粒级与宏观形态对带式焙烧机球团性能的影响①

温宝良[1], 刘英才[1], 宋灿阳[1], 张晓萍[1,2], 杨佳龙[2]
(1.马鞍山钢铁有限公司技术中心, 安徽 马鞍山 243003; 2.安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘 要: 考察了粒级与宏观形态对带式焙烧机球团综合性能的影响。结果表明,成品球粒级集中于 12~16 mm,占比超过 90%;其中完整球占比 59.95%,破损球与裂纹球占比分别为 24.71%、15.35%。完整球抗压强度随粒级增大呈上升趋势;同粒级条件下,宏观形态为球团抗压强度主导因素,完整球抗压强度最高,裂纹球抗压强度最低。球团抗压强度差异本质是内部赤铁矿晶粒的结合紧密程度不同。大粒级完整球氧化反应不充分,内部结构均匀性较差。还原性能方面,不同粒级完整球还原度相差不大;同粒级的破损球与裂纹球前期还原速率更高,而后期还原度、还原膨胀率及抗粉化性能与完整球无明显差异。破损球与裂纹球力学性能劣化,入炉冶炼时易破坏高炉料柱透气性,需严控入炉比例。建议优先提高 12~14 mm 完整球使用比例,平衡球团强度与冶金性能。研究可为球团质量评估体系优化及高炉入炉料配用优化提供理论支撑。

关键词: 球团矿; 粒级; 宏观形态; 抗压强度; 冶金性能; 矿相结构; 带式焙烧机
中图分类号: TF046 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.031
文章编号: 0253-6099(2026)04-0203-07

Effects of Particle Size and Macro Morphology on Pellet Properties of Straight-Grate Induration Machine

WEN Baoliang[1], LIU Yingcai[1], SONG Canyang[1], ZHANG Xiaoping[1,2], YANG Jialong[2]
(1.*Technology Center of Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan* 243003, *Anhui*, *China*; 2.*School of Metallurgical Engineering*, *Anhui University of Technology*, *Ma'anshan* 243032, *Anhui*, *China*)

Abstract: The effects of particle size and macro morphology on the comprehensive properties of pellets produced by the straight-grate induration machine were investigated. The results show that the particle size of finished pellets is mainly distributed within the range of 12-16 mm, accounting for more than 90%. Intact pellets account for 59.95%, while broken pellets and cracked pellets account for 24.71% and 15.35%, respectively. The crushing strength of intact pellets rises with an increase in particle size. As for the pellets with the same particle size, the macro morphology serves as the dominant factor determining their crushing strength. It is shown that intact pellets exhibit the highest crushing strength, whereas cracked pellets show the lowest crushing strength. The essential reason for the difference in crushing strength among pellets lies in the different bonding compactness of internal hematite grains. Large-sized intact pellets undergo insufficient oxidation and possess poor uniformity in internal structure. In terms of reduction performance, intact pellets with different particle sizes have negligible differences in reduction degree. For pellets with identical particle size, broken and cracked pellets feature a higher initial reduction rate, but present no obvious differences compared with intact pellets in terms of final reduction degree, reduction swelling index and anti-pulverization performance. Broken and cracked pellets suffer degraded mechanical properties and tend to damage the gas permeability of blast furnace burden during smelting, so their feeding proportion into the blast furnace should be strictly controlled. It is recommended that the proportion of intact pellets sized 12-14 mm be preferentially increased to balance pellet strength and metallurgical properties. This research can provide theoretical support for the optimization of pellet quality evaluation system and proportion of blast furnace burden.

① **收稿日期**: 2026-03-26
基金项目: 安徽省重大产业创新计划资助项目(AHZDCYCX-LSDT2023-01)
作者简介: 温宝良(2000—),男,安徽滁州人,工程师,主要研究方向为铁矿造块新技术与理论。E-mail:2648364449@qq.com
通信作者: 张晓萍(1982—),女,宁夏吴忠人,高级工程师,主要研究方向为炼铁新技术与理论。E-mail:M75333@baosteel.com

Key words: pellet; particle size; macro morphology; crushing strength; metallurgical property; mineral phase structure; straight-grate induration machine

钢铁工业正面临“双碳”目标下的深刻转型压力[1],优化高炉炉料结构、推进低碳冶炼已成为钢铁行业高质量发展的核心路径[2]。球团矿因其铁品位高、粒级均匀、强度好且工序能耗显著低于烧结矿等优点,被视为实现高炉炉料优化的关键原料[3]。

带式焙烧机工艺具有单机产能大[4]、热效率高、原料适应性强的特点,在生产熔剂性球团和镁质球团时,能有效规避回转窑结圈等技术难题,是当前大型化、集约化球团生产的主流技术路线[5-7]。然而,在实际生产中,成品球团并非全部为理想状态的完整球,常混杂一定比例的破损球及裂纹球[8-12]。成品球的粒级分布与宏观形态是影响工业现场观测及后续冶炼过程的两项重要指标,但现有研究多聚焦于铁精矿粒级、膨润土配比、焙烧温度与时间等工艺参数对球团性能的影响[13-15],对粒级分布差异及破损、裂纹等宏观形态缺陷如何影响球团冶金性能仍缺乏深入研究。这一认知不足既限制了生产工艺的精细化调控,也影响了对“次品球”危害的准确评估及高炉优化配料的科学决策。

