doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.02.019

引用格式：鲁兴武，闵小波，杨斌，殷勤生，牛振华，祁万虎，张恩玉，程亮，李俞良. 铅银渣与石膏渣协同熔炼—烟化资源化工艺研究[J]. 矿冶，2026，35(2)：329-335.

LU Xingwu, MIN Xiaobo, YANG Bin, YIN Qinsheng, NIU Zhenhua, QI Wanhu, ZHANG Enyu, CHENG Liang, LI Yuliang. Study on the co-treatment of lead-silver residue and gypsum residue via smelting-fuming process for resource utilization[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(2): 329-335.

铅银渣与石膏渣协同熔炼—烟化资源化工艺研究

鲁兴武[1,2,3] 闵小波[1,4] 杨 斌[2] 殷勤生[5] 牛振华[2,3]
祁万虎[2,3] 张恩玉[2,3] 程 亮[2,3] 李俞良[2,3]

（1. 中南大学 冶金与环境学院，长沙 410083；
2. 西北矿冶研究院，甘肃 白银 730900；
3. 甘肃省有色矿产资源综合利用技术创新中心，甘肃 白银 730900；
4. 国家重金属污染防治工程技术研究中心，长沙 410083；
5. 白银有色集团股份有限公司，甘肃 白银 730900）

摘 要：基于铜冶炼污酸处理石膏渣中$CaSO_4$在高温下可与还原剂C反应生成CaO的特性，提出将其与湿法炼锌铅银渣协同进行侧吹熔炼—烟化处置的新工艺。该工艺在实现铅、锌、金、银等有价金属高效挥发回收的同时，有效解决了两种固危废的堆存与资源化难题。通过系统考察反应温度、时间、配碳量、铁硅比及钙硅比等关键因素对金属挥发行为的影响，确定了优化工艺条件。结果表明，在在还原温度1 250 ℃、时间60 min、配碳量14%、铁硅比1.8、钙硅比0.8的优化条件下，铅、锌挥发率均高于98%，金、银挥发率分别超过50%和80%，石膏渣的协同消纳量可达铅银渣质量的10%左右。本研究为铜、铅、锌冶炼行业典型固危废的协同处理与资源回收提供了可行思路。

关键词：铅银渣；石膏渣；协同熔炼—烟化；有价金属回收；资源循环利用

中图分类号：TF811；TF813；TF09 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）02-0329-07

Study on the co-treatment of lead-silver residue and gypsum residue via smelting-fuming process for resource utilization

LU Xingwu[1,2,3] MIN Xiaobo[1,4] YANG Bin[2] YIN Qinsheng[5] NIU Zhenhua[2,3]
QI Wanhu[2,3] ZHANG Enyu[2,3] CHENG Liang[2,3] LI Yuliang[2,3]

(1. School of Metallurgy and Environment of Central South University, Changsha 410083, China;
2. Northwest Research Institute of Mining and Metallurgy, Baiyin 730900, Gansu, China;
3. Technological Innovation Center of comprehensive utilization of non-ferrous mineral resources of Gansu Province, Baiyin 730900, Gansu, China;
4. Chinese National Engineering Research Centre for Control & Treatment of Heavy Metal Pollution, Changsha 410083, China;
5. Baiyin Nonferrous Group Co. Ltd., Baiyin 730900, Gansu, China)

Abstract: Based on the characteristic that $CaSO_4$ in gypsum residue from copper-smelting acidic wastewater treatment can react with reductant C at high temperature to form CaO, a novel co-treatment process is proposed,

收稿日期：2025-08-21 **修回日期：**2025-10-27 **录用日期：**2025-11-05

基金项目：甘肃省科技重大专项(23ZDGD002，24ZDCD002)；国家重点研发计划项目(2019YFC1907300)

第一作者：鲁兴武，博士研究生，正高级工程师，主要从事有色金属资源回收利用研究。E-mail：450816388@qq.com

通信作者：闵小波，博士，教授；E-mail：mxb@csu.edu.cn

©Mining and Metallurgy Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

which integrates side-blown smelting and fuming of zinc-hydrometallurgy lead-silver residue together with the gypsum residue. This process not only achieves efficient volatilization recovery of valuable metals such as Pb, Zn, Au and Ag, but also effectively addresses the storage and resource-recycling challenges of both solid hazardous wastes. By systematically investigating the effects of key factors including reaction temperature, time, carbon dosage, Fe/SiO_2 ratio and CaO/SiO_2 ratio on metal volatilization behavior, the optimal process conditions were determined. The results show that under the optimized conditions – reduction temperature of 1 250 ℃, time of 60 min, carbon dosage of 14%, Fe/SiO_2 ratio of 1.8, and CaO/SiO_2 ratio of 0.8 – the volatilization rates of lead and zinc both exceed 98%, while those of gold and silver surpass 50% and 80%, respectively. The co-consumption of gypsum residue can reach approximately 10% of the mass of lead-silver residue. This study provides a feasible approach for the co-treatment and resource recovery of typical solid hazardous wastes in the copper, lead, and zinc smelting industries.

