



烧结用铁矿粉球磨后制备氧化球团研究

高 杰^a, 周 伟^a, 李 玲^b, 兰 歌^a, 春铁军^a

(安徽工业大学 a. 冶金工程学院; b. 能源与环境学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要:在钢铁工业绿色低碳转型背景下,球团矿在高炉入炉比例逐渐提高,扩大球团矿原料选择是钢铁企业面临的关键共性难题。为此,本文以烧结用铁矿粉为原料,研究不同球磨粒度组成对氧化球团性能的影响。结果表明:当小于0.074 mm粒级占比增加时,比表面积增大使颗粒间范德华力增强,抗压强度持续提高;然而,超细颗粒的团聚效应会导致爆裂温度下降。预热球团抗压强度随粒度减小先升后稳,当小于0.074 mm粒级占比为75.45%时,抗压强度达372.6 N/P。焙烧球团抗压强度整体呈“先升—后降—再升”趋势。当小于0.074 mm粒级占比为46.24%、60.30%时,分别达峰值2 062.4、2 146.1 N/P。膨润土配比增加可同步提升生球落下强度、抗压强度和爆裂温度,当配比为1%时,生球落下强度为16.6次/(0.5 m)、抗压强度为10.9 N/P、爆裂温度为399℃。当预热温度为1 050℃、预热时间为15 min、焙烧温度为1 340℃、焙烧时间为15 min时,预热球与焙烧球抗压强度仍随膨润土配比增加而上升,配比为1%时分别为367.2、1945.2 N/P。本文成果可为钢铁企业扩大球团原料选择实现降本增效提供参考。

关键词:铁矿粉; 氧化球团; 粒度组成; 抗压强度

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)01-0001-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.01.001

Study on preparation of oxidized pellets with ball-milled iron ore fines for sintering

GAO Jie^a, ZHOU Wei^a, LI Ling^b, LAN Ge^a, CHUN Tiejun^a

(Anhui University of Technology a. School of Metallurgical Engineering;

b. School of Energy and Environment, Ma'anshan 243002, Anhui, China)

Abstract: Under the background of green and low-carbon transformation in the iron and steel industry, the proportion of pellets in the blast furnace charge is gradually increasing. Expanding the raw material options for pellets is a key common challenge faced by steel enterprises. For this purpose, the iron ore fines for sintering are used as raw material to study the effects of different particle size distributions of ball-milled iron ore fines on the properties of oxidized pellets. The results indicate that as the proportion of particles smaller than 0.074 mm increases, the specific surface area enlarges, enhancing the van der Waals forces between particles and continuously improving the compressive strength. However, the agglomeration effect of ultra-fine particles leads to a decrease in the bursting temperature. The compressive strength of preheated pellets initially increases and then stabilizes as the particle size decreases. When the proportion of particles smaller than 0.074 mm is 75.45%, the compressive strength reaches 372.6 N/P. The compressive strength of roasted pellets overall shows a trend of “initially increasing, then decreasing, and increasing again”. When the proportion of particles smaller than 0.074 mm was

收稿日期: 2025-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374315)

作者简介: 高 杰(2000—),男,硕士研究生,从事烧结球团方面研究。

通信作者: 春铁军(1984—),男,博士,教授,从事烧结球团工艺、冶金固废资源综合利用方面研究。

46.24% and 60.30%, the strength reached the peak values of 2 062.4 N/P and 2 146.1 N/P respectively. Increasing the bentonite ratio can simultaneously enhance the drop strength, compressive strength, and bursting temperature of green pellets. When the ratio is 1%, the drop strength of green pellets is 16.6 times/(0.5 m), the compressive strength is 10.9 N/P, and the bursting temperature is 399 °C. Under the conditions of a preheating temperature of 1 050 °C, preheating time of 15 min, roasting temperature of 1 340 °C, and roasting time of 15 min, the compressive strengths of preheated and roasted pellets still increase with the bentonite ratio, reaching 367.2 N/P and 1 945.2 N/P respectively when the ratio is 1%. The findings of this study can provide references for steel enterprises to expand pellet raw material options for cost reduction and efficiency improvement.

