非等温还原条件下氧化球团热态强度演变及结构转变

李圣辉[1]，周江虹[1]，杨 涛[2]
（1. 宝武资源有限公司，上海 200126；2. 安徽工业大学 a. 冶金工程学院；b. 冶金工程与资源综合利用安徽省重点实验室，安徽 马鞍山 243002）

摘要：在“双碳”战略背景下，提高炉料中球团配比是钢铁行业实现低碳转型的关键途径。球团在高炉内的结构稳定性对其冶炼性能及运行效率至关重要，然而传统基于冷态抗压强度的评价方法难以准确反映其在高温还原环境中的真实力学行为。为此，本研究利用自主开发的原位实验平台，系统考察了氧化球团在非等温还原过程中的热态抗压强度演变规律。结果表明，球团热态强度与还原进程显著相关，整体随还原反应的推进而下降，由 500 ℃时的 2 632.4 N/P 快速降至 1 050 ℃时的 320.2 N/P，该变化主要源于不同还原阶段物相转变所引起的结构演化。在还原前期，强度下降尤为显著，此阶段 Fe_2O_3 向 Fe_3O_4 转变过程伴随剧烈体积膨胀，导致连晶结构破坏并生成大量孔隙。值得注意的是，在 900 ℃时，低熔点液相的生成促进了颗粒间桥联结构的形成，从而增强了局部结构的稳定性，使热态强度出现阶段性回升。进入还原后期，金属 Fe 的生成及其连晶生长进一步强化了颗粒间的桥联作用，但高温软化效应限制了热态强度的提升。本研究系统阐明了球团在高炉冶炼条件下的力学行为及结构演化规律，论证了采用热态抗压强度进行评价的必要性，为高炉实现高球团配比的稳定冶炼提供了理论支撑。

关键词：球团；热态强度；还原；非等温；物相转变
中图分类号：TF046.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)03－0082－08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.050

Evolution of thermal strength and structural transformation of oxidized pellets under non-isothermal reduction conditions

LI Shenghui[1], ZHOU Jianghong[1], YANG Tao[2]
(1. Baowu Resources Co., Ltd., Shanghai 200126, China; 2. Anhui University of Technology a. School of Metallurgical Engineering, b. Anhui Provincial Key Laboratory of Metallurgical Engineering and Comprehensive Utilization of Resources, Ma'anshan 243002, Anhui, China)

Abstract: In the context of the "dual carbon" strategy, increasing the ratio of pellets in furnace charges is the key way to achieve low-carbon transformation in the steel industry. The structural stability of pellets inside the blast furnace is crucial for their smelting performance and operational efficiency. However, traditional evaluation methods based on cold-state compressive strength struggle to accurately reflect their true mechanical behavior in high-temperature reduction environments. Therefore, a self-developed in-situ experimental platform is used to systematically investigate the evolution law of thermal compressive strength of oxidized pellets during non-isothermal reduction process. The results indicate that the thermal strength of the pellets is significantly correlated with the reduction process. Overall, the decrease decreases with the advancement of the reduction reaction, dropping rapidly from 2 632.4 N/P at 500 ℃ to 320.2 N/P at 1 050 ℃, mainly due to structural evolution caused by phase transitions at different reduction stages. In the early stages of reduction, the

收稿日期：2025－12－16；**修回日期**：2026－02－12
基金项目：安徽省自然科学基金青年项目(A 类延续资助)(2508085JX007)
作者简介：李圣辉(1986—)，男，硕士研究生，工程师，从事低碳冶金方面的研究。
通信作者：杨 涛(1996—)，男，博士，从事低碳炼铁、冶金固废资源化方面的研究。

decrease in strength is particularly significant. During this phase, the transformation of Fe_2O_3 to Fe_3O_4 is accompanied by a substantial increase in volume, which leads to the breakdown of the intergranular structure and the formation of a large number of pores. It is worth noting that at 900 ℃, the formation of low-melting-point liquid phase promotes the formation of interparticle bridging structures, thereby enhancing local structural stability and causing a temporary rebound in thermal strength. In the late reduction stage, the formation of metallic Fe and its intercrystallization further strengthen the bridging between particles, but the high-temperature softening effect limits the improvement of thermal strength. The mechanical behavior and structural evolution laws of pellets are systematically clarified under blast furnace smelting conditions, the necessity of evaluating thermal compressive strength is demonstrated, and theoretical support for stable smelting with high pellet ratios in blast furnaces is provided.

Key words: pellets; thermal strength; reduction; non-isothermal; phase transition

钢铁工业作为典型的资源与能源消耗密集型行业，碳排放强度高、总量大，是落实国家“双碳”战略的重点领域。据统计，钢铁行业碳排放约占全国总排放量的 16% 左右。其中，高炉炼铁工序作为长流程炼铁工艺的核心环节，由于大量消耗焦炭和喷吹煤粉，其碳排放占整个流程的 70% 以上[1]，具有显著的减排潜力。因此，炼铁工艺路径的优化与变革，既是钢铁行业实现绿色低碳转型的必然要求，也是国家落实‘双碳’战略的重要抓手。

