铜冶炼渣资源化利用:配伍优化与烧结行为调控研究①

余小吕[1], 梁艳辉[2,3], 高峰[1], 李安[2,3], 徐严伟[1], 刘维维[2,3]
(1.易门铜业有限公司, 云南 玉溪 651199; 2.昆明冶金研究院有限公司, 云南 昆明 650021; 3.有色金属强化冶金新技术全国重点实验室 云南 昆明 650021)

摘 要: 为优化铜渣与铜精矿在铜冶炼过程中的配伍,采用热力学分析、相图计算与实验研究相结合的方法,系统研究配伍比例对物相演变、烧结特性及硫分离行为的影响。结果表明:随着铜渣比例从 40%增至 60%,体系中氧化物相比例显著上升,硫化物相比例下降,液相生成量增加,烧结体结构由疏松多孔逐渐趋于致密连续;铜渣比例 50%~60%时,烧结体结构更稳定。较高铜渣比例有助于形成铁钙硅复合氧化物,从而显著增强烧结体结构稳定性。氧浓度由 40%提高到 60%,硫挥发量显著增加,挥发效率提升 11 百分点。

关键词: 铜冶炼渣; 铜精矿; 配伍比例; 烧结行为; 物相变化; 硫分离
中图分类号: X758 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.027
文章编号: 0253-6099(2026)04-0175-08

Resource Utilization of Copper Smelting Slag: Blending Optimization and Sintering Behavior Regulation

YU Xiaolyu[1], LIANG Yanhui[2,3], GAO Feng[1], LI An[2,3], XU Yanwei[1], LIU Weiwei[2,3]
(1.*Yimen Copper Industry Co., Ltd.*, *Yuxi* 651199, *Yunnan*, *China*; 2.*Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd.*, *Kunming* 650021, *Yunnan*, *China*; 3. *State Key Laboratory of New Enhanced Metallurgical Technology for Non-ferrous Metals*, *Kunming* 650021, *Yunnan*, *China*)

Abstract: To optimize the blending of copper slag and copper concentrate in copper smelting process, thermodynamic analysis, phase-diagram calculation and experimental research were combined to systematically investigate the effects of blending ratio on phase evolution, sintering characteristics and sulfur separation behavior. The results show that an increase in the copper slag ratio from 40% to 60% leads to a remarkable rise in the fraction of oxide phases and a drop in the fraction of sulfide phases in the system, as well as higher liquid-phase-forming capacity. The structure of the sintered product gradually changes from loose and porous to dense and continuous, and reaches its most stable state when the copper slag ratio ranges from 50% to 60%. A higher copper slag ratio facilitates the formation of Fe-Ca-Si composite oxides, which greatly enhances the structural stability of sintered products. With a rise in oxygen concentration from 40% to 60%, sulfur volatilization capacity is substantially improved, and the sulfur volatilization efficiency rises by 11 percentage points.

Key words: copper smelting slag; copper concentrate; blending ratio; sintering behavior; phase evolution; sulfur separation

随着铜冶炼行业的快速发展,铜冶炼渣(简称铜渣)产量持续增长。全球每月精炼铜产量约为 301.0 万 t,按每吨铜产 2.2 t 渣计算,铜渣月产量高达 662.2 万 t[1],其中含铜量超过 3.3 万 t,铜渣资源化利用已成为冶金领域的重要挑战。目前,铜渣主要采用破碎-浮选工艺进行处理[2],但该方法存在工艺流程长、尾矿利用率低等问题[3]。因此,开发流程短、效率高的铜渣处理技术,特别是通过优化铜渣与其他冶金物料的配伍实现综合回收,已成为近年的研究热点[4-5]。

铜渣富含 FeO、CaO 和 SiO_2 等组分,在与铜精矿

① **收稿日期**: 2026-03-04
基金项目: 国家重点研发计划(2024YFC3712101)
作者简介: 余小吕(1990—),男,云南昆明人,高级工程师,主要研究方向为铜冶炼过程与工艺技术开发。E-mail:360215129@qq.com
通信作者: 刘维维(1985—),女,陕西汉中人,高级工程师,主要研究方向为有色金属冶炼过程污染控制。E-mail:3802802@163.com

配伍熔炼时,可促进生成铁硅酸盐、钙铁石等低熔点矿物相[6],这些物相的形成能有效改善渣系的流动性,增强其高温稳定性,并促进铜硫高效分离[7-9],有助于降低冶炼过程整体能耗,提升铜的回收率[10]。铜渣配伍比例对物相组成与烧结行为具有关键影响[11],适当提高铜渣配伍比例可促进氧化物相生成、减少硫化物相,增强烧结体致密性,提升分离效率[12]。然而,目前针对配伍体系的系统性优化,尤其是结合热力学分析与实验验证的研究仍显不足。

本文围绕铜渣与铜精矿的配伍比例开展实验,结合热力学计算、相图分析与烧结实验,阐明配伍比例对物相演变、烧结特性及硫分离行为的影响机制,确定优化配伍区间与工艺条件,以期为铜渣高效资源化提供理论依据与技术参考。

1 实验

1.1 实验原料

实验原料包括铜精矿、铜渣、粉煤灰,均取自云南某铜冶炼厂,其主要化学成分见表 1。由表 1 可知,铜精矿主要成分为 CuO 和 Fe_2O_3,表明铜精矿在冶炼中主要以铜、铁氧化物存在;铜渣中 Fe_2O_3 和 SiO_2 含量较高,呈现典型的铁氧化物-硅酸盐炉渣物相特征;粉煤灰富含 SiO_2 和 Al_2O_3。

表 1 实验原料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of raw materials in experiment %

原料	CuO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	PbO	ZnO
铜精矿	21.20	25.93	3.73	2.32	0.38	0.46	0.38	0.045	43.67	0.13	0.03
铜渣	4.48	55.28	25.37	2.83	2.84	1.6	—	—	1.03	2.74	2.89
粉煤灰	—	3.35	51.96	26.72	6.24	0.50	0.62	0.15	7.38	—	—

