钒钛球团热强度及其影响因素

张立利[1]，朱 伟[2]，马凯辉[1]，刘凌岭[1]，陈 茅[1]
（1. 攀钢集团研究院有限公司 钒钛资源综合利用国家重点实验室，四川 攀枝花 617000；
2. 攀钢集团攀枝花钢钒有限公司，炼铁厂，四川 攀枝花 617000）

摘要：为揭示在低碳炼铁高配比球团冶炼背景下钒钛球团的热力学行为，本文系统考察了温度、气氛和还原时间对钒钛球团热抗压强度的影响。采用热强度测定仪，并结合 X 射线衍射（XRD）和光学显微镜等手段，分析了球团在不同条件下的强度演变、物相转变及显微组织变化。结果表明：在 N_2 惰性气氛下，球团抗压强度随温度升高呈先增加后降低的趋势，在 800 ℃时达到峰值（2 992.2 N/P），此阶段主要由固相烧结引起的致密化效应所致；在 900 ℃下引入含 CO/CO_2 的还原气氛后，球团强度迅速下降至 1 000 N/P 左右，主要原因是 Fe_2O_3 向 Fe_3O_4 的相变伴随晶格与体积变化，破坏了原有烧结骨架；在还原气氛中，随着还原时间的延长，强度在第 1.0 h 内急剧下降，随后在较低水平波动，这是还原诱导的结构损伤与高温再烧结修复相互竞争的结果。本研究揭示了钒钛球团在模拟高炉上中部环境下的热强度演化机理，可为高配比球团在高炉冶炼中的稳定应用与操作优化提供理论依据。

关键词：钒钛球团；热强度；还原气氛；物相转变；显微结构
中图分类号：TF046.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764（2026）01－0188－08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.016

Hot strength of vanadium-titanium pellets and its influencing factors

ZHANG Lili[1], ZHU Wei[2], MA Kaihui[1], LIU Lingling[1], CHEN Mao[1]
（1. State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Vanadium and Titanium Resources, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Ironmaking Plant, Pangang Group Panzhihua Iron & Steel Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China）

Abstract: To reveal the thermodynamic mechanical behavior of vanadium-titanium pellets under the condition of low-carbon ironmaking with high high-proportion pellets, in the study of this paper, the effects of temperature, atmosphere, and reduction time on the thermal compressive strength of vanadium-titanium pellets were systematically investigated. A thermal strength tester combined with X-ray diffraction (XRD) and optical microscopy, the strength evolution was used to analyze the phase transformations, and microstructural changes of the pellet under different conditions. The results showed that at the inert N_2 atmosphere, the compressive strength of the pellets initially increased and then decreased with the temperature rising, and it reached its peak value (2 992.2 N/P) at 800 ℃, at this period, it was primarily due to densification effects from solid-phase sintering. When a reducing atmosphere containing CO/CO_2 was introduced at 900 ℃, the pellets strength rapidly declined to approximately 1 000 N/P, mainly due to the phase transformation of Fe_2O_3 to Fe_3O_4 accompanied by lattice and volume changes, which disrupted the original sintered structure. In the reducing atmosphere, with the reduction time extending the strength sharply decreased within the first 1.0 h of reduction and then fluctuated at a lower level, which is attributed to the competition between reduction-induced structural damage and high-temperature re-sintering repair. This

收稿日期：2025－09－25；**修回日期**：2025－11－04
基金项目：四川省自然科学基金面上资助项目（2024NSFSC0206）
作者简介：张立利（1997—），女，硕士，工程师，从事高炉炼铁方面的研究。
通信作者：陈 茅（1987—），男，博士，正高级工程师，从事低碳冶金和钒钛磁铁矿高效绿色综合利用方面的研究。

study revealed the strength evolution mechanism of vanadium-titanium pellets under the simulated conditions of the upper blast furnace, which can provide a theoretical basis for the stable application and operational optimization of high-proportion pellets in blast furnace smelting.

Key words: vanadium-titanium pellets; thermal strength; reducing atmosphere; phase transformation; microstructure

钢铁工业是我国实现“碳达峰、碳中和”目标的关键行业，其 CO_2 排放量占全国总量的 15% 以上[1]。在以“高炉—转炉”为主的长流程工艺中，高炉炼铁是能耗与碳排放的主要环节，其 CO_2 排放占全流程的 70% 以上[2]。因此，推动高炉工序的低碳转型是行业绿色发展的核心任务。

当前，高炉富氢冶炼与大配比球团冶炼被普遍视为低碳炼铁的两条重要技术路线[3]。其中，提高球团矿在炉料中的配比是行之有效的源头减碳措施。相比烧结矿，球团矿具有生产能耗和污染排放更低、品位更高的优势，有利于降低高炉焦比与炉渣产出从而实现炼铁系统整体降碳[4-5]。然而，高配比球团入炉对球团自身的热力学性能(即热抗压强度)提出了严苛要求。在下降过程中，球团承受着上部料柱的压力，并经历复杂的温度和气氛变化，其热强度对维持料柱的透气性至关重要[6-7]。若强度不足，球团易过早软化、粉化，导致高炉压差波动、煤气流紊乱，严重影响高炉稳定顺行[8-9]。

