选矿与原料预处理

高硫铁矿氧化焙烧过程中硫的迁移行为

谢雨时[1]，杨博文[1]，张 波[1]，贾中帅[2,3]，罗国立[2,3]，魏 国[1]，刘承军[1]，姜茂发[1]

(1. 东北大学 a. 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室; b. 冶金学院，辽宁 沈阳 110819;
2. 包钢集团矿山研究院(有限责任公司)，内蒙古 包头 014030; 3. 内蒙古自治区矿山和冶金固废资源化绿色化综合利用重点实验室，内蒙古 包头 014030)

摘要: 凭借毗邻我国的区位优势及未充分开发的资源潜力，蒙古铁矿已成为我国重要的铁矿供应来源，但该矿含硫量较高，不能直接进入传统高炉冶炼。为探究该高硫铁矿的适用性和可行性，本文对磁选后的高硫铁精矿粉进行不同温度的氧化焙烧试验，对焙烧前后高硫铁精矿粉的物相组成、硫的赋存状态等进行分析，并结合试验温度区间内各反应的热力学分析及焙烧过程中 SO_2 排放质量浓度的变化，得到不同温度焙烧后高硫铁精矿粉的脱硫效果及硫的迁移行为规律。结果表明: 高硫铁精矿粉中含硫物相主要为黄铁矿及磁黄铁矿，二者氧化脱硫反应在试验温度范围内均可自发进行; 经过 1 100 ℃和 1 200 ℃焙烧后矿粉的含硫量从原矿的 3.186% 分别降至 0.034% 和 0.017%，脱硫率均高于 98%。本文通过揭示高硫铁精矿粉在氧化焙烧过程中硫的迁移行为，证实高温氧化焙烧可实现高硫铁矿的高效脱硫，为后续造球、烧结等实际生产过程中，脱硫方法的应用提供重要的理论依据。

关键词: 高硫铁矿; 氧化焙烧; 脱硫效果; 硫迁移

中图分类号: TF046 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000－8764(2025)06－0084－07

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.06.099

Migration behavior of sulfur during oxidative roasting of high-sulfur iron ore

XIE Yushi[1], YANG Bowen[1], ZHANG Bo[1], JIA Zhongshuai[2,3], LUO Guoli[2,3], WEI Guo[1], LIU Chengjun[1], JIANG Maofa[1]

(1. Northeastern University a. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Minerals, Ministry of Education; b. School of Metallurgy, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Baotou Steel Group Mining Research Institute (Co., Ltd.), Baotou 014030, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory for Green and Comprehensive Utilization of Mining and Metallurgy Solid Waste Resources, Baotou 014030, Inner Mongolia, China)

Abstract: With the geographical advantage of being adjacent to China and underutilized resource potential, Mongolian iron ore has become a significant source of iron ore supply for China, however, it cannot be directly used in traditional blast furnace smelting due to its high sulfur content. To explore the application feasibility of this high-sulfur iron ore, this paper studies the oxidative roasting test at different temperatures conducted on magnetically separated high-sulfur iron ore concentrate powder. Through the test, the phase composition and sulfur occurrence state of the high-sulfur iron concentrate powder before and after roasting were analyzed. Combined with thermodynamic analysis of relevant reactions within the test temperature range and the change in SO_2 emission mass concentration during roasting, the desulfurization effect and the pattern of sulfur migration behavior in the high-sulfur iron concentrate powder after roasting at different temperatures were

收稿日期: 2025－08－12; **修回日期:** 2025－09－15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374412)

作者简介: 谢雨时(2000—)，男，硕士研究生，从事高硫铁矿造块脱硫方法的研究。

通信作者: 张 波(1984—)，男，教授，从事冶金资源高效综合利用方面的研究。

中国知网 https://www.cnki.net

obtained. The test results show that the main sulfur-bearing phases in the high-sulfur iron concentrate powder are pyrite and pyrrhotite, and the oxidative desulfurization reactions of both can proceed spontaneously within the test temperature range. After roasting at 1 100 ℃ and 1 200 ℃, the sulfur content of the ore powder decreased from 3.186% in the raw ore to 0.034% and 0.017%, respectively, with desulfurization rates both exceeding 98%. By revealing the sulfur migration behavior in high-sulfur iron concentrate powder during oxidative roasting, this paper confirms that the high-sulfur iron ore can be efficiently desulfurized through high-temperature oxidative roasting, which provides an important theoretical basis for the application of desulfurization methods in subsequent practical production processes such as pelletizing and sintering etc

Key words: high-sulfur iron ore; oxidative roasting; desulfurization effect; sulfur migration

我国可供利用的铁矿资源相对短缺，对澳大利亚、巴西等传统供应国的进口依赖度较高。这不仅导致运输及生产成本居高不下，更使国家经济生产易受国际形势变化的冲击。蒙古铁矿资源储量丰富且勘探开发程度较低，进口并利用该国铁矿，既能显著降低成本，也可增强我国钢铁产业链的抗风险能力。然而，蒙古铁矿普遍含硫量较高，不满足高炉冶炼的原料要求。因此，需在入炉前对其进行有效脱硫处理。氧化焙烧工艺因其脱硫率高、工艺简单且不影响产品质量等优势，被广泛应用于矿石入炉冶炼前的脱硫环节[1-2]。该工艺通过在氧化焙烧阶段将高硫铁精矿的含硫量降至符合高炉冶炼要求的水平，对控制入炉原料的含硫量起着关键作用[3]。

