# 高褐铁矿配比条件下不同粒度烧结矿显微结构和矿物组成特点研究①

张国成[1], 柴轶凡[2], 李红霞[1], 贾倩南[1], 罗果萍[2], 雍胜利[1]
(1.包头师范学院 化学学院, 内蒙古 包头 014030; 2.内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要**: 采用烧结杯试验模拟实际烧结工艺条件,对褐铁矿质量分数 42%的铁矿粉进行烧结,制备得到不同粒级的烧结矿,并采用矿相显微镜分析了烧结矿的微观结构特征。结果表明,混合矿中大于 5 mm 矿粉颗粒产率达到 25.23%,制粒性能较差,导致小粒径烧结矿增多;随着烧结矿粒度由 40 mm 变小至 5~12 mm,烧结矿黏结相质量分数由 59.10%降至 23.19%,铁酸钙形貌由针状向片状、团块状转变,其质量分数由 39.43%降至 17.26%,烧结矿微观结构由磁铁矿与铁酸钙的熔蚀交织结构转变为赤铁矿、磁铁矿和黏结相的粒状结构,磁铁矿晶粒由自形-半自形变为他形晶,晶粒间及晶粒中的微孔增多,呈现"多孔薄壁"结构,烧结矿强度性能变差。

**关键词**: 烧结矿; 粒度; 显微结构; 矿物组成; 褐铁矿; 黏结相; 磁铁矿; 赤铁矿; 配矿
**中图分类号**: TF046 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.026
**文章编号**: 0253-6099(2025)06-0146-05

# Microstructure and Mineral Composition of Sintered High-Limonite Ore with Different Particle Sizes

ZHANG Guocheng[1], CHAI Yifan[2], LI Hongxia[1], JIA Qiannan[1], LUO Guoping[2], YONG Shengli[1]
(1.*Department of Chemistry, Baotou Teachers' College, Baotou* 014030, *Inner Mongolia, China*; 2.*School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia, China*)

**Abstract**: In order to investigate the microstructure and mineral composition of sintered limonite (42% in mass fraction) within different size fraction, a sintering pot test was used to simulate the actual sintering process conditions. Thereby, the sintered ore with different particle sizes were prepared, and then mineralogical microscope was used to analyze its microstructure characteristics. The results show that if the mixed ore has the powdered ore with size larger than 5 mm in a mass fraction of 25.23%, the finally sintered ore with small particle size increases, presenting a poor pelletizing performance. As the sintered ore has its particle size reduced from 40 mm to a range of 5-12 mm, the bonding phase therein is in a mass fraction decreasing from 59.10 % to 23.19 %, and the calcium ferrite has its morphology converting from being acicular to flaky and agglomerated, and its mass fraction decreases from 39.43% to 17.26%. It is found that the sintered ore has converted from the structure with magnetite interwoven with calcium ferrite to granular structure composed of hematite, magnetite and bonding phase. The euhedral to subhedral magnetite grains are transformed to be anhedral, and the number of micropores between and within the grains increases, presenting a "porous and thin-walled" structure, resulting in worse performance in the strength of the sintered ore.

**Key words**: sintered ore; particle size; microstructure; mineral composition; limonite; bonding phase; magnetite; hematite; ore blending

烧结矿作为高炉炼铁的主要原料,其质量直接关系到高炉冶炼的效率和成本。不同粒度的烧结矿在烧结过程中表现出不同的物理化学特性,进而影响其显微结构和矿物组成,最终对烧结矿的整体性能产生显著影响[1-3]。粗粒级烧结矿由于颗粒间接触面积大,有利于形成稳定的结合相。随着粒度的减小,细粒级和

① **收稿日期**: 2025-06-05
**基金项目**: 内蒙古自治区自然科学基金青年基金项目(2024QN05033);内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2022MS02005)
**作者简介**: 张国成(1986—),男,内蒙古包头人,博士,副教授,主要从事烧结球团技术研究工作。E-mail:644942242@qq.com
**通信作者**: 雍胜利(1972—),男,内蒙古阿拉善人,博士,副教授,主要从事材料化学研究工作。E-mail:1258023423@qq.com

