

## 不同粒度条件下铁矿球团性能及工艺条件优化

韩 涛<sup>a</sup>, 杨大兵<sup>b</sup>, 王 炜<sup>c</sup>, 黄渝茜<sup>a</sup>

( 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;  
c. 材料与冶金学院, 湖北 武汉 430081)

**摘要:** 为降低铁矿球团干燥过程的生产成本, 加快成球速度, 促进大球团形成, 提升球团的综合性能, 本文以 10 ~ 12、12 ~ 14、14 ~ 16 mm 和 16 ~ 18 mm 这四种粒度范围的球团为研究对象, 探索粒度大小对球团性能及工艺条件的影响。结果表明: 增大球团粒度需要更高的造球水分和更长的造球时间, 并且生球的落下强度和抗压强度显著提升; 随着球团粒度的增大, 预热球内部颗粒的排列更加规整, 成品球内部的固相占比增加, 气孔减小, 晶体连接更好, 致密性提高, 预热球和成品球的抗压强度均增大; 球团粒度不宜高于 16 mm, 当粒度提高至 16 ~ 18 mm 时, 还原膨胀指数由 11.6% 降低至 9.7%, 还原度指数由 70.7% 降低至 54.5%, 还原度变差; 铁精矿的轻度干燥或免干燥有助于提高球团粒度, 大幅降低生球中 < 12 mm 粒级的占比, 提升 12 ~ 16 mm 粒级占比, 使生球的粒度分布更均匀。因此, 在球团生产中将粒度控制在 12 ~ 16 mm, 既能节省干燥成本, 又能获得更好的球团性能指标, 为后续高炉冶炼提供更多优质炉料。

**关键词:** 球团工艺; 粒度; 生球性能; 冶金性能; 矿相结构; 干燥成本

中图分类号: TF046.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0078-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.044

## Optimization of iron ore pellet performance and process conditions under different particle size conditions

HAN Tao<sup>a</sup>, YANG Dabing<sup>b</sup>, WANG Wei<sup>c</sup>, HUANG Yuqian<sup>a</sup>

( 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; c. Institute of Materials and Metallurgy, Wuhan 430081, Hubei, China)

**Abstract:** In order to reduce the production cost of iron ore pellets drying process, accelerate the pelletization speed, promote the formation of large pellets, and improve the comprehensive performance of pellets, the pellets in the range of 10 ~ 12, 12 ~ 14, 14 ~ 16 mm and 16 ~ 18 mm are taken as the research objects to explore the influence of particle size on pellets performance and process conditions. The results show that increasing the particle size of the pellets requires higher pelletizing moisture and longer pelletizing time, and the falling strength and compressive strength of the fresh pellets are significantly improved. With the increase of pellets size, the arrangement of particles inside the preheating pellets is more regular, the proportion of solid phase inside the finished pellets increases, the porosity decreases, the crystal connection is better, the compactness is improved, and the compressive strength of the preheating pellets and the finished pellets increases. The particle size of pellets should not be higher than 16 mm, when the particle size is increased to 16 ~ 18 mm, the reduction expansion index decreases from 11.6% to 9.7%, and the reduction index decreases from 70.7% to 54.5%.

收稿日期: 2024-12-11; 修回日期: 2025-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974212)

作者简介: 韩 涛(1998—), 男, 硕士研究生, 从事铁矿球团质量方面的研究。

通信作者: 杨大兵(1965—), 男, 教授, 从事矿物加工、铁矿球团黏结剂方面的研究。

and the reduction degree becomes worse. Mild drying or non-drying of iron ore concentrate can help to improve the particle size of pellets greatly reduce the proportion of < 12 mm particle size in fresh pellets increase the proportion of 12 ~ 16 mm particle size and make the particle size distribution of green pellets more uniform. Therefore, controlling the particle size at 12 ~ 16 mm in pellets production can not only save drying costs, but also obtain better pellets performance indexes, and provide more high-quality charges for subsequent blast furnace smelting.

**Key words:** pelletizing process; particle size; green pellets performance; metallurgical properties; mineral phase structure; drying costs

在“双碳”战略目标背景下,提高球团矿的入炉比是符合我国铁矿资源禀赋和现实国情的一项极具发展潜力的策略<sup>[1]</sup>。提高球团矿的入炉比可以显著提提高炉原料的综合品位、降低燃料消耗和渣量,进而降低炼铁过程的CO<sub>2</sub>及污染物排放,是实现低碳绿色炼铁的重要支撑和关键技术途径之一<sup>[2-3]</sup>。就铁矿烧结和球团工序而言,球团工序的能源消耗不到烧结工序的1/2<sup>[4]</sup>;从烟气排放量来看,球团生产一般为1 300 m<sup>3</sup>/t,而烧结生产为4 000 m<sup>3</sup>/t,此外,球团工序的碳排放量仅为烧结工序的20%~45%<sup>[5-6]</sup>。