Key words: lead-silver residue; gypsum residue; co-smelting-fuming; valuable metals recovery; resource circulation and utilization

铅银渣是湿法炼锌热酸浸出环节产生的副产物，呈酸性且粒度极细。其中含有大量铅、锌等有价金属，以及铟、锗、金、银等少量贵金属[1-4]，同时也可能伴生砷、镉等有害元素。若未经妥善处理直接堆存，其中有毒有害成分将可能对土壤及水体造成潜在环境污染风险。石膏渣则来源于铜冶炼烟气洗涤废水（污酸）的中和处理工序，外观呈灰白色，质地疏松，密度较低。其主要成分为二水硫酸钙（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$），并含有锌、镉、砷等少量重金属元素。这些重金属多以硫酸盐形态存在[5-7]，若直接堆存同样会对环境构成隐患。

在铅银渣资源回收方面，现有方法主要包括熔化—烟化、浮选及湿法工艺等，可从渣中提取铅、锌、银等金属，并以氧化物形式作为二次原料返回锌冶炼等工业流程，实现资源循环利用[8-10]。对于石膏渣，不含重金属的类别可作为建筑材料、水泥缓凝剂或土壤改良剂使用。然而，铜冶炼污酸中和产生的石膏渣因含有砷、锌、镉等有毒元素，难以直接资源化利用。张添富[11]针对含锌石膏渣提出了选择性还原焙烧—水浸—二氧化碳碳化的工艺，有效回收了锌和硫，并制备出高纯度碳酸钙，实现了该渣的无害化与资源化。RUAN等[12]研究了以石膏污泥（主要成分为$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）替代石灰石与高铅渣共熔回收铅、锌，发现在钙硅比为0.8、硫酸钙与氧化钙摩尔比为1∶5的条件下，铅、锌回收率分别可达94.43%与58.43%。LONG等[13]将铜冶炼污酸石膏渣配入铜熔炼渣中，通过高温反应使硫酸钙转化为硫化钙，进而与渣中铁、铜、硅等元素作用，提升后续浮选过程中铜的回收率，同时使重金属转化为稳定的硫化物形态，降低其浸出毒性。该方法工艺简便、成本较低且效果显著。

通过合理的协同配伍技术，可实现上述危废的资源化利用与环境保护双重目标。基于此，本研究将铜冶炼污酸处理产生的石膏渣配入铅银渣，采用侧吹熔炼—烟化工艺进行协同处置。利用石膏渣中$CaSO_4$在高温下与还原剂C反应生成CaO的特性，部分替代石灰石，同时促进铅、锌、金、银等有价金属的挥发回收，并使最终水淬渣达到一般固废标准，从而实现铅银渣与石膏渣协同无害化与资源化的目标。本研究旨在通过系统的协同熔炼—烟化试验，揭示反应过程中多金属的挥发迁移行为，阐明关键工艺参数（如温度、配碳量、反应时间、铁硅比、钙硅比等）对金属回收率的影响规律，为湿法炼锌与铜冶炼行业典型固危废的协同处置与有价金属高效回收提供技术参考。

1　试验

1.1　试验原料

1.1.1　化学组成分析

1）铅银渣化学组成

铅银渣的XRF半定量分析结果如表1所示。结果表明，渣中主要有价金属元素为锌和铅；金、银含量分别为1.52 $g \cdot t^{-1}$和110.64 $g \cdot t^{-1}$。图1为铅银渣的SEM-EDS分析结果，可见渣颗粒形状不规则、粒径分布不均，各元素间无明显界限，整体呈均匀分布状态。

2）石膏渣化学组成

石膏渣的XRF全元素分析结果列于表2。其主要化学组成为钙和硫。由图2的SEM-EDS分析可知，石膏渣颗粒尺寸细小（多数低于10 μm），形态不规则。

表1 铅银渣的主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of the lead-silver residue /%

