富氢碳循环氧气高炉内烧结矿冶炼特征

康 健，许海法，朱 彤
（宝山钢铁股份有限公司，上海 201999）

摘要：为了更好地了解富氢碳循环氧气高炉内烧结矿冶炼特征，本文开展了不同还原气氛下烧结矿还原粉化、还原行为和软熔性能试验。试验结果表明：在还原温度为 500 ℃时，与传统高炉相比，HyCROF 碳循环条件下烧结矿低温还原粉化指数（>6.3 mm）、（>3.15 mm）分别降低 58.6% 和 37.7%；与 HyCROF 碳循环相比，HyCROF 碳循环 +20% H_2 气氛下烧结矿低温还原粉化指数（>6.3 mm）、（>3.15 mm）分别提高 21.3% 和 10.2%，烧结矿还原粉化明显改善。在温度为 1 100 ℃时，HyCROF 碳循环条件下烧结矿的还原度得到明显提升；与传统高炉相比，HyCROF 碳循环和 HyCROF 碳循环 – 富氢条件下烧结矿内部金属 Fe 含量显著增加，高还原势富氢气氛有利于烧结矿金属铁相增加。富氢碳循环气氛下烧结矿的软化开始温度降低，软化区间变宽，而烧结矿的熔化开始温度升高，熔滴区间变窄。

关键词：富氢；碳循环；还原粉化；还原度；软熔性能
中图分类号：TF046.4；TF53 **文献标志码**：A **文章编号**：1000 – 8764（2026）01 – 0232 – 06
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.021

Smelting characteristics of sinter in a hydrogen-enriched carbon recycling oxygen blast furnace

KANG Jian，XU Haifa，ZHU Tong
（Baoshan Iron and Steel Co.，Ltd.，Shanghai 201999，China）

Abstract：In order to better understand the smelting characteristics of sinter in a hydrogen-enriched carbon recycling oxygen blast furnace（HyCROF），in this study experiments were conducted on the reduction degradation，reduction behavior，and softening-melting performance of sinter under different reducing atmospheres. The experimental results show that at a reduction temperature of 500 ℃，compared with a traditional blast furnace，the low-temperature reduction degradation index（>6.3 mm）、（>3.15 mm）of the sinter under HyCROF carbon recycling conditions decrease by 58.6% and 37.7%，respectively. Compared with HyCROF carbon recycling，under the HyCROF carbon recycling +20% H_2 atmosphere，the low-temperature reduction degradation index（>6.3 mm）、（>3.15 mm）of the sinter increase by 21.3% and 10.2%，respectively，indicating a significant improvement in sinter reduction degradation. At a temperature of 1 100 ℃，the reduction degree of the sinter under HyCROF carbon recycling conditions is obviously improved. Compared with the traditional blast furnace，the metallic Fe content inside the sinter under both HyCROF carbon recycling and HyCROF carbon recycling + hydrogen-enriched conditions increases significantly，indicating that the highly reducing hydrogen-enriched atmosphere is conducive to the increase of the metallic iron phase of the sinter. Under the hydrogen-enriched carbon recycling atmosphere，the softening starting temperature of sinter decreases，the softening interval widens，while the melting starting temperature increases，and the melting-dripping interval narrows.

Key words：hydrogen-enriched；carbon recycling；reduction degradation；reduction degree；softening-melting performance

收稿日期：2025 – 09 – 08；**修回日期**：2025 – 12 – 04
作者简介：康 健（1982—），男，高级工程师，从事高炉低碳炼铁技术方面的研究。

钢铁工业的能源消耗占我国总能耗的 16%，而钢铁生产中约 70% 的能源消耗在炼铁工序。因此，降低炼铁工序的碳素消耗是实现钢铁工业煤炭减量和 CO_2 减排的主要途径。基于传统高炉炼铁流程，“顶煤气碳循环”和“富氢”耦合的高炉炼铁技术是最具有可行性且效果明显的低碳炼铁技术路径之一[1-2]。与传统高炉还原气氛相比，富氢碳循环氧气高炉(HyCROF)工艺的热力学和动力学条件发生较大变化，其对炉料还原过程和粉化行为等将产生重要影响。

