低品位锡中矿与铅冶炼烟尘协同焙烧高效脱砷研究①

王崇宇，王泽斌，李磊
（东华大学 环境科学与工程学院，上海 201620）

摘　要：提出了一种低品位锡中矿和铅冶炼烟尘协同焙烧高效脱砷的方法。结果表明，锡中矿含砷物相 FeAsS 在焙烧过程中分解生成单质 As 和 FeS，两者可将铅冶炼烟尘中砷酸盐物相还原为易挥发的 As_2O_3 物相，继而实现砷的高效脱除。在焙烧温度 700 ℃、铅冶炼烟尘添加量 30%、焙烧时间 90 min 条件下，砷脱除率达 94.73%。

关键词：焙烧；协同处置；锡中矿；铅冶炼烟尘；脱砷
中图分类号：TF803.1　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.028
文章编号：0253-6099(2026)03-0192-07

Efficient Arsenic Removal by Co-disposal of Low-Grade Tin Middlings and Lead Smelting Flue Dust

WANG Chongyu, WANG Zebin, LI Lei
(*College of Environmental Science and Engineering*, *Donghua University*, *Shanghai* 201620, *China*)

Abstract: A novel processing technique for efficient arsenic removal by collaborative roasting of low-grade tin middlings and lead smelting flue dust is proposed in this study. It is shown that FeAsS, the arsenic-bearing phase in tin middlings, decomposes into elemental As and FeS during roasting. These decomposition products can reduce arsenate phases in lead smelting flue dust into volatile As_2O_3, thereby realizing high-efficiency arsenic removal. With an addition of lead smelting flue dust at an amount of 30%, roasting at 700 ℃ for 90 min can lead to the arsenic removal rate reaching 94.73%.

Key words: roasting; co-disposal; tin middling; lead smelting flue dust; arsenic removal

锡尾矿是锡选矿过程中的副产品，其含锡 0.08%~0.35%，并伴生 0.1%~1.6%的砷[1]。工业上主要通过重选、浮选及磁选等方法对其进行处理，获得含锡 2.4%~4.9%、含砷 2.20%~9.45%的低品位锡中矿[2-3]。锡中矿处理工艺主要包括物理分离、化学浸出及焙烧，然而这些方法存在锡回收率低、砷分散污染难控制、额外添加硫化剂导致 SO_2 污染增加等问题[4-8]。铅冶炼烟尘(LSD)产生于铅冶炼过程，采用湿法冶金和火法冶金技术处置时存在砷二次污染大、有价金属回收率低等问题[9-12]。为此，基于低品位锡中矿和铅冶炼烟尘中砷的矿相结构特征，本文提出了一种两者协同焙烧高效脱砷技术，并对脱砷机理和参数影响进行了系统研究。

1　试验

1.1　试验原料

试验所用原料包括低品位锡中矿和铅冶炼烟尘，分别来自内蒙古某选矿厂和山东某铅冶炼厂。

表 1 为低品位锡中矿主要成分。由表 1 可知，低品位锡中矿中锡含量为 3.38%，砷和硫含量分别为 6.28%和 3.95%。

表 1　低品位锡中矿主要成分(质量分数)

Table 1　Chemical composition of low-grade tin middlings %

As	S	Sn	Pb	Zn	Fe	CaO	SiO_2	其他
6.28	3.95	3.38	0.23	0.65	31.05	16.66	30.46	7.34

① **收稿日期**：2026-01-25
基金项目：国家自然科学基金(52174384)；中央高校基本科研业务费专项资金以及东华大学杰出青年教授计划(LZB2021003)
作者简介：王崇宇(1999—)，男，山西吕梁人，硕士研究生，主要研究方向为固废资源化利用。E-mail:2222292@mail.dhu.edu.cn
通信作者：李磊(1986—)，男，山东菏泽人，博士，教授，主要研究方向为金属固/危废的资源化及无害化处置。E-mail:tianxiametal1008@dhu.edu.cn

低品位锡中矿 XRD 图谱如图 1 所示，其主要物相有 SnO_2、CaF_2、FeAsS、FeS_2 和 $Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$ 等。

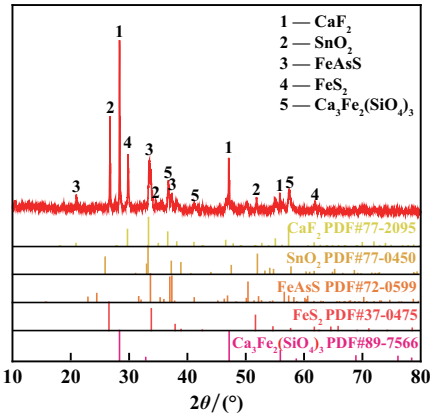


图 1　低品位锡中矿的 XRD 图谱

Fig. 1　XRD pattern of low-grade tin middlings

图 2 为低品位锡中矿 SEM-EDS 图像。由图 2 可知，点 1 区域检测到 FeAsS 和 FeS_2 的特征元素，点 2 对应物相为 CaF_2，点 3 和点 4 对应的物相分别为 $Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$ 和 SnO_2。