图 1 为实验原料 XRD 图谱。由图 1 可知,铜精矿在约 29°处存在显著衍射峰,对应 $CuFeS_2$ 特征衍射峰;在 32°~40°及 50°附近分别检出 FeS_2 与 Fe_2O_3 的特征峰,表明样品中富含铁硫化物与氧化物,反映了其具有强硫化特性。铜渣检出 $CuFe_2O_4$ 和 Fe_2SiO_4 等特征衍射峰,说明其物相以铜铁氧化物及铁硅酸盐为主,结构较为复杂。高温条件下铜矿石和废渣发生了复杂的化学反应,生成了多种铜铁氧化物及硅酸盐相[13-14]。粉煤灰中主要物相为 SiO_2、Al_2O_3、$Al_6Si_2O_{13}$,呈现典型的硅铝酸盐组成。在高温冶炼过程中,铜渣与粉煤灰可作为关键造渣组分,调节体系组成与熔体性质,促进硫的反应与分离,从而提升冶炼效率与产物质量[15]。

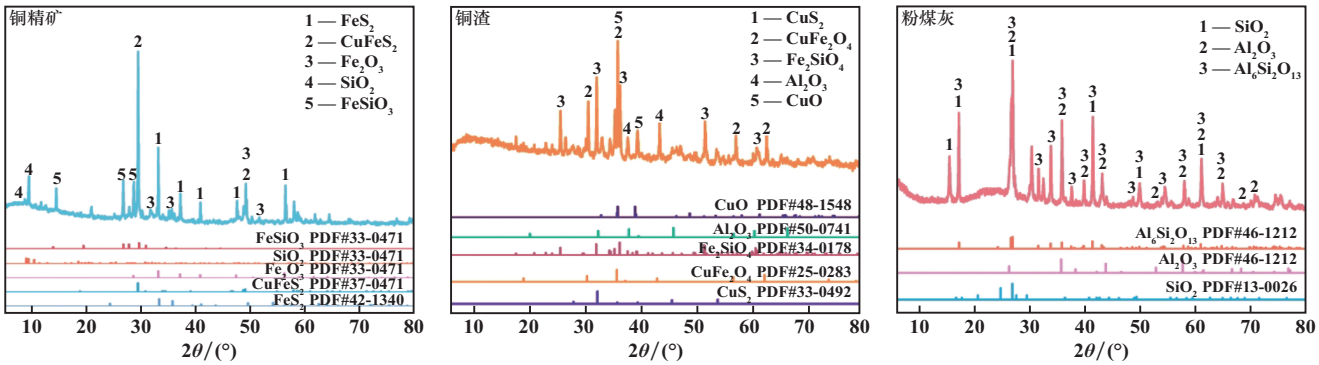


图 1 实验原料 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of raw materials in experiment

1.2 实验过程

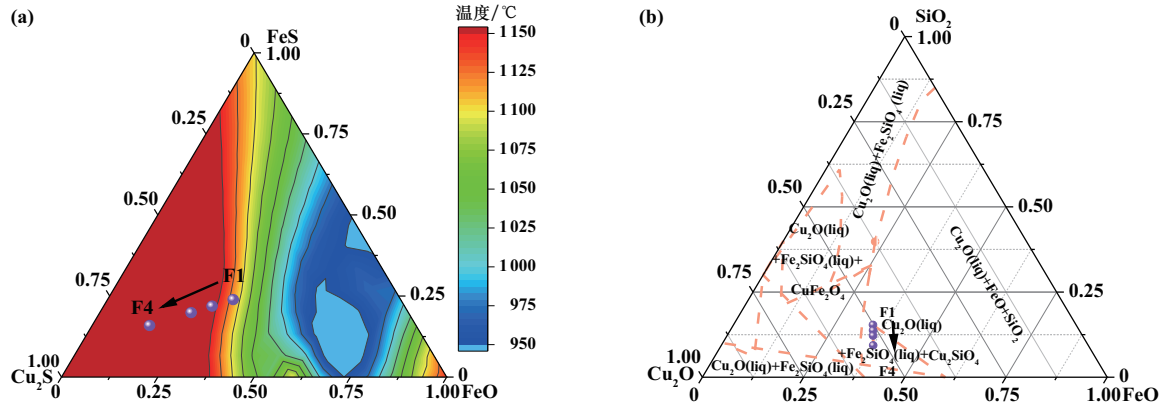
将铜精矿、铜渣、粉煤灰按一定比例混合,混合后置于行星球磨机中以 300 r/min 的转速球磨 0.5 h,其中行星球磨机罐体尺寸为 Φ260 mm × 320 mm,研磨介质为 Φ5 mm 和 Φ10 mm 的氧化锆球。球磨产物使用 150 μm 试验筛筛分,筛分产物于 300 ℃下预热 15 min,预热结束后,在一定烧结温度下保温 1 h。

1.3 分析与检测

采用 X 射线荧光光谱仪(RIGAKU ZSX Primus)测定原料化学成分;采用 X 射线衍射仪(Ultima IV)表征原料物相组成;使用 HSC 9.0 软件计算反应热力学参数(ΔH、ΔS、ΔG 及平衡常数);采用同步热分析仪分析烧结过程的热行为;采用扫描电子显微镜测定样品微观形貌及元素分布;采用管式炉收集烧结过程释放的气体,测定气体中的硫含量。

1.4 铜渣与铜精矿配比优化分析

图 2 为铜冶炼过程中主要配伍组分的三元相图。由图 2 可知,随着 FeO 含量增加,体系液相温度显著下降,特别是在 FeO 质量分数为 55%附近,形成了一个明显的低温区(约 980~1 000 ℃)。当 Cu_2S 与 FeO 比例约为 0.22∶0.50 时,体系处于流动性与反应温度的较优平衡区,表明FeO的引入有助于降低熔融温