在高炉冶炼中,如果球团的粒度过大,其传热和传质速率将降低,使得球团内部不易发生完全反应;粒度过小则对料层透气性产生较大影响,进而影响球团矿的干燥、预热、焙烧和冷却速率及高炉冶炼指标<sup>[7-8]</sup>。研究人员研究了粒度与球团氧化程度之间的关系,如韦东等<sup>[9]</sup>对利比里亚邦精矿复合造块工艺的研究表明,当球团粒度为8~10 mm时,该精矿的烧结性能显著提高;浦舟等<sup>[10]</sup>对磁铁矿球团氧化反应的数值模拟的研究表明,球团粒度越大,其氧化效果越差,获得的最佳球团粒度范围为8~12 mm;徐礼兵<sup>[11]</sup>对氧化球团制备的试验表明,球团达到给定氧化程度所需的时间与其粒度的二次方成正比。杨金保等<sup>[12]</sup>通过探究氧化球团粒度与能源消耗的关系,发现适宜的球团粒度有助于降低工序能耗。DWARAPUDI等<sup>[13]</sup>研究了粒度对铁矿球团质量和微观结构的影响,发现10.0~12.5 mm粒度球团的物理和冶金

性能较好。李振铠等<sup>[14]</sup>研究了粒度对熔剂性球团冶金性能的影响,结果表明,10~16 mm粒度的球团的抗压强度较好,熔滴性能较为优秀,综合性能最佳。综上可知,8~12 mm为多数研究人员推荐的最佳粒度范围,该条件平衡了氧化效率及能源消耗;10~16 mm粒度球团的冶金性能表现较为突出。

上述研究均是针对某一生产阶段球团的最佳粒度,未考虑整个工艺阶段,因此本文从造球阶段开始并结合球团的冶金性能进行研究,以此探寻整个阶段适宜的球团粒度范围。试验以10~12、12~14、14~16 mm和16~18 mm这四种不同粒度范围的球团为研究对象,分析探讨增大球团粒度对球团性能及工艺条件的影响,重点研究工艺条件变化对不同粒度球团指标的影响,以期提升球团粒度分布的均匀性,降低干燥成本,改善球团性能,为优化球团矿生产提供一定参考。

## 1 试验原料与方法

### 1.1 试验原料

试验所用原料为程潮铁精矿和辽宁膨润土,其主要化学成分如表1所示,膨润土的物理性能如表2所示。由表1可知,程潮铁精矿的TFe和FeO质量分数最高,分别达到了66.19%和26.79%;辽宁膨润土中SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数为57.78%、14.23%。由表2可知,该种膨润土的2 h吸水率为404.50%,蒙脱石质量分数达到了89.37%,属于较优质的膨润土。

表1 铁精矿和膨润土主要化学成分与烧损(质量分数)

原料名称	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P	S	烧损
程潮铁精矿	66.19	26.79	2.37	0.83	1.08	1.10	—	—	0.006	0.22	-1.88
辽宁膨润土	2.68	—	57.78	14.23	3.55	2.31	1.79	2.87	—	—	13.11

表 2 膨润土物理性能

Table 2 Physical properties of bentonite

吸蓝量/[g·(100 g) <sup>-1</sup> ]	胶质价/[mL·(15 g) <sup>-1</sup> ]	膨胀容/(mL·g <sup>-1</sup> )	2 h 吸水率/%	蒙脱石质量分数/%
39.50	101.30	19.00	404.50	89.37

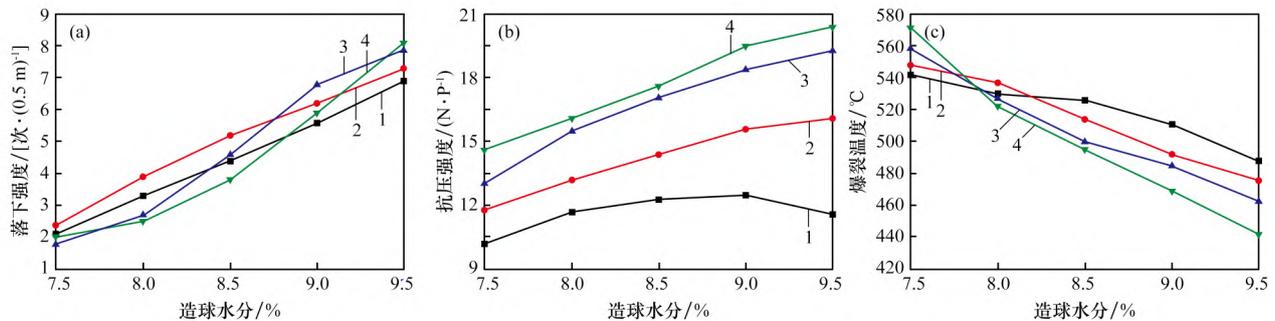
## 1.2 试验方法

每次在实验室称取 4 kg 铁精矿, 配加一定比例膨润土后混合均匀, 在  $\varnothing 800$  mm 的圆盘造球机 (转速为 24 r/min、倾角为 47°) 中进行造球试验。密实时间控制在 2 min, 造球粒径分别控制在 10 ~ 12、12 ~ 14、14 ~ 16 mm 和 16 ~ 18 mm。采用单一变量法分别探究在不同造球水分、造球时间以及膨润土配比下四种不同粒度生球的落下强度、抗压强度及爆裂温度的变化, 并分析造球工艺条件变化对生球粒度分布的影响。