许多研究者开展了富氢气氛下含铁炉料还原的相关研究。张淑会等[3]研究发现，喷吹富氢气体高炉在发挥氢还原优势的同时，容易出现下部热量不足、煤粉燃烧率降低、铁矿石粉化严重等问题。张卫国等[4]研究表明，富氢气体喷吹可不同程度地降低直接还原度，发展间接还原，减少燃料消耗。当富氧率和焦比不变时，天然气对于直接还原度、风口焦炭质量、理论燃烧温度的影响最大，焦炉煤气其次，循环煤气最小。陈小龙等[5]研究得出，随着还原气氛中 H_2 的体积分数从 0 增加到 30%，烧结矿低温还原粉化指数(>6.3 mm)和(>3.15 mm)分别从 39.31%、75.60% 增加到 43.75%、79.64%；烧结矿低温还原粉化指数(<0.5 mm)从 6.24% 降低至 3.65%；烧结矿的失重率从 7.82% 降低至 1.89%。田野等[6]研究发现，随着还原气($CO + H_2$)体积分数由 20% 增加到 40%，烧结矿的还原度急剧增加，烧结矿的低温还原粉化指数(>3.15 mm)由 58.5% 减少到 54%，烧结矿的裂纹密度急剧增加，从 102 m/m^2 增加到170 m/m^2。喷 H_2 量从 0 增至 150 m^3/t，炉料还原度提高 14.47%，还原速率指数增加 0.575，说明喷吹 H_2 促进了铁氧化物还原[7]。在 H_2 体积分数为 20% 的条件下，块矿和烧结矿的低温还原粉化率明显改善，低温还原粉化指数(<0.5 mm)分别增加了 11.08% 和 30.23%，同时富氢条件有利于含铁炉料粒度的均匀化[8]。烧结矿在氧气高炉气氛下的低温还原粉化率较传统高炉气氛下的高，但其低温还原粉化指数(>3.15 mm)仍高达 82.7%；随着还原气氛中 CO 和 H_2 含量的提高，烧结矿的低温还原粉化率明显上升[9]。在 H_2 气氛下，矿石的还原速率较快，还原生成的金属铁大多以板状形式析出，晶粒与晶粒间的接触面较大，结合力较强，所以还原粉化会较轻[10]。

为了更好地了解 HyCROF 内部炉料的冶炼特征，本文结合工业生产实际，模拟 HyCROF 工艺条件下还原气成分，开展烧结矿还原粉化、还原行为和软熔性能试验研究。

1　试验原料及方法

1.1　试验原料

试验所用烧结矿取自某钢厂，破碎筛分至 10~12.5 mm 颗粒，105 ℃烘干备用，其主要化学成分如表 1 所示。

表 1　烧结矿主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of sinter　%

TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	TiO_2
56.34	5.69	10.79	1.54	0.25	0.11
MnO	P_2O_5	S	Zn	FeO	
0.25	0.16	0.02	0.01	7.94	

1.2　试验方法

烧结矿静态还原粉化试验方案还原气氛组成如表 2 所示。称量试样(500 ± 1)g(粒度为 10.0~12.5 mm)放到还原管中，试将 N_2(5 L/min)通入还原管，加热升温速度不大于 10 ℃/min，在 500 ℃通入 15 L/min 的还原气体，恒温 60 min。试样冷却后，从还原管中倒出试样并测定其质量，然后把试样装入转鼓，以(30 ± 1) r/min 的转速共转 10 min。取出试样进行筛分，测定并记录 6.30 mm、3.15 mm 粒级筛上、3.15 mm 粒级筛下的试样质量。根据《铁矿石低温粉化试验静态还原后使用冷转鼓的方法》(GB/T 13242—2017)中的还原气成分确定试验 1(模拟传统高炉)的还原气成分；HyCROF 实际生产的炉顶煤气成分确定试验 2(模拟 HyCROF 只喷吹循环煤气)、试验 3(模拟 HyCROF 碳循环条件下富氢 5%)、试验 4(模拟 HyCROF 碳循环条件下富氢 20%)的还原煤气成分，具体见表 2。