成分	Zn①	水溶锌①	Pb①	Ag①,②	Au①,②	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2
含量	9.43	4.14	3.55	110.64	1.52	1.05	1.04	1.68	15.79
成分	P_2O_5	S	Cl	K_2O	CaO	Ti	Cr	Mn	Fe
含量	0.09	32.25	0.03	0.08	5.85	0.10	0.01	2.15	25.73
成分	Ni	Cu	As	Sr	Cd	Sb	Ba		
含量	0.01	0.20	0.23	0.12	0.18	0.09	0.33		

注：表中标①的数值为化学分析结果，其余为XRF半定量检测结果；标②的单位为$g \cdot t^{-1}$。

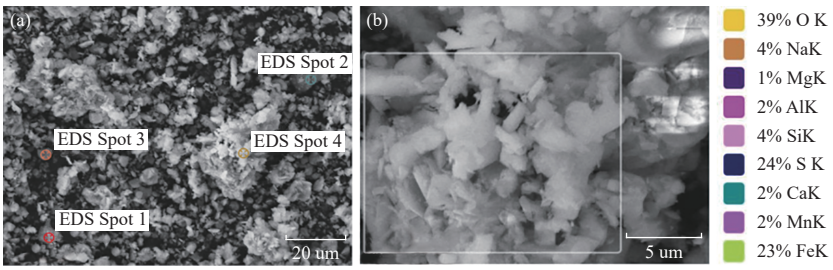


图1 铅银渣的扫描电镜—能谱分析结果

Fig. 1 SEM-EDS analysis results of the lead-silver residue

表2 石膏渣的全元素分析结果

Table 2 Full-element analysis results of the gypsum residue /%

元素	O	Ca	S	As	F	Fe	Si	Na	Cu	Al	Bi
含量	46.745	32.486	16.418	4.612	2.721	0.696	0.476	0.393	0.301	0.238	0.217
元素	Zn	Cd	Cl	Mn	Pb	Ti	P	Ni	Sr	Se	
含量	0.173	0.103	0.081	0.042	0.040	0.040	0.033	0.018	0.015	0.012	

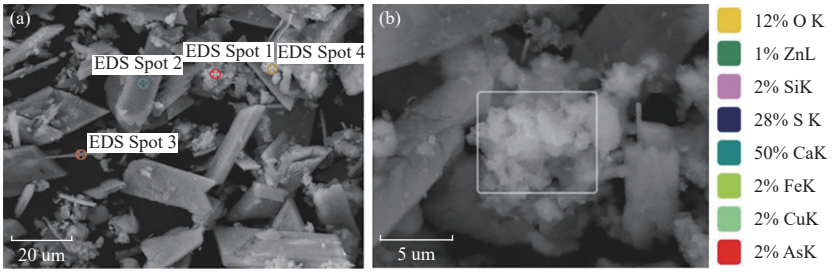


图2 石膏渣的扫描电镜—能谱分析结果

Fig. 2 SEM-EDS analysis results of the gypsum residue

从图3石膏渣的热重分析结果可以看出，热重分析显示石膏渣的失重过程可分为三个阶段：50.4~110.2 ℃（失重率12.57%）、210.2~780.3 ℃（失重率8.55%）及1 000.3~1 400 ℃（失重率39.58%）。在固定分解温度与无烟煤用量的条件下，延长分解时间可显著提高脱硫率与氧化钙生成量。当温度由1 000 ℃升至1 200 ℃时，脱硫率明显上升，氧化钙生成量急剧增加；温度继续升至1 300 ℃时，脱硫率增速减缓，氧化钙生成量渐趋平稳。温度达到1 300 ℃后，石膏渣基本完全分解为CaO[14-16]。