在多种低碳炼铁路径中，提高球团矿在高炉炉料结构中的配比被认为是短期内切实可行且减碳效果显著的重要途径之一[2-3]。球团矿具有原料均匀、成分易控、机械强度高等特点，可改善炉料透气性和冶金性能，有利于促进高炉稳定高效运行。然而，随着球团矿在高炉炉料中配比的不断提高，高炉运行的稳定性和工艺控制也面临新的挑战[4]。球团的强度、还原性、还原膨胀行为等关键冶金性能，尤其是在高温还原过程中的热态抗压强度，直接影响炉内料柱的结构稳定性、气体通透性以及整体还原效率。球团在高温条件下若结构稳定性不足，极易在还原带发生粉化、破碎或塌陷[5-6]，产生细粉并阻塞气流通道，导致透气性下降，严重时甚至可能引发崩料等运行事故。因此，明确球团在高温还原过程中的力学行为，对于高炉高配比球团冶炼工艺具有重要意义。

大量研究证实，球团的矿物组成、孔隙结构及熔体特性是决定其力学性能的关键因素[7-9]。如 DWARAPUDI 等[10]的研究进一步表明，赤铁矿含量、孔隙率以及硅酸盐熔体的数量与空间分布，对球团的高温强度具有决定性影响。韩涛等[11]考察了不同粒度条件下的球团性能，结果表明，随着球团粒度增大，内部固相比例增加、孔隙率降低，晶体结合更为紧密，从而提高了致密性和抗压强度。然而，粒度过大（ > 16 mm）会降低还原速度。为了改善球团在高温下的结构稳定性，研究者从液相调控、热工制度优化以及富氢气氛还原等方面展开了大量探索。温宝良等[12]研究了高镁含硼磁铁精矿配比对球团强度的影响，结果显示，提高其添加比例能够促进尖晶石型镁铁氧体的生成，改善赤铁矿晶粒形貌，形成更加稳定的“赤铁矿—尖晶石型镁铁氧体”结构，从而显著提升球团强度。胡鹏等[13]和曹鹏飞等[14]的研究认为，提高碱度可促进硅酸盐、铁酸盐及钙钛矿等液相的生成，降低球团孔隙率并增强强度；而 GUO 等[15]研究则指出，提高 SiO_2 含量虽可促进熔体生成，但可能导致形成大量低熔点熔体（如 $2FeO·SiO_2$），从而抑制 FeO 的还原及还原气体向内部扩散。此外，VITIKKA 等[16]的研究进一步表明，球团在赤铁矿向磁铁矿和浮氏体转变阶段强度急剧下降，而当浮氏体还原为金属铁后强度又显著回升，表明相变过程对结构演化具有决定性影响。HUANG 等[17]亦从物相转变与结构变化的角度对此进行了进一步解释。但需要指出的是，上述工作主要集中于球团还原前后的冷态强度，且大多基于等温条件，其结果难以充分反映高炉连续升温及阶段性气氛变化下球团热态强度的真实演变行为。

基于此，本研究以氧化球团为对象，系统考察了非等温还原条件下球团的热态抗压强度，揭示其演变规律及破坏机制。研究结果可为高炉高

配比球团冶炼提供理论依据和数据支撑，并为低碳炼铁技术的推广应用提供参考。

1 原料性能与试验方法

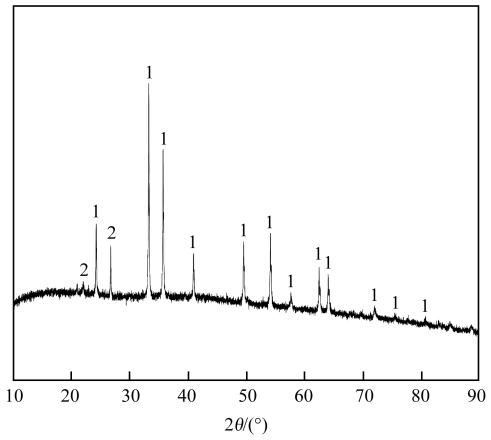
1.1 原料性能

试验原料主要包括实验室制备的氧化球团及还原气体。球团主要化学组成如表 1 所示。由表 1 可知，该球团 $w(\mathrm{TFe})$ 为 62.20%，经氧化焙烧处理后，主要以 Fe_2O_3 形式存在，其 FeO 含量较低。同时，$w(SiO_2)$ 较高，为 8.49%。球团 XRD 分析如图 1 所示。由图 1 可知，该球团主要由 Fe_2O_3 和少量 SiO_2 构成，其 XRD 结果与化学组成特征一致。试验所用球团经筛分，粒度为(12 ± 0.5) mm，平均抗压强度为 2 738.0 N/P。还原气体包括 CO、CO_2 和 N_2，纯度为 99.99%。

表 1 氧化球团主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of oxidized pellets %

TFe	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3
62.20	0.95	0.22	8.49	0.40	0.49



1—Fe_2O_3；2—SiO_2。

图 1 氧化球团 XRD 分析

Fig. 1 XRD analysis of oxidized pellets

1.2 试验方法

1.2.1 球团制备

氧化球团在实验室条件下制备，制备中将磁铁矿原料与膨润土充分混匀，混合料水分控制在(7.5 ± 0.2)%。造球试验采用直径为 1 000 mm、边高为 200 mm 的圆盘造球机进行，圆盘倾角为 45°、转速为 25 r/min、造球时间控制在 15 min。适宜尺寸的生球在 105 ℃烘箱中烘干 12 h，在空气气氛下通过两段卧式炉完成预热与焙烧。预热焙烧制度：预热温度为 950 ℃、时间为 18 min；焙烧温度为 1 250 ℃、时间为 20 min。焙烧后得到测试用氧化球团，随机选取 12 个焙烧球团进行抗压强度测定。

