

引文格式:石瑀, 彭珊, 王俊娥, 等. 难处理金矿造低铜钼捕金试验研究[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(5): 58-64.

SHI Yu, PENG Shan, WANG June, et al. Experimental study on gold collection in low copper matte of refractory gold ore [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(5): 58-64.

难处理金矿造低铜钼捕金试验研究

石瑀^{1,2}, 彭珊^{1,2}, 王俊娥^{1,2}, 田博^{1,2}, 廖元杭^{1,2}

(1. 低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室, 福建 厦门 361101;

2. 厦门紫金矿冶技术有限公司, 福建 厦门 361101)

[摘要] 目前对于微细粒低金高硫金矿、硅酸盐包裹类金矿等难处理金矿, 文献中多采用协同含铜物料火法熔炼, 利用钼相对贵金属的捕集能力实现矿中有价金属的综合回收, 但实际生产会受到铜冶炼原料的供应限制。针对此情况, 本文以国外某低铜难处理金矿为原料, 不添加含铜物料, 通过造低铜钼进行捕金, 研究采用 FactSage 软件探究了 FeS 与铁硅渣间的平衡分离关系, 并通过单因素试验考察了温度、渣型等对金属回收率的影响, 得到以下主要结论。Factsage 分析表明, 在 1 300 °C 下 FeS-FeO-SiO₂ 系中, 通过控制冶炼渣型, 即使钼相中含铜很低或者不含铜, 也可以实现钼相与铁硅渣两相分离; 单因素试验表明, 在温度 1 300 °C、保温沉淀时间 60 min、渣相 Fe/SiO₂ = 1.3、CaO/SiO₂ = 0.2 的条件下, 钼相金、铜品位分别为 34.4 g/t 和 2.98%, 金、铜回收率分别为 96.8% 和 92.3%; 物相组成方面, 钼相主要由铁橄榄石、磁性铁、硫化亚铁和多金属合金 4 相组成, 金与矿中砷、锑、镍等伴生元素共同高度富集于钼相中合金相。

[关键词] 难处理金矿; 造钼捕金; 低铜钼; 渣相; 金回收; 铜回收

[中图分类号] TF811 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)05-0058-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.05.006

0 引言

金是一种十分重要的稀贵金属, 是自然界中延展性最好的金属之一, 其在地壳中赋存稀少且性质稳定, 兼具货币和商品双重属性的特殊战略储备功能, 现已广泛应用于航空航天、核工业、电子器械等多个领域^[1-2]。

矿产金仍为金的主要来源, 随着金矿开采规模的不断加大, 优质易处理金矿日益枯竭, 据统计, 世界已探明金矿中的难处理金矿比例已达 60%~70%^[3], 难处理金矿逐渐成为黄金生产企业的主要原料之一。通常, 如某种矿石经细磨后

仍无法获得满意的金氰化浸出率 (>80%), 就可将其称为难处理金矿^[4]。根据难处理金矿的选冶特点, 大体可以分为如下几种类型^[5-7]: ①包裹型金矿, 矿中金以微细粒、亚显微级存在, 并被硅酸盐、硫化物等包裹, 难以细磨解离进入氰化液; ②碳质金矿, 矿中活性炭、无定形碳等在氰化浸出过程吸附溶解金, 形成“劫金”现象; ③耗氰型金矿, 矿中硫化物消耗大量氧, 并形成氰络合物和硫氰根, 如磁黄铁矿、砷黄铁矿、黄铜矿等, 抑制金的溶解和浸出; ④难溶类金矿, 矿中金以碲化物、铋化物及其他合金形式存在, 如碲金矿、碲锑矿、银金矿、黑铋金矿等, 金难以在氰化液中溶解; ⑤钝化类金矿, 氰化过程金颗粒表面形成氧化物膜、硫化膜等钝化膜, 如过氧化钙膜、As₂S₃ 胶体等, 急剧降低金在氰化物中的溶解速率。