（a）Cu_2S-FeS-FeO；（b）Cu_2O-FeO-SiO_2

图 2　铜冶炼过程中主要配伍组分的三元相图

Fig. 2　Ternary phase diagram of main blending components in copper smelting process

度，改善熔渣流动性[16]。在 FeS 富集区，体系熔点维持在 1 100 ℃以上，表现出较好的高温稳定性。Cu_2O-FeO-SiO_2 三元相图的相区变化反映了 SiO_2 对熔渣结构的调控作用：随着 SiO_2 含量增加，液相区逐渐缩小，体系黏度上升，说明过量 SiO_2 会抑制渣相流动性，不利于金属熔滴的分离与富集[17]。当 Cu_2O 与 FeO 比例在 0.18～0.30（即 F1～F4 连续配伍区）时，体系位于 Fe_2SiO_4-Cu_2SiO_4 共晶区附近，熔点较低（约 1 125 ℃），渣相呈现玻璃态流动特征，有利于铜铁分离。

综上分析，确定铜精矿、铜渣、粉煤灰的质量比例为：铜渣 40%～60%、铜精矿 20%～40%、粉煤灰 20%。在此范围内，体系主要化学成分控制于 Cu_2O 6%～10%、Fe_2O_3 33%～40%、SiO_2 20%～25%、SO_3 9%～18%，可保证其在较低温度下具有良好的熔融特性、较高的金属回收率以及稳定的渣相流动性。基准配比点（F3）位于低温液相区与流动性最佳区域的交汇处，可作为后续铜渣资源化与清洁冶炼实验的关键基础配方。

配伍 F1～F4 的原料掺配比例和化学成分组成分别见表 2 和表 3。

表 2　配伍 F1～F4 的原料掺配比例（质量分数）

Table 2　Blending ratios of raw materials in formulations F1–F4　%

配伍	铜精矿	铜渣	粉煤灰
F1	40	40	20
F2	35	45	20
F3	30	50	20
F4	20	60	20

2　实验结果与讨论

2.1　铜冶炼过程热力学参数分析

图3为铜冶炼过程中主要反应的热力学参数随温度变化规律。铜冶炼过程中涉及的主要化学反应如下。

表 3　配伍 F1～F4 的化学成分组成（质量分数）

Table 3　Chemical composition of raw materials in blending formulations F1–F4　%

配伍	CuO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	PbO	ZnO
F1	10.27	33.51	20.72	9.25	2.73	1.05	0.29	0.18	17.90	1.15	1.17
F2	9.44	34.98	21.81	9.28	2.85	1.11	0.27	0.18	15.76	1.28	1.31
F3	8.60	36.45	22.89	9.30	2.97	1.17	0.25	0.18	13.63	1.41	1.46
F4	6.93	39.38	25.05	9.35	3.22	1.28	0.22	0.17	9.37	1.67	1.74

$$4CuFeS_2 = 2Cu_2S + 4FeS + S_2 \quad (1)$$

$$2CuS + O_2 = Cu_2S + SO_2 \quad (2)$$

$$2Cu_2S + 3O_2 = 2Cu_2O + 2SO_2 \quad (3)$$

$$4FeS_2 + 11O_2 = 2Fe_2O_3 + 8SO_2 \quad (4)$$

$$FeS + Cu_2O = FeO + Cu_2S \quad (5)$$

$$2FeO + SiO_2 = Fe_2SiO_4 \quad (6)$$

由图 3 可知，铜精矿分解反应［式（1）］的 ΔH 为正值，表明除式（1）外，其余反应在高温下均为放热过程。其中，式（1）在 600～1 100 ℃及 1 200～1 500 ℃区间、造锍反应［式（5）］在 1 100～1 300 ℃、造渣反应［式（6）］在 1 300～1 500 ℃范围内，ΔH 下降尤为明显。高温条件有利于 FeO 与 SiO_2 结合生成稳定铁硅酸盐相。因此，从热效应角度分析，提高温度能够促进硫化物氧化、冰铜形成以及铁硅酸盐造渣过程的协同进行。温度低于 1 150 ℃时，FeS_2 氧化反应［式（4）］及式（5）的ΔS 随温度升高而增加，说明反应过程中有 SO_2 气体生成以及物相转变，体系无序度增加，有利于反应正向进行[18]。相比之下，Cu_2S 氧化反应与造渣反应的 ΔS 受温度影响较小，说明反应过程中物相变化相对稳定。

铜精矿分解反应 ΔS 随温度升高呈现先增大后减小的趋势，该过程可能经历了由硫化物结构破坏到新

物相形成的阶段性变化[19]。铜精矿分解、Cu_2S 初步氧化及造锍反应的 ΔG 均随温度升高而下降，说明高温有利于反应自发进行；温度不低于 1 200 ℃时，铜精矿分解反应的 ΔG 小于 0。式(3)和式(4)的 ΔG 始终为负，但数值较低，表明其自发性较弱，在实际冶炼中可能需要更高温度或更长时间才能有效自发进行。

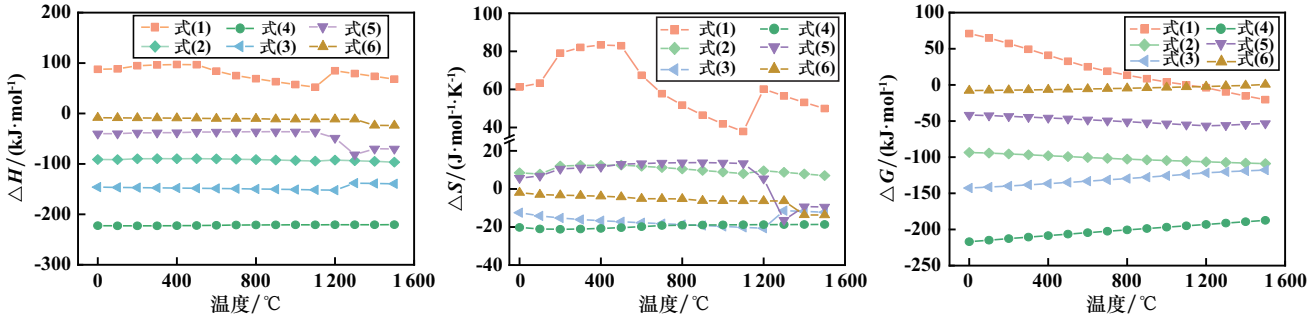


图 3 铜冶炼过程中主要反应的热力学参数随温度变化规律

Fig. 3 Variation of thermodynamic parameters of major reactions with temperature in copper smelting process

