富氢气氛下块矿的还原冶炼行为

周江虹[1]，李圣辉[1]，黎子曦[2,3]，郭正启[2,3]
（1. 宝武资源有限公司，上海 200126；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；
3. 淡水河谷－中南大学低碳与氢冶金联合实验室，湖南 长沙 410083）

摘要：钢铁行业是我国碳排放大户，目前我国钢铁生产以高炉—转炉长流程为主，大力推行高炉富氢冶炼是减少钢铁行业碳排放重要措施之一。本文研究了高炉富氢条件下块矿的还原行为，系统分析了块矿的还原及软熔滴落特性，阐明了还原过程中的物相与结构演变规律，为我国富氢高炉炼铁技术的发展提供理论指导。研究结果表明：随着还原气氛中 H_2 含量增加，块矿低温还原粉化率由 98.65% 降至 97.26%，但受限于块矿的致密结构，还原气氛的改变对其低温还原粉化性能影响甚微；随着还原气氛中 H_2 含量增加，块矿的还原度从 53.02% 升至 96.15%，提高了 43.12 个百分点，生成的金属铁主要呈致密单相形态，内部孔隙率较低。此外，随着还原气氛中 H_2 含量增加，块矿熔滴温度提高，促使软熔带位置下移，有助于扩大高炉上部间接还原区间，从而强化冶炼并降低焦耗；熔滴区间收窄及最大压差降低，改善炉内透气性与煤气流分布，提高煤气利用率。

关键词：高炉富氢冶炼；块矿；还原粉化；还原度；软熔滴落
中图分类号：TF19 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0223－09
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.020

Reduction and smelting behaviors of lump ore in hydrogen-enriched atmospheres

ZHOU Jianghong[1], LI Shenghui[1], LI Zixi[2,3], GUO Zhengqi[2,3]
(1. Baowu Resources Co., Ltd., Shanghai 200126, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Vale-Central South University Low Carbon and Hydrometallurgy Joint Laboratory, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: The iron and steel industry is a major contributor to carbon emissions in China, where the blast furnace (BF)-basic oxygen furnace (BOF) long process dominates the iron and steel production, and vigorously promoting hydrogen-enriched smelting in blast furnaces is one of the key measures to reduce the carbon emissions of the iron and steel industry. In this paper the reduction behavior of lump ore under hydrogen-enriched BF conditions was studied, the reduction and softening-melting-dripping characteristics of lump ore was systematically analyzed and the evolution laws of phase and structure during the reduction process was elucidated, thus providing theoretical guidance for the development of hydrogen-enriched BF ironmaking technology in China. The study results indicate that as the H_2 content in the reducing atmosphere increases, the low-temperature reduction disintegration index (RDI) of the lump ore decreases from 98.65% to 97.26%. However, limited by the dense structure of the lump ore, the changes in the reducing atmosphere have a minimal effect on its low-temperature reduction disintegration performance. With increasing H_2 content in the reducing atmosphere, the reduction degree (RD) of the lump ore rises from 53.02% to 96.15%, an increase of 43.12 percentage points. The metallic iron produced primarily exists in a dense, single-phase morphology with low internal porosity. Furthermore, as the

收稿日期：2025－10－16；**修回日期**：2025－12－21
基金项目：国家自然科学基金面上资助项目(52474370)
作者简介：周江虹(1969—)，男，高级工程师，从事冶金铁前领域技术研究。
通信作者：郭正启(1988—)，男，教授，从事钢铁冶金技术研究。

H_2 content increases, the softening-melting temperatures of the lump ore increase, which promotes the cohesive zone position to move down and helps expand the indirect reduction zone in the upper part of the blast furnace, thereby intensifying smelting and reducing coke consumption. The narrowing of the softening-melting temperature interval and the decrease in the maximum pressure drop improve the permeability and gas flow distribution within the furnace, which can increase the gas utilization efficiency.

Key words: hydrogen-enriched blast furnace smelting; lump ore; reduction disintegration; reduction degree; softening-melting-dripping

在全球气候危机不断加剧的背景下，钢铁行业作为全球碳排放最大的工业部门之一，迫切需要进一步加快绿色转型，降低碳排放[1]。我国高炉—转炉长流程约占钢产量90%以上，其中高炉炼铁工序的CO_2排放约占整个钢铁生产的75%[2-3]。基于此，在可预见的未来内，低碳高炉炼铁是规模化实现中国钢铁工业低碳任务的重要路径，而富氢冶炼是实现高炉低碳发展的重要手段之一[4]。目前，烧结矿、球团矿和块矿是我国高炉的三大主要含铁炉料。为此，近些年来许多科研工作针对三大炉料的富氢还原开展了相关研究。陈小龙等[5]研究了富氢还原对烧结矿低温还原粉化的影响，发现在500 ℃时，随着还原气体中H_2含量增加，烧结矿的低温还原粉化性能得到改善。陈淼等[6]研究不同含量H_2混合气体还原浮氏体，发现随着还原气体中H_2比例的增加，铁矿石的还原速率大大加快，但是当H_2比例增大到一定值时，促进效果逐渐减弱。BONDALE等[7]分别以纯H_2、Midrex气氛(55%H_2、35%CO、4%CO_2和6%N_2)和纯CO为还原气体，在还原温度为850 ℃、气体流量为2 L/min条件下，对赤铁矿球团进行还原试验。结果表明，纯H_2气氛下的反应速率最高，纯CO气氛下的反应速率最慢，而Midrex气氛下的还原速率介于两者之间。LAN等[8]的研究发现在高炉冶炼过程中增加H_2比例会使含铁炉料的软化特性发生明显变化，含铁炉料的软化开始温度(T_{10})和软化结束温度(T_{40})均增加，软化区间变窄；随着H_2含量的增加，熔化开始温度(T_S)和滴落开始温度(T_d)大幅增加，熔滴区间变窄。国内外学者就高炉富氢含铁炉料还原行为研究主要集中在烧结矿与球团矿并从宏观层面揭示了相关规律[9-14]，但是对块矿在不同气氛下的系统还原行为研究较少，富氢之后块矿的微观结构演变规律和演变机理尚不明确，有必要深入研究不同气氛条件下块矿富氢前后的宏观和微观结构演变。