将制备好的四种不同粒度的生球在烘箱中烘干水分, 干燥后在卧式管炉中进行预热焙烧试验。设定不同的预热焙烧条件, 冷却后采用智能球团压力机测定球团抗压强度, 以分析不同粒度预热球和成品球的抗压强度变化趋势; 之后, 对预热球进行光学显微观察, 并对成品球进行 XRD 和扫描电镜分析, 以探究高温条件下提高粒度对预热球和成品球矿相结构的影响, 以及不同粒度球团的固结机理; 进一步地, 对不同粒度的成品球进行冶金性能检测, 包括还原膨胀指数和 3 h 还原度的测定; 最后进行经济性分析, 以估算提高球团粒度对整体干燥成本的影响。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 造球工艺对生球性能及粒度分布的影响



(a) 落下强度; (b) 抗压强度; (c) 爆裂温度

粒度组成/mm: 1—10~12; 2—12~14; 3—14~16; 4—16~18。

图 1 造球水分对生球性能的影响

Fig. 1 Effect of pelletizing moisture on raw ball performance

### 2.1.1 造球水分对生球性能的影响

在造球时间为 10 min、膨润土配比为 1.8% 的条件下, 试验研究造球水分对生球性能的影响, 结果如图 1 所示。由图 1 可以看出, 随着造球水分的提高, 四种不同粒度生球的落下强度均在不断增强, 12 ~ 14、14 ~ 16 mm 和 16 ~ 18 mm 粒度生球的抗压强度逐渐提高, 10 ~ 12 mm 粒度生球的抗压强度则呈现先升后降的趋势, 同时各粒度生球的爆裂温度均呈下降趋势。由图 1(a)、(c) 可知: 当造球水分较低时, 粒度较小的生球展现出较高的落下强度和较低的爆裂温度; 当造球水分增加时, 生球的落下强度随粒度的增大而逐渐提高, 爆裂温度则相应降低。这一现象的成因在于, 低水分条件下较小粒度生球内物料颗粒之间的毛细作用相对较强、内部空隙较少、内部蒸汽压较大, 使得落下强度较高, 爆裂温度较低; 当造球水分逐渐提高后, 粒度较小的生球内部水分达到过饱和状态, 多余的水分转化为重力水, 减弱了矿粉颗粒之间的表面作用力, 润滑作用愈发显著, 导致其抗压强度开始下降, 如图 1(b) 所示; 而粒度较大的生球需要更多的水分以增强颗粒之间的结合力, 其结构更加紧实, 从而提高了生球的落下强度和抗压强度。但因粒度较大, 短时间内水分不能及时蒸发排出, 导致内外压差增大, 进而降低了生球的爆裂温度。

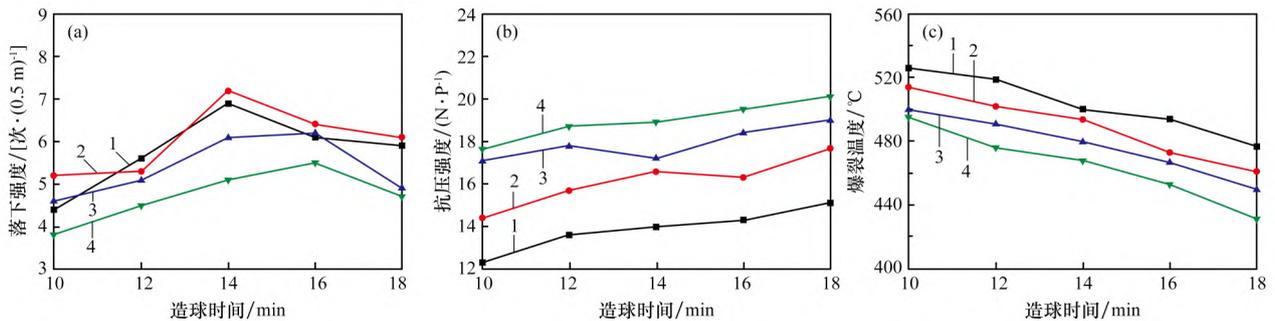
### 2.1.2 造球时间对生球性能的影响

鉴于实验室造球过程中造球水分较高时易出现严重的粘料问题,故将造球水分控制在8.5%,维持膨润土配比为1.8%,进行造球时间对生球性能的影响试验。试验结果如图2所示。由图2可知,随着造球时间的增加,各粒度生球的抗压强度均逐渐提高,生球的爆裂温度则呈下降趋势,10~12 mm和12~14 mm生球的落下强度在造球时间超过14 min后开始下降,而14~16 mm和16~18 mm生球的落下强度则在16 min时开始降低,这是因为随着造球时间的延长,生球在造球盘中滚动使得颗粒间黏结更加紧密,生球的孔隙率降低,物料颗粒之间的相互作用增强,故各粒度生球的落下强度和抗压强度逐渐提升。然而,当进一步延长造球时间时,颗粒之间的紧密程度过高,孔隙逐渐减小,毛细作用减弱,限制了内部水蒸气的扩散,导致落下强度和爆裂温度降低,而粒度较大的生球内部颗粒之间的黏结作用增长