我国拥有丰富的钒钛磁铁矿资源，将其制成钒钛球团以实现资源高效利用具有重要现实意义[10-11]。攀钢已在钒钛球团应用方面取得显著进展，目前已经实现了 55% 球团配比高炉稳定生产，但钒钛球团因其成分特殊，在高炉内的冶金行为复杂，行业尚无更高配比钒钛球团应用的工业经验，且针对其在不同温度、气氛及还原进程中强度演变规律的系统性基础研究尤显不足[12-13]。基于上述背景，本文以工业钒钛球团为研究对象，模拟高炉上部区域的温度与气氛条件，系统考察了温度、还原气氛及还原时间对其热抗压强度的影响，并结合 XRD 和显微结构分析，解析其强度演化机理，以期为钒钛资源在低碳炼铁中的应用及高炉操作参数的优化提供科学依据。值得指出的是，本研究从“热力学性能”的角度出发，是对现有以 RDI(还原粉化指数)/RSI(低温还原粉化指数)为代表的中低温还原性能评价体系的重要补充，为更全面地预测钒钛球团在高炉内的整体服役行为提供了新的视角和试验数据。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验所用钒钛球团矿取自西南某钒钛矿冶炼企业高炉实际用料。选取表面完整、粒度均匀且无明显裂纹的球团作为试样。其主要化学成分如表 1 所示。

表 1　钒钛球团矿主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of vanadium-titanium pellets　　%

TFe	FeO	SiO_2	CaO	V_2O_5	TiO_2	MgO	S	P
53.36	2.87	5.48	1.60	0.57	9.98	2.31	0.01	0.02

1.2　试验方法

试验采用全自动炉料热强度在线测定装置。该设备可精确控制温度(室温 – 1 500 ℃)、气氛(N_2、CO、CO_2等)和压力(0 ~ 10 kN)，并实时记录载荷 – 位移曲线。试验采用单球测试法，每组条件下重复测量 10 个球团，取其算术平均值作为最终结果。具体试验方案如下。

(1) 温度影响试验：将球团置于 N_2 气氛(4 L/min)中，以 5 ℃/min 的速率分别升温至 400、600、700、800、900、1 000、1 100、1 200 ℃，各温度点恒温 1 h 后进行抗压强度测试，同时测定室温(25 ℃)强度作为基准。

(2) 气氛影响试验：先在 N_2 气氛中升温至 900 ℃，随后切换为不同组分的混合气氛(100% N_2、25% CO +20% CO_2 +55% N_2、30% CO +15% CO_2 +55% N_2、35% CO +10% CO_2 +55% N_2、40% CO +5% CO_2 +55% N_2)(均为体积分数)，并在该预设气氛下恒温 1 h，随后恢复为 N_2 气氛进行强度测试。

(3) 还原时间影响试验：在 N_2 气氛中升温至 900 ℃后，切换为还原气氛(30% CO +15% CO_2 +55% N_2)(均为体积分数)，分别恒温 0、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0 h。达到预设时间后，

切换回 N_2 气氛进行抗压强度测试。

所有热处理后的样品均在 N_2 气氛中冷却至室温，再取样用于后续的 X 射线衍射(XRD)物相分析和光学显微镜结构观察。

2 结果与分析

2.1 温度对球团热抗压强度的影响

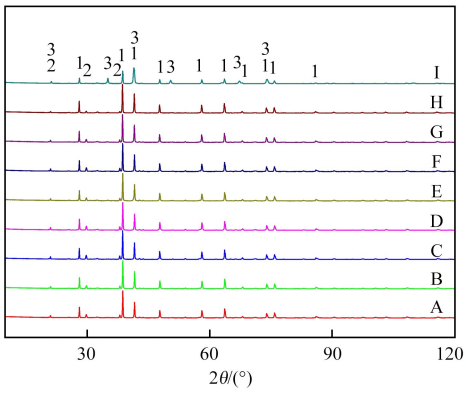
在 N_2 气氛下，加热至不同温度并恒温 1 h 后各球团热抗压强度测定结果如表 2 所示。由表 2 可知：球团常温抗压强度为 1 941.0 N/P；在 N_2 气氛下，钒钛球团抗压强度随温度升高呈现显著“先增加后降低”的规律，在 800 ℃时达到峰值 2 992.2 N/P(较常温提高约 54%)；当温度超过 800 ℃后，强度开始下降，在 900 ℃时略微回落至 2 932.9 N/P，随后随温度进一步升高而急剧下降，至 1 200 ℃时强度仅为 475.7 N/P，表明球团在高温下已基本丧失承载能力并发生明显软化。

表 2 球团不同温度下抗压强度测试结果

Table 2 Compressive strength of pellets at different temperatures **N/P**

25 ℃(常温)	400 ℃	600 ℃	700 ℃
1 941.0	2 484.6	2 791.5	2 871.9
800 ℃	900 ℃	1 000 ℃	1 100 ℃	1 200 ℃
2 992.2	2 932.9	2 312.5	1 654.4	475.7