因此，本文基于高炉富氢条件下，从宏观性能和微观物相变化多尺度系统地研究块矿在不同H_2含量下的还原行为变化与微观结构演变，对丰富高炉富氢低碳冶金基础理论，推动富氢高炉产业化进程具有重要的指导意义。

1 原料性能和研究方法

1.1 原料性能

试验过程中使用的主要原料有块矿以及还原气体(CO、H_2等)。

块矿来自于某国外矿山，其主要化学成分和物理性能分别如表1和表2所示。由表1可知，块矿的铁品位为64%左右，w(FeO)仅为0.22%，属于赤铁矿型块矿。由表2可知，块矿的转鼓强度、耐磨指数和热爆指数分别为93.20%、3.60%和1.70%，高炉冶炼过程中不易产生粉化现象，有利于高炉保持良好的透气性。此外，块矿的孔隙率较低，仅为8.23%，因此其还原性较差。

表1 块矿主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of lumps %

TFe	FeO	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P	S
63.83	0.22	0.087	0.047	1.66	4.10	0.050	0.089

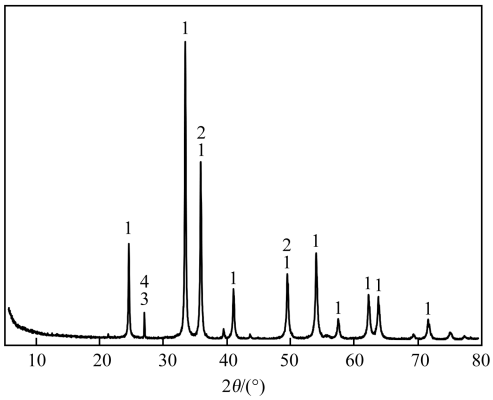
表2 块矿主要物理性能

Table 2 Main physical properties of lumps

转鼓强度(>6.3 mm)/%	耐磨指数(<0.5 mm)/%	孔隙率/%	热爆指数(<6.3 mm)/%
93.20	3.60	8.23	1.70

块矿X射线衍射(XRD)分析如图1所示。由图1可知，块矿主要以磁铁矿(Fe_3O_4)和赤铁矿(Fe_2O_3)为主，还含有少量的石英(SiO_2)和高岭土

$[Al_2(Si_2O_5)OH_4]$。



1—赤铁矿；2—磁铁矿；3—石英；4—高岭土。

图 1　块矿的 XRD

Fig. 1　XRD pattern of lumps

块矿的微观结构如图 2 所示。由图 2 可以看出，块矿的主要矿物组成是赤铁矿，另有少量的高岭石和针铁矿，赤铁矿发育良好，结构较致密，强度高。

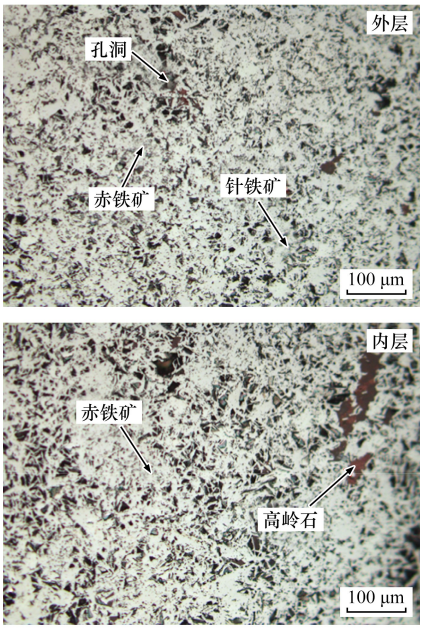


图 2　块矿的微观结构

Fig. 2　Microstructure of lumps

本文所使用的还原剂为纯度大于 99.9% 的 N_2、CO、CO_2 和 H_2 所组成的气体混合配制而成。低温还原粉化研究由 N_2、CO、CO_2 和 H_2 配制，还原度和软熔滴落性能研究所使用的混合气体由 N_2、CO 和 H_2 配制，具体配比见研究方法。

1.2　研究方法

1.2.1　块矿低温还原粉化性能

块矿低温还原粉化性能(RDI)参考《高炉炉料用铁矿石低温还原粉化静态试验》(GB/T 31923.1—2015)标准进行试验，以 $RDI_{>3.15\ mm}$ 作为粉化指标，$RDI_{>6.3\ mm}$ 和 $RDI_{<0.5\ mm}$ 作为参考指标。具体气体组成(体积分数)：① $N_2 + CO + CO_2 + H_2 = 60\% + 20\% + 20\% + 0\%$；② $N_2 + CO + CO_2 + H_2 = 60\% + 10\% + 20\% + 10\%$；③ $N_2 + CO + CO_2 + H_2 = 60\% + 0\% + 20\% + 20\%$；④ $N_2 + CO + CO_2 + H_2 = 40\% + 20\% + 20\% + 20\%$。前 3 种方案为使用 H_2 等量取代 CO 的气体组成来研究富氢后块矿的低温还原粉化性能变化，第 4 种方案为 20% H_2 等量取代 20% N_2 来研究还原气氛对低温还原粉化性能的影响。