Key words: iron ore fines; oxidized pellets; particle size distribution; compressive strength

在“双碳”目标背景下,绿色低碳发展已成为钢铁工业的重要研究课题之一。提高球团矿在高炉炉料中的比例,既能有效降低炼铁工序碳排放,但同时也亟须解决球团原料多元化供应问题。由于我国铁矿资源自给率低,叠加全球铁矿市场中球团用铁精矿供应日趋短缺,而烧结用铁粉矿资源相对丰富,若将烧结粉矿用于球团矿生产,既可拓宽球团生产的矿粉来源,又可降低生产成本^[1-3]。

针对烧结粉矿作为球团生产原料的应用问题,国内外已开展相关研究。毛瑞等^[4]以巴卡粉与巴西混合粉两种高品位烧结矿粉开展系统研究,重点评估其细磨加工后作为球团原料的适用性。试验表明,相较于传统球团精矿粉,两类矿粉的静态成球性指数有所降低,但得益于矿粉表面活化能的提升,成品生球落下强度呈梯度增长趋势,这与其独特的粒度分布特征和黏结相形成机制密切相关。刘昌^[5]、黄柱成等^[6]研究了赤铁矿粉配加量对球团造球生产的影响,发现在相同膨润土配比下,随着赤铁矿粉配比从 0 增至 100%,混合料颗粒平均粒径增大,生球孔隙率增加导致黏结力下降,进而使生球落下强度和抗压强度均降低。值得注意的是,当赤铁矿配比达到 30% 时,球团的预热后强度和煅烧后强度均有提升。球团原料适配性研究显示,不同细磨矿粉的配加会引发性能的差异化响应:马丽等^[7]发现,提高细磨麦克粉掺入量虽能优化生球成型性,但其原料高结晶水

含量特征会导致焙烧阶段因孔隙演化最终制约球团冶金性能,并提出麦克粉在球团生产中的临界掺入量为 30%。与之对比,彭道胜^[8]通过熔剂性球团试验证实,卡粉细磨物料配比提升至 45% 时,球团仍保持良好的冶金性能(抗压强度可达 2 855 N/P),同时显著改善了高温软熔特性。

然而,目前研究多聚焦于不同种类烧结粉矿对生球性能的影响,而忽视了矿粉粒度组成对球团质量的潜在作用。因此,本文基于铁矿粉原料体系,系统探究粉磨细度调控对氧化球团成矿过程的作用机制,从微观角度建立矿粉粒度与生球球团性能的关联模型,以期为钢铁企业实现铁矿资源多元利用以及工序成本控制提供关键工艺参数支持。

1 原料性能及研究方法

1.1 原料性能

试验所用烧结铁矿粉和膨润土均取自某钢铁厂,其化学成分检测结果如表 1 所示。铁矿粉的主要化学成分中,TFe 为 63.84%,其余主要组分 CaO、SiO₂、Al₂O₃ 和 MgO 质量分数分别为 0.19%、6.06%、0.99%、0.31%。膨润土的主要化学成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃,质量分数分别为 70.82%、14.05%。铁矿粉的粒度组成如表 2 所示。由表 2 可知:铁矿粉整体粒度较粗,需经磨矿预处理后方可用于造球。试验所用膨润土的基本物化性能如表 3 所示,其中蒙脱石质量分数为 67.42%。

表 1 原料化学成分(质量分数)

%

原料名称	TFe	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	S	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O
铁矿粉	63.84	0.19	6.06	0.31	0.99	0.14	0.11	0.02	0.07	0.04	0.03
膨润土	1.44	1.83	70.82	1.62	14.05	0.27	—	—	0.05	—	3.98

表 2 铁矿粉粒度组成(质量分数)

$\leq 1\text{ mm}$	$(1,3]\text{ mm}$	$(3,5]\text{ mm}$
53.00	37.25	9.75

表 3 膨润土物理性质

胶质价/ [mL·(5 g) ⁻¹]	膨胀容/ [mL·(2 g) ⁻¹]	吸水率/%	吸蓝量/ [g·(100 g) ⁻¹]	蒙脱石 质量分数/%	黏度/(Pa·s)
57	17	300.58	29.8	67.42	2.1

1.2 研究方法

1.2.1 原料制备与粒度调控

为研究不同粒度组成的影响，以烧结用铁矿粉为原料，采用 XMQ - Ø160 锥形球磨机进行湿式磨矿。每次试验称取 1 kg 干矿粉，按水料质量比 1:1 与水混合，在矿浆质量分数为 50%、填充率为 70%、钢球填充率为 30% 的条件下，通过精确控制球磨时间制备不同目标粒度的试验样品。湿磨完成后，矿浆经 Ø260/200 真空过滤机抽滤脱水，所得样品用于后续造球与表征。

