

铁矿粉矿物学特性及其黏结相强度影响机理

王伟伟^{1a}, 韩秀丽¹, 段博文^{1a}, 饶明军^{1b,2}, 李凤久^{1a}, 徐良平^{1b,2}

(1. 华北理工大学 a. 矿业工程学院; b. 燕赵钢铁实验室; c. 矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心, 河北 唐山 063210; 2. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 黏结相强度是衡量铁矿粉烧结基础特性的重要指标之一, 铁矿粉本身的矿物学特性与黏结相强度密切相关。在对现场6种铁矿粉进行矿物学特性及烧结基础特性研究的基础上, 进行焙烧试样的矿相结构定量研究, 综合分析各因素对黏结相强度的影响机理。结果表明: 6种铁矿粉中, 纽曼粉以赤铁矿为主, 石英质量分数为4.1%; 铁精粉以磁铁矿为主, 石英质量分数为4.9%; 其他4种均以褐铁矿为主, 石英质量分数为3.1%~5.6%。各试样的粒度分布欠均匀, 超特粉粒度较大, 主要集中在5~10 mm; 国内铁精粉粒度最小。6种铁矿粉的TFe质量分数为56.87%~65.62%, 其中超特粉TFe含量最低, 国内铁精粉TFe含量最高; SiO₂质量分数为3.33%~5.90%, 超特粉SiO₂含量最高, PB粉SiO₂含量最低。焙烧试样中金属相主要为赤铁矿, 黏结相主要为铁酸钙, 其中超特粉中铁酸钙含量最高, 麦克粉中赤铁矿含量最高; 显微结构均以熔蚀交织结构为主, 但气孔特征差异明显, 麦克粉以薄壁大气孔为主, 气孔率最高。铁矿粉黏结相强度与焙烧试样中铁酸钙含量呈正相关, 与赤铁矿含量及气孔率呈负相关; 与原料中石英和褐铁矿含量密切相关, 与TFe含量关系不明显。本文研究成果对不同种类铁矿粉的合理利用、优化烧结配矿具有理论意义和应用价值。

关键词: 铁矿粉; 矿物学特性; 铁酸钙; 矿相结构; 黏结相强度

中图分类号: TF041

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)04-0122-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.04.066

Mineralogical characteristics of iron ore powder and its influencing mechanism of bonding phase strength

WANG Weiwei^{1a}, HAN Xiuli¹, DUAN Bowen^{1a}, RAO Mingjun^{1b,2}, LI Fengjiu^{1a}, XU Liangping^{1b,2}

(1. North China University of Science and Technology a. College of Mining Engineering; b. Yanzhao Iron and Steel Laboratory; c. Collaborative Innovation Center of Green Development and Ecological Restoration of Mineral Resources, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. School of Minerals Processing and Bio-engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: The bonding phase strength is one of the important indicators to measure the basic characteristics of iron ore powder sintering. The mineralogical characteristics of iron ore powder itself are closely related to the bonding phase strength. Based on the study of the mineralogical properties and basic characteristics of sintering of six kinds of iron ore powders on site, the mineral phase structure of the roasted samples is quantitatively studied, and the influence mechanism of various factors on the bonding phase strength is comprehensively analyzed. The results show that among the six kinds of iron ore powders, Newman powder is dominated by hematite, and the quartz mass fraction is 4.1%. The iron concentrate is

收稿日期: 2024-12-22; 修回日期: 2025-01-22

基金项目: 河北省科技计划资助项目(23564101D); 河北省中央引导地方科技发展资金资助项目(246Z4102G); 华北理工大学重点科研项目(ZD-ST-202308)

作者简介: 王伟伟(1998—), 男, 硕士研究生, 从事含铁原料工艺矿物学相关研究。

通信作者: 韩秀丽(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 从事冶金工艺矿物学、成因矿物学、资源高效利用等方面的研究。

mainly magnetite, and the quartz mass fraction is 4.9%; The other four types are dominated by limonite, and the quartz mass fraction is 3.1%~5.6%. The particle size distribution of each sample is not uniform, and the particle size of the super special powder is large, mainly concentrated in 5~10 mm. The domestic iron concentrate powder has the smallest particle size. The TFe mass fraction of the six kinds of iron ore powders is 56.87%~65.62%, among which the TFe content of super special powder is the lowest and the TFe content of domestic iron concentrate powder is the highest. The mass fraction of SiO₂ is 3.33%~5.90%, and the SiO₂ content of super special powder is the highest, and the SiO₂ content of PB powder is the lowest. The metal phase in the roasted specimens is mainly hematite, and the binding phase is mainly calcium ferrite, among which the content of calcium ferrite is the largest in super powder and the content of hematite is the largest in wheat powder. The microstructures are dominated by melted interweaving structures, but the pore characteristics are obviously different, and the mackerel powder is mainly made up of thin-walled atmospheric pores, and the stomatal rate is the highest. The bonding phase strength of iron ore powder is positively correlated with the calcium ferrite content in the calcined samples, and negatively correlated with the content of hematite and porosity. It is closely related to the content of quartz and limonite in the raw materials, but the relationship with the content of TFe is not obvious. The research results have theoretical significance and application value for the rational utilization and optimization of sintering and blending of different types of iron ore powder.

