

有机黏结剂高品位球团的固结机制研究

周仙霖¹, 郑子康¹, 万军营¹, 陈铁军¹, 罗艳红¹, 王兆才²

(1. 武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院; b. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081; 2. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

摘要: 应用纯有机黏结剂可以显著提高成品球的 TFe 质量分数, 研究纯有机黏结剂球团对炼铁工艺具有重要意义。本文以细粒级高品位磁铁精矿和有机黏结剂 JDOB-4 及印度膨润土为原料, 研究有机黏结剂和膨润土对高品位球团矿性能的影响, 并采用光学显微镜与扫描电子显微镜-能谱仪等仪器, 分析球团矿的微观结构变化规律。结果表明: 当 JDOB-4 添加量为 0.15% 时, 生球的落下强度为 6.1 次/(0.5 m), 在预热温度为 1 050 °C、预热时间为 18 min、焙烧温度为 1 300 °C、焙烧时间为 21 min 的预热焙烧条件下, 焙烧球的抗压强度为 2 290 N/P; 随着 JDOB-4 添加量的增加, 焙烧球的抗压强度先增加后减少。当有机黏结剂用量过多时, 球团内部孔洞增加, 形成了高孔隙度、疏松的微观结构, 导致球团的抗压强度下降。相比膨润土球团, 添加有机黏结剂较多的球团焙烧过程需要提高焙烧温度、延长焙烧时间来促进赤铁矿连晶, 进而提高焙烧球的抗压强度。本文研究成果可为采用国内高品位铁精矿配加纯有机黏结剂生产高品位氧化球团提供参考。

关键词: 高品位铁精矿; 有机黏结剂; 预热焙烧; 固结机理

中图分类号: TF046.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0070-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.043

Study on the consolidation mechanism of organic binders high-grade pellets

ZHOU Xianlin¹, ZHENG Zikang¹, WAN Junying¹, CHEN Tiejun¹,
LUO Yanhong¹, WANG Zhaocai²

(1. Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: The application of pure organic binder can significantly improve the TFe mass fraction of finished pellets, and it is of great significance to study the pure organic binder pellets for ironmaking process. In this paper, fine-grained high-grade magnetite concentrate, organic binder JDOB-4 and Indian bentonite are used as raw materials to study the effects of organic binder and bentonite on the properties of high-grade pellets, and the law of microstructure change of pellets is analyzed by equipment of optical microscopy and scanning electron microscopy-energy dispersive spectrometer. The results show that when the addition of JDOB-4 is 0.15%, the falling strength of the fresh pellets is 6.1 times/(0.5 m), and the compressive strength of the pellets is 2 290 N/P under the conditions of preheating temperature of 1 050 °C, preheating time of 18 min, roasting temperature of 1 300 °C and roasting time of 21 min. With the increase of JDOB-4 addition, the compressive strength of the roasting pellets first increases and then decreases. When the amount of organic binder is too

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-05-17

基金项目: 中冶长天科研开发基础研究基金资助项目(2023JCYJ05); 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2022014)

作者简介: 周仙霖(1986—), 男, 博士, 副教授, 从事铁矿低碳造块新技术和冶金固废高效资源化利用等方面的研究。

通信作者: 罗艳红(1985—), 女, 博士, 讲师, 从事铁矿低碳造块新技术方面的研究。

much, the internal pores of the pellets increase, and a highly porosity and loose microstructure are formed, resulting in a decrease in the compressive strength of the pellets. Compared with bentonite pellets, the roasting process of pellets with more organic binders needs to increase the roasting temperature and extend the roasting time to promote hematite crystallization and then improve the compressive strength of the roasting pellets. The results can provide a reference for the production of high-grade oxidation pellets using domestic high-grade iron ore concentrate with pure organic binder.

Key words: high-grade iron ore concentrate; organic binder; preheat roasting; consolidation mechanism

在“双碳”战略目标背景下, 钢铁行业碳减排势在必行, 而调整高炉炉料结构、提高高品质球团矿的入炉比例是炼铁工业的降碳途径之一^[1-3]。气基还原炼铁工艺已成为研究热点, 该工艺可以将氧化球团在其熔化温度以下还原成海绵铁, 产品中几乎包括氧化球团中所有脉石组分^[4]。为了提升直接还原铁产品的质量, 要求气基还原用氧化球团具有尽可能高的铁品位, 较低的有害元素含量以及较好的冶金性能^[5-6]。氧化球团制备是将离散的铁矿粉颗粒结合成较大的颗粒。在球团含水时, 由于表面张力和毛细力的作用, 矿粉聚合在一起; 但在球团干燥时, 需要在黏结剂的作用下将球团硬化来提升强度。因此, 选择适宜的黏结剂可以起到优化球团制备工艺参数、提高成品球团矿质量的作用。膨润土和有机黏结剂是目前钢铁企业生产中应用广泛的黏结剂, 能有效提高生球质量, 但膨润土的添加会降低成品球的 TFe 含量, 而有机黏结剂的添加对成品球 TFe 含量的影响微乎其微。应用纯有机黏结剂球团可以显著提高成品球 TFe 含量, 研究纯有机黏结剂球团对炼铁工艺具有重要意义^[7-10]。

