

文章编号:1674-9669(2020)03-0011-07 DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2020.03.002

引文格式:赵盛林,南天翔.难处理锡铅共生精矿绿色高效冶炼工艺[J].有色金属科学与工程,2020,11(3):11-17.

难处理锡铅共生精矿绿色高效冶炼工艺

赵盛林¹, 南天翔²

(1.广西科学技术情报研究所,南宁 530022;2.中南大学冶金与环境学院,长沙 410083)

摘要:针对难处理锡铅共生精矿,开发了一种“固砷-还原固硫低温熔炼”的冶炼工艺,对比传统富氧顶吹、底吹锡铅还原工艺,新工艺锡直收率提升 60%~70%,铅直收率提升 70%~90%,锡、铅直收率均接近 98.5%;还原反应温度降低 300~600 ℃,两段式升温可有效避免铅、砷等重金属粉尘及低浓度 SO₂ 的排放,一步炼制法可大幅提高锡铅回收率,降低成本。其中固砷反应的较优工艺参数为:反应温度 200~300 ℃,反应时间>20 min,固砷剂的用量是锡铅精矿中 As 氧化物反应理论质量的 2 倍以上,锡铅合金中的含砷量稳定在 0.000 3%左右,排出烟气中 As 含量稳定在 0.003‰。还原剂低温熔炼的较优工艺参数为:反应温度 750~1 200 ℃,反应时间>80 min,还原剂用量与投入锡铅精矿质量的比例>5%,固硫剂的用量是锡铅精矿中金属硫化物反应理论质量的 0.5 倍及以上,锡铅合金中的 Sn 直收率稳定在 97.2%~98.1%,Pb 直收率稳定在 95.4%~98.2%,锡铅合金中的硫元素占比稳定在 0.001%左右。

关键词:锡铅精矿;固砷反应;还原固硫反应;低温熔炼

中图分类号:TF81 **文献标志码:**A

Green and high-efficiency smelting process for refractory lead-tin symbiotic concentrate

ZHAO Shenglin¹, NAN Tianxiang²

(1. Guangxi Institute of Science and Technology Information, Nanning 530022, China;

2. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In this paper, a smelting process of "low temperature smelting of arsenic-reduction and sulfur-fixing" was developed for handling refractory tin-lead symbiotic concentrate. Compared with traditional oxygen-enriched top-blowing and bottom-blowing tin-lead reduction process, the new process boasts prominent advantages: the direct recovery of tin and lead are close to 98.5%, with an increment of 60%~70% and 70%~90%, respectively; the reduction reaction temperature is reduced by 300~600 ℃, the two-stage heating can effectively avoid the emission of lead, arsenic and other heavy metal dust and the low-concentration SO₂, and the one-step refining method can greatly improve the recovery rate of tin-lead and reduce costs. The best process parameters for arsenic solidification reaction are: reaction temperature, 200~300 ℃; reaction time, over 20 min; the dosage of arsenic solidification agent, more than twice the theoretical mass of As oxide in tin-lead concentrate; the arsenic content in lead-tin alloy and flue gas, stably at 0.0003% and 0.003‰, respectively. The best process parameters of low-temperature smelting of reducing agent are: reaction temperature, 750~1 200 ℃; reaction time> 80min; ratio of the dosage of reducing agent to the mass of tin-lead concentrate>5%; the dosage of sulfur-fixing agent, 0.5 times or more of theoretical mass of metal sulfide in tin-lead concentrate; the direct recovery of Sn and Pb in tin-lead alloy, stably at 97.2% ~ 98.1% and

收稿日期:2019-12-24

基金项目:广西科学研究与技术开发计划课题(桂科能 1347017-3-7)

通信作者:赵盛林(1977—),男,高级工程师,主要从事科技信息与技术创新方向研究。E-mail: 215332259@qq.com

95.4%~98.2%; sulfur element in tin-lead alloy, stably at about 0.001%.

Keywords: lead-tin concentrate; arsenic treatment; reduction and sulfur treatment; low temperature smelting

锡基合金是重要的焊接材料,尤其是锡基铅合金(锡铅合金),因其性能稳定、熔点低、流动性好、抗腐蚀能力强且价格便宜等优点^[1],而被广泛应用于电镀、喷涂、喷漆及生产制作各种精美合金饰品、合金工艺品和保护工业生产设备等^[2]。铅锡合金的制备方法主要有电镀^[3]和传统工艺^[4],而对于难选的锡铅共生的硫化矿或者氧化矿一般采用传统工艺^[5],其工艺流程为首先采用重选的方法分别得到粗铅精矿和粗锡精矿,再通过浮选得到铅精矿和锡精矿,最后采用富氧顶吹等方法分别得到粗铅和粗锡^[6]。

