

铅冰铜富氧侧顶吹熔炼中试研究

郭徽 张岭 柏韬 汤凯乐

(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南长沙 410000)

[摘要] 针对铅冰铜复杂物料熔炼效率低、Cu与Pb分离不彻底、粗铜品位不高等技术难题,采用自主开发的富氧侧顶吹熔炼试验装备开展了中试试验。试验结果表明,在温度1250℃、氧气浓度60%的条件下,铅冰铜侧顶吹熔炼可一步产出粗铜,粗铜含Cu量达到94.03%,含Pb量为0.11%,主要杂质Pb、As和Sb的脱除率分别约为99%、90%和85%。采用该工艺,熔炼造渣+吹炼造铜可在同一反应器内完成,冶炼周期缩短至24h,煤率9.6%,相较于传统工艺,冶炼效率大幅提升、操作环境好、能耗低,该工艺具有较好的应用前景。

[关键词] 铅冰铜;富氧侧吹;顶吹;一步炼铜

[中图分类号] TF812

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2024)03-0026-09

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.03.005

0 前言

铅冰铜是一种含有Cu、Pb、S、Fe、Ag、As、Sb等多种金属的复杂化合物,产生于铅、铜等重金属火法冶炼过程^[1-2],其最主要来源为粗铅初步火法精炼。根据不同精炼方法,铅冰铜主要分为两种:一是熔铅锅精炼产出的铜浮渣经过反射炉处理得到的铅冰铜^[3];二是连续精炼炉直接产出的铅冰铜。另外,还有少量铅冰铜是含铜量较高的炼铅原料熔炼过程产出的。不同来源的铅冰铜的化学成分有较大差异。反射炉产出的铅冰铜主要含有Cu₂S、FeS、PbS和ZnS等金属硫化物以及一定量的Ag、As等元素,通常Cu含量30%~40%,Fe含量10%~20%,Pb

含量10%~20%^[4];采用连续精炼炉脱铜工艺产出的铅冰铜含铜量为45%~55%,含铅量20%左右,铁、硫含量很低,大部分铜、铅以合金的形态存在^[5];铅熔炼炉放出的铅冰铜含铁量、含硫量很低,含铅量较高。

目前,铅冰铜中有价金属的回收工艺通常分为湿法和火法两种,其中湿法冶炼工艺主要有酸浸法^[6-8]、氯化浸出法^[9]、氨浸法^[10]等。由于湿法处理在浸出时会产生大量的冶炼渣,固液分离及后续废渣无害化处置较为困难,因此,湿法处理铅冰铜的工业化应用较少。

铅冶炼企业主要采用火法工艺处理铅冰铜,其中火法工艺又大致分为传统火法吹炼和转炉熔池吹炼两类。传统火法处理工艺包括反射炉法、鼓风炉法等^[11],这些方法存在以下问题:①效率低,吹炼一炉铅冰铜一般需要3~7d;②能耗高,尤其是反射炉热效率仅为30%左右;③机械化、自动化水平低;④无法彻底地分离铜和铅,要经过2~3道工序才能得到粗铜。

有部分企业采用转炉吹炼处理铅冰铜^[12-13],以硅石作熔剂,渣型为FeO-SiO₂铁橄榄石渣,这一渣型可将吹炼造渣末期产生的PbO大部分脱除,但残留在白冰铜中的铅在造铜期脱除率不高,且冰铜仍需进一步吹炼才能得到粗铜,两步操作使整个造铜

[收稿日期] 2024-04-30

[基金项目] 国家重点研发计划项目“复杂铜基多金属固废绿色协同冶炼技术与成套装备研究”(2018YFC1901606)。

[作者简介] 郭徽(1987—),男,河北张家口人,博士,工程师,主要从事重金属冶炼及二次资源综合回收研究工作。

[引用格式] 郭徽,张岭,柏韬,等. 铅冰铜富氧侧顶吹熔炼中试研究[J]. 绿色矿冶,2024,40(3):26-34.

GUO Hui, ZHANG Ling, BAI Tao, et al. Pilot test study on oxygen-enriched side-top-blown smelting of lead matte[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(3): 26-34.

周期依然在 2~3 d,吹炼效率有待进一步提高。

广西某铅冶炼企业年产铅冰铜 1.2 万 t。该企业采用反射炉将铜浮渣熔化,并加入纯碱、硫铁矿、粒煤等辅料进行还原,使大部分 Pb 以粗铅形式返回熔铅锅,Cu 元素被捕集至冰铜相。但由于反射炉熔炼强度较低,且多相分离不彻底,导致冰铜中依然夹杂一定量的 Pb,同时含有一定量 FeS,形成较难处理的铅冰铜。目前该企业铅冰铜处置采用的是双反射炉工艺,首先进行熔炼脱硫、脱铅,形成黑铜合金,再进行吹炼除杂产出粗铜。该工艺主要存在三方面问题:①流程长,吹炼强度小,单炉次吹炼周期 8~10 d,工作效率低;②铜铅分离不彻底,冰铜含铅量较高,需进行铜、铅深度分离;③粗铜品位低,仅 80% 左右,其中杂质 As 含量约 9%,Sb 含量约 4.7%,需要提高粗铜品位等。因此,亟需一种新的强化熔炼方法提高铅冰铜 Cu 回收效率。为了进一步提高铅冰铜吹炼效率,本文利用自主开发的富氧侧顶吹中试装备进行了半工业化试验。