目前, 研究人员研究了添加复合有机黏结剂对普通品位铁精矿球团的影响, 如: 韩风光等^[11]研究了有机黏结剂 P 替代部分膨润土对球团高温强度的影响, 认为适量有机黏结剂的添加有利于预热球、焙烧球强度的提升和球团的氧化; 杨永斌等^[12]综述了膨润土有机改性及反应机制, 得出有机黏结剂在蒙脱石和铁精矿表面吸附, 可以改善其亲水性, 有利于球团的制备; 徐晨阳等^[13]研

究了膨润土与有机黏结剂之间的相互作用, 结果表明, 对比膨润土, 有机复合黏结剂的晶层间距增加, 可以改善球团矿的还原性。然而对纯有机黏结剂应用于高品位铁精矿球团的研究相对较少, 基于已有的生产有机黏结剂球团的现状, 研究有机黏结剂对高品位铁精矿球团的固结机理, 并应用于纯有机黏结剂球团的生产很有必要。

因此, 本文以程潮现场取样的铁精矿经过实验室磨选处理后得到的高品位铁精矿为研究对象, 分析不同有机黏结剂配比对球团矿生球、成品球强度的影响, 并与膨润土作为黏结剂制备的球团性能进行对比, 采用光学显微镜和扫描电镜等手段系统评价有机黏结剂对高品位磁铁精矿球团固结机理的影响, 为生产纯有机黏结剂高品位球团矿提供技术支持。

1 原料性能及研究方法

1.1 原料性能

试验铁精矿为现场取样的程潮铁精矿, 其经过磨矿磁选处理后铁品位为 69.59%; 试验黏结剂为 JDOB-4 型有机黏结剂及印度膨润土。铁精矿和印度膨润土的主要化学成分如表 1 所示, 印度膨润土的物理性能如表 2 所示。由表 1 可见, 铁精矿的铁品位为 69.59%, 矿石中含有少量杂质, SiO₂、Al₂O₃、CaO、MgO 的质量分数分别为 1.36%、0.96%、0.59% 和 0.55%, 有害元素 S 质量分数为 0.036%。铁精矿中 > 0.045 mm、(0.037, 0.045] mm、(0.031, 0.037] mm、≤ 0.031 mm 粒级质量分数分别为 9.10%、7.75%、

表 1 铁精矿和印度膨润土的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of iron concentrates and Indian bentonite

原料名称	TFe	FeO	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	S	P	烧损
铁精矿	69.59	25.73	0.59	0.98	0.55	1.36	—	—	0.036	0.010	-2.49
印度膨润土	10.54	—	1.82	13.63	2.50	49.63	0.22	3.37	—	—	11.1

表 2 印度膨润土的物理性能

Table 2 The physical properties of Indian bentonite

<0.074 mm 粒级质量分数/%	含水量/%	吸水率/%	膨胀容/(mL·g ⁻¹)	吸蓝量/[g·(100 g) ⁻¹]
98.33	11.80	632.8	68.0	39.68

11.95%、71.20%，其 < 0.037 mm 粒级占比为 83.15%，粒度较小。试验用印度膨润土 TFe 质量分数为 10.54%，SiO₂ 及 Al₂O₃ 的质量分数分别为 49.63% 和 13.63%，< 0.037mm 粒级占比为 98.33%，吸水率和膨胀容都较高，符合造球用黏结剂的要求^[14]。

1.2 研究方法

1.2.1 生球制备试验

采用 CWO-100 型圆盘造球机在实验室进行球团制备试验，每次造球称取铁精矿 5 kg(采用 XY6000-1BF 型电子天平进行称重)，依次配加 0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30% 的 JDOB-4 型有机黏结剂，固定生球水分为 8.5% 左右，造球时间控制在 12 min；然后进行生球抗压强度测试，采用 SCQ-50 型铁矿石球团爆裂温度测定仪测试生球爆裂温度。