基于此,本文通过对带式焙烧机工艺所生产的不同特征球团进行性能表征与对比分析,明确粒级与宏观形态对球团性能的影响规律,为带式焙烧机生产工艺参数精细调控、产品均质化水平提升、入炉前质量评价及筛分制度优化提供科学指导,以保障高炉实现高比例球团冶炼与提质增效所需原料的稳定性和优质性。

1 试验

1.1 试验原料

试验用成品球取自马鞍山钢铁有限公司,其主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可知,成品球 TFe 品位大于 60%,并含有 SiO_2、Al_2O_3、MgO 等多种氧化物。图 1 为成品球 XRD 图谱。由图 1 可知,成品球主要由 Fe_2O_3 和 SiO_2 组成。

表 1 成品球主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of finished pellets %

TFe	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3
62.10	1.16	0.55	6.80	0.58	1.55
V_2O_5	Na_2O	K_2O	ZnO	P	S
0.19	0.36	0.12	0.01	0.028	0.02

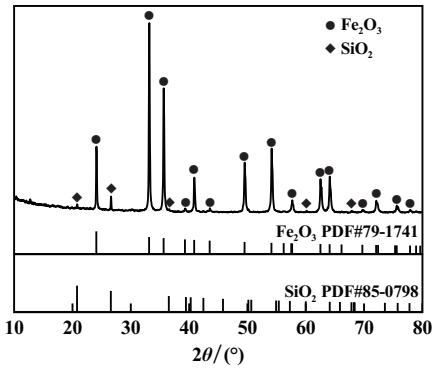


图 1 成品球 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of finished pellets

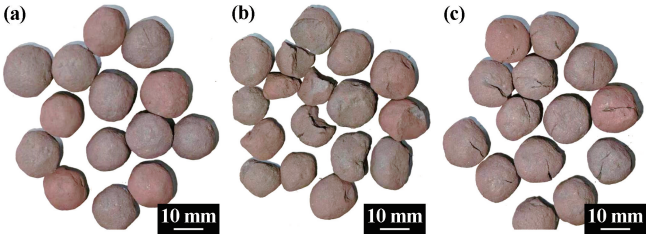
1.2 试验方法

1.2.1 粒级分布统计

每次称取 3 kg 成品球样品,使用系列标准圆孔筛进行筛分,记录各粒级质量分数,该过程重复 5 次,以平均值作为最终粒级分布结果,并计算标准差。

1.2.2 成品球形态分类与统计

依据外观特征将成品球分为 3 类:① 完整球,表面无可见裂纹,最大直径(D_{max})与最小直径(D_{min})之比不大于 1.2,球形完整;② 破损球,形态严重偏离球形,呈多棱状、局部缺失(缺失面积占比不低于 10%)或扁圆状(D_{max}/D_{min} 不小于 1.5),少量破损球伴随有裂纹;③ 裂纹球,基本具有球形结构,但表面存在肉眼可见裂纹,裂纹长度占所在大圆周长比例不小于 5%,且球体未出现解体或破碎。图 2 为各形态成品球图片。



(a) 完整球; (b) 破损球; (c) 裂纹球

图 2 各形态成品球图片

Fig. 2 Classification of finished pellets by morphology

每次随机取 1 kg 成品球,参照上述量化标准进行人工分拣。为保证数据的可靠性,该过程重复 5 次,取各类球质量分数的平均值作为最终成品球形态组成数据,并计算标准差。

1.2.3　性能检测

基于国家标准 GB/T 14201—2018《高炉和直接还原用铁球团矿 抗压强度的测定》,对成品球开展抗压强度测试;依据国家标准 GB/T 13241—2017《铁矿石还原性的测定方法》、GB/T 13240—2018《高炉用铁球团矿 自由膨胀指数的测定》、GB/T 13242—2017《铁矿石 低温粉化试验 静态还原后使用冷转鼓的方法》,分别测定成品球的还原度(RI)、还原膨胀率(RSI)及还原粉化指数(RDI)。

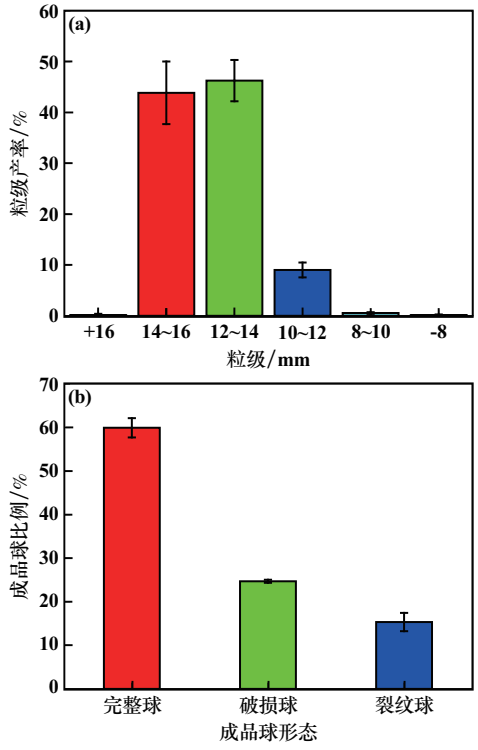
1.2.4　矿相分析

将试样切割并制备成平整试样,使用 Buehler Ecomet 250 Pro 型设备对试样进行打磨和抛光;采用蔡司光学显微镜(ZEISS AX10)观察试样组成与形貌特征。受光学显微镜分辨率和统计样本量的限制,本文未对试样晶粒尺寸、孔隙率等指标进行定量统计,而是基于每类样品 10 个视场的系统观察,归纳了赤铁矿结合形态的共性特征。相关定性描述与强度的关系已得到文献支持[15-17]。