在传统工艺流程中,如图 1 所示,首先采用重选工艺除杂产出含锡量 8%~30%、含铅量 10%~40%的重选精矿,对其通过浮选工艺除杂并分离锡铅矿,分别产出含锡量>40%、含铅量<10%的锡精矿和含铅量 30%~40%、含锡量 1%~3%的铅精矿;再分别对锡精矿和铅精矿进行熔炼,锡精矿通过富氧顶吹熔炼或反射炉熔炼得到粗锡,铅精矿则通过富氧底吹等方法得到粗铅;得到的粗锡与粗铅分别通过精炼后产出精锡与精铅,再由精锡与精铅配置锡铅合金^[7-10]。

传统冶炼工艺流程不仅操作复杂,而且回收率低,在重选和浮选的过程中,因锡铅难于彻底分离,易造成锡、铅混合物的浪费,直接导致锡、铅的回收率降低。传统冶炼工艺流程中铅冶炼主要利用氧气吹炼还原方法,锡冶炼则是采用现有的奥斯麦特顶吹熔炼^[11-13]或传统的反射炉熔炼^[14],两种金属的冶炼过程都须在 1 100~1 400 ℃的高温下进行,不仅能耗高,而且在此高温下,冶炼过程会产生大量铅蒸汽和弥散的铅雾,铅蒸汽和铅雾中含与锡伴生的 Cu、Pb、Bi、As、Sb 及 Ag 等,As 和 Pb 还大量挥发,极易对周边空气、土地及水源环境造成严重污染^[15]。同时,为营造传统锡铅冶炼过程所需的高温环境,需消耗大量优质煤火重油,造成能耗成本居高不下。锡铅合金中的砷和硫含量是两个负面指标:砷含量高,导电导热性能降低^[16];硫含量高,焊接点容易老化、缩短使用寿命^[17],因此,控制锡铅合金中的砷和硫是一项重要工作。

针对传统冶炼工艺环境污染重、能耗高,产率低等问题,文中提出并研究了一种新型的固砷固硫还原低温熔炼工艺,该工艺省去“锡铅矿重选——锡精矿、铅精矿浮选——锡精矿冶炼、铅精矿冶炼——锡、铅精炼——锡铅合金配置”这一冗长的工艺路线,通过固砷反应和还原固硫反应,直接冶炼出铅锡合金,以提升铅、锡直收率,并达到缩短工艺流程,低碳、清洁、绿色高效的目的。通过单因素条件试验详细考察各反应阶段温度、时间以及关键反应物用量对反应过程及产物的影响,得到较优工艺条件参数,为量产提供依据。

1 实验

1.1 实验原料和试剂

以广西某公司锡铅精矿 A、锡铅精矿 B、锡铅精矿 C 三种不同化学组分的矿料作为原料,其主要化学组分如表 1 所列。

其他实验试剂分别为:惰性熔盐(工业级碳酸钠 I 级优等、工业级氯化钠 I 类、工业级碳酸氢钠 I 类中的一种或两种或三者的组合),固砷剂(MgO、ZnO、BaO 中的一种或两种的组合),固硫剂(ZnO、CuO 中的一种或两种的组合),还原剂(粉煤或焦炭)。