模拟不同工况还原气氛下烧结矿还原试验(烧结矿试样质量为 500 g，粒度为 10.0 ~12.5 mm)如表 3 所示。模拟不同工艺条件下高炉内的气氛和炉料的升温过程，开展烧结矿在传统高炉(H1)、传

表2 烧结矿静态还原粉化试验方案还原气氛组成(体积分数)

Table 2 Composition of reducing gas for the sinter reduction-degradation test scheme %

方案	CO	CO_2	H_2	H_2O	N_2
试验1	20	20	0	0	60
试样2	45	30	0	0	25
试样3	45	30	5	0	20
试样4	35	25	20	9	11

表3 模拟不同工况下烧结矿还原试验方案

Table 3 Reduction test schemes for sinter under simulated different operating conditions

方案	体积分数/%				还原温度/℃	还原时间/min
	H_2	CO	CO_2	N_2		
H1	3.2	21.3	20.0	55.5	200~750	0~60
	3.7	25.4	13.3	57.6	750~900	61~78
	4.2	29.4	6.6	59.8	900(恒温)	79~108
	4.7	33.5	0	61.8	900~1 100	109~148
H2	10.0	17.0	18.0	55.0	200~750	0~60
	12.4	21.1	12.0	54.5	750~900	61~78
	14.8	25.2	6.0	54.0	900(恒温)	79~108
	17.1	29.2	0	53.7	900~1 100	109~148
H3	10.0	45.9	36.2	7.9	200~750	0~60
	11.6	58.4	24.1	5.9	750~900	61~78
	13.2	70.9	12.0	3.9	900(恒温)	79~108
	14.7	83.4	0	1.9	900~1 100	109~148
H4	23.3	31.4	31.1	14.2	200~750	0~60
	27.4	42.2	20.7	9.7	750~900	61~78
	31.5	53.0	10.3	5.2	900(恒温)	79~108
	35.7	63.7	0	0.6	900~1 100	109~148

统高炉+富氢(H2)、HyCROF碳循环(H3)、HyCROF碳循环-富氢(H4)条件下的还原试验。结合富氢碳循环氧气高炉生产实际，确定4种工艺条件下的煤气成分。试验升温制度为900 ℃以下保持升温速率为9 ℃/min，升温至900 ℃恒温30 min，然后以5 ℃/min的升温速率继续升温至1 100 ℃。试验过程中，在200 ℃以下的温度范围内，通入氮气；之后将气体流量换成15 L/min的还原气体。当反应温度达到1 100 ℃时，停止供电进入降温阶段，同时将还原性气体切换为N_2并冷却至室温。

烧结矿熔滴试验方案还原气氛组成(烧结矿试样质量为500 g，粒度为10.0~12.5 mm)如表4所示。表4中模拟传统高炉(S1)、传统高炉-富氢(S2)、HyCROF碳循环(S3)、HyCROF碳循环-富氢(S4)条件下的还原煤气成分。试验升温制度为900 ℃以下保持升温速率为9 ℃/min，900 ℃以上保持升温速率为5 ℃/min。

表4 烧结矿熔滴试验方案还原气氛组成(体积分数)

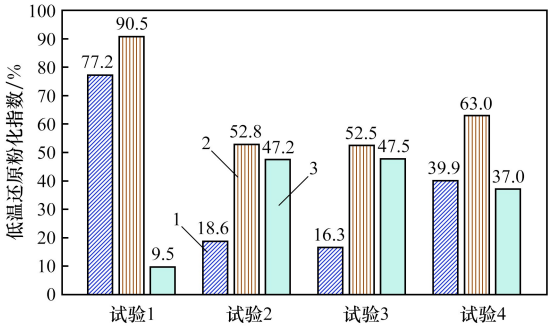
Table 4 Composition of reducing gas for the sinter softening-melting test scheme %