Key words: iron ore powder; mineralogical characteristics; calcium ferrite; ore phase structure; bonding phase strength

黏结相强度是铁矿粉烧结基础特性的重要指标之一,对烧结矿质量有着重要影响^[1-2]。铁矿粉自身矿物学特性是影响黏结相强度的根本因素。吴胜利等^[3]、张国成等^[4]研究了铁矿粉的矿物组成,认为相较于赤铁矿粉和磁铁精粉,褐铁矿粉的黏结相强度较低。李建朝等^[5]研究了混合铁矿粉对黏结相强度的影响,发现当褐铁矿型铁矿粉配比为40%~50%时,混合铁矿粉的黏结相强度最高。杨双平等^[6]从化学成分的角度研究了10种铁矿粉的SiO₂含量与黏结相强度的关系,发现SiO₂质量分数为5%时黏结相强度最高。向家发等^[7]、李和平等^[8]、任强等^[9]、ZHANG等^[10]、沈峰满等^[11]研究发现,铁矿粉中SiO₂含量与铁酸钙的生成有直接关联, SiO₂含量过高会产生高熔点硅酸盐,降低液相的流动性,不利于固结; SiO₂含量过低不利于铁酸盐液相的生成,降低复合铁酸钙的生成量,当SiO₂质量分数为2.52%时,铁酸钙生成量最低。范晓慧等^[12]研究了单一铁矿粉的粒度情况,发现粒度大小及分布的均匀度决定了SiO₂对铁酸钙生成能力的强弱。伊凤永等^[13]对混合铁矿粉的研究表明,铁矿粉中TFe含量的增加会增大Fe₂O₃和CaO之间的接触面积,提高黏结相强度。焙烧试样中矿相结构是黏结相强度的直观反映,而铁酸钙作为矿物组成中的优

质黏结相,对烧结试样强度的影响最为显著^[14-18]。宋鹤锴等^[19]利用Matlab软件对黏结相的微观气孔率进行编程统计,得出黏结相强度与气孔率呈反比。张文兴等^[20]通过扫描电镜对5种铁矿粉试样的微观气孔含量及分布状态进行统计,研究认为:大气孔分布均匀会形成厚壁,提高黏结相强度;大气孔分布集中会形成薄壁,降低黏结相强度。薛方等^[21]研究了铁矿粉试样中微孔和大孔对黏结相强度的影响,结果表明:孔径相差越大,黏结相强度越低。

上述研究仅从单因素角度对黏结相强度的影响规律进行研究。本文在系统研究铁矿粉矿物学特性的基础上,定量分析铁矿粉的化学成分、矿物种类及含量、粒度及焙烧试样的矿相结构等多因素综合作用对黏结相强度的影响,旨在为合理利用铁矿粉及优化烧结配矿提供理论指导。

1 试验原料与方法

1.1 铁矿石矿物学特性

1.1.1 化学成分

本文研究对象为唐山某钢铁厂现场烧结用超特粉、JMB粉、麦克粉、纽曼粉、PB粉、国内铁精粉等6种不同成分铁矿粉,其化学成分特点如表1所示。由表1可知,6种铁矿粉的TFe质量分

数为 56.87%~65.62%，SiO₂ 质量分数为 3.33%~5.90%，MgO 质量分数为 0.02%~0.05%，有害杂质 S 含量较低。国内铁精粉 TFe 和 FeO 质量分数均最高，分别为 65.62% 和 27.08%；超特粉 TFe 含量最低、硅含量最高；PB 粉 SiO₂ 含量最低。

表 1 铁矿粉主要化学成分(质量分数)

原料名称	TFe	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	S
超特粉	56.87	1.62	0.21	5.90	0.04	2.76	0.03
JMB 粉	60.59	0.44	0.13	4.33	0.05	2.72	0.02
麦克粉	60.98	0.32	0.14	3.72	0.04	2.31	0.04
纽曼粉	61.67	0.44	0.23	4.14	0.04	2.35	0.01
PB 粉	61.96	0.44	0.12	3.33	0.04	2.15	0.02
国内铁精粉	65.62	27.08	0.14	5.05	0.02	—	0.03

1.1.2 矿物组成特点

分别取代表性铁矿粉制备光薄片，在德国蔡司 Axioskop A1 pol 透/反两用研究型偏光显微镜下采用过尺线测法^[22]对 6 种铁矿粉的矿物组成进行定量分析。具体步骤：① 根据试样中矿物颗粒大小，确定放大倍数为 10×20、测线间距为 1 mm；② 在样片上均匀布线，从左侧第一条测线上端的

第一个视域开始，逐个视域测量直至最后一个视域结束，移动机械台至第二条测线以同样方法测量，直至最后一条测线结束；③ 以目镜标尺垂直方向作为基准线，从第一个视域开始，测量并记录矿物最大水平截距在目镜测微尺上的格子数。某一矿物的格子数与所有矿物格子数之比即为该种矿物的质量分数，误差范围为 0.5%~1.0%，测量结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出，超特粉、JMB 粉、麦克粉、PB 粉中金属矿物均以褐铁矿粉为主，其中麦克粉中褐铁矿的质量分数最高，达到 76.5%；纽曼粉的主要矿物为赤铁矿和褐铁矿，各占 56.5% 和 34.7%；国内铁精粉中磁铁矿的质量分数高达到 87.5%，含少量赤铁矿，未见褐铁矿。石英是主要的脉石矿物，超特粉和国内铁精粉中石英含量最高，PB 粉石英含量最低。