高硫铁精矿粉氧化焙烧脱硫的原理在于，在空气气氛条件下进行高温焙烧时，铁硫化物氧化最终反应生成铁氧化物，硫以二氧化硫(SO_2)气体形式排出，从而降低铁矿中含硫量。在空气气氛及高温焙烧条件下，黄铁矿(FeS_2)被氧化成Fe_2O_3、Fe_3O_4的同时，由于磁黄铁矿(FeS)可视为硫在FeS_2中的固熔体[4]，FeS_2也可先热解为 FeS 和S_2，FeS 继续氧化生成铁氧化物，而S_2在氧化气氛下迅速氧化，以SO_2气体的形式排出[5-7]。若部分SO_2未及时排出而附存于矿相颗粒之间，可能与铁氧化物在高温条件下发生反应，生成中间产物硫酸盐[$FeSO_4$、$Fe_2(SO_4)_3$]，随着焙烧温度继续升高，硫酸盐会发生分解[8-10]，最终氧化产物为Fe_2O_3[11]。Fe_2O_3通常在低于 1 400 ℃和高氧浓度下形成，而Fe_3O_4通常在高于 1 400 ℃或低氧浓度下形成[12-14]。CHEN 等[15]通过构建黄铁矿颗粒在氧化焙烧过程中脱硫分解氧化的机理模型，得出硫的迁移顺序：$FeS_2 \rightarrow FeS \rightarrow SO_2$。胡小莲等[16]研究发现，增大反应物之间的比表面积，可确保在焙烧过程中矿物与氧气充分接触，从而提高脱硫效果。成日金等[17]研究表明，延长焙烧时间或提高焙烧温度，均有助于提升铁矿石氧化焙烧的脱硫效率。考虑到实际生产中的成本与能源消耗问题，LIU 等[18]通过对常用脱硫工艺的比较分析，提出可通过气固流动法来改善焙烧效果，改变矿石晶体结构并优化其溶出性能；同时也可借助焙烧反应热力学来优化焙烧温度，从而降低能耗。此外，矿物中含有的碱性氧化物(如 CaO、MgO)能够与脱硫产物SO_2发生固硫反应，生成碱金属硫酸盐[19-21]。随着温度的升高，部分碱金属硫酸盐将分解[22-23]。

本文对蒙古高硫铁矿粉进行物相分析，得到含硫物相在矿粉内的赋存状态，采用热力学计算与试验验证相结合的系统研究方法，揭示其在氧化焙烧过程中复杂的硫迁移转化机制；通过阐释硫迁移历经硫酸盐生成、分解以及碱金属氧化物(CaO/MgO)的“固硫－释硫”循环等多个阶段，并将此机理与SO_2排放的三个特征温度区间精准对应；明确脉石成分对脱硫过程的具体影响，发现并论证固硫效应及其反向分解作用对最终脱硫效率的制约；最后，得到在实际生产中将含硫量降至一级球团矿标准的优化工艺参数，为开发该类高硫铁矿资源提供直接、可行的理论与实践依据。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

高硫铁精矿粉主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可见，经磁选后铁精矿粉中 TFe 及 S 质量分数分别为 63% 和 3.186%，其含硫量远高于实际生产对铁精矿含硫量的要求，属于高硫磁铁矿。

中国知网　https://www.cnki.net

矿物含有脉石等其他杂质，主要脉石成分为 MgO、SiO_2，同时含有 CaO、Al_2O_3等杂质。

表 1 高硫铁矿粉主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of high-sulfur iron ore fine %

TFe	CaO	MgO	SiO_2	FeO	Al_2O_3	S	P
63	1.43	2.35	3.2	31	1.02	3.186	0.05

1.2 试验方法

高硫铁精矿粉的氧化焙烧试验设备选用 GSL1400X 卧室管式炉，盛放载体选用刚玉方舟，试验气氛为空气，初始条件为常温常压，氧化焙烧温度设置为 800、900、1 000、1 100、1 200 ℃。称量 3 g 待焙烧矿粉试样平铺于刚玉方舟内，并置于炉管内中心位置。试验过程中持续通入空气，设置气体流速为 1 L/min。炉内温度由常温升至对应的试验温度，保温 20 min 后降至室温。设置升温、降温速率为 5 ℃/min，采用 TY-6400 紫外(DOAS)气体分析仪实时监测试验尾气中的 SO_2 质量浓度，采用排气装置将尾气排出。