1.2.2 比表面积与粒度表征

采用 SBT - 127 型勃氏比表面积测定仪检测球磨后样品的比表面积，过程严格遵循《水泥比表面积测定方法 - 勃氏法》(GB/T 8074—2008)操作规程。该方法通过测量空气透过特定压实粉体层时的流速与压力差来测定矿物颗粒的比表面积，重复性误差小于 2%，为评估粉磨效果提供了关键数据支持。

1.2.3 造球工艺与生球性能检测

以球磨后的烧结粉矿为基料开展造球试验。每次称取 4 kg 干燥球磨矿粉，外配 1.0% (质量分数) 的干燥膨润土作为黏结剂，使用 SYH - 5L 型三维多向混合装置混合 5 min。随后，将混合料置于 JDA - 40 型圆盘制粒机(盘径为 1 000 mm，边高为 150 mm)中造球。关键造球参数设定：圆盘转速为 22 r/min、盘面倾角为 47°、造球水分为 7.5% ± 0.5%、成型周期为 18 min。

造球完成后，筛选出粒径为 9 ~ 12 mm 的合格生球，依次测定其落下强度、抗压强度、爆裂温度及含水率 4 项关键性能指标。其余合格生球经干燥后，在设定的热态制度(保温时间为 15 min、预热温度为 1 050 ℃、焙烧温度为 1 340 ℃)下进行预热与焙烧，以测定预热球与焙烧球的强度。

1.2.4 膨润土配比优化试验

为研究不同膨润土配比对生球质量和氧化球团性能的影响，每次称取 4 kg 粒度组成小于 0.074 mm 粒级占比为 64.90% 的烧结粉矿，分别添加质量分数为 0.4%、0.6%、0.8%、1.0% 的干燥膨润土。物料经混合机混合 5 min 后，使用圆盘造球机造球。对粒径为 9 ~ 12 mm 的达标生球，系统测定其落下强度、单球抗压强度、热爆裂临界温度及生球含水率 4 项关键参数。其余合格生球经干燥后转入热态试验阶段，在保温时间为 15 min、预热温度为 1 050 ℃、焙烧温度为 1 340 ℃的条件下分别进行预热和焙烧试验。

2 结果与讨论

2.1 球磨粒度对比表面积的影响

球磨粒度对比表面积的影响如图 1 所示。由图 1 可知：随着球磨时间的延长，小于 0.074 mm 粒级的粉矿质量分数逐渐增加，其比表面积也随之增大。其中，当小于 0.074 mm 粒级质量分数为 46.24% 时，粉矿比表面积最小，仅为 1 163.88 cm²/g；而当质量分数提升至 75.47% 时，比表面积则增至 1 953.96 cm²/g。

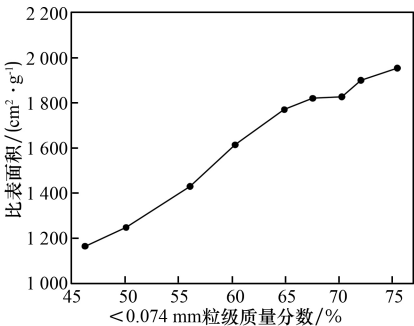


图 1 球磨粒度对比表面积的影响

2.2 球磨粒度对生球质量的影响

2.2.1 球磨粒度对生球落下强度的影响

球磨粒度对生球落下强度的影响如图 2 所示。

由图 2 可知：随着球磨时间的延长，小于 0.074 mm 粒级占比持续增加，导致生球落下强度整体呈现先上升后下降的抛物线特征。具体而言，当该粒级质量分数增至 62% 的临界值前，铁精矿生球落下强度提升归因于颗粒细化增大了球内颗粒间接触面积，形成更紧密的毛细网络，结合力随之增强，表现为落下强度升高；而当质量分数超过 62% 时，落下强度开始下降，这是由于粒度进一步细化引发颗粒团聚效应，导致生球内部结构疏松化，最终削弱其抗冲击性能^[9]。这一现象表明，造球过程中存在最优粒度配比阈值。