1 试验

1.1 原燃料及熔剂

原料为浮渣反射炉所产铅冰铜,其化学元素测试结果列于表 1。

表 1 铅冰铜样品化学分析测试结果 %

元素	Cu	Pb	Zn	Fe	As
含量	33	12	1.5	9	10
元素	S	Ag	Sb	Bi	
含量	10	0.15	3	0.4	

采用粒状及粉状无烟煤作为燃料,为冷料熔化及造渣过程提供热源,无烟煤化学成分列于表 2。

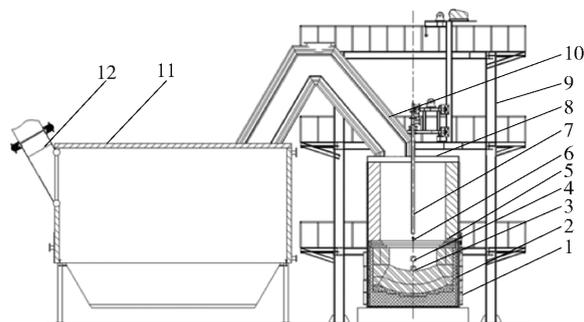
表 2 无烟煤化学分析测试结果 %

成分	固定碳	S	灰分	挥发分	H ₂ O
含量	77	0.5	9.5	10	3

1.2 试验设备

本试验采用的熔炼设备为侧顶复吹熔炼炉。与传统的熔池熔炼设备有所不同,该设备可在同一熔池空间内同时具备顶吹和侧吹功能,且顶吹喷枪高度可调,顶、侧吹喷枪可鼓入富氧空气及粉煤燃料,实现熔体内不同高度、多种工况的调控,完成复杂多金属物料的氧化还原熔炼。

该复吹熔炼炉本体为圆筒型,炉缸面积 3.14 m²,炉台下炉缸深度 693 mm,炉床面积 5.47 m²,其结构如图 1 所示。炉身铜水套部位沿圆周均匀分布 10 个富氧侧吹风口,另外预备 6 只可快拆的粉煤喷枪,喷枪可插入一次风口进行粉煤与富氧空气混合喷吹。顶部安装有可升降式顶吹喷枪,可鼓入富氧空气或同时喷煤燃烧(需换枪)。炉身及炉缸共设有放出口 5 个,渣口及虹吸口位于圆柱体炉身的同一母线上,三个上下相邻的直排口位于另一条母线上,两条母线半径方向夹角为 90°。炉顶设有加料口,原料和燃料通过皮带从炉子上部加入,炉身上部还设有观察口,此口也可安装溜槽,用于加入液态炉料。



1-炉壳;2-炉缸;3-铅口;4-铜口;5-侧吹喷枪;6-渣口;7-顶吹喷枪;8-加料口;9-钢构架;10-烟道;11-余热回收装置;12-烟气出口

图 1 铅冰铜侧顶复吹熔炼装置结构示意图

1.3 试验方法

试验工艺流程如图 2 所示。

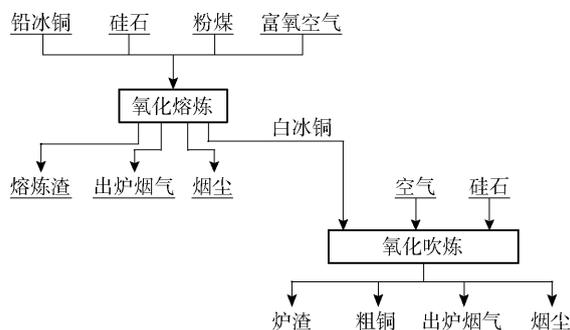


图 2 铅冰铜侧顶复吹熔炼试验工艺流程图

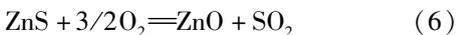
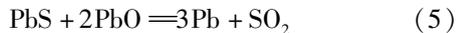
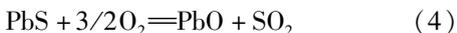
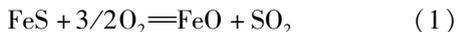
冶炼流程总体分为两段。第一段为铅冰铜侧吹熔炼:将铅冰铜、熔剂混合后由皮带送至加料口加入熔炼炉,设置于渣液层的侧吹喷枪鼓入富氧空气进行熔炼,熔炼温度为 1 200~1 250 ℃。铅冰铜在炉缸内完成熔化及液相分层过程,同时可由加料口加入粒煤或由侧吹喷枪喷入粉煤,以补充热量。加入硅石与上浮的杂质元素氧化物形成低共熔点物质,改善熔渣的流动性,CuS 氧化后与 FeS 形成铜品位

65%~75%的冰铜相。熔炼过程需注意液面高度,保持熔渣与冰铜界面不高于炉台位置,熔炼渣经由渣口排出,烟气经冷却除尘后送至制酸系统。

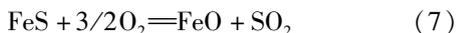
第二段为冰铜侧顶复合吹炼。熔炼段放渣结束后,即进入顶吹吹炼阶段,设置于炉体上部的顶吹喷枪下探,鼓入富氧空气进行吹炼,吹炼温度为1250~1300℃。Fe等杂质元素被氧化后上浮与加入的酸性熔剂造渣,部分Cu元素同时被氧化进入渣中,冰铜氧化产出的粗铜沉积于炉缸底部,铜液自炉墙下部铜口放出。吹炼段产生的铜渣量小且含铜量较高,可不放出,与下一批次熔化的铅冰铜发生交互反应,回收其中的Cu元素。整个作业周期为24h。

1.4 反应原理

侧顶复吹熔炼的目标是在一台熔炼设备中通过分段操作,直接产出粗铜产品,冶炼过程分为熔炼造渣及吹炼造铜两步。熔炼过程主要任务首先是将物料熔化,喷入富氧及燃料,Fe元素被氧化并与熔剂造渣上浮;铅元素大部分进入炉渣及烟尘;Cu元素主要进入冰铜相,少量进入熔炼渣;S元素部分氧化为SO₂进入烟气,部分以Cu₂S、FeS形式进入冰铜相。熔炼过程主要化学反应见式(1)~(6)。