另需额外指出, 上述金矿类型仅对金矿的典型难处理特质进行划分, 同一种金矿可能同时具备以上多种难处理特质。

[收稿日期] 2025-01-21

[第一作者] 石瑀(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事金铜火法冶金工艺研究。

[基金项目] 国家重点研发计划项目“低品位钼金多金属矿高效富集与分离提取技术”(2023YFC2907800)。

为提高难处理金矿的金回收率,常在氰化提金前对其进行预处理,常用的预处理方法有焙烧氧化法、加压氧化法、生物氧化法等^[8-9],但仍存在一定限制,如微细粒低金高硫金矿、硅酸盐包裹类金矿等,现有提金工艺仍难经济处置,不同程度的存在金回收率低、投资运维成本高、处理周期长等问题。为此,部分学者提出火法提金工艺,利用钼相对贵金属的捕集能力,实现矿中有价金属的综合回收。杨天足等^[10]将含砷难处理金矿和氧化铜协同造钼熔炼,较优试验条件下,金在铜钼中得到有效富集,金回收率为99.98%;张杜超等^[11]将含铋高砷难处理金矿与铜精矿协同造钼熔炼,较优试验条件下,金回收率为98.16%。Kozhakhmetov^[12]以含砷难处理金矿为原料,通过还原熔炼使金富集在铜钼中,较优试验条

件下,渣含金可以降至0.1~0.16 g/t。然而,现有研究仍多集中于难处理金矿与富铜物料的协同冶炼,实际生产过程中,仍会受到铜冶炼原料的供应限制,单独使用金矿造低铜钼捕金的研究仍然较少,具有较为重要的研究意义。

基于此,本文以国外某低铜难处理金矿为原料,通过造钼熔炼,使金富集在低铜钼相中,实现矿中有价金属的富集回收,降低提金成本。

1 试验

1.1 试验原料

原料为国外某浮选含铜金精矿,经60℃脱水干燥后,破碎、研磨至200目(0.074 mm)占比50%,进行化学分析,主要化学成分见表1。

表1 金精矿主要化学成分(质量比)

Table 1 Chemical composition of gold concentrate (mass percent)

成分	Cu	Fe(Total)	S	As	Sb	Ni	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Au*
含量	0.84	38.28	45.19	0.02	0.01	0.01	12.06	0.45	0.61	0.01	4.69

注:标记*元素单位为g/t。

由表1可知,矿中Cu、Fe、S的含量分别为0.84%、38.28%和45.19%。金含量为4.69 g/t。为探究主要物相组成,进行XRD分析,结果如图1所示。

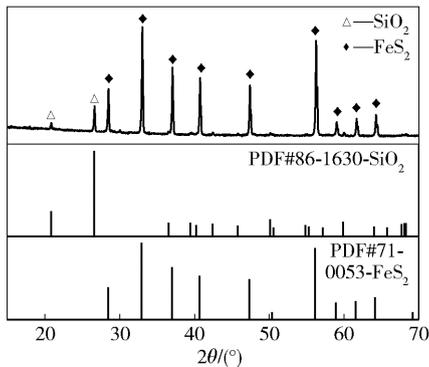


图1 金精矿 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of gold concentrate

由图1可知,金精矿中的铁主要以黄铁矿形式存在,硅主要以SiO₂形式存在。其他物相因含量过低而未被检测到。为进一步分析矿中金的存在形式,通过MLA和化学浸出的联合表征方法,进行了金物相分析,结果见表2。表2表明,矿中非包裹金含量占比约14.18%;金主要被包裹在硫化物中,占

比约76.67%;少量金被包裹在氧化物、碳酸盐、硅酸盐等脉石矿物中。

表2 金矿的金物相分析(质量比)

Table 2 Analysis of the form of gold existence in gold mines (mass percent)

含金物相	非包裹金	碳酸盐及氧化物包裹金	硫化物包裹金	硅酸盐及其他包裹金	合计
含量	14.18	2.97	76.67	0.18	100

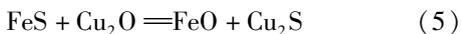
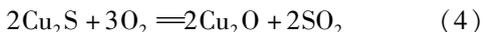
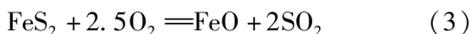
氧化铁熔剂为试验用金精矿高温富氧焙烧自制而成。其他试验熔剂,如CaO、SiO₂等,均为分析纯试剂,外购。