1.2.2 球团预热焙烧试验

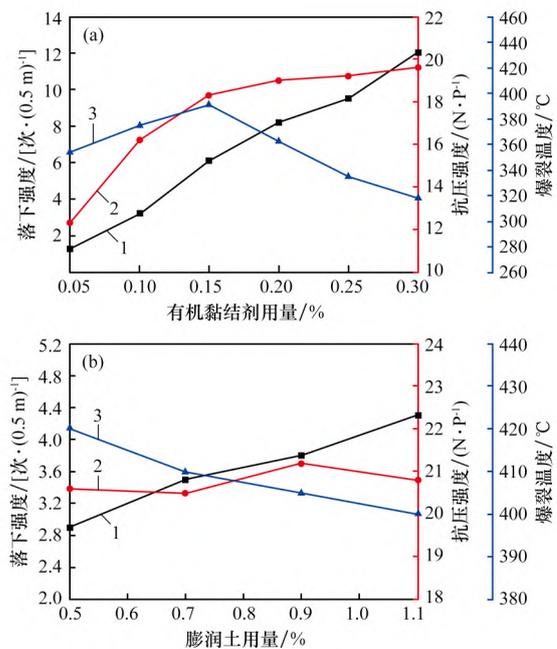
采用 CWQ-55 型管式电阻炉对干燥球团进行预热焙烧试验，每次将 10 个干燥球团放进瓷舟中，在管炉中进行球团干燥、预热、焙烧、均热、冷却等步骤。采用 HXQT-10D 型抗压强度测定仪对成品球进行抗压强度测试。成品球经过干燥、制样后，检测球团化学成分。将成品球经镶嵌制样磨抛后，采用光学显微镜及扫描电镜-能谱仪观察其微观形貌、元素种类和成分。

2 试验结果与讨论

2.1 黏结剂用量对生球性能的影响

试验研究有机黏结剂、膨润土添加量对生球落下强度、抗压强度、爆裂温度的影响，结果如图 1 所示。由图 1(a) 可见：随着有机黏结剂添加量的增加，生球的落下强度、抗压强度也逐渐增大。在有机黏结剂用量为 0.05%、0.15% 和 0.30% 时，生球的平均落下强度分别为 1.3、6.1、1.0 次/(0.5 m)。当有机黏结剂用量为 0.05%~0.15% 时，生球的抗压强度增大较快，0.15% 时

该值达到 18.3 N/P，0.15%~0.30% 时该值变化不明显。生球的爆裂温度先升高后降低，在有机黏结剂用量为 0.15% 时爆裂温度最高，为 391℃，满足实际生产对生球的质量要求。由图 1(b) 可见：随着印度膨润土用量的增加，生球的落下强度逐渐增加，抗压强度变化不明显，爆裂温度逐渐下降。在印度膨润土添加量为 1.1% 时，生球的落下强度为 4.3 次/(0.5 m)，抗压强度为 20.8 N/P，爆裂温度为 405℃，满足实际生产对生球的质量要求。



(a) 有机黏结剂; (b) 印度膨润土

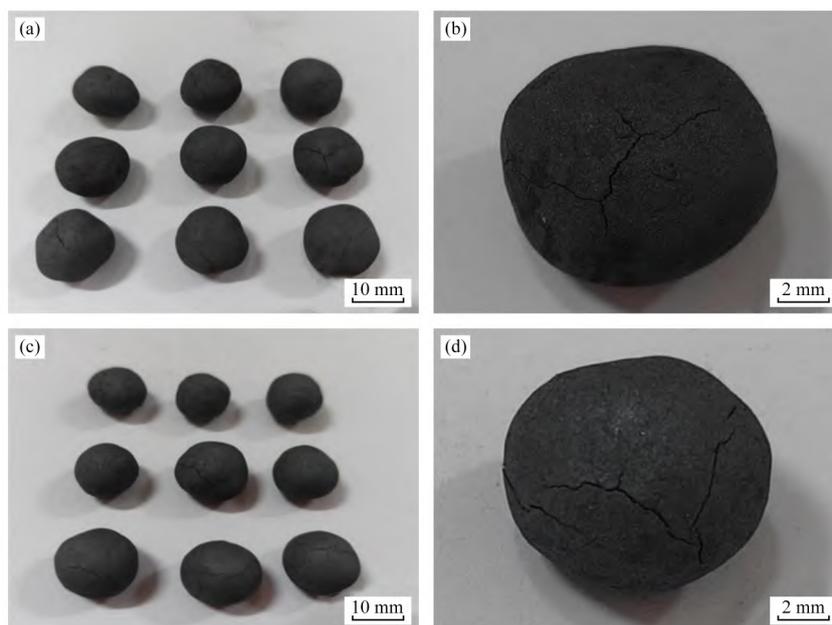
1—落下强度; 2—抗压强度; 3—爆裂温度。

图 1 有机黏结剂和印度膨润土用量对生球性能的影响

Fig. 1 The impact of organic binder and Indian bentonite dosage on the performance of green pellets