白冰铜吹炼过程主要任务是将其中溶解的Fe元素造渣除去,S元素氧化后产出合格粗铜。主要化学反应见式(7)~(11)。



由于原料中Fe含量较高且Ca含量较低,从降低渣量的角度考虑,熔渣采用FeO-SiO₂酸性渣系。FeO-SiO₂二元系相图如图3所示。根据图3可知,将Fe/SiO₂调整至1.3~2.4,液相温度可降低至1200℃左右,同时考虑熔炼过程中成分波动对渣系稳定性的影响,铜熔炼过程通常Fe/SiO₂控制在1.8~2.0。

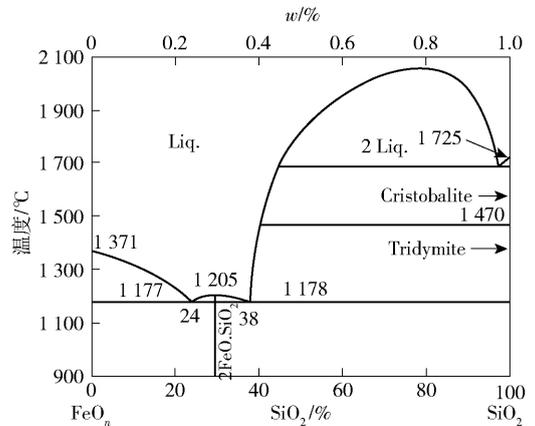


图3 FeO-SiO₂二元系相图

1.5 试样检测

试验原料从料堆中多点取样,采用锥形四分法缩分制得。熔炼过程产出的熔渣及冰铜试样在打开出口时采集,冷却后破碎。试样成分采用化学分析法测试,物相鉴定分别采用化学物相法及XRD法。XRD试样为取2.0g熔渣及冰铜研磨成粒径<50μm的粉末,采用德国布鲁克D8 Advance型X射线衍射仪对其进行定性分析。数据采集使用连续扫描方式,扫描速度为10°/min。XRD衍射数据使用Crystallographica Search-Match软件进行物相匹配。另从每份试样中取一块状样品镶嵌至环氧树脂中,用砂纸打磨出平整断面,抛光后在扫描电子显微镜下观察断面物相变化。由于试样本身导电性差,所以检测前表面进行了喷碳处理。SEM采用日本电子JSM-6490LV型扫描电子显微镜,并配有美国EDAX NEPTUNE TEXSHP能谱仪进行化学元素半定量分析。SEM照片均采用背散射电子像以区分不同物相。

2 试验结果及讨论

2.1 熔炼-吹炼过程主要金属元素分配规律

试验原料及熔炼产物化学元素分析结果见表3。

以表1中化验数据为依据,借助Metcal冶化流程计算软件进行物料平衡计算,工艺流程见图2。熔炼段约束条件:原料、无烟煤、硅石的温度均为25℃,熔炼温度1250℃,富氧浓度60%,煤率根据热平衡自动调整。吹炼段温度1250℃,富氧浓度60%,达到过热状态,由冷却水及炉体自然散热带走部分热量。物料平衡计算结果见表4。

表3 试验原料及熔炼产物化学成分分析

组分	Cu	Pb	Zn	Fe	SiO ₂	S	As	Sb	Bi	In	Ag
铅冰铜	32.40	11.96	1.51	8.40	-	8.860	10.03	2.94	0.40	0.077	0.148
熔炼渣	4.28	0.88	0.04	28.37	22.01	0.076	0.48	0.34	0.33	0.011	0.007
冰铜	52.26	8.14	0.02	13.48	0.10	6.130	12.92	3.69	0.42	0.085	0.207
吹炼渣	22.20	8.10	0.13	17.42	11.77	0.037	5.05	3.06	0.26	0.077	0.029
粗铜	94.03	0.11	0.002	-	-	0.029	2.75	0.94	0.10	0.120	0.168
烟尘	4.60	20.30	1.72	6.74	3.70	6.520	16.18	0.98	0.94	0.140	0.031

表4 铅冰铜熔炼试验物料平衡

工艺	投入物料	数值	产出物	数值
熔炼段	铅冰铜/(t·h ⁻¹)	5.00	熔炼渣/(t·h ⁻¹)	0.10
	硅石/(t·h ⁻¹)	0.05	出炉烟气/(t·h ⁻¹)	2.30(1 314.05 Nm ³ /h)
	粒煤/(t·h ⁻¹)	0.50	烟尘/(t·h ⁻¹)	1.55
	富氧/(t·h ⁻¹)	1.60(1 170.40 Nm ³ /h)	冰铜/(t·h ⁻¹)	3.20
	合计/(t·h ⁻¹)	7.15	合计/(t·h ⁻¹)	7.15
吹炼段	冰铜/(t·h ⁻¹)	3.20	吹炼渣/(t·h ⁻¹)	1.50
	硅石/(t·h ⁻¹)	0.25	粗铜/(t·h ⁻¹)	1.35
	富氧/(t·h ⁻¹)	1.20(887.55 Nm ³ /h)	烟气/(t·h ⁻¹)	1.30(665.35 Nm ³ /h)
			烟尘/(t·h ⁻¹)	0.55
	合计/(t·h ⁻¹)	4.65	合计/(t·h ⁻¹)	4.65

由物料平衡及物料化学成分可计算主要金属元素及S元素的分配规律,结果见表5。由于烟气系统中熔炼烟尘及吹炼烟尘呈混合态,难以分别测试及计量,因此统计分配率时合并计算。由表5中数据可见,Cu元素直收率为76.73%,其余部分主要流向吹炼渣,这是因为吹炼渣含铜量22%左右,且吹炼段造渣量较大,这部分渣可返回配料;Ag被捕集进入粗铜的部分为85.42%,渣含Ag量及烟尘含