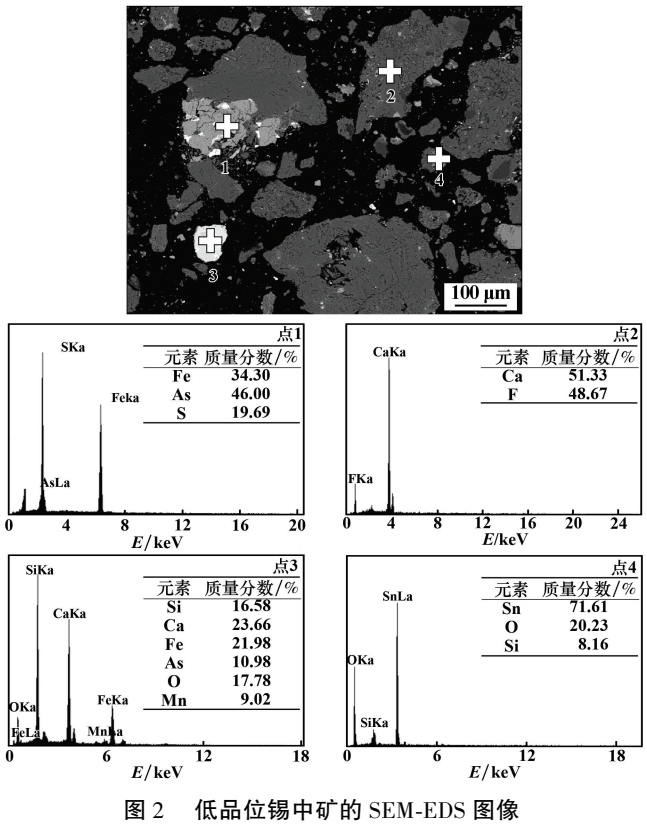


图 2　低品位锡中矿的 SEM-EDS 图像

Fig. 2　SEM-EDS images of low-grade tin middlings

表 2 为铅冶炼烟尘主要成分。由表 2 可知，铅冶炼烟尘中 As、Pb、Zn 和 S 含量分别为 9.38%、42.38%、3.48%和 9.94%。

表 2　铅冶炼烟尘主要成分(质量分数)

Table 2　Chemical composition of lead smelting flue dust　%

As	S	Pb	Zn	Bi	O	其他
9.38	9.94	42.38	3.48	1.88	23.76	9.18

图 3 为铅冶炼烟尘的 XRD 和 XPS 图谱。由图 3 可知，铅冶炼烟尘主要物相有 $Pb_3(AsO_4)_2$、$BiAsO_4$、$PbSO_4$、As_2O_3 和 As_2O_5，同时，其 XPS 图谱也进一步证实了烟尘中存在 As^{3+} 和 As^{5+}。

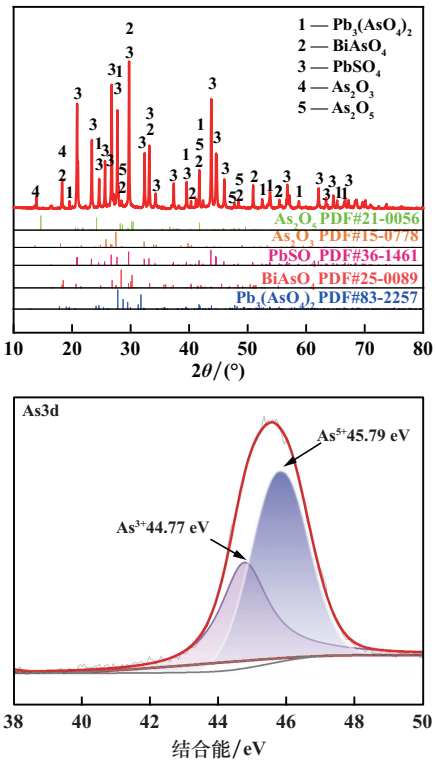


图 3　铅冶炼烟尘的 XRD 和 XPS 图谱

Fig. 3　XRD and XPS patterns of lead smelting flue dust

1.2　试验方法

试验装置示意图见图 4。

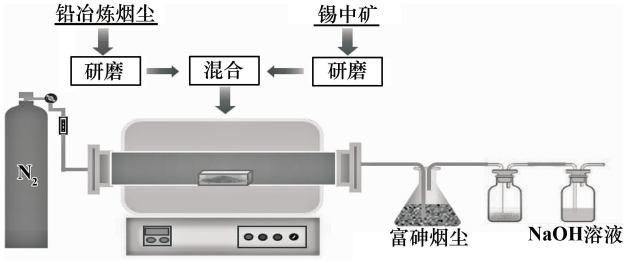


图 4　试验装置示意图

Fig. 4　Schematic diagram of experimental apparatus

采用焙烧工艺，先向管式炉中通入高纯氮气 15 min 以彻底排除管式炉中的残留空气，随后将研磨

至-75 μm 的锡中矿粉末和铅冶炼烟尘均匀混合放入 100 mm × 30 mm × 20 mm 刚玉坩埚中,并移入管式炉中,在 40 mL/min 的氮气流量下升温至设定温度,并保持一定时间,之后在氮气气氛下随炉自然降温至室温,焙烧过程中产生的烟气则通过 15% 氢氧化钠溶液净化处理后排出。最终,对焙烧渣进行分析表征。