2.2 黏结剂种类对球团预热焙烧强度的影响

试验前期发现，配加 0.05% 有机黏结剂的细粒级高品位铁精矿球团在管式炉中预热焙烧后，部分表面有裂纹，试验结果如图 2 所示。球团的抗压强度较低，预热球、焙烧球的平均抗压强度分别为 273、1 977 N/P。分析原因认为，瓷舟被



(a)、(b) 预热球; (c)、(d) 焙烧球

图 2 添加 0.05% 有机黏结剂预热焙烧后球团

Fig. 2 Pellets prepared by adding 0.05% organic binder after preheating and roasting

推进管式炉中预热焙烧段时速度较快, 导致球团的升温速率过快, 使得球团在未完全氧化之前已经发生再结晶, 外壳收缩造成球团表面形成裂纹及封闭孔隙, 使得球团内部核心的氧化速率下降。后续减小瓷舟进入预热焙烧段的速度(由 5 次/min 降低为 2.5 次/min), 情况有所改善。随着有机黏结剂用量的增加, 裂纹减少。分析原因认为, 高温时有机黏结剂在球团内部分解形成孔隙, 一定程度上利于 O_2 进入球团内部促进氧化, 使得球团整体缓慢升温, 表面裂纹减少。

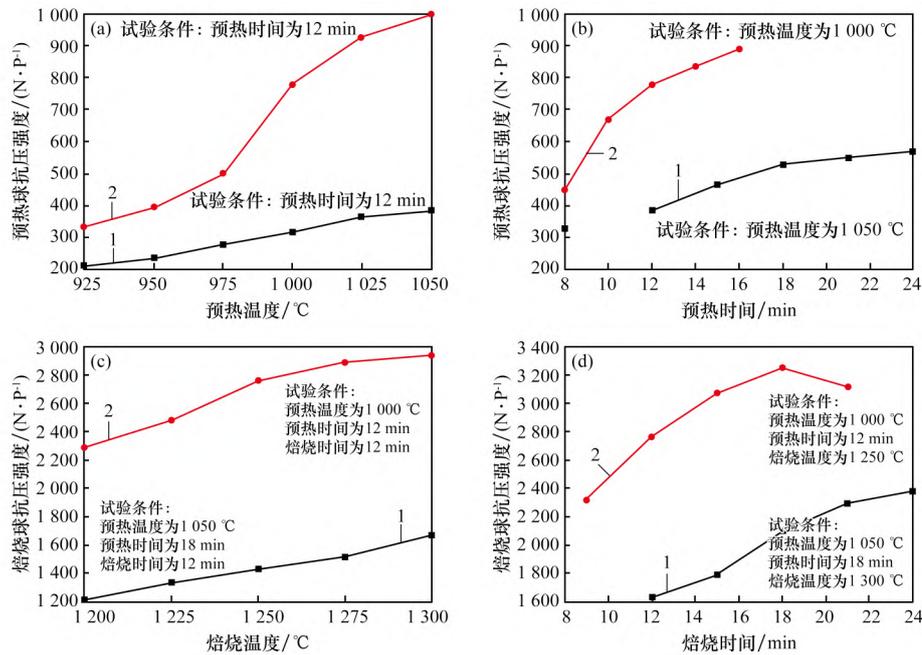
试验探究预热焙烧条件对添加 0.15% 有机黏结剂及 1.1% 印度膨润土的预热球及焙烧球抗压强度的影响, 其中有机黏结剂球团制备采用缓慢升温方式(2.5 次/min), 试验结果如图 3 所示。由图 3 可见, 固定预热时间为 12 min 条件下, 两种预热球抗压强度均随预热温度的升高而增大。其中, 有机黏结剂球团的抗压强度随温度升高的增大幅度较小; 同等预热条件下, 添加有机黏结剂球团的抗压强度要远小于印度膨润土球团。要想获得同等抗压强度, 有机黏结剂球团所需的预热焙烧时间和温度都远高于印度膨润土球团; 且随着预热焙烧制度的优化, 即使延长预热焙烧的时间和提高温度, 添加有机黏结剂球团的抗压强度