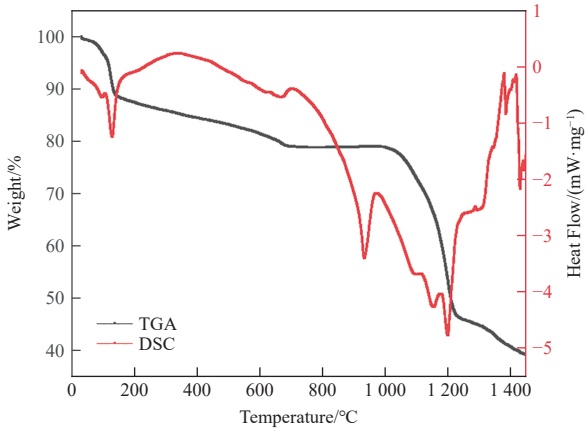


图3 石膏渣同步热分析结果

Fig. 3 Results of simultaneous thermal analysis of gypsum slag

1.2 试验方法

将铅银渣磨细并过150目标准筛备用。随后将筛后铅银渣与添加剂（石膏渣）、还原剂（焦炭）及少量

水均匀混合并造球，于40 ℃真空干燥箱中干燥10 h。将干燥后的料球置于黏土坩埚中，待马弗炉升温至设定温度后迅速放入坩埚进行反应。试验结束后快速取出坩埚并冷却，对所得还原渣称重、制样并进行分析。采用控制变量法，系统考察时间、温度、配碳量、铁硅比及钙硅比等参数对金属挥发率的影响。

1.3 主要化学反应

铅银渣中铅主要赋存于$PbSO_4$、PbO及$PbSiO_3$等物相中；锌主要以$ZnSO_4$、$ZnFe_2O_4$及Zn_2SiO_4等形式存在；银则主要存在于AgCl、Ag_2S、Ag_2O及Ag_2SO_4等物相中。

在侧吹熔炼—烟化过程中，可能发生的主要化学反应如下所示[17,18]：

$$PbSO_4+2C=Pb+SO_2+2CO(g) \quad (1)$$

$$PbO+C=Pb+CO(g) \quad (2)$$

$$PbSiO_3+C=Pb+SiO_2+CO(g) \quad (3)$$

$$Zn_2SiO_4+2CO(g)=2Zn(g)+SiO_2+2CO_2(g) \quad (4)$$

$$ZnFe_2O_4+2CO(g)=Zn(g)+2FeO+2CO_2(g) \quad (5)$$

$$Zn_2SiO_4+2C=2Zn(g)+SiO_2+2CO(g) \quad (6)$$

$$ZnSO_4+2CO(g)=Zn(g)+SO_2(g)+2CO_2(g) \quad (7)$$

$$ZnFe_2O_4+2C=Zn(g)+2FeO+2CO(g) \quad (8)$$

$$ZnSO_4+2C=Zn(g)+SO_2(g)+2CO(g) \quad (9)$$

$$2Ag_2S+C=4Ag+CS_2 \quad (10)$$

$$Ag_2S+CO=2Ag+COS \quad (11)$$

$$1/2Ag_2SO_4+C=Ag+1/2SO_2+CO \quad (12)$$

$$1/2Ag_2SO_4+CO=Ag+1/2SO_2+CO_2 \quad (13)$$

$$Ag_2O+C=2Ag+CO \quad (14)$$

$$Ag_2O+CO=2Ag+CO_2 \quad (15)$$

$$1/2Ag_2S+O_2=1/2Ag_2SO_4 \quad (16)$$

$$CaSO_4+C=CaO+SO_2+CO \quad (17)$$

2 结果与讨论

2.1 熔炼温度对金属挥发率的影响

固定试验条件：铅银渣50 g、石膏渣5 g、反应时间60 min、配碳量12%（计算铁硅比约为1.6，钙硅比约为0.87），考察反应温度对金属挥发率的影响，结果如图4所示。

如图4所示，随着温度升高，渣的减量化效果总体趋于显著。高温环境有利于金属的还原与挥发，挥发量增加导致最终尾渣产量相应减少。同时，尾渣中残留金属含量随温度升高而降低，表明其潜在环境危害性也随之减弱。由图4中金属挥发率结果可知，熔炼温度对铅、锌的挥发行为具有重要影响。当温度