1.2.2 热态强度

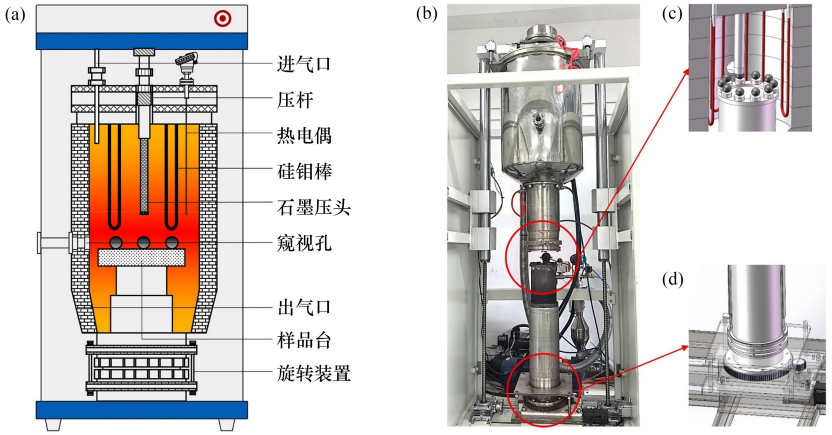
热态强度试验采用自主研发的冶金炉料高温抗压强度试验参数及可视化在线检测装置分别如表 2 和图 2 所示。该装置可在不同气氛、升温速率与还原温度下，实现球团热态强度、应力曲线及形貌演化的实时监测。试验步骤：选取符合要求的球团样品置于旋转试样盘上，试样盘设有 10 个均匀分布的测试位置，底部配有透气孔，以确保还原气体能够充分与球团接触。

试验流程：在 N_2 保护气氛(流量为 5 L/min)下，以设定升温速率加热球团至目标温度，温度稳定后切换为预设成分的还原气体，开展非等温还原试验，不同还原阶段的温度和气氛等参数见表 2[18]。为确保测试准确性，在热态强度测试开始前，系统启动真空抽气并迅速通入 N_2 冲洗，整个过程在 30 s 内完成，以快速终止还原反应。随后触发热态抗压强度测试程序，对还原球团的力学性能进行测定。同时，试样盘可自动旋转，每轮测试结束后，传动单元以 36°/s 的速度驱动样品托盘逆时针旋转，完成样品切换，继续下一轮测试，最终实现 10 个球团的连续、高效热态强度测试。每轮测试结束后，回收还原球团样品，用于进一步分析其还原度、物相组成及显微结构。

表 2 非等温还原热态强度试验参数

Table 2 Experimental parameters for hot strength testing under non-isothermal reduction

阶段	升温速率/(℃·min^{-1})	温度范围/℃	还原气氛(体积分数)/%		
			CO	CO_2	N_2
1	10	500 ~ 600	17	23	60
2	10	600 ~ 700	20	20	60
3	10	700 ~ 800	23	17	60
4	10	800 ~ 900	26	14	60
5	2	900 ~ 950	29	11	60
6	2	950 ~ 1 000	33	7	60
7	2	1 000 ~ 1 050	37	3	60



（a）整体结构示意；（b）实体装置；（c）球盘局部示意；（d）传动机构局部示意

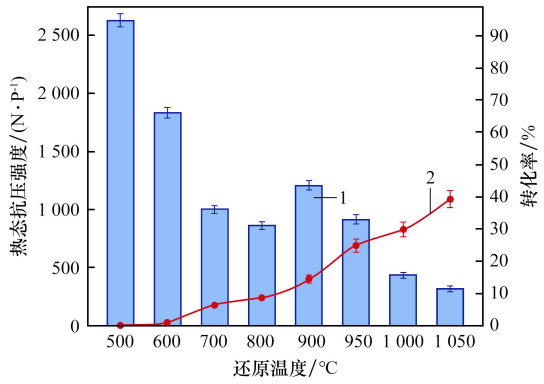
图 2　冶金炉料高温性能在线测试装置

Fig. 2　High-temperature performance testing platform for metallurgical burden

2　结果与讨论

2.1　非等温还原过程热态抗压强度

非等温还原条件下氧化球团的热态抗压强度及还原转化率变化如图 3 所示。由图 3 可知，随着还原反应的推进，球团的热态抗压强度整体呈下降趋势，而还原转化率则逐渐升高，二者表现出明显的负相关。在低温阶段(500 ~ 800 ℃)，球团还原速率较低，800 ℃时转化率仅为 8.73%。此时，球团热态抗压强度由 2 632.4 N/P 快速下降至 864.1 N/P，其中 500 ~ 700 ℃区间强度下降尤为显著，而在 700 ~ 800 ℃阶段下降幅度有所减缓。值得注意的是，焙烧后氧化球团的冷态抗压强度为 2 738.0 N/P，而初始热态抗压强度(随炉升温至 500 ℃、尚未发生还原反应)为 2 632.4 N/P，略低于焙烧球团强度，这可能与加热过程中的热应力作用有关。当温度升至 900 ℃时，球团热态抗压强度出现明显回升，达到 1 212.2 N/P，表明在该温度区间球团内部结构发生了有利于承载能力提升的变化。随着温度进一步升高，球团强度再次下降，并在 1 000 ~ 1 050 ℃区间趋于相对稳定。至 1 050 ℃时，球团热态抗压强度降至 320.2 N/P，对应的最终还原转化率为 39.21%。这一结果表明，在高温还原阶段，球团结构持续劣化，其承载能力显著降低。