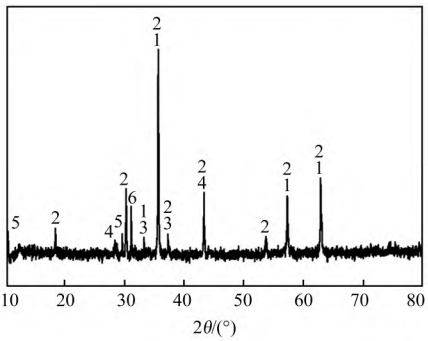
对高硫铁矿精矿粉和经过焙烧后的产物进行物相组成和嵌布特征分析，先将未经焙烧和经过 5 组焙烧过后的矿粉进行镶样后，用砂纸进行粗磨、细磨，用抛光机进行抛光，然后将制备好的样品放入飞纳 Phenom 台式扫描电镜进行能谱点扫(SEM-EDS)。

2 结果与讨论

2.1 高硫铁精矿粉的矿物学特征

采用 XRD 及 SEM 对高硫铁精矿粉进行物相组成和嵌布特征分析。磁选后高硫铁精矿粉的 XRD 分析如图 1 所示。由图 1 可见：该精矿粉的含铁物相主要为磁铁矿和赤铁矿，含硫物相主要为黄铁矿及磁黄铁矿，此外还含有堇青石、白云石等其他矿相。

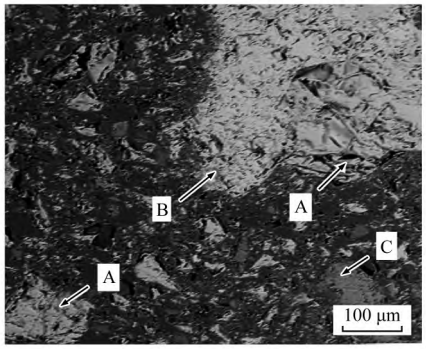
磁选后高硫铁矿精矿粉的 SEM-EDS 分析检测结果如图 2 所示。由图 2 可见，磁选后精矿粉中大多数物相以独立颗粒形式存在，少部分以夹杂物包裹形式存在；含硫物相与铁氧化物的区别较大，其颜色差异明显，且比含铁物更明亮。磁铁矿和磁黄铁矿共生区域的形态样貌有明显差异。



1—赤铁矿；2—磁铁矿；3—黄铁矿；4—磁黄铁矿；5—堇青石；6—白云石。

图 1 磁选后高硫铁矿 XRD 物相组成

Fig. 1 XRD phase compositions of high-sulfur iron ore after magnetic separation



A—磁黄铁矿；B—磁铁矿；C—镁橄榄石。

图 2 磁选后高硫铁矿粉 SEM-EDS 微观形貌

Fig. 2 SEM-EDS microstructural morphology of high-sulfur iron ore fines after magnetic separation

2.2 氧化焙烧脱硫反应热力学

为确定高硫铁矿中硫元素的脱除机理及其反应条件(如焙烧温度、保温时间)对脱硫过程的影响规律，利用 FactSage 8.3 软件对氧化焙烧过程中可能发生的反应进行热力学计算；并以此分析氧化反应过程中，铁硫化物的脱硫反应随温度变化的温度区间及相应的物相、成分变化。为确保计算结果更加准确，设定氧化反应氧气的系数均为 1，将 FactSage 8.3 软件的反应模块(reaction)设置为反应物氧分压、活度为 0.21。得到模拟空气气氛条件下，随着温度的变化，体系可能发生的氧化反应如式(1)～(17)所示。氧化焙烧过程中各反应的标准吉布斯自由能与温度的关系如图 3 所示。计算的温度区间为 25～1 350 ℃。根据吉布斯自由能的正负可以判断反应能否自发进行，依据该值大小判断反应发生的先后顺序。

中国知网 https://www.cnki.net

热力学计算结果表明，在空气气氛条件下，随着恒定速率的升温，当温度在 25 ~ 500 ℃时，FeS 会先于 FeS_2 发生氧化反应。当 FeS_2 发生反应时，其在 25 ~ 400 ℃会优先氧化成 $FeSO_4$，在 600 ~ 1 350 ℃会优先氧化成 FeS。对于 FeS 和 FeS_2 氧化生成铁氧化物的反应，其在 25 ~ 550 ℃会优先氧化为 Fe_2O_3，在 550 ~ 1 350 ℃会优先氧化为 Fe_3O_4。Fe_3O_4 氧化为 Fe_2O_3 的反应在 25 ~ 1 350 ℃温度区间可自发进行。在 25 ~ 1 350 ℃温度区间内，FeS、FeS_2 会与 SO_2、O_2 反应生成中间产物 $Fe_2(SO_4)_3$、$FeSO_4$，反应均能自发进行。FeS_2、$FeSO_4$、$Fe_2(SO_4)_3$ 在高温条件下不稳定，易受热分解。参考反应(11) ~ (13) 的吉布斯自由能，三者分解温度由低到高的顺序为 FeS_2、$FeSO_4$、$Fe_2(SO_4)_3$。由于矿物内存在碱性氧化物(CaO、MgO)，而 SO_2 为酸性气体，体系内会发生碱金属固硫反应，生成硫酸盐($CaSO_4$、$MgSO_4$)。因此，当升温过程中有 SO_2 生成时，SO_2 会和 CaO、MgO 发生固硫反应。$MgSO_4$ 的理论分解温度小于 $CaSO_4$，随着温度的升高，$MgSO_4$ 会先于 $CaSO_4$ 分解，二者分解均产生 SO_2。

