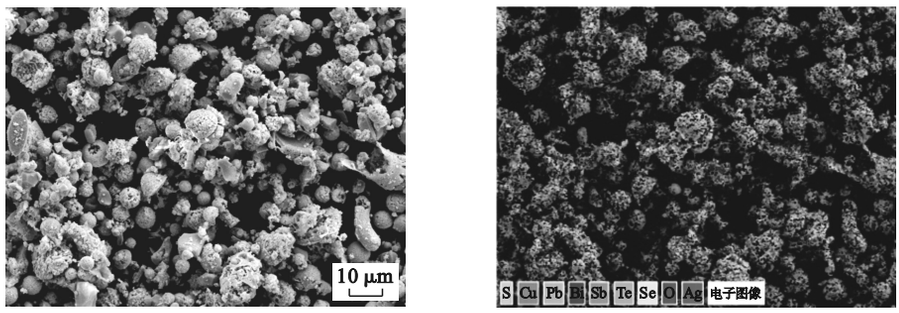


图 12　氧压浸出后阳极泥的SEM、面扫描元素分布图

Fig. 12　SEM and elemental mapping images of anode slime after oxygen pressure leaching

3　结　　论

1) 本研究对某铜冶炼企业阳极泥进行了原料分析,从XRD分析结果来看,铜阳极泥的主要物相是$PbSO_4$,$CuSO_4$以及Ag_2Se;通过SEM及面扫描结果来看,铜、银、硒、碲分布关联紧密.在预处理脱铜浸出条件下,硒和碲不可避免会进入溶液中,浸出后阳极泥主要物相是$PbSO_4$和$BaSO_4$.

2) 热力学分析表明,氧压浸出需在pH<3、有氧气参与的条件下进行,可将不溶的单质铜、硫化铜以及铜的硒化物、碲化物溶解.

3) 针对铜阳极泥进行了氧压浸出实验研究.结果表明:随着浸出酸度的增加、温度的提高、压力的增大、液固比的提高,铜、硒、碲的浸出率均有提高;而浸出时间的延长对铜、硒、碲浸出率的提升有限.在溶液硫酸质量浓度为80 g/L,温度为140 ℃,压力为0.8 MPa,时间为60 min,液固比为2的条件下,铜、硒、碲的浸出率分别为93%,14%和45%.该条件处理后满足后续工艺对铜的要求.

参考文献:

[1] 付磊, 孙健康. 铜阳极泥中稀贵金属的综合回收工艺探究[J]. 冶金与材料, 2025, 17(4): 46-48.
(Fu Lei, Sun Jian-kang. Study on comprehensive recovery technology of rare and precious metals from copper anode mud[J]. *Metallurgical and Materials*, 2025, 17(4): 46-48.)

[2] 魏迎辉, 柴胜利, 吕峰杰. 铜阳极泥提取稀贵金属的研究进展[J]. 世界有色金属, 2025(4): 1-5.
(Wei Ying-hui, Chai Sheng-li, Lyu Feng-jie. Research progress on the extraction of rare and precious metals from copper anode slime[J]. *World Nonferrous Metals*, 2025(4): 1-5.)

[3] 王吉坤, 张博亚. 铜阳极泥现代综合利用技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
(Wang Ji-kun, Zhang Bo-ya. Modern comprehensive utilization technology of copper anode mud[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.)

[4] 栾会光, 王书奎, 曲晓明, 等. 用氧压酸浸法从铜冶炼电尘灰中回收铜锌砷[J]. 湿法冶金, 2023, 42(2): 116-119.
(Luan Hui-guang, Wang Shu-kui, Qu Xiao-ming, et al. Oxygen pressure acid leaching of copper, zinc and arsenic from copper smelting dust[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2023, 42(2): 116-119.)

[5] 蔡创开, 庄荣传, 林鸿汉. 从铜阳极泥中氧压浸出有价金属试验研究[J]. 湿法冶金, 2015, 34(5): 376-379.
(Cai Chuang-kai, Zhuang Rong-chuan, Lin Hong-han. Leaching of valuable metals from copper anode slime by oxygen pressure-acid leaching process[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2015, 34(5): 376-379.)

[6] 孙福海, 王鲁, 孙海明. 铅冶炼冰铜渣氧压酸浸脱铜、铁试验研究[J]. 世界有色金属, 2022(8): 12-15.
(Sun Fu-hai, Wang Lu, Sun Hai-ming. Lead smelting ice copper slag oxygen pressure acid leaching copper and iron experimental study[J]. *World Nonferrous Metals*, 2022(8): 12-15.)

[7] 翟忠标, 牟兴兵, 刘俊场. 氧压酸浸法分离铅冰铜中的铜和铅[J]. 矿冶, 2022, 31(5): 64-70.
(Zhai Zhong-biao, Mou Xing-bing, Liu Jun-chang. Separation of copper and lead from lead matte by oxygen pressure acid leaching[J]. *Mining and Metallurgy*, 2022, 31(5): 64-70.)