1.2 实验原理

1.2.1 固砷反应

固砷反应的实质就是固砷剂与锡铅矿发生氧化

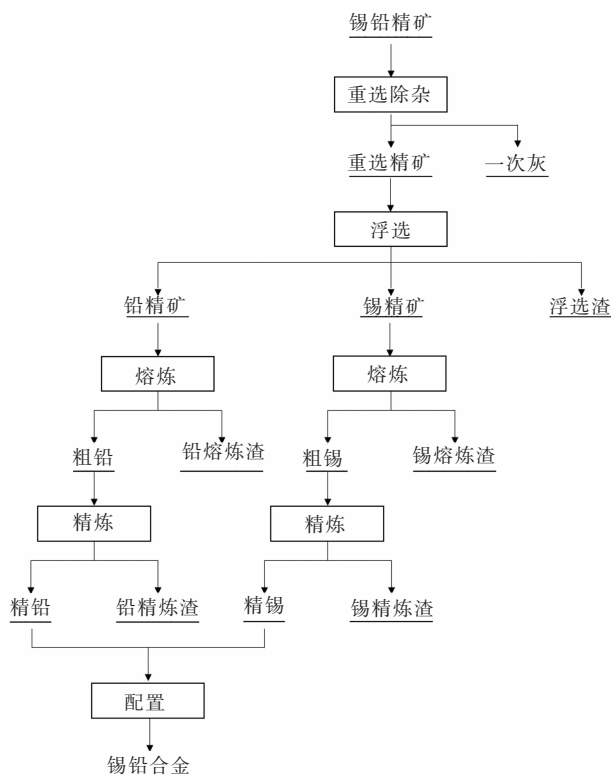


图 1 传统冶炼工艺流程

Fig. 1 Flow chart of traditional smelting process

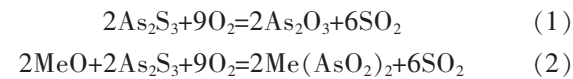
表 1 不同锡铅精矿主要化学组分

Tab. 1 Main chemical composition of different tin-lead concentrates

单位:质量分数, %

原料	Sn	Pb	S	As	Fe	Cu	SiO ₂	CaO
锡铅精矿 A	29.11	33.39	17.18	0.01	1.12	0.07	2.17	0.00
锡铅精矿 B	38.30	23.75	7.85	2.33	5.53	2.40	4.12	0.30
锡铅精矿 C	42.01	13.42	7.19	0.01	1.12	0.07	2.17	0.00

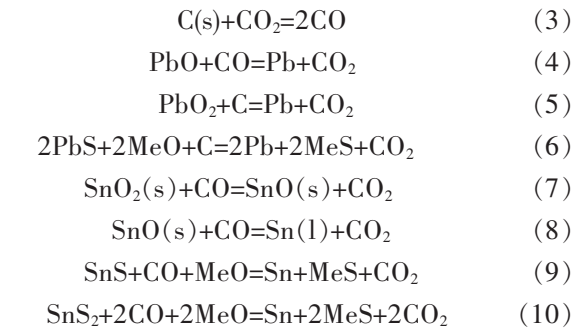
还原反应,使砷以砷氧化物或砷酸盐的形式存在于渣中,具体反应如下:



将锡铅精矿与固砷剂、固硫剂及惰性熔盐混合后在一定的温度下进行一段时间的固砷反应,此过程中 MeO 表示固砷剂。

1.2.2 固硫反应

锡铅精矿还原固硫低温熔炼的实质是以惰性熔盐构成的熔体作为熔炼体系,在一定的温度下,惰性熔盐不参与反应,不造渣,仅熔体中的锡铅组分被还原成铅锡合金,发生如下反应^[1]:



固砷反应结束后加入还原剂(粉状还原煤或焦炭粉),再升高到一定温度进行一段时间的还原固硫熔炼,反应结束后直接得到锡铅合金,其他元素大多以难熔性氧化物、金属盐的形式存在于尾矿中。

1.3 工艺流程

新型冶炼工艺核心在于固砷和固硫两段反应,通过低温熔炼直接得到铅锡合金熔液和以固体形态存在的尾矿,其工艺流程如图 2 所示。

首先在锡铅精矿中加入固砷剂、固硫剂、惰性熔盐充分混合均匀后,置于一定温度下进行固砷反应,一段时间后,加入还原剂(焦炭粉或者煤粉),升高反应温度至一定温度进行还原固硫熔炼,反应一段时间,反应结束得到锡铅合金液和尾矿。

1.4 分析与表征

新型冶炼工艺主要包括固砷反应和还原固硫反

应,其主要产物为锡铅合金和两段反应所产生烟尘。故采用现代分析手段对各段产物主要元素含量进行分析表征,以确定工艺的效果。其中矿物原料成分分析采用 X 射线荧光光谱仪分析,各段烟尘通过布袋收尘和静电捕集收尘后通过 X 射线荧光光谱仪和 ICP 电感耦合等离子体发射光谱仪相结合的方式进行分析。锡铅合金通过溶解后采用 ICP 电感耦合等离子体发射光谱仪进行分析。

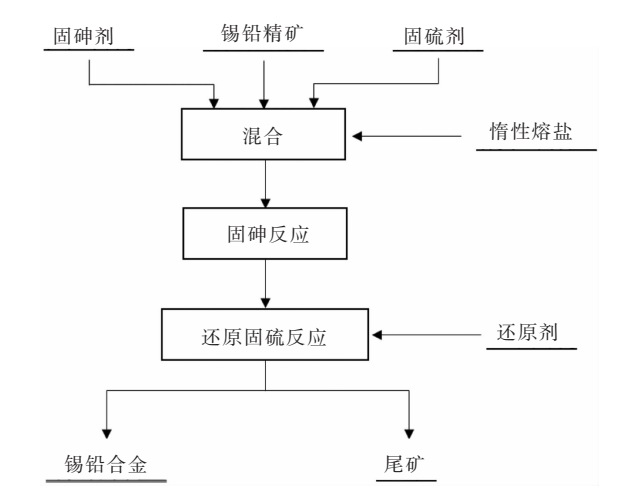


图 2 新型冶炼工艺流程

Fig. 2 Flow chart of new smelting process

2 结果与讨论

针对 A、B、C 3 种元素成分不同的锡铅精矿,分别考察各试验要素对关键质量参数的影响效果,主要从工艺流程中的固砷反应和还原固硫反应两部分进行探究。

2.1 固砷反应试验

固砷试验主要目的是降低锡铅合金和排出烟气中的含砷量,考虑到反应温度、反应时间,以及固砷剂用量的影响,设置不同条件下得到锡铅合金和排出烟气中的含砷量 (P-As 代表锡铅合金含砷量、TG-As 代表烟气含砷量)。