较慢,因此需要更长的造球时间以达到最佳的强度水平。

### 2.1.3 膨润土对比对生球性能的影响

在8.5%的造球水分和12 min的造球时间条件下,进行膨润土对比对生球性能的影响试验。试验结果如图3所示。由图3可知,随着膨润土配比的逐渐增加,各粒度生球的落下强度和抗压强度均呈上升趋势,生球的爆裂温度则先升高后下降。由于膨润土具有高分散度和较好的吸水性,生球内部的毛细力及颗粒之间的黏结作用增强,减缓了水分蒸发带来的内部压力,进而提升了生球的强度和爆裂温度;而当膨润土的用量超过一定值时,生球内部颗粒之间的透气性开始降低,导致生球爆裂温度降低。就粒度而言,随着生球粒度的提高,膨润土配比的增加对生球的落下强度和抗压强度的提升效果愈发明显,尽管过高的膨润土用量会导致爆裂温度下降,但生球的整体性能仍符合生产要求。

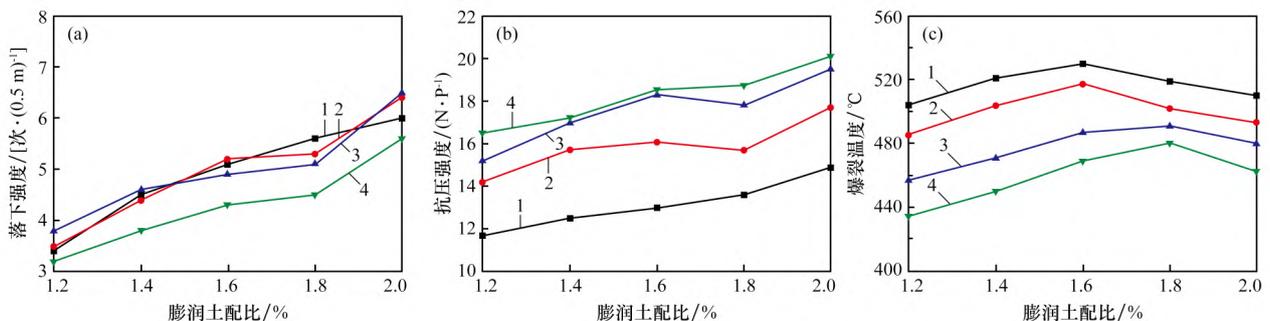


(a) 落下强度; (b) 抗压强度; (c) 爆裂温度

粒度组成/mm: 1—10~12; 2—12~14; 3—14~16; 4—16~18。

图2 造球时间对生球性能的影响

Fig. 2 Effect of pelleting time on performance of raw ball



(a) 落下强度; (b) 抗压强度; (c) 爆裂温度

粒度组成/mm: 1—10~12; 2—12~14; 3—14~16; 4—16~18。

图3 膨润土对比对生球性能的影响

Fig. 3 Effect of bentonite ratio on performance of raw ball

### 2.1.4 造球水分对生球粒度组成的影响

在造球过程中,造球水分是决定生球粒度的主要因素,因此试验固定造球时间为 14 min、膨润土配比为 1.8%,在保证生球强度的同时,对造球结束后得到的所有生球进行不同粒度筛分,分析造球水分由 8.5% 提升至 9.5% 后各粒级球团的占比情况。试验结果如表 3 所示。由表 3 可以看出: <12 mm 粒级球团质量分数由 60.76% 下降至 16.96%,降低了 43.8 个百分点; 12~16 mm 粒级球团质量分数由 34.93% 提升至 70.39%,提高了 35.46 个百分点; >16 mm 粒级球团质量分数提高了 8.34 个百分点。相比造球水分增加之前,>12 mm 粒级球团质量分数显著提高,球团粒度分布也更均匀。

## 2.2 不同粒度球团抗压强度的变化规律

### 2.2.1 预热条件对球团抗压强度的影响

不同预热时间(固定预热温度为 950 °C)和预热温度(固定预热时间为 15 min)对预热球抗压强度的影响如图 4 所示。由图 4 可知:随着预热时间的延长和预热温度的升高,不同粒度预热球的抗压强度均在上升;此外,粒度较大的球团在预热过程中抗压强度的提升更为显著。主要是因为预热时间和预热温度的提高促进了球团内部 FeO

的氧化程度,使得内部颗粒之间结合更加紧实。随着球团粒度的提高,内部颗粒分布趋于均匀,颗粒之间的孔隙大小适中,有利于预热过程中热量的均匀传递,促使球团内部结构变化的一致性。同时,适宜的孔隙率不仅有助于内部气体的排出,还能使颗粒之间有足够的接触点和结合力,使得预热球的整体抗压强度增大。

### 2.2.2 不同粒度预热球的微观结构

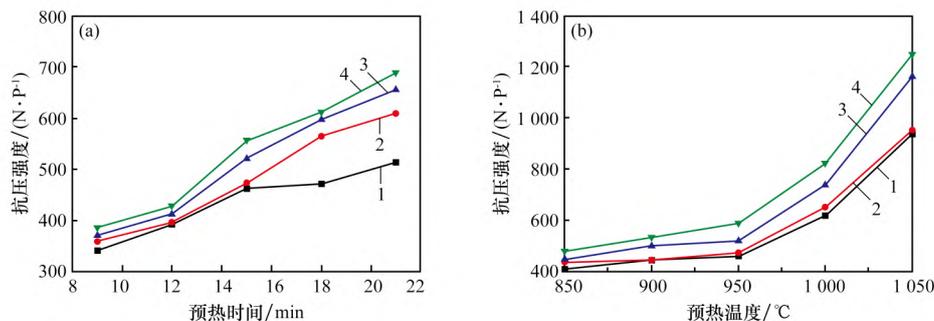
图 5 展示了在 950 °C 下预热 15 min 的条件下不同粒度球团的光学显微图像。由图 5 可以观察到,随着球团粒径由 10~12 mm 提高至 16~18 mm,球团内部颗粒之间排列的规整性逐渐增强,孔隙分布变得更加均匀适中,这种结构特征更有利于预热过程中热量的有效传递,确保了球团内部结构的均匀变化;同时,在相同的预热温度下,较大粒度的球团为黏结剂与颗粒之间的相互融合和黏结提供了更为充足的时间和空间,使得整个球团内部结构更加紧实稳固,这一结构上的变化直接提升了预热球的整体抗压强度。