热力学分析表明，铜冶炼过程中铜精矿分解、硫化物氧化、造锍及造渣反应均可在高温条件下实现。1 100~1 300 ℃有利于造锍反应进行，温度高于 1 300 ℃时，促进了铁硅酸盐渣相形成。因此，合理控制温度及调节铜渣、铜精矿配比，有助于强化硫氧化脱除、促进铜铁分离以及形成稳定渣相。

2.2 配伍比例对物相演变的影响

图 4 为不同配伍样品的 XRD 图谱。由图 4 可知，不同配伍样品的物相主要为 Cu_2S、$CuFe_2O_4$、Fe_2SiO_4。配伍 F1 在约 33°处出现 Cu_2S 特征衍射峰，表明较高铜精矿比例强化了铜硫化物相的生成；在 35°处附近出现 Fe_2SiO_4 特征衍射峰，说明已有铁橄榄石相形成，该相对造渣与铜相分离具有重要作用。配伍 F2 的 Fe_2SiO_4 衍射峰明显增强，铜硫化物相受到抑制，表明冶炼过程中的铁橄榄石矿相稳定性提高可能有利于提高铜回收率[20]。配伍 F3 中 Fe_2SiO_4 相更显著，表明增加铜渣促进了铁橄榄石相生成[21]。配伍 F4 的铜渣比例为 60%，Fe_2SiO_4 衍射峰占据主导，Cu_2S 峰强度大幅降低，说明高比例铜渣显著抑制了铜硫化物的形成。

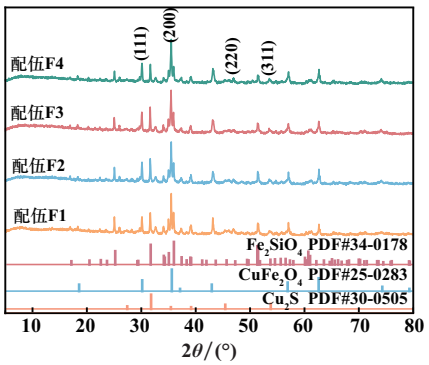


图 4 不同配伍样品的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of samples with different blending formulations

综合配料组成、低温液相形成及物相变化分析，铜渣质量占比 40%~60%为体系的合理配料范围，其中铜渣质量占比 50%~60%(F3~F4)为协同作用较为显著的优选区间。在该区间内，铜渣与铜精矿、粉煤灰在化学组成和熔融行为方面形成良好的协同效应，有利于 Fe_2SiO_4 等渣相的形成及连续液相的发展。

2.3 热重分析与热性质表征

表 4 为不同配伍样品的热行为特征参数。

表 4 不同配伍样品的热行为特征参数

Table 4 Thermal behavior characteristic parameters of samples with different blending formulations

配伍	氧化增重阶段		主分解阶段		SO_2 主释放温度/℃
	温度/℃	增重率/%	温度/℃	失重率/%	
F1	344.1~614.7	11.66	614.7~773.1	14.23	470.2,729.1
F2	352.3~628.9	11.38	628.9~778.7	13.81	469.4,730.3
F3	344.7~605.4	11.83	605.4~774.0	13.72	469.8,728.5
F4	343.6~623.7	11.84	623.7~772.9	13.59	469.8,726.8

图 5 为不同配伍样品 TG-DSC 曲线和质谱(MS)曲线，MS 曲线中质荷比 $M/Z=64$、$M/Z=80$ 分别对应热分解过程中逸出的 SO_2 和 SO_3。由表 4 和图 5 可知，配伍样品的高温热反应主要分为 3 个阶段：低温氧化增重、含硫物质主要氧化、高温分解和微量气体逸出。在低温氧化增重阶段，所有样品均出现明显放热峰并伴随质量增加，主要源于体系氧势较高时铜渣中 FeO 的氧化反应，其化学反应式如下。

$$6FeO + O_2 = 2Fe_3O_4 \quad (7)$$

此外，MS 曲线表明此阶段约在 470 ℃出现 SO_2 释放峰，对应硫化物氧化过程[式(2)~(4)]。尽管样品的初始硫含量(以 SO_3 计)从配伍 F1 的 17.90%下降至配伍F4的9.37%，其氧化增重率仍接近。随着铜渣