为揭示上述强度变化的内在机理，对不同温度处理后的球团进行 XRD 图谱(图 1)、物相定量分析(表 3)和显微结构分析(图 2)。由图 1 可知，在常温至 1 200 ℃区间内，各温度下球团的 XRD 图谱(曲线 A～I)在衍射峰的位置基本一致，表明其主物相没有发生显著变化。结合表 3 的定量分析可知，在常温至 800 ℃区间，球团主物相为赤铁矿(Fe_2O_3)，质量分数稳定在 80% 以上，同时含有约 14% 的假板钛矿(Fe_2TiO_5)，未发生显著的物相转变。由图 2 可知，随着温度升高，原子扩散能力增强，颗粒接触点处出现物质迁移并形成“烧结颈”，颗粒由点接触向面接触转化，颗粒边界逐渐模糊，组织趋于致密。这一由固相烧结驱动的结构致密化过程是该温度区间内球团强度提升的根本原因。与相关文献结论一致，在类似热处理条件下，铁氧体主相的稳定能够有效提升球团结构强度和致密性[14-15]。



温度/℃：A—25(常温)；B—400；C—600；D—700；E—800；F—900；G—1 000；H—1 100；I—1 200

1—Fe_2O_3；2—Fe_2TiO_5；3—Fe_3O_4。

图 1 球团在不同温度下的 X 射线衍射分析

Fig. 1 X-ray diffraction analysis of pellets at different temperatures

表 3 球团不同温度下物相组成(质量分数)

Table 3 Phase composition and relative content of pellets at different temperatures **%**

温度/℃	Fe_2O_3	Fe_2TiO_5	Fe_3O_4	其他
25(常温)	81.3	14.1	—	4.6
400	82.4	14.5	—	3.1
600	80.0	15.1	—	4.9
700	81.4	14.9	—	3.7
800	80.4	14.8	—	4.8
900	81.6	11.3	4.0	3.1
1 000	79.5	11.5	3.2	5.8
1 100	83.7	6.2	5.8	4.3
1 200	75.5	0.3	22	2.2

当温度超过 800 ℃后，球团强度开始下降。XRD 结果表明，从 900 ℃开始，Fe_2O_3 在惰性气氛下发生缓慢热分解($3Fe_2O_3 \rightarrow 2Fe_3O_4 + 1/2O_2$)生成 Fe_3O_4，同时，作为重要骨架相的 Fe_2TiO_5 开始分解，其质量分数从 800 ℃的 14.8% 锐减至 1 200 ℃的 0.3%。这些物相转变引入了晶格畸变和体积效应，在内部产生组织应力，破坏了前期形成的稳定烧结结构[16-17]。具体而言，Fe_2O_3 向 Fe_3O_4 转变不仅伴随晶格结构由六方向立方转变，还造成体积膨胀，在颗粒晶界处形成应力集中区，诱发微裂纹，导致烧结骨架解体、结构松散，宏观表现为强度骤降。此外，Fe_2TiO_5 这一钛铁双氧化物

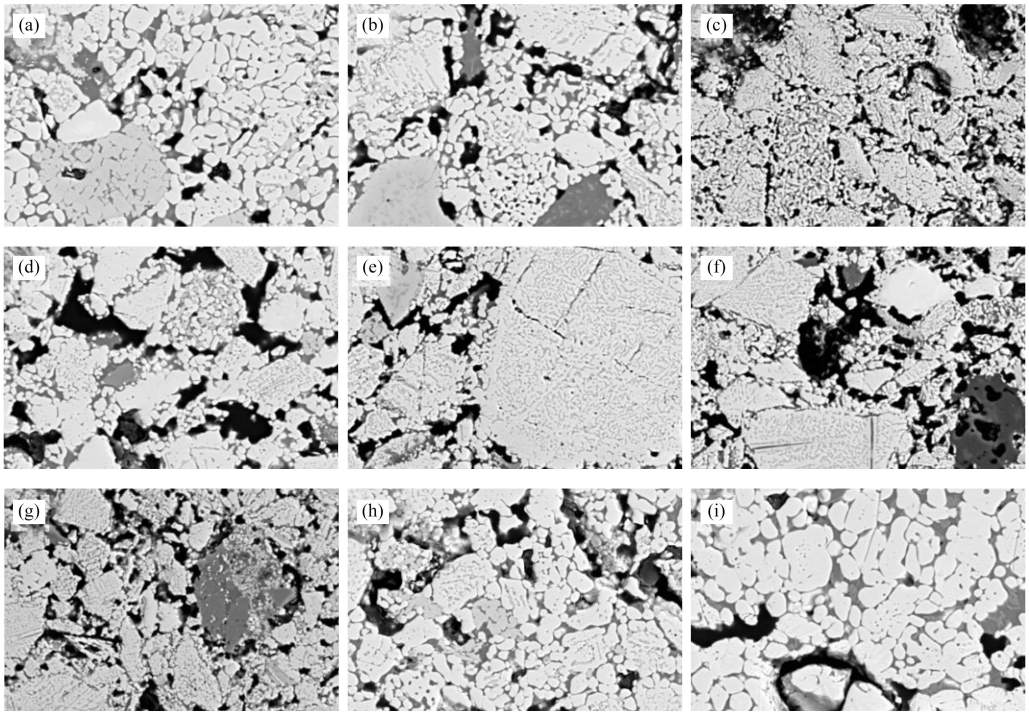
作为球团的辅助骨架相，其高温分解也会导致骨架失稳，进一步削弱球团整体强度。因此，物相转变过程中产生的组织应力与固相致密性变化，是球团抗压强度崩溃的根本原因。更重要的是，当温度进一步提高(>1 000 ℃)时，低熔点相开始生成并逐渐增多。显微结构[图 2(g) ~ (i)]显示固相颗粒出现圆化并被液相包裹或分离，原有连续的固相骨架被液相分割，形成“固相悬浮于液相中”的弱承载结构。上述物相分解与液相渗透共同导致球团高温软化并使抗压强度急剧下降。

