煤气利用率对炉料冶金性能演变规律的影响

寇鑫林[1,2]，柴轶凡[1,2]，刘培军[1,2]，闫瑞军[1,2]，李 靖[1,2]，樊君尧[1,2]
（1. 内蒙古科技大学 冶金未来技术学院，内蒙古 包头 014010；
2. 轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室，内蒙古 包头 014010）

摘要：高炉炼铁作为钢铁工业能耗与碳排放的核心环节，其高效低碳运行高度依赖炉料冶金性能与还原气氛的精准适配。煤气利用率作为衡量高炉节能水平的关键指标，其变化对炉料冶金性能具有显著调控作用。本研究通过系统试验，揭示了煤气利用率变化对烧结矿与球团矿低温还原粉化指数及还原性指数的调控规律。结果表明：随煤气利用率增加，烧结矿低温还原粉化指数普遍提升，炉料还原性指数均呈增长趋势且该影响规律受炉料成分调控。其中，烧结矿 S-C 因高碱度促进铁酸钙生成，抗粉化能力最优；S-A 因 MgO 生成铁酸镁抑制膨胀，冶金性能稳定；S-B 因 SiO_2 含量低导致骸晶赤铁矿增多，粉化程度最大。还原性方面，S-B 因低硅酸盐含量使得还原性指数在 3 组烧结矿中最高，球团矿 P-C 因高 TFe、低含量脉石相，还原性指数达到 85.75%。XRD 与 SEM-EDS 分析证实，煤气利用率降低加剧 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$ 相变应力，导致微观裂纹与孔隙增生。本研究分析了煤气利用率－炉料冶金性能的影响规律，为高炉低碳操作与炉料结构优化提供了理论依据。

关键词：煤气利用率；冶金性能；烧结矿；球团矿；低碳
中图分类号：TF54；TF046.4；TF046.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0214－09
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.019

Effect of gas utilization rate on evolution law of metallurgical properties of furnace charge

KOU Xinlin[1,2], CHAI Yifan[1,2], LIU Peijun[1,2], YAN Ruijun[1,2], LI Jing[1,2], FAN Junyao[1,2]
(1. School of Metallurgical Future Technology, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Green Extraction and Efficient Utilization of Light Rare Earth Resources, Ministry of Education, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: As a core process for energy consumption and carbon emissions in the iron and steel industry, blast furnace ironmaking is highly dependent on the precise matching between the metallurgical properties of the furnace charge and the reducing atmosphere for its efficient and low-carbon operation. The gas utilization rate is a key indicator for evaluating the energy-saving level of blast furnaces, and its change plays a significant regulatory role in the metallurgical properties of the furnace charge. Through systematic experiments, this study reveals the regulatory laws of changes in gas utilization rate on the low-temperature reduction degradation index (RDI) and reduction index (RI) of sinter and pellets. The results show that with the increase in gas utilization rate, the RDI of sinter generally increases, while the RI of the furnace burdens shows an increasing trend, and this effect law is adjusted and controlled by the furnace burden composition. Among the sinters, S-C exhibits the optimal anti-degradation performance due to its high basicity that promotes the formation of

收稿日期：2025－09－30；**修回日期**：2025－11－12
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52364043)；中央引导地方科技发展资金资助项目(2024ZY0078)；内蒙古自治区科技计划资助项目(2025YFHH0055)；中国内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2025YQ016)；内蒙古自治区教育厅冶金工程一流学科科研专项资助项目(YLXKZX-NKD-006、YLXKZX-NKD-041)
作者简介：寇鑫林(1998—)，男，博士研究生，从事低碳冶金与资源综合利用方面的研究。
通信作者：柴轶凡(1992—)，男，教授，博士生导师，从事低碳冶金与资源综合利用方面的研究。

calcium ferrite; S-A maintains stable metallurgical properties as MgO forms magnesium ferrite to inhibit expansion; while S-B shows the highest degree of degradation due to low SiO_2 content leading to increased skeletal hematite. In terms of reducibility, S-B achieves the highest RI among the three groups of sinter due to its low silicate content, while pellet P-C reaches an RI of 85.75% owing to its high TFe and low gangue phase content. XRD and SEM-EDS analyses confirm that the decrease in gas utilization rate intensifies the phase transformation stress from Fe_2O_3 to Fe_3O_4, resulting in the increasing of microcracks and pores. This study analyzes the effect law of gas utilization rate on the metallurgical properties of the furnace charge, providing a theoretical basis for the low-carbon operation of blast furnaces and the optimization of furnace charge structure.

Key words: gas utilization rate; metallurgical properties; sinter; pellet; low-carbon

高炉炼铁作为现代钢铁工业的关键环节，其能耗占整个钢铁生产流程的 70% 以上，CO_2 排放量占比超过 90%[1]。高炉通过复杂的物理化学反应实现铁矿石的高效还原，其中煤气利用率(η)是衡量高炉节能水平与操作稳定性的关键指标(η = 实际利用的煤气量/总煤气量)[2]。提升煤气利用率可直接减少 CO 排放、降低燃料比，通常 η 每提高 1%，高炉燃料比可降低 1.2%，铁水产量增加 0.5%~1.0%[3]。