$$FeS_2 + O_2 = FeS + SO_2 \quad \Delta G_T^\theta = -223.776 - 0.053T \tag{1}$$

$$3/8FeS_2 + O_2 = 1/8Fe_3O_4 + 3/4SO_2 \quad \Delta G_T^\theta = -297.231 + 0.032T \tag{2}$$

$$4/11FeS_2 + O_2 = 2/11Fe_2O_3 + 8/11SO_2 \quad \Delta G_T^\theta = -303.127 + 0.040T \tag{3}$$

$$1/3FeS_2 + O_2 = 1/3FeSO_4 + 1/3SO_2 \quad \Delta G_T^\theta = -349.305 + 0.109T \tag{4}$$

$$2/7FeS_2 + O_2 = 1/7Fe_2(SO_4)_3 + 1/7SO_2 \quad \Delta G_T^\theta = -360.276 + 0.150T \tag{5}$$

$$3/5FeS + O_2 = 1/5Fe_3O_4 + 3/5SO_2 \quad \Delta G_T^\theta = -341.351 + 0.083T \tag{6}$$

$$4/7FeS + O_2 = 2/7Fe_2O_3 + 4/7SO_2 \quad \Delta G_T^\theta = -348.502 + 0.093T \tag{7}$$

$$1/2FeS + O_2 = 1/2FeSO_4 \quad \Delta G_T^\theta = -412.128 + 0.190T \tag{8}$$

$$2/5FeS + O_2 + 1/5SO_2 = 1/5Fe_2(SO_4)_3 \quad \Delta G_T^\theta = -414.930 + 0.231T \tag{9}$$

$$4Fe_3O_4 + O_2 = 6Fe_2O_3 \quad \Delta G_T^\theta = -491.200 + 0.289T \tag{10}$$

$$2FeS_2 = 2FeS + S_2 \quad \Delta G_T^\theta = 276.229 - 0.278T \tag{11}$$

$$2Fe_2(SO_4)_3 = 2Fe_2O_3 + 6SO_2 + 3O_2 \quad \Delta G_T^\theta = 1\,709.460 - 1.619T \tag{12}$$

$$4FeSO_4 = 2Fe_2O_3 + 4SO_2 + O_2 \quad \Delta G_T^\theta = 857.262 - 0.852T \tag{13}$$

$$2MgO + O_2 + 2SO_2 = 2MgSO_4 \quad \Delta G_T^\theta = -741.159 + 0.537T \tag{14}$$

$$2CaO + O_2 + 2SO_2 = 2CaSO_4 \quad \Delta G_T^\theta = 741.159 - 0.537T \tag{15}$$

$$2MgSO_4 = 2MgO + O_2 + 2SO_2 \quad \Delta G_T^\theta = -984.678 + 0.544T \tag{16}$$

$$2CaSO_4 = 2CaO + O_2 + 2SO_2 \quad \Delta G_T^\theta = 984.678 - 0.544T \tag{17}$$

2.3　硫的迁移行为

对氧化焙烧前后矿粉进行 S 元素含量检测，并计算脱硫效果。结果如图 4 所示。由图 4 可见：含硫量随焙烧温度的增加而降低，由开始的 3.18% 降低到 1 100、1 200 ℃焙烧温度下的 0.034%、0.017%；脱硫率随焙烧温度的增加而升高，1 100、1 200 ℃焙烧温度下矿粉的脱硫率分别为 99.02%、99.51%。根据《高炉用铁球团矿》(GB/T 27692—2024) 标准，一、二级碱性铁球团矿的含硫量分别应低于 0.06%、0.02%。可知，经过 1 100、1 200 ℃焙烧后矿粉的含硫量分别满足二、一级碱性铁球团矿的生产要求。

采用 XRD 对不同温度焙烧后的矿粉进行物相组成分析。结果如图 5 所示。由图 5 可见，焙烧后矿粉中主要含铁物相为赤铁矿和磁铁矿，主要含硫物相为未完全氧化的黄铁矿；随着氧化焙烧温度的增高，磁铁矿、黄铁矿的特征衍射峰强度降低，赤铁矿的特征衍射峰强度随温度的升高而增加，这表明高硫铁矿含铁物相氧化焙烧的最终产物为赤铁矿。

对 800、900、1 000、1 100、1 200 ℃温度焙烧后矿粉进行 SEM-EDS 微观形貌分析。结果如图 6 所示。根据矿粉焙烧热力学分析可知，在焙烧过程中，随着温度升高到 800 ℃时，FeS 和 FeS_2 氧化为 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4，并产生 SO_2 气体。这些 SO_2 气体会和矿石内的碱金属氧化物(CaO、MgO) 发生反