综上所述，温度通过影响球团的固相烧结进程、物相稳定性和液相生成行为，综合决定了球团的热抗压强度。在球团温度≤800 ℃时，固相烧结与稳定物相促进致密化与强度提升；在更高温度时，物相分解与液相行为破坏骨架导致强度劣化。

2.2　气氛对球团热抗压强度的影响

球团在 900 ℃、不同气氛下抗压强度测定结果如表 4 所示。由表 4 可知：在纯 N_2惰性气氛中，球团抗压强度平均值达 2 932.9 N/P；一旦引入还原性气体(CO/CO_2)，强度发生断崖式下跌。在还原性最弱的 25% CO + 20% CO_2 + 55% N_2气氛中，强度已骤降至 1006.5 N/P，仅为纯 N_2气氛下的 1/3 左右；随气氛还原性的增强(即 CO 含量升高、CO_2含量降低)，球团抗压强度整体在约 1 000 N/P 的附近小幅波动，表明还原反应的发生是导致强度劣化的关键。

球团在不同气氛条件下的 X 射线衍射分析、矿物物相组成和显微结构分析分别如图 3、表 5 和图 4 所示。由图 3 可见，相较于纯 N_2 气氛下的测试图谱(曲线 A)，经含 CO/CO_2 的还原气氛处理后，球团的 XRD 图谱(曲线 B ~ E)均发生显著变化，且曲线 B ~ E 的衍射峰位置基本重合，说明不同含 CO/CO_2 还原气氛处理后的球团主物相组成一致。结合表5的物相定量分析结果可知：在



温度/℃：(a) 25(常温)；(b) 400；(c) 600；(d) 700；(e) 800；(f) 900；(g) 1 000；(h) 1 100；(i) 1 200

图 2　球团在不同温度下的显微结构

Fig. 2　Microstructure evolution of pellets at different temperatures

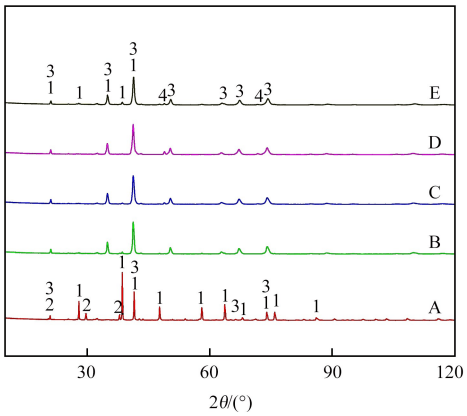
表 4　球团不同气氛下抗压强度测试结果

Table 4　Compressive strength of pellets under different atmospheres　　**N/P**

100% N_2	25% CO + 20% CO_2 + 55% N_2	30% CO + 15% CO_2 + 55% N_2	35% CO + 10% CO_2 + 55% N_2	40% CO + 5% CO_2 + 55% N_2
2932.9	1006.5	1071.8	987.0	911.4

N_2 气氛中(曲线 A)，球团主相为 Fe_2O_3(质量分数为 81.6%)；而在所有还原气氛中(曲线 B ~ E)，Fe_2O_3 的衍射峰均大幅减弱或消失，Fe_3O_4 的衍射峰成为绝对主导，表明 Fe_2O_3 被大量还原为 Fe_3O_4，后者成为绝对主导物相(质量分数 > 84%)，同时 Fe_2TiO_5 物相消失。随着气氛还原性的增强，Fe_2O_3 质量分数从 11.8%(25% CO)降至 3.2%(40% CO)，而 Fe_3O_4 质量分数则从 84.7% 稳步增至93.0%。Fe_2O_3(六方晶系)向Fe_3O_4(立方晶系)的转变过程中，虽然密度变化不大，但晶格重构产生的内应力远大于材料自身的结合强度，这是导致微裂纹萌生的根本原因。同时，相变过程中的体积效应在约束条件下转化为拉应力，加速了裂纹的扩展。