1—热态强度；2—还原转化率。

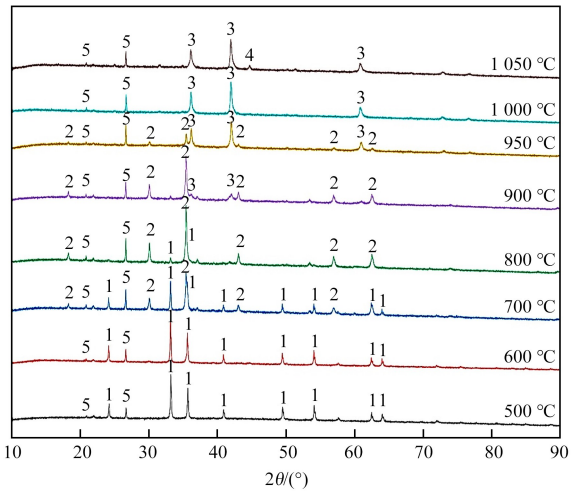
图 3　氧化球团热态抗压强度及转化率随还原温度的变化

Fig. 3　Variation of compressive strength and conversion rate of pellets with reduction temperature

2.2　氧化球团热态抗压强度演变机理分析

2.2.1　还原过程物相组成分析

氧化球团在非等温还原过程中的 XRD 图谱如图 4 所示。由图 4 可知，球团在还原过程中主要经历了 Fe_2O_3、Fe_3O_4、FeO 及金属 Fe 等物相的逐步转化，同时伴随脉石矿物 SiO_2 的存在。在未还原状态下，氧化球团的主要物相为 Fe_2O_3 和 SiO_2，这是由于在预热与焙烧过程中，磁铁矿的 Fe_3O_4 已基本完全氧化。随着还原反应的进行，Fe_2O_3 逐步向低价铁氧化物转化。低温阶段(500 ~ 700 ℃)还原速率较慢，XRD 图谱中未观察到明显的新物相生成，Fe_2O_3 仍为主导相；当温度升至 700 ℃时，出现少量 Fe_3O_4 特征峰，表明还原反应开始加快。至 900 ℃时，Fe_2O_3 基本消失，球团中以 Fe_3O_4 和 FeO 为主要物相，并出现少量 $2FeO·SiO_2$ 特征峰，由于其生成量较低，在 XRD 图谱中表现并不明显；随着温度进一步升高，还原反应持续



1—Fe_2O_3；2—Fe_3O_4；3—FeO；4—Fe；5—SiO_2。

图 4 氧化球团在还原过程中的物相转变

Fig. 4 XRD patterns of oxidized pellets during reduction

推进，在 1 050 ℃时开始检测到金属 Fe 的生成。

上述物相演变过程与球团热态抗压强度的变化具有显著对应关系。在 Fe_2O_3 主导阶段，由于晶体结构较为稳定，球团能够保持较高的热态强度；进入 Fe_3O_4 和 FeO 阶段后，相变伴随的体积效应及结构孔隙化导致球团内部结构显著削弱，热态抗压强度明显下降。同时，FeO 和 SiO_2 结合生成低熔点液相，填充颗粒间孔隙，球团结构致密化，强度有所回升；当金属 Fe 开始生成后，颗粒间逐渐形成桥联结构，使球团结构趋于稳定，并表现出一定的韧性结合特征。然而，在高温条件下，金属 Fe 易发生软化，其作为黏结相对强度的提升作用有限，未能显著改善球团的承载能力。

2.2.2 高温形貌及应力－时间响应分析

球团在不同还原阶段高温压缩过程中的应力响应特征及宏观破坏形貌演变如图 5 所示。图中左侧为球团的应力－时间曲线，右侧为对应的压缩破坏形貌。从图 5 可以看出，球团的高温压缩过程可划分为接触、压缩、断裂和终止 4 个典型阶段。结合应力曲线演化特征与破坏形貌变化，可归纳其破坏行为规律如下。

在还原初期，试样在接触加载后应力迅速上升至峰值，几乎未发生明显形变便发生断裂，峰值之后应力瞬间降至 0 N/P，表现出典型的脆性（刚性）破坏特征。例如，在 600 ℃条件下，球团强度迅速提升至 1 706.9 N/P 后即发生瞬时失效。此阶段球团主要由 Fe_2O_3 连晶结构构成，颗粒结合紧密、塑性变形能力有限，当外加载荷超过结构承载极限时即发生整体崩塌。