1.2 试验设备及方法

试验设备为立式高温电阻炉,温度误差±2℃。试验反应容器为高纯刚玉坩埚。试验过程中,先将金矿与一定比例的氧化铁(试验金矿氧化焙砂)、氧化硅等熔剂混合均匀,共同转入刚玉坩埚,再将载料坩埚置于电炉恒温区,以10℃/min的升温速率加热物料至设定温度,保温一定时间后,将装有样品的坩埚取出水淬,并对样品中的钼相与渣相进行机械分离,分别进行物化性质分析,通过目标金属在渣中剩余的量计算金属回收率。

2 造钼捕金过程热力学分析

金矿造钼捕金是在高温下,使金矿和熔剂在高温下共同进行氧化还原反应,利用钼相对金的强亲和力,使矿中金等有价金属富集于钼相中,并基于渣钼两相的差异性,实现渣钼分离。熔炼体系主要有 Cu-Fe-S-O-Si 五个主要成分。熔炼过程主要化学反应见式(1)~(7)。



因金矿含铜较低,较于铜冶炼,熔炼产出的钼相铜品位低,渣钼两相的密度差值更小,金矿熔炼所需的渣钼分离条件也将更为苛刻,考虑到金矿完全不含铜的极限情况,利用 Factsage 软件绘制了 1300 °C 下 FeS-FeO-SiO₂ 系相平衡图(CaO 加入量很少,不考虑),见图 2。由图 2 可知,如能良好控制冶炼渣型,即使钼相铜品位为 0%,钼相也能与铁渣渣完成两相分离,即低铜金矿造钼捕金在理论上可行。

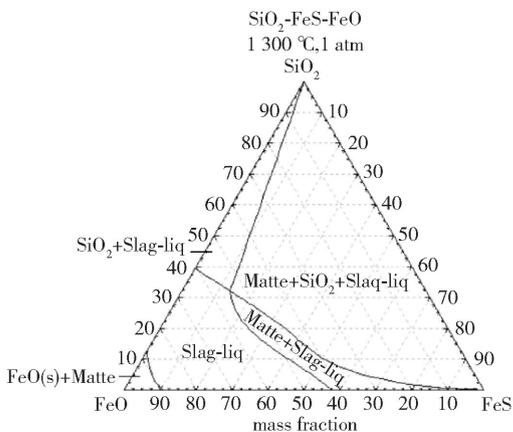


图 2 FeO-FeS-SiO₂ 相平衡图

Fig. 2 FeO-FeS-SiO₂ phase diagram

3 结果与讨论

3.1 铁硅比的影响

在温度 1300 °C、保温沉降 60 min、不添加 CaO 的条件下,探究渣相中 $m(\text{Fe})/m(\text{SiO}_2)$ (后文简称铁硅比)对渣中金、铜、硫含量的影响,试验结果如

图 3 所示。

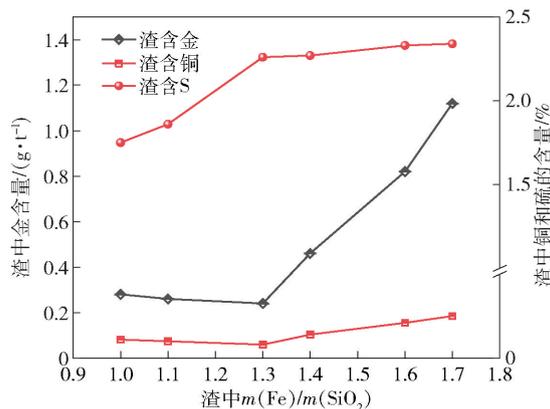


图 3 铁硅比对渣中金、铜、硫含量的影响

Fig. 3 Effect of $m(\text{Fe})/m(\text{SiO}_2)$ on the content of gold, copper, and sulfur in slag