Ag量约300 g/t;Pb残留在粗铜中仅有0.41%,99%以上的Pb与粗铜分离,74%以上被氧化进入烟尘,因此烟尘可考虑进行脱砷预处理后返回铅冶炼系统回收;As脱除率约90%,进入烟尘部分占59.68%;Sb脱除率约85%,进入烟尘及吹炼渣部分分别为46.55%、37.81%。

2.2 金属元素在冶炼过程中的物相转化

2.2.1 铅冰铜原料

对铅冰铜原料进行物相定性分析及断面微观结构分析,XRD图谱如图4所示,SEM-EDS分析结果

表5 铅冰铜熔炼过程主要元素分配率

序号	元素	粗铜	熔炼渣	吹炼渣	烟尘	烟气	合计
1	Cu	76.73	0.29	19.65	3.34	0.00	100
2	S	0.46	0.02	0.29	0.85	98.37	100
3	As	10.90	0.13	29.29	59.68	0.00	100
4	Sb	15.09	0.57	37.81	46.55	0.00	100
5	Pb	0.41	0.16	25.28	74.14	0.00	100
6	Zn	0.29	0.32	2.53	96.86	0.00	100
7	Fe	0.00	7.95	60.15	31.90	0.00	100
8	Ag	85.42	0.16	5.91	8.52	0.00	100
9	Bi	16.36	0.14	11.25	72.25	0.00	100
10	In	0.00	0.44	38.33	61.23	0.00	100

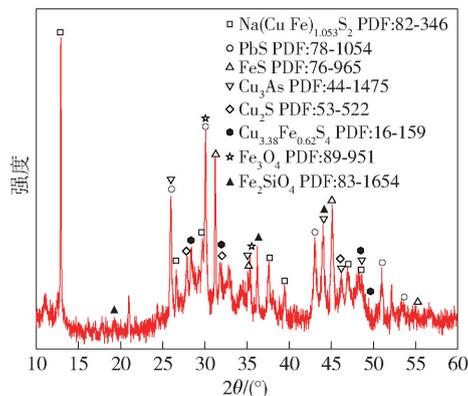


图4 铅冰铜 XRD 图谱

如图 5 所示。

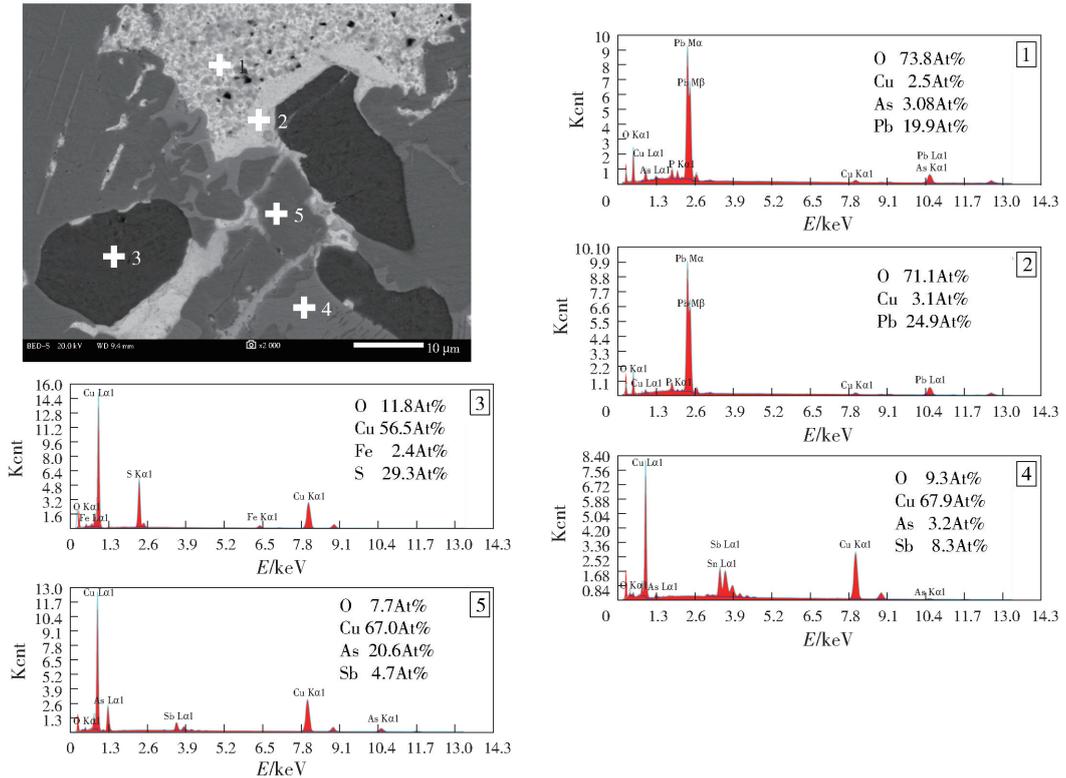


图 5 铅冰铜试样断面 SEM 照片及 EDS 结果

由图 4 可见,原料铅冰铜中主要金属 Cu、Pb、Fe 大部分以硫化物形态存在,主要物相为 PbS、FeS、Cu₂S、Cu_{3.38}Fe_{0.62}S₄。由于铅冰铜来源于铜浮渣熔炼,纯碱与 Cu、Fe 反应生成了 Na(Cu Fe)_{1.053}S₂ 化合物;部分 Fe 元素以氧化态存在,主要物相为 Fe₃O₄、Fe₂SiO₄;As 元素含量较高,与 Cu 形成 Cu₃As。由图 5 可见,黑色区域 3 为 Cu、Fe 硫化物,结晶颗粒粒度为 10~20 μm,相对独立分布,与周边深灰色区域 4、5 紧密联结;深灰色区域 4、5 为 Cu 与 As、Sb 形成的化合物,区域 5 的 As 含量相对更高;浅色区域 1、2 为 Pb 与 Cu、As 形成的化合物,其中存在砷含量不同的多相紧密交织在一起,由于单相尺度 < 1 μm,超出 EDS 光斑精度,无法完全区分。