1.2.2　块矿还原性能

块矿的还原性能研究参考《铁矿石还原性的测定方法》(GB/T 13241—2017)开展，衡量还原性能的指标有还原度(RI)、全铁含量、金属铁含量和金属化率，具体的气体组成(体积分数)：① $N_2 + CO + H_2 = 70\% + 30\% + 0\%$；② $N_2 + CO + H_2 = 70\% + 20\% + 10\%$；③ $N_2 + CO + H_2 = 70\% + 10\% + 20\%$；④ $N_2 + CO + H_2 = 70\% + 0\% + 30\%$。

1.2.3　块矿软熔滴落性能

块矿软熔滴落性能研究参考《铁矿石高温荷重还原软熔滴落性能测定方法》(GB/T 34211—2017)开展，试验时荷重为(2.00 ± 0.02) kg/cm^2。当从计算机中观察到块矿已经收缩 10%，记录此刻的温度为 T_{10}；当料层收缩 40%，记录此刻的温度为 T_{40}；当观察到料层压差急剧上升，记录此刻的温度为 T_s；当从计算机中观察到第一滴滴落物滴落，记录此刻的温度为 T_d。试验时的具体气氛条件(体积分数)：① $N_2 + CO + H_2 = 70\% + 30\% + 0\%$；② $N_2 + CO + H_2 = 70\% + 20\% + 10\%$；③ $N_2 + CO + H_2 = 70\% + 10\% + 20\%$；④ $N_2 + CO + H_2 = 70\% + 0\% + 30\%$。

1.2.4　块矿还原过程微观结构分析

块矿还原过程微观结构分析主要包括 XRD 分析与显微结构分析。① XRD 分析。将块矿敲碎至 5 ~ 6.3 mm，然后混匀、缩分取样，放入振动磨样机进行制样，振动磨样机设备型号为众合 ZHM-1A 振动磨，制样时间为 30 s。将制好的样品用玛瑙研钵进一步磨细至 < 0.044 mm，用正压法将样品

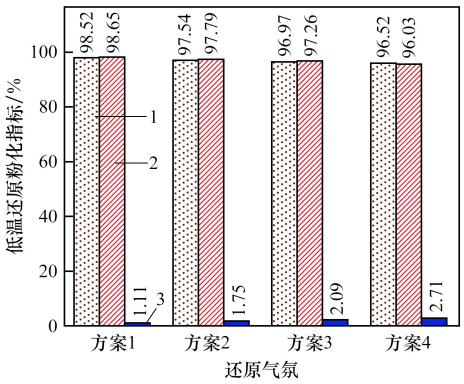
固定在样品槽，用 X 射线衍射分析方法(XRD)对其进行检测和分析。② 显微结构分析。与 XRD 分析类似，取 5 ~ 6.3 mm 粒级的含铁炉料，利用环氧树脂与三乙醇胺胶结定型，再利用半自动研磨抛光机制成光片，并用光学显微镜和扫描电子显微镜 - 能谱分析仪分析进行显微结构分析，包括矿物组成、微观结构(孔径大小和形状，矿物间嵌布关系)等。

2 结果与分析

2.1 低温还原粉化行为

2.1.1 还原气体组成对还原粉化的影响

改变还原气体中的 H_2 配比，考察块矿在 500 ℃时的还原粉化行为，还原气氛对块矿还原粉化性能的影响如图 3 所示。由图 3 可知，当还原气体中 H_2 配比上升(方案 1 ~ 方案 3)时，块矿 $RDI_{>3.15\ mm}$ 指标由 98.65% 略微降至 97.26%。增强反应的还原气氛(方案 4)条件下，块矿的还原粉化性能变差，与方案 3 相比，块矿 $RDI_{>3.15\ mm}$ 指标下降了 1.17%。



1—$RDI_{>3.15\ mm}$；2—$RDI_{>6.3\ mm}$；3—$RDI_{<0.5\ mm}$。

图 3 还原气氛对块矿低温还原粉化的影响

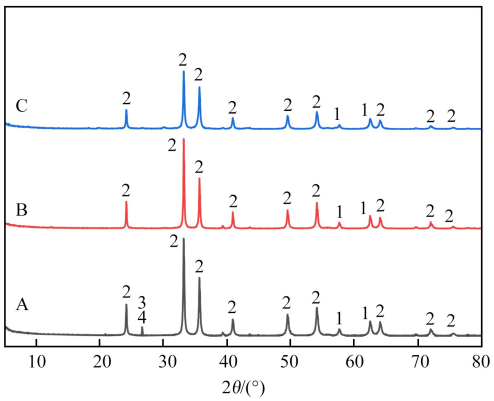
(还原温度为 500 ℃、还原时间为 60 min)

Fig. 3 Effect of atmosphere on reduction degradation index of lumps (reduced at 500 ℃ for 60 min)