由图 3 可知,随着渣相铁硅比增大,渣中 S 含量逐渐升高,这是由于随着铁硅比增大,渣中 FeO 活度升高,FeS 与渣中 FeO 的互溶趋势增强^[9],渣中 FeS 的溶解损失增大。渣中金、铜含量方面,随着渣相铁硅比增大,渣中金、铜的含量先减小后增大,当铁硅比为 1.3 时有最小值,这是由于随着铁硅比增大,渣中 FeO 活度逐渐升高,熔渣碱度升高,渣中复杂的硅酸盐网络结构逐渐解聚为单体、二聚体等简单结构,熔渣流动性增强,提高了渣钼分离效果;随着铁硅比进一步增大,熔渣氧势增大,渣中磁性铁含量升高,高熔点复杂尖晶石相占比增大,熔渣黏度升高,渣中有价金属的机械损失增大^[12]。综合考虑,确定渣相铁硅比 1.3 为最优技术条件。

3.2 钙硅比的影响

在温度 1300 °C、保温沉降时间 60 min,渣相铁硅比 1.3 的条件下,探究渣相中 $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)$ (后简称钙硅比)对渣中金、铜、硫含量的影响,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,渣中金、铜、硫的含量随着渣相钙硅比增大而减小,当渣相钙硅比为 0.2,渣中金、铜、硫的含量分别为 0.22 g/t、0.09% 和 1.38%;继续增大钙硅比,渣中有价金属含量无明显变化。这可归因于三方面原因:①CaO 能对渣中复杂的硅酸网络结构产生破坏^[13],并增大渣钼两相界面张力,随着渣相钙硅比增大,渣系黏度降低,流动性增强,促进了渣中微小钼相的聚集、长大、沉降,渣中金、铜的含量降低;②钙离子(Ca²⁺)的离子半

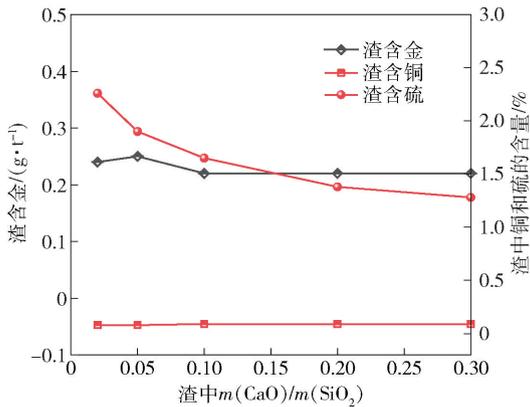


图4 钙硅比对渣中金、铜、硫含量的影响

Fig. 4 Effect of $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)$ on the content of gold, copper, and sulfur in slag

径与铜离子(Cu^+)的离子半径极为相近,随着氧化钙配比增大,钙离子能有效取代熔渣中的部分铜离子^[14-15],降低渣中金、铜的损失;③氧化钙能促进磁铁矿的还原反应^[16],并能与渣中 FeO 和 SiO_2 结合,形成钙铁硅酸盐,降低 FeS 与渣中 FeO 的互溶性,改善熔渣性质。综合考虑,确定渣相钙硅比0.2为最优技术条件。

3.3 温度的影响

在渣相铁硅比1.3、钙硅比0.2、保温沉降时间120 min的条件下,探究熔炼温度对渣中金、铜、硫含量的影响,结果如图5所示。

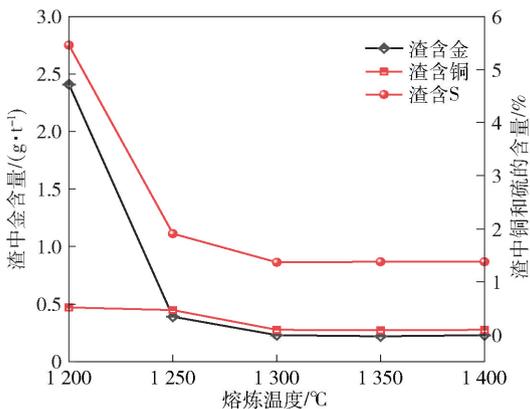


图5 熔炼温度对渣中有价元素含量的影响

Fig. 5 Effect of smelting temperature on the content of gold, copper, and sulfur in slag