### 2.2.3 焙烧条件对成品球抗压强度的影响

在预热温度为 950 °C 和预热时间为 15 min 条件下,分别考察焙烧时间(固定焙烧温度为 1 250 °C)和焙烧温度(固定焙烧时间为 15 min)对

表 3 造球水分对生球粒度分布的影响(质量分数)

造球水分	粒度组成						%
	≤10 mm	(10,12] mm	(12,14] mm	(14,16] mm	(16,18] mm	>18 mm	
8.5	24.27	36.49	22.38	12.55	3.77	0.54	
9.5	2.11	14.85	41.59	28.80	10.03	2.62	

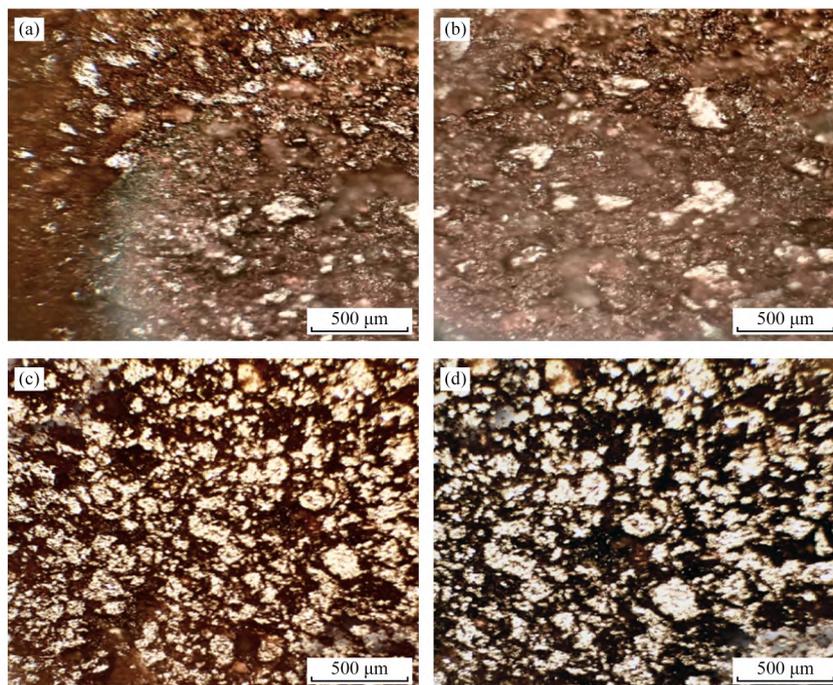


(a) 预热时间; (b) 预热温度

粒度组成/mm: 1—10~12; 2—12~14; 3—14~16; 4—16~18。

图 4 预热时间与预热温度对球团抗压强度的影响

Fig. 4 Influence of preheating time and preheating temperature on compressive strength of pellets



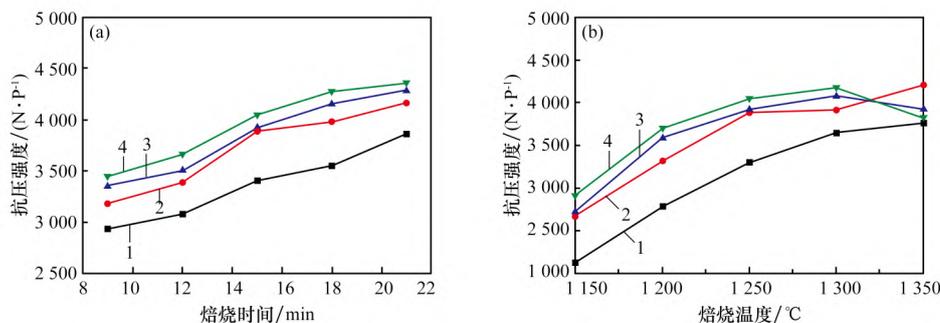
粒度组成/mm: (a) 10 ~ 12; (b) 12 ~ 14; (c) 14 ~ 16; (d) 16 ~ 18

图 5 不同粒度预热球的微观图像

Fig. 5 Microscopic images of preheated pellets with different particle sizes

成品球抗压强度的影响。试验结果如图 6 所示。由图 6(a) 可以看出, 焙烧时间的延长与成品球抗压强度的提升之间存在正相关关系, 且这一增强效应在较大粒度的球团中更为突出。这一现象归因于: 球团粒度的增大, 改善了球团内部的透气性, 促进了焙烧过程中热量传递的均匀性, 从而提高了球团的抗压强度。从图 6(b) 可以进一步看出, 对于 10 ~ 12 mm 和 12 ~ 14 mm 粒度的成品球, 其抗压强度随着焙烧温度的升高而持续增加, 而 14 ~ 16 mm 和 16 ~ 18 mm 粒度的成品球抗压强度