粉化的根本原因是赤铁矿还原为磁铁矿时发生的晶型转变[15-17]。对于块矿这种结构致密的炉料来说，还原速率的决定性因素为气固反应界面的扩散速率。由于 H_2 分子尺寸小于 CO，H_2-H_2O 的互扩散系数大于 CO-CO_2 的互扩散系数[18]，使得富氢后的反应物和反应产物都更容易在块矿内扩散，反应速率更快。因此，在 500 ℃时，H_2 还原块矿的能力比 CO 还原块矿的能力更强，这也是富氢后块矿 $RDI_{>3.15\ mm}$ 指标下降的原因。但是因为块矿本身的致密度高，机械性能好，因此改变还原气体组成对其粉化性能影响并不大。增强还原气氛后(方案 4)块矿 $RDI_{>3.15\ mm}$ 指标进一步下降也证明了块矿的低温还原粉化性能与其还原程度有关。

2.1.2 还原粉化过程的物相转变

图 4 为不同气氛下块矿低温还原前后的 XRD 图谱。由图 4 可知，不管采用 CO 还是 H_2 低温还原块矿，产物均以赤铁矿为主，并有少量的磁铁矿生成。由于 XRD 检测手段很难准确分析不同气氛下块矿低温还原粉化过程的物相转变。因此，进一步对块矿还原产物进行光学显微结构分析，结果如图 5 所示。由图 5 可知，块矿结构致密，用 CO 还原后(方案 1)，只在外层最边缘处能观察到磁铁矿生成，内层仅能观察到赤铁矿，这说明 CO 这种大分子气体很难扩散进入致密块矿内部与赤铁矿发生还原反应。在块矿外层，可观察到裂缝自边缘处向块矿内层延伸，裂缝周边还有磁铁矿生成，这是 CO 与外层赤铁矿发生还原反应时晶型发生转变导致的。富 H_2 还原后(方案 3)，在外层中部位置即可见裂缝形成，裂缝周边磁铁矿成片存在，但内层未观察到磁铁矿生成，可见即便是 H_2 也很难大量扩散到块矿内部。



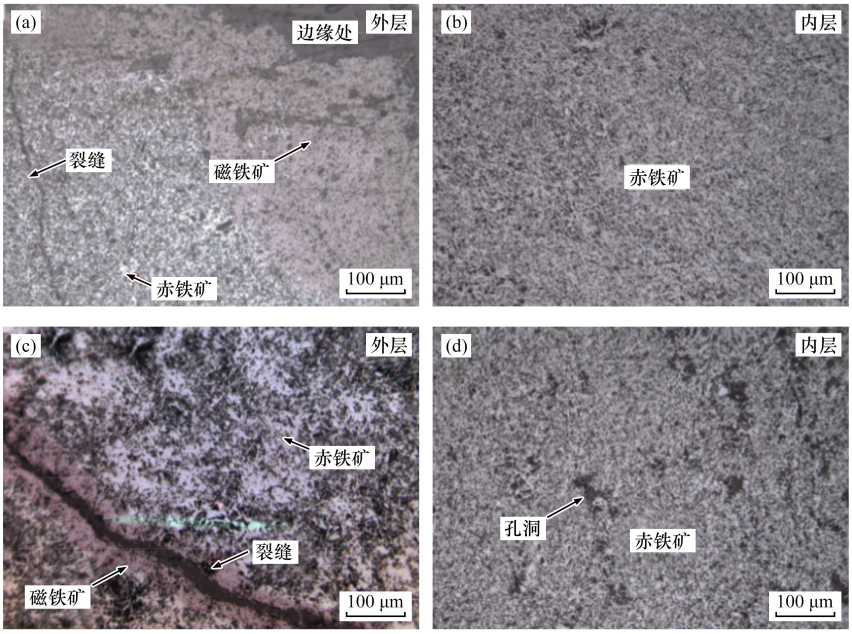
A—原矿；B—方案 1；C—方案 3

1—磁铁矿；2—赤铁矿；3—高岭石；4—石英。

图 4 块矿还原粉化后的 XRD

(还原温度为 500 ℃、还原时间为 60 min)

Fig. 4 XRD pattern of lumps after reduction degradation (reduced at 500 ℃ for 60 min)



（a）、（b）方案 1；（c）、（d）方案 3

图 5　不同气氛下块矿低温还原后的微观结构（还原温度为 500 ℃、还原时间为 60 min）

Fig. 5　Microstructure of lumps after low-temperature reduction under different atmospheres (reduced at 500 ℃ for 60 min)

对块矿低温还原产物进行 SEM 分析，结果见图 6。由图 6 可知，由于块矿结构致密，CO 很难扩散进入块矿内部与赤铁矿接触还原，因此用 CO 还原后块矿内结构完整，没有出现明显的结构损坏。富 H_2 还原后，块矿内层和外层结构仍然以赤铁矿成片互联构成致密的片状结构为主，但可以看到内层和外层都有微细孔洞生成，说明少量 H_2 可以扩散到致密的块矿内部与赤铁矿发生反应，致使块矿发生细微结构损坏，这也是富氢后块矿还原粉化性能变差的原因。

2.2　块矿的还原性能变化

2.2.1　还原气体组成对还原性能的影响

不同还原气氛下块矿还原度的变化如图 7 所示。由图 7 可知，随着还原气氛中 H_2 含量的增加，块矿还原度从 53.02% 升至 96.15%，提高了 43.12 个百分点。这主要是一方面在还原温度为 900 ℃ 时，H_2 的还原能力强于 CO，所以将 CO 等量替代为 H_2 后块矿还原度升高；另一方面，对于结构致密的块矿，H_2 扩散能力显著强于 CO，所以用 CO 还原块矿后还原度较低，而富氢还原后还原度显著增加。此外，由于铁氧化物的还原是由外向内逐级还原的，还原生成的致密铁层会阻碍还原气体的扩散[19]，H_2 比 CO 更容易穿过这一致密铁层，这也是富氢后块矿还原度增加的原因之一。