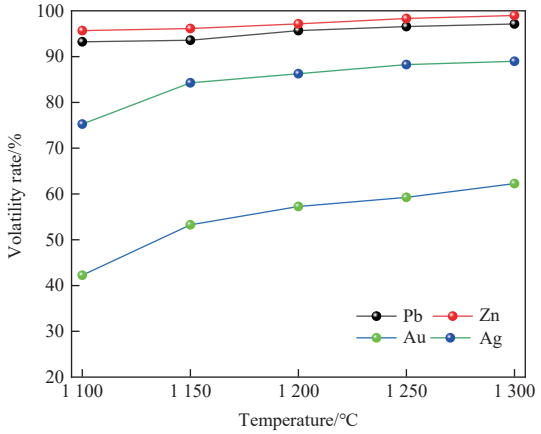


图4 熔炼温度对金属挥发率的影响

Fig. 4 Effects of smelting temperature on metal volatilization rate

低于1 250 ℃时，铅、锌的挥发率随温度上升均呈提高趋势；温度超过1 300 ℃后，挥发率变化趋于平稳。温度过高不仅会增加能耗、缩短熔炼炉使用寿命，也可能引起体系热力学与动力学的复杂变化；而温度过低则会显著增大熔渣黏度，降低其流动性，从而延缓金属氧化物的还原过程，导致金属挥发速率与挥发率下降。金的熔点为1 064 ℃，其挥发行为随温度升高而增强，尤其在超过1 100 ℃后，金与银的挥发损失均显著增大。综合考虑金属回收效率、能耗与经济性等因素，确定试验最优熔炼温度为1 250 ℃。

2.2 反应时间对金属挥发率的影响

固定试验条件：铅银渣50 g、石膏渣5 g、反应温度1 250 ℃、配碳量12%，考察反应时间对金属挥发率的影响，结果如图5所示。

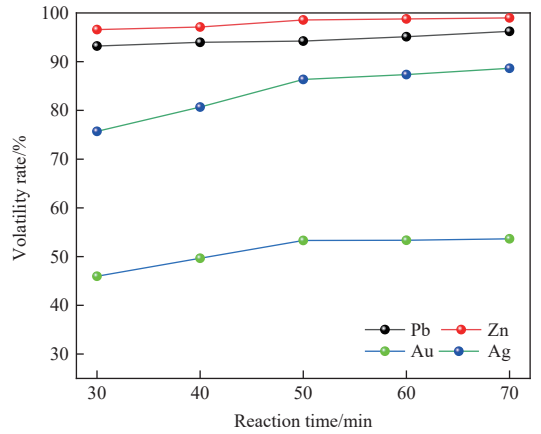


图5 反应时间对金属挥发率的影响

Fig. 5 Effects of reaction time on metal volatilization rate

由图5可知，金属挥发效果随反应时间延长而显著改善。延长反应时间有利于渣中硫酸盐的充分

分解，从而减少最终尾渣的产率。当反应时间达到60 min后，金属挥发率及渣的减量化程度均趋于稳定。反应时间在30~70 min，金属挥发率整体呈上升趋势。这主要归因于反应时间的延长促进了渣中铅、锌等化合物还原反应的进行，使生成的金属单质得以更充分挥发。综合考虑挥发效率与工艺经济性，本研究确定最佳反应时间为60 min。

2.3 配碳量对金属挥发率的影响

固定试验条件：铅银渣50 g、石膏渣5 g、反应温度1 250 ℃、反应时间60 min，考察配碳量对金属挥发率的影响，结果如图6所示。

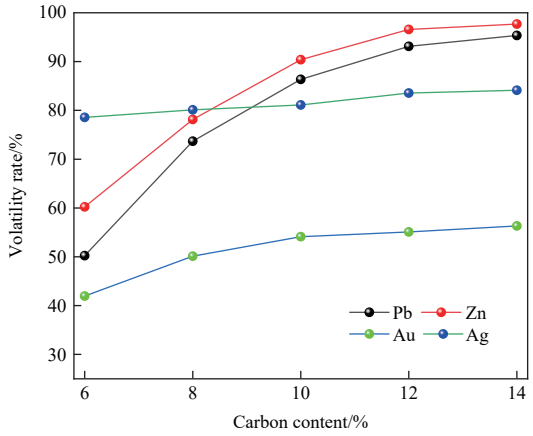


图6 配碳量对金属挥发率的影响

Fig. 6 Effects of carbon dosage on metal volatilization rate

从图6可以看出，随着配碳量增加，渣的减量率呈现稳步上升趋势，说明强还原性气氛下有利于金属硫酸盐的分解及金属的还原挥发。因此，提高配碳量有利于增加金属挥发量，降低尾渣产率，同时减少尾渣中金属残留含量。如图6所示，当配碳量为14%时，金属挥发率达到最高。综合考虑还原效果与碳耗成本，本研究确定最佳配碳量为14 t%。

2.4 铁硅比对金属挥发率的影响

固定试验条件：铅银渣50 g、石膏渣5 g、反应温度1 250 ℃、反应时间60 min（钙硅比约为0.87），通过控制石英石或铁屑的加入量调整铁硅比，考察铁硅比对金属挥发率的影响，结果如图7所示。