极细粒级烧结矿由于颗粒间接触面积减小,难以形成稳定的结合相,导致显微结构疏松,孔隙率高,进而影响其机械强度和还原性[4-5]。国内外已有许多学者对烧结矿显微结构和矿物组成进行了研究[6-11],揭示了烧结矿中各种矿物相的特性及其对烧结矿性能的影响。但关于高褐铁矿配比条件下不同粒度烧结矿在显微结构和矿物组成上的研究较少。深入研究高褐铁矿配比条件下不同粒度烧结矿的显微结构和矿物组成特点,对优化烧结工艺、提高烧结矿质量具有重要意义。本文通过系统分析高褐铁矿配比条件下不同粒度烧结矿的显微结构和矿物组成特点,揭示不同粒级烧结矿的形成机制,为优化烧结工艺和提升烧结矿质量提供理论依据和实践指导。

## 1　试验原料

某钢铁公司 500 $m^2$ 大型烧结机实际烧结用铁矿粉有 7 种,包括澳大利亚褐铁矿(LA、LB、LC),澳大利亚磁铁精矿(MA),巴西赤铁矿(HA、HB、HC)。烧结熔剂为白云石和生石灰,主要用来调整烧结矿 MgO 含量和碱度。原料化学成分如表 1 所示,原料粒度组成如表 2 所示。

**表 1　原料化学成分(质量分数)**

Table 1　Chemical compositions of powdered iron ore, flux and fuel for sintering　　%

| 铁矿粉名称 | TFe | $SiO_2$ | CaO | MgO | $Al_2O_3$ | S | P | 烧失 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LA | 61.20 | 3.70 | 0.03 | 0.10 | 2.50 | 0.056 | 0.045 | 5.0 |
| LB | 57.20 | 6.00 | 0.02 | 0.10 | 1.60 | 0.114 | 0.050 | 10.0 |
| LC | 62.30 | 4.40 | 0.05 | 0.10 | 2.50 | 0.094 | 0.006 | 4.0 |
| MA | 65.50 | 7.70 | 0.18 | 0.20 | 0.50 | 0.021 | 0.082 | — |
| HA | 65.51 | 1.70 | 0.02 | 0.17 | 1.15 | 0.071 | 0.007 | 2.0 |
| HB | 61.39 | 6.50 | 0.10 | 0.19 | 1.71 | 0.034 | 0.101 | 2.0 |
| HC | 63.05 | 5.00 | 0.10 | 0.11 | 1.30 | 0.130 | 0.201 | 2.7 |
| 白云石 | — | 1.20 | 30.57 | 20.03 | 1.50 | 0.016 | — | 43.0 |
| 生石灰 | — | 2.50 | 82.00 | 4.90 | 1.50 | 0.081 | — | 10.0 |

由表 1 可知,澳大利亚褐铁矿中 LA 矿和 LC 矿 TFe 质量分数较高,结晶水质量分数介于 3.0%~6.0%之间,属于中等水化程度的半褐铁矿;LB 矿结晶水质量分数高达 10.0%,为全褐铁矿,TFe 质量分数相对较低,烧结过程中易形成疏松多孔结构[12-13]。巴西赤铁矿中,HA 矿 TFe 质量分数较高,配加大比例 HA 矿有利于烧结矿 TFe 品位的提高。澳大利亚磁铁精矿 MA 矿 TFe 质量分数高达 65.50%,配加一定比例 MA 矿不仅可提高烧结矿 TFe 品位,而且由于其较高的 $SiO_2$ 含量,可以为平衡烧结矿 $SiO_2$ 及液相形成提供条件。

**表 2　原料粒度组成**

Table 2　Size distribution of powdered iron ore

| 铁矿粉名称 | 粒级(mm)产率/% | | | | | | | | 平均粒径/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | +8 | 5~8 | 3~5 | 1~3 | 0.5~1.0 | -0.5 | -1 | +1 | |
| LA | 12.67 | 23.33 | 20.00 | 28.67 | 3.80 | 11.53 | 15.33 | 84.67 | 4.39 |
| LB | 20.00 | 16.67 | 17.33 | 35.33 | 6.01 | 4.66 | 10.67 | 89.33 | 4.76 |
| LC | 6.20 | 17.43 | 15.13 | 22.43 | 9.62 | 29.19 | 38.81 | 61.19 | 3.14 |
| MD | — | — | — | — | 12.52 | 87.48 | 100.00 | 0 | — |
| HA | 14.00 | 12.67 | 14.00 | 28.00 | 10.01 | 21.32 | 31.33 | 68.67 | 3.70 |
| HB | 8.33 | 13.33 | 16.00 | 32.00 | 5.84 | 24.50 | 30.34 | 69.66 | 3.28 |
| BRBF | 13.33 | 14.00 | 16.67 | 31.33 | 4.98 | 19.69 | 24.67 | 75.33 | 3.84 |