也无法达到添加印度膨润土球团的强度。添加 0.15% 有机黏结剂球团适宜的预热焙烧制度: 预热温度为 1 050 $^{\circ}C$ 、预热时间为 18 min、焙烧温度为 1 300 $^{\circ}C$ 、焙烧时间为 21 min, 此条件下焙烧球抗压强度为 2 290 N/P。添加 1.1% 印度膨润土球团适宜的预热焙烧制度: 预热温度为 1 000 $^{\circ}C$ 、预热时间为 12 min、焙烧温度为 1 250 $^{\circ}C$ 、焙烧时间为 18 min, 此条件下焙烧球抗压强度为 3 249 N/P。

试验继续探究在最佳预热焙烧条件下, 添加不同配比有机黏结剂对成品球抗压强度的影响, 试验结果如表 3 所示。由表 3 可见, 随着有机黏结剂用量的增加, 成品球的抗压强度先增大, 后减小。添加适宜的有机黏结剂可以提高成品球的抗压强度, 但有机黏结剂添加量过多时情况相反。当有机黏结剂添加量为 0.05% 时, 成品球的抗压强度为 2 479 N/P, 比前期试验预热段未减缓升温速度的球团抗压强度提升 502 N/P。

2.3 成品球化学成分

添加 0.15% 有机黏结剂及 1.1% 印度膨润土成品球的主要化学成分如表 4 所示。由表 4 可见, 添加 0.15% 有机黏结剂成品球的 TFe、 SiO_2 、 Al_2O_3 质量分数分别为 67.81%、1.49%、1.08%; 添加 1.1% 印度膨润土成品球的 TFe、 SiO_2 、 Al_2O_3



(a) 预热温度; (b) 预热时间; (c) 焙烧温度; (d) 焙烧时间

1—有机黏结剂球团; 2—印度膨润土球团。

图 3 预热焙烧条件对球团抗压强度的影响

Fig. 3 Effects of preheating and roasting conditions on the compressive strength of pellets

表 3 有机黏结剂用量对成品球抗压强度的影响

Table 3 The impact of organic binder dosage on the compressive strength of finished pellets

有机黏结剂 用量/%	成品球抗压 强度/(N·P ⁻¹)	有机黏结剂 用量/%	成品球抗压 强度/(N·P ⁻¹)
0.05	2 479	0.20	2 116
0.10	2 558	0.25	1 988
0.15	2 290	0.30	1 904

质量分数分别为 67.37%、1.83%、1.19%; 有机黏结剂球团的 TFe 质量分数比膨润土球团高 0.44%, SiO₂ 质量分数比膨润土球团低 0.34%。根据现有研究可知,降低球团矿 SiO₂ 含量,有利于提高球团矿品位,改善冶金性能^[15];但同时,铁精矿及膨润土中 SiO₂ 以及 Al₂O₃ 等成分可以与铁氧化物反应生成低熔点液相进而促进固相扩散以及赤铁矿连晶,适宜的 SiO₂ 以及 Al₂O₃ 含量有

表 4 成品球的主要化学成分(质量分数)

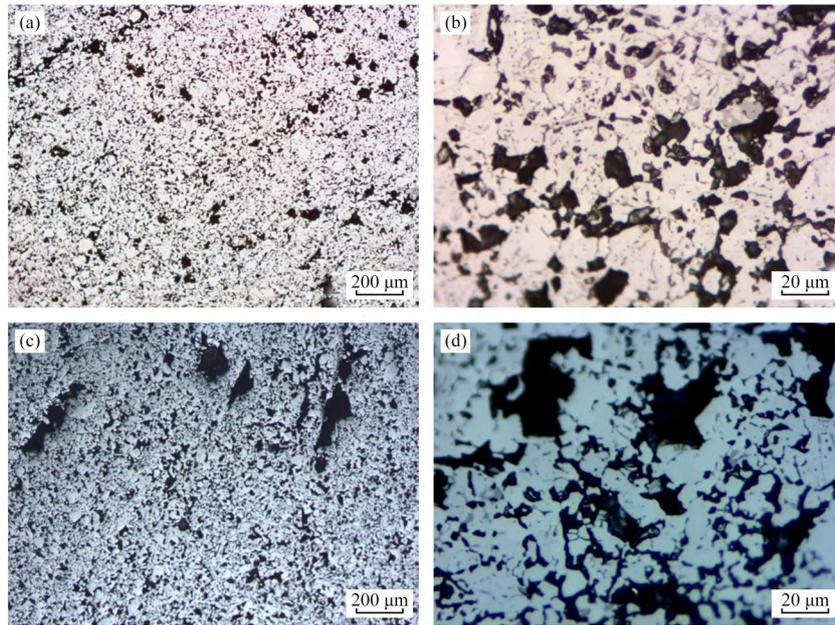
Table 4 Main chemical composition of finished pellets