由图7可知，随着铁硅比的增大，熔剂率越低，渣的减量化效果越显著。在较低熔剂的情况下，起到了更好的减量效果，说明铁硅比的增大，有利于渣的减量化。另外，尾渣的金属含量随着铁硅比的升高而减小，表明尾渣的危害性越小。金属挥发率的结果由上图所示，铁硅比的增大，有利于铅、锌的挥发，当铁硅比为2的时候，铅、锌的挥发率分别为96.68%、

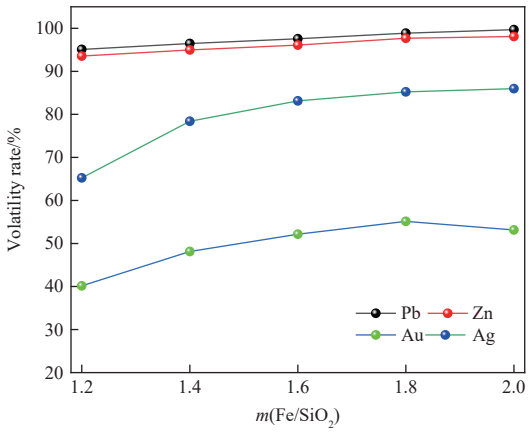


图7 铁硅比对金属挥发率的影响

Fig. 7 Effects of Fe/SiO_2 ratio on metal volatilization rate

95.36%。原料的铁硅比为1.6，铁硅比越接近1.6意味着所需添加SiO_2的量越少，成本越低。因此，本试验确定铁硅比最优值为1.8。

2.5 钙硅比对金属挥发率的影响

固定试验条件：铅银渣50 g、反应温度1 250 ℃、反应时间60 min（铁硅比1.8），通过控制石膏渣的加入量调整钙硅比，考察钙硅比对金属挥发率的影响，结果如图8所示。

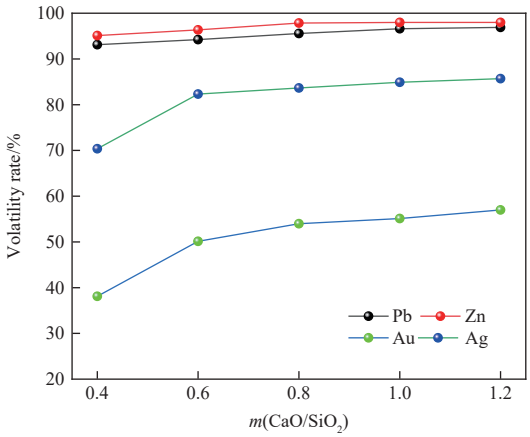


图8 钙硅比对金属挥发率的影响

Fig. 8 Effects of CaO/SiO_2 ratio on metal volatilization rate

从图8可以看出，随着钙硅比增大，所需熔剂添加量相应增加，而渣的减量化效果反而有所下降。这表明较高的钙硅比不利于实现渣相减量，且因熔剂用量增加导致最终尾渣产率升高。在钙硅比为0.8时，尾渣中银含量最低，铅、锌残留量也相对较少。金属挥发率结果显示（图8），铅、锌挥发率受钙硅比影响较小，在该钙硅比条件下分别达到95.36%与96.11%，同时渣的减量率也达到最高值。综合考虑减量化效果、尾渣金属残留及工艺经济性，本研究确定最优钙

硅比为0.8，此时石膏渣适宜加入量约为5 g。

2.6 协同熔炼渣的微观形貌与成分分析

在采用控制变量法系统研究铅银渣与石膏渣协同熔炼过程中金属挥发行为的基础上，按上述确定的最佳工艺条件进行验证试验，并对所得协同熔炼渣进行扫描电镜（SEM）形貌观察及能谱（EDS）分析，结果分别如图9和表3所示。分析表明，该熔炼渣中已基本检测不到金、银等贵金属信号。