2　试验结果与讨论

2.1　成品球粒级分布与各形态成品球比例

成品球粒级分布与各形态成品球比例见图 3。



(a) 成品球粒级分布;(b) 各形态成品球比例

图 3　成品球粒级分布与各形态成品球比例

Fig. 3　Size distribution of finished pellets and proportion of finished pellets in various morphologies

由图 3 可知,12 ~ 14 mm 粒级成品球占比达 46.27%,+16 mm、8 ~ 10 mm 及 -8 mm 粒级成品球占比均较低。从成品球形态构成来看,完整球比例为 59.95%,破损球和裂纹球比例分别为 24.71%和 15.35%。

2.2　成品球抗压强度

2.2.1　不同粒级完整球

表 2 为不同粒级完整球抗压强度。由表 2 可知,10 ~ 12 mm 粒级完整球平均抗压强度最低,仅为 2 385.63 N,且该组中强度低于 2 500 N 的试样累计比例高达 66.94%,表明其整体抗压能力相对较弱。相比之下,12 ~ 14 mm 和 14 ~ 16 mm 粒级的完整球平均抗压强度分别为 3 113.78 N 和 3 101.31 N,两者数值相近;同时,小于 2 500 N 的试样累计比例也大幅下降至 25%以下,说明较大粒级完整球的抗压性能更好。

表 2　不同粒级完整球抗压强度

Table 2　Crushing strengths of intact pellets with different sizes

粒级/mm	平均抗压强度/N	标准差/N	小于 2 500 N 累计比例/%
10 ~ 12	2 385.63	455.24	66.94
12 ~ 14	3 113.78	688.21	24.86
14 ~ 16	3 101.31	910.43	21.53

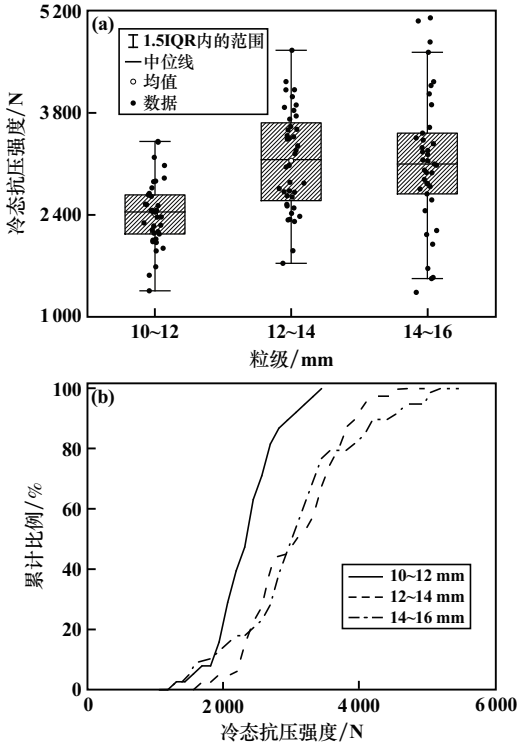
图 4 为不同粒级完整球抗压强度箱线图和直方累计频率分布图。由图 4 可知,14 ~ 16 mm 粒级完整球标准差相对较大,反映其强度数据分布较为分散,但从整体趋势判断,较大粒级完整球的抗压能力仍然较强。

2.2.2　不同形态成品球

本小节主要研究球团形态对成品球抗压强度的影响,需要排除粒级差异带来的干扰。12 ~ 14 mm 粒级球团在成品球中所占比例最高,因此,本节与后续涉及不同形态成品球的试验,均选取 12 ~ 14 mm 粒级球团作为研究对象,以保证不同球团性能比较的准确性和结果的可比性。

表 3 为不同形态成品球抗压强度。由表 3 可知,完整球平均抗压强度最高,且小于 2 500 N 的累计比例最低;破损球平均抗压强度略低,小于 2 500 N 累计比例上升至 50.43%;裂纹球平均抗压强度明显下降,仅为 2 050.61 N,且 77.56%的样本抗压强度不足 2 500 N。成品球的抗压强度与其结构完整性密切相关,完整球承载能力更好,裂纹球因表面存在明显裂纹,其抗压强度显著降低。表面裂纹是影响成品球抗压强度的关键因素。