由图5可知,渣中金、铜、硫的含量随冶炼温度增大而减小,当冶炼温度为1300℃,渣中金、铜、硫的含量分别为0.23 g/t、0.10%和1.37%;继续增大

冶炼温度,渣中金、铜、硫的含量无明显下降趋势。这可归因于两方面原因^[17]:①温度升高加剧了熔体分子间热运动,促进了渣中 Fe_3O_4 与 FeS 的还原造渣反应,渣中高熔点尖晶石相减小,熔渣黏度降低,流动性增强;②随着熔炼温度升高,熔渣中复杂硅酸盐结构逐渐解聚,渣系黏度逐渐减小^[13],促进了渣中微小铁硫相的聚集沉降速率,渣硫分离效果显著提高。进一步提高熔炼温度,熔渣结构无法继续解聚,综合考虑,确定1300℃为最优冶炼温度。

3.4 沉降时间的影响

在渣相铁硅比1.3、钙硅比0.2、熔炼温度1300℃的条件下,探究保温沉降时间对渣中金、铜、硫含量的影响,结果如图6所示。

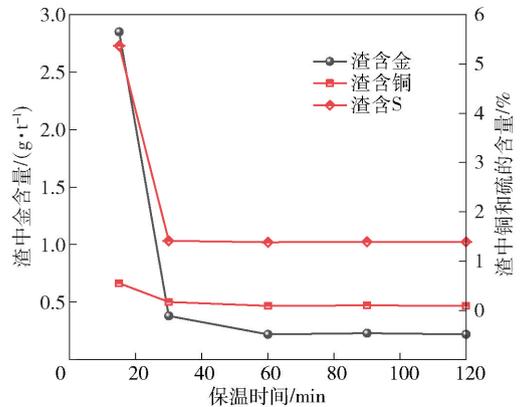


图6 沉降时间对渣中金、铜、硫含量的影响

Fig. 6 Effect of holding time on the content of gold, copper, and sulfur in slag

由图6可知,渣中有价金属含量随沉降时间增大而增大,当保温沉降时间大于60 min,渣中有价金属含量无明显变化。这是由于渣中金、铜损失分为两类,即化学溶解和机械夹带,化学溶解损失一般分为氧化态损失和硫化态损失^[17],主要由熔渣自身性质决定,难以通过延长沉降时间降低;对于机械夹带损失,熔体保温沉降过程中,渣中细小硫滴在重力的作用下向熔体底部逐渐汇聚,随着沉降时间增大,上层渣中金、铜的含量逐渐降低,实现渣硫分离,但在硫滴沉降过程中,部分细小硫滴与枝晶状磁性铁相接触并吸附于磁性铁颗粒表面^[18],出现机械夹杂损失,难以通过延长沉降时间持续降低渣含铜。综合考虑,确定60 min为最优保温时间。

3.5 综合条件试验

在温度1300℃、保温沉降时间60 min、渣相铁

硅比 1.3、钙硅比 0.2 条件下,开展金矿造钼捕金综合条件试验,结果表明,渣中金、铜的含量分别为 0.23 g/t 和 0.10%。金铜回收率分别为 96.8% 和 92.3%。渣相、钼相主要化学元素组成见表 3。

表 3 渣相、钼相主要化学元素组成(质量比)

Table 3 The main element composition table of

Matte(mass percent) %

分析项	Cu	Fe	S	Au*
渣相	0.10	42.10	0.83	0.23
钼相	2.98	60.83	24.49	34.4

注:标记*元素单位为 g/t。

由表 3 可知,渣中铜、铁、硫、金的含量分别为 0.1%、42.1%、0.83% 和 0.23 g/t。为进一步探究钼相组成与微观形貌,对钼相进行了 SEM-EDS 表征,结果如图 7 所示。

图 7 显示了钼相的微观形貌,结合能谱分析可知,钼相中主要存在 4 个明显物相,分别为铁橄榄石相(点 1)、磁性铁相(点 2)、合金相(点 3)和钼相(点 4)。钼相为基底,铁橄榄石相、磁性铁相和合金相夹杂其中,其中,合金相颜色最亮,形貌呈类球形分布。有价金属分布方面,金高度富集与 Cu-Ni-Sb 合金相中;铜主要分布于合金相和钼相中;铁主要分布于钼相、磁性铁相和铁橄榄石相中。金矿造