1.1.3 粒度分布特征

采用 GZS-1 高频振筛机对 6 种铁矿粉进行筛分试验，分别使用 10.00、5.00、2.50、1.00、0.50、0.25、0.15 mm 的套筛测出其粒度组成。铁矿粉的粒度分布如表 3 所示。由表 3 可以看出：6 种铁矿粉的粒度分布不均匀，超特粉、JMB 粉、

表 2 铁矿粉的矿物组成(质量分数)

原料名称	磁铁矿	赤铁矿	磁赤铁矿	褐铁矿	石英	长石	黑云母	铁矿粉类型
超特粉	5.5	32.1	—	55.3	5.6	1.5	—	褐铁矿型
JMB 粉	3.2	33.3	—	57.8	3.9	—	1.8	褐铁矿型
麦克粉	1.5	17.5	1.0	76.5	3.5	—	—	褐铁矿型
纽曼粉	2.3	56.5	2.4	34.7	4.1	—	—	赤铁矿型
PB 粉	1.3	32.3	—	63.3	3.1	—	—	褐铁矿型
国内铁精粉	87.5	4.5	3.1	—	4.9	—	—	磁铁矿型

表 3 铁矿粉的粒度分布(质量分数)

原料名称	>10.00 mm	(5.00,10.00] mm	(2.50,5.00] mm	(1.00,2.50] mm	(0.50,1.00] mm	(0.25,0.50] mm	(0.15,0.25] mm	≤0.15 mm
超特粉	11.31	40.29	33.52	10.76	2.04	0.88	0.20	1.00
JMB 粉	4.58	25.98	24.23	15.74	7.19	8.04	3.48	10.76
麦克粉	5.45	27.78	19.21	10.24	5.96	9.31	6.25	15.80
纽曼粉	5.07	18.55	22.59	12.83	7.46	8.73	6.18	18.59
PB 粉	2.05	24.82	24.67	13.00	8.17	9.92	5.04	12.33
国内铁精粉	—	—	—	0.76	1.36	1.28	1.28	95.32

麦克粉、PB粉以粗粒为主,粒度主要分布在5~10 mm,其中超特粉粒度最大,5~10 mm 粒级占比为40.29%;纽曼粉以中粒级为主,粒度主要集中在2.5~5 mm。国内铁精粉的粒度最小,≤0.15 mm 粒级占比为95.32%。

1.2 试验方案

试验流程如图1所示。对6种铁矿粉分别缩分取样,并进行烘干,使用研磨机对铁矿粉进行研磨,直至粒度均小于0.074 mm;添加CaO分析纯试剂调节 R_2 (二元碱度)为2.0并充分混匀;取0.8 g 混合料放入手动压样机中,以15 MPa 将混合料压制成8 mm×5 mm 的小饼[图1(a)];将小饼放入卧式管炉中进行焙烧,设定焙烧温度为1 280 ℃、恒温时间为4 min[图1(b)];用万能试验机测定烧结后小饼的抗压强度,重复5次,取抗压强度的平均值作为黏结相强度的最终结果[图1(c)],控制试验误差范围小于5%。

2 试验结果与讨论

2.1 铁矿粉黏结相强度

铁矿粉黏结相强度如图2所示。由图2可见,6种铁矿粉黏结相强度存在明显差异,黏结相强度由大到小依次为超特粉、纽曼粉、JMB粉、国内铁精粉、PB粉、麦克粉,其中超特粉黏结相强度最高为1 588 N,麦克粉黏结相强度最低仅为328 N,其他铁矿粉黏结相强度为877~1 242 N。

2.2 焙烧试样矿相结构特点

以6种焙烧试样纵切面为基准制备光薄片,利用偏光显微镜在200倍条件下观察分析其矿相结构,并采用过尺线测法对焙烧试样中各矿物含量及气孔率进行测量。结果如图3所示。由图3

可见:6种试样均以熔蚀交织结构为主,主要表现为赤铁矿被铁酸钙胶结。超特粉焙烧试样矿相结构致密,气孔分布较为均匀,以规则状似圆形厚壁气孔为主;PB粉、麦克粉焙烧试样气孔形状较不规则,气孔壁较薄,且PB粉较麦克粉气孔形状更为规则、气孔壁更厚;纽曼粉、JMB粉、国内铁精粉焙烧试样则以较规则状厚壁气孔为主,其中纽曼粉焙烧试样相较于JMB粉气孔较为均匀,且小气孔明显较少,铁精粉焙烧试样中气孔多呈圆形且分布较为分散,铁酸钙生成形态多呈针状集中分布,针状铁酸钙的形成有利于整体强度的提升。

焙烧试样矿物含量和气孔率如图4所示。由图4(a)可见:焙烧试样中金属相主要为赤铁矿,黏结相主要为铁酸钙,磁铁矿、玻璃相含量相对较低;超特粉焙烧试样中铁酸钙质量分数最高为58.7%,麦克粉焙烧样中赤铁矿质量分数最高为57.3%。由图4(b)可知,焙烧试样气孔率差异不明显,麦克粉气孔率最高为31.4%,超特粉气孔率最低为25.2%。

3 黏结相强度的影响因素分析

3.1 铁矿粉矿物学特性的影响

3.1.1 铁矿粉化学成分

铁矿粉中 SiO_2 含量是影响黏结相强度的主要因素。化学成分对黏结相强度的影响如图5所示。由图5(a)可见,黏结相强度与 SiO_2 含量整体呈正相关。当碱度不变时, SiO_2 含量增加后,碱性熔剂的配比也随之增加。尽管高温反应过程中 SiO_2 与CaO更易发生反应,但由于烧结料中 Fe_2O_3 与CaO的接触数量远高于 SiO_2 ,液相形成后 SiO_2 会在高温的作用下固溶于铁酸钙液相中,从而促