2.2.2 熔炼产物冰铜及熔炼渣

熔炼过程主要产物为冰铜及熔炼渣,取样进行物相定性分析及断面微观结构分析,冰铜 XRD 图谱如图 6 所示,冰铜 SEM-EDS 分析结果如图 7 所示。由图 6 可见,冰铜中 Cu 元素主要以 Cu₂S、Cu、Cu₅FeS₄、Cu₅As₂、Cu₁₁Sb₃ 等物相存在;Fe 元素除 Cu₅FeS₄ 形态存在外,部分以 FeS 形态溶于冰铜中,另外还存在 Pb、As 的单质物相。由图 7 可见,灰色区域 4、5 为 Cu、As、Sb 形成的合金相,含 Cu 量较高

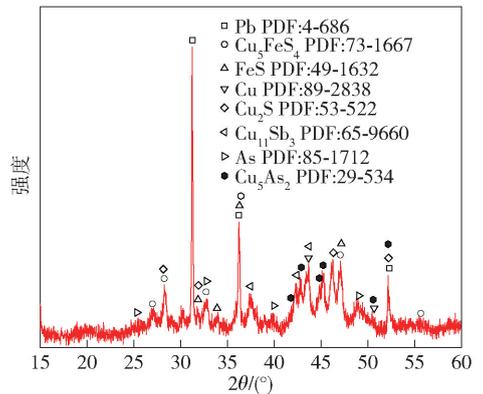


图 6 冰铜 XRD 图谱

的区域颜色较深;深灰色区域 2、3 为 Cu、Fe 的硫化物包裹于合金相中;冰铜中析出的浅色相 1 为含铅合金氧化后形成的氧化物。

熔炼渣 XRD 图谱如图 8 所示,熔炼渣 SEM-EDS 分析结果如图 9 所示。由图 8 可见,熔炼渣中 Fe 元素主要以橄榄石及磁铁矿形态存在;渣中夹杂的 Cu 元素以单质铜及铜铁氧化物 CuFe₂O₄ 形态存在。由图 9 可见,渣中颗粒离散分布,浅色区域 1 为铜铁氧化物,深灰色区域 3 为橄榄石相,其中析出了磁铁矿相,即灰色区域 2。