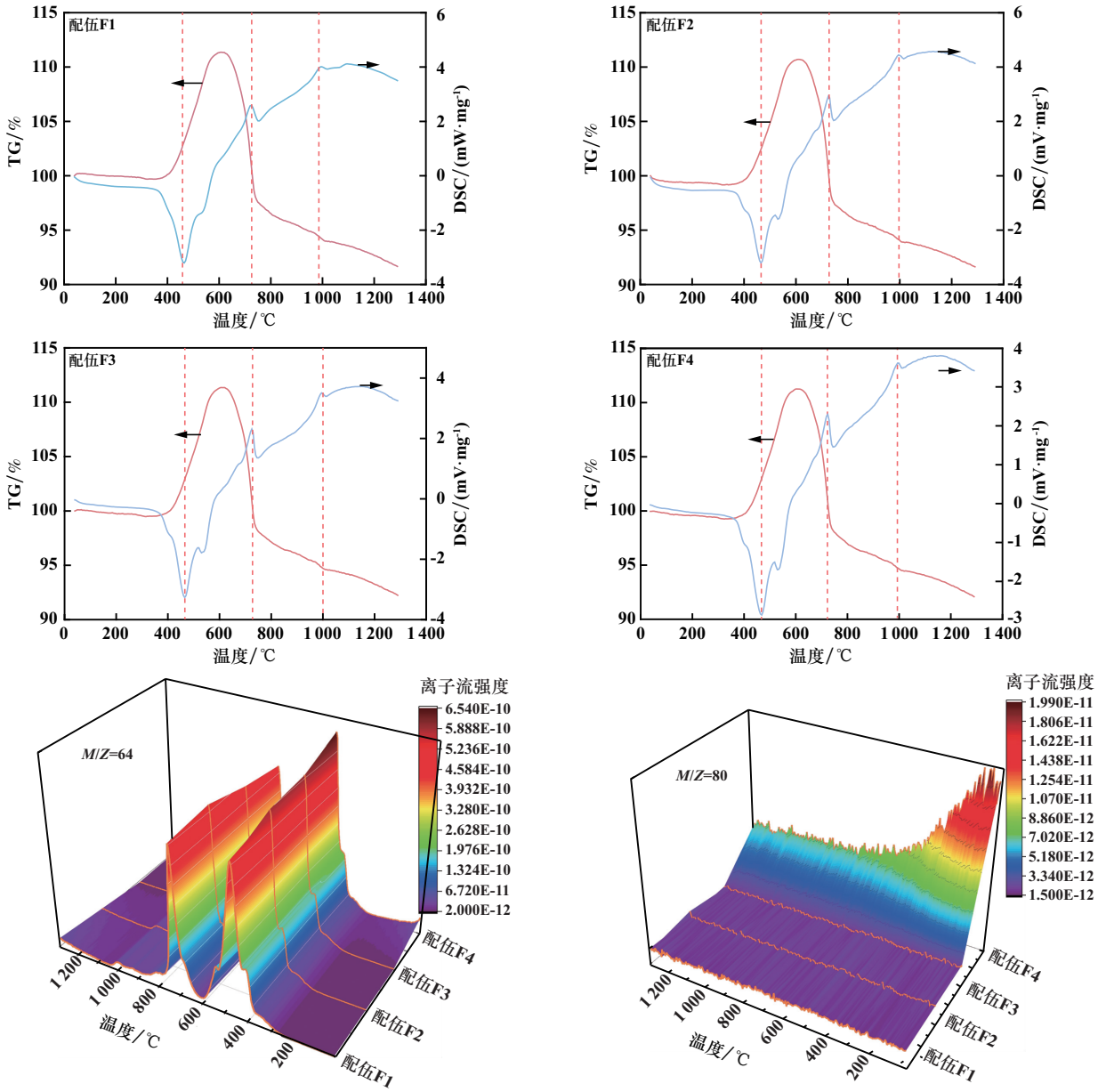


图 5　不同配伍样品 TG-DSC 曲线和质谱(MS)曲线

Fig. 5　TG-DSC and MS curves of samples with different blending formulations

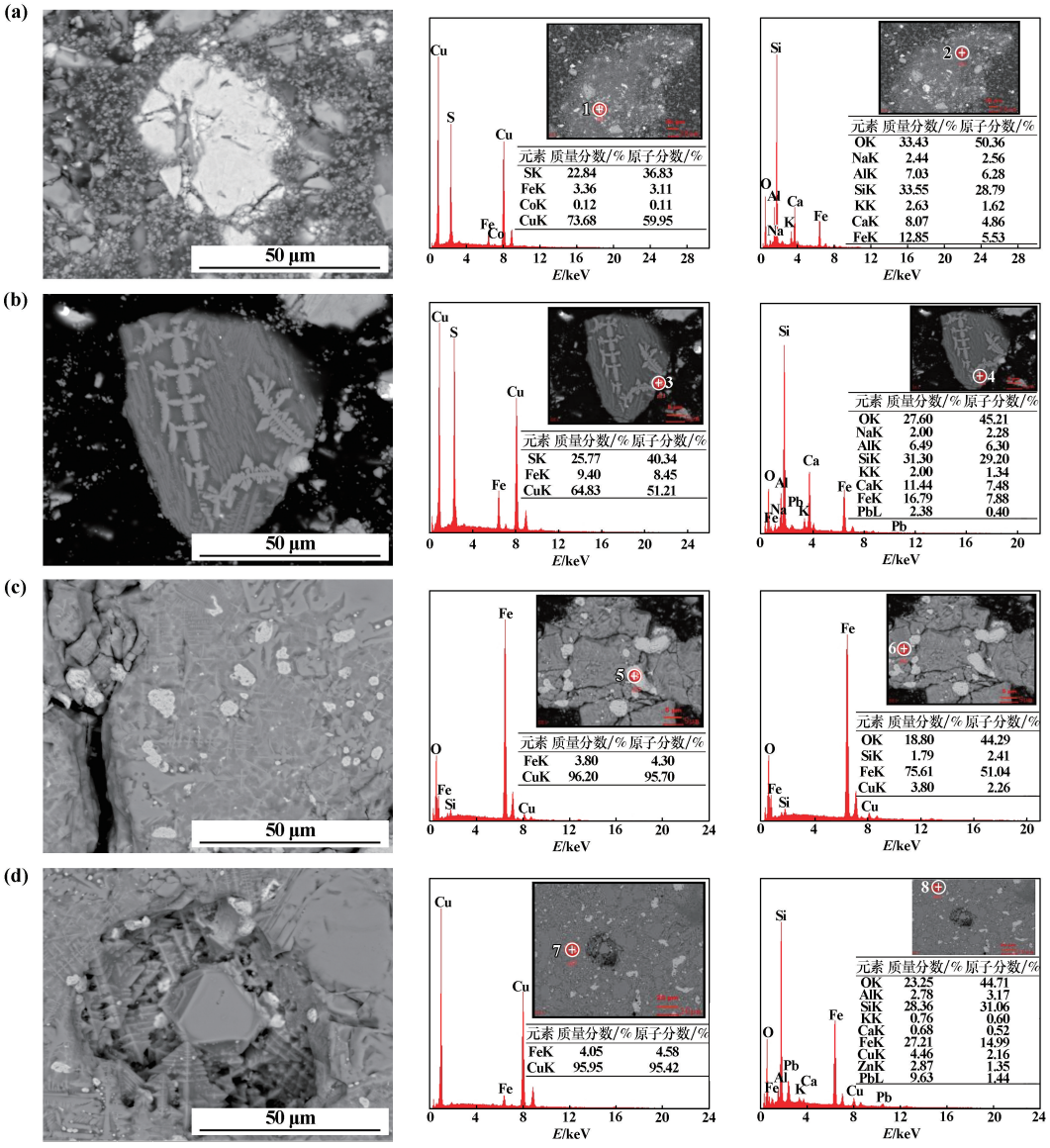
比例由 40%增加至 60%,FeO 等氧化性组分增加补偿了硫含量下降带来的影响。