在纯 N_2 气氛下的球团结构致密且均匀[图4(a)]，而在还原气氛下，晶粒结构遭到破坏并形成疏松聚集体[图4(b)~(e)]。局部区域



A—100% N_2；B—25% CO + 20% CO_2 + 55% N_2；C—30% CO + 15% CO_2 + 55% N_2；D—35% CO + 10% CO_2 + 55% N_2；E—40% CO + 5% CO_2 + 55% N_2

1—Fe_2O_3；2—Fe_2TiO_5；3—Fe_3O_4；4—FeO。

图 3 球团在不同气氛下的 X 射线衍射分析

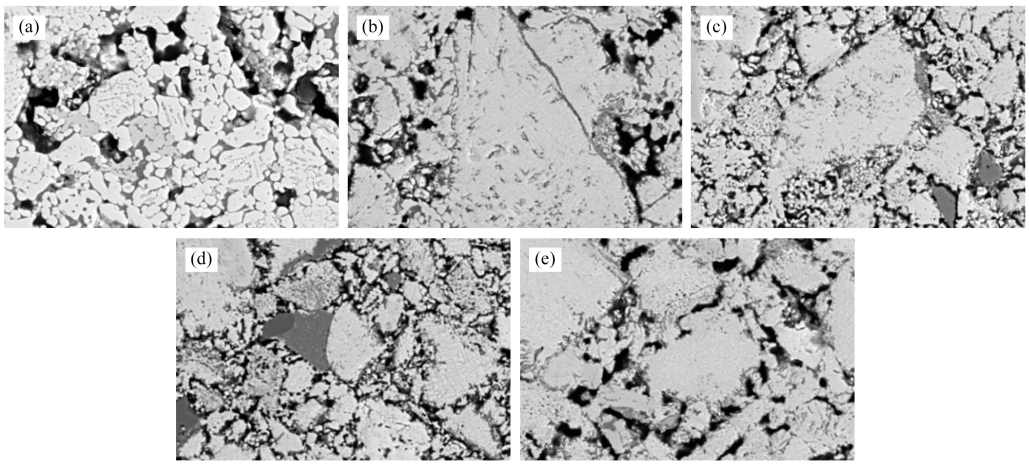
Fig. 3 X-ray diffraction analysis of pellets under different atmospheres

表 5 球团不同气氛下物相组成(质量分数)

Table 5 Phase composition and relative content of pellets under different atmospheres %

气氛组成	Fe_2O_3	FeO	Fe_3O_4	Fe_2TiO_5	其他
100% N_2	81.6	—	4.0	11.3	3.1
25% CO + 20% CO_2 + 55% N_2	11.8	0.1	84.7	—	3.4
30% CO + 15% CO_2 + 55% N_2	8.9	1.9	86.7	—	2.5
35% CO + 10% CO_2 + 55% N_2	4.2	2.6	88.1	—	5.1
40% CO + 5% CO_2 + 55% N_2	—	4.6	91.4	—	4.0

注:“—”表示无测试数据。



(a) 100% N_2；(b) 25% CO + 20% CO_2 + 55% N_2；(c) 30% CO + 15% CO_2 + 55% N_2；(d) 35% CO + 10% CO_2 + 55% N_2；(e) 40% CO + 5% CO_2 + 55% N_2

图 4 球团在不同气氛下的显微结构

Fig. 4 Microstructure of pellets under different atmospheres

出现多孔的枝晶状或海绵状结构，并伴有贯通性裂纹与孔洞，这与相变应力导致的微裂纹萌生扩展一致。这种疏松、不连续的结构显著降低了球团的有效承载面积，从而导致宏观抗压强度的急剧恶化。

综上所述，气氛通过控制球团内部的还原反应，决定了其主导物相和微观结构，进而影响其宏观力学性能。在惰性气氛中，稳定的 Fe_2O_3 相通过固相烧结形成高强度结构。而在还原性气氛中，Fe_2O_3 向 Fe_3O_4 的相变所引发的体积膨胀和组织应力，是导致球团产生大量微观缺陷、结构疏松化并最终丧失机械强度的根本原因。

2.3　反应时间对球团抗压强度的影响

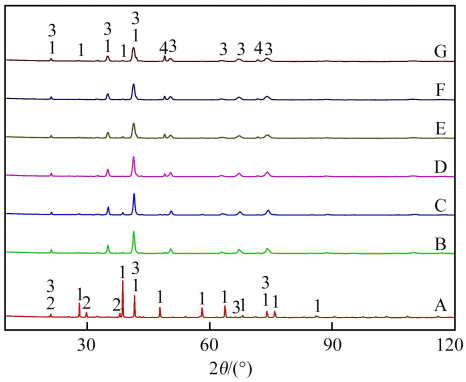
球团在 900 ℃、固定还原气氛（30% CO + 15% CO_2 + 55% N_2）下，不同还原时间抗压强度测试结果如表 6 所示。由表 6 可知，球团的抗压强度随着还原时间的变化表现出明显的非线性规律。未还原（0 h）时球团的抗压强度最高，达到 2 932.9 N/P；还原开始后，在第 1.0 h 内强度急剧下降至 1 071.8 N/P，降幅高达 63.5%。随后在 1.0 ~ 4.0 h 的还原过程中，强度并未持续下降，而是在 1 000 ~ 1 300 N/P 的范围内波动，整体维持在一个较低的稳定水平。