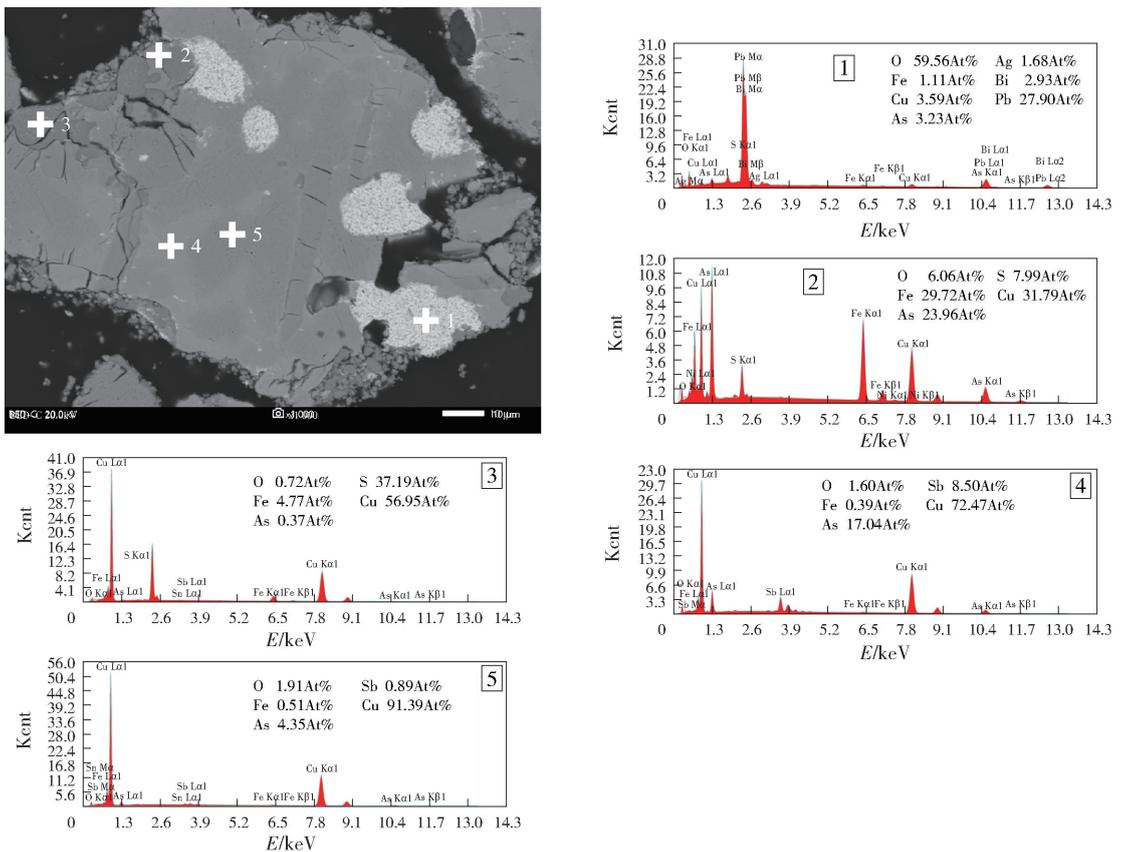


图7 冰铜试样断面 SEM 照片及 EDS 结果

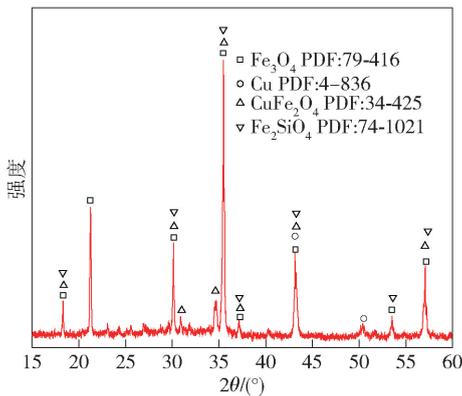


图8 熔炼渣 XRD 图谱

2.2.3 吹炼产物粗铜、吹炼渣及烟尘

冰铜吹炼过程主要产物为粗铜及吹炼渣,由于熔炼过程及吹炼过程在同一熔炼炉内进行,两段产生的烟尘在烟气系统中混合难以分离,因此烟尘样品为混合尘。取样进行物相定性分析及断面微观结构分析,粗铜 SEM-EDS 分析结果如图 10 所示。由图 10 中可见,深色区域 2 为 Cu 金属相,其中溶解有少量 As、Ag 元素。紧密包裹的灰色区域 3 为 Cu、As、Sb 合金相,两相界面上析出的少量亮白色物质 1 为含 Ag 量较高的金属相。

吹炼渣 XRD 图谱如图 11 所示,吹炼渣 SEM-EDS 分析结果如图 12 所示。由图 11 可见,熔炼渣中 Fe 元素主要以橄榄石及磁铁矿形态存在,渣中夹杂的 Cu 元素以单质铜及铜铁氧化物 CuFe_2O_4 形态存在。另外还有 Sb_2O_5 及游离 SiO_2 分布其中。由图 12 可见,渣中小颗粒较多,颗粒较为分散,占比较大的深灰色区域 3、4 分别为铁硅橄榄石及铁铜氧化物相;独立分布的浅灰色区域 2 为铜金属相,其中溶解了一定量 As 元素;金属铜边缘析出的亮白色物相 1 为铜铋氧化物。

混合烟尘 XRD 图谱如图 13 所示。由于 Pb、As 元素大部分进入烟尘中,因此烟尘含有大量 PbSO_4 及 As_2O_3 物相,另外烟尘中 Fe 元素主要以 Fe_3O_4 形态存在,Cu 元素以氧化物形态存在。

2.3 铅冰铜富氧侧顶吹熔炼的技术指标

采用富氧侧顶吹熔炼装置,针对铅冰铜物料开展了两周的中试试验,试验过程主要技术指标见表 6。

从表 6 可以看出,本次试验实现了主要技术目标,即铅冰铜熔炼效率大幅提升,完成 Cu 和 Pb 的深度分离,提高了粗铜品位。侧顶吹复合吹炼工艺将冶炼周期从反射炉的 8~10 d 缩短至 24 h 以