2.1.1 反应温度对固砷反应的影响

试验条件为固砷反应时间 45 min、固砷剂的用量是锡铅精矿中 As 氧化物完全反应所需理论质量的 5 倍、惰性熔盐为碳酸钠,惰性熔盐用量为锡铅精矿质量的 4 倍,还原固硫反应温度 800 ℃、还原固硫反应时间 120 min、还原剂用量为投入锡铅精矿质量的 15%、固硫剂的用量是锡铅精矿中金属硫化物全部反应为金属所需理论质量的 1.5 倍,考察固砷反应温度对锡铅合金和烟气含砷量的影响,结果如图 3 所示。

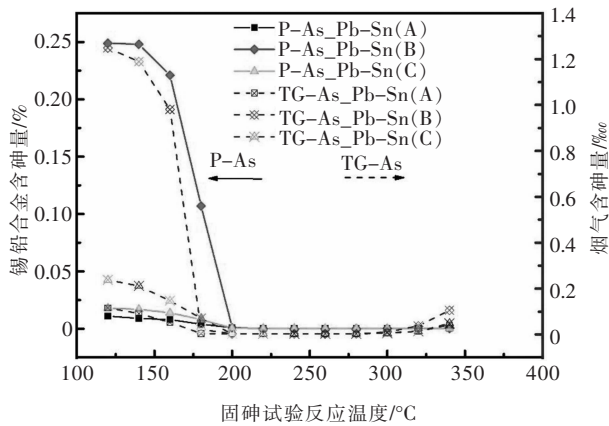


图3 反应温度对锡铅合金和烟气含砷量的影响

Fig. 3 Effect of reaction temperature on arsenic content of alloys and smoke

由图3可知,对于固砷反应,随着反应温度的升高,锡铅合金中的含砷量下降到稳定,排出烟气中的含砷量先下降再升高。当温度低于200℃时,锡铅合金和烟气中的含砷量均较高,说明在低温段发生固砷反应较为困难,即反应发生的吉布斯自由能较大。在200~300℃之间,锡铅合金和排出烟气中的含砷量都能到达较好的效果,锡铅合金中的含砷量稳定在0.0003%左右,排出烟气中As含量稳定在0.003‰。反应温度继续增加,大于300℃时,虽然锡铅合金中的含砷量基本保持稳定,但烟尘中的含砷量有明显提高,这是因为增加温度提高了砷的挥发量。所以固砷反应较优温度区间为200~300℃。

2.1.2 反应时间对固砷反应的影响

试验条件为固砷反应温度250℃、固砷剂的用量是锡铅精矿中As氧化物完全反应所需理论质量的5倍、惰性熔盐为碳酸钠,用量为锡铅精矿质量的4倍,还原固硫反应温度800℃、还原固硫反应时间120min、还原剂用量为投入锡铅精矿质量的15%、固硫剂的用量是锡铅精矿中金属硫化物全部反应为金属所需理论质量的1.5倍,考察固砷反应时间对锡铅合金和烟气含砷量的影响,结果如图4所示。

由图4可知,随着固砷反应时间的延长,锡铅合金和排出烟气中的含砷量下降到稳定。在20min之后,锡铅合金和排出烟气中的含砷量都能到达较好的效果,锡铅合金的含砷量稳定在0.0003%左右,排出烟气中As含量稳定在0.003‰,说明反应发生20min后,整体固砷反应基本完成,说明在此条件下固砷反应速率较快。但是为保证反应时间不会影响后续单因素条件试验,在后续试验中采用45min作为反应时间。

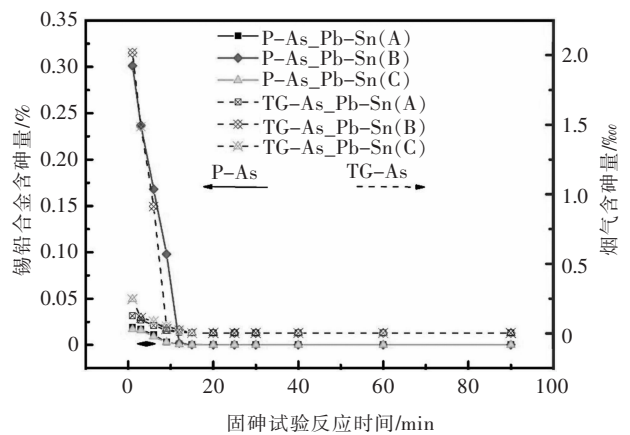


图4 反应时间对锡铅合金和烟气含砷量的影响

Fig. 4 Effect of reaction time on arsenic content of alloys and smoke

2.1.3 固砷剂用量对固砷反应的影响

试验条件为固砷反应时间45min、固砷反应温度250℃、惰性熔盐为碳酸钠,用量为锡铅精矿质量的4倍,还原固硫反应温度800℃、还原固硫反应时间120min、还原剂用量为投入锡铅精矿质量的15%、固硫剂的用量是锡铅精矿中金属硫化物全部反应为金属所需理论质量的1.5倍,考察固砷反应温度对锡铅合金和烟气含砷量的影响,结果如图5所示。