在含硫物质主要氧化阶段,DSC 曲线均出现强烈吸热峰(724~726 ℃)。对应硫化物氧化生成 SO_2 的过程[反应(2)~(4)]。该阶段 MS 曲线出现强烈的 SO_2 释放信号,其主峰位置与 DSC 吸热峰高度吻合,位于 727~730 ℃。该阶段的失重率呈现规律性下降,失重率从配伍 F1 的 14.23%降至配伍 F4 的 13.59%,证明了该阶段失重主要由含硫物质的氧化主导。这主要是铜精矿含量从配伍 F1 中的 40%降至配伍 F4 中的 20%,致使配伍样品总硫含量从配伍 F1 的 17.90%降至配伍 F4 的 9.37%。

在高温分解和微量气体逸出阶段,所有样品在 995~998 ℃ 出现弱吸热峰,并伴有少量质量损失(0.91%~1.04%)。此外,MS 曲线显示此阶段有微量 SO_2 释放,这可能是由于该阶段高温下造锍与造渣反应过程中残留气体的逸出。

2.4　微观形貌与能谱结构分析

图 6 为不同配伍样品的 SEM-EDS 图像。由图 6 可知,配伍 F1 样品结构疏松,颗粒边界模糊,存在明显孔隙与未反应颗粒,表明烧结程度较低。配伍 F1 样品 EDS 结果表明,点 1 区域富含 Cu、S,含少量 Fe,对应铜硫化物相;点 2 区域 Si 含量较高,反映体系液相黏度大,不利于致密化。配伍F2样品颗粒界面趋于平滑,



(a) 配伍 F1；(b) 配伍 F2；(c) 配伍 F3；(d)配伍 F4

图 6 不同配伍样品的 SEM-EDS 图像

Fig. 6 SEM images and EDS analysis of samples with different blending formulations

出现少量针状与片状晶体，表明液相量增加促进了晶体再结晶与烧结结合。EDS 图片中点 3 区域 Cu 含量降低，点 4 区域 Fe、Ca 含量增加，这可能是由于铜渣中铁氧化物与粉煤灰中 SiO_2、Al_2O_3 进一步反应生成了铁硅酸盐或钙铁氧化物，改善了颗粒结合性。配伍 F3 样品形貌更为致密，孔隙减少，晶体边界清晰，可见规则柱状或六边形晶粒，反映烧结反应充分、结晶完整。EDS 图片中点 5 区域显示 Cu 含量进一步增加；点 6 区域出现了明显的 Fe 富集区域，说明铁组分发生了显著的局部富集和相分异。结合图 4 分析，配伍 F3 中 Fe_2SiO_4 峰进一步增强，表明 F3 配伍在整个样品范围内铁硅酸盐渣相的形成亦得到促进[22]。配伍 F4 样品结构高度致密，表面平滑，几乎无孔隙，出现大尺寸等轴晶体。EDS 图片中点 7 区域富含铜，点 8 区域以 O、Fe、Si 为主，同时含少量 Cu、Ca、Zn 等元素，属于典型的多元氧化物和硅酸盐基体区域。配伍 F4 中 Cu-Fe 富集相与 Fe-Si-Al-O 基渣相之间形成了较清晰的成分分区，Fe_2SiO_4 衍射峰占主导，Cu_2S 峰减弱，表明较高铜渣比例有利于 Fe 进入硅酸盐渣相，促进 Cu 富集相与氧化物—硅酸盐渣相的分离。

随铜渣比例提升，烧结结构由疏松多孔逐步发展为连续致密，物相组成从铜铁硫化物为主转向铁钙硅复合氧化物为主，结构稳定性显著增强。当铜渣质量占比为 50%~60%时，体系的熔融与烧结行为得到明显改善，烧结结构逐渐由疏松多孔向致密连续转变，渣相流动性随之增强，有利于铜相的聚集、沉降及铜渣分离。

经分离后,残余 Cu 主要以细小分散态存在或进入玻璃质相中,而铁钙硅复合氧化物成为主要物相。这一成分变化直接反映了配方优化对显微结构的调控作用[23]。

2.5　富氧条件下硫含量的变化分析

图 7 为氧浓度对配伍 F3 和 F4 样品硫含量的影响。由图 7 可知,当氧浓度从 40%提升至 60%时,配伍 F3 烟气硫浓度由 16%显著增至 27%,配伍 F4 烟气硫浓度则由 11%增至 18%;氧浓度继续增至 70%时,配伍 F3 和配伍 F4 烟气硫浓度增幅均趋于平缓。提高氧浓度有助于促进硫化物氧化,使更多硫以气体形式释放[24];但进一步提高氧浓度对硫挥发的强化作用有限。此外,配伍 F4 样品的硫含量整体低于配伍 F3 样品,这可能与其铜精矿比例较低、铜渣比例较高有关,铜渣中初始硫含量通常低于铜精矿,因此硫释放总量相对较低[25]。