1.3 分析方法

采用 Rigaku Ultima IV 型 X 射线衍射仪测定焙烧前后样品的物相组成;采用 Thermo Scientific K-Alpha 型 X 射线光电子能谱仪测定 As3d 和 S2p 结合能;采用 Analytik Jena AG 型电感耦合等离子体光谱仪测定焙烧前后样品中砷、锡等元素含量;采用 Vario Max CN 型元素分析仪测定焙烧前后样品中硫含量;采用 JEOL JXA-8230 型电子探针分析仪测定低品位锡中矿与铅冶炼烟尘中金属的物相分布。

样品砷脱除率(η)计算公式如下:

$$\eta = \left(1 - \frac{m_{焙烧渣}\omega_{As,焙烧渣}}{m_{锡中矿}\omega_{As,锡中矿} + m_{铅冶炼烟尘}\omega_{As,铅冶炼烟尘}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:$m_{焙烧渣}$为反应后焙烧渣的质量,g;$m_{锡中矿}$为反应前锡中矿的质量,g;$m_{铅冶炼烟尘}$为反应前铅冶炼烟尘的质量,g;ω_{As}为砷的质量分数,%。

2 热力学分析

基于图 1 和图 3 的物相分析结果,模拟计算在 101.325 kPa 惰性气氛下,对 1 mol FeAsS、1 mol $PbSO_4$ 和 1 mol $Pb_3(AsO_4)_2$ 开展 500~1 000 ℃温度区间的热力学模拟,探究其物相平衡分布及反应路径,结果如图 5 所示。其中,图 5(d)为潜在反应在 500~1 000 ℃范围内的标准吉布斯自由能变(ΔG^{θ})。

涉及的化学反应式如下:

$$4FeAsS = 4FeS + As_4(g) \quad (2)$$

$$3Pb_3(AsO_4)_2 + As_4(g) = 9PbO + 5As_2O_3 \quad (3)$$

$$2As_2O_3 = As_4O_6 \quad (4)$$

$$1.5Pb_3(AsO_4)_2 + 10FeS = 10FeO + 4.5PbS + 1.5As_2S_3 + SO_2(g) \quad (5)$$

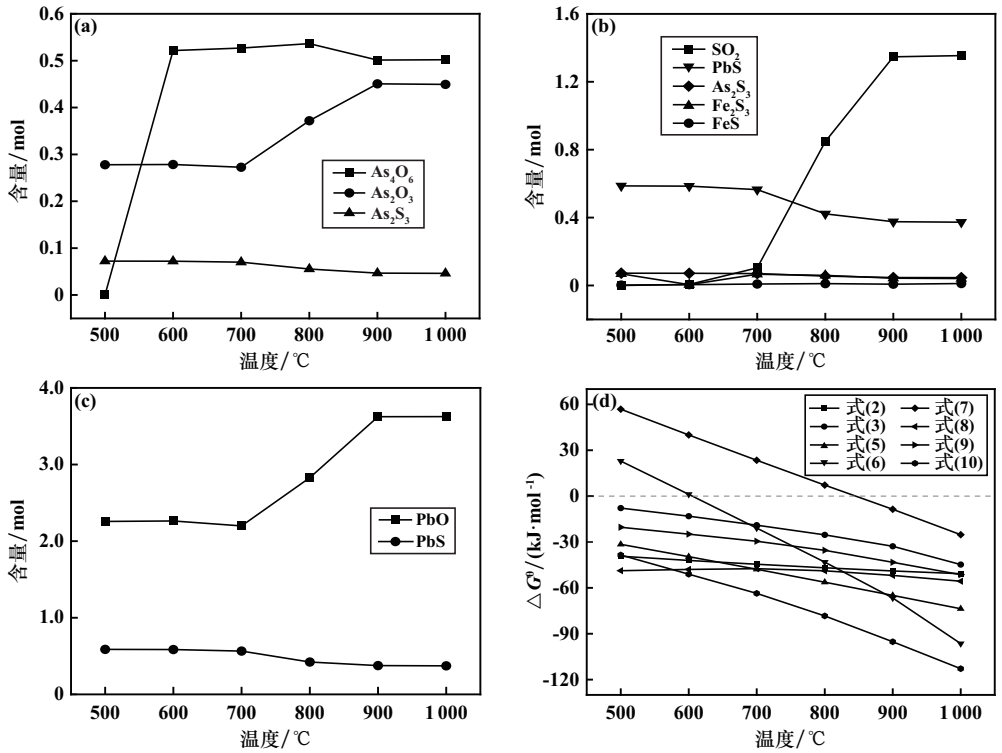
$$4.5Pb_3(AsO_4)_2 + As_2S_3 = 5.5As_2O_3 + 13.5PbO + 3SO_2(g) \quad (6)$$