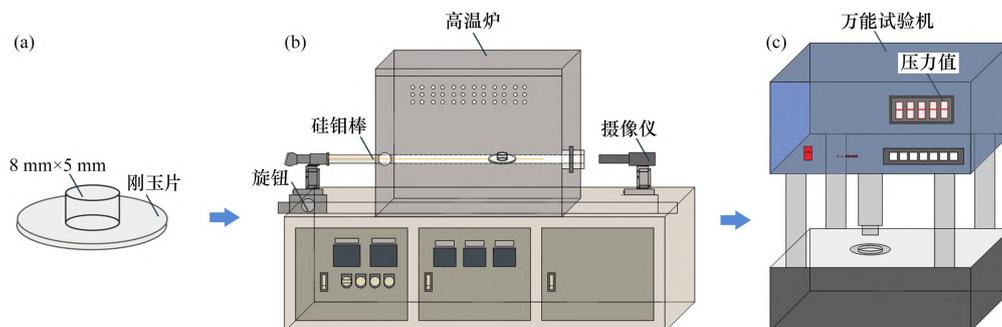


图1 试验流程

Fig. 1 Experimental flow diagram

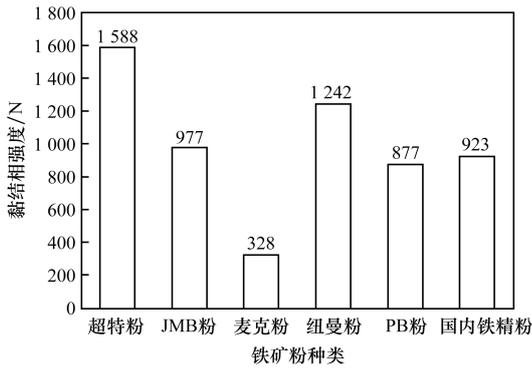


图 2 铁矿粉黏结相强度

Fig. 2 Bond phase strength of iron ore powder

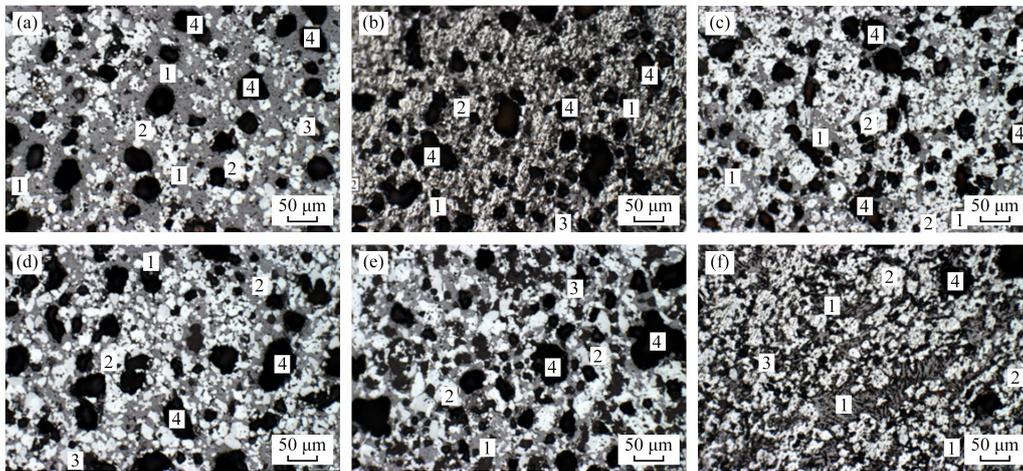
进了铁酸钙的生成。液相量的增加有利于邻近铁矿粉的相互黏结,提高了黏结相强度。

TFe 含量对黏结相强度影响不明显,如图5

(b)所示。黏结相强度取决于液相生成量。由于混合粉中的铁氧化物与 CaO 的含量都较高, CaO 已经与 Fe₂O₃ 充分反应生成足量的铁酸钙,所以 TFe 含量的改变,未引起黏结相强度发生明显变化。

3.1.2 铁矿粉矿物组成的影响

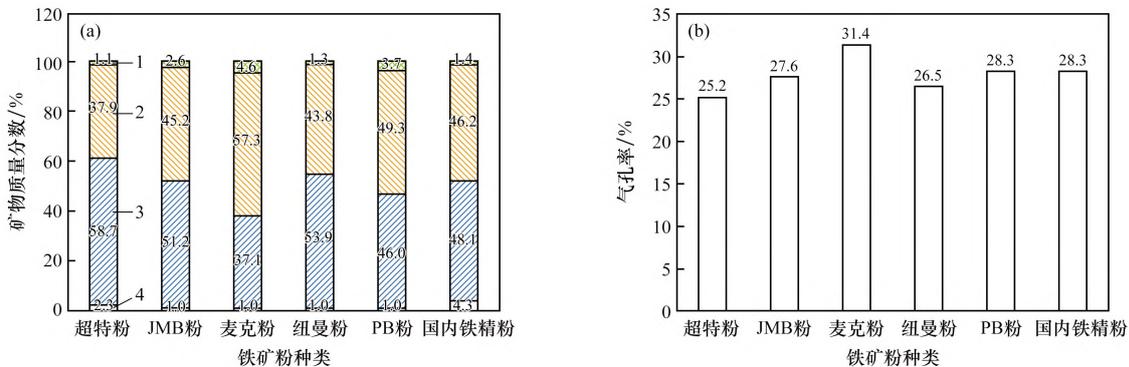
铁矿粉中褐铁矿含量是影响黏结相强度的重要因素。铁矿粉中矿物含量对黏结相强度的影响如图6所示。由图6可见:超特粉中褐铁矿质量分数为55.3%,黏结相强度最高;麦克粉中褐铁矿质量分数最高,达76.5%,黏结相强度最低。由于含有结晶水,褐铁矿在烧结过程中结晶水的挥发会产生一定的气孔。气孔率的增加促进了物料之间的反应,如果褐铁矿含量过多,铁矿粉在