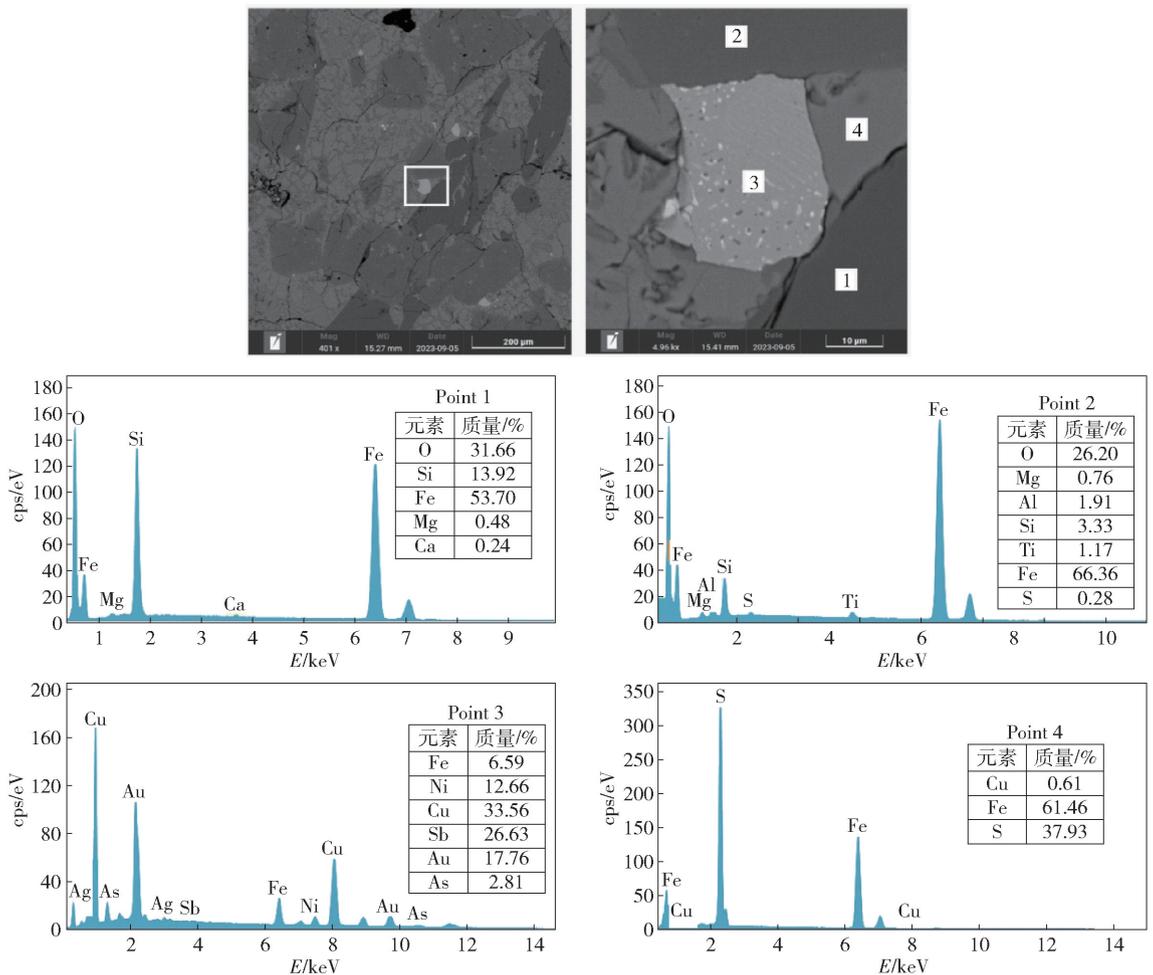


图 7 钼相微观形貌及能谱分析

Fig. 7 The Microscopic morphology and energy spectrum analysis of matte

钼熔炼过程中,因钼相与铜、镍等金属元素具有较强的亲和力^[19],金能以单质形式进入低铜品位钼

相中,并进一步高度富集于钼相中的金属相,利于有价金属的高效富集回收。

4 结论

针对低金高硫、硅酸盐包裹等类型金矿难处理问题,本文以国外某低铜难处理金矿为原料,不添加含铜物料,通过造低品位铜钼进行捕金,研究在采用FactSage软件分析FeS与铁硅渣间的平衡分离关系的基础上,通过单因素试验考察了各工艺参数对金、铜回收率的影响,得到以下主要结论。