$$3PbSO_4 + PbS = 4PbO + 4SO_2(g) \quad (7)$$

$$6BiAsO_4 + As_4(g) = 3Bi_2O_3 + 5As_2O_3 \quad (8)$$

$$3BiAsO_4 + 10FeS = 10FeO + 1.5Bi_2S_3 + SO_2(g) + 1.5As_2S_3 \quad (9)$$

$$9BiAsO_4 + As_2S_3 = 5.5As_2O_3 + 4.5Bi_2O_3 + 3SO_2(g) \quad (10)$$



(a) 砷元素平衡物相组成;(b) 硫元素平衡物相组成;(c) 铅元素平衡物相组成;(d) 反应标准吉布斯自由能变

图 5 不同温度下砷、硫、铅的物相平衡变化与反应标准吉布斯自由能变

Fig. 5 Variation of phase equilibrium composition of arsenic, sulfur and lead with temperature and standard Gibbs free energy change

由图 5 可知,在 500~1 000 ℃温度范围内,砷主要以氧化物形式存在,且氧化物含量随温度升高而增加,其所涉及的化学反应式见式(2)~(6)。温度高于 500 ℃时,锡中矿中的毒砂(FeAsS)分解成 As_4(g)和 FeS[2-3],As_4(g)进一步与铅冶炼烟尘中的 $Pb_3(AsO_4)_2$ 发生反应生成 As_2O_3,从而导致 As_2O_3 含量显著上升;As_2O_3 还能继续反应进一步生成 As_4O_6,因此 As_4O_6 含量也有一定增加。$Pb_3(AsO_4)_2$ 能与毒砂分解产生的 FeS 反应生成 As_2S_3,但 As_2S_3 还会继续与 $Pb_3(AsO_4)_2$ 反应生成 As_2O_3,这一过程可解释体系中 As_2S_3 含量较低,且随温度升高呈小幅下降趋势的现象。温度高于 500 ℃时,式(3)和(5)的吉布斯自由能变都为负,表明这两个反应均可自发进行。

500~700 ℃温度范围内,硫以 PbS 和 As_2S_3 等物相为主;当温度高于 700 ℃时,SO_2(g)生成量增加,与金属硫化物含量的减少相对应,其中,PbS 含量下降较为明显,主要归因于铅冶炼烟尘中 $PbSO_4$ 与 PbS 发生反应[见式(7)]。此外,高温下大量产生 SO_2 会导致体系中硫元素严重流失,不利于后续锡回收的硫化处理,需要严格控制温度来保留足量的硫,以确保锡的有效硫化。

随着温度升高,铅的 $PbSO_4$、$Pb_3(AsO_4)_2$ 物相全部转化为 PbO 和 PbS。当温度高于 700 ℃时,PbS 含量下降,PbO 含量上升,这与式(7)的反应相一致。PbO 的大量产生,在一定程度上会抑制 As_2O_3 的生成,从而抑制砷的挥发。

此外,铅冶炼烟尘中还存在 $BiAsO_4$,可能会与 As_4(g)、FeS、As_2S_3 发生反应,反应的吉布斯自由能变都为负,均可自发进行。因此,为了保证不产生大量的 SO_2 和 PbO,需要严格控制温度不高于 700 ℃,才能保证砷的有效挥发和脱除。

3　结果与讨论

3.1　铅冶炼烟尘添加量的影响

在焙烧温度 700 ℃、焙烧时间 90 min、氮气流量 40 mL/min 条件下,研究了铅冶炼烟尘添加量(相对于低品位锡中矿的质量分数)对脱砷效果的影响,结果如图 6 所示。由图 6 可知,铅冶炼烟尘添加量达到 10%时,脱砷率达 95.85%,砷残余量为 0.31%;铅冶炼烟尘添加量继续增加,脱砷率并没有继续提高,反而在添加量大于 30%时,脱砷率开始急剧下降。主要原因是铅冶炼烟尘中富含砷酸铅和砷酸铋,当毒砂分解产生的 As_4 和 FeS 不足以与过量的砷酸盐充分反应时,焙烧渣中砷含量便会明显增加,脱砷效率随之大幅下降。焙烧渣中的硫残余量随着铅冶炼烟尘添加量增加而增大,进一步表明毒砂分解产生的 FeS 不足以与铅冶炼烟尘中的砷酸盐发生反应,硫无法以 As_2S_3 形式挥发,从而造成硫含量持续增加。硫含量大幅增加使得硫锡比上升。据文献[3]报道,硫锡比需高于 1.48 才能保证锡有效硫化挥发,因此,铅冶炼烟尘添加量需达到 30%以上才能满足试验要求。