球团种类	TFe	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	P
有机黏结剂球团	67.81	0.79	0.74	0.63	1.49	1.08	0.008	0.006
印度膨润土球团	67.37	0.88	0.83	0.65	1.83	1.19	0.006	0.004

利于提高成品球抗压强度。而本文试验采用纯有机黏结剂及高品位磁铁精矿制备有机黏结剂球团,铁精矿自身含有的 SiO₂ 及 Al₂O₃ 等影响成品球铁品位的成分含量较少,有机黏结剂也不含有这些成分,导致生球质量合格的有机黏结剂焙烧球的抗压强度相比膨润土球团的低。

2.4 配加不同黏结剂球团的微观结构

为了阐明有机黏结剂对球团固结的影响,试验分析成品球的显微结构,并使用 ImageJ 软件统计不同物相的灰度特征值,计算得出成品球的孔隙度。得到添加不同黏结剂球团在光学显微镜下的矿相显微结构如图 4 所示。由图 4 可知:添加 1.1% 印度膨润土的球团,赤铁矿分布均匀,连晶较好,孔隙率(13.58%)较低,球团抗压强度较高;添加 0.15% 有机黏结剂的球团,赤铁矿连晶相对较差,且球团内部存在较大孔洞,孔隙率为



(a)、(b) 1.1% 印度膨润土; (c)、(d) 0.15% 有机黏结剂

图 4 有机黏结剂配比对成品球微观形貌的影响

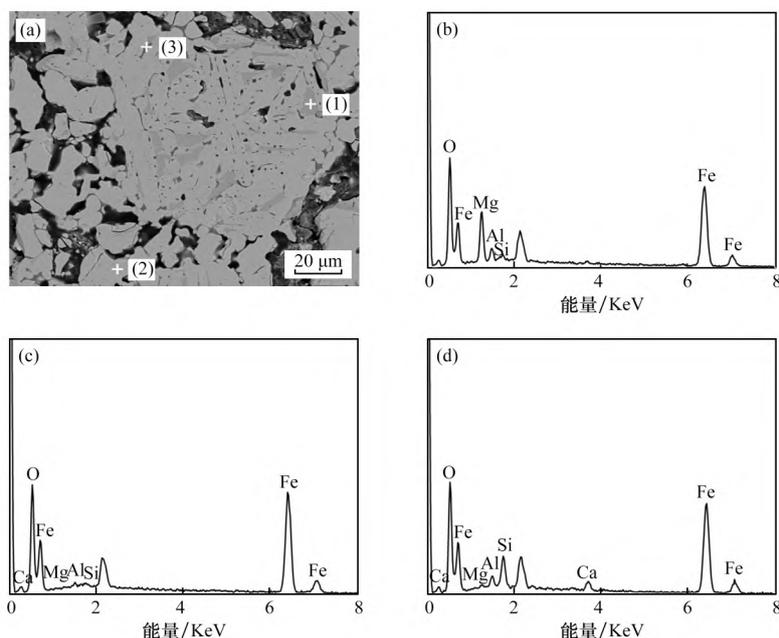
Fig. 4 The influence of organic binder ratio on the microscopic morphology of finished pellets

18.32%，其焙烧球抗压强度小于添加 1.1% 印度膨润土的球团。由于有机黏结剂的热分解作用，球团内部孔洞数量增加，可以为氧气进入内部提供更多通道，使得磁铁矿氧化速度加快、赤铁矿连晶进程加快，使赤铁矿区域逐渐连接成片，这在一定程度上可以提升球团强度。但有机黏结剂添加量过多也会导致球团内部孔洞进一步扩大，过大的孔洞对成品球抗压强度造成的消极影响大于赤铁矿连晶带来的提升，从而导致成品球抗压强度降低。由图 4 (b)、(d) 可以看出，膨润土球团中脉石含量较高，分布比较均匀，有机黏结剂球团中脉石含量较少，分布不均匀且球团内部结构更加松散，所以膨润土焙烧球的抗压强度较高。