(a) 超特粉; (b) JMB粉; (c) 麦克粉; (d) 纽曼粉; (e) PB粉; (f) 国内铁精粉
1—铁酸钙; 2—赤铁矿; 3—玻璃质; 4—气孔。

图 3 焙烧试样显微结构

Fig. 3 The bonded phase microstructures

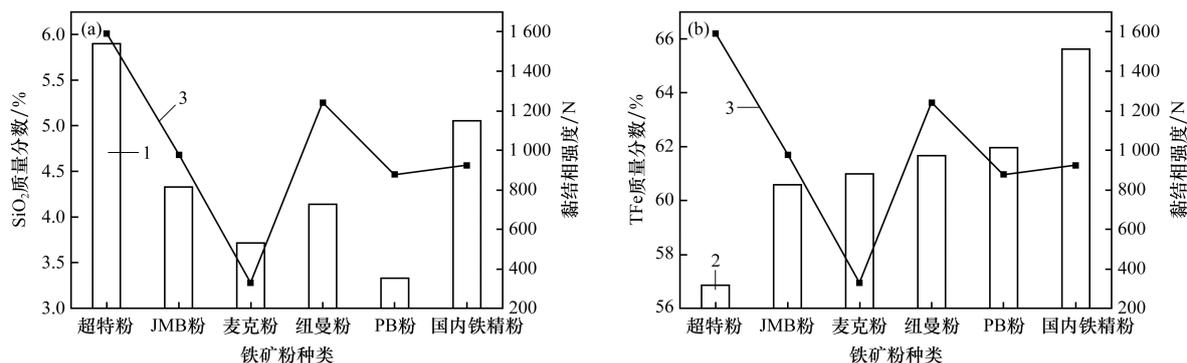


(a) 矿物质量分数; (b) 气孔率

1—玻璃相; 2—赤铁矿; 3—铁酸钙; 4—磁铁矿。

图 4 焙烧试样矿物含量和气孔率

Fig. 4 Mineral content and porosity of the roasting sample

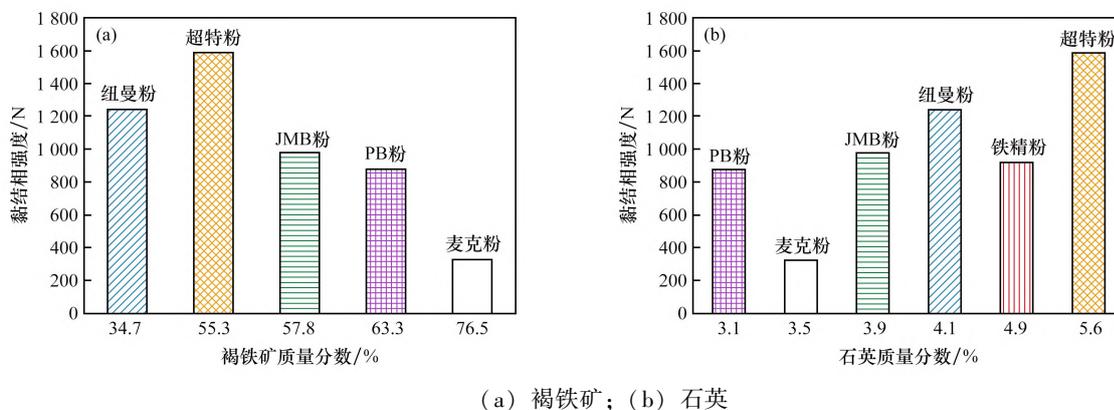


(a) 不同 SiO₂ 质量分数下铁矿粉的黏结相强度; (b) 不同 TFe 质量分数下铁矿粉的黏结相强度

1—SiO₂ 质量分数; 2—TFe 质量分数; 3—黏结相强度。

图 5 化学成分对黏结相强度的影响

Fig. 5 Effect of the chemical composition on the bonding phase strength



(a) 褐铁矿⁺; (b) 石英

图 6 铁矿粉中矿物含量对黏结相强度的影响

Fig. 6 Effect of the mineral content in the iron ore powder on the strength of the bond phase

分解过程中结晶水的挥发会产生孔隙率较高的网状结构,形成薄壁状疏松大气孔,造成整体强度的降低。原矿粉中石英含量与黏结相强度密切相关,超特粉中石英质量分数为 5.6%,黏结相强度最高;麦克粉中石英质量分数为 3.5%,黏结相强度最低。石英在高温反应过程中会形成低熔点熔融物,可与铁氧化物、CaO 等在高温下形成多元低熔点化合物,提高液相流动性,增加复合铁酸钙生成量。铁酸钙生成量的增加有利于矿粉之间的固结。