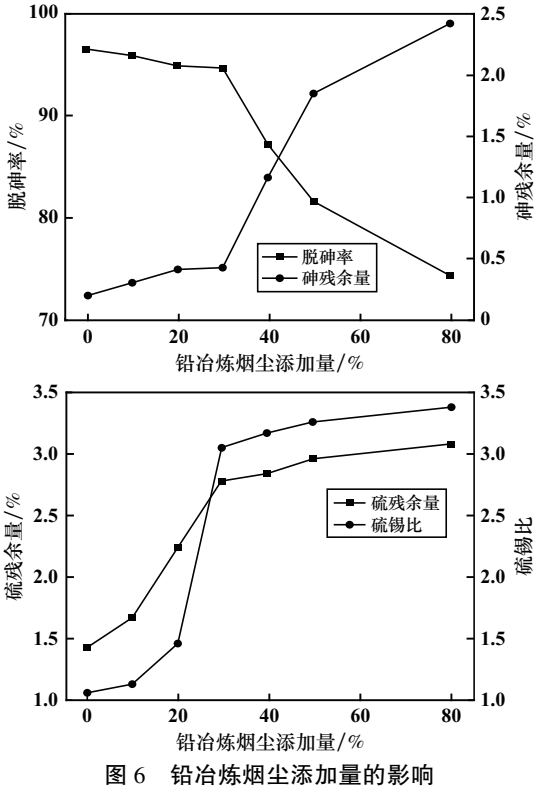


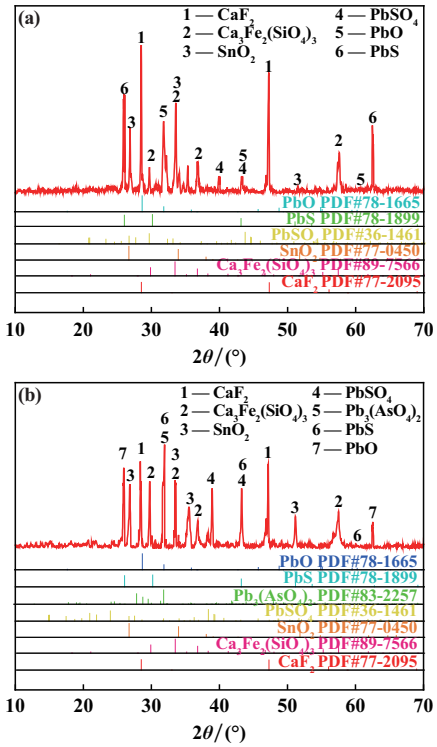
图 6　铅冶炼烟尘添加量的影响

Fig. 6　Effect of adding amount of lead smelting flue dust

为了进一步证实上述分析结果,对不同铅冶炼烟尘添加量下焙烧脱砷渣进行物相表征,结果如图 7 所示。由图 7 可知,铅冶炼烟尘添加量为 30%时,焙烧渣中砷含量较低,未检测到明显砷物相衍射峰;当铅冶炼烟尘添加量为 80%时,焙烧渣中存在 $Pb_3(AsO_4)_2$ 的特征衍射峰,说明铅冶炼烟尘添加量过多反而使脱砷效果变差。

图 8 为不同铅冶炼烟尘添加量下焙烧渣 As 和 S 的 XPS 图谱。由图 8 可知,铅冶炼烟尘添加量为 30%时,检测到存在 As^{3+} 和 As^{5+},但 As^{3+} 含量较少,以 As^{5+} 为主;铅冶炼烟尘添加量为 80%时,As^{5+} 的峰位明显高于铅冶炼烟尘添加量 30%时 As^{5+} 的峰位,说明铅冶炼烟尘添加量过多。同时,随着铅冶炼烟尘添加量增加,硫酸根谱峰强度增大,而 S^{2-} 谱峰强度呈现减小趋势。在铅冶炼烟尘添加量 80%条件下,硫酸根含量不断增加,会持续与 PbS 发生反应,从而使得体系中 S^{2-} 含量下降,也证实了此时铅冶炼烟尘添加过量。因此,铅冶

炼烟尘添加量选用 30%。



(a) 30%; (b) 80%

图 7 不同铅冶炼烟尘添加量下焙烧渣的 XRD 图谱

Fig. 7 XRD pattern of roasted slag with different adding amount of lead smelting flue dust

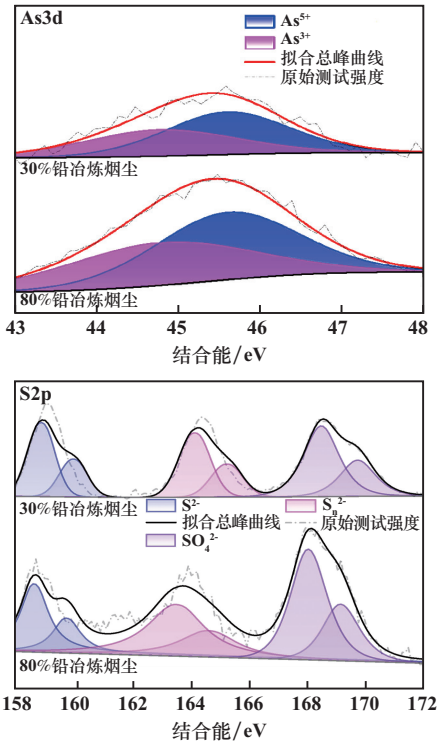


图 8 不同铅冶炼烟尘添加量下焙烧渣 As 和 S 的 XPS 图谱

Fig. 8 XPS spectra of As and S in roasted slag with different adding amount of lead smelting flue dust