然而，煤气利用率提升会改变高炉内的还原氛围，进而影响炉料的冶金性能。高炉内不同区域的温度与气体组成存在显著梯度，而 η 的提升会直接改变各区域的气体配比，在高炉块状带区域，η 提高会导致 CO_2 浓度升高、CO 浓度降低。炉料在此区域发生低温还原反应，Fe_2O_3 还原成 Fe_3O_4 时体积膨胀产生内应力，此时炉料易因晶格体积变化产生粉化[4]；若低温还原粉化指数过高，粉化后的细颗粒会堵塞炉料间隙，导致透气性下降，引发悬料等故障[5]。在高炉中下部区域，η 提升过程中，炉内还原气体 CO 浓度也会随操作参数发生变化，直接影响炉料的还原性指数[6-7]，还原性指数过低会延长还原时间，降低高炉利用系数；还原性指数过高并伴随炉料粉化，同样会破坏炉况顺行。因此，明确不同煤气利用率对炉料低温还原粉化指数和还原性指数的影响规律，是实现高炉顺行的前提。

现有研究多聚焦于单一炉料在固定气氛下的冶金性能，或单一气氛对不同炉料的影响。吉伟等[8]通过分析烧结矿成矿机理，提出 $w(FeO)$ 在 7.5%~9.0%、碱度为 1.9~2.15、$w(MgO) \leqslant 2.3\%$、$w(Al_2O_3)/w(SiO_2)$ 比在 0.10~0.35 范围内的烧结矿冶金性能最优，ZHANG 等[9]通过烧结矿浸泡法发现 Cl^- 是降低烧结矿低温还原粉化指数的关键因素。韩婷等[10]解析了烧结矿与球团矿的性能差异，发现烧结矿中 $CaO \cdot Fe_2O_3$ 相的存在促进了高熔点矿物生成，球团矿的赤铁矿微孔结构利于还原气体扩散。张军红等[11]研究了各单一含铁炉料的冶金性能以及不同块矿配比下混合炉料的冶金性能，发现烧结矿和块矿在软化后期开始发生交互作用，形成较低熔点的 $CaO \cdot FeO \cdot SiO_2$，在烧结矿配比为 75% 的情况下，块矿配入量应控制在 10% 左右。刘志豪等[12]通过模拟高炉气固还原过程，研究发现金属化球团疏松多孔结构使其还原速率和还原度显著优于氧化球团，低温还原粉化性与氧化球团相近。但这些研究均未考虑煤气利用率动态变化对高炉还原气氛的重构作用，也未系统揭示该变化对不同成分炉料低温还原粉化指数和还原性指数的协同调控机制，缺乏煤气利用率与炉料冶金性能的量化关系，难以支撑高炉低碳操作与炉料结构优化的实际需求。

煤气利用率的提升不仅重构了高炉中上部还原性气氛的热力学平衡，更通过调控氧化铁逐级还原，显著改变炉料冶金性能的演化规律。基于此，本研究采用还原性分析及低温还原粉化指数表征手段，系统研究不同 CO 浓度下，球团矿、烧结矿的冶金性能影响机制，旨在建立煤气利用率与炉料冶金性能的量化关系，为高炉操作参数优化及低碳炉料配比设计提供理论支撑。

1　试验

1.1　原料制备

试验原料取自 3 家钢厂的烧结矿(S-A、S-B、S-C)和球团矿(P-A、P-B、P-C)，每类炉料取样量

≥50 kg，经颚式破碎机破碎后，筛选出试验所需粒度为 10 ~ 12.5 mm 试样。各炉料成分如表 1 所示。

表 1 炉料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of furnace charge %

炉料种类	TFe	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3
S-A	53.91	8.78	11.03	5.79	2.81	2.46
S-B	55.76	8.64	11.34	5.26	2.12	2.16
S-C	53.96	8.78	12.38	5.93	2.13	1.96
P-A	63.00	1.39	0.55	1.87	5.76	2.37
P-B	63.50	1.08	0.72	6.30	0.69	1.07
P-C	65.33	0.80	2.47	2.25	0.95	0.58

1.2 试验方法

低温还原粉化及还原性测定试验采用冶金综合性能测定装置进行测试，本试验装置由三大核心组件构成：① 气路控制系统：采用电子流量计实现 CO、N_2等反应气体的精准配比与流量控制，确保还原气体浓度的稳定性；② 质量监测系统：配置高精度电子天平(分辨率为 0.01 g)实时采集试样失重数据；③ 高温反应系统：包含刚玉质反应管及管式电阻炉，通过 PID 温控模块实现精确控温。试验装置如图 1 所示。

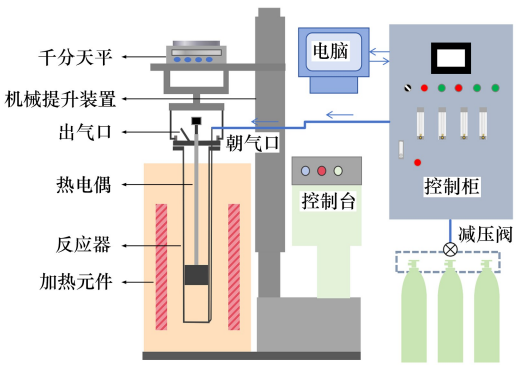


图 1 冶金综合性能测定装置

Fig. 1 Metallurgical comprehensive performance testing device

烧结矿低温还原粉化指数是评价高炉原料冶金性能的核心指标之一。在高炉 400 ~ 600 ℃区间内，CO 等还原性气体会与 Fe_2O_3 发生交互反应，从而引发赤铁矿向磁铁矿的晶格转变，导致体积膨胀并产生内应力裂纹。烧结矿低温还原粉化试验方案气体组成(每组方案烧结矿试样质量为 500 g)如表 2 所示。