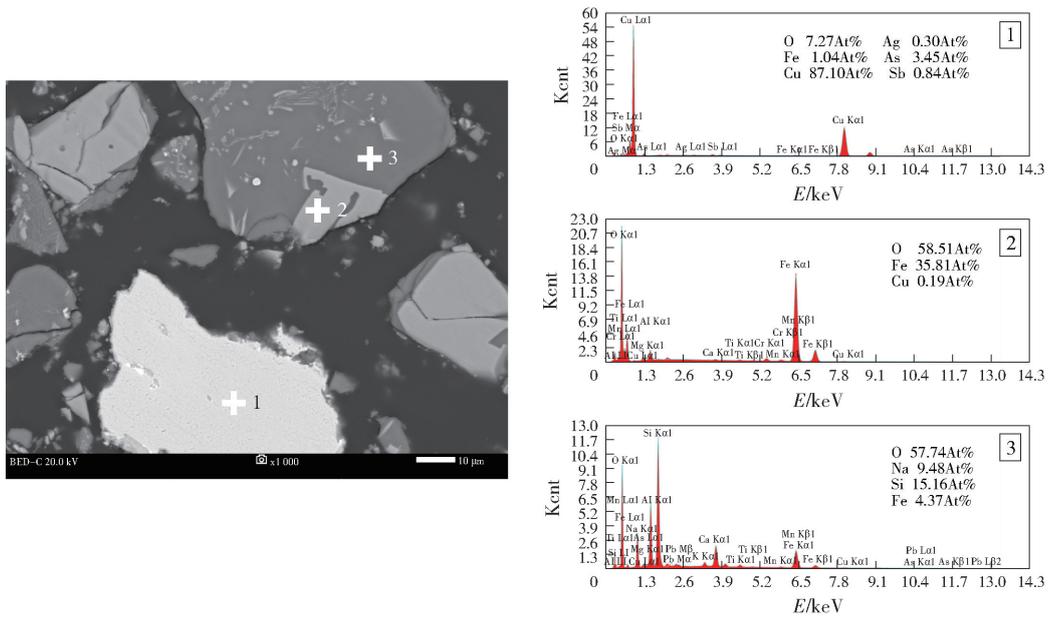


图9 熔炼渣试样断面 SEM 照片及 EDS 结果

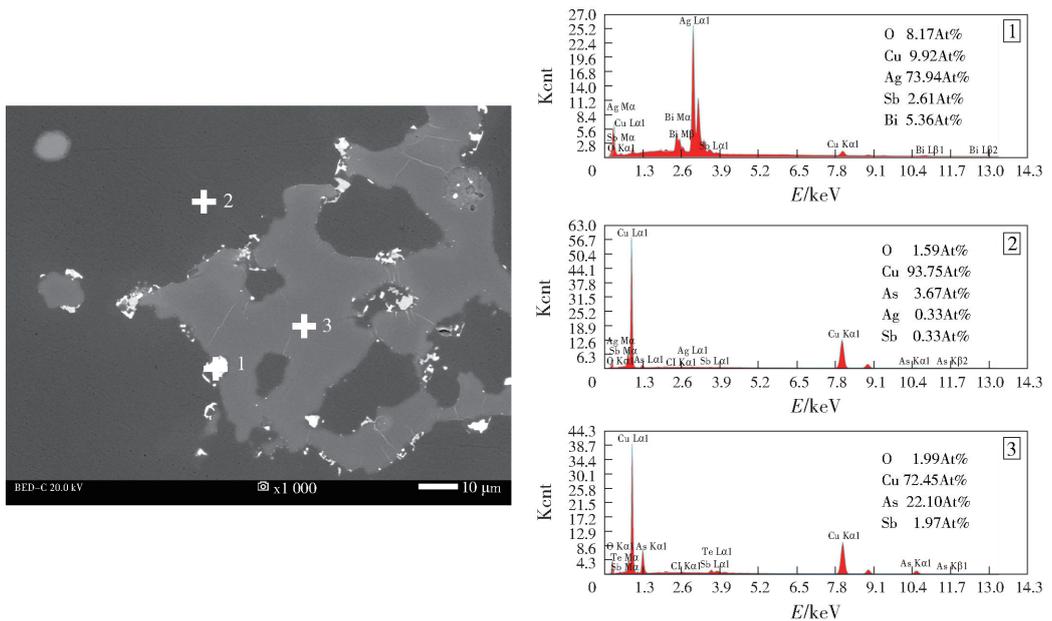


图10 粗铜试样断面 SEM 照片及 EDS 结果

表6 铅冰铜熔炼试验技术指标

指标	数值	指标	数值
铅冰铜投料量/ ($t \cdot h^{-1}$)	1 ~ 3	顶吹富氧流量/ ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	1 000 ~ 1 400
熔炼煤率/%	9.6	顶吹富氧浓度/%	60
吹炼煤率	自热	顶吹富氧压力/kPa	20 ~ 40
熔剂率/%	6	渣率/%	27.6
侧吹富氧流量/ ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	1 000 ~ 2 000	烟尘率/%	36.2
侧吹富氧浓度/%	60	粗铜含 Cu 量/%	94.03
侧吹富氧压力/kPa	150	粗铜含 Pb 量/%	0.11
熔池温度/ $^{\circ}C$	1 250 ~ 1 300	冶炼周期/h	24

内,多批次粗铜平均含铅量降低至 0.2% 以下,含铜量为 92% ~ 94%,相比传统铅冰铜熔炼工艺,技术水平大幅提高。本次试验铅冰铜投料量设计值为 5 t/h,设计床能率为 22 t/d·m²,由于后期排渣系统故障及烟气脱硫能力受限等问题,操作过程中处理能力未能达到预期指标,整体运行时间也较短,后续如继续提高投料量,需对中试系统进行改造。

3 结论

本文针对铅冰铜复杂物料熔炼效率低、铜铅分离不彻底、粗铜产品品位不高等技术难题,采用自主

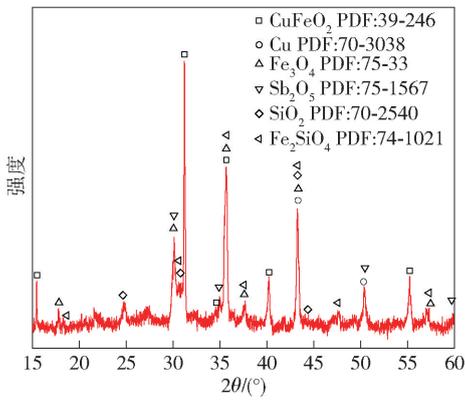


图 11 吹炼渣 XRD 图谱

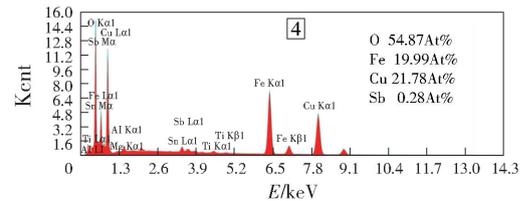
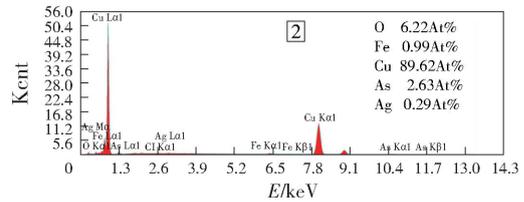
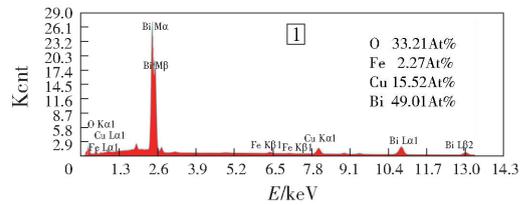
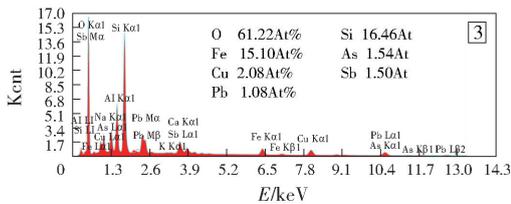
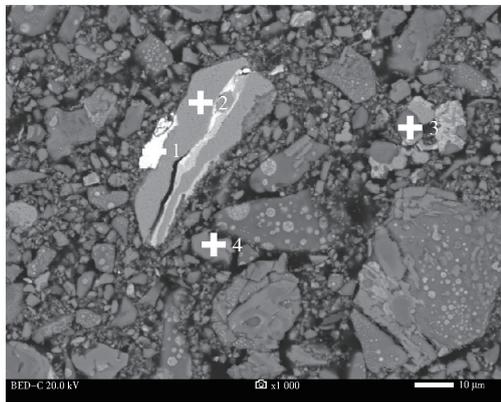