对块矿还原后的样品用化学分析法检测其 w(TFe) 和 w(MFe)，结果见图 8。由图 8 可知，还原后块矿的 w(TFe)、w(MFe) 和金属化率分别提高了 16.44%、65.70% 和 62.61%。用 CO 和 H_2 还原后的 w(TFe)、w(MFe) 和金属化率的变化趋势与图 7 中还原度的变化趋势类似，这进一步说明了 H_2 在致密块矿内部扩散能力要强于 CO，因此富氢还原可以显著提高块矿的 w(TFe)、w(MFe) 和金属化率。

2.2.2　还原过程的物相转变

对不同气氛下块矿还原后的产物进行 XRD 分析，结果见图 9。由图 9 可知，在不同还原气氛下块矿的还原程度与产物物相存在显著差异。在方案 1 中，还原产物仍明显保留浮式体、氧化铁及氧化亚铁少量等中间氧化物的衍射峰，同时金属铁的衍射峰较弱，说明 CO 在 900 ℃、180 min 条件下未能将块矿完全还原，其反应可能停滞在 FeO→Fe 阶段，这与 CO 还原的吸热特性及其在致密矿体内的扩散限制有关；而在方案 4 下，谱图中几乎仅呈现强烈的金属铁衍射峰，铁氧化物相基本消失，表明 H_2 在相同条件下能够实现近乎彻底的还原，显著提高金属化率，这得益于 H_2 分子

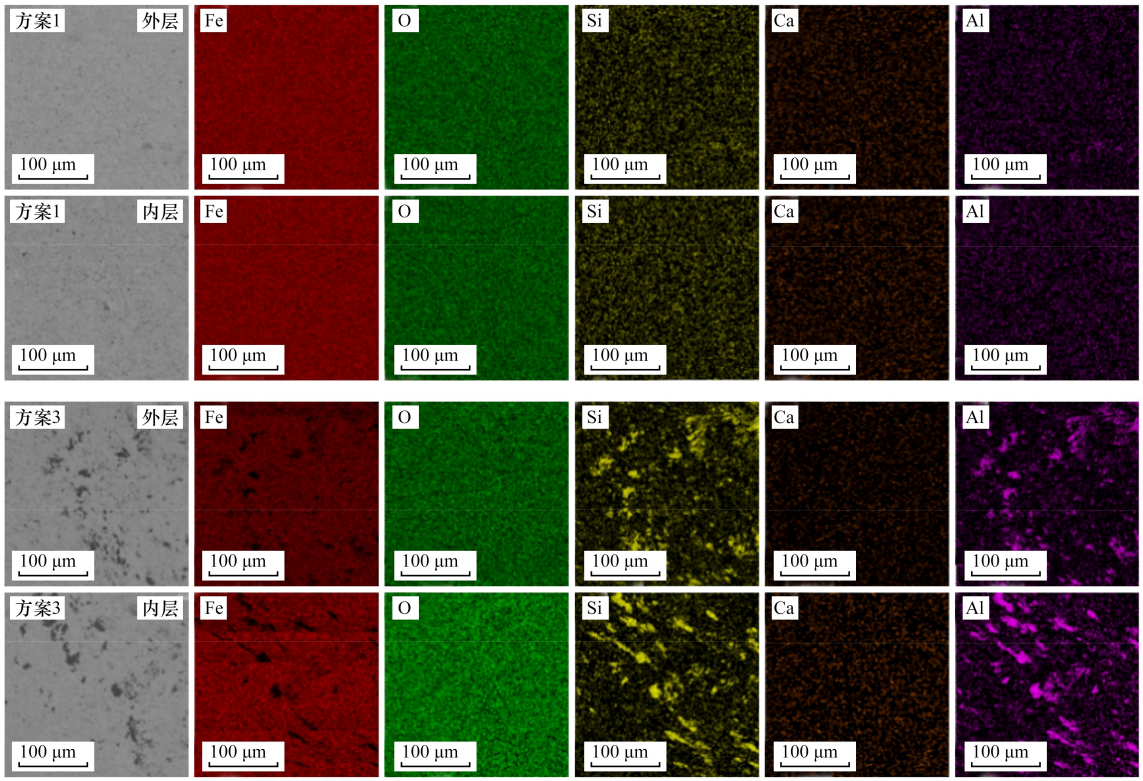


图 6 块矿低温还原后元素分布特征(还原温度为 500 ℃、还原时间为 60 min)

Fig. 6 Distribution characteristics of elements after low-temperature reductio of lumps(reduced at 500 ℃ for 60 min)

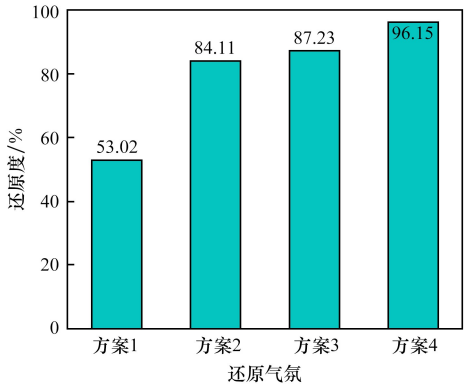
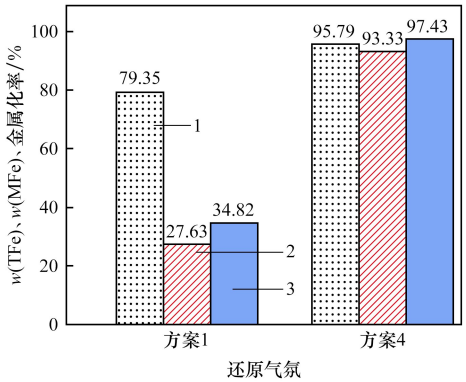