则呈现出先上升后轻微下降的趋势, 这是因为焙烧温度的升高加速了磁铁矿的氧化过程, 促进了赤铁矿晶粒的生长, 使得球团强度得到增强。但当温度过高时, 较大粒度球团的内部边缘开始生成大量液相, 阻碍了晶粒之间的有效连接, 并在球团内部形成“铁帽”现象, 导致球团内部出现分层和结构疏松, 使得成品球的抗压强度有所下降。综上所述, 提高球团粒度可以大幅度提升成品球抗压强度, 但当粒度过大时, 过高的焙烧温度反而会降低成品球的抗压强度。



(a) 焙烧时间; (b) 焙烧温度

粒度组成/mm: 1—10 ~ 12; 2—12 ~ 14; 3—14 ~ 16; 4—16 ~ 18。

图 6 焙烧时间与焙烧温度对成品球抗压强度的影响

Fig. 6 Influence of roasting time and roasting temperature on compressive strength of finished ball

### 2.2.4 不同粒度成品球的 XRD 及矿相分析

图 7 和图 8 分别展示了在 950 °C 下预热 15 min、1 250 °C 条件下焙烧 15 min 后得到的不同粒度成品球的 XRD 图谱和微观结构。由图 7 可以看出, 四种不同粒度的成品球主要物相均为赤铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、铁橄榄石、硅酸钙及铁酸钙, 仅在铁酸钙和硅酸钙的含量上有些许差异, 即随着球团粒度的增大, 球团内部铁酸钙和硅酸钙含量相对降低, 其中铁酸钙可以促进液相的产生, 硅酸钙主要参与液相的凝固过程, 这些含量的差异影响了球团内部液相的生成量。结合图 8 可以发现, 随着粒度的提高, 球团内部固相面积增多, 液相生成量相对减少, 气孔减小, 球团更加致密。在球团高温焙烧过程中, 过多的液相会阻碍晶体的连接, 而适当的液相量可以加快固体质点的扩散, 使相邻质点之间接触点的扩散速度增加, 促使  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  晶体持续长大和再结晶, 形成连晶结构, 加速并增强球团矿的固相固结。球团固结一般以固相固结为主, 液相固结为辅。当球团粒度由 10 ~ 12 mm 提高至 16 ~ 18 mm 时, 球团内部固液比降低, 气孔减小, 颗粒之间固结更加紧密, 使球团对外部的抗压能力增强, 进一步提高了成品球的抗压强度。

### 2.3 不同粒度球团的冶金性能

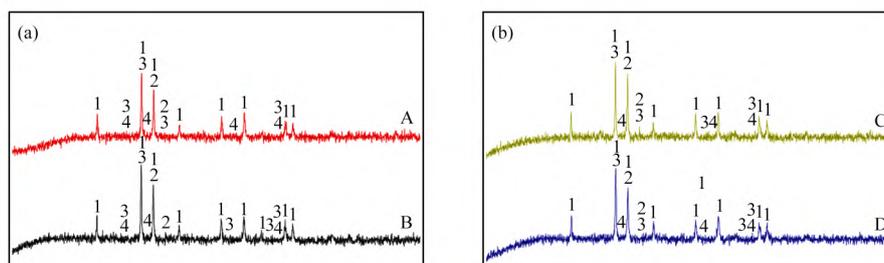
试验对不同粒度成品球进行冶金性能(还原膨胀指数和 3 h 还原度指数)测定, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 当球团粒度由 10 ~ 12 mm 提升至 16 ~ 18 mm 后, 成品球的还原膨胀指数由 11.6% 下降至 9.7%, 均保持在 12% 以下, 表明球团的还原膨胀性能均保持在较为优秀的水平;

在 900 °C 的还原炉中经过 180 min 的还原过程, 成品球的还原度指数由 70.7% 降低至 54.5%, 还原性能逐渐劣化, 其中 16 ~ 18 mm 粒度成品球的还原度指数已经低于一般高炉冶炼要求。据此可以看出, 可以适当提高球团粒度来优化球团的整体冶金性能, 但粒度不宜高于 16 mm, 这样既可保证球团的还原度指数不低于 60%, 又能提升球团的还原膨胀性能。

### 2.4 经济性分析

在实际生产中, 铁精矿原料和生球水分是影响球团生产成本的主要因素, 因此, 调控铁精矿的含水量和生球水分可以有效控制干燥成本。忽略其它因素的影响, 蒸发 1 kg 水分需要能量为 2 260.87 kJ (2 260.87 kJ/kg × 1 kg), 而普通混煤平均低位发热量为 18 840.6 kJ/kg, 则蒸发 1 kg 水分需要普通混煤的质量为 0.12 kg (2 260.87 kJ ÷ 18 840.6 kJ/kg)。