3.2 焙烧试样矿相结构的影响

3.2.1 焙烧试样中矿物组成的影响

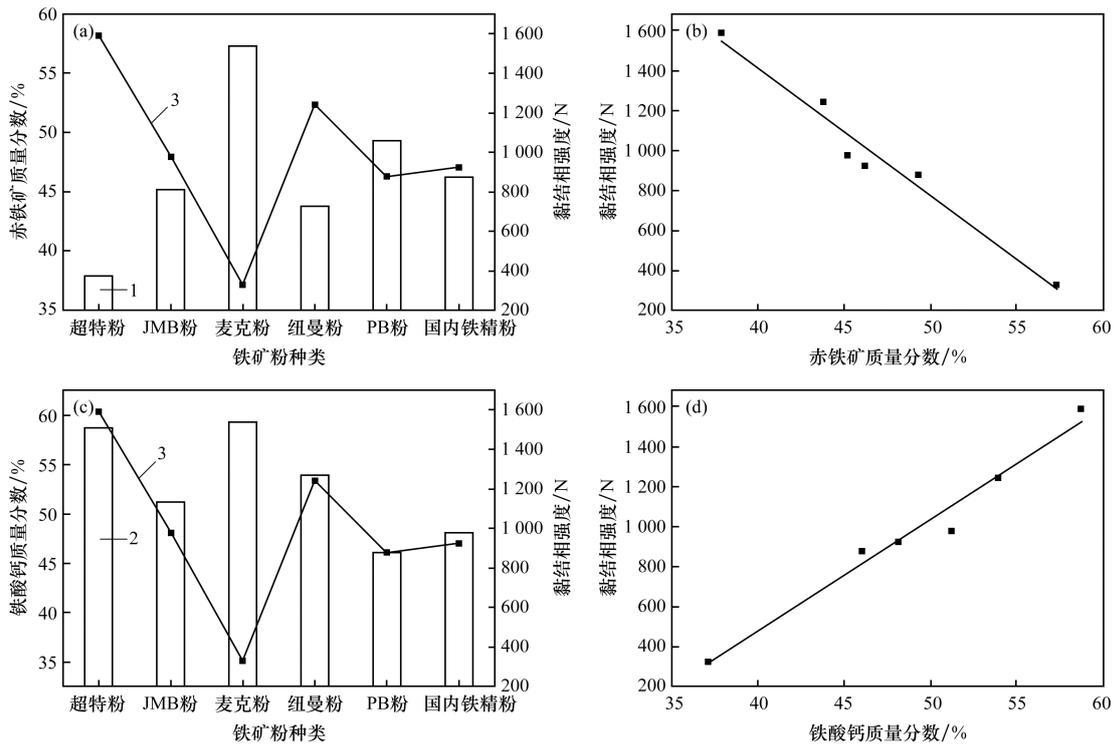
焙烧试样中矿物含量对黏结相强度的影响如图 7 所示。由图 7(a)可见,焙烧试样中赤铁矿含量与黏结相强度呈负相关。赤铁矿含量的增加会减少液相量的生成,导致烧结试样的固结强度降低。本文采用 Origin 软件对赤铁矿质量分数与黏结相强度进行拟合,所得的拟合直线方程为 $y = -63.19781x +$

3935.23797 , 拟合度 $R_2 = 0.94490$, 拟合效果好,见图 7(b)。

由图 7(c)可见,铁酸钙含量与黏结相强度呈正相关。麦克粉试样中铁酸钙质量分数最低为 37.1%,黏结相强度仅为 328 N,超特粉试样中铁酸钙质量分数最高为 58.7%,黏结相强度达到 1588 N。拟合得到铁酸钙质量分数与黏结相强度的拟合曲线方程为 $y = 55.74437x - 1751.59796$, 拟合度 $R_2 = 0.97179$, 拟合效果好,见图 7(d)。

3.2.2 气孔率的影响

气孔率对黏结相强度的影响如图 8 所示。由图 8 可知,焙烧试样气孔率与铁矿粉黏结相强度呈负相关。超特粉焙烧试样气孔率最低,黏结相强度最高;麦克粉焙烧试样气孔率最高,黏结相强度最低。气孔率的影响与铁矿粉中褐铁矿含量密切相关,气孔率的形成主要取决于高温反应过程中褐铁矿中结晶水的挥发。通过拟合得到气孔率与黏结相强



(a) 黏结相强度与赤铁矿含量的关系; (b) 赤铁矿含量与黏结相强度线性拟合;
(c) 黏结相强度与铁酸钙含量的关系; (d) 铁酸钙与黏结相强度线性拟合
1—赤铁矿; 2—铁酸钙; 3—黏结相强度。

图 7 焙烧试样中矿物含量对黏结相强度的影响

Fig. 7 Effect of the mineral content in the roasting sample on the strength of the bond phase