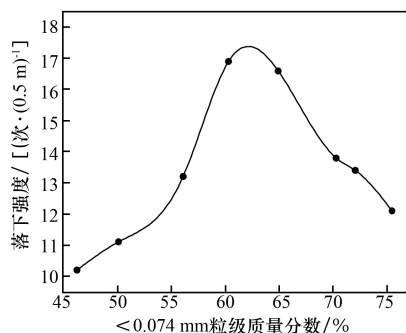


图 2 球磨粒度对生球落下强度的影响

2.2.2 球磨粒度对生球抗压强度的影响

球磨粒度对生球抗压强度的影响如图 3 所示。由图 3 可知：随着球磨时间的延长，小于 0.074 mm 粒级的粉矿质量分数逐渐增加，对应的生球抗压强度也随之上升。其中，当该粒级质量分数为 46.24% 时，生球抗压强度最低，仅为 9.1 N/P；而当质量分数增至 75.47% 时，抗压强度升至 11.4 N/P。这一现象的原因可能是：当小于 0.074 mm 粒级较细时，生球内部颗粒更容易紧密排列，结构更致密，可塑性增强，从而提高了抗压强度。

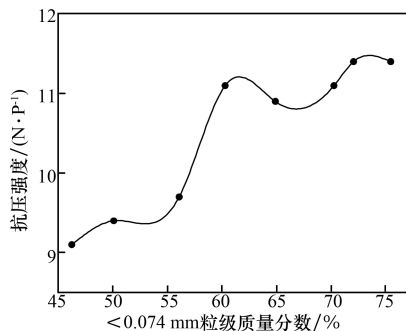


图 3 球磨粒度对生球抗压强度的影响

2.2.3 球磨粒度对生球爆裂温度的影响

球磨粒度对生球爆裂温度的影响如图 4 所示。

由图 4 可知：随着球磨时间的延长，小于 0.074 mm 粒级质量分数逐渐增加，生球爆裂温度呈减小趋势。其中，当该粒级质量分数为 46.24% 时，生球爆裂温度最高达 427 °C；而当质量分数增至 75.47% 时，爆裂温度最低，仅为 358 °C。这一现象的原因可能是：当颗粒持续细化时，比表面积增大虽能显著强化颗粒间结合力，但也会导致球团孔隙通道细化。干燥过程中，致密结构阻碍了水分顺利排出，内部蒸汽压急剧累积引发局部应力集中。当蒸汽压超过生球承载极限时，原本致密的结构网络中萌生微裂纹，这些裂纹随能量释放迅速扩展并相互贯通，最终导致球团整体破裂，爆裂温度大幅降低^[10]。

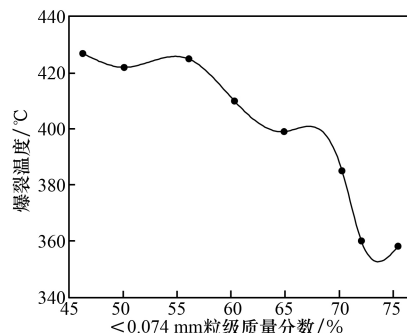


图 4 球磨粒度对生球爆裂温度的影响

2.3 球磨粒度对氧化球团质量的影响

2.3.1 球磨粒度对预热后球团强度影响

球磨粒度对预热球团抗压强度的影响如图 5 所示。由图 5 可知：随着小于 0.074 mm 粒级占比增大，预热球团抗压强度显著提高。其中，当该粒级占比为 46.24% 时，预热球团抗压强度最低，仅为 250.6 N/P；当占比增至 75.47% 时，抗压强度升至 372.6 N/P。其原因可能是：球磨后矿物颗粒表面粗糙度增大，棱边、尖角等活性位点数量显著增加，促进了质子晶桥的形成并增强了其迁移扩散能力。表面形貌的改善有效提升了颗粒间物质传输效率，这种微观结构演变机制为相关界面反应动力学研究提供了重要依据^[11]。此外，预热过程中磁铁矿快速氧化生成 Fe_2O_3 相，其晶粒表面原子迁移活化能显著降低，通过界面扩散在相邻颗粒间形成稳定晶键^[12]。同时，矿物颗粒间黏结性物相与晶键的协同作用，使原料粒度细化显著增加了有效晶界接触面积，进而提升了预热球团矿的抗压强度。该相变 - 扩散耦合机制揭示