还原性指数作为衡量高炉原料反应活性的核心指标，直接决定了铁氧化物中氧元素的脱除效率与高炉间接还原进程的占比。本试验研究不同还原气氛对烧结矿和球团矿还原性的影响机制，其试验方案气体组成(每组方案烧结矿试样质量为 500 g)如表 3 所示。

表 2 烧结矿低温还原粉化试验方案气体组成

Table 2 Gas composition for low-temperature reduction degradation test of sintered ore

试验方案	气体组成(体积分数)/%		
	CO	CO_2	N_2
方案 1	20	20	60
方案 2	18	22	60
方案 3	16	24	60
方案 4	14	26	60

表 3 烧结矿、球团矿还原性试验方案气体组成

Table 3 Gas composition for reducibility test of sinter and pellet ore

试验方案	气体组成(体积分数)/%	
	CO	N_2
方案 1	40	60
方案 2	35	65
方案 3	30	70
方案 4	25	75
方案 5	20	80

1.3 试验结果表征

将(500 ± 1) g 的试样平铺于还原管内，随后密封还原管顶部，并将其置入还原炉中。向还原管中通入 N_2，标态流量为 5 L/min，并通过控温柜设置升温程序，升温速度为 10 ℃/min。当试样温度接近还原开始温度时，增大 N_2的标态流量至 15 L/min。当试样温度到达还原开始温度时，通入标态流量为 15 L/min 的还原气体代替 N_2，当试样温度到达还原结束温度时，停止通入还原气体，并向还原管中通入标态流量为 5 L/min 的 N_2，待试样温度降至 200 ℃以下时，将还原管提出炉外进行冷却，将试样冷却到室温。对还原后的试样进行转鼓测试，利用式(1)计算烧结矿低温还原粉化指数(S_{RDI})。

$$S_{RDI} = \frac{m_1 + m_2}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

式中：m_0为还原后转鼓前试样质量，g；m_1为留在

6.3 mm 筛上的试样质量，g；m_2为留在 3.15 mm 筛上的试样质量，g。

称取试样(500 ± 1) g，试样粒度 10 ~ 12.5 mm，将试样装入还原装置，并置于还原炉内，通入流量为 5 L/min 氮气保护试样，当还原炉达到 900 ℃时，增大 N 的标态流量至 15 L/min，保温 30 min 后，通入标态流量为 15 L/min 的还原气体代替 N_2，以三价铁状态为基准，测试 3 h 后的还原度，根据试(2)计算试样还原性指数(S_{RI})。

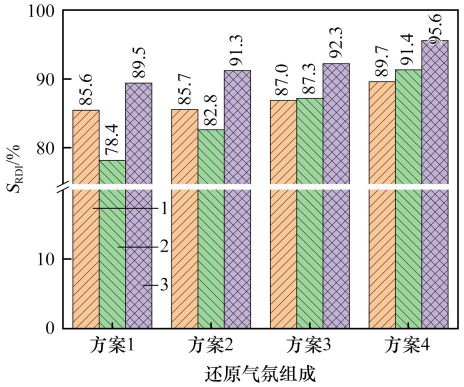
$$S_{RI} = \left\{\frac{0.111\,\omega_1}{0.430\,\omega_2} + \frac{m_4 - m_t}{m_3 \times 0.430\,\omega_2} \times 100\right\} \times 100 \tag{2}$$

式中：ω_1为还原前试样中的亚铁质量分数,%；ω_2为还原前试样中的全铁质量分数,%；m_3为试样质量，g；m_4为还原开始前试料和反应管总质量，g；m_t为还原开始 t min 后试料和反应管总质量，g。

2　结果与讨论

2.1　还原气氛对炉料冶金性能的影响

烧结矿 S_{RDI}反映了炉料在高炉块矿带的抗粉化能力，数值越大性能越优。试验采用 4 组还原气氛，模拟高炉煤气利用率提升过程中块状带的气氛变化，其 CO 体积分数越低表明高炉煤气利用率越高。固定 60% N_2配比，逐步提升 CO 占比气氛下（20% CO-20% CO_2、18% CO-22% CO_2、16% CO-24% CO_2、14% CO-26% CO_2）烧结矿 S-A、S-B、S-C 的 S_{RDI}如图 2 所示。