注:平均粒径为大于 1 mm 的铁矿粉颗粒的平均粒径。

由表 2 可知,褐铁矿 LA、LB 矿粒度较粗,-0.5 mm 铁矿粉粒级占比低,矿化能力较弱,不易生成烧结液相,并且褐铁矿分解生成的赤铁矿呈微球网状结构,孔隙率较高,烧结液相易进入网孔,消耗液相,降低强度[14-15]。烧结用燃料为焦粉,其中固定碳质量分数 85.00%、灰分 12.5%、挥发分 1.45%、硫分 0.65%。

## 2　研究方案及控制条件

实际生产过程中,在配料方案和过程工艺等几乎不变的情况下,烧结矿出现了平均粒径降低、5~10 mm 粒级占比偏高、返矿率增加的问题,影响高炉工况。因此,以实际烧结工艺及原料条件为基准,开展烧结杯[16-17]试验,试验方案见表 3,其中褐铁矿(LA+LB+LC)含量为 42%。燃料焦粉添加量为铁料质量的 4%。

**表 3　烧结杯试验方案(质量分数)**

Table 3　Sintering pot test scheme　　%

| 铁料配比 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| LA | LB | LC | MD | HA | HB | HC |
| 19 | 17 | 6 | 15 | 4 | 11 | 28 |

烧结矿化学成分根据实际生产工艺设计,MgO 质量分数控制为 1.75%,$SiO_2$ 质量分数控制在 5.2%~5.4%之间,碱度 R 控制为 1.95。烧结杯工艺参数见表 4。

**表 4　烧结杯试验设备参数及工艺控制条件**

Table 4　Sintering pot test equipment parameters and process conditions

| 设备参数 | | 配料及混合制粒参数 | |
|---|---|---|---|
| 料层厚度/mm | 700 | 混料时间/min | 10 |
| 烧结杯直径/mm | 325 | 混合料配碳量/% | 4.0 |
| 烧结负压/Pa | 10 000 | 返矿内配/% | 30 |
| 混合机直径/mm | 800 | 混合料水分/% | 7.5±0.5 |
| 点火温度/℃ | 850 | 制粒时间/min | 5 |

## 3 试验结果及讨论

依据实际烧结生产工艺的原料结构,计算得到混合铁矿粉的粒度组成,见表 5。由表 5 可见,烧结混合矿中-0.5 mm 粒级产率为 27.44%,而+0.5 mm 粒级产率达到了 72.56%,混合矿制粒性能不佳,会导致小粒径烧结矿及烧结返矿增加,特别是+5 mm 粒级产率达到了 25.23%,这部分矿粉制粒性能较差,导致小粒径烧结矿增多。

为了探明各粒级烧结矿分布的影响因素,采用矿相显微镜对不同粒级烧结矿的显微结构和矿物组成进行分析。根据实际烧结工艺中烧结矿筛分要求,将烧结矿分为+40 mm、25~40 mm、18~25 mm、12~18 mm、5~12 mm 共 5 个粒级,矿相显微结构如图1所示,共选取 4 个视域进行分析,其中(a)、(b)分图分别为试样的左、右边缘视域,(c)、(d)分图分别为试样的左、右中心视域,F 代表铁酸钙、H 代表赤铁矿、S 代表硅酸盐、P 代表孔洞,M 代表磁铁矿。各粒级烧结矿矿物组成见表 6。

**表 5 混合矿粒度组成**

Table 5 Size distribution of mixed ore

| 粒径/mm | 产率/% |
|---|---|
| +8 | 11.04 |
| -8+5 | 14.19 |
| -5+3 | 14.60 |
| -3+1 | 26.08 |
| -1+0.5 | 6.65 |
| -0.5 | 27.44 |