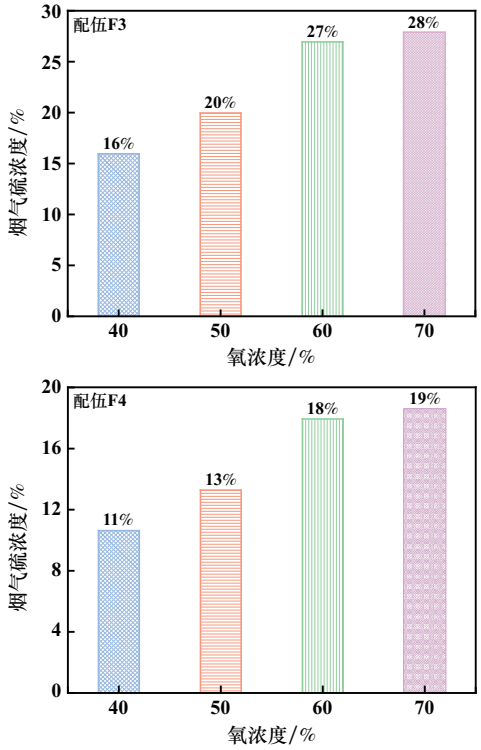


图 7　氧浓度对配伍 F3 和 F4 样品硫含量的影响

Fig. 7　Effect of different oxygen-enriched concentrations on sulfur content in samples with blending formulations F3 and F4

2.6　机理分析

图 8 为铜冶炼过程中配伍样品的反应机理示意图。由图 8 可知,铜冶炼过程中,铜渣与粉煤灰在造锍熔炼和造渣过程中起到关键作用。铜渣主要提供 FeO 和 SiO_2,粉煤灰补充 SiO_2,二者共同调节熔炼体系的成分,促进 Fe_2SiO_4 等渣相的形成。在造锍过程中,铜主要以冰铜(Cu_2S-FeO)形式富集,而铁则进入渣相,完成初步分离,通过优化配伍、烧结及富氧条件,强化了冰铜与渣相的界面分离,有效促进了硫的脱除与渣的排出,从而提升了铜回收率与冶炼效率,并为后续 SO_2 制酸创造了条件。

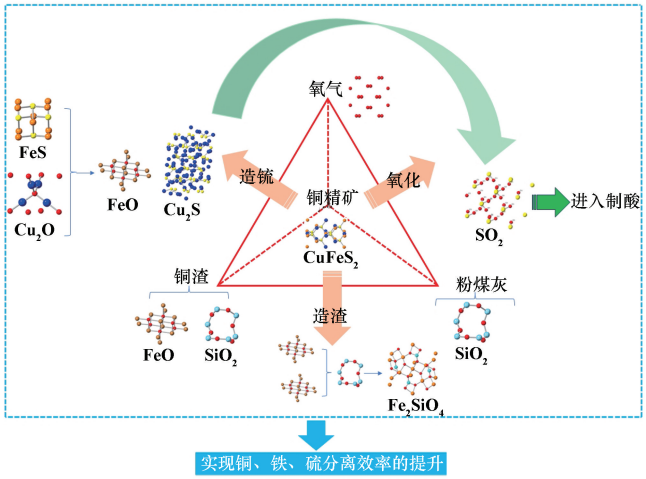


图 8　铜冶炼过程中配伍样品的反应机理示意图

Fig. 8　Schematic of reaction mechanism for samples with blending formulations during copper smelting

3　结论

1）基于三元相图分析,确定配伍范围为铜渣比例 40%~60%、铜精矿比例 20%~40%、粉煤灰比例 20%,该体系可在较低温度下具备良好熔融特性,实现铜、铁、硫的有效分离与渣相流动性的稳定。热力学计算结果表明,升高温度总体上有利于铜精矿分解、硫化物氧化、造锍及铁硅酸盐生成等反应,但不同反应的热力学驱动力和有利温区存在差异。

2）铜渣比例 50%~60%时,铜渣可与铜精矿、粉煤灰形成良好的协同作用。调节体系成分,可有效促进 Fe_2SiO_4 等渣相形成,并驱动烧结结构从疏松多孔向致密连续转变,有利于铜相和渣相分离。

3）含硫物质的氧化主要发生在 724~726 ℃温度区间,对应于硫化物直接氧化生成 SO_2。研究结果表明,当氧浓度提高至 60%时,配伍 F3 样品硫挥发效率相较氧浓度 40%时可增加 11 百分点,这为后续 SO_2 转化吸收制酸工艺创造了有利条件。

参考文献(References):

[1] Hao J, Dou Z H, Zhang T A, et al. Energy conservation and emission reduction through utilization of latent heat of copper slag for iron and copper recovery[J]. Journal of Cleaner Production, 2024,436:140602.

[2] 吴海祥,吴维新,岳涛,等. 某铜冶炼渣浮选回收铜工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):57-59.
Wu Haixiang, Wu Weixin, Yue Tao, et al. Reclaiming copper resource from copper smelting slag by flotation approach[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):57-59.

[3] Zhu Y F, Li B, Wei Y G, et al. Advanced approach to sustainable recovery of valuable metals via co-smelting of waste printed circuit boards with copper smelting slag[J]. Chemical Engineering Journal, 2025,524:169531.

[4] Guo Z Q, Zhu D Q, Pan J, et al. Innovative methodology for comprehensive and harmless utilization of waste copper slag via selective reduction-magnetic separation process[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,187:910-922.

[5] Li J L, Liao Y L, Ma H F, et al. Review on comprehensive recovery valuable metals and utilization of copper slag[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2023,9(2):439-458.

[6] Wang Z W, Gao J T, Lan X, et al. A green method to clean copper slag and rapidly recover copper resources via reduction-sulfurizing smelting and super-gravity separation at low temperature[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,468:133834.