表 6　球团不同还原时间下抗压强度测试结果

Table 6　Compressive strength of pellets under different reduction time intervals　　N/P

0 h	1.0 h	1.5 h	2.0 h	2.5 h	3.0 h	4.0 h
2 932.9	1 071.8	1 106.5	987.0	1 150.4	1 339.0	1 210.3

结合 XRD 与显微组织分析可解释该非线性变化，球团在不同还原时间下的 X 射线衍射分析、矿物物相组成和显微结构分析分别如图 5、表 7 和图 6 所示。由图 5 可见，相较于未还原时的测试图谱（曲线 A），经 CO/CO_2 的还原气氛反应不同时间后，球团的 XRD 图谱（曲线 B ~ G）均发生显著变化；且曲线 B ~ G 的衍射峰位置基本一致，仅衍射峰相对强度存在小幅差异，表明不同还原时间处理后的球团主物相类型保持一致，仅物相相对含量发生改变。结合表 7 的物相分析结果可知，球团物相组成随还原时间延长呈现明显演变：初始未还原状态下（曲线 A，0 h），球团主物相为 Fe_2O_3；经 1.0 h 还原后（曲线 B），Fe_2O_3 的特征峰强度急剧衰减，Fe_3O_4 成为主导物相，同时 Fe_2TiO_5 发生完全分解，该物相演变规律与球团强度的骤降特征完全契合。随着还原时间继续延长（曲线 C ~ G），Fe_3O_4 衍射峰强度呈现小幅波动，FeO 特征衍射峰则逐步出现且强度持续提升，表明还原反应持续向深度方向进行。此时球团强度进入平台阶段，该现象是由两种相互竞争的作用机制共同主导所致。



还原时间/h：A—0；B—1.0；C—1.5；D—2.0；E—2.5；F—3.0；G—4.0

1—Fe_2O_3；2—Fe_2TiO_5；3—Fe_3O_4；4—FeO。

图 5　球团在不同还原时间下 X 射线衍射分析

Fig. 5　X-ray diffraction analysis of pellets under different reduction time intervals

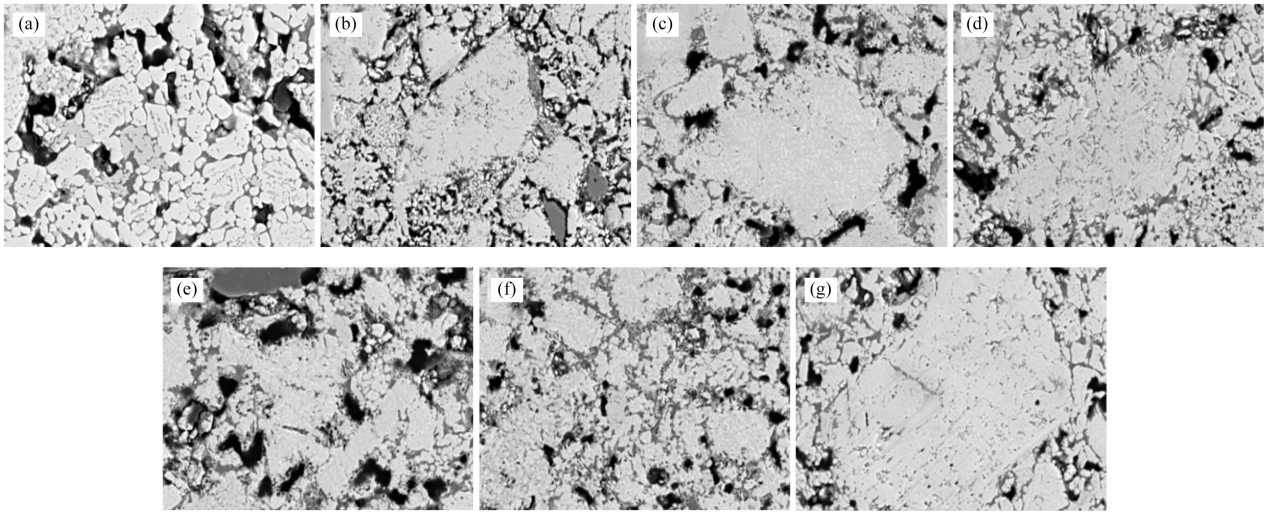
表 7　球团不同还原时间下物相组成（质量分数）

Table 7　Phase composition and relative content of pellets under different reduction time intervals　　%

还原时间/h	Fe_2O_3	FeO	Fe_3O_4	Fe_2TiO_5	其他
0	81.6	—	4.0	11.3	3.1
1.0	8.9	1.9	86.7	—	2.5
1.5	10.2	2.1	84.6	—	3.1
2.0	5.3	5.7	84.7	—	4.3
2.5	13.6	9.0	72.5	—	4.9
3.0	9.0	9.6	75.0	—	6.4
4.0	7.8	13.6	73.2	—	5.4