了微观结构演化与宏观力学性能的统一性。

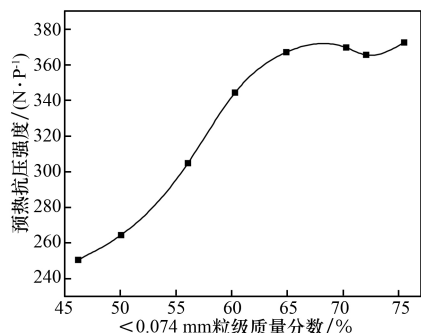


图 5 球磨粒度对预热球团抗压强度的影响

2.3.2 球磨粒度对焙烧后球团强度影响

球磨粒度对焙烧球团抗压强度的影响如图 6 所示。由图 6 可知: 随着球磨时间的延长, 小于 0.074 mm 粒级质量分数逐步增加, 焙烧球团抗压强度呈先升后降再升的波动趋势。当该粒级质量分数在 46.24%~60.30% 时, 抗压强度呈上升趋势, 从 1 460.5 N/P 升至 2 062.4 N/P; 质量分数增至 60.30%~72.06% 时, 抗压强度转为下降, 从 2 062.4 N/P 降至 1 821.6 N/P; 质量分数进一步提升至 72.06%~75.47% 时, 抗压强度再次小幅回升至 1 851.6 N/P。关于强度变化机制: 当小于 0.074 mm 粒级质量分数处于 46.24%~60.30% 时, 强化效应表现为双重机制。首先, 磁铁矿氧化生成新生 Fe_2O_3 相, 通过表面原子重排形成微晶键联结构; 其次, 赤铁矿晶粒扩散迁移能力增强, 诱发再结晶与晶粒择优生长。这种孔隙结构演变-晶体生长耦合效应促使颗粒间孔隙率降低、球体致密化收缩, 最终形成多颗粒连接的致密球体^[9]。当质量分数处于 60.30%~72.06% 时, 球团孔隙率过低限制了气体内扩散, 导致磁铁矿氧化程度降低, 进而造成抗压强度下降。而当质量分数提升至 72.06%~89.22% 时, 尽管氧化程度

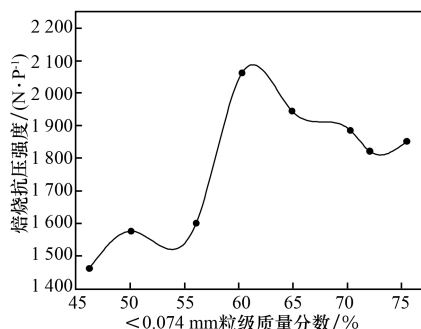


图 6 球磨粒度对焙烧球团抗压强度的影响

仍较低, 但因烧结粉矿颗粒过细, 球团内颗粒接触点数量增多, 内部形成更紧密的结构, 故抗压强度重新提高。

2.4 膨润土比对生球质量的影响

试验所用粉矿具有一定黏性, 球磨后作为球团原料可大幅降低膨润土用量。因此, 研究不同膨润土比对生球、预热球团和焙烧球团性能的影响。

2.4.1 膨润土比对生球落下强度的影响

膨润土比对生球落下强度的影响如图 7 所示。

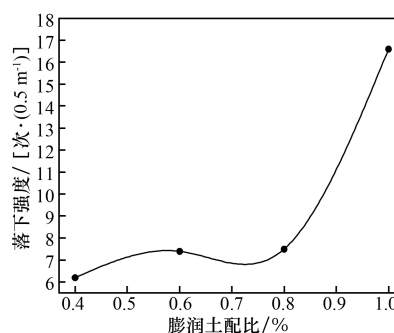


图 7 膨润土比对生球落下强度的影响

由图 7 可知: 随着膨润土配比的增加, 生球落下强度逐渐提高。当膨润土配比为 0.4% 时, 生球落下强度最低, 仅为 6.2 次/(0.5 m); 当配比增至 1.0% 时, 强度升至 16.6 次/(0.5 m)。这一现象的原因可能是: 膨润土吸水性较强, 吸收水分后颗粒间黏结作用增强, 从而提高球团强度。膨润土颗粒吸水膨胀后形成黏土状胶体, 其黏结性能使球团内部颗粒结合更牢固, 增强球团稳固性。因此, 膨润土配比与生球落下强度呈正相关。