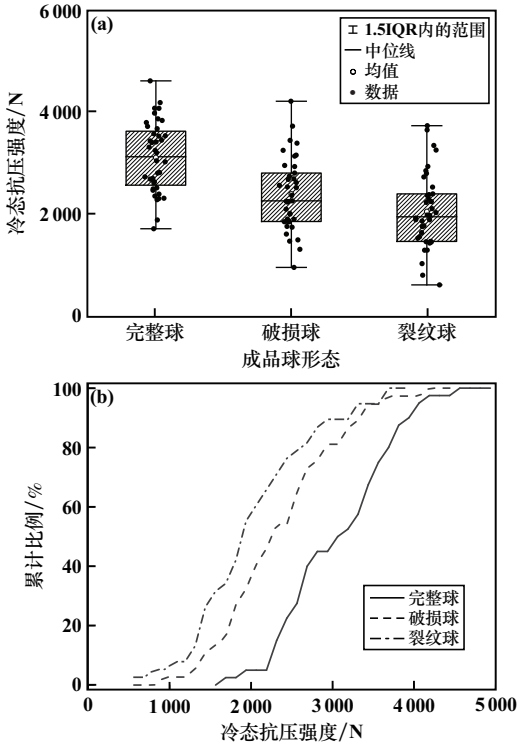
图 5 为不同形态成品球抗压强度箱线图与直方累计频率分布图。由图 5 可知,虽然各形态成品球抗压强度的标准差较为接近,但从直方累计频率分布图可以看出,不同形态成品球的抗压强度存在显著差异。



(a) 箱线图; (b) 直方累计频率分布图

图 4 不同粒级完整球抗压强度箱线图与直方累计频率分布图

Fig. 4 Box plot and cumulative frequency histogram of crushing strength of intact pellets with different sizes



(a) 箱线图; (b) 直方累计频率分布图

图 5 不同形态成品球抗压强度箱线图与直方累计频率分布图

Fig. 5 Box plot and cumulative frequency histogram of crushing strengths of finished pellets with different morphologies

表 3 不同形态成品球抗压强度

Table 3 Crushing strengths of finished pellets with different morphologies

形态	平均抗压强度/N	标准差/N	小于 2 500 N 累计比例/%
完整球	3 113.78	688.21	24.86
破损球	2 393.64	718.13	50.43
裂纹球	2 050.61	742.23	77.56

2.3 成品球冶金性能

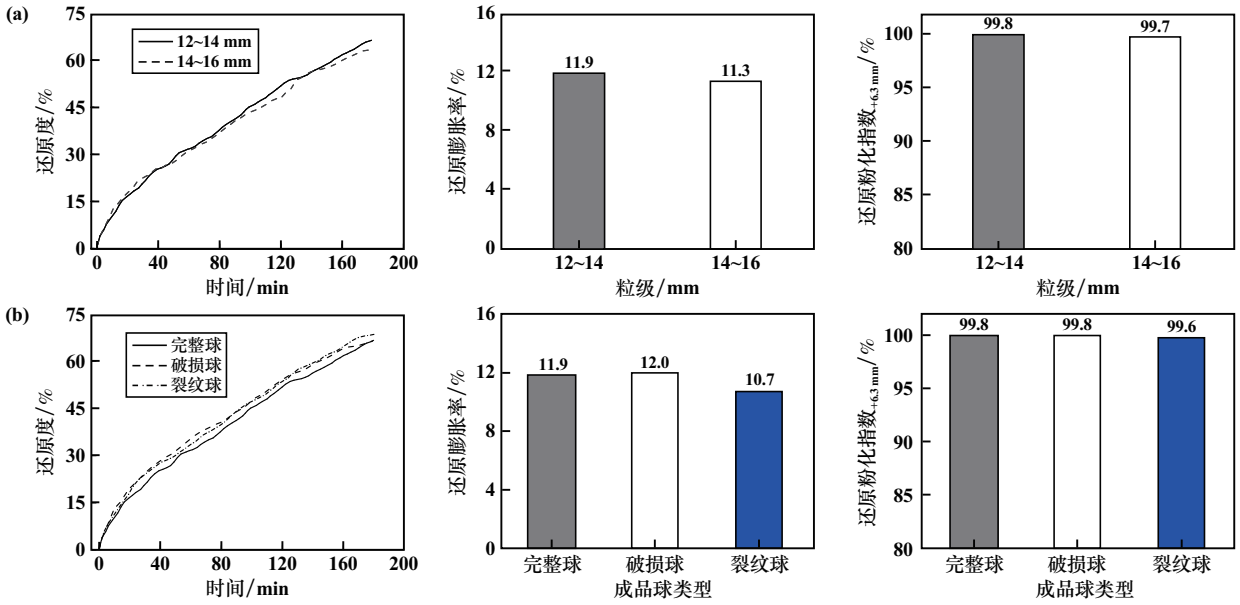
图 6 为不同粒级完整球与不同形态成品球冶金性能。由图 6 可知,12~14 mm 粒级完整球还原度略高于14~16 mm 粒级完整球,这与文献[12-13]的研究究结论一致,核心原因是大粒级球团内部气体扩散路径更长,对还原进程的抑制作用更显著;不同粒级完整球的还原膨胀率、还原粉化指数均无显著差异。

破损球与裂纹球在还原前期速率显著高于完整球,最终还原度则与完整球相差不大,且三者还原膨胀率、还原粉化指数无明显差异。从机理层面分析,破损球与裂纹球表面和内部缺陷结构增大了反应比表面积,缩短了气体内扩散路径,提升了初期反应活性;而还原后期反应转为内扩散控制,固态产物层的扩散阻力成为反应限速步骤,因此各样品还原度最终收敛。其中裂纹球还原膨胀率略低,可能源于内部裂纹为铁氧化物相变的体积膨胀提供了缓冲空间。