1)Factsage软件分析表明,在1300℃下FeS-FeO-SiO₂系中,如能控制冶炼渣型,即使钼相铜品位为0%,钼相也能与铁硅渣完成两相分离。

2)试验用金矿造钼捕金的最优工艺条件为熔炼温度1300℃、保温沉降时间60min、渣相铁硅比1.3、渣相钙硅比0.2,该条件下,熔炼渣中金铜品位分别为0.23g/t和0.1%,熔炼金铜回收率分别为96.8%和92.3%。

3)低铜金矿可以通过造钼熔炼实现金的富集回收,产出的低铜钼相主要由铁橄榄石、磁性铁、硫化亚铁和多金属合金等4相组成,金与矿中砷、锑、镍等伴生元素共同高度富集于铜钼中金属相。

[参考文献]

- [1] 田庆华,王浩,辛云涛,等. 难处理金矿预处理方法研究现状[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(2): 83-89.
TIAN Q H, WANG H, XIN Y T, et al. Research status of pretreatment of refractory gold ore[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(2): 83-89.
- [2] 王忠卫,王世颖,张书圣. 黄金提取技术研究进展[J]. 青岛化工学院学报, 2000, 21(2): 108-111.
WANG Z W, WANG S Y, ZHANG S S. Development of technologies of gold extracting[J]. Journal of Qingdao Institute of Chemical Technology, 2000, 21(2): 108-111.
- [3] 钱方珺. 臭氧和三氯化铁氧化高硫高砷难浸金精矿的预处理试验研究[D]. 上海: 东华大学, 2009.
QIAN F J. Experimental study in pretreatment of high-sulfur and high-arsenic refractory gold concentrate by Ozone and ferric chloride[D]. Shanghai: Donghua University, 2009.
- [4] 刘汉钊. 难处理金矿石堆浸的预处理技术[J]. 四川地质学报, 1997, 17(3): 231-233.
LIU H Z. Pre treatment technique for heap leaching of refractory gold ore[J]. Acta Geologica Sichuan, 1997, 17(3): 231-233.
- [5] 刘志楼,杨天足. 难处理金矿的处理现状[J]. 贵金属, 2014, 35(1): 79-89.
LIU Z L, YANG T Z. Treatment status for refractory gold ores [J]. Precious Metals, 2014, 35(1): 79-89.
- [6] 孙春宝,魏德洲. 国内外难处理金矿资源的开发利用[J]. 国外金属矿选矿, 1996, 33(3): 3-6.