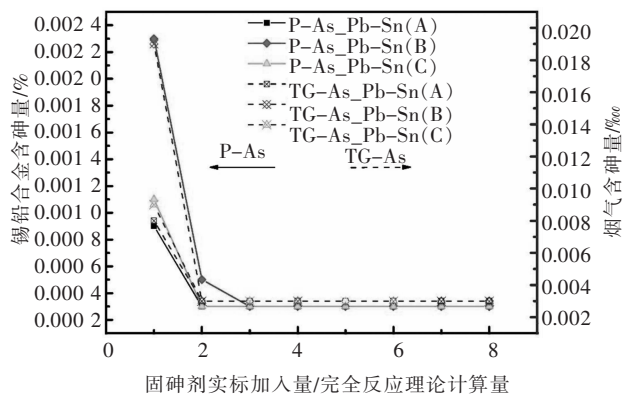


图5 固砷剂用量对锡铅合金和烟气含砷量的影响

Fig. 5 Effect of dosage of arsenic-fixing agent on arsenic content of alloys and smoke

由图5可见,随着固砷剂用量的增加,锡铅合金和排出烟气中的含砷量下降到稳定。当固砷剂的用量是锡铅精矿中As氧化物反应理论质量的2倍以上,锡铅合金和排出烟气中的含砷量都能到达较好的效果,锡铅合金中的含砷量稳定在0.0003%左右,排出烟气中As含量稳定在0.003‰。从锡铅合金和烟气中含砷量可知,固砷剂用量并非固砷反应的决定性因素条件,高于理论用量即有较好的固砷效果,实际工

业生产过程中可以适当调整固硫剂用量,以达到锡铅合金质量和经济效益的较优平衡点。

2.2 还原固硫反应试验

还原固硫试验主要目的是产出锡铅合金、并控制锡铅合金中硫的含量,故考察反应温度、反应时间、还原剂使用量对铅、锡金属直收率的影响(D-Pb 代表铅直收率、D-Sn 代表锡直收率),同时考察固硫剂用量对除硫效果的影响。

2.2.1 反应温度对固硫反应的影响

试验条件为固硫反应时间 45 min、固硫反应温度 250 ℃、固硫剂的用量是锡铅精矿中 As 氧化物反应理论质量的 5 倍、惰性熔盐为碳酸钠,用量为锡铅精矿质量的 4 倍,还原固硫反应时间 120 min、还原剂用量为投入锡铅精矿质量的 15%、固硫剂的用量是锡铅精矿中金属硫化物反应理论质量的 1.5 倍,考察固硫反应温度对锡铅精矿中 Pb 和 Sn 直收率的影响,结果如图 6 所示。

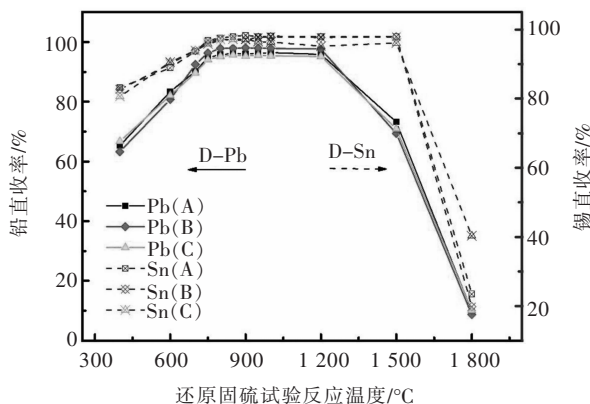


图 6 还原固硫试验反应温度对铅、锡直收率的影响

Fig. 6 Effect of reaction temperature on recovery rates of lead and tin

由图 6 知,对于还原固硫反应,随着反应温度的升高,锡铅合金中 Pb 和 Sn 的直收率先升高再下降。在 750~1 200 ℃之间,Pb 的直收率达到较好的效果,精矿 A 的 Pb 直收率稳定在 96%左右,精矿 B 的 Pb 直收率稳定在 98%左右,精矿 C 的 Pb 直收率稳定在 95.6%左右,在 750~1 500 ℃之间,Sn 的直收率达到较好的效果,精矿 A 的 Sn 直收率稳定在 98.1%左右,精矿 B 的 Sn 直收率稳定在 97.5%左右,精矿 C 的 Sn 直收率稳定在 97.1%左右。较低的反应温度不利于整体反应的发生,使得反应速率较低,同时铅、锡直收率难以提升,但是较高的温度会使得熔炼出的 Pb/Sn 汽化随烟气流失^[18-20],所以较优熔炼温度