3.2 焙烧温度的影响

铅冶炼烟尘添加量 30%，其他条件不变，研究了焙烧温度的影响，结果见图 9。由图 9 可知，脱砷率随着温度升高而增大，700 ℃时，脱砷率达到94.73%。温度升高既有利于毒砂的分解，也可以促进砷酸盐的反应。同时，温度升高会促进硫酸盐参与反应，使得体系中的二氧化硫逸出，从而大幅降低焙烧渣的硫锡比，不利于后续对锡的硫化回收。焙烧温度对去除砷和保留硫具有双重作用，高温有助于实现高效脱砷，但也不可避免地引起硫损失，造成硫锡比的下降。

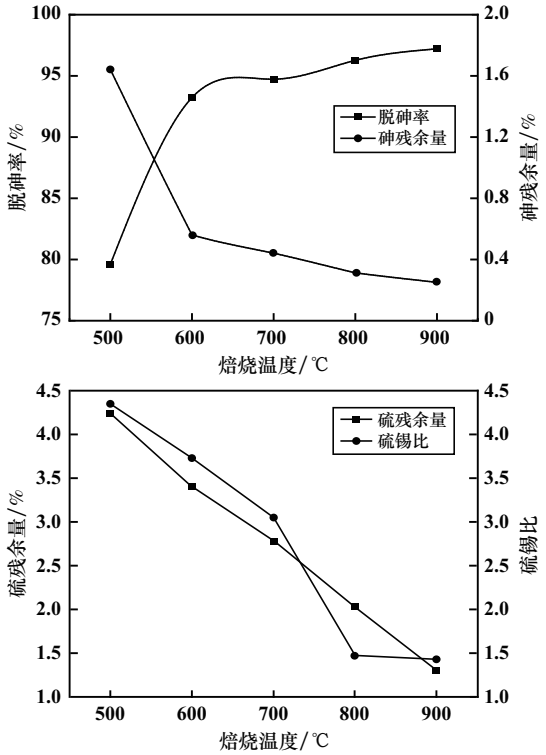


图 9 焙烧温度的影响

Fig. 9 Effect of roasting temperature

图 10 为 500 ℃下焙烧渣的 XRD 图谱。焙烧温度对物相的组成和转化具有显著影响。500 ℃下，产物主要由 CaF_2、$Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$、SnO_2、$Pb_3(AsO_4)_2$、$PbSO_4$、FeAsS、PbO 和 PbS 等组成。$Pb_3(AsO_4)_2$ 和 FeAsS 峰位的出现说明，在 500 ℃下，毒砂没有完全分解，只有部分砷酸盐参与了反应，这与 500 ℃下脱砷率不到 80%的结果相对应。对比图 7(a)发现，FeAsS 和 $Pb_3(AsO_4)_2$ 的衍射峰消失，表明温度升高更有利于砷酸铅和毒砂的分解，使砷更易挥发脱除。

进一步对 700 ℃下焙烧渣进行了电子探针显微分析，结果如图 11 所示。点 5 的主要成分为 SnO_2 和 $Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$，点 6 的主要成分为 CaF_2、$PbSO_4$ 和 PbS，没有找到关于砷的物相，验证了砷被有效脱除。综上，适宜的焙烧温度为 700 ℃。

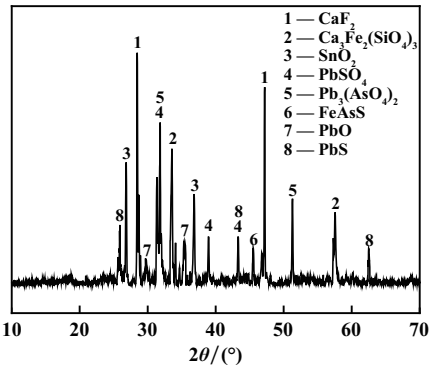


图 10　500 ℃ 下焙烧渣的 XRD 图谱

Fig. 10　XRD pattern of roasted slag at 500 ℃

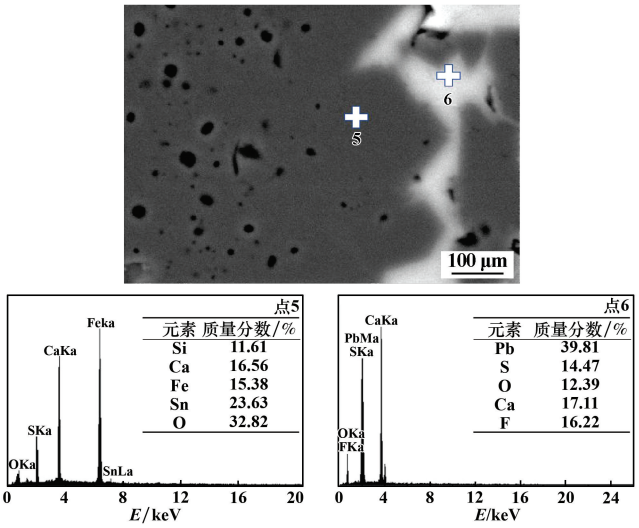


图 11　700 ℃ 下焙烧渣的 EPMA 分析结果

Fig. 11　EPMA of roasted slag at 700 ℃

3.3　焙烧时间对脱砷率的影响

焙烧温度 700 ℃,其他条件不变,研究了焙烧时间的影响,结果如图 12 所示。由图 12 可知,焙烧时间 90 min 时,脱砷率约 94.73%;继续延长焙烧时间,脱砷率增幅不显著。随着焙烧时间延长,硫残余量呈下降趋势,且硫锡比下降使后续工艺中锡无法有效硫化挥发。为了保证后续硫化锡所需的硫锡比,焙烧时间选用 90 min。