随着还原反应的推进，Fe_2O_3 逐步向 Fe_3O_4 和 FeO 转化，相变过程伴随体积效应，使球团内部逐渐产生微裂纹与孔隙。在压缩加载过程中，裂纹逐渐产生并扩展，但球团仍具一定承载能力。此时，应力曲线在达到峰值后不再出现骤降，而是呈现平台或缓慢下降的斜坡段，反映出应力逐步释放和延迟失效的特征，表明破坏模式由脆性

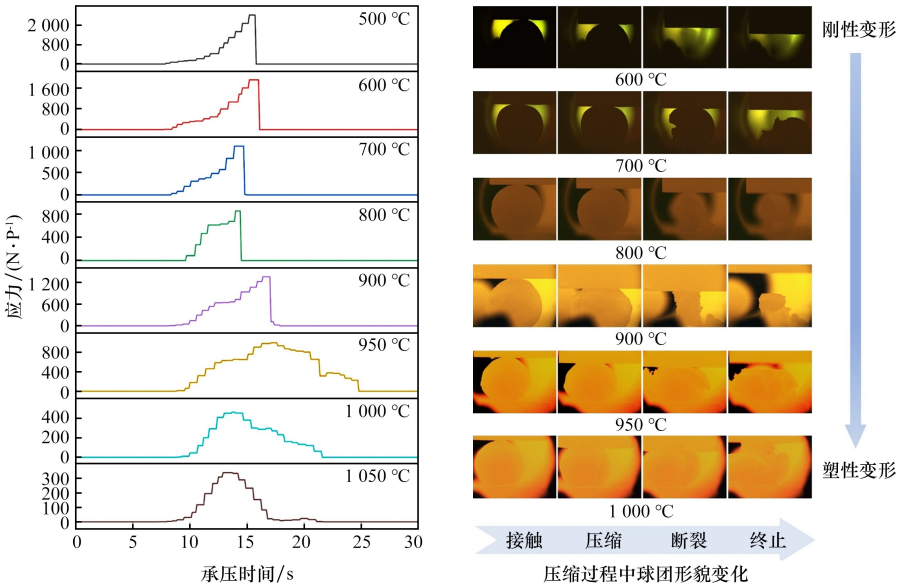


图 5 非等温还原过程中氧化球团在压缩载荷下的应力曲线及失效机制

Fig. 5 Stress curve and failure mechanism of oxidized pellets during non-isothermal reduction

向韧性过渡。

在还原后期，随着温度进一步升高，部分低熔点液相及金属 Fe 生成，并在颗粒表面形成桥联结构，增强了颗粒间的韧性连接能力。对应的应力曲线中，峰值之后应力不再瞬时衰减，而是呈现逐步下降的趋势，如 950 ~ 1 050 ℃条件下的样品所示。这表明球团在高温下具备一定的缓冲和变形能力，其破坏模式逐渐转变为以塑性变形为主的塑性破坏。总体而言，在低温阶段(500 ~ 900 ℃)，球团仍以脆性(刚性)破坏为主，应力在峰值后快速下降；当温度升高至 900 ~ 1 050 ℃区间时，应力曲线在峰值后呈缓慢下降特征，表现出典型的塑性破坏行为。

2.2.3　*微观结构及矿物组成分析*

不同还原温度下氧化球团的微观形貌及矿物组成如图 6 所示。由图 6 可知，球团主要包括 Fe_2O_3、Fe_3O_4、FeO、金属 Fe，以及脉石矿物和孔隙。未还原时，球团主要由 Fe_2O_3 连晶构成，颗粒结合紧密，孔隙分布均匀；同时，规则块状的 SiO_2嵌布在 Fe_2O_3 连晶结构中，尚未与铁氧化物接触。

随着还原反应的进行，Fe_2O_3 逐步转化为低价态铁氧化物，Fe_3O_4 开始出现，球团内部出现大量孔隙和破碎结构，这是热态强度快速下降的主要原因之一。已有研究表明[19]，Fe_2O_3(α-Fe_2O_3，三方晶系)向 Fe_3O_4 的转化会经历中间相 γ-Fe_2O_3(立方晶系)，由于晶系差异，该相变伴随约 124% 的体积膨胀，从而导致结构破裂并产生大量孔隙。还原反应进一步进行，Fe_3O_4 逐渐转化为 FeO，该相变伴随的体积效应较小，因此孔隙扩展受限，球团结构趋于稳定。值得注意的是，此时 FeO 活性增强，其与周围的 SiO_2 互相接触，逐渐形成 $2FeO·SiO_2$ 等低熔点液相[15]，液相填充在铁氧化物颗粒间，促进桥联结构形成，这是球团在约 900 ℃时热态强度回升的重要原因。

在还原后期，金属 Fe 首先在 FeO 颗粒表面析出，并逐步向颗粒内部扩展，最终在相邻颗粒间形成桥接结构，从而显著增强整体结构稳定性。然而，从氧化球团热态抗压强度曲线(图 2)可见，球团在 950 ℃时的热强度并没有逐渐提高，反而出现下降趋势，由 1 212.2 N/P 降至 917.9 N/P，且继续升高温度至 1 050 ℃时，强度进一步下降至 320.2 N/P。这主要是由于高温下球团出现软化所致，如图 5 中 950 ~ 1 050 ℃的应力曲线所示，随着还原时间延长，球团的破坏模式由刚性断裂逐步过渡为塑性变形。结果表明，尽管该阶段已生成大量金属 Fe 及部分桥接结构，但球团在高温下仍处于热软化状态，强度逐渐下降。这一现象与以往研究存在差异：传统冷态强度检测结果显示，在还原后期，由于金属 Fe 的生成，球团内部孔隙率降低、结构致密度提高，冷态抗压强度显著提升[20-21]。上述对比进一步表明，仅依赖冷态强度评价球团性能，难以准确反映其在高温还原条件下的实际力学行为。