1—S-A；2—S-B；3—S-C。

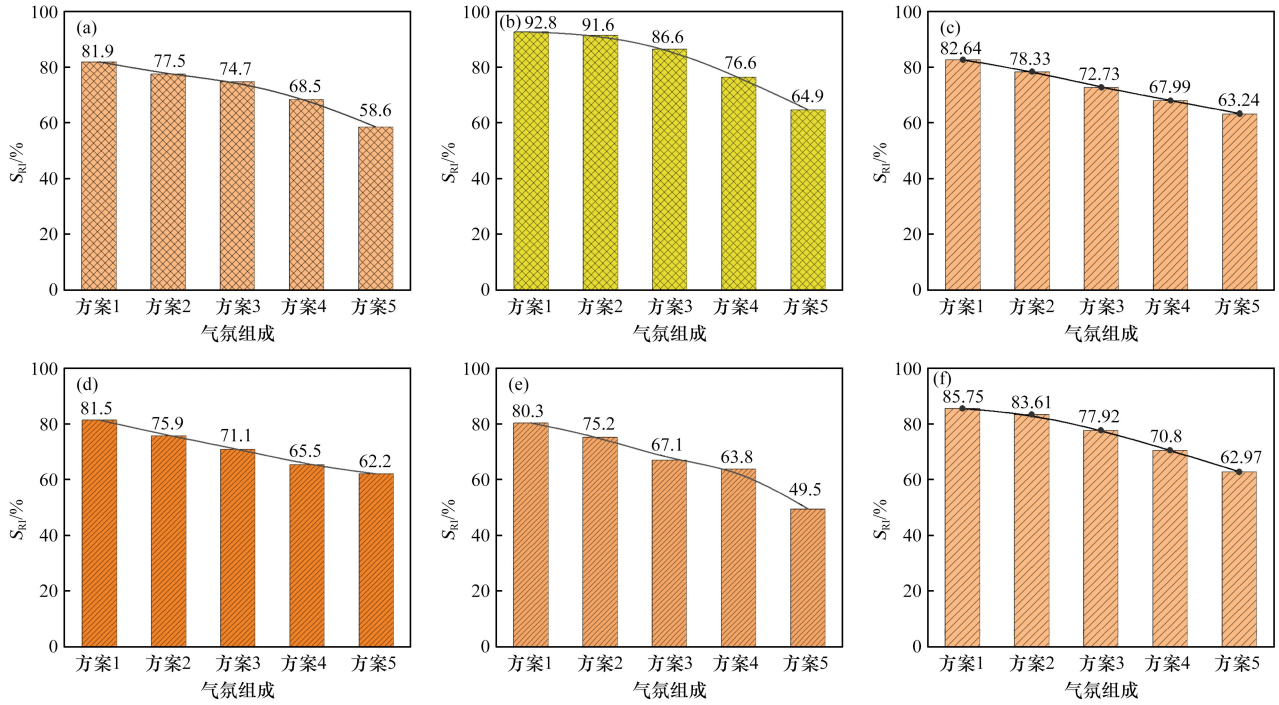
图 2　不同气氛下炉料(烧结矿)的低温还原粉化指数

Fig. 2　Low-temperature reduction powdering index of furnace charge (sintered ores) under different atmospheres

由图 2 可知，当 CO 体积分数从 14% 增加至 20% 时，S-A 的 S_{RDI}从 89.7% 降低至 85.6%，降幅较小，且在 CO 体积分数为 18% 时，S_{RDI}降幅趋于平缓，说明 S-A 具备一定的抗粉化能力，结合成分表分析，S-A 的 w(MgO)最高，MgO 可与 Fe_2O_3结合形成铁酸镁($MgFe_2O_4$)，该物相晶格结构稳定，能有效缓解 Fe_2O_3向 Fe_3O_4转变过程中的体积膨胀，减少内应力聚集，从而抑制裂纹产生[13]。S-B 的 S_{RDI}随 CO 体积分数变化从 91.4% 降至 78.4%，降幅最为显著。在高 CO 体积分数下 S-B 的 S_{RDI}最低，主要是由于 S-B 中 SiO_2含量最低，SiO_2含量不足会导致烧结矿中出现大量骸晶状结构的赤铁矿，此类赤铁矿在还原相变过程中晶形转变剧烈，易造成内应力集中，进而引发严重粉化[14-15]。S-C 的 S_{RDI}随 CO 体积分数变化从 95.6% 降低至 89.5%，当 CO 体积分数低时，S-C 的抗粉化能力最强。S-C 的碱度相较于 S-A 与 S-B 更优，高碱度促进了大量铁酸钙($CaO \cdot Fe_2O_3$)生成，$CaO \cdot Fe_2O_3$作为强黏结相，可增强烧结矿颗粒间的结合强度，有效阻止还原过程中烧结矿裂纹的产生与扩展，从而提升抗粉化性能[16]。

S_{RI}是评价铁矿石在高炉炼铁过程中，被还原性气体还原的难易程度的关键指标，通常认为 $S_{RI} \geqslant 78\%$的炉料属于还原性优良的炉料。试验设定了 5 组气氛来模拟随煤气利用率改变导致的高炉还原气氛变化，试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知，所有烧结矿(S-A、S-B、S-C)与球团矿(P-A、P-B、P-C)的 S_{RI}均随 CO 体积分数的减少呈下降趋势，符合高炉内铁氧化物还原反应($FeO + CO = Fe + CO_2$)的动力学规律，即 CO 体积分数降低会减少与 FeO 的接触、降低反应界面 CO 分压，导致还原效率下降。对比 3 组烧结矿可以发现，S-B 在所有 CO 体积分数下 S_{RI}均为烧结矿最优，当 CO 体积分数为 40% 时达 92.8%，这是因为 S-B 中 SiO_2的含量低，使得烧结矿中钙铁橄榄石等难还原硅酸盐相减少，铁氧化物更易被还原气体接触和还原，从而使烧结矿还原性增强。S-C 在气氛变化中 S_{RI}的变化幅度最小，表现出稳定的还原特性。S-A 则因高含量的 MgO，在反应过程中生成大量高熔点的$MgFe_2O_4$，抑制了$CaO \cdot Fe_2O_3$的