图 7 还原气氛对还原度的影响
(还原温度为 900 ℃、还原时间为 180 min)

Fig. 7 Effect of reduction atmosphere on reduction degree (reduced at 900 ℃ for 180 min)



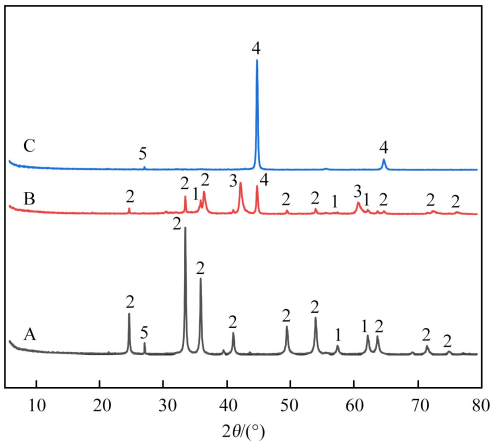
1—w(TFe); 2—w(MFe); 3—金属化率。

图 8 还原气氛对块矿 w(TFe)、w(MFe)和金属化率的影响(还原温度为 900 ℃、还原时间为 180 min)

Fig. 8 Effect of reduction atmosphere on w(TFe), w(MFe) and metallization rate of lumps(reduced at 900 ℃ for 180 min)

尺寸小、扩散能力强及其还原过程放热的动力学优势。

图 10 和图 11 分别为块矿还原后的微观形貌和 SEM 分析。由图 10 可知，用单一 CO 还原后，块矿主要为金属铁和浮氏体的集合体，其中金属铁以大晶粒形式存在，浮氏体散布在金属铁颗粒附近，可见块矿未充分还原，金属化率较低；而用富H_2还原后，可观察到块矿内外层都以单一金属铁相为主，几乎不存在其它含铁物相，还原较为充分，金属化率较高。块矿的外层金属铁晶粒直径较大，金属铁晶粒充分接触形成了致密的铁层；在内层，金属铁晶粒逐渐接触互联长大，形成了较为致密的结构。从整体来看，富H_2还原后，块矿内外层的孔隙率都较低。



A—原矿；B—方案 1；C—方案 4

1—磁铁矿；2—赤铁矿；3—浮氏体；4—金属铁；5—石英。

图 9　不同还原气氛块矿产物 XRD 图谱(还原温度为 900 ℃、还原时间为 180 min)

Fig. 9　XRD patterns of lumps reduced under different atmosphere (reduced at 900 ℃ for 180 min)

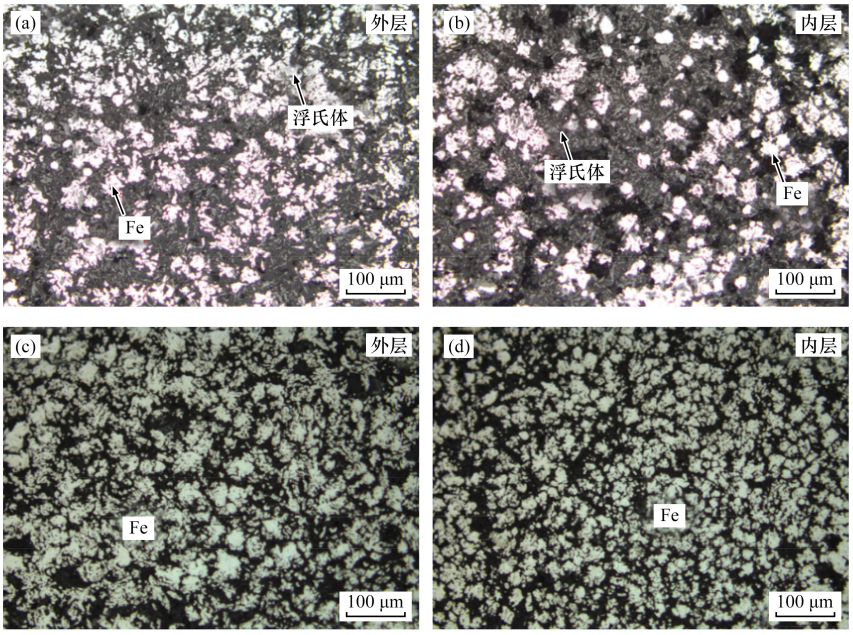
由图 11 进一步证实了以上观点。当采用单一 CO 还原时，在块矿外层，Fe 主要富集在金属铁相内；在内层，主要以浮氏体形式存在，另有少量的 Fe 与 O、Ca 和 Si 元素形成的铁硅酸盐物质未被还原；而用富 H_2还原，在内外层，Fe 都是主要以金属铁形式存在，可见难以还原的铁硅酸盐物质也被充分还原，提高了块矿的还原度和金属化率。