2.3　非等温还原氧化球团热态强度演变机理

综上所述，氧化球团在还原过程中的结构演变及其对强度的影响可总结如图 7 所示。由图 7 可知，氧化球团初始矿物组成主要为 Fe_2O_3 和脉石组分，其中 Fe_2O_3 呈片状互连结构，是球团强度的主要来源。还原过程遵循逐级还原规律，并表现为由外向内逐层推进的反应特征。

在还原初期，Fe_2O_3 表面逐渐与 CO 发生反应生成 Fe_3O_4，由于晶体结构由三方晶系转变为立方晶系，相变伴随体积膨胀，导致原有的 Fe_2O_3 连晶结构产生裂纹并发生破碎，连通性遭到破坏，形成小尺寸颗粒，孔隙率显著增加。此阶段主要表现为球团外层 Fe_2O_3 反应生成 Fe_3O_4，而球团核心部分未参与反应，仍以 Fe_2O_3 为主。

随着还原的深入，反应界面逐渐向球团内部推进，形成典型的多层结构：外层发生 Fe_3O_4→FeO 的转变，中间层为 Fe_2O_3→Fe_3O_4，核心部分仍为未反应的 Fe_2O_3。此时，球团外层部分，高活性的 FeO 逐渐在 Fe_3O_4 颗粒周围生成，可与周围 SiO_2接触，并在界面反应形成低熔点液相，液相填充铁氧化物颗粒间，促进颗粒间连接，使球团热态强度出现回升。在还原末期，外层 FeO 逐步还原为金属 Fe，且金属 Fe 颗粒相互接触并形成桥联结构。然而，在高温下，由于球团仍处于热软化状态，金属 Fe 的强化作用有限，热态抗压强度逐渐下降。

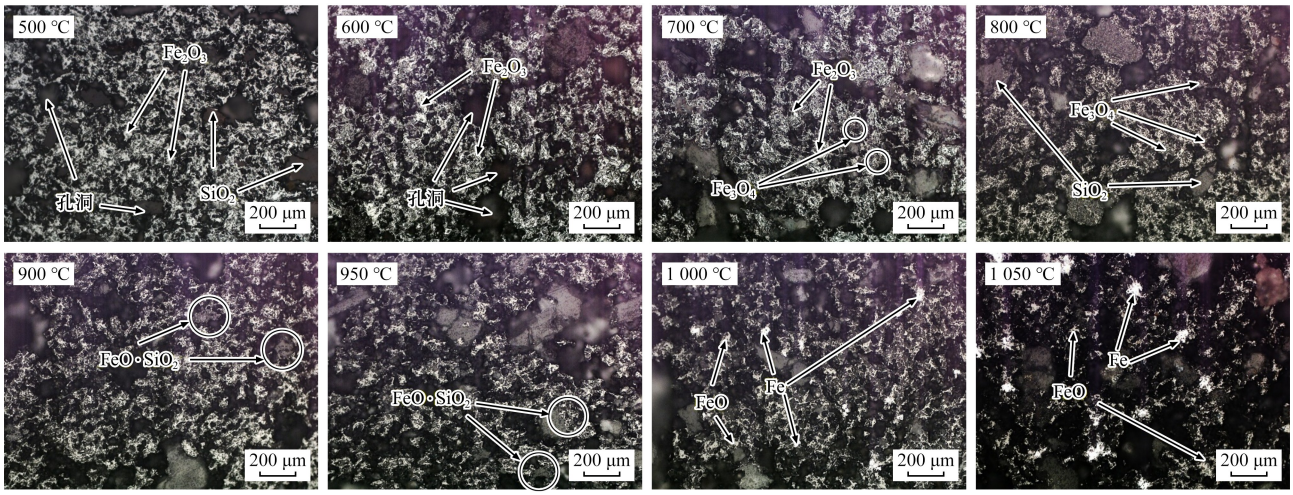


图 6 非等温还原过程中氧化球团的微观形貌及矿相组成

Fig. 6 Microstructural morphology and phase composition of pellets during non-isothermal reduction