方案	H_2	CO	CO_2	N_2
S1	4.7	33.5	0	61.8
S2	17.1	29.2	0	53.7
S3	13.2	70.9	12	3.9
S4	35.7	63.7	0	0.6

2 试验结果与分析

2.1 不同还原气氛对烧结矿低温还原粉化性能的影响

不同还原气氛下烧结矿还原粉化试验结果如图1所示。由图1可知，在还原温度为500 ℃条件下，与试验1相比，试验2、试验3和试验4气氛下烧结矿的低温还原粉化指数(>6.3 mm)和(>3.15 mm)均出现明显下降，试验2气氛下烧结矿低温还原粉化指数(>6.3 mm)和(>3.15 mm)分别降低58.6%和37.7%；试验3气氛下，烧结矿低温还原粉化指数(>6.3 mm)和(>3.15 mm)差别都不大；相较于试验2，试验4气氛下烧结矿低温还原粉化指数(>6.3 mm)和(>3.15 mm)分别提高了21.3%和10.2%，烧结矿还原粉化明显改善。



1—>6.3 mm；2—>3.15 mm；3—<3.15 mm。

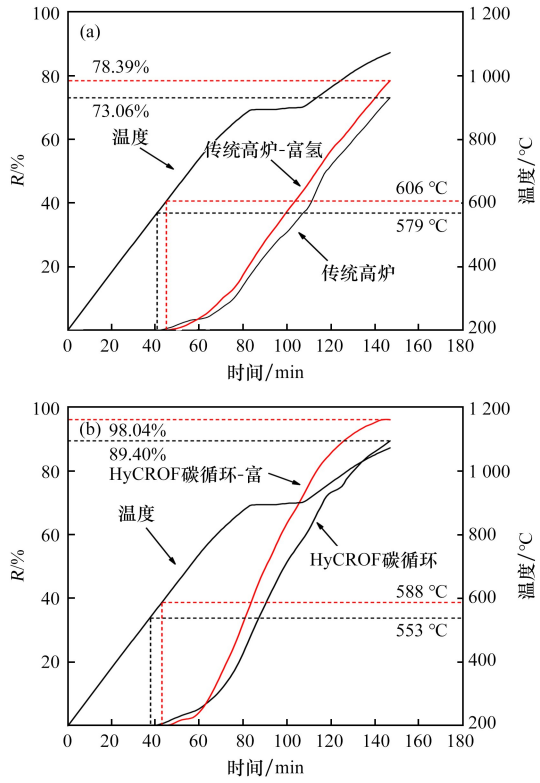
图1 不同还原气氛下烧结矿低温还原粉化性能

Fig. 1 RDI results of sinter under different reducing atmospheres

烧结矿还原粉化的原因主要是烧结矿中赤铁矿(Fe_2O_3)转变为磁铁矿(Fe_3O_4)过程中发生晶格转变，由三方晶系六方晶格转变为等轴立方晶格，从而产生内应力导致炉料粉化，这主要发生在 500～600 ℃区间。与传统高炉相比，HyCROF 碳循环气氛下高还原势煤气加速烧结矿的还原反应，矿石颗粒内部应力加速集聚，导致烧结矿还原粉化出现恶化。

2.2　不同还原气氛对烧结矿还原度的影响

不同还原气氛下烧结矿还原度(R)随反应时间的变化如图 2 所示。由图 2 可知，相同反应时间条件下，还原度随煤气还原势的增加而提高。在传统高炉气氛下，烧结矿的还原开始温度为 579 ℃，而传统高炉－富氢气氛下烧结矿的还原开始温度为 606 ℃，富氢使还原开始温度提高了 27 ℃。在 HyCROF 碳循环气氛下，烧结矿还原开始温度为 553 ℃，HyCROF 碳循环－富氢气氛下的还原开始温度为588 ℃，富氢使还原开始温度提高了 35 ℃。在温度达到1 100 ℃时，传统高炉和传统高炉－富氢气氛下的还原度分别为 73.06% 和 78.39%，而 HyCROF 碳循环和 HyCROF 碳循环－富氢气氛下的还原度分别达到 89.40% 和 96.04%。还原气富氢后，烧结矿还原度得到明显提升。



（a）传统高炉和传统高炉－富氢；

（b）HyCROF 碳循环和 HyCROF 碳循环－富氢

图 2　不同还原气氛下烧结矿还原度随反应时间的变化

Fig. 2　Variation of reduction degree of sinter with reaction time under different reducing atmospheres