2.4.2 膨润土比对生球抗压强度的影响

膨润土比对生球抗压强度的影响如图 8 所示。由图 8 可知: 膨润土配比的提升可显著增强生球力学性能。当配比从 0.4% 增至 1.0% 时, 生球抗压强度由 9.4 N/P 提升至 10.9 N/P。这一强化效应源于球团形成过程中, 膨润土颗粒的吸水膨胀特性: 其既有助于提升球团内部密实度和稠度, 又通过表面电荷在水分作用下形成黏结力。该黏结力促进颗粒间结合, 增强球团凝聚力与抗压能力; 同时, 膨润土颗粒表面的黏聚力进一步强化颗粒间结合, 提升球团整体抗压性能。因此, 膨润土配比与生球抗压强度呈正相关。

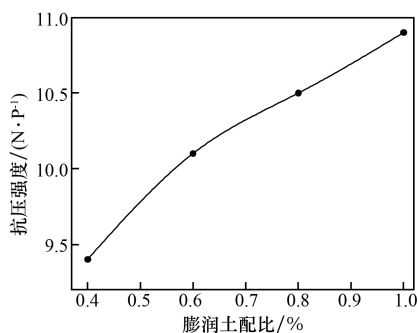


图 8 膨润土配比对生球抗压强度的影响

2.4.3 膨润土配比对生球爆裂温度的影响

膨润土配比对生球爆裂温度的影响如图 9 所示。

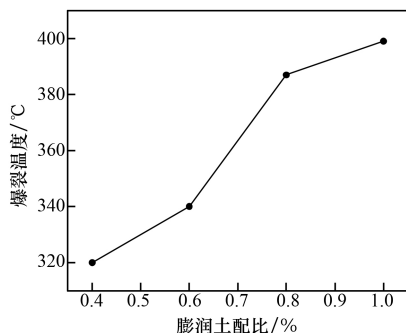


图 9 膨润土配比对生球爆裂温度的影响

由图 9 可知：随着膨润土配比的增加，生球爆裂温度逐步升高。当膨润土配比为 0.4% 时，生球爆裂温度最低，仅为 320 ℃；当膨润土配比增至 1.0% 时，爆裂温度升至 399 ℃。这一现象的原因可能是：在球团升温过程中，膨润土颗粒释放储存的水分，水分在较低温度下蒸发并吸收热量，延缓了球团内部水分在高温阶段的剧烈汽化，从而降低了爆裂发生的可能性。因此，膨润土配比与生球爆裂温度呈正相关。

2.5 膨润土比对氧化球团质量的影响

为研究膨润土比对预热球团和焙烧球团抗压强度的影响，将不同膨润土配比的球团经干燥处理后，分别控制保温时间 15 min、预热温度 1 050 ℃、焙烧温度 1 340 ℃。开展预热和焙烧试验。

2.5.1 膨润土比对预热球团质量的影响

膨润土比对预热球团抗压强度的影响如图 10 所示。

由图 10 可知：随着膨润土配比的增加，预热球团抗压强度逐步提高。当膨润土配比为 0.4% 时，预热球团抗压强度最低，仅为 217.6 N/P；当

配比增至 1.0% 时，抗压强度升至 367.2 N/P。这一现象的原因可能是：球团形成过程中，膨润土颗粒（通常呈片状或纤维状，比表面积较大）与矿物颗粒紧密接触。这样形态特征促进了颗粒间的相互咬合和结合，增强了球团内聚力，推动内部结构致密化。因此，膨润土配比与预热球团抗压强度呈正相关。

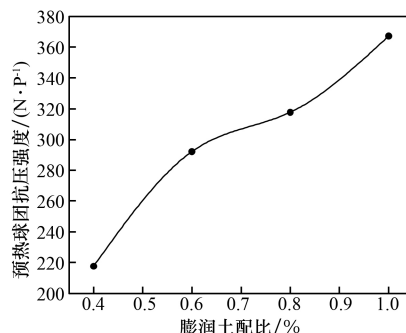


图 10 膨润土比对预热球团抗压强度的影响

2.5.2 膨润土比对焙烧球团质量的影响

膨润土比对焙烧球团抗压强度的影响如图 11 所示。

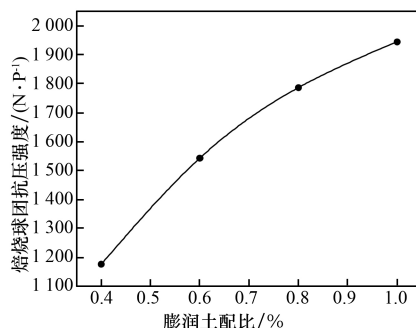


图 11 膨润土比对焙烧球团抗压强度的影响

由图 11 可知：膨润土配比与焙烧球团抗压强度呈显著正相关关系。当配比从 0.4% 提升至 1.0% 时，抗压强度由 1 175.7 N/P 显著提升至 1 945.2 N/P。这一现象的原因可能是：膨润土主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ，焙烧过程中会生成低熔点物质，降低球团孔隙率，从而提高球团抗压强度^[13]。