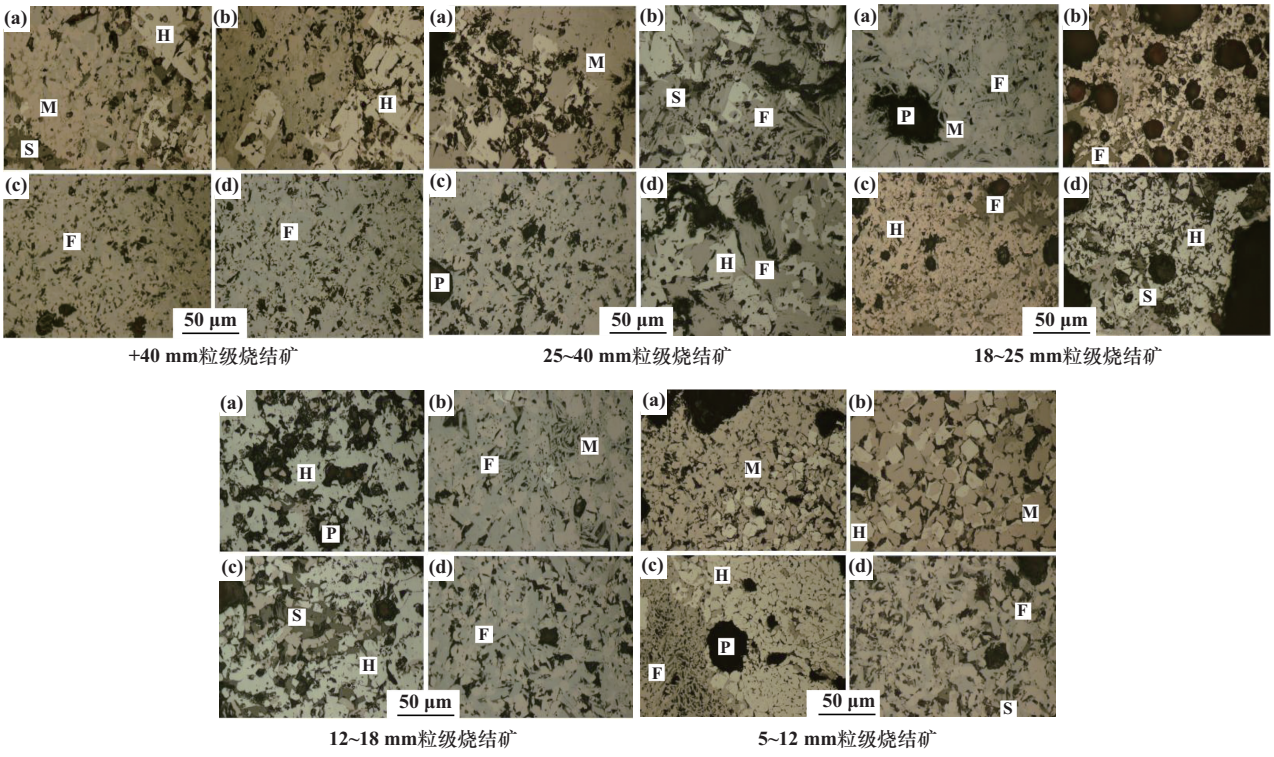



**图 1 烧结矿微观结构**

Fig. 1 Microstructure of sintered ores

**表 6 各粒级烧结矿矿物组成**

Table 6 Mineral compositions of sinted ore in different particle size

| 粒级/mm | 矿物组成(质量分数)/% | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 赤铁矿 | 磁铁矿 | 铁酸钙 | 硅酸盐 |
| +40 | 10.78 | 25.09 | 39.43 | 19.67 |
| -40+25 | 15.31 | 15.35 | 37.05 | 10.73 |
| -25+18 | 22.26 | 3.21 | 30.86 | 9.88 |
| -18+12 | 27.46 | 27.26 | 25.34 | 8.38 |
| -12+5 | 30.59 | 31.43 | 17.26 | 5.93 |

由图 1 和表 6 可知,+40 mm 粒级烧结矿由粒度较细的磁铁矿、针状和针柱状铁酸钙和硅酸盐渣相组成,局部存在粒度较粗的二次赤铁矿,其中磁铁矿与铁酸钙呈熔蚀交织结构,二次赤铁矿晶粒较粗、边界清晰,硅酸盐分布较为均匀,黏结相(铁酸钙、硅酸盐)较多,孔隙率较低,烧结矿强度较高。