[8] 李俊, 周兆安, 刘小文, 等. 多金属复杂铜阳极泥氧压酸浸预处理工艺[J]. 矿产综合利用, 2025(2): 160-164, 170.
(Li Jun, Zhou Zhao-an, Liu Xiao-wen, et al. Pretreatment process of polymetallic complex copper anode slime by oxygen pressure acid leaching[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2025(2): 160-164, 170.)

[9] 蒋震清. 铜阳极泥二次预处理工艺优化[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(2): 50-53.
(Jiang Zhen-qing. Optimization of secondary pretreatment process of copper anodized mud[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2018(2): 50-53.)

[10] 郭学益, 刘左伟, 田庆华, 等. 稀散金属高效分离提取及高纯化制备[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(11): 3685-3712.
(Guo Xue-yi, Liu Zuo-wei, Tian Qing-hua, et al. Efficient separation and purification of scattered metals[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2024, 34(11): 3685-3712.)

[11] 刘元辉, 张善辉, 贺东晓, 等. 高硒碲铜阳极泥协同高铜渣硫酸化焙烧工艺研究[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(5): 95-102.

(Liu Yuan-hui, Zhang Shan-hui, He Dong-xiao, et al. Sulfated roasting process of high selenium tellurium copper anode slime combined with high copper slag [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2024, 53(5): 95−102.)

[12] 彭国敏, 张玉明, 张福元, 等. 高铅含硒物料湿法处理回收硒的工艺研究[J]. 稀有金属, 2015, 39(10): 928−933.
(Peng Guo-min, Zhang Yu-ming, Zhang Fu-yuan, et al. Hydrometallurgical process study on selenium recovery from lead-rich selenium concentrates [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2015, 39(10): 928−933.)

[13] 曾颜亮. 高杂铜阳极泥中硒碲定向富集及梯级分离基础研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2024.
(Zeng Yan-liang. Basic research on targeted enrichment and cascade separation of selenium and tellurium in high-ductility copper anode sludge [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2024.)

[14] 颜婉晴,张德超,林玥,等.炼铜阳极泥中铜、硒的选择性浸出[J].中国有色金属学报,2025,35(06):2195−2206.
(Yan Wan-qing, Zhang De-chao, Lin Yue, et al. Selective leaching of copper and selenium from copper smelting anode mud [J]. *China Nonferrous Metals Journal*, 2025, 35(06):2195−2206.)

[15] 刘勇. 杂铜阳极泥综合回收有价金属新工艺研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
(Liu Yong. Study on new technology of comprehensive recovery of valuable metals from copper anode slime [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.)

[16] Dong Z L, Jiang T, Xu B, et al. Comprehensive recoveries of selenium, copper, gold, silver and lead from a copper anode slime with a clean and economical hydrometallurgical process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 393: 124762.

[17] Kurniawan K, Lee J C, Kim J, et al. Augmenting metal leaching from copper anode slime by sulfuric acid in the presence of manganese (IV) oxide and graphite [J]. *Hydrometallurgy*, 2021, 205: 105745.

[18] Yang H Y, Li X J, Tong L L, et al. Leaching kinetics of selenium from copper anode slimes by nitric acid-sulfuric acid mixture[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(1): 186−192.

[19] 章尚发, 王冲, 王华, 等. 氯化浸出−还原法处理铜阳极泥分铜渣[J]. 稀有金属与硬质合金, 2014, 42(1): 5−8, 69.
(Zhang Shang-fa, Wang Chong, Wang Hua, et al. Treatment of copper-separated residue from copper anode slime by chlorination leaching and reduction [J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2014, 42(1): 5−8, 69.)

[20] 蔡兵, 陶雷, 王郎郎, 等. 铜冶炼烟尘金属分离及资源回收研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(3): 882−894.
(Cai Bing, Tao Lei, Wang Lang-lang, et al. Research progress on metal separation and resource recovery of copper smelting dust [J]. *Journal of Central South University* (*Science and Technology*), 2024, 55(3): 882−894.)

[21] 李阳, 寇珏, 傅钰辉, 等. 微波预热强化某难浸氧化铜矿浸出行为及机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(11): 4274−4282.
(Li Yang, Kou Jue, Fu Yu-hui, et al. Behavior and mechanism of enhanced leaching of copper from refractory oxidized copper ore by microwave preheating [J]. *Journal of Central South University* (*Science and Technology*), 2024, 55(11): 4274−4282.)

[22] 廖春发, 彭珊, 邹耕, 等. 基于RSM超声波−微波协同氧化浸出铜阳极泥分铜渣中碲的研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2020, 48(2): 10−17, 21.
(Liao Chun-fa, Peng Shan, Zou Geng, et al. Study on ultrasonic-microwave synergistic oxidation leaching of tellurium from copper-separated residue of copper anode slime based on RSM [J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2020, 48(2): 10−17, 21.)

[23] 钟清慎.铜阳极泥加压浸出及浸出液中碲和硒的提取研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.
(Zhong Qing-shen. Study on pressure leaching of copper anode mud and extraction of tellurium and selenium from leachate [D]. Xi 'an: Xi 'an University of Architecture and Technology, 2014.)

[24] 易超. 铜阳极泥氧压酸浸预处理脱铜的工艺试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
(Yi Chao. Experimental study on copper removal from copper anode slime by oxygen pressure acid leaching pretreatment [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.)