(a) S-A; (b) S-B; (c) S-C; (d) P-A; (e) P-B; (f) P-C

图 3 不同气氛下炉料的还原性

Fig. 3 Reducibility of charge materials under different atmospheres

生成[17]，而 $CaO\cdot Fe_2O_3$ 的还原活性高于 $MgFe_2O_4$。因此，S-A 的还原性相较于 S-B 与 S-C 更差。

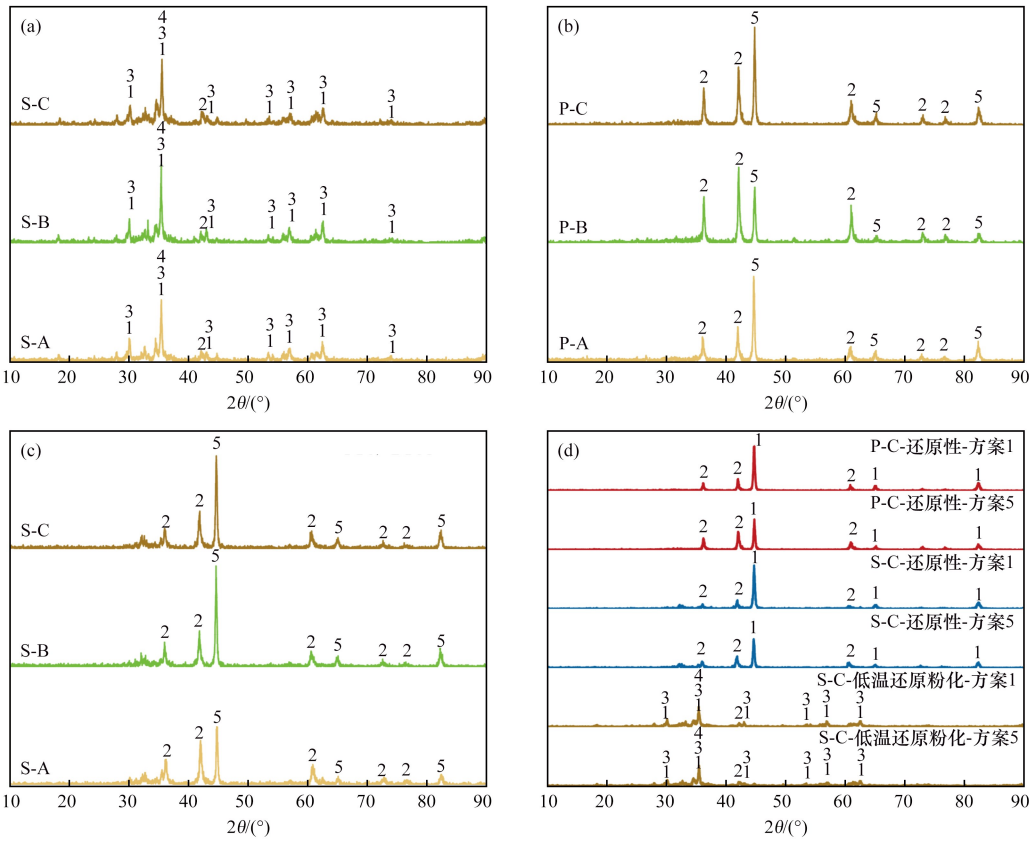
从 3 组球团矿对比来看，P-C 还原性最优，当 CO 体积分数为 40% 时，S_{RI} 达 85.75%，并且随着 CO 体积分数的增加，其 S_{RI} 增长趋势逐渐变缓。这主要由于 P-C 的 w(TFe) 最高而 w(FeO) 最低，w(FeO) 降低可直接提升还原度；同时其 $w(SiO_2)$ 低于 P-B 的 6.30%，减少了 SiO_2 与 FeO 生成难还原的 $2FeO\cdot SiO_2$，且 $w(Al_2O_3)$ 仅为 0.58%，减少了高熔点铝酸盐对 CO 扩散通道的堵塞，降低气体渗透阻力；P-B 则因为 SiO_2 含量最高，生成大量难还原的 $2FeO\cdot SiO_2$，因而还原性为 3 种球团矿中最差。

2.2 XRD 分析

X 射线衍射(XRD)分析作为表征晶体物相组成与结构的核心手段，能够定性识别炉料中的物相种类、定量分析各物相相对含量。本试验开展不同烧结矿/球团矿在同一还原气氛下的 XRD 分析以及同一烧结矿/球团矿在不同还原气氛下的 XRD 分析，从而明确成分差异主导的物相组成差异以及 CO 体积分数变化引发的物相演变规律，具体分析结果如图 4 所示。

由图 4 中可知，不同烧结矿/球团矿在同一还原气氛下的矿物组成差异，以及同一烧结矿/球团矿在不同 CO 体积分数下呈现明确的相变规律。在相同还原气氛条件下，图 4(a)中 3 种烧结矿以 Fe_3O_4、$MgFe_2O_4$ 和 $CaO\cdot Fe_2O_3$ 为主要物相，表明烧结矿在低温还原粉化过程中发生了 Fe_2O_3 向 Fe_3O_4 的相变，此相变会引发晶格膨胀产生内应力，是导致低温还原粉化的核心原因，而 $MgFe_2O_4$ 和 $CaO\cdot Fe_2O_3$ 的存在则能抑制膨胀。图 4(b)中 3 种球团矿则显示出较强的 Fe、FeO 衍射峰，Fe 衍射峰的强度直接反映还原程度，对比 3 组 XRD 图谱发现 P-B 的 Fe 衍射峰强度最低，说明其还原度最低，这与 P-B 在还原性试验中 S_{RI} 最差的结果相互印证。图 4(c)中 3 组烧结矿中同样检测到明显的 Fe 和 FeO 衍射峰，其中 S-A 的 Fe 衍射峰强度最弱，表明其在 CO 体积分数为 20% 的还原气氛中还原程度最低，与 S-A 还原性较差的试验结果相符。