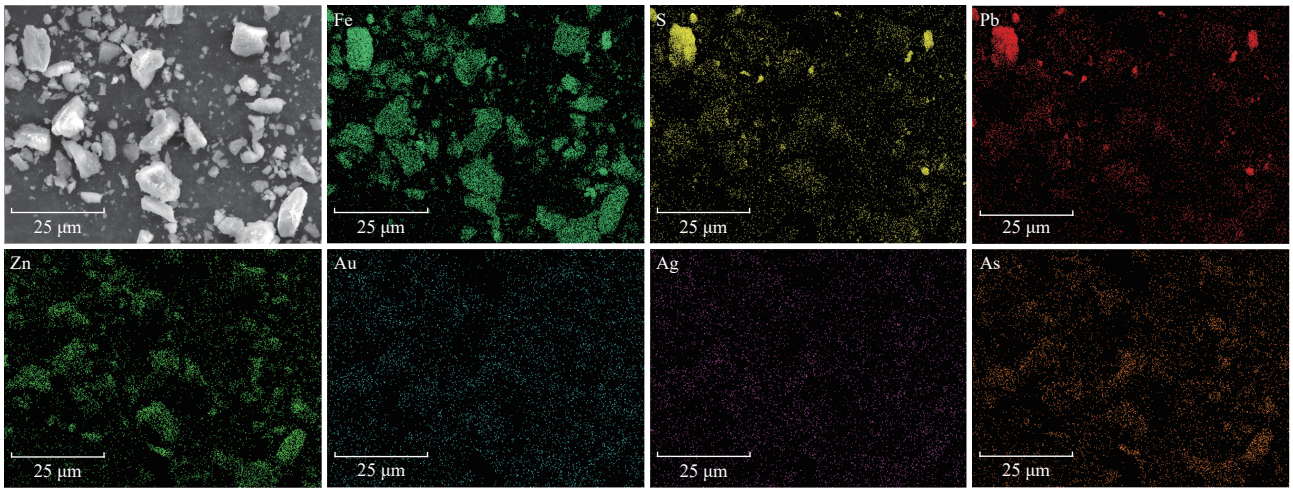


图9 铅银渣与石膏渣协同熔炼渣的扫描电镜及元素分布图像

Fig. 9 SEM image and elemental distribution maps of the co-smelted slag from lead-silver residue and gypsum residue

表3 铅银渣与石膏渣协同熔炼渣的EDS能谱分析结果

Table 3 EDS analysis results of the co-smelted slag from lead-silver residue and gypsum residue

元素	质量分数/%	σ值/%	原子分数/%
S	10.25	0.21	17.16
Fe	72.12	0.60	69.32
Cu	0.28	0.33	0.24
Zn	8.21	0.44	6.74
As	9.14	0.47	6.54
Ag	0.00	0.25	0.00
Au	0.00	0.55	0.00
Pb	0.00	0.70	0.00
总计	100.0		100.0

3 结论

1）关键工艺参数对金属挥发具有显著影响。提高反应温度、配碳量、铁硅比及延长反应时间，或适当降低钙硅比，均有利于促进铅、锌、金、银等有价金属的挥发回收。

2）在还原温度1 250 ℃、时间60 min、配碳量14%、铁硅比1.8、钙硅比0.8的优化条件下，铅、锌挥发率均高于98%，金、银挥发率分别达50%和80%以上，实现了有价金属的高效提取。

3）该工艺实现了固危废的协同消纳与资源化。石膏渣的适宜掺入比例为铅银渣质量的10%。据此估算，一个年产10万t锌的湿法炼锌企业，每年可协同处置铅银渣约5万t与石膏渣约0.5万t，在有效消纳两种废渣的同时，还可减少石灰石消耗，兼具环境与经济效益。

参考文献

[1] 张帆. 含矾铅银渣中锌铁的浸出与分离行为研究[D]. 沈阳：东北大学，2013.
ZHANG F. Study on the leaching and separation behavior of zinc and iron in alum-containing lead-silver slag[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.

[2] 伍贺东. 鼓风炉炼铅炉渣烟化挥发锌的研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2008.
WU H D. Study on the volatilization of zinc by fumigation of lead slag from blast furnace[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008.

[3] 张学友，王海北，MA Hao. 锌冶炼的双碳目标实现路径与方法[J]. 矿冶，2025，34(3)：508-514.
ZHANG X Y, WANG H B, MA H. Paths and methods for achieving carbon peaking and carbon neutrality in zinc smelting industry[J]. Mining and Metallurgy, 2025, 34(3): 508-514.

[4] GORAI B, JANA R K, PREMCHAND. Characteristics and utilisation of copper slag—a review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2003, 39(4): 299-313.

[5] 王振银，高文成，温建康，等. 锌浸出渣有价金属回收及全质化利用研究进展[J]. 工程科学学报，2020，42(11)：1400-1410.
WANG Z Y, GAO W C, WEN J K, et al. Research progress on recovery of valuable metals from zinc leaching slag and

utilization of holomorphism[J]. Journal of Engineering Science, 2020, 42(11): 1400-1410.