（1）持续的还原损伤：随着时间延长，还原反应继续向深度进行，即 Fe_3O_4 逐渐被还原为 FeO（表 7 中 FeO 质量分数从 1.0 h 的 1.9% 增至 4.0 h 的 13.6%）。这一过程同样伴随晶格变化，会对结构造成持续的、渐进式的损伤。

（2）高温再烧结修复：同时，在 900 ℃的持续温度作用下，新生成的FeO、Fe_3O_4 等物相的晶粒



还原时间/h：(a) 0；(b) 1.0；(c) 1.5；(d) 2.0；(e) 2.5；(f) 3.0；(g) 4.0

图6 球团在不同还原时间下的显微结构

Fig. 6 Microstructure of pellets under different reduction time intervals

具有一定的迁移和重排能力。颗粒间会发生再烧结(或称固相烧结)，形成新的烧结颈，从而部分“修复”或“弥合”因前期相变产生的微裂纹，使结构在一定程度上致密化，对强度起到恢复和稳定作用。

值得注意的是，在本试验条件下(900 ℃，最长还原4.0 h)，所有还原后的样品中均未检测到金属铁(Fe)的生成，且在部分条件下仍有少量Fe_2O_3残留。其主要原因：① 热力学限制。试验采用的还原气氛(如30% CO + 15% CO_2)中，$CO/(CO+CO_2)$的摩尔比为0.67。根据铁氧化物还原的Fe-O-C系平衡图，在900 ℃下，该气氛的还原电位处于FeO的稳定区，未达到生成金属铁所需的强还原条件。因此，从热力学角度看，铁氧化物主要被还原至Fe_3O_4和FeO阶段。② 动力学迟滞。Fe_2O_3的残留可能与还原时间不足或钒、钛等元素的存在有关。V、Ti元素会与铁氧化物形成固溶体或复杂的复合氧化物，这会改变还原反应的路径并降低还原速率，使得Fe_2O_3向Fe_3O_4的转化在宏观上表现出不完全性。这与钒钛磁铁矿难还原的特性较一致。

球团在不同还原时间下的显微结构(图6)进一步验证了上述机理：还原1.0 h后组织明显疏松且裂纹增多[图6(b)]；随时间延长至4.0 h，尽管总体孔隙度仍较高，但局部区域出现细颗粒再聚和新烧结颈的形成[图6(c)~(g)]，说明再烧结修复对强度的部分恢复具有一定作用。因此，在还原中后期，球团在还原过程中的强度演化是物相转变引起的初期破坏与高温烧结修复共同作用的结果。

综上所述，钒钛球团在还原过程中的抗压强度变化是由其内部物相转变主导的。还原初期，Fe_2O_3向Fe_3O_4的晶型转变伴随的体积膨胀是导致强度骤降的核心因素；而在还原中后期，Fe_3O_4向FeO的持续转变与高温下的再烧结效应相互竞争，共同决定了球团强度的波动和最终水平。

3 结 论

本文在模拟高炉上部工况下，系统研究了温度、气氛及还原时间对钒钛球团热抗压强度的影响，得出以下主要结论。

(1) 温度效应显著。在惰性气氛下，球团随温度升高先因固相烧结致密化而强度增加，于800 ℃达到峰值；当温度超过800 ℃时，物相分解与液相生成破坏固相骨架，使强度明显下降。

(2) 还原气氛对球团强度具有显著劣化作用。在900 ℃下，即使弱还原气氛也能使球团强度下降至惰性气氛下的约1/3。其主要机制是Fe_2O_3向Fe_3O_4的相变伴随晶格与体积膨胀，引发组织应力与微裂纹，从而破坏结构的完整性。

(3) 还原时间对球团强度的影响呈非线性。还原初期(0~1.0 h)，因$Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$的相变，球团强度急剧下降；在还原中后期(1.0~4.0 h)，

强度在较低水平波动并趋于稳定，这归因于 Fe_3O_4→FeO 的持续还原损伤与高温再烧结修复之间的相互竞争并达到动态平衡的结果。

（4）钒钛球团在进入高炉还原区前发生的相变是其力学性能的薄弱环节。在高配比球团冶炼过程中，应通过优化炉内温度场与气氛分布，减缓球团在低温区的还原速率与相变速度，以避免强度急剧劣化，从而保障料柱的稳定性与透气性。基于本研究揭示的热力学行为，未来工作可将热强度演变与 RDI/RSI 等传统评价指标相结合，探索其内在联系，以期建立一个能更全面评估钒钛球团高炉冶金性能的综合评价体系。

参考文献：

[1] 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.
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.

[2] WEI C Z, ZHANG X, ZHANG J, et al. Development of direct reduced iron in China: Challenges and pathways [J]. Engineering,2024,41:93－109.

[3] 张福明,程相锋,银光宇,等. 国内外低碳绿色炼铁技术的发展[J]. 炼铁,2021,40(5):1－8.
ZHANG Fuming, CHENG Xiangfeng, YIN Guangyu, et al. Development of low-carbon green ironmaking technology at home and abroad[J]. Ironmaking, 2021, 40(5):1－8.