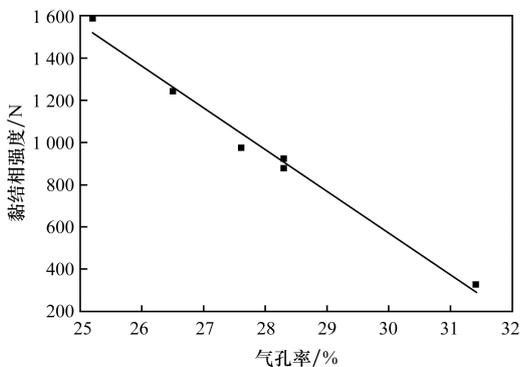


图 8 气孔率对黏结相强度的影响

Fig. 8 Effect of the stomatal rate on the strength of the bonded phases

度的拟合曲线方程为 $y = -198.6725x + 6528.81818$, 拟合度 $R_2 = 0.98627$, 拟合效果显著。

4 结论

(1) 不同种类铁矿粉矿物学特性差异较大, 超特粉、JMB粉、麦克粉、PB粉以褐铁矿为主, 粒度较大, 主要分布在 5 ~ 10 mm, 其中超特粉

TFe 含量最低、SiO₂ 含量最高, PB 粉的 SiO₂ 含量最低。纽曼粉以赤铁矿为主, 粒度主要分布在 2.5 ~ 5 mm。国内铁精粉以磁铁矿为主, TFe 含量最高, 粒度最小, 0.15 mm 以下占 95.32%。

(2) 焙烧试样的矿物组成中, 金属相主要为赤铁矿, 黏结相主要为铁酸钙, 但含量差异明显, 超特粉焙烧试样中铁酸钙质量分数最高, 为 58.7%, 麦克粉焙烧样中铁酸钙质量分数最低, 为 37.1%。6 种铁矿粉的显微结构均以熔蚀交织结构为主, 但气孔特征明显不同, 超特粉以规则似圆状大气孔为主; 麦克粉、PB 粉以不规则薄壁大气孔为主; 纽曼粉、JMB 粉、国内铁精粉则以较规则状厚壁大气孔为主。超特粉气孔率最低, 为 25.2%, 麦克粉气孔率最高, 为 31.4%。

(3) 6 种铁矿粉中, 超特粉的黏结相强度最好, 麦克粉的黏结相强度最差。超特粉中较高的硅含量及适量的褐铁矿, 使得焙烧试样中产生较多的铁酸钙及较低的气孔率, 有利于强度的提升; 麦克粉中低硅及过高的褐铁矿使得焙烧试样中产

生少量的铁酸钙及大量的气孔,使得强度变低。总体来看,铁矿粉黏结相强度与焙烧试样中铁酸钙含量呈正相关,与赤铁矿含量及气孔率呈负相关;与原料中石英和褐铁矿含量密切相关,与TFe含量关系不明显。

参考文献:

- [1] 吴胜利,刘宇,杜建新,等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念[J]. 北京科技大学学报,2002,24(3):254-257.
WU Shengli, LIU Yu, DU Jianxin, et al. New concept of iron ores sintering basic characteristics[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 24(3):254-257.
- [2] 吴胜利,杜建新,马洪斌,等. 铁矿粉烧结粘结相自身强度特性[J]. 北京科技大学学报,2005,27(2):169-172.
WU Shengli, DU Jianxin, MA Hongbin, et al. Self-intensity of binding phase in iron ores during sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(2):169-172.
- [3] 吴胜利,戴宇明,OLIVEIRA D,等. 基于铁矿粉高温特性互补的烧结优化配矿[J]. 北京科技大学学报,2010,32(6):719-724.
WU Shengli, DAI Yuming, OLIVEIRA D, et al. Optimization of ore blending during sintering based on complementation of high temperature properties[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(6):719-724.
- [4] 张国成,罗果萍,柴铁凡,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.
- [5] 李建朝,伊凤永,李福民,等. 混合铁矿粉的烧结基础特性[J]. 钢铁,2013,48(5):7-10;40.
LI Jianchao, YI Fengyong, LI Fumin, et al. Sintering basic characteristics of blending iron ore[J]. Iron and Steel, 2013, 48(5):7-10;40.
- [6] 杨双平,于成刚,何少红,等. 铁矿粉化学成分对烧结高温基础特性的影响[J]. 中国冶金,2023,33(2):47-54.
YANG Shuangping, YU Chenggang, HE Shaohong, et al. Influence of chemical composition in iron ore powder on basic characteristics of sintering at high temperature[J]. China Metallurgy, 2023, 33(2):47-54.
- [7] 向家发,王跃飞,何志军,等. 铁矿粉成分对其烧结基础特性的影响研究[J]. 烧结球团,2016,41(2):32-36.
XIANG Jiafa, WANG Yuefei, HE Zhijun, et al. Study on influence of iron ore composition on the basic sintering characteristics[J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(2):32-36.
- [8] 李和平,吴胜利,苏博. SiO₂质量分数对铁矿粉液相特性及固结强度的影响[J]. 烧结球团,2019,44(5):23-28.
LI Heping, WU Shengli, SU Bo. Effect of SiO₂ mass fraction on the liquid phase characteristic and concretion strength of iron ore powder[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(5):23-28.
- [9] 任强,王艺慈,罗果萍,等. 铁矿粉的烧结基础特性及最佳配矿试验研究[J]. 烧结球团,2020,45(2):26-30.
REN Qiang, WANG Yici, LUO Guoping, et al. Experimental study on basic sintering characteristics and optimum ore blending scheme of iron ore powder[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(2):26-30.
- [10] ZHANG Q J, JIANG L M, MO W L, et al. Influence of SiO₂ content on fractal of grain distribution in low silicon sinter[J]. Advanced Materials Research, 2011, 391/392:269-273.
- [11] 沈峰满,安海玮,姜鑫,等. 烧结工艺中复合铁酸钙黏结相的研究进展[J]. 钢铁,2024,59(2):1-12.
SHEN Fengman, AN Haiwei, JIANG Xin, et al. Research progress on sillico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) bonding phase in sintering process[J]. Iron and Steel, 2024, 59(2):1-12.
- [12] 范晓慧,孟君,陈许玲,等. 铁矿烧结中铁酸钙形成的影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版),2008,39(6):1125-1131.
FAN Xiaohui, MENG Jun, CHEN Xuling, et al. Influence factors of calcium ferrite formation in iron ore sintering[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39(6):1125-1131.
- [13] 伊凤永,李福民,孙恺,等. 混合矿烧结基础性能与化学成分间的关系[J]. 烧结球团,2013,38(2):1-5.
YI Fengyong, LI Fumin, SUN Kai, et al. Relationship between basic sintering properties and chemical