对于同一炉料在不同还原气氛下的演变趋势，图 4(d)中 XRD 图谱揭示了 CO 体积分数对相变路径的影响：当 CO 体积分数从 14% 增强至 20% 时，S-C 的 Fe_3O_4 衍射峰强度略有增强，这与实验中 S-C 的 S_{RDI} 变化趋势较缓相吻合，其中 $CaO\cdot Fe_2O_3$



（a）低温还原粉化试验相同气氛下 3 种烧结矿；（b）还原性试验相同气氛下 3 种球团矿；
（c）还原性试验相同气氛下 3 种烧结矿；（d）不同气氛下低温还原粉化、还原性试验炉料
1—Fe_3O_4；2—FeO；3—$MgFe_2O_4$；4—$CaO·Fe_2O_3$；5—Fe。

图 4　相同气氛下不同炉料 XRD 与不同气氛下同一炉料 XRD 分析

Fig. 4　XRD analysis of different raw materials under the same atmosphere and the same raw material under different atmospheres

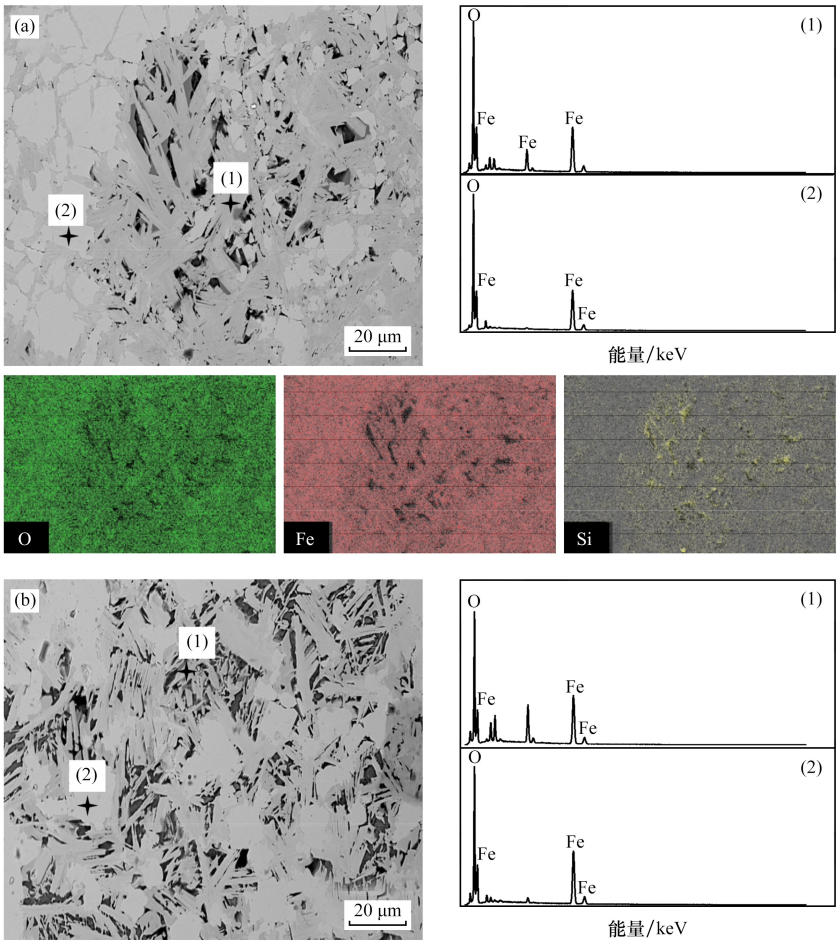
的稳定存在抑制了相变引发的粉化。当 CO 体积分数从 20% 升高至 40% 时，S-C 与 P-C 中 Fe 衍射峰显著增强，表明 FeO 转变为 Fe 的还原反应更充分，金属铁生成量增加，这直接导致炉料 S_{RI} 提升，与还原性试验结果一致。

2.3　SEM-EDS 分析

通过扫描电镜可以得到不同 CO 体积分数（不同煤气利用率变化）下烧结矿还原粉化及球团矿还原后的形貌差异，能直观反映出其内部结构和成分在还原过程中的变化。S-A 在不同 CO 体积分数下的 SEM-EDS 分析结果如图 5 所示。

由图 5 可知，在 CO 体积分数为 14% 条件下，大部分区域仍呈现未完全还原的铁氧化物相，表现出弱还原反应，还原生成的金属铁占比低，不足以通过晶粒聚集形成连续铁网络结构，且还原反应产生的孔隙数量少，孔隙率仅为 15%～20%，因此结构致密。这种致密结构能减少裂纹产生，使 S_{RDI} 保持较高水平，但较低的孔隙率会阻碍还原气体扩散，一定程度上影响 S_{RI}。在 CO 体积分数为 20% 条件下，还原反应速率加快，可以观察到烧结矿表面和内部有大量细小的铁晶粒生成。这是由于 CO 与烧结矿中的铁氧化物发生还原反应，CO 夺取铁氧化物中的氧，使得铁原子析出并结晶。随着还原的持续进行，铁晶粒逐渐长大并相互连接。同时，烧结矿内部形成许多孔隙，这些孔隙是铁氧化物被还原成铁的过程中，氧元素以 CO_2 形式逸出留下的空间，使得孔隙率升至 40%～45%。大量孔隙的存在会降低烧结矿的结构强度，导致 S_{RDI} 下降，但孔隙结构有利于还原气体扩散，为还原反应提供通道，间接提升还原能力。