中国知网　https://www.cnki.net

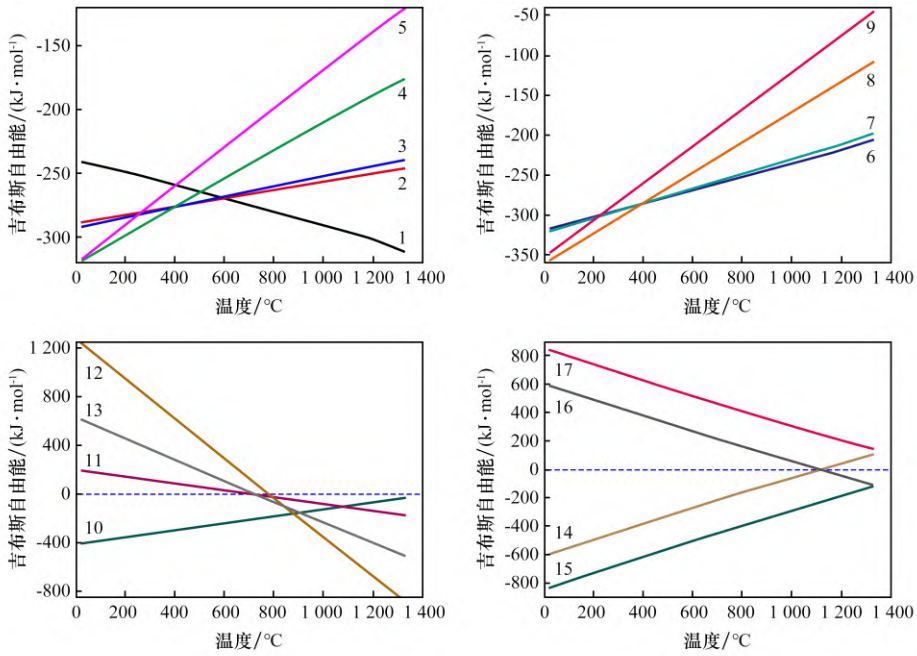
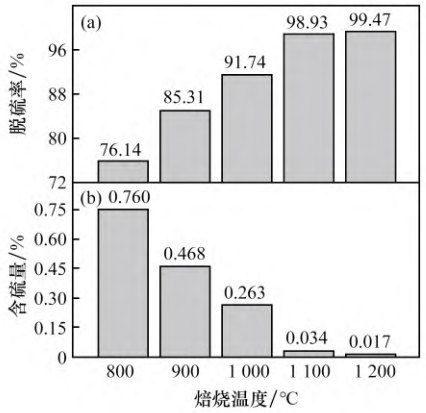


图 3 氧化焙烧过程中各反应的标准吉布斯自由能与温度的关系

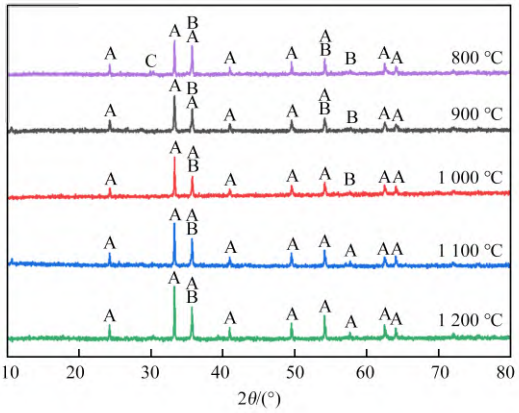
Fig. 3 Relationship between standard gibbs free energy and temperature for various reactions during oxidation roasting



(a) 脱硫率；(b) 含硫量

图 4 氧化焙烧后矿粉元素含量变化及脱硫率

Fig. 4 Changes in elemental content and desulfurization rate of ore fines after oxidation roasting