尽管破损球与裂纹球在实验室静态条件下还原性略优,但在高炉实际工况中仍存在 3 类风险:① 破损球流动性差,易嵌合降低料层孔隙率,承压后则会二次破碎产粉,裂纹球则易裂化解体,这均会恶化料柱透气性;② 炉内应力、摩擦等耦合作用会显著加剧缺陷球的粉化产尘;③ 缺陷球力学性能劣化会完全抵消初期的还原优势,引发局部还原不均、气固接触效率下降。因此,为保障高炉顺行稳定,必须控制破损球与裂纹球的入炉比例。

2.4 成品球 FeO 含量

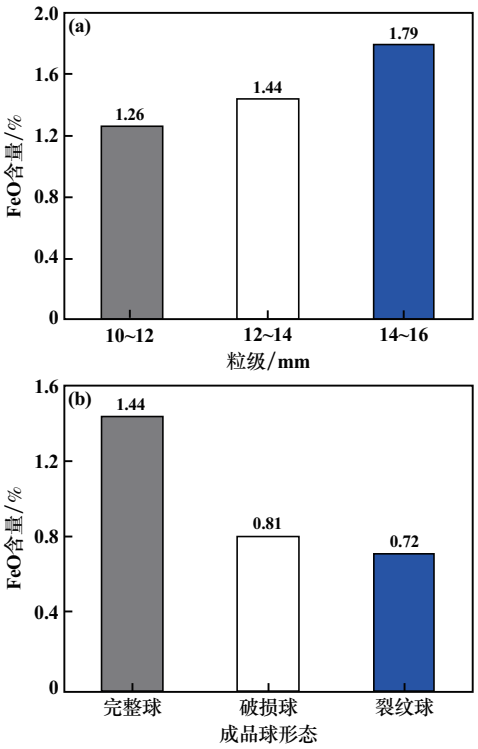
图 7 为不同粒级完整球与不同形态成品球 FeO 含量。由图 7 可知,完整球粒级越大,FeO 含量越高,该趋势与文献[12]研究结果一致。这一现象可从氧化焙烧动力学角度解释,在相同焙烧温度和焙烧时间条件下,大粒级球团内部的热传导效率较低,热传递阻力大,球团核心区域达到完全氧化所需温度的时间滞后,使得其内部磁铁矿难以彻底完成向赤铁矿的氧化相变,从而残留 FeO 含量较高[13]。从成品球形态来看,破损球与裂纹球因存在结构缺陷,为氧气提供了额



(a) 不同粒级完整球还原度曲线、还原膨胀率、还原粉化指数;(b) 不同形态成品球还原度曲线、还原膨胀率、还原粉化指数

图 6　不同粒级完整球与不同形态成品球冶金性能

Fig. 6　Metallurgical properties of intact pellets with different sizes and finished pellets with different morphologies



(a) 不同粒级完整球 FeO 含量;(b) 不同形态成品球 FeO 含量

图 7　不同粒级完整球与不同形态成品球 FeO 含量

Fig. 7　FeO content of intact pellets with different sizes and finished pellets with different morphologies

外的扩散通道,促进了内部磁铁矿的氧化,从而降低了残余 FeO 含量。

FeO 含量的高低决定了球团中磁铁矿与赤铁矿的相对比例,较低的 FeO 含量通常意味着氧化更完全、赤铁矿比例更高。而赤铁矿直接还原速度快于磁铁矿,这有助于解释图 6 中破损球与裂纹球在还原初期表现出的还原速率优势,赤铁矿直接还原为磁铁矿的步骤更快,且缺陷结构提供了更多的反应活性位点。

2.5　矿相分析

2.5.1　不同抗压强度完整球微观结构

为比较不同抗压强度等级完整球的受力破坏行为,根据完整球抗压强度分布,将试样划分为高强度完整球(>4 000 N)、中强度完整球(1 500~4 000 N)和低强度完整球(<1 500 N)。以高、中、低三种典型强度球团为案例,选取具有代表性的试样进行抗压试验,其试验力-时间曲线如图 8 所示,S1、S2、S3 分别代表高强度完整球、中强度完整球、低强度完整球。所选 S1、S2 和 S3 试样