球团矿 P-A 在 CO 体积分数分别为 20% 与 40% 气氛下的 SEM-EDS 分析如图 6 所示。由图 6



（a）方案 4；（b）方案 1

图 5 低温还原粉化后的烧结矿的 SEM-EDS 分析

Fig. 5 SEM-EDS analysis of sintered ore after low-temperature reduction and pulverization

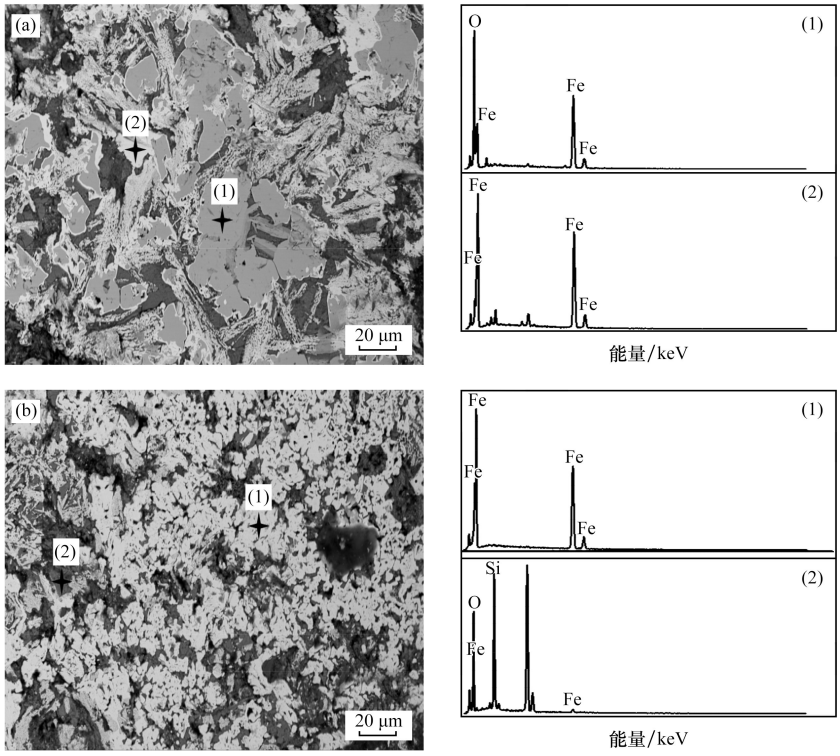
可知，在 CO 体积分数为 20% 气氛下，球团矿表面呈现致密结构，金属铁相以孤立颗粒存在，还原程度低，此时孔隙率约为 20%～25%，还原气体扩散受阻，导致 S_{RI} 低。当 CO 体积分数提升至 40% 时，微观结构发生明显变化：金属铁相显著聚集并形成连续网状结构，强还原气氛促进了铁氧化物还原和金属铁晶粒的聚集长大。在 CO 体积分数为 40% 条件下形成了疏松多孔结构（孔隙率 35%～40%），能大幅降低还原气体扩散阻力，利于还原反应深入进行，从而提升 S_{RI}；但同时较高的孔隙率会降低球团矿的结构强度，可能导致低温还原粉化率恶化，与前文 S_{RDI} 和 S_{RI} 的关联性规律一致。

3 结 论

（1）煤气利用率下降会加剧炉料冶金性还原粉化但存在成分依赖性。当煤气利用率降低时，CO 浓度升高，炉料低温还原粉化程度加深，同时粉化程度也受炉料成分调控。S-C 因高碱度生成大量铁酸钙黏结相，增强颗粒结合力并抑制裂纹扩展，抗粉化能力最强；S-A 通过 MgO 生成铁酸镁缓解晶格膨胀，冶金性能稳定；S-B 因 SiO_2 含量低，骸晶赤铁矿占比增加，粉化程度最高。

（2）炉料还原性随着煤气利用率提升而增加。煤气利用率提升，炉料与 CO 反应充分，S_{RI} 普遍增加。S-B 因 SiO_2 含量低，难还原硅酸盐相生成量少，还原阻力最小，S_{RI} 在 3 组烧结矿中最优；球团矿中 P-C 因高 TFe、低 FeO 以及低脉石（SiO_2、Al_2O_3）含量，气体渗透阻力小，还原程度最高。

（3）煤气利用率降低促进 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$ 相变并产生内应力，导致微观裂纹与孔隙增生，降低结构强度；高煤气利用率下金属铁网络的形成虽



（a）方案 5；（b）方案 1

图 6　还原性试验后球团矿的 SEM-EDS 分析

Fig. 6　SEM-EDS analysis of pellets after restorative experiments

利于还原深入，但孔隙率过高会加剧结构疏松化，导致 S_{RDI}降低。

参考文献：

[1] ZHAO J, ZUO H B, WANG Y J, et al. Review of green and low-carbon ironmaking technology[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(3): 296 – 306.

[2] GAO X D, LI X. Analysis of gas utilization rate of vanadium titanium magnetite reduced by CH_4-H_2-CO mixed gas in blast furnace[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2025, 70(2): 575 – 582.

[3] 刘林刚，魏大胜．高炉煤气利用率的影响因素及实践研究[J]．山西冶金，2024，47(9)：149 – 150.
LIU Lingang, WEI Dasheng. Study on influencing factors and practice of utilization ratio of blast furnace gas[J]. Shanxi Metallurgy, 2024, 47(9): 149 – 150.