[6] DAS B, BARADA KANTA M, ANGADI S, et al. Characterization and recovery of copper values from discarded slag[J]. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 2009, 28(6): 561-567.

[7] 朱应旭，陶家荣，世仙果，等. 湿法炼锌污酸处理中石膏渣减量化工艺探索[J]. 绿色矿冶，2024, 40(1): 44-48.
ZHU Y X, TAO J R, SHI X G, et al. Exploration of gypsum slag reduction process in wet zinc smelting acid treatment[J]. Green Mining and Metallurgy, 2024, 40(1): 44-48.

[8] 苏瑞娟. 火法处理铅银渣的挥发工艺研究[J]. 山西冶金，2024, 47(8): 45-46, 52.
SU R J. Research on volatilization process of lead-silver slag by fire treatment[J]. Shanxi Metallurgy, 2024, 47(8): 45-46, 52.

[9] 宋言，陈向强，张阁. 湿法炼锌危废铅银渣的侧吹熔炼-连续烟化工艺核心装备与工程设计[J]. 有色设备，2024, 38(5): 53-60.
SONG Y, CHEN X Q, ZHANG G. Core equipment and engineering design of side-blowing melting-continuous smelting process for wet zinc refining of hazardous lead-silver slag[J]. Nonferrous Equipment, 2024, 38(5): 53-60.

[10] 陈春林，戴兴征，魏昶. 湿法炼锌协同处置富氧顶吹炼铅烟尘分离回收镉的生产实践[J]. 矿冶，2023, 32(1): 60-64, 83.
CHEN C L, DAI X Z, WEI C. Production practice of separation and recovery of cadmium from oxygen-enriched top-blow lead smelting dust by zinc hydrometallurgy[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(1): 60-64, 83.

[11] 张添富. 含锌石膏渣资源化利用及减量化处置工艺与机理研究[D]. 长沙：中南大学，2023.
ZHANG T F. Research on resource utilization and reduced disposal process and mechanism of zinc-containing gypsum slag[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[12] RUAN B, JIAO F, LIU W, et al. Utilization and detoxification of gypsum sludge by replacing limestone in reduction smelting of high lead slag[J]. J. Cent. South Univ., 2023, 30: 1145-1157.

[13] LONG G X, SHU H C, QI H L, et al. Co-treatment of copper smelting slag and gypsum residue for valuable metals and sulfur recovery[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2023, 183: 106360.

[14] 林巧，陶超凡，王冬冬. 石膏渣热分解过程分析[J]. 铜业工程，2021(5): 63-65.
LIN Q, TAO C F, WANG D D. Analysis of thermal decomposition process of gypsum slag[J]. Copper Engineering, 2021(5): 63-65.

[15] 王云燕，何紫彤，唐巾尧，等. 铜冶炼脱硫石膏渣的环境稳定性与重金属释放机制[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2023, 54(2): 562-576.
WANG Y Y, HE Z T, TANG J Y, et al. Environmental stability and heavy metal release mechanism of desulfurization gypsum slag from copper smelting[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2023, 54(2): 562-576.

[16] 谢容生，谢天鉴，刘维维，等. 锌冶炼石膏渣还原分解热力学分析[J]. 环境科学与技术，2018, 41(2): 151-156.
XIE R S, XIE T J, LIU W W, et al. Thermodynamic analysis of reductive decomposition of zinc smelting gypsum slag[J]. Environmental Science and Technology, 2018, 41(2): 151-156.

[17] 冶玉花，苟有强，刘安强. 铅银渣熔化-烟化过程中银物相演化规律的研究[J]. 绿色矿冶，2024, 40(2): 26-34.
YE Y H, GOU Y Q, LIU A Q. Study on the evolution law of silver physical phase during the melting-smoldering process of lead-silver slag[J]. Green Mining and Metallurgy, 2024, 40(2): 26-34.

[18] 赵瑞峰，王胜，何乃勇，等. 烟化挥发回收铅银渣中低品位稀贵金属的研究[J]. 甘肃冶金，2023, 45(5): 68-71.
ZHAO R F, WANG S, HE N Y, et al. Study on the recovery of low-grade rare precious metals from lead-silver slag by smelting volatilization[J]. Gansu Metallurgy, 2023, 45(5): 68-71.