[7] Wang L B, Xu Y M, Tian L, et al. Two-stage method recovery of metals from copper slag: realize the resource utilization of all components[J]. Minerals Engineering, 2024,206:108503.

[8] Sarfo P, Wyss G, Ma G J, et al. Carbothermal reduction of copper smelter slag for recycling into pig iron and glass[J]. Minerals Engineering, 2017,107:8-19.

[9] Guo Z Q, Pan J, Zhu D Q, et al. Mechanism of composite additive in promoting reduction of copper slag to produce direct reduction iron for weathering resistant steel[J]. Powder Technology, 2018,329:55-64.

[10] Qin Z L, Xiao J H, Zhang J H, et al. Practical experience to theoretical innovation: a model for recovering metal resources from industrial solid waste – a case study of copper smelting slag[J]. Separation and Purification Technology, 2025,354:129395.

[11] 唐刚,杨亚东,刘梦茹,等. 铜渣资源化利用现状及展望[J]. 化工矿物与加工, 2021,50(12):37-41.
Tang Gang, Yang Yadong, Liu Mengru, et al. Status and prospect of resource utilization of copper slag[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021,50(12):37-41.

[12] 付芳忠,叶昊辉,胡金,等. Fe/SiO_2 质量比对 $FeO-SiO_2-Al_2O_3$ 体系熔体黏度的影响机制[J]. 材料导报, 2025,39(22):51-56.
Fu Fangzhong, Ye Haohui, Hu Jin, et al. Principle of how Fe/SiO_2 mass ratio influences melt viscosity of $FeO-SiO_2-Al_2O_3$ system[J]. Materials Reports, 2025,39(22):51-56.

[13] 李宇,刘月明. 我国冶金固废大宗利用技术的研究进展及趋势[J]. 工程科学学报, 2021,43(12):1713-1724.
Li Yu, Liu Yueming. Progress and trend of bulk utilization technology of metallurgical solid wastes in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021,43(12):1713-1724.

[14] Klemettinen L, Avarmaa K, Taskinen P. Slag chemistry of high-alumina iron silicate slags at 1 300 ℃ in WEEE smelting[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2017,3(4):772-781.

[15] Bellemans I, De Wilde E, Moelans N, et al. Metal losses in pyrometallurgical operations: a review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2018,255:47-63.

[16] 贺冲,郭晶,秦育红,等. Shell 煤气化炉气氛下熔渣中金属铁析出及对其黏度影响的模拟研究[J]. 煤炭学报, 2023,48(8):3218-3228.
He Chong, Guo Jing, Qin Yuhong, et al. Modelling study of the precipitation and agglomeration behavior of metallic iron in coal slag and its effect on the slag viscosity under Shell coal gasification atmosphere[J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(8):3218-3228.

[17] 段生朝,张立峰. 电渣重熔易氧化元素控制的研究进展[J]. 工程科学学报, 2025,47(5):1005-1020.
Duan Shengchao, Zhang Lifeng. Research progress on the control of reactive elements in remelted ingots during the electroslag remelting process[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025,47(5):1005-1020.

[18] 王举金,张立峰,任英. 炼钢过程反应热力学与动力学及其在数值模拟仿真的应用研究进展[J]. 工程科学学报, 2024,46(11):1960-1977.
Wang Jujin, Zhang Lifeng, Ren Ying. Advances in the thermodynamics and kinetics of the steelmaking process and their application in numerical simulation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024,46(11):1960-1977.

[19] 何春静,刘雄军,张盼,等. 粉末冶金在高熵材料中的应用[J]. 工程科学学报, 2019,41(12):1501-1511.
He Chunjing, Liu Xiongjun, Zhang Pan, et al. Applications of powder metallurgy technology in high-entropy materials[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019,41(12):1501-1511.

[20] 张磊,蒋开喜,谢锋,等. 氧化铜精矿熔炼过程中铜、钴、铁的还原行为[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024,45(3):337-345.
Zhang Lei, Jiang Kaixi, Xie Feng, et al. Reduction behaviors of copper, cobalt and iron in smelting of copper oxide concentrate[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2024,45(3):337-345.

[21] 阎崔蓉,张浩,周新涛,等. 冶炼铜渣中 Fe 的常压酸浸溶出规律及动力学分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2025,53(3):127-138.
Yan Cuirong, Zhang Hao, Zhou Xintao, et al. Dissolution mechanism and kinetics analysis of Fe from copper smelting slag by acid leaching at atmospheric pressure[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2025,53(3):127-138.

[22] Zhao D Y, Du Y S, Guo Y H, et al. Phase evolution and solidification mechanisms of heavy metals in polyphase slag glass-ceramics[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025,1030:180902.

[23] Li Z, Ma G J, Zheng D L, et al. Effect of Fe_2O_3 on the crystallization behavior, microstructure and properties of glass-ceramics prepared from the modified tailings after reduction of copper slag[J]. Materials Today Communications, 2022,31:103516.

[24] 屈文开,杨应宝,周世伟,等. 铜火法冶炼过程中砷的形态演变与砷脱除策略[J]. 矿冶, 2025,34(2):308-314.
Qu Wenkai, Yang Yingbao, Zhou Shiwei, et al. Arsenic speciation transformation and elimination strategies during copper pyrometallurgy[J]. Mining and Metallurgy, 2025,34(2):308-314.

[25] 罗春华,苏晓晖,陆斌刚,等. 某堆存铜渣中回收铜金属的选矿试验研究及生产应用[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):81-83.
Luo Chunhua, Su Xiaohui, Lu Bingang, et al. Reclaiming copper resource from copper slag: beneficiation test research and production practice[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):81-83.

引用本文:余小吕,梁艳辉,高峰,等. 铜冶炼渣资源化利用:配伍优化与烧结行为调控研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):175-182.
Yu Xiaolyu, Liang Yanhui, Gao Feng, et al. Resource utilization of copper smelting slag: blending optimization and sintering behavior regulation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):175-182.