A—赤铁矿；B—磁铁矿；C—黄铁矿。

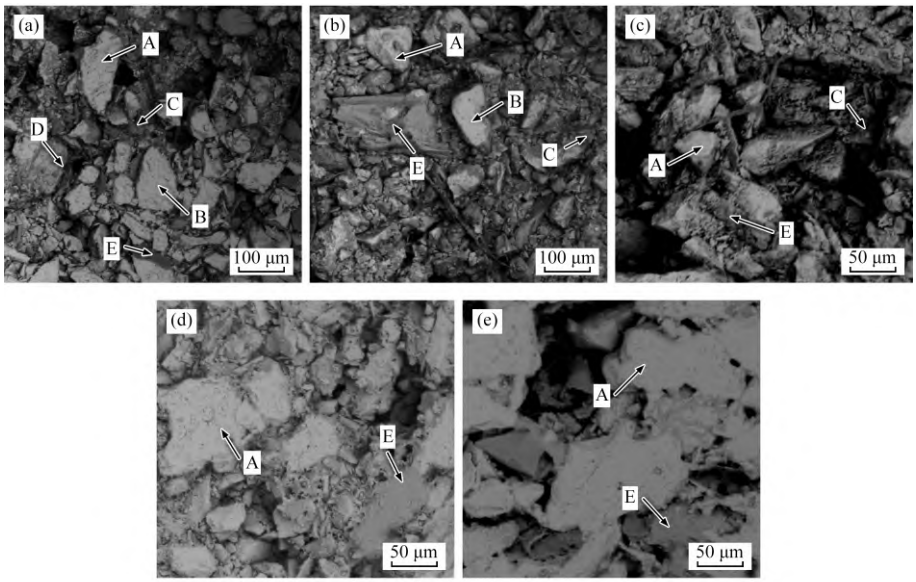
图 5 焙烧后矿粉 XRD 物相组成分析

Fig. 5 XRD phase composition analysis of roasted ore fines

应，生成硫酸盐（$CaSO_4$、$MgSO_4$），赋存于铁氧化物之间。由图 6 可见，对比 800、900、1 000 ℃焙烧后矿粉的 SEM-EDS 分析结果，高温焙烧后矿粉中部分 Fe_3O_4 继续氧化为 Fe_2O_3，晶粒逐渐长大。硫酸盐($CaSO_4$、$MgSO_4$)在高温下分解为碱金属氧化物(CaO、MgO)，其与其他脉石成分共熔，形成硅酸盐复合相。

硫的迁移主要是铁硫化物发生分解、氧化反应导致的物相变化。在焙烧过程中持续通入空气，生成的 SO_2 气体大部分会随着气流流出。氧化焙烧过程中 SO_2 排放曲线如图 7 所示。结合各反应的热力学分析、矿粉焙烧结果以及 SO_2 尾气收集数据可知，随着焙烧温度的升高，在 235 ~ 370 ℃即Ⅰ温度区间内，出现 SO_2 排放峰，该区间内 FeS_2、FeS 氧化生成中间产物 $FeSO_4$、$Fe_2(SO_4)_3$，且反应产生 SO_2；在 445 ~ 660 ℃即Ⅱ温度区间内，出现全过程 SO_2 排放最高峰。在该区间内，FeS_2 会热解生成 FeS，FeS 进一步氧化生成 Fe_3O_4、Fe_2O_3，并伴

中国知网 https://www.cnki.net

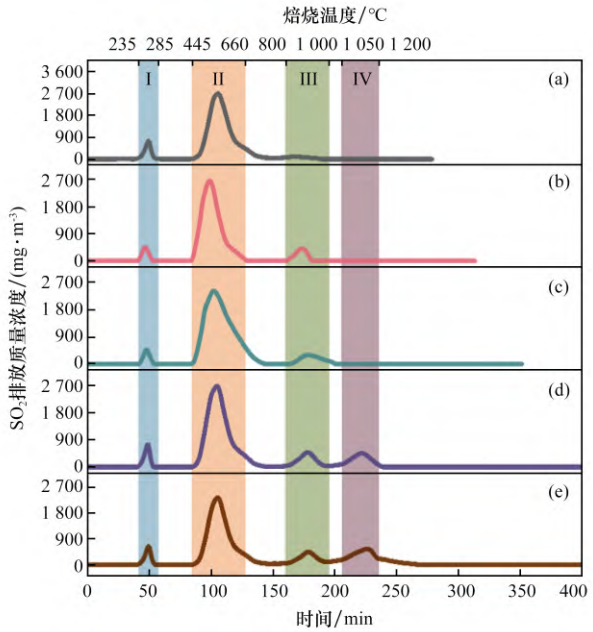


焙烧温度/℃：(a) 800；(b) 900；(c) 1 000；(d) 1 100；(e) 1 200

A—Fe_2O_3；B—$MgSO_4$；C—$CaSO_4$；D—Fe_3O_4；E—硅酸盐。

图 6　焙烧后矿粉 SEM-EDS 微观形貌分析

Fig. 6　SEM-EDS microstructural evolution of roasted ore fines



焙烧温度/℃：(a) 800；(b) 900；(c) 1 000；(d) 1 100；(e) 1 200

图 7　高硫铁精矿粉在不同焙烧温度下焙烧过程中 SO_2 排放曲线

Fig. 7　SO_2 emission profiles during roasting of high-sulfur iron concentrate fines at varied temperatures

有大量 SO_2 生成，未及时排出的 SO_2 气体会附着在矿物表面及颗粒孔隙中，与矿粉中的碱性金属氧化物(如 CaO、MgO)颗粒反应生成对应的硫酸盐($CaSO_4$、$MgSO_4$)。在 800～1 000 ℃即 III 温度区间内，中间产物 $FeSO_4$、$Fe_2(SO_4)_3$ 及 $MgSO_4$ 发生分解，产生 SO_2 气体；$CaSO_4$ 在高于 1 050 ℃时发生分解反应，并产生 SO_2。

3　结　论

(1) 通过 XRD、SEM-EDS 等物相分析手段对磁选后高硫铁矿精矿粉进行物相分析后发现，该矿粉主要含铁物相为磁铁矿及赤铁矿，含硫物相为黄铁矿及磁黄铁矿。磁选后精矿粉中大多数物相以独立颗粒形式存在，少部分以夹杂物包裹形式存在。

(2) 高硫铁精矿粉中硫大部分生成 SO_2 气体逸出，少量生成碱金属硫酸盐残余。焙烧后矿粉的含硫量降低，全铁含量增加。1 100、1 200 ℃焙烧后矿粉中硫元素质量分数由 3.18% 降为 0.034%、0.017%，分别满足二、一级碱性铁球团矿要求。