在 750~1 200 ℃之间。

2.2.2 反应时间对固硫反应的影响

试验条件为固硫反应时间 45 min、固硫反应温度 250 ℃、固硫剂的用量是锡铅精矿中 As 氧化物完全反应所需理论质量的 5 倍、惰性熔盐为碳酸钠,用量为锡铅精矿质量的 4 倍,还原固硫反应温度 800 ℃、还原剂用量为投入锡铅精矿质量的 15%、固硫剂的用量是锡铅精矿中金属硫化物完全反应所需理论质量的 1.5 倍,考察固硫反应时间对锡铅精矿中 Pb 和 Sn 直收率的影响,结果如图 7 所示。

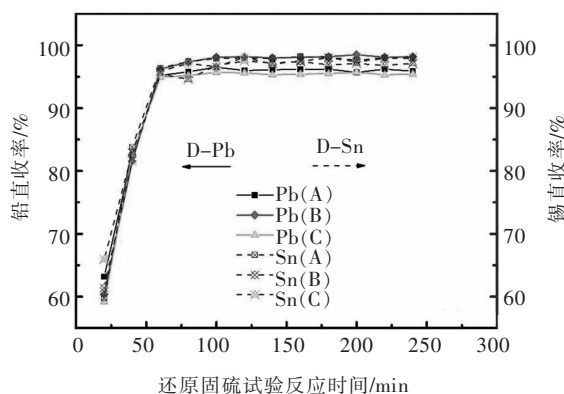


图 7 还原固硫试验反应时间对铅、锡直收率的影响

Fig. 7 Effect of reaction time on recovery rates of lead and tin

由图 7 可见,对于还原固硫反应,随着反应时间的推移,锡铅合金中 Pb 和 Sn 的直收率升高到稳定。在 80 min 之后,Pb 的直收率达到较好的效果,精矿 A 的 Pb 直收率稳定在 96%左右,精矿 B 的 Pb 直收率稳定在 98%左右,精矿 C 的 Pb 直收率稳定在 95.4%左右,Sn 的直收率达到较好的效果,精矿 A 的 Sn 直收率稳定在 98%左右,精矿 B 的 Sn 直收率稳定在 97.5%左右,精矿 C 的 Sn 直收率稳定在 97.2%左右,所以较优熔炼时间为大于 80 min。

2.2.3 还原剂用量对固硫反应的影响

试验条件为固硫反应时间 45 min、固硫反应温度 250 ℃、固硫剂的用量是锡铅精矿中 As 氧化物完全反应所需理论质量的 5 倍、惰性熔盐为碳酸钠,用量为锡铅精矿质量的 4 倍,还原固硫反应温度 800 ℃、还原固硫反应时间 120 min、固硫剂的用量是锡铅精矿中金属硫化物完全反应所需理论质量的 1.5 倍,考察还原剂用量对锡铅精矿中 Pb 和 Sn 直收率的影响,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,对于还原固硫反应,随着还原剂用量与投入锡铅精矿质量的比例的增大,锡铅合金中

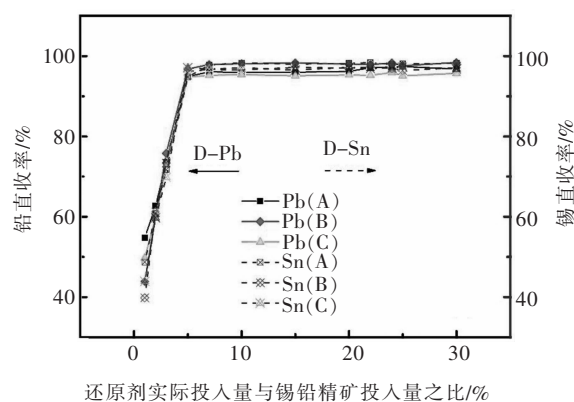


图 8 还原固硫试验还原剂用量对铅、锡直收率的影响
Fig. 8 Effect of dosage of reducing agent on recovery rates of lead and tin

Pb 和 Sn 的直收率升高到稳定。在 5%比例之后,Pb 的直收率达到较好的效果,精矿 A 的 Pb 直收率稳定在 96.2%左右,精矿 B 的 Pb 直收率稳定在 98%左右,精矿 C 的 Pb 直收率稳定在 95.3%左右,Sn 的直收率达到较好的效果,精矿 A 的 Sn 直收率稳定在 98.2%左右,精矿 B 的 Sn 直收率稳定在 97.1%左右,精矿 C 的 Sn 直收率稳定在 97.1%左右,所以较优还原剂投入量因大于与锡铅精矿投入量的 5%。