- compositions of mixed iron ores fines[J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(2): 1-5.
- [14] 杜鹤桂, 郭兴敏. 烧结过程铁酸钙的生成速度[J]. 东北工学院学报, 1992, 13(1): 18-24.
DU Hegui, GUO Xingmin. Rate of calcium ferrite formation in sintering process[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1992, 13(1): 18-24.
- [15] 韩秀丽, 司天航, 李鸣铎, 等. 镁铝对烧结矿中铁酸钙的矿物学特性影响[J]. 地学前缘, 2020, 27(5): 280-290.
HAN Xiuli, SI Tianhang, LI Mingduo, et al. Influences of MgO and Al₂O₃ on the mineralogical properties of calcium ferrite in iron ore sinter[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(5): 280-290.
- [16] 韩秀丽, 杜亮, 陈前冲, 等. 赤铁矿型烧结矿中不同形态铁酸钙形成规律研究[J]. 烧结球团, 2021, 46(5): 1-7.
HAN Xiuli, DU Liang, CHEN Qianchong, et al. Research on formation law of different forms of calcium ferrite in hematite-type sinter[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(5): 1-7.
- [17] 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.
- [18] 许满兴, 张天启. 铁矿石优化配矿实用技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2017.
XU Manxing, ZHANG Tianqi. Practical technology for optimizing ore blending of iron ore[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017.
- [19] 宋鹤锴, 吴胜利, 周恒. 铁矿烧结黏结相气孔率影响因素分析[J]. 中国冶金, 2019, 29(5): 15-21.
SONG Hekai, WU Shengli, ZHOU Heng. Analysis of influence factors of porosity of sintered bonding phase in iron ore[J]. China Metallurgy, 2019, 29(5): 15-21.
- [20] 张文兴, 黄苑龄, 张周位. 烧结矿的矿物组成和气孔特征对黏结相强度的影响[J]. 现代矿业, 2018, 34(7): 118-121; 125.
ZHANG Wenxing, HUANG Yuanling, ZHANG Zhouwei. Influence of sinter mineral composition and stomata characteristics on bonding phase strength[J]. Modern Mining, 2018, 34(7): 118-121; 125.
- [21] 薛方, 徐东升, 张俊杰, 等. 铁矿粉黏结相强度的微观分析及配矿方法探讨[J]. 烧结球团, 2020, 45(5): 25-28; 58.
XUE Fang, XU Dongsheng, ZHANG Junjie, et al. Microanalysis on bonding phase strength of iron ore powder and discussion on ore matching method[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(5): 25-28; 58.
- [22] 周乐光. 工艺矿物学[M]. 3版. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
ZHOU Leguang. Process mineralogy[M]. 3rd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.

广 告 目 次

封面	湖南中冶长天重工科技有限公司	前彩 18-19	湖南中冶长天重工科技有限公司
封二	襄阳中和机电技术有限公司	前彩 20-21	北京顺泰克科技有限公司
封三	《烧结球团》杂志征订启事	前彩 22-23	唐山助钢炉料有限公司
封底	河北同冶冶金科技有限责任公司	前彩 24	焦作市迈科冶金机械有限公司
前彩 1	湖南宏德陶瓷科技有限公司	前彩 25	成都利君实业股份有限公司
前彩 2-3	鞍山市昱昊机械设备有限公司	前彩 26-27	湖南中冶长天节能环保技术有限公司
前彩 4-5	湖南德尚源耐磨工业有限公司	前彩 28-29	北京金都泰拓冶金技术研究有限公司
前彩 6	秦皇岛秦冶重工有限公司	前彩 30	江阴市创裕机械有限公司
前彩 7	秦冶工程技术(北京)有限责任公司	前彩 31	江苏鑫华节能环保工程股份有限公司
前彩 8	长沙天为华信环保装备有限公司	前彩 32	厦门川亿机械设备有限公司
前彩 9	罗迪格(北京)机械设备有限公司	前彩 33	SEW-传动设备(天津)有限公司
前彩 10-11	中冶长天(长沙)智能科技有限公司	前彩 34	湖南长重机器股份有限公司
前彩 12-13	朝阳重型机器有限公司	后彩 1	中冶长天炉窑工程技术公司
前彩 14-15	北京艾瑞机械有限公司	后彩 2	爱立许集团(中国)有限公司
前彩 16	南京三埃工控有限公司	后彩 3	鞍山市明阳金属材料有限公司
前彩 17	沈阳华泽单齿辊破碎机制造有限公司	后彩 4	湖北中船气体有限公司