图 12 吹炼渣试样断面 SEM 照片及 EDS 结果

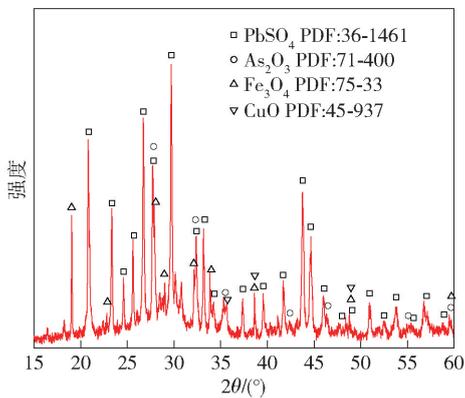


图 13 烟尘 XRD 图谱

效率高、操作环境好、能耗低,为行业内铅冰铜复杂物料低碳高效综合回收提供了一条新的途径。

【参考文献】

[1] 黄超,沈强华,张弦,等. 窑渣-还原熔炼铅冰铜新工艺

开发的富氧侧顶吹熔炼试验装备开展了中试试验,实现了铅冰铜熔炼一步产出粗铜,粗铜品位达到 94.03%,粗铜含铅量为 0.11%,主要杂质 Pb、As 和 Sb 的脱除率分别约为 99%、90% 和 85%。熔炼造渣+吹炼造铜可在同一反应器内完成,冶炼周期缩短至 24 h,煤率 9.6%,冶炼效率相较于传统工艺有大幅提升。熔炼段炉渣含铜量较低,磁铁矿含量高,可考虑通过渣选工艺回收铜铁等有价金属;吹炼渣中含有大量单质铜及铜铁氧化物 CuFeO_2 ,可返回至熔炼工艺配料;烟尘中含有大量 PbSO_4 、 As_2O_3 等物质,可送至铅冶炼系统进行综合回收。本工艺冶炼

研究[J]. 矿冶,2016,25(3):58-60,88.

[2] 王恩志,舒波,张鑫,等. 高铅冰铜 PS 转炉吹炼过程铅赋存状态变化及脱铅技术探讨[J]. 云南冶金,2023,52(5):73-79.

[3] 张忠军,单银平. 提高铅浮渣反射炉运行效率的生产实践[J]. 甘肃冶金,2010,32(3):118-120.

[4] 黄超. 铅冰铜分层熔炼新工艺研究[D]. 昆明理工大学,2016.

[5] 周蓉. 连续脱铜炉在粗铅火法精炼的应用[J]. 山西冶金,2015(5):98-99.

[6] 蒋朝金,谢兆凤,蒋兆慧,等. 从铅冰铜中高效选择性提取铜的工艺研究[J]. 矿冶工程,2018,38(2):99-102.

[7] 蒋朝金,黄海飞,杨跃新. 铅冰铜盐酸浸出试验研究[J]. 湖南有色金属,2015,31(4):36-38,46.

[8] 刘大方,史谊峰,舒波,等. 从鼓风炉冶炼粗铅副产物铅冰铜中提铜的工艺研究[J]. 中国有色冶金,2017(4):12-15,61.

- [9] 文剑锋,杨天足,王安,等. 铅冰铜控制电位选择性氯化浸出[J]. 湖南有色金属,2011,27(1):24-29.
- [10] 冯金婷,秦庆伟,汤海波,等. 用加压氨浸法从低品位铅冰铜中浸出铜锌试验研究[J]. 湿法冶金,2023,42(1):8-12.
- [11] 袁培新,郭飞,何飞舟. 铅浮渣反射炉提高冰铜铜铅比的生产实践[J]. 湖南有色金属,2014,30(5):41-44.
- [12] 张鑫,余彬,惠兴欢,等. 杂质元素在铜铈吹炼过程中的行为分析[J]. 中国有色冶金,2018(4):20-22,48.
- [13] 吴卫国,宋言. 铜铅锌冶炼固废协同处理及有价金属综合回收[J]. 绿色矿冶,2023,39(1):47-52.

Pilot Test Study on Oxygen-enriched Side-top-blown smelting of Lead Matte

GUO Hui, ZHANG Ling, BAI Tao, TANG Kaile

(CINF Engineering Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: Aiming at the technical problems of low smelting efficiency of lead matte complex materials, incomplete separation of Cu and Pb, and low grade of crude copper, a pilot test was carried out using a self-developed oxygen-enriched side-top-blown smelting test equipment. The experimental results show that under the condition of temperature 1 250 °C and oxygen concentration 60%, lead matte side-top-blown smelting can produce crude copper in one step. The content of Cu in crude copper reaches 94.03%, the content of Pb is 0.11%, and the removal rates of main impurities Pb, As and Sb are approximately 99%, 90% and 85%, respectively. Using this process, smelting slag + blowing copper can be completed in the same reactor, the smelting cycle is shortened to 24 h, and the coal rate is 9.6%. Compared with the traditional process, the smelting efficiency is greatly improved, the operating environment is good, and the energy consumption is low. It has a good application prospect.

Key words: lead matte; oxygen-enriched-blown; top-blown; one step copper smelting