通过扫描电镜观察不同还原气氛下烧结矿还原至1 100 ℃时的微观结构，结果如图 3 所示。由图 3 可知，传统高炉气氛下烧结矿边缘区域主要由金属 Fe、FeO 和硅酸钙组成，金属 Fe 主要出现在铁氧化物区域的外缘及铁酸钙相中，铁氧化物区域的中心则为未还原的 FeO。烧结矿内部区域则主要由铁酸钙和 FeO 组成，微观形貌仍然保持着铁氧化物与硅酸钙的交织熔蚀的原始形态。在传统高炉－富氢气氛下，烧结矿边缘和交界面处的微观结构与传统高炉气氛下的情况相似，在其中心区域主要由铁酸钙和 FeO 组成，但同时也出现少量的金属 Fe。

在 HyCROF 碳循环气氛下，烧结矿边缘区域的铁氧化物基本还原为金属 Fe，并以“零星碎片”形态分布。而在 HyCROF 碳循环－富氢气氛下，烧结矿边缘和中心区域的铁氧化物已完全还原为碎片状的金属 Fe。由此可见，富氢气氛更有利于烧结矿中金属铁相的增加。

2.3　不同还原气氛对烧结矿软熔性能的影响

不同还原气氛下烧结矿的软熔区间如表 5 所示。由表 5 可知，在传统高炉和传统高炉－富氢条件下，烧结矿的 $T_{10\%}$、$T_{40\%}$ 分别为 1 152、1 137 ℃和 1 225、1 229 ℃；传统高炉富氢后，烧结矿的软化区间 ΔT_S 从 73 ℃增加到 92 ℃。在 HyCROF 碳循环和 HyCROF 碳循环－富氢条件下，烧结矿的 $T_{10\%}$、$T_{40\%}$ 分别为 1 106、1 080 ℃和 1 269、1 255 ℃；HyCROF 碳循环富氢后，烧结矿的软化区间 ΔT_S从 163 ℃增加到 175 ℃。

碳循环和富氢使煤气的还原势增强，可以缩短烧结矿从 Fe_2O_3 到 FeO 的还原过程，从而导致在较低温度下还原产生的 FeO 增多，进而生成更多含 FeO 的低熔点相，如 $2FeO \cdot SiO_2$（熔点 1 217 ℃）、$CaO_x(FeO)_{1.81}SiO_2$（熔点 1 150 ℃）。因此，HyCROF 碳循环富氢气氛下烧结矿的软化开始温度降低，软化区间变宽。