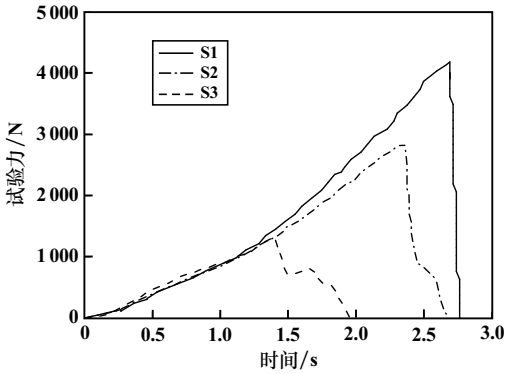
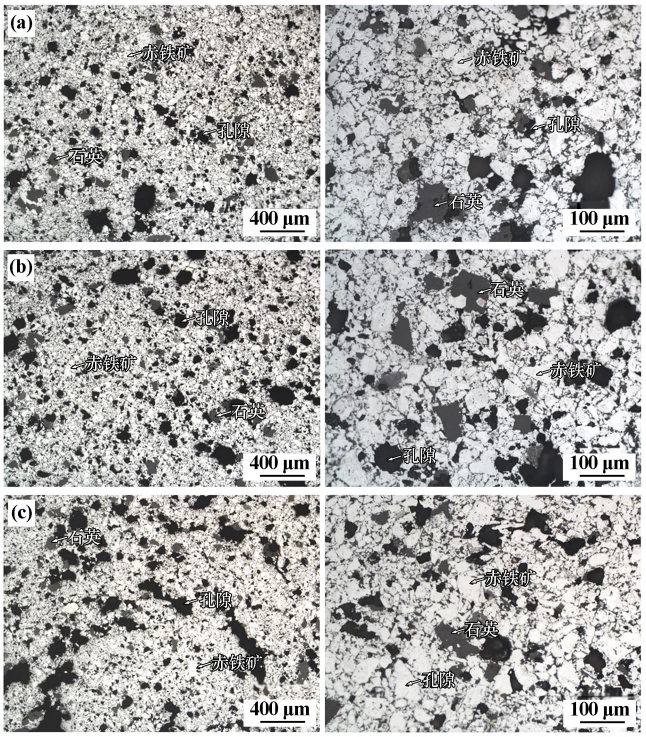


图 8　不同抗压强度完整球试验力-时间曲线

Fig. 8　Force-time curve of intact pellets with different crushing strengths

的峰值载荷分别为 4 185 N、2 864 N 和 1 323 N，均处于所对应的强度区间，能够较好表征高、中、低 3 种典型强度完整球的受力及破坏特征。由图 8 可知，0~2.7 s 区间内，S1 试样曲线为典型的陡直单峰，呈现脆性瞬时断裂特征。S2 试样曲线在 0~2.36 s 持续上升，峰值为 2 864 N，峰值后载荷突降，载荷突降代表局部裂纹失稳扩张，对应裂纹间歇扩展。S3 试样曲线在 1.41 s 达到峰值载荷 1 323 N，峰值后未快速跌落，于 1.41~1.96 s 平缓回落至 0，属于渐进式压溃破坏。

不同抗压强度完整球典型矿相结构见图 9。由图 9 可知，S1 试样内部赤铁矿晶粒间结合紧密、孔隙分布均匀，可有效延缓裂纹产生与扩展，承载极限更高；当载荷超过临界值后，裂纹则会快速贯通整体试样，发生瞬间失效[14]。S2 试样局部存在大孔薄弱结构区域，裂纹扩展至该区域时发生停滞、偏转，最终形成了阶梯式破坏形态。S3 试样晶粒间结合较弱，球团内部存在同心环带状结构裂纹。在荷载作用下，同心环带内片状晶粒易沿裂纹发生滑移分离；因裂纹扩展阻力较低，损伤持续累积发展，最终宏观上表现出近似韧性的缓慢压溃力学行为。



(a) S1；(b) S2；(c) S3

图 9 不同抗压强度完整球典型矿相结构

Fig. 9 Typical mineral phase structures of intact pellets with different crushing strengths