(3) 随着焙烧温度的升高，在 235～370 ℃，FeS_2、FeS 氧化生成中间产物 $FeSO_4$、$Fe_2(SO_4)_3$ 及 SO_2；在 445～660 ℃，FeS_2、FeS 氧化生成 Fe_2O_3、Fe_3O_4 及 SO_2，同时少量 SO_2 与碱性氧化物生成硫酸盐；在 800～1 000 ℃，中间产物 $FeSO_4$、$Fe_2(SO_4)_3$ 及 $MgSO_4$ 分解生成 SO_2；$CaSO_4$ 在

中国知网　https://www.cnki.net

1 050 ℃以上发生分解。

参考文献:

[1] 张红强,张婧,罗果萍,等. 硫含量对白云鄂博铁精矿球团显微结构及抗压强度的影响[J]. 烧结球团,2018,43(3):52-57;62.
ZHANG Hongqiang, ZHANG Jing, LUO Guoping, et al. Effect of sulfur content on microstructure and compressive strength of Baiyunebo iron concentrate pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(3): 52-57; 62.

[2] 朱建国,张红强,罗果萍,等. 硫含量对白云鄂博铁精矿预热压团显微结构及抗压强度的影响[J]. 烧结球团,2019,44(1):40-45.
ZHU Jianguo, ZHANG Hongqiang, LUO Guoping, et al. Effect of sulfur content on microstructure and compressive strength of preheating briquette of Baiyunebo iron concentrate[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(1): 40-45.

[3] 杨大兵,张攀,李乾坤,等. 内蒙古某高硫高碱度磁铁精矿球团焙烧脱硫机理研究[J]. 烧结球团,2016,41(2):41-46.
YANG Dabing, ZHANG Pan, LI Qiankun, et al. Study on pellet induration desulphurization mechanism of high sulphur and high basicity magnetite concentrate from Inner Mongolia[J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(2): 41-46.

[4] 盛叶彬. 磁黄铁矿焙烧特点与生产实践[J]. 硫酸工业,2019(3):15-18.
SHENG Yebin. Roasting characteristics and production practice of pyrrhotite[J]. Sulphuric Acid Industry, 2019(3): 15-18.

[5] 罗立群,雷严明,沈洪涛,等. 含铅锌赤褐铁矿氧化焙烧脱硫性能和机理[J]. 中南大学学报(自然科学版),2023,54(7):2529-2539.
LUO Liqun, LEI Yanming, SHEN Hongtao, et al. Performance and mechanism of oxidative roasting desulphurisation of hematite-limonite containing lead and zinc[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(7): 2529-2539.

[6] YANG L C, LUO L Q, NIYONZIMA J C, et al. Desulfurization mechanism of lead-zinc-bearing hematite-limonite ore through oxidation roasting process[J]. JOM, 2024, 76(8): 4347-4360.

[7] 衣德强,张祖刚. 硫铁矿焙烧降低排渣硫品位生产实践[J]. 化工矿物与加工,2017,46(4):62-64.
YI Deqiang, ZHANG Zugang. Production practice of lowering sulfur grade of slag in pyrite roasting[J]. Industrial Minerals & Processing, 2017, 46(4): 62-64.

[8] ARACENA A, JEREZ O, ORTIZ R, et al. Pyrite oxidation kinetics in an oxygen-nitrogen atmosphere at temperatures from 400 to 500 ℃[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2016, 55(2): 195-201.

[9] TORO C, TORRES S, PARRA V, et al. On the detection of spectral emissions of iron oxides in combustion experiments of pyrite concentrates[J]. Sensors, 2020, 20(5): 1284.

[10] RUAN S F, WANG C Y, JIE X W, et al. Kinetics of pyrite multi-step thermal decomposition in refractory gold sulphide concentrates[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(5): 3689-3702.

[11] TIAN C S, RAO Y Z, SU G, et al. Effects of pyrrhotite on the combustion behavior and the kinetic mechanism of pyrite-pyrrhotite mixture powders in the air[J]. International Journal of Chemical Engineering, 2023, 2023(1): 9567708.

[12] DARKEN L S, GURRY R W. The system iron: Oxygen. II. equilibrium and thermodynamics of liquid oxide and other phases[J]. Journal of the American Chemical Society, 1946, 68(5): 798-816.

[13] KOPP O C, KERR P F. Differential thermal analysis of pyrite and marcasite[J]. American Mineralogist, 1958, 43: 1079-1097.

[14] HU G L, DAM-JOHANSEN K, WEDEL S, et al. Decomposition and oxidation of pyrite[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(3): 295-314.

[15] CHEN X J, ZHAO N, LI Z, et al. Study on the migration and release of sulfur during the oxidizing roasting of high-sulfur iron ore[J]. Minerals, 2024, 14(3): 276.

[16] 胡小莲,陈文汨,谢巧玲. 高硫铝土矿氧化钙焙烧脱硫研究[J]. 轻金属,2010(1):9-14.
HU Xiaolian, CHEN Wenmi, XIE Qiaoling. Study on desulfuration of high sulfur bauxite by calcium oxide roasting[J]. Light Metals, 2010(1): 9-14.