由于运输与储存等因素的影响, 球团厂所用铁精矿含水量较高, 普遍在 9.5% 左右。为了满足造球工艺标准, 通常需将水分降至 8% 以下。由造球试验可知, 当生球中 12 ~ 16 mm 球团粒度占比由 34.93% 提升至 70.39% 时, 相应的水分也将增加 1%。由于高水分铁精矿有助于形成大粒度球团, 因此, 可以采取轻度干燥甚至直接造球的策略, 促进球团粒度的提高。忽略其它因素的影响, 此时 1 t 铁精矿可节省 1.80 kg 普通混煤; 在生球粒度提高后, 干燥 1 t 生球需要多消耗 1.20 kg 的普通混煤。按照膨润土配比为 1.8%, 在不计造球损耗的情况下, 生产 1 t 生球大约需要 0.982 t 铁



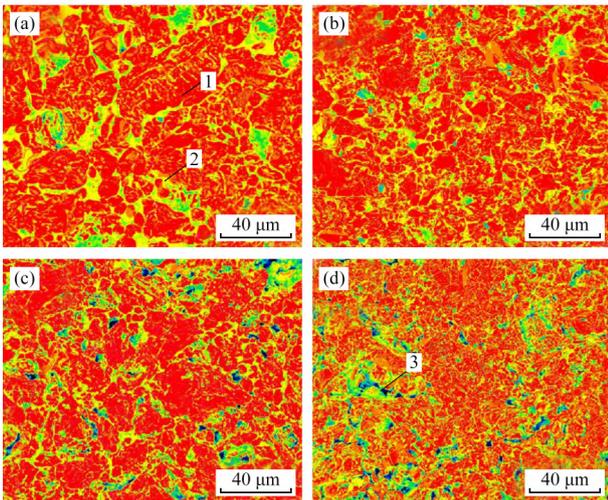
(a) 小粒级球团; (b) 大粒级球团

粒度组成/mm: A—12 ~ 14; B—10 ~ 12; C—16 ~ 18; D—14 ~ 16。

1—赤铁矿; 2—铁橄榄石; 3—硅酸钙; 4—铁酸钙。

图 7 不同粒度球团的 X 射线衍射图谱

Fig. 7 X-ray diffraction pattern of pellets with different particle sizes



粒度组成/mm: (a) 10~12; (b) 12~14;

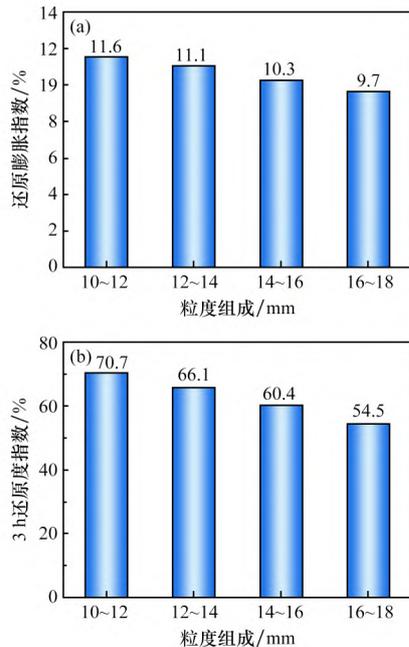
(c) 14~16; (d) 16~18

1—固相(红色部分); 2—液相(黄色部分);

3—气孔(蓝绿色部分)。

图 8 不同粒度球团的电子显微结构

Fig. 8 Electron microstructure of pellets with different particle sizes



(a) 还原膨胀指数; (b) 还原度指数

图 9 不同粒度球团的冶金性能

Fig. 9 Metallurgical properties of pellets with different particle sizes

精矿。假设球团厂年用铁精矿为 220 万吨, 大概生产 224 万吨生球, 综合来看, 在干燥工艺中, 球团厂一年可节省 1 272 t 普通混煤, 按 771 元/t 的市场

价格计算, 每年节约的干燥成本可达 98.07 万元。

### 3 结论

(1) 提高生球粒度需相应增加造球水分和延长造球时间, 这一调整可以显著提升生球的落下强度和抗压强度。对于粒度高于 12 mm 的生球, 提高膨润土配比对其综合性能提升更加明显; 此外, 当造球水分由 8.5% 增加至 9.5% 后, <12 mm 球团粒级占比降低了 43.48%, 12~16 mm 球团粒级占比由 34.93% 提高至 72.15%, 球团粒度分布更加均匀。

(2) 随着球团粒度的提高, 预热球团内部颗粒之间分布更加均匀, 孔隙变得大小适中, 黏结剂与颗粒之间的黏结作用得到增强。在预热过程中, 热量传递更均匀, 促进了球团内部结构变化的一致性, 使得结构更加紧密稳固, 使得预热球的整体抗压强度增强。成品球内部固相占比增加, 气孔减小, 晶体连接更好, 致密性提高, 对抗外界压力的能力变强, 进而使得成品球抗压强度大幅度提升。

(3) 当球团粒度由 10~12 mm 提升至 16~18 mm 时, 成品球的还原膨胀性能变得更为优秀, 其值由 11.6% 下降至 9.7%; 成品球的还原度指数由 70.7% 降低至 54.5%, 还原性能劣化。整体来看, 可以通过适当提高球团粒度来优化球团的综合冶金性能, 但粒度不宜高于 16 mm, 这样既可保证球团的还原性能满足工业应用需求, 又能提升球团的还原膨胀性能。

(4) 在实际生产中, 应着力提高生球中 12~16 mm 粒度范围的球团占比, 此时球团的综合性能指标最佳。而采取铁精矿轻度干燥或直接用于造球的策略可以间接提高造球水分, 大幅度降低生产中的小球团占比, 扩大生球中 12~16 mm 粒度范围的大球团占比, 使得球团粒度分布更加均匀。

### 参考文献:

[1] 杨晓东, 张丁辰, 刘锟, 等. 球团替代烧结: 铁前节能低碳污染减排的重要途径[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程 2017 9(1): 44-52.