- SUN C B, WEI D Z. Development and utilization of refractory gold resources at home and abroad[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1996, 33(3): 3-6.
- [7] 刘汉钊. 难处理金矿石难浸的原因及预处理方法[J]. 黄金, 1997, 18(9): 44-48.
LIU H Z. The processing and recovery of fine-grained alluvial gold [J]. Gold Science and Technology, 1997, 18(9): 44-48.
- [8] 崔永霞,沈燕. 难处理金矿石提纯技术研究进展[J]. 黄金科学技术, 2007, 15(3): 53-57.
CUI Y X, SHEN Y. The Difficult processing gold mine stone refines the technique research development[J]. Gold Science and Technology, 2007, 15(3): 53-57.
- [9] 郭学益,王松松,王亲猛,等. 造钼捕金机理及富氧熔炼过程贵金属分配行为[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2951-2962.
GUO X Y, WANG S S, WANG Q M, et al. Mechanism of gold collection in matte and distribution behavior of precious metals in oxygen-enriched smelting process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(12): 2951-2962.
- [10] 杨天足,卢一帆,张杜超,等. 造钼熔炼富集含砷难处理金矿中金的研究[J]. 贵金属, 2019, 40(2): 5-11.
YANG T Z, LU Y F, ZHANG D C, et al. Enriching gold from refractory arsenic-bearing gold ore by matte smelting method[J]. Precious Metals, 40(2): 5-11.
- [11] ZHANG D C, XIAO Q K, YANG T Z, et al. Enrichment of gold in low grade copper matte from arsenical refractory gold concentrate via matte smelting method: TMS/7th [M]. 7th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, 2016, 139-146.
- [12] Kozhakhmetov S M, Kvyatkovskiy S A. Reducing pyrometallurgical selection of particularly refractory ledge gold ore [J]. Eurasian Chemico-Technological Journal, 2017, 19(1): 71.
- [13] YANG T Z, XIE B Y, LIU W F, et al. Enrichment of gold in antimony matte by direct smelting of refractory gold concentrate [J]. JOM, 2018, 70(6), 1017-1023.
- [14] 张家靓,杨旭,张建坤,等. 铜渣组份含量对渣钼高温沉降分离效果的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(8): 1712-1720.
ZHANG J L, YANG X, ZHANG J K, et al. Influence of slag contents on sedimentation separation of slag and matte at high temperature [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(8): 1712-1720.
- [15] MACKEY P J. The physical chemistry of copper smelting slags-a review [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1982, 21(3): 221-260
- [16] 蔡振平,刘进,远忠森,等. 含铜炉渣的火法强化贫化[J]. 有色金属(冶炼部分), 1999(2): 13-15.
CAI Z P, LIU J, YUAN Z S, et al. Fire strengthening cleaning of copper-bearing slag [J]. Nonferrous Metals (Extractive

- Metallurgy), 1999(2): 13 – 15.
- [17] 周世伟. 餐厨废油还原贫化富氧顶吹熔炼铜熔渣的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- ZHOU S W. Study on the reduction of depleted oxygen-enriched top-blown smelting copper slag by kitchen waste oil [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [18] EUSTATHOPOULOS N, NICHOLAS M G, DREVET B. Wettability at high temperatures [M]. Pergamon: Oxford, 1999.
- [19] DEGTEROV S A, PELTON A D. Thermodynamic modeling of lead distribution among matte, slag, and liquid copper [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 1999, 30(6): 1031 – 1044.

Experimental study on gold collection in low copper matte of refractory gold ore

SHI Yu^{1,2}, PENG Shan^{1,2}, WANG June^{1,2}, TIAN Bo^{1,2}, LIAO Yuanhang¹

(1. State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-Grade Refractory Gold Ores, Xiamen 361101, China;

2. Xiamen Zijin Mining and Technology Co., Ltd., Xiamen 361101, China)

Abstract: At present, it is difficult to treat fine-grained low-gold and high-sulfur gold ores, silicate-coated gold ores and other refractory gold ores. In the literature, the pyrometallurgical smelting of copper-containing materials is mostly used, and the comprehensive recovery of valuable metals in the ore is realized by using the capture capacity of matte relative to precious metals, However, the actual production will be limited by the supply of copper smelting raw materials. Therefore, in this paper, a low-copper refractory gold mine abroad is used as the raw material, without adding copper-containing materials, and gold is captured by low-copper grade matte. The equilibrium separation relationship between FeS and Iron olivine slag was investigated by FactSage software, The effects of temperature and slag type on metal recovery rate were investigated by single factor test, and the following main conclusions were obtained. Factsage analysis shows that in the FeS–FeO–SiO₂ system at 1 300 °C, the two-phase separation of matte phase and iron-silicon slag can be achieved by controlling the type of smelting slag, even if the matte phase contains very low copper or does not contain copper. Under the conditions of temperature of 1 300 °C, holding time of 60 min, Fe/SiO₂ = 1.3, CaO/SiO₂ = 0.2, the matte phase gold and copper grades were 34.4 g/t and 2.98%, respectively, and the gold and copper recovery rates were 96.8% and 92.3%, respectively. In terms of phase composition, the matte phase is mainly composed of four phases: fayalite, magnetic iron, ferrous sulfide and polymetallic alloy. The associated elements such as arsenic, antimony and nickel in gold and ore are highly enriched in the alloy phase of copper matte.

Key words: refractory gold ores; capture of gold by molten matte; low copper grade matte; slag phase; gold recovery; copper recovery