25~40 mm 粒级烧结矿主要由赤铁矿、磁铁矿、铁酸钙和硅酸盐组成熔蚀交织结构,赤铁矿多为晶粒较

粗的二次赤铁矿。该烧结矿试样中铁矿物、熔剂和燃料分布较均匀,铁酸钙质量分数较高,为 37.05%,形貌多为枝晶状和片柱状,并含有一定量的磁铁矿和硅酸盐,黏结相总量质量分数较高,为 47.78%,褐铁矿分解使烧结矿孔隙率增加,形成小孔结构,强度较高。

18~25 mm 粒级烧结矿主要由大量细密针状铁酸钙和少量原生赤铁矿组成熔蚀交织结构,铁酸钙质量分数达 30.86%。细密针状铁酸钙由原生赤铁矿与熔剂反应形成。粗粒度褐铁矿分解成微球网状赤铁矿,熔剂矿化生成铁酸钙和硅酸盐,液相大多渗入褐铁矿分解而成的孔隙中,使烧结矿有效黏结相减少,强度降低。

12~18 mm 粒级烧结矿主要为小颗粒磁铁矿和铁酸钙组成的熔蚀交织结构,磁铁矿质量分数为 27.26%,铁酸钙质量分数为 25.34%,说明熔剂和燃料分布较多,铁酸钙多呈现片柱状,烧结矿强度中等。其原因在于烧结原料中的褐铁矿和赤铁矿粒度均匀性较差,熔剂和燃料多集中在细粒度黏附粉中,制粒并形成小球,矿化形成铁酸钙和磁铁矿的熔蚀交织结构,中小粒度的赤铁矿颗粒周围熔剂和燃料分布较少,多形成赤铁矿、硅酸盐及少量铁酸钙的粒状结构,烧结液相量较少,孔隙率较高。

5~12 mm 粒级烧结矿由大量细颗粒磁铁矿、少量赤铁矿、铁酸钙和硅酸盐组成,黏结相总量质量分数不足 25%,试样气孔率较高,黏结相与磁铁矿形成粒状结构,强度较低。其原因在于细颗粒赤铁矿亲水性及成球性远低于褐铁矿,其黏附石灰粉和燃料的能力较差,试样中熔剂和燃料量不足,黏结相较少,孔隙率高,强度较差。

将不同粒级烧结矿的液相含量变化趋势进行比较,以揭示烧结矿显微结构和矿物组成随烧结矿粒度变化的规律,见图 2。由图 2 可见,随着烧结矿试样粒径减小,试样中铁酸钙含量和黏结相总量均明显降低。这是因为大粒级烧结矿呈现典型的磁铁矿与铁酸钙的熔蚀交织结构,其中含有二次赤铁矿颗粒,铁矿物与熔剂和燃料接触良好,铁酸钙含量及黏结相总量较多,赤铁矿含量较少,强度较高;小粒级烧结矿多呈现赤铁矿、磁铁矿和黏结相的粒状结构,以及微球网状赤铁矿与黏结相的渗透结构,铁酸钙含量及黏结相含量不足,多呈现“多孔薄壁”结构,强度不高。

小粒级烧结矿及烧结返矿形成的原因主要有三方面:① 褐铁矿颗粒粗大,分解后形成微球网状结构的赤铁矿,其表面形成有限的烧结液相,液相渗入网孔中,减少了矿物颗粒间的有效黏结相,形成“多孔薄壁”结构;② 烧结混合料中赤铁矿和褐铁矿粒度较粗,熔剂和燃料多集中在细颗粒粉矿中,导致粗粒铁矿物周围熔剂和燃料分布较少,特别是赤铁矿颗粒的润湿性较褐铁矿差,其矿化形成铁酸钙和黏结相的能力不足,烧结试样气孔率较高,呈现“多孔薄壁”特征,强度变差。③ 褐铁矿同化温度低、液相生成能力强,在高配比条件下,随着烧结温度升高,褐铁矿迅速熔化并产生大量液相,这些液相在冷却过程中凝固,形成烧结矿的微观结构;烧结矿粒度减小时,颗粒间接触面积增大,促进液相在颗粒间的流动和填充,形成细小均匀的孔洞结构,进而表现出“多孔薄壁”的特征。基于上述分析,实际生产中,通过提高赤(磁)铁矿配比、采用厚料层烧结、优化烧结矿碱度等技术措施,可有效减少 5~10 mm 小粒级烧结矿及返矿的形成。