3 结 论

(1) 当烧结粉矿球磨后小于 0.074 mm 粒级质量分数增加（膨润土配比固定为 1% 时），生球落下强度呈先上升后下降趋势，其中粒级质量分数为 60.30% 时落下强度最佳，平均达 16.9 次/(0.5 m)；

生球抗压强度整体呈上升趋势, 粒度质量分数增至 75.47% 时平均抗压强度达 11.4 N/P; 爆裂温度则整体呈下降趋势, 粒度质量分数为 46.24% 时爆裂温度达 427 ℃。

(2) 试验控制保温时间为 15 min、预热温度为 1 050 ℃、焙烧温度为 1 340 ℃, 当烧结粉矿球磨后小于 0.074 mm 粒级质量分数增加时, 预热球团抗压强度整体呈上升趋势(粒级质量分数从 46.24% 增至 75.47%, 抗压强度从 250.6 N/P 升至 372.6 N/P); 焙烧球团抗压强度呈现非单调变化, 当粒级质量分数达 46.24%、60.30% 临界值时, 强度分别达到峰值 2 062.4、2 146.1 N/P。

(3) 试验结果表明, 固定球磨后小于 0.074 mm 粒级质量分数为 64.90% 时, 膨润土配比提升显著改善生球性能指标: 当膨润土配比增至 1% 时, 生球落下强度、抗压强度及爆裂温度分别达峰值 16.6 次/(0.5 m)、10.9 N/P、399 ℃。这主要因为膨润土(黏结剂)质量分数的增加, 通过增强颗粒间范德华力与毛细管作用力, 有效提升了生球结构致密性。控制其他条件不变时, 预热球团抗压强度从 217.6 N/P 升至 367.2 N/P, 焙烧球团抗压强度从 1 175.7 N/P 升至 1 945.2 N/P。

参考文献:

[1] 朱德庆, 黄伟群, 杨聪聪, 等. 铁矿球团技术进展[J].

烧结球团, 2017, 42(3): 42-49.

- [2] 孙海华. 配加涑源富矿粉提高烧结矿强度[J]. 烧结球团, 2000, 25(5): 43-45.
- [3] 王海风, 裴元东, 张春霞, 等. 中国钢铁工业烧结/球团工序绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁, 2016, 51(1): 1.
- [4] 毛瑞, 王飞, 金海, 等. 烧结富矿粉细磨用于制备球团矿的试验研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(2): 24.
- [5] 刘昌. 赤铁矿配比对氧化性球团制备影响规律的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [6] 黄柱成, 张元波, 朱尚扑, 等. 以赤铁矿为主配加磁铁矿制备氧化球团的研究[J]. 钢铁, 2004, 39(4): 9-13.
- [7] 马丽, 青格勒, 田筠清. 球团配加细磨麦克粉的试验研究[J]. 烧结球团, 2019, 44(2): 39-41; 49.
- [8] 彭道胜. 细磨卡粉制备熔剂性球团的试验研究[J]. 烧结球团, 2021, 46(4): 50.
- [9] 范晓慧, 袁晓丽, 李光辉, 等. 铁精矿粒度对球团强度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(11): 8.
- [10] 智谦, 张福明, 韩志国, 等. 配加细磨烧结粉矿对带式焙烧机球团质量的影响[J]. 中国冶金, 2024, 34(2): 35-41; 95.
- [11] 王昌安, 罗廉明. 铁精矿粒度组成对球团矿的影响[J]. 武汉化工学院学报, 2005, 27(2): 3841.
- [12] 朱德庆, 黄铮静, 杨聪聪, 等. GF88 赤铁精矿制备氧化球团的试验研究[J]. 烧结球团, 2020, 45(6): 61.
- [13] 胡志清, 潘建, 朱德庆, 等. 铁精矿原料特性及其对成球性能的影响[J]. 烧结球团, 2013, 38(4): 42-49.