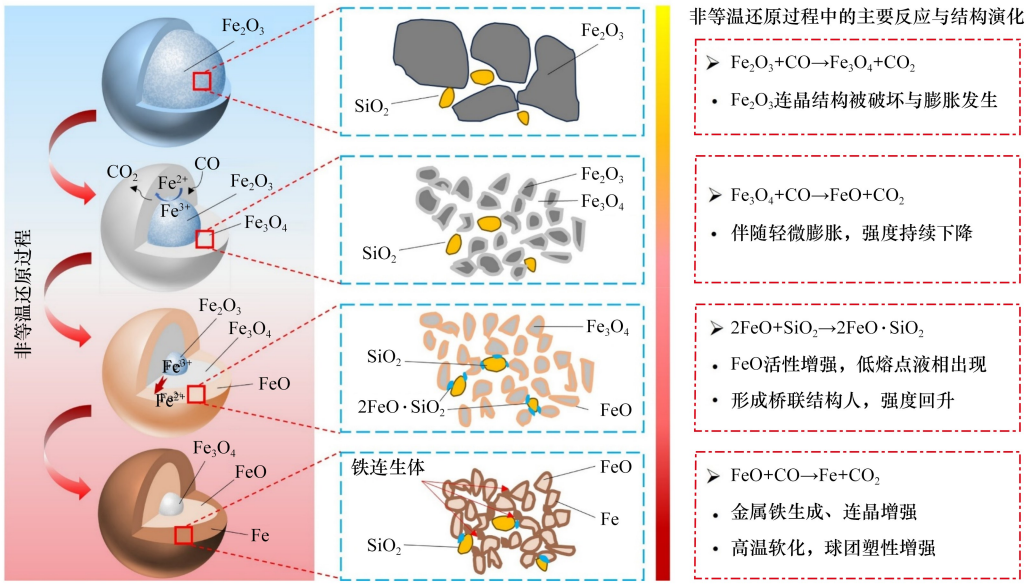


图 7 氧化球团非等温还原过程中结构演变示意

Fig. 7 Schematic of structural evolution during the non-isothermal reduction of oxidized pellets

3 结 论

（1）球团热态强度随还原进行总体下降，900 ℃时因液相烧结致强度短暂回升。

（2）物相转变是驱动球团热态抗压强度演变的关键因素。Fe_2O_3 逐级还原为 Fe_3O_4、FeO 及金属 Fe，直接导致球团内部结构和孔隙率的动态演变。其中，在还原初期 Fe_2O_3 向 Fe_3O_4 转化阶段，体积剧烈膨胀导致裂纹扩展和孔隙增多，使强度显著下降。

（3）球团的失效机制随还原进程发生变化。在还原中前期，体积膨胀主导的脆性断裂是主要失效形式；至还原后期，高温软化效应加剧，球团行为向塑性变形转变。尽管此时金属 Fe 连晶及桥联结构得以发展，但在高温下其强化作用有限，未能逆转热态强度的整体下降趋势。

参考文献：

[1] SONG X C, DU S, DENG C N, et al. Carbon emissions in China's steel industry from a life cycle perspective: Carbon footprint insights[J]. Journal of Environmental Sciences, 2025, 148: 650 – 664.

[2] 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 and Steel,2021,56(5):7 – 16.

[3] 马成伟,安钢,郭宏烈,等. 京唐 5 500 m³ 高炉超高比例碱性球团矿冶炼实践[J]. 炼铁,2024,43(1):16 – 20.
MA Chengwei, AN Gang, GUO Honglie, et al. Operation of jingtang 5 500 m³ BF smelting with ultra-high percentage of basic pellet[J]. Ironmaking,2024,43(1):16 – 20.

[4] 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 and Steel,2024,59(3):32 – 45.

[5] NOGUEIRA P F, FRUEHAN R J. Blast furnace burden softening and melting phenomena: Part I. Pellet bulk interaction observation[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2004,35(5):829 – 838.

[6] LEIMALM U, FORSMO S, DAHLSTEDT A, et al. Blast furnace pellet textures during reduction and correlation to strength[J]. ISIJ International, 2010, 50(10): 1396 – 1405.

[7] 龙伟,周恒,孙大为,等. 基于工业 CT 微观孔隙结构表征球团矿抗压强度[J]. 中国冶金,2024,34(5):82 – 88.
LONG Wei, ZHOU Heng, SUN Dawei, et al. Characterizing compressive strength of pellet ore based on micro-pore structure captured through industrial CT[J]. China Metallurgy,2024,34(5):82 – 88.

[8] 范建军,郭宇峰,王帅,等. 碱度对球团矿抗压强度及矿物组成的影响[J]. 钢铁研究学报,2024,36(9):1183 – 1193.
FAN Jianjun, GUO Yufeng, WANG Shuai, et al. Effect of basicity on compression strength and mineral composition of iron ore pellets[J]. Journal of Iron and Steel Research,2024,36(9):1183 – 1193.

[9] 王周勇,姜文政,文小平,等. 超细铁精矿球团制备与固结行为[J]. 中国冶金,2025,35(2):13 – 22.
WANG Zhouyong, JIANG Wenzheng, WEN Xiaoping, et al. Preparation and consolidation behavior of oxidized pellet from ultrafine iron concentrates[J]. China Metallurgy,2025,35(2):13 – 22.

[10] 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.

[11] 韩涛,杨大兵,王炜,等. 不同粒度条件下铁矿球团性能及工艺条件优化[J]. 烧结球团,2025,50(3):78 – 86.
HAN Tao, YANG Dabing, WANG Wei, et al. Optimization of iron ore pellet performance and process conditions under different particle size conditions[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(3):78 – 86.

[12] 温宝良,张晓萍,刘德楼,等. 含硼磁铁矿对超细粒级磁铁矿球团性能的影响[J]. 钢铁,2022,57(11):33 – 41.
WEN Baoliang, ZHANG Xiaoping, LIU Delou, et al. Effect of boron-containing magnetite on properties of ultrafine-grained magnetite pellets[J]. Iron & Steel, 2022,57(11):33 – 41.