3.4　综合试验

经单因素实验可得优化焙烧工艺条件为:铅冶炼烟尘添加量 30%、焙烧温度 700 ℃、焙烧时间 90 min,此条件下的焙烧渣成分分析结果见表 3。由表 3 可知,焙烧渣中砷残余含量为 0.44%,锡残余含量为 3.19%。对应的硫锡比为 3.05,为后续的硫化挥发锡提供了有利条件。通过对焙烧渣进行烟化熔炼,可得到铅铋合金和含少量锌元素的硫化锡烟尘,实现多金属的分离和回收。

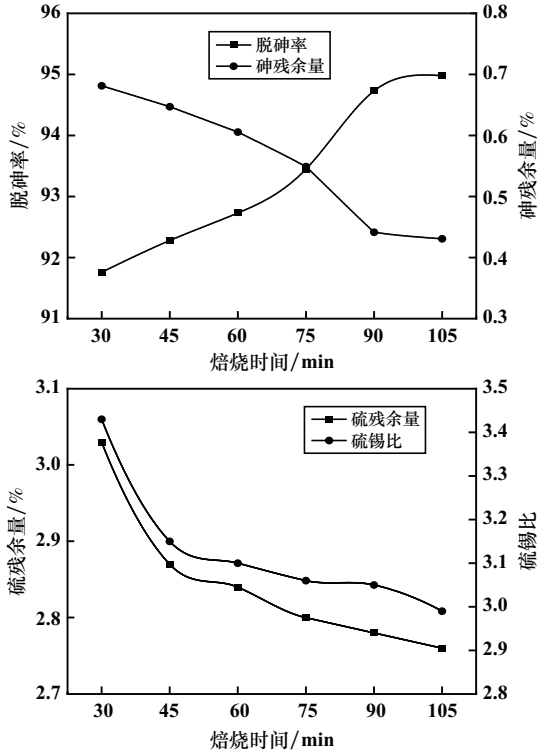


图 12　焙烧时间的影响

Fig. 12　Effect of roasting time

表 3　优化条件下焙烧渣成分分析(质量分数)

Table 3　Composition of roasted slag under optimized conditions %

As	S	Sn	Pb	Zn	Bi	Fe	CaO	SiO_2	其他
0.44	2.78	3.19	11.78	3.35	0.85	27.64	19.17	25.88	6.92

4　结论

1) 热力学分析结果表明,反应体系中砷的挥发脱除主要包括两部分:① 源于低品位锡中矿中毒砂分解产生的挥发性 As_4;② 源于毒砂分解产物与铅冶炼烟尘中砷酸盐反应形成的挥发性 As_2O_3。

2) 铅冶炼烟尘添加量 30%、焙烧温度 700 ℃、焙烧时间 90 min 条件下,砷脱除率达 94.73%,同时焙烧渣中硫锡比为 3.05,有利于后续锡的硫化回收。铅冶炼烟尘添加量大于 30%时,其中砷酸盐物相过量,难以形成有效还原,砷脱除率下降。

3) 锡中矿与铅冶炼烟尘协同焙烧时,升高焙烧温度和延长焙烧时间有利于砷的挥发,但过高的焙烧温度和过长的焙烧时间会造成硫的损失。

参考文献(References):

[1]　邱在军,李磊,王华,等. 含锡铁精矿硫化焙烧脱锡的反应特征[J]. 过程工程学报, 2012,12(6):957-961.
QIU Zaijun, LI Lei, WANG Hua, et al. Reaction characteristics of

removal of tin from tin-bearing iron concentrate by sulfidation roasting[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2012, 12(6):957-961.

[2] HE J L, LI L, SUN Y X, et al. Tin separation and recovery using the successive conversion of the self-possessed sulfur from low-grade tin middling[J]. Separation and Purification Technology, 2025,356:129999.

[3] 徐志鹏,刘振鸿,李磊,等. 还原熔炼法回收低品位锡中矿中锡资源[J]. 中国有色冶金, 2024,53(1):68-80.
XU Zhipeng, LIU Zhenhong, LI Lei, et al. Recovery of tin resources from low-grade tin-bearing middling by reduction smelting process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024,53(1):68-80.

[4] 郭辉. 重有色金属冶炼中砷的脱除与回收[J]. 世界有色金属, 2020(1):7.
GUO Hui. Removal and recovery of arsenic in heavy nonferrous metal smelting[J]. World Nonferrous Metals, 2020(1):7.

[5] YU Y, LI L, WANG J, et al. Phase transformation of Sn in tin-bearing iron concentrates by roasting with FeS_2 in CO-CO_2 mixed gases and its effects on Sn separation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018,750:8-16.