配加 0.15% 有机黏结剂球团的 SEM-EDS 分析结果如图 5 所示。当有机黏结剂(JDOB-4)添加量为 0.15% 时，图 5(a) 球团中心区域赤铁矿晶体之间的连接较为紧密并伴随铁酸盐液相局部富集特征，此类液相分布均匀可以有效填充赤铁矿晶粒之间的空隙，使得球团的孔隙率下降、微观结构更加致密化，有利于提高成品球团的抗压强度。但球团中有机黏结剂分解会产生气体，这部分气体逸出使得球团内的孔洞量增多，孔隙率变大，恶化晶粒之间的连接；图 5(a) 周围区域赤铁矿晶

粒之间的连接较为松散，且晶粒大小分布不均，降低了球团的抗压强度。在球团矿制备中，添加适量的有机黏结剂有利于球团内部液相转移，促进赤铁矿晶粒之间互相连接，增大球团的抗压强度，但有机黏结剂添加量过多会导致球团内部气孔变多，孔隙率变大，赤铁矿连晶变差，进而导致球团的抗压强度下降。

纯有机黏结剂及膨润土应用于细粒级高品位磁铁精矿球团矿制备，其氧化固结方式均主要为磁铁矿的氧化、赤铁矿结晶、赤铁矿晶粒长大连接形成连晶，该氧化固结过程会使得球团的抗压强度得到明显提升。在生球制备中添加适量的有机黏结剂，在球团焙烧过程中，有机黏结剂在高温下分解会形成孔隙。少量的孔隙有利于球团内部生成的液相转移，可以促进赤铁矿连晶，一定程度上有利于球团抗压强度的提高。但当有机黏结剂添加量过多时，其在高温下分解产生的气体外溢会导致球团的孔隙率变得过大，球团内部形成了高孔隙度、疏松的微观结构，其对成品球质量产生的负面影响大于正面影响，导致球团抗压强度下降。因此，在配加较多有机黏结剂用量条件下，需要提高焙烧温度、延长焙烧时间来促进赤铁矿生成并产生连晶，进而提高成品球的抗压强度。



(a) SEM 图像; (b) 点 1 处 EDS 结果; (c) 点 2 处 EDS 结果; (d) 点 3 处 EDS 结果

图 5 添加 0.15% 有机黏结剂球团的 SEM 图像和 EDS 分析

Fig. 5 SEM Image and EDS analysis of sample pellets with the addition of 0.15% organic binder

3 结论

(1) 添加 0.15% 有机黏结剂时的生球质量指标与添加 1.1% 印度膨润土时的指标接近, 落下强度为 6.1 次/(0.5 m), 抗压强度为 18.3 N/P, 爆裂温度为 391 °C。

(2) 添加有机黏结剂的球团需要提高预热焙烧温度并延长预热焙烧时间来提升焙烧球团的抗压强度, 且随着预热焙烧制度的优化, 即使延长预热焙烧的时间和提高温度, 添加有机黏结剂球团的成品球抗压强度也无法达到添加印度膨润土球团的强度。添加 0.15% 有机黏结剂球团在预热温度为 1 050 °C、预热时间为 18 min, 焙烧温度为 1 300 °C、焙烧时间为 21 min 的预热焙烧条件下, 焙烧球的抗压强度为 2 290 N/P。添加 1.1% 印度膨润土的球团在预热温度为 1 000 °C、预热时间为 12 min、焙烧温度为 1 250 °C、焙烧时间为 18 min 的预热焙烧条件下, 焙烧球的抗压强度为 3 249 N/P。

(3) 随着有机黏结剂用量的增加, 球团内部孔洞增多, 孔隙扩大, 对成品球抗压强度造成的消极影响大于赤铁矿连晶带来的提升。高孔隙度、疏松的微观结构, 会阻碍赤铁矿连晶, 导致球团

的抗压强度降低, 需要提高焙烧温度、延长焙烧时间来促进赤铁矿连晶。

参考文献:

- [1] 王新东, 金永龙. 高炉使用高比例球团的战略思考与球团生产的试验研究[J]. 钢铁 2021, 56(5): 7-16.
WANG Xindong, JIN Yonglong. Strategy analysis and testing study of high ratio of pellet utilized in blast furnace[J]. Iron & Steel 2021, 56(5): 7-16.
- [2] 孙健宁, 刘小杰, 严照照, 等. 不同含量 SiO₂ 对邯鄹球团质量的影响[J]. 矿产综合利用 2021(1): 118-123.
SUN Jianning, LIU Xiaojie, YAN Zhaozhao, et al. Effect of different contents of SiO₂ on the quality of pellets of Hansteel[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources 2021(1): 118-123.
- [3] 潘向阳, 龙跃, 李神子, 等. w(MgO) 对熔剂性球团冶金性能的影响[J]. 钢铁 2019, 54(10): 17-22.
PAN Xiangyang, LONG Yue, LI Shenzi, et al. Effect of w(MgO) on metallurgical properties of flux pellets[J]. Iron & Steel 2019, 54(10): 17-22.
- [4] 杨富廷. 基于“双碳”背景的钢铁企业节能低碳发展技术路径探析[J]. 山东冶金 2023, 45(4): 51-55; 62.