[13] 胡鹏,吕学伟,林文康,等. 碱度对全钒钛球团矿性能的影响[J]. 钢铁,2024,59(11):45 – 53.
HU Peng, LÜ Xuewei, LIN Wenkang, et al. Effect of basicity on properties of all-vanadium titanomagnetite pellets[J]. Iron & Steel,2024,59(11):45 – 53.

[14] 曹鹏飞,张倩,潘建,等. 带式焙烧机工艺高硅镁质熔剂性球团制备特性[J]. 烧结球团,2024,49(2):38 – 46.
CAO Pengfei, ZHANG Qian, PAN Jian, et al. Preparation characteristics of high silica magnesium-bearing fluxed pellets based on straight grate process[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(2):38 – 46.

[15] GUO H, JIANG X, SHEN F M, et al. Influence of SiO_2 on the compressive strength and reduction-melting of pellets [J]. Metals,2019,9(8):852.

[16] VITIKKA O, ILJANA M, HEIKKILÄ A, et al. Cold compressive strength of iron ore pellets in distinct reduction stages[J]. Powder Technology, 2025, 451: 120478.

[17] HUANG Z C, YI L Y, JIANG T. Mechanisms of strength decrease in the initial reduction of iron ore oxide pellets [J]. Powder Technology,2012,221:284 – 291.

[18] 徐晨阳. 高炉富氢条件下熔剂性球团矿的还原行为研究[D]. 北京科技大学,2022.
XU Chenyang. Research on reduction behavior of fluxed pellets underhydrogen-rich conditions in blast furnace [D]. University of Science and Technology Beijing, 2022.

(下转第 125 页)

Pelletizing,2004,29(5):1 – 5.

[6] 邸丽卿. 宣钢外购块矿性能评价[J]. 冶金信息导刊,2014,51(4):6 – 10.
DI Liqing. The performance evaluation of outsourcing block ore in Xuanhua iron and steel[J]. Metallurgical Information Review,2014,51(4):6 – 10.

[7] 周明顺,韩淑峰,王义栋,等. 铁矿石综合评价方法及其在鞍钢的应用[J]. 鞍钢技术,2017(2):1 – 7.
ZHOU Mingshun, HAN Shufeng, WANG Yidong, et al. Comprehensive evaluation method for iron ore and its application in ansteel[J]. Angang Technology,2017(2):1 – 7.

[8] 祁成林,冯根生,许满兴,等. 高炉冶炼条件下天然块矿热裂指数评价新方法[J]. 烧结球团,2022,47(2):67 – 73.
QI Chenglin,FENG Gensheng,XU Manxing,et al. A new method for evaluating decrepitation index (DI) of natural lump ore under BF ironmaking[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):67 – 73.

[9] 李新宇,张建良,苏步新,等. 基于主成分分析的高炉用天然块矿性能评价[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):2943 – 2950.
LI Xinyu, ZHANG Jianliang, SU Buxin, et al. Performance evaluation of lump ores for blast furnace based on principle component analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2016,47(9):2943 – 2950.

[10] 李云飞. 高块矿比条件下含铁炉料软熔滴落性能新方法评价及应用研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2021.
LI Yunfei. New method evaluation and application research on soft-melt dripping performance of iron-bearing charges under high lump ore ratio condition[D]. Anshan:University of Science and Technology Liaoning,2021.

[11] 李新宇,张建良,闫志武,等. 青钢高炉用 5 种块矿的综合性能评价[C]//第十四届全国炼铁原料学术会议论文集. 兰州:中国金属学会,2015:239 – 244.
LI Xinyu, ZHANG Jianliang, YAN Zhiwu, et al. Comprehensive performance evaluation of five lump ores for qingdao ironworks blast furnaces[C]//Proceedings of the 14th Nation A Cademic Conference on Ironmaking Raw Materials. Lanzhou:The Chonese Society for Metals,2025:239 – 244.

[12] 胡启晨,吴春亮,史文礼,等. 铁矿石冶金性能对高炉生产的影响[J]. 矿冶,2019,28(1):42 – 46.
HU Qichen, WU Chunliang, SHI Wenli, et al. Effect of iron ore metallurgical properties on blast furnace production[J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(1): 42 – 46.

(上接第 89 页)

[19] SPREITZER D,SCHENK J. Reduction of iron oxides with hydrogen: A review[J]. Steel Research International, 2019,90(10):1900108.

[20] 赵满祥,刘嘉雯,贾国利,等. 高强度生物质含碳球团制备及性能优化[J]. 中国冶金,2024,34(4):96 – 105.
ZHAO Manxiang, LIU Jiawen, JIA Guoli, et al. Preparation and performance optimization for biomass carbon-bearing pellets with high strength[J]. China Metallurgy,2024,34(4):96 – 105.

[21] 黄柱成,沈雪华,朱顺伟,等. 还原回转窑中的粉末黏结特性及其固结机理[J]. 金属矿山,2018(1):73 – 78.
HUANG Zhucheng,SHEN Xuehua,ZHU Shunwei,et al. Bonding characteristics of powder and its consolidation mechanism in rotary kiln of reduction[J]. Metal Mine, 2018(1):73 – 78.