[4] 杨聪聪,夏光辉,朱德庆,等. 铁矿氧化球团低温还原粉化性能的影响因素评述[J]. 工程科学学报,2024,46(11):1978－1988.
YANG Congcong, XIA Guanghui, ZHU Deqing, et al. Review of influencing factors on the reduction disintegration performance of iron ore oxidized pellets [J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(11): 1978－1988.

[5] 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.

[6] 王帅,郭宇峰,姜涛,等. 钒钛磁铁矿综合利用现状及工业化发展方向[J]. 中国冶金,2016,26(10):40－44.
WANG Shuai, GUO Yufeng, JIANG Tao, et al. Comprehensive utilization and industrial development direction of vanadium-titanium magnetite[J]. China Metallurgy,2016,26(10):40－44.

[7] 陈双印,储满生,唐珏,等. 预氧化对钒钛磁铁矿球团矿相及内部结构的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2013,34(4):536－541.
CHEN Shuangyin, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Effects of pre-oxidation on phase composition and microstructure of vanadium titano-magnetite[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(4):536－541.

[8] 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.

[9] FANG J, LI C, WANG X J, et al. Raw material strength in a blast furnace at operating temperature[J]. Steel Research International,2008,79(1):5－10.

[10] 杨耀辉,惠博,颜世强,等. 全球钒钛磁铁矿资源概况与综合利用研究进展[J]. 矿产综合利用,2023(4):1－11.
YANG Yaohui, HUI Bo, YAN Shiqiang, et al. Overview of global vanadium-titanium magnetite resources and comprehensive utilization[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2023(4):1－11.

[11] 王勋,韩跃新,李艳军,等. 钒钛磁铁矿综合利用研究现状[J]. 金属矿山,2019(6):33－37.
WANG Xun, HAN Yuexin, LI Yanjun, et al. Research status on comprehensive development and utilization of vanadium-titanium magnetite[J]. Metal Mine,2019(6): 33－37.

[12] ZHAO W, CHU M S, LIU Z G, et al. High-temperature interactions between vanadium-titanium magnetite carbon composite hot briquettes and pellets under simulated blast furnace conditions[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2019,50(4):1878－1895.

[13] CHEN B J, JIANG T, WEN J, et al. Review of pellets and blast furnace slag research progress: The effects of MgO on metallurgical properties[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2023,50(8):1022－1036.

（下转第 246 页）

38(1):6 – 8.

[12] 张立国,任伟,刘德军,等. 半焦作为高炉喷吹用煤研究[J]. 鞍钢技术,2015(1):13 – 17.
ZHANG Liguo, REN Wei, LIU Dejun, et al. Study on semi-coke used as pulverized coal for injection into blast furnace[J]. Angang Technology,2015(1):13 – 17.

[13] 何选明,付鹏睿,王春霞,等. 用于高炉喷吹的低阶煤梯级转化半焦的燃烧性能[J]. 钢铁,2014,49(9):92 – 96.
HE Xuanming, FU Pengrui, WANG Chunxia, et al. Combustion behavior of low rank coal char application in blast furnace injection[J]. Iron & Steel,2014,49(9):92 – 96.

(上接第195页)

[14] 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.

[15] UMADEVI T,KUMAR P,LOBO N F,et al. Influence of pellet basicity (CaO/SiO_2) on iron ore pellet properties and microstructure[J]. ISIJ International,2011,51(1):14 – 20.

[16] ZHU W H,WINTERSTEIN J,MAIMON I,et al. Atomic structural evolution during the reduction of α-Fe_2O_3 nanowires[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2016,120(27):14854 – 14862.

[17] CHEN B J, JIANG T, WEN J, et al. High-chromium vanadium-titanium magnetite all-pellet integrated burden optimization and softening-melting behavior based on flux pellets[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,2024,31(3):498 – 507.

广 告 目 次

封面	《烧结球团》创刊50周年特刊	前彩11	南京三埃工控有限公司
封二	襄阳中和机电技术有限公司	前彩12 – 13	北京金都泰拓冶金技术研究有限公司
封三	河南好运祥耐材有限公司	前彩14 – 15	北京顺泰克科技有限公司
封底	河北同业冶金科技有限责任公司	前彩16	焦作市迈科冶金机械有限公司
前彩1	湖南宏德陶瓷科技有限公司	前彩17	成都利君实业股份有限公司
前彩2 – 3	朝阳重型机器有限公司	前彩18	江苏鑫华能环保工程股份有限公司
前彩4 – 5	湖南中冶长天重工科技有限公司	前彩19	江阴市创裕机械有限公司
前彩6 – 7	唐山助纲炉料有限公司	前彩20	厦门川亿机械设备有限公司
前彩8	秦皇岛秦冶重工有限公司	前彩21	鞍山市明阳金属材料有限公司
前彩9	华基环保(武汉)有限公司	前彩22	中冶长天炉窑工程技术公司
前彩10	长沙天为华信环保装备有限公司		