YANG Xiaodong, ZHANG Dingchen, LIU Kun, et al.

- Substituted pelletizing for sintering: An important approach of energy-saving, low-carbon and emission reduction before ironmaking[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2017 9(1): 44-52.
- [2] 张福明,徐文轩,程相锋,等. 高炉高比例球团矿冶炼关键工艺技术分析[J]. *钢铁* 2024 59(3): 32-45.  
ZHANG Fuming, XU Wenxuan, CHENG Xiangfeng, et al. Analysis on key process and technology of blast furnace ironmaking on high charging proportion of pellet ore[J]. *Iron & Steel* 2024 59(3): 32-45.
- [3] 王新东. 适应高比例球团冶炼的高炉系统设计与生产实践[J]. *钢铁* 2022 57(12): 23-31.  
WANG Xindong. Design and production practice of blast furnace system for high proportion pellet smelting[J]. *Iron & Steel* 2022 57(12): 23-31.
- [4] 白凯凯. 熔剂性球团氧化焙烧及冶金行为研究[D]. 北京: 北京科技大学 2022.  
BAI Kaikai. Study on oxidizing roasting and metallurgical behavior of fluxed pellet[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing 2022.
- [5] 赵雪斌,路振毅,唐顺兵. 太钢 1 800 m<sup>3</sup> 高炉大比例球团生产技术的探讨[J]. *山西冶金* 2021 44(5): 43-45.  
ZHAO Xuebin, LU Zhenyi, TANG Shunbing. Discussion on production technology of large proportion pellet in TISCO 1 800 m<sup>3</sup> blast furnace[J]. *Shanxi Metallurgy*, 2021 44(5): 43-45.
- [6] 王新东,金永龙. “双碳”背景下高炉使用高比例球团的展望[J]. *过程工程学报* 2022 22(10): 1379-1389.  
WANG Xindong, JIN Yonglong. Prospect on high ratio pellet utilized in blast furnace under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering* 2022 22(10): 1379-1389.
- [7] 韦振宁,马承胜,石楚刚,等. 提高球团矿 10~16 mm 比例优化改造实践[J]. *矿业工程* 2022 20(1): 42-45.  
WEI Zhenning, MA Chengsheng, SHI Chugang, et al. Practice of optimizing reformation for increasing the proportion of pellets by 10~16 mm[J]. *Mining Engineering* 2022 20(1): 42-45.
- [8] 王欣宇,曾宇,李林春,等. 复合镁质添加剂对球团生产影响的试验分析[J]. *中国冶金* 2021 31(8): 7-10.  
WANG Xinyu, ZENG Yu, LI Linchun, et al. Analysis on effects of multiple MgO-bearing additive on pellet production[J]. *China Metallurgy* 2021 31(8): 7-10.
- [9] 韦东,李光辉,黄三兵. 利比里亚邦精矿复合造块工艺研究[J]. *烧结球团* 2022 47(3): 25-31; 97.  
WEI Dong, LI Guanghui, HUANG Sanbing. Research on process of composite agglomeration of concentrates in the state of Liberia[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2022, 47(3): 25-31; 97.
- [10] 浦舟,张铭,周峰,等. 磁铁矿球团等温氧化反应建模与数值模拟[J]. *烧结球团* 2020 45(3): 22-27; 54.  
PU Zhou, ZHANG Ming, ZHOU Feng, et al. Modeling and numerical simulation of isothermal oxidation reaction of magnetite pellet[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2020, 45(3): 22-27; 54.
- [11] 徐礼兵. 进口高铬型钒钛磁铁矿氧化球团制备的试验研究[D]. 沈阳: 东北大学 2012.  
XU Libing. Experimental study on the preparation of imported high chromium vanadium titanium magnetite oxide pellets[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [12] 杨金保,朱辛州,窦晓东,等. 氧化球球径与能耗的关系初探[J]. *烧结球团* 2011 36(1): 41-46.  
YANG Jinbao, ZHU Xinzhou, DOU Xiaodong, et al. Discussion on relation of oxidized pellet diameter with energy consumption[J]. *Sintering and Pelletizing* 2011, 36(1): 41-46.
- [13] DWARAPUDI S, DEVI T U, MOHAN RAO S, et al. Influence of pellet size on quality and microstructure of iron ore pellets[J]. *ISIJ International*, 2008, 48(6): 768-776.
- [14] 李振铠,高冰,贾彬,等. 粒度对熔剂性球团冶金性能及矿相结构的影响[J]. *烧结球团* 2024 49(2): 59-64.  
LI Zhenkai, GAO Bing, JIA Bin, et al. Effect of particle size on metallurgical properties and mineral phase structure of fluxed pellets[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2024 49(2): 59-64.