2.3　块矿软熔滴落性能

不同气氛下的块矿软熔滴落性能如图 12 所示。由图 12 可知，随着还原气氛中 CO 逐渐被 H_2取代，块矿 T_{10}、T_{40}、T_s和 T_d都呈升高趋势；同时，当还原气体中 H_2的体积分数从 0 提高至 30%时，块矿的软化区间和熔融区间分别从 182 ℃和 109 ℃缩小至 175 ℃和 89 ℃。其主要原因：当 H_2取代 CO 后，气体还原能力更强，炉料中更多的 FeO 被还原成金属铁，低熔点物质逐渐减少，软化开始温度和软化终止温度逐渐上升。同时，随着气氛中 H_2含量的增加，炉料中 Fe_xO 含量降低，初渣流动性较差，渣铁不易分离，从而延缓了滴落的过程，滴落温度提高。此外，随着 H_2含量增加，块矿熔滴区间变窄，最大压差逐渐降低，料层透气性改善，从而有利于改善高炉内煤气流的分布，提高煤气利用率。

3　结　论

（1）在 500 ℃时，块矿在单一 CO 还原气氛下粉化率最低，随还原气氛中 H_2含量增加，还原粉化率提升。



（a）、（b）：方案 1；（c）、（d）：方案 4

图 10　块矿还原后的微观形貌(还原温度为 900 ℃、还原时间为 180 min)

Fig. 10　Microstructure of lumps (reduced at 900 ℃ for 180 min)

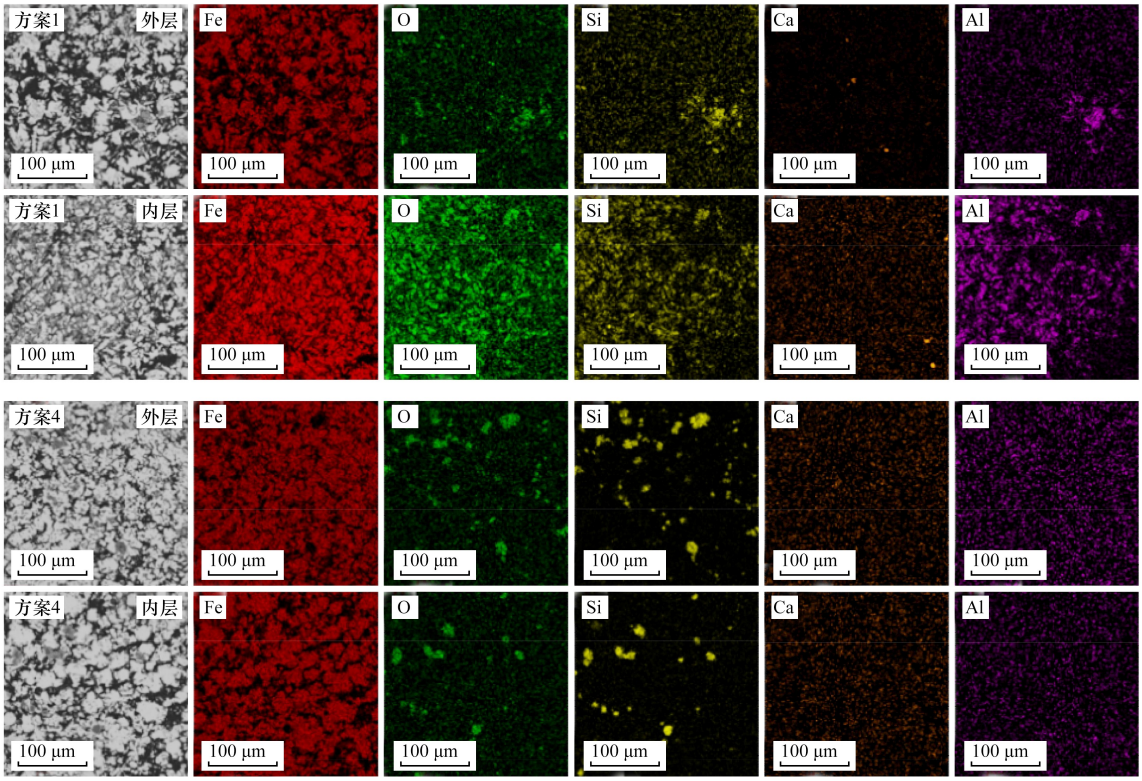


图 11 块矿还原后元素分布特征(还原温度为 900 ℃、还原时间为 180 min)

Fig. 11 Distribution characteristics of elements after reduction of lumps (reduced at 900 ℃ for 180 min)

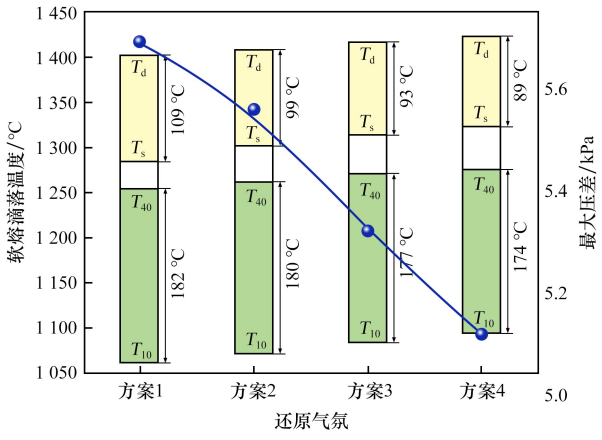


图 12 不同方案的软熔滴落性能

Fig. 12 Softening and dripping properties of different schemes

(2) 在 900 ℃，用 H_2 等量取代 CO 还原条件下，随 H_2 含量增加，块矿的还原度、w(TFe)、w(MFe)和金属化率均显著提高。

(3) 块矿高炉富氢气氛下冶炼其软熔区间变窄、软熔带位置下移，扩大了高炉上部间接还原区间，有利于强化高炉冶炼，节约焦炭；同时，随着气体中 H_2 含量增加，还原产物中 Fe_xO 含量降低，生成的铁硅酸盐被还原，减少熔融时液相量和渣相，料层透气性得到改善。

参考文献：

[1] DENG Z, ZHU B Q, DAVIS S J, et al. Global carbon emissions and decarbonization in 2024[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2025, 6(4): 231 – 233.