[6] 昆明理工大学国土资源工程学院. “复杂多金属锡矿资源绿色低碳综合利用关键技术与产业化”取得重大进展[J]. 云南科技管理, 2024,37(3):68-69.
Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology. Key technologies and industrialization for green and low-carbon comprehensive utilization of complex polymetallic tin ore resources have made significant progress[J]. Yunnan Science and Technology Management, 2024,37(3):68-69.

[7] 于勇. 含锡铁精矿硫化焙烧分离锡的基础研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2022.
YU Yong. Fundamental research on separation of tin from tin-bearing iron concentrate by sulfidation roasting[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[8] WANG J, XU B, JIANG W, et al. Development of one-step process method to separate tin from tin-refining sulfur slag via vacuum sulfuration and volatilization[J]. Vacuum, 2023,212:112039.

[9] HE J L, LI L, XIAO Y, et al. Staged separation and recovery of As, Pb, Bi, and Zn from lead smelting dusts[J]. Separation and Purification Technology, 2025,354:129163.

[10] LI W, LIU W, JIAO F, et al. Comprehensive recovery of arsenic and valuable metals from lead smelting flue dust: Process optimization and mechanism investigation[J]. Separation and Purification Technology, 2025,353:128497.

[11] LIU J, HUANG S, CHEN K, et al. Recovering metallic Pb directly from lead smelting dust by NaOH-carbon roasting process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020,9(3):2744-2753.

[12] 陈丽诗,李鹏程,伍美珍,等. 锡冶炼烟尘中锡、铟赋存形态及分离富集研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):124-129.
CHEN Lishi, LI Pengcheng, WU Meizhen, et al. Occurrence state of tin and indium in tin smelting dust and corresponding separation method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):124-129.

引用本文:王崇宇,王泽斌,李磊. 低品位锡中矿与铅冶炼烟尘协同焙烧高效脱除砷研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):192-198.
WANG Chongyu, WANG Zebin, LI Lei. Efficient arsenic removal by co-disposal of low-grade tin middlings and lead smelting flue dust. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):192-198.

(上接第191页)

[7] 郑颖欣,张媛文. MPPM 表面 UiO-66-SO_3H 的构建及其性能[J]. 武夷学院学报, 2024,43(9):7-12.
ZHENG Yingxin, ZHANG Aiwen. Construction and performance study of UiO-66-SO_3H on MPPM surface[J]. Journal of Nanping Teachers College, 2024,43(9):7-12.

[8] 袁近秋,吕章怡,梁宇宁,等. UiO-66-NH_2 的改性及其吸附 Cu^{2+} 性能[J]. 化工科技, 2024,32(4):44-48.
YUAN Jinqiu, LYU Zhangyi, LIANG Yuning, et al. Modification of UiO-66-NH_2 and adsorption properties of Cu^{2+}[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2024,32(4):44-48.

[9] JI Z C, SUN H Y, ZHU Y F, et al. Enhanced selective removal of lead ions using a functionalized PAMAM@ UiO-66-NH_2 nanocomposite: Experiment and mechanism[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2021,328:111433.

[10] MORCOS G S, IBRAHIM A A, EL-SAYED M M H, et al. High performance functionalized UiO metal organic frameworks for the efficient and selective adsorption of Pb (II) ions in concentrated multi-ion systems[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021,9(3):105191.

[11] YANG L, LIU T J, LI Z, et al. Adsorption of La^{3+} onto trifluoroacetic acid modified UiO-66-COOH: Adsorption mechanism and application[J]. Materials Chemistry and Physics, 2023,301:127535.

[12] JIANG H R, XUE C H, SUN W J, et al. Acid regulation of defective sulfonic-acid-functionalized UiO-66 in the esterification of cyclohexene with formic acid[J]. Catalysis Letters, 2023,153(3):836-849.

[13] ANDRADE P H M, HENRY N, VOLKRINGER C, et al. Iodine uptake by Zr-/Hf-based UiO-66 materials: The influence of metal substitution on iodine evolution[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022,14(26):29916-29933.

[14] WANG Y L, ZHANG S, ZHAO Y F, et al. UiO-66-based metal organic frameworks for the photodegradation of acetaminophen under simulated solar irradiation[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021,9(5):106087.

[15] HUANG Z, WANG C, ZHAO J L, et al. Adsorption behavior of Pd(II) ions from aqueous solution onto pyromellitic acid modified-UiO-66-NH_2[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2020,13(9):7007-7019.

[16] OLORUNYOMI J F, LIU T Y, HO C K, et al. Imparting UiO-66 with fast cation exchange propertyvia sulfonating organic linkers for selective adsorption[J]. Separation and Purification Technology, 2021,260:118219.

[17] MORAL R, PAUL S. Understanding the role of solvent polarity and amino acid composition of cyclic peptides in nanotube stability[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2025,129(14):3590-3603.

引用本文:逄淑伟,程全国,赵勇. 功能化 SY-MOF-1 材料的制备及其对土壤中铅的去除[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):186-191.
PANG Shuwei, CHENG Quanguo, ZHAO Yong. Preparation of functionalized SY-MOF-1 composites and their application in lead removal from soil[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):186-191.