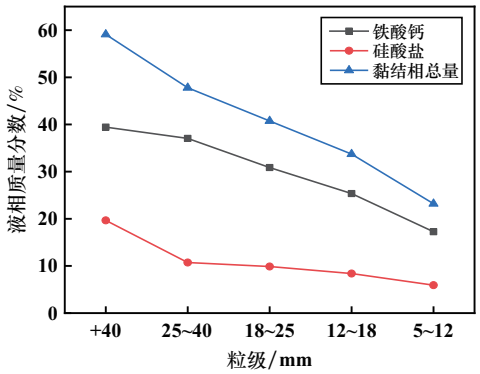



**图 2　不同粒级烧结矿液相含量变化趋势**

Fig. 2　Variation of liquid phase content in sintered ore with different particle sizes

## 4　结论

1) 褐铁矿粉亲水性比其他矿粉好,制粒过程中可以黏附较多的石灰熔剂,烧结时在其周围产生较多液相,但褐铁矿分解生成的赤铁矿呈微球网状结构,具有较强的吸液性,烧结体多孔而结构不均,强度较差。

2) 在 25~40 mm 粒级烧结矿中,铁酸钙含量达 37.05%,黏结相总量为 47.78%,形成以熔蚀交织为主的结构;而在 5~12 mm 粒级中,黏结相总量不足 25%,铁酸钙形态由针状转为片状、团块状,结构呈现粒状特征,强度显著下降。

3) 随着烧结矿粒度从 18~25 mm 降至 5~12 mm,铁酸钙含量由 30.86%降至 17.26%,赤铁矿含量明显上升,磁铁矿由自形-半自形转变为他形晶,显微结构由熔蚀交织演变为“多孔薄壁”形态,晶间微孔增多,结构强度恶化。

**参考文献**(References):

[1]　李国旺,韩秀丽,刘磊,等. 烧结成矿过程中铁酸钙特征与冶金性

能定量关系[J]. 烧结球团, 2023,48(1):44-49.
LI Guowang, HAN Xiuli, LIU Lei, et al. Quantitative relationship between characteristics of calcium ferrite and metallurgical properties during the process of sintering and mineralization[J]. Sintering and Pelletizing, 2023,48(1):44-49.

[2] 郅亚娜,李宇壮,白诗皓,等. 碱度对富矿粉厚料层烧结固相反应及矿物生成的影响[J]. 中国冶金, 2023,33(2):38-46.
QIE Yana, LI Yuzhuang, BAI Shihao, et al. Influence of basicity on solid phase reaction and mineral formation in high feed sintering of ore-rich[J]. China Metallurgy, 2023,33(2):38-46.

[3] 魏鑫,郭兴敏. 碱度对 $Fe_2O_3$-CaO-$SiO_2$ 体系矿物组成及显微结构的影响[J]. 钢铁研究学报, 2023,35(7):832-839.
WEI Xin, GUO Xingmin. Effect of basicity on composition and microstructure of reaction products in $Fe_2O_3$-CaO-$SiO_2$ system[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023,35(7):832-839.

[4] 韩秀丽,司天航,刘盈盈,等. 不同含量 $Al_2O_3$ 烧结矿矿相结构与 $RDI_{+3.15\ mm}$ 的定量关系[J]. 中国冶金, 2022,32(2):34-38.
HAN Xiuli, SI Tianhang, LIU Yingying, et al. Relationship between mineralogical structure and $RDI_{+3.15\ mm}$ of sinter with different contents of $Al_2O_3$[J]. China Metallurgy, 2022,32(2):34-38.

[5] 郝瑞聪,刘磊,韩秀丽,等. 铁酸钙特征对高碱度烧结矿冶金性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2021,42(4):111-116.
HAO Ruicong, LIU Lei, HAN Xiuli, et al. Influence of calcium ferrite characteristics on metallurgical properties of high basicity sinter[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021,42(4):111-116.