[4] 傅菊英，姜涛，朱德庆．烧结球团学[M]．长沙：中南工业大学出版社，1996.
FU Juying, JIANG Tao, ZHU Deqing. Sintered pelletizing [M]. Changsha: Central South University of Industrial Press, 1996.

[5] PIMENTA H P, SESHADRI V. Characterisation of structure of iron ore sinter and its behaviour during reduction at low temperatures[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2002, 29(3): 169 – 174.

[6] 赵霞，潘文，李铁军．铁矿石还原气 – 固还原行为研究现状[J]．中国冶金，2013，23(4)：1 – 6.
ZHAO Xia, PAN Wen, LI Tiejun. Overview of research on gas-solid reduction of iron ore[J]. China Metallurgy, 2013, 23(4): 1 – 6.

[7] SHI B J, ZHU D Q, PAN J, et al. Research on the preparation of sinter for COREX reduction process by varying basicity and MgO content[J]. Minerals, 2022, 12(2): 207 – 221.

[8] 吉伟，冯二莲．烧结矿转鼓强度和冶金性能研究[J]．河北冶金，2024(5)：14 – 23.
JI Wei, FENG Erlian. Research on drum strength and metallurgical properties of sinter ore[J]. Hebei Metallurgy, 2024(5): 14 – 23.

[9] ZHANG X, ZHANG J L, HU Z W, et al. Effect of $CaCl_2$ on RDI and RI of sinter[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010, 17(11): 7 – 12.

[10] 韩婷，刘兴乐，何奕波，等．烧结矿与球团矿冶金性能研究[J]．山西冶金，2025，48(6)：8 – 10.

HAN Ting, LIU Xingle, HE Yibo, et al. Study of metallurgical properties of sinter and pellets[J]. Shanxi Metallurgy,2025,48(6):8 – 10.

[11] 张军红,刘颖超,佘雪峰,等. 不同块矿炉料结构下炉料冶金性能研究[J]. 烧结球团,2021,46(5):79 – 85.
ZHANG Junhong, LIU Yingchao, SHE Xuefeng, et al. Study on metallurgical performance of furnace material under different lump ore furnace structures[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(5):79 – 85.

[12] 刘志豪,王爱萍,彭浩,等. 金属化球团热态冶金性能对高炉炉料透气性的影响[J]. 烧结球团,2025,50(4):48 – 55.
LIU Zhihao, WANG Aiping, PENG Hao, et al. Effect of high-temperature metallurgical properties of metallized pellets on breathability of blast furnace charge[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(4):48 – 55.

[13] 张国成,罗果萍,宋巍,等. MgO 对烧结矿液相形成性能和微观结构特性的影响[J]. 中国冶金,2021,31(10):8 – 16.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, SONG Wei, et al. Effect of MgO on liquid phase formation properties and microstructure of sinter[J]. China Metallurgy, 2021, 31(10):8 – 16.

[14] BARANBN P, ERRIGO V, MONTOMOLI G. Recent improvements in sintering operation at Nuova Italsider [J]. Ironmaking Proc,1983,42:59.

[15] 闫志武,张建良,张亚鹏,等. SiO_2 对烧结矿冶金性能及微观结构的影响[J]. 工程科学学报,2016,38(7):913 – 919.
YAN Zhiwu, ZHANG Jianliang, ZHANG Yapeng, et al. Effects of SiO_2 on the metallurgical properties and microstructure of sinter[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016,38(7):913 – 919.

[16] 李秀,李杰,张玉柱,等. 不同碱度对钒钛烧结矿质量的影响[J]. 矿产综合利用,2017,38(5):115 – 118.
LI Xiu, LI Jie, ZHANG Yuzhu, et al. Effect of different basicity on quality of vanadium titanium sintering ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017,38(5):115 – 118.

[17] 潘向阳,龙跃,李神子,等. MgO/Al_2O_3 对烧结矿冶金性能的影响[J]. 钢铁钒钛,2019,40(4):100 – 105.
PAN Xiangyang, LONG Yue, LI Shenzi, et al. Effect of MgO/Al_2O_3 on metallurgical properties of sinter[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2019,40(4):100 – 105.

《烧结球团赋》——湘钢总工程师汤乐云

七七风云变，星火起湘川。
中冶举长天，创刊号角传。
铅字凝霜夜，油墨染青衫。
五十春秋过，铁卷写千篇！
烧结载道远，球团铸铁魂。
一册承匠意，万字铸国根。
钢花溅纸背，炉火映晨昏。
谁言工科冷？热血化诗温！
德日专家至，俄美论文刊。
五洲聚智语，四海破疑难。
翻译挑灯校，数据逐字勘。
至今数据库，犹记译笔寒。
金刊奖章耀，核心期刊冠。
专利三十项，标准百页繁。
高被引文献，院士亲题赞。
最是行业榜，年年列前端！
昔教贫矿炼，今导低碳先。
钢厂千座立，皆读此刊言。
粉尘变珠玉，废渣作金砖。
功成身隐处，犹护碧云天！
夜访编辑部，灯火仍阑珊。
新人伏案牍，老将校稿残。
问君何所执？笑指创刊年。

致敬行业专家和前辈为《烧结球团》创刊倾情题赋，汤总此赋，将冷硬的工业技术与深厚的人文情怀深度融合。它表明中国钢铁行业的领导和专家及产业链同仁，不仅关注产量与技术，更重视行业文化的沉淀、精神血脉的传承与知识共同体的构建。赋中所赞颂的“匠意”与“国根”，正是其企业精神与行业责任感的诗意表达。