2.2.4 固硫剂用量对固硫反应的影响

试验条件为固砷反应时间 45 min、固砷反应温度 250 ℃、固砷剂的用量是锡铅精矿中 As 氧化物完全反应所需理论质量的 5 倍、惰性熔盐为碳酸钠,用量为锡铅精矿质量的 4 倍,还原固硫反应温度 800 ℃、还原固硫反应时间 120 min、还原剂用量为投入锡铅精矿质量的 15%,考察固硫剂用量对锡铅合金中含硫量的影响,结果如图 9 所示。

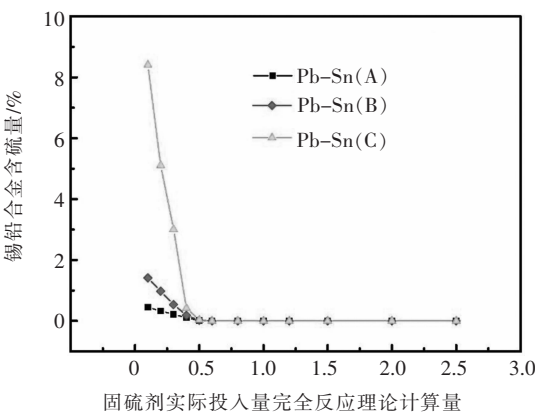


图 9 还原固硫剂用量对锡铅合金含硫量的影响
Fig. 9 Effect of dosage of sulphur-fixing agent on sulfur content of products

由图 9 可见,对于还原固硫反应,随着固硫剂的用量的增加,锡铅合金中硫元素的占比下降到稳定。在固硫剂的用量是锡铅精矿中金属硫化物反应理论质量的 0.5 倍或者更大比例,硫元素的去除达到较好的效果,锡铅合金中的硫元素占比稳定在 0.001%左右,此时未达到反应理论量即可有较好的固硫效果主要是因为熔炼过程中加入惰性熔盐 Na_2CO_3 ,此物质也具备一定的固硫能力,与加入的金属氧化物固硫剂共同对原料中硫进行固定作用^[21-22]。

2.3 综合条件试验

通过固砷反应和还原固硫反应单因素条件试验得出较优工艺条件。对精矿 B 进行综合条件试验以验证工艺可行性。试验条件为试验锡铅精矿 B 为 835.0 g,固砷反应温度为 250 ℃之间,反应时间为 45 min,固砷剂的用量是锡铅精矿中 As 氧化物完全反应所需理论质量的 2 倍,随后进行还原固硫反应,反应温度为 600 ℃,还原剂用量为投入锡铅精矿质量的 10%,固硫剂用量为理论用量,惰性熔盐为碳酸钠,用量为试验原料质量的 4 倍,反应时间为 100 min。试验结果如表 2 所列。

表 2 综合条件试验各产物主要元素含量表

Table 2 Contents of element in products at comprehensive conditions

产物	单位:质量分数, %					
	Sn	Pb	S	As	Fe	Cu
锡铅合金	47.96	29.97	0.000 1	0.000 25	0.002 5	2.260 0
尾矿	0.09	0.05	1.290 0	0.060 00	1.130 0	0.160 0
烟尘	5.25	0.05	17.820 0	0.040 00	27.430 0	0.001 5

由表 2 可知,当使用 835.0 g 铅锡精矿 B 作为原料熔炼时,可得到质量为 650.25 g,Sn 含量 47.96%,Pb 含量 29.97%的铅锡合金,该产物 S 含量为 0.000 1%,As 含量为 0.000 25%,仅含有少量 Fe 和 Cu 等金属杂质。熔炼后得到尾矿(含熔盐)3 508.30 g,烟尘 86.45 g。值得一提的是,原矿中的 As 主要存于尾矿中,S 主要存于烟尘中,由于使用惰性熔盐一同参加反应,故尾矿中主要成分依然主要为惰性熔盐,可以循环使用。烟尘中含有一定量其他金属元素可再次回收利用。

3 结 论

1)提出的“固砷-还原固硫”处理锡铅精矿新工

艺,可有效提取原矿中的铅、锡,最终产物为锡铅合金。该工艺不仅缩短了生产流程,同时是一种绿色、环保的新型冶炼工艺,具有一定的前景和竞争力。

2) 固砷剂可以较好地降低锡铅合金和排出烟气中的砷元素含量,反应温度处于 200~300 ℃之间,反应时间大于 20 min,固砷剂的用量是锡铅精矿中 As 氧化物完全反应所需理论质量的 2 倍以上时锡铅合金和排出烟气中的含砷量都较低,排出烟气中 As 含量稳定在 0.003‰,铅锡合金中的含砷量稳定在 0.000 3%左右,砷含量很低,为后续工艺减少了巨大的压力。