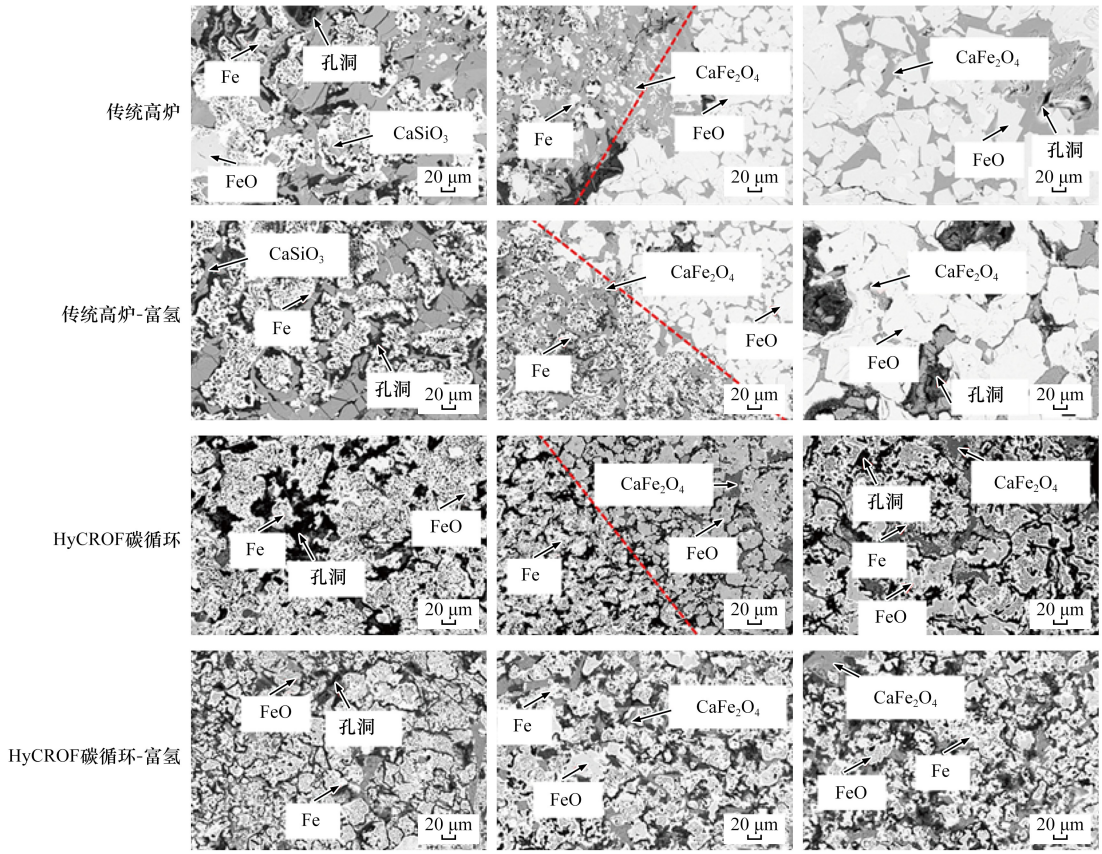


图 3 不同气氛下还原至 1 100 ℃时烧结矿的 SEM 显微照片

Fig. 3 SEM micrographs of sinter reduced to 1 100 ℃ under different atmospheres

表 5 不同还原气氛下烧结矿软熔区间

Table 5 Softening-melting interval of sinter under different reducing atmospheres

项目	传统高炉	传统高炉 – 富氢	碳循环高炉	碳循环高炉 – 富氢
$T_{10\%}$	1 152	1 137	1 106	1 080
$T_{40\%}$	1 225	1 229	1 269	1 255
ΔT_s	73	92	163	175
T_s	1 329	1 391	1 418	1 355
T_d	1 492	1 491	1 478	1 455
ΔT_d	163	100	60	100

注：$T_{10\%}$ 为软化开始温度（试样收缩率 10% 时的温度）；$T_{40\%}$ 为软化终了温度（试样收缩率 40% 时的温度）；T_s 为熔化开始温度（压差陡升拐点温度）；T_d 为滴落温度（第一滴铁液滴落的温度）；ΔT_s 为软化区间（软化终了温度与软化开始温度差）；ΔT_d 为熔滴区间（滴落温度与熔化开始温度差）。

与传统高炉相比，传统高炉 – 富氢条件下烧结矿的熔滴区间 ΔT_d 降低了 63 ℃，HyCROF 碳循环和 HyCROF 碳循环 – 富氢条件下烧结矿的熔滴区间 ΔT_d 也均有所收窄。在富氢条件下，随着温度的升高，初渣中 FeO 被快速还原为金属 Fe，低熔点相减少，炉料的熔化开始温度升高，导致熔滴区间范围变窄，并向高温区移动。

3 结 论

（1）在还原温度为 500 ℃时，与传统高炉相比，HyCROF 碳循环气氛下烧结矿低温还原粉化指数（ >6.3 mm）和（ >3.15 mm）分别降低了 58.6% 和 37.7%；相较于 HyCROF 碳循环，HyCROF 碳循环 + 20% H_2 气氛下烧结矿低温还原粉化指数（ >6.3 mm）和（ >3.15 mm）分别提高 21.3% 和 10.2%，烧结矿还原粉化明显改善。当氢气配比提升至 20% 时，氢气的强扩散与还原能力促进了更均匀的相变，显著缓解了应力集聚，使 RDI 指标明显改善。

（2）富氢碳循环气氛下烧结矿的还原度得到明显提升。