2.5.2 不同粒级完整球微观结构

图 10 为不同粒级完整球微观结构。由图 10 可

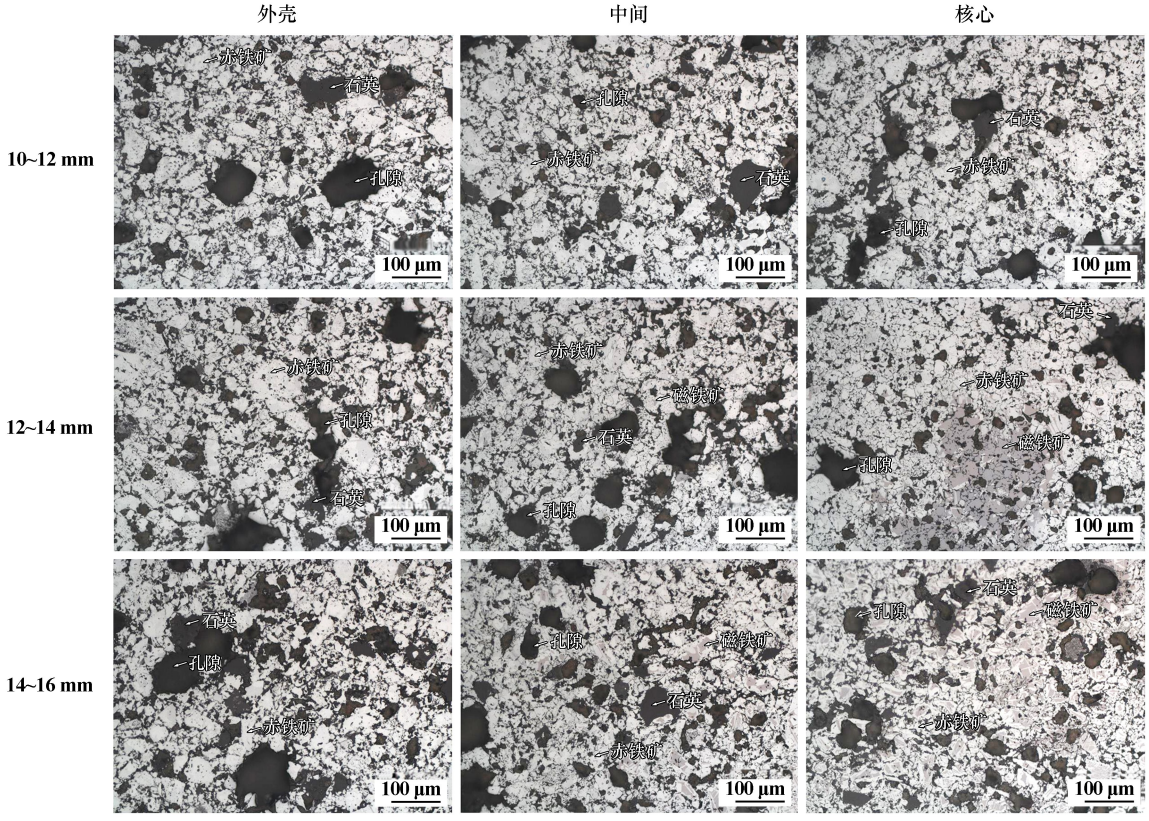


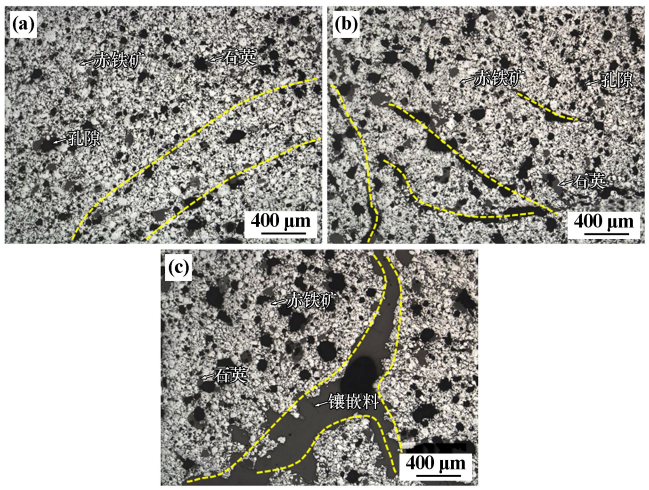
图 10 不同粒级完整球微观结构

Fig. 10 Microstructure of intact pellets with different sizes

知,10~12 mm 粒级球团磁铁矿含量较低,赤铁矿从外壳层至核心层均匀分布[16];12~14 mm 粒级球团核心区域出现少量磁铁矿;14~16 mm 粒级球团的中间层与核心层均可见磁铁矿。各粒级球团赤铁矿结晶形态无明显区别。微观结构特征能够解释完整球抗压强度随粒级增大而升高的规律,该现象主要来源于球团尺寸效应。14~16 mm 粒级球团内部(尤其是中间层与核心层)组分分布不均,同时,大粒径球团在生球的制备与焙烧过程中更易产生类同心环带裂纹,造成球团内部结构整体性下降[17],最终表现为该粒级完整球力学测试数据离散程度更高。

2.5.3　不同形态成品球微观结构

图 11 为不同形态成品球微观结构。由图 11 可知,不同形态球团的矿物组成未发生明显变化,说明形态差异并非由矿物相组成引起,主要与成球过程中的结构完整性有关。完整球内部组织连续性较好,赤铁矿晶粒排列较为均匀,孔隙分布相对合理;破损球由于受到外力作用产生局部断裂,内部连续结构受到破坏,并伴随局部微裂纹形成;裂纹球则表现出明显裂纹贯穿和断裂带发育特征,裂纹成为其承载能力下降的主要因素。



(a) 完整球;(b) 破损球;(c) 裂纹球

图 11　不同形态成品球微观结构

Fig. 11　Microstructures of finished pellets with different macro morphologies

3　结论

1) 成品球粒级集中于 12~16 mm(占比大于 90%),完整球占比 59.95%,破损球和裂纹球占比分别为 24.71%和 15.35%。除控制粒级外,提升球团结构完整性是优化产品质量均匀性的关键。

2) 完整球抗压强度总体随粒级增大而升高;在相同粒级(12~14 mm)下,宏观形态取代粒级成为主导因素,完整球抗压强度最高(3 113.78 N),裂纹球因表面缺陷抗压强度骤降(2 050.61 N)。微观分析结果表明,高强度球团内部赤铁矿晶粒结合程度高,孔隙分布均匀;而低强度球团中赤铁矿晶粒结合程度差,孔隙率高,微裂纹多。此外,较大粒级完整球因氧化不完全,FeO 含量偏高,核心残留磁铁矿较多,内部结构均匀性较差。

3) 不同粒级完整球的还原度差异不显著,同粒级下破损球与裂纹球前期还原速度较快,但最终还原度与完整球趋同,还原膨胀率和抗粉化性能无明显差异。从高炉顺行角度考量,破损球与裂纹球力学性能较差,在炉内应力与磨损作用下易产生粉末,恶化料柱透气性,为保障高炉稳定运行,应严控其入炉比例。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] Bhagat R P. Agglomeration of iron ores[M]. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2019.

[3] 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.

[4] Jing T, Lv H, Gan M, et al. A new insight into iron ore oxidized pellets prepared by steel belt roasting process[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024,31(12):2903-2914.