[17] 成日金,栾晓帆. 含砷铁矿焙烧脱砷与脱硫[J]. 上海金属,2019,41(2):81-85.
CHENG Rijin, LUAN Xiaofan. Arsenic and sulfur removals from arsenic-bearing iron ore by roasting[J]. Shanghai Metals, 2019, 41(2): 81-85.

(下转第143页)

中国知网 https://www.cnki.net

SO_2 and NO removal over Ce-Mn/NAC [J]. Fuel,2017, 202:328 – 337.

[37] YUAN B, ZHAO Y, MAO X Z, et al. Simultaneous removal of SO_2, NO and Hg^0 from flue gas using vaporized oxidant catalyzed by Fe/ZSM-5 [J]. Fuel, 2020,262:116567.

[38] FU H B,WANG X,WU H B,et al. Heterogeneous uptake and oxidation of SO_2 on iron oxides [J]. The Journal of Physical Chemistry C,2007,111(16):6077 – 6085.

[39] CAGLAYAN B S, AKSOYLU A E. CO_2 adsorption on chemically modified activated carbon [J]. Journal of Hazardous Materials,2013,252:19 – 28.

[40] 张秋菊,王晓,陈建民,等. SO_2 与 Fe_2O_3 生成 Fe(Ⅱ)(aq) 和硫酸盐的复相反应机理 [J]. 高等学校化学学报,2006,27(7):1347 – 1350.
ZHANG Qiuju, WANG Xiao, CHEN Jianmin, et al. Formation of Fe(Ⅱ)(aq) and sulfate via heterogeneous reaction of SO_2 with Fe_2O_3 [J]. Chemical Journal of Chinese Universities,2006,27(7):1347 – 1350.

(上接第 90 页)

[18] LIU Y S,LIU Y,ZHANG T A,et al. Summary of sulfur hazards in high-sulfur bauxite and desulfurization methods [J]. Science of the Total Environment,2024, 948:174631.

[19] 王运,华一新,徐存英,等. $CaCO_3$ 存在下高铁硫化锌矿氧化焙烧的相变机理 [J]. 有色金属工程,2019, 9(5):51 – 57.
WANG Yun, HUA Yixin, XU Cunying, et al. Phase transformation mechanism of high iron zinc sulfide ore during oxidative roasting in the presence of $CaCO_3$ [J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(5):51 – 57.

[20] 吕国志,张廷安,鲍丽,等. 高硫铝土矿的焙烧预处理及焙烧矿的溶出性能 [J]. 中国有色金属学报,2009, 19(9):1684 – 1689.
LÜ Guozhi, ZHANG Tingan, BAO Li, et al. Roasting pretreatment of high sulfur bauxite and leaching performance of roasted ore [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2009,19(9):1684 – 1689.

[21] 吕国志,张廷安,鲍丽,等. 高硫铝土矿的焙烧预处理 [J]. 过程工程学报,2008,8(5):892 – 896.
LÜ Guozhi, ZHANG Tingan, BAO Li, et al. Roasting pretreatment of high-sulfur bauxite [J]. Process engineering, 2008,8(5):892 – 896.

[22] 陈卓,郑睿琦,堵伟桐,等. 含锌粉尘协同处置含铬尘泥的碳热还原试验 [J]. 钢铁,2021,56(11): 148 – 159.
CHEN Zhuo, ZHENG Ruiqi, DU Weitong, et al. Experiment on co-processing of chromium-containing sludge with zinc-bearing dust by carbothermic reduction method [J]. Iron and Steel,2021,56(11):148 – 159.

[23] NAYAK D,RAY N,DASH N,et al. An optimal route for the preparation of metallized composite pellets from ilmenite concentrate [J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2021,7(3):1102 – 1115.

(上接第 133 页)

[23] 闻格,梁婉雪,章正刚,等. 矿物红外光谱学 [M]. 重庆:重庆大学出版社,1988:112 – 119.
WEN Ge, LIANG Wanxue, ZHANG Zhenggang, et al. Infrared spectroscopy of minerals [M]. Chongqing: Chongqing University Press,1988:112 – 119.

[24] PAL J,AMMASI A,BANDYOPADHYAY B S,et al. An innovative approach to replace bentonite in hematite ore pelletizing with organic binder [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,2024,45(3):225 – 237.

[25] 朱德庆,蔡汝卓,傅守澄,等. 黏结剂与铁精矿表面作用机理研究 [J]. 烧结球团,1995,20(3):19 – 21;5.
ZHU Deqing,CAI Ruzhuo,FU Shoucheng,et al. Study on mechanism of interaction of binder with iron ore concentrate [J]. Sintering and Pelletizing,1995,20(3): 19 – 21;5.

[26] 姜涛,李宏煦,黄柱成. 铁矿球团黏结剂分子结构设计的初步研究 [J]. 烧结球团,1998,23(1):30 – 35.
JIANG Tao, LI Hongxu, HUANG Zhucheng. Primary molecular design of organic binderfor magnetic concentrate pelletizing [J]. Sintering and Pelletizing, 1998,23(1):30 – 35.

中国知网　https://www.cnki.net