- YANG Futing. Analysis of energy-saving and low-carbon development technology path of iron and steel enterprises based on the background of "double carbon" [J]. Shandong Metallurgy 2023 45(4):51-55;62.
- [5] 张颖,王莹,查松妍,等. 钢铁行业氢冶金技术路线及发展现状[J]. 烧结球团 2023 48(4):8-15;23. ZHANG Ying, WANG Ying, ZHA Songyan, et al. Hydrogen metallurgy technology routes and development status of iron and steel industry [J]. Sintering and Pelletizing 2023 48(4):8-15;23.
- [6] 魏炜,周佃民. "双碳"目标下我国钢铁工业发展现状与展望[J]. 中国能源 2023 45(增刊1):59-66. WEI Wei, ZHOU Dianmin. Current situation, development and prospect of China's iron and steel industry based on carbon peak and carbon neutrality goals [J]. Energy of China 2023 45(Suppl 1):59-66.
- [7] 嵇建国,杨群,谢永生. 新型有机黏结剂在球团生产中的应用[J]. 烧结球团 2011 36(5):30-33. JI Jianguo, YANG Qun, XIE Yongsheng. Application of new type of organic binder in pellet production [J]. Sintering and Pelletizing 2011 36(5):30-33.
- [8] 侯恩俭,翁兴洋,范晓慧. 纤维化复合膨润土强化氧化球团制备研究[J]. 烧结球团 2019 44(4):40-44. HOU Enjian, WENG Xingyang, FAN Xiaohui. Study on strengthening preparation of oxide pellets with fibration composite bentonite [J]. Sintering and Pelletizing 2019, 44(4):40-44.
- [9] KOTTA A B, PATRA A, KUMAR M, et al. Effect of molasses binder on the physical and mechanical properties of iron ore pellets [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials 2019 26(1):41-51.
- [10] 陆帅帅,袁致涛,刘炯天,等. 有机黏结剂强化铁精矿的成球性能[J]. 东北大学学报(自然科学版) 2017, 38(6):849-853. LU Shuaishuai, YUAN Zhitao, LIU Jiongtian, et al. Binding and strengthening mechanisms of organic binders on the magnetite concentrate in pelletization [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(6):849-853.
- [11] 韩凤光,杨涛,赵贺喜,等. 复合黏结剂对球团高温固结的影响及机理[J]. 工程科学学报 2023 45(9):1450-1458. HAN Fengguang, YANG Tao, ZHAO Hexi, et al. Effects and mechanism of composite binder on high-temperature consolidation of pellets [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023 45(9):1450-1458.
- [12] 杨永斌,段倩倩,李骞,等. 铁矿球团膨润土黏结剂提质改性研究进展[J]. 钢铁研究学报 2022 34(2):101-110. YANG Yongbin, DUAN Qianqian, LI Qian, et al. Research progress on upgrading modification of iron ore pellet bentonite binder [J]. Journal of Iron and Steel Research 2022 34(2):101-110.
- [13] 徐晨阳,张建良,刘征建,等. 有机复合黏结剂特性表征及对球团矿性能的影响[J]. 钢铁研究学报 2021, 33(11):1154-1160. XU Chenyang, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Characterization of organic composite binder and its influence on properties of pellets [J]. Journal of Iron and Steel Research 2021 33(11):1154-1160.
- [14] 韦东,胡钺,胡梦杰,等. 不同种类膨润土对球团性能影响的试验与应用[J]. 烧结球团 2023 48(2):52-60. WEI Dong, HU Yue, HU Mengjie, et al. Experiment and application of effect of different types of bentonite on performance of pellets [J]. Sintering and Pelletizing, 2023 48(2):52-60.
- [15] 孙广伟,李娜,张利飞,等. 球团矿降低二氧化硅生产实践[J]. 云南化工 2019 46(6):84-85;88. SUN Guangwei, LI Na, ZHANG Lifei, et al. Production practice of pellet reduction of silica in Anyang Yuhe Company [J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46(6):84-85;88.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。