[2] 王新东，郅亚娜，吕庆，等. 高炉喷吹不同富氢介质节能减排潜能的分析与比较[J]. 钢铁，2023，58(10)：34 – 41.
WANG Xindong, QIE Yana, LÜ Qing, et al. Analysis and comparison of energy saving and emission reduction of blast furnace injection with different hydrogen-rich mediums[J]. Iron and Steel, 2023, 58(10): 34 – 41.

[3] SUN Y L, KANG C Q, XIA Q, et al. Analysis of transmission expansion planning considering consumption-based carbon emission accounting[J]. Applied Energy, 2017, 193: 232 – 242.

[4] 卢立金，王海风，王锋，等. 氢冶金工艺技术发展现状及应用[J]. 钢铁，2024，59(3)：183 – 196.
LU Lijin, WANG Haifeng, WANG Feng, et al. Development status and application of hydrogen metallurgy technology[J]. Iron and Steel, 2024, 59(3): 183 – 196.

[5] 陈小龙,高立华. 富氢还原对烧结矿低温还原粉化的影响[J]. 冶金能源,2022,41(4):27 – 30.
CHEN Xiaolong, GAO Lihua. Effect of rich hydrogen reduction on low temperature reduction disintegration of sinters[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2022, 41(4):27 – 30.

[6] 陈淼,李家新,王平,等. 不同 H_2 含量混合气体还原浮氏体的试验研究[J]. 山东冶金,2006,28(6):32 – 34.
CHEN Miao, LI Jiaxin, WANG Ping, et al. Experiment study on wustite reduction with compound gases of different H_2 content[J]. Shandong Metallurgy, 2006, 28(6):32 – 34.

[7] BONALDE A, HENRIQUEZ A, MANRIQUE M. Kinetic analysis of the iron oxide reduction using hydrogen-carbon monoxide mixtures as reducing agent[J]. ISIJ International,2005,45(9):1255 – 1260.

[8] LAN C C, ZHANG S H, LIU X J, et al. Change and mechanism analysis of the softening-melting behavior of the iron-bearing burden in a hydrogen-rich blast furnace [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(28):14255 – 14265.

[9] 王煜. 富氢条件下含铁炉料冶金性能及微观结构演变规律[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2020.
WANG Yu. Metallurgical properties and microstructure evolution of iron-containing burdens under hydrogen-rich conditions[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning,2020.

[10] 沈峰满,姜鑫,魏国,等. 富氢还原对烧结矿还原性及还原粉化的影响[J]. 中国冶金,2014,24 (1):2 – 5.
SHEN Fengman, JIANG Xin, WEI Guo, et al. Effect of hydrogen-rich reduction on reduction and reduction pulverization of sinter[J]. China Metallurgy, 2014, 24(1):2 – 5.

[11] 易凌云. 铁矿球团 CO-H_2 混合气体气基直接还原基础研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
YI Lingyun. Fundamental research on gas-based direct reduction of iron ore pellets with carbon monoxide and hydrogen mixtures. Changsha: Central South University, 2013.

[12] LIU J X, CHENG G J, LIU Z G, et al. Softening and melting properties of different burden structures containing high chromic vanadium titano-magnetite[J]. International Journal of Mineral Processing,2015,142:113 – 118.

[13] NAKANO K,SAKAI H,UJISAWA Y,et al. Development of low carbon blast furnace operation technology by using experimental blast furnace[J]. ISIJ International,2022, 62(12):2424 – 2432.

[14] 郅亚娜,靳亚涛,康媛,等. 高炉富氢对钒钛矿软熔滴落性能的影响[J]. 钢铁,2023,58(5):31 – 38.
QIE Yana, JIN Yatao, KANG Yuan, et al. Influence of hydrogen-rich on softening and melting property of blast furnace burden with vanadium and titanium[J]. Iron and Steel,2023,58(5):31 – 38.

[15] 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:北京科技大学,2022.
XU Chenyang. Research on reduction behavior of fluxed pellets underhydrogen-rich conditions in blast furnace [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2022.

[16] 李之甫. 铁矿石烧结矿低温还原粉化机理研究(续)[J]. 烧结球团,1995(4):23 – 28.
LI Zhifu. Study on mechanism of low temperature reduction pulverization of iron ore sinter (continued)[J]. Sintering and Pelletizing,1995(4):23 – 28.

[17] 李之甫. 铁矿石烧结矿低温还原粉化机理研究[J]. 烧结球团,1995(3):25 – 29.
LI Zhifu. Study on mechanism of low temperature reduction pulverization of iron ore sinter[J]. Sintering and Pelletizing,1995(3):25 – 29.

[18] 陈衍彪. 新型炉料制备及在富氢高炉下的冶金行为研究[D]. 北京:北京科技大学,2023.
CHEN Yanbiao. Study on preparation of new burden and metallurgical behavior in hydrogen-rich blast furnace [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2023.

[19] KIM W H, LEE S, KIM S M, et al. The retardation kinetics of magnetite reduction using H_2 and H_2-H_2O mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013,38(10):4194 – 4200.