3) 固砷反应后可以采用还原剂低温熔炼得出锡铅合金,反应温度处于 750~1 200 ℃之间,反应时间大于 80 min,还原剂用量与投入锡铅精矿质量的比例大于 5%时 Sn 和 Pb 的直收率可以达到较好的效果,精矿 A 的 Pb 直收率稳定在 96%左右,精矿 B 的 Pb 直收率稳定在 98%左右,精矿 C 的 Pb 直收率稳定在 95.4%左右,精矿 A 的 Sn 直收率稳定在 98%左右,精矿 B 的 Sn 直收率稳定在 97.5%左右,精矿 C 的 Sn 直收率稳定在 97.2%左右。

4) 还原固硫反应中固硫剂的使用可以去除产物锡铅合金中硫元素的含量,在固硫剂的用量是锡铅精矿中金属硫化物完全反应所需理论质量的 0.5 倍或者更大比例,硫元素的去除达到较好的效果,锡铅合金中的硫元素占比稳定在 0.001%左右。

参考文献:

- [1] 史文革,黎乾荣,梁世豪,等.一种从铅锡精矿中直接冶炼铅锡合金的方法:中国,CN102978423B[P]. 2015-01-07.
- [2] 张敏.金精矿固砷固硫焙烧提金工艺设计[J].矿冶工程,2002,22(4): 59-63.
- [3] 王立,季婷,李睿,等.从复杂钼钨精矿中高效提取钼的新工艺研究[J].有色金属(冶炼部分),2019(5): 28-32.
- [4] 路永锁,叶标,宁建平.锌浸出渣烧结-还原熔炼回收铅锡[J].有色金属工程,2016,6(4): 44-47.
- [5] 寇建军,吴萍.某含砷高硫难处理金矿固砷固硫提金试验[J].矿产综合利用,2002(6): 3-6.
- [6] 戈捷.含硫砷金精矿双层球团无污染焙烧的基础研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [7] 曾子高,梁经冬.难浸金矿选择性固砷焙烧预处理新工艺[J].矿冶工程,1997,17(3): 39-42.
- [8] 朱光俊,梁中渝,邓能运.煤粉燃烧固硫的研究[J].矿业安全与环保,2004,31(6): 21-22.
- [9] 吴仙花,张桂珍,盛桂云,等.难浸金矿石焙烧固硫、砷剂的研究[J].黄金,2001,22(8): 27-30.
- [10] 张桂珍,吴仙花,盛桂云,等.难浸金精矿焙烧镁盐固硫剂的研究[J].黄金,1999,20(8): 35-37.
- [11] 吴家聪,吴正芬.铅锡合金加铁粉脱砷的生产实践[J].中国有色冶金,1984(6): 10-12.
- [12] 李军旗.从杂铜冶炼废渣中回收锡铜铅锌的工业实践[J].中国有色冶金,1999,28(6): 14-16.
- [13] 黄昌元,沈江,卢林,等.铅冶炼过程中回收锡新工艺研究与生产实践[J].云南冶金,2014,43(1): 58-65.
- [14] 尤文佳.冶炼企业含砷铅废渣综合治理工艺方案论述[J].节能,2019,38(5): 134-135.
- [15] 陶先昌.铅冶炼过程中的能源消耗与技术应用[J].世界有色金属,2017(12): 22-23.
- [16] 王建潮,朱钰土,钟寅丽,等.铅冶炼重金属污染及治理问题初探[J].化工管理,2017(25): 113-113.
- [17] 叶龙刚,唐朝波,唐谟堂,等.硫化锑精矿低温熔炼新工艺[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(9): 19-24.
- [18] 张绪亮,刘宗强,杨建英,等.铋钨混合矿低温熔炼新工艺研究[J].有色金属科学与工程,2014,5(3): 44-49.
- [19] 李淑梅,张福生,丛自范,等.固体氯化铅直接低温熔炼生产粗铅的研究[J].有色矿冶,2011,27(2): 34-36.
- [20] 黄潮,唐朝波,唐谟堂,等.废铅酸蓄电池胶泥的低温熔盐还原固硫熔炼工艺研究[J].矿冶工程,2012,32(2): 90-93.
- [21] 胡宇杰,唐朝波,陈永明,等.铅锌混合硫化精矿的低温熔盐还原固硫熔炼[J].中国有色金属学报,2015,25(12): 3488-3496.
- [22] 郭路路,陈永明,何静,等.含铅固废还原固硫混合熔炼工艺研究[J].矿冶工程,2017,37(5): 82-85.