[6] 雷仕江,杜东,蔡源,等. 杨迪矿替代巴西矿对烧结过程的影响机理[J]. 烧结球团, 2024,49(2):1-7.
LEI Shijiang, DU Dong, CAI Yuan, et al. Influence mechanism of Yandicoogina substitution of Brazilian ore on sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2024,49(2):1-7.

[7] 司天航,韩秀丽,刘磊,等. 镁铝对烧结矿矿相结构的影响规律[J]. 烧结球团, 2021,46(2):24-31.
SI Tianhang, HAN Xiuli, LIU Lei, et al. Influence of Mg and Al on mineralogical structure in sinter[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2):24-31.

[8] 杨双平,张紫涵,王苗,等. 钒钛矿烧结配碳量对烧结矿质量及矿相结构影响[J]. 钢铁研究学报, 2024,36(7):875-884.
YANG Shuangping, ZHANG Zihan, WANG Miao, et al. Influence of sintered carbon content of vanadium titanium ore on sinter quality and mineral phase structure[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024,36(7):875-884.

[9] 刘磊,朱旺,赵俊花,等. 不同富氧阶段下烧结矿的矿相结构及软熔滴落性能[J]. 烧结球团, 2024,49(1):65-71.
LIU Lei, ZHU Wang, ZHAO Junhua, et al. Mineral structure and softening dropping property of sinter under different oxygen-rich stages[J]. Sintering and Pelletizing, 2024,49(1):65-71.

[10] 付壮壮. 铁矿粉粒度对烧结基础性能及矿相结构的影响[D]. 唐山:华北理工大学, 2022.
FU Zhuangzhuang. Effect of particle size of iron ore powder on basic sintering properties and ore mineralogical structure[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2022.

[11] 付壮壮,韩秀丽,刘磊,等. 铁矿粉粒度对烧结基础性能的影响[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2022,44(3):8-14.
FU Zhuangzhuang, HAN Xiuli, LIU Lei, et al. Effect of particle size of iron ore powder on basic properties of sintering[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022,44(3):8-14.

[12] 张国成,罗果萍,宋巍,等. MgO 对烧结矿液相形成性能和微观结构特性的影响[J]. 中国冶金, 2021,31(10):8-16.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, SONG Wei, et al. Effect of MgO on liquid phase formation properties and microstructure of sinter[J]. China Metallurgy, 2021,31(10):8-16.

[13] 张国成,罗果萍,柴轶凡,等. 碱度对烧结矿液相形成性能和微观结构特性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2021,33(7):584-592.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, CHAI Yifan, et al. Effect of basicity on liquid phase formation properties and microstructure of sinter[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021,33(7):584-592.

[14] 张国成,罗果萍,柴轶凡,等. 褐铁矿在烧结工艺中的优化配置[J]. 工程科学学报, 2022,44(1):39-49.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, CHAI Yifan, et al. Optimal allocation of limonite in sintering process[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022,44(1):39-49.

[15] 张国成,罗果萍,柴轶凡,等. 褐铁矿对烧结矿铁酸钙形貌及微区组成的影响[J]. 钢铁, 2024,59(5):22-32.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, CHAI Yifan, et al. Effect of limonite on morphology and micro-area composition of sinter calcium ferrite[J]. Iron and Steel, 2024,59(5):22-32.

[16] 易正明,陈轩,杨福,等. 低品位块矿烧结工艺正交试验优化研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(3):73-76.
YI Zhengming, CHEN Xuan, YANG Fu, et al. Optimization of orthogonal test for low-grade iron ore sintering process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(3):73-76

[17] 易正明,覃佳卓,邓植丹,等. 烧结加湿燃烧对 $NO_x$ 排放影响的研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(4):84-87.
YI Zhengming, QIN Jiazhuo, DENG Zhidan, et al. Influence of combustion air humidification on $NO_x$ emissions during sintering[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(4):84-87.

**引用本文**:张国成,柴轶凡,李红霞,等. 高褐铁矿配比条件下不同粒度烧结矿显微结构和矿物组成特点研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):146-150.
ZHANG Guocheng, CHAI Yifan, LI Hongxia, et al. Microstructure and mineral composition of sintered high-limonite ore with different particle sizes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):146-150.