[5] Dave S, Harichandan B, Banerjee G, et al. A novel OpenFOAM-based approach for numerical modeling of straight-grate pellet induration furnace[J]. JOM, 2025,77(9):6941-6956.

[6] Lalam S, Jana A K, Dwarapudi S. Formulating iron ore pellet induration process in an industrial straight grate system: real-time experimentation and validation[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024,55:102928.

[7] 唐国成,黄细聪,路漫漫,等. 低质含镁原料制备碱性球团试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):217-222.
Tang Guocheng, Huang Xicong, Lu Manman, et al. Experimental study on preparation of alkaline pellets with low-quality magnesium-containing raw materials[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):217-222.

[8] Kawatra S K, Claremboux V. Iron ore pelletization: part I. fundamentals[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2022, 43(4):529-544.

(下转第 214 页)

Cai Chaojun, Hua Yixin, Liang Duoqiang. Studies on non-isothermal kinetics of reaction of copper sulfide concentrate[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2004,29(6):22-26.

[6] 陈雯,丘克强. 硫化铜精矿硫酸化焙烧的热力学分析[J]. 昆明工学院学报, 1989,14(1):48-53.
Chen Wen, Qiu Keqiang. The thermodynamic analysis of copper sulfide concentrate in the process of sulphatizing roasting[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Sciences), 1989,14(1):48-53.

[7] 庞丹丹,姜琴,崔传发. 响应曲面法优化金绿宝石型铍矿中铍浸出率实验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):123-129.
Pang Dandan, Jiang Qin, Cui Chuanfa. Experimental study on improving leaching rate of beryllium from chrysoberyl by response surface methodology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):123-129.

[8] 欧乐明,邓颖,符海桃,等. 响应曲面法优化某低品位锡石浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):175-180.
Ou Leming, Deng Ying, Fu Haitao, et al. Optimization of low-grade cassiterite flotation by response surface methodology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):175-180.

[9] 唐正鹏,郭建维,李帅,等. 响应曲面法优化硅孔雀石中钴的还原浸出[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):108-113.
Tang Zhengpeng, Guo Jianwei, Li Shuai, et al. Optimization of reductive leaching of cobalt from chrysocolla by response surface methodology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):108-113.

[10] 徐文涛,周振华,杨帅峰,等. 基于焙烧-浸出工艺从某硫精矿中回收铜、钴[J]. 中国冶金, 2025,35(4):132-144.
Xu Wentao, Zhou Zhenhua, Yang Shuaifeng, et al. Copper and cobalt are recovered from a sulphur concentrate based on a roasting-leaching process[J]. China Metallurgy, 2025,35(4):132-144.

[11] Gayratov B, Gayratov B, Godirilwe L L, et al. Copper recovery from copper sulfide ore by combined method of collectorless flotation and additive roasting followed by acid leaching[J]. ChemEngineering, 2025,9(6):117.

引用本文:罗星,赵富城,贾康乐,等. 基于响应曲面法的高铜低硫精矿焙烧参数优化模型[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):210-214.
Luo Xing, Zhao Fucheng, Jia Kangle, et al. Optimization model for roasting parameters of high-copper low-sulfur concentrate based on response surface methodology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):210-214.

(上接第209页)

[9] Cao F, Gan M, Fan X H, et al. Energy consumption optimization model and system for the pellet drying process of straight grate[J]. Drying Technology, 2024,42(8):1357-1369.

[10] Umadevi T, Kumar P M, Lobo N F, et al. Effect of iron ore pellet size on its properties and microstructure[J]. Steel Research International, 2009,80(10):709-716.

[11] Dwarapudi S, Devi T U, Rao S M, et al. Influence of pellet size on quality and microstructure of iron ore pellets[J]. ISIJ International, 2008,48(6):768-776.

[12] Iljana M, Paananen T, Mattila O, et al. Effect of iron ore pellet size on metallurgical properties[J]. Metals, 2022,12(2):302.

[13] Pal J, Ghoari S, Ammasi A, et al. Improving reducibility of iron ore pellets by optimization of physical parameters[J]. Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy, 2017,53(1):37-46.

[14] 张国成,罗果萍,宋巍. 改善预热球团矿抗压强度的工艺优化[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):91-96.
Zhang Guocheng, Luo Guoping, Song Wei. Process optimization for improving compressive strength of preheated pellets[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):91-96.

[15] Umadevi T, Lobo N F, Desai S, et al. Optimization of firing temperature for hematite pellets[J]. ISIJ International, 2013,53(9):1673-1682.

[16] Meyer M, Lagoeiro L E, Graça L M, et al. Phase and microstructural characterization of iron ore pellet and their relation with cold crushing strength test[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2016,37(5):295-304.

[17] Prasad R, Soren S, Kumaraswamidhas L A, et al. Experimental investigation of different fineness and firing temperatures on pellets properties of different iron ore fines from Indian mines[J]. Materials, 2022,15(12):4220.

引用本文:温宝良,刘英才,宋灿阳,等. 粒级与宏观形态对带式焙烧机球团性能的影响[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):203-209.
Wen Baoliang, Liu Yingcai, Song Canyang, et al. Effects of particle size and macro morphology on pellet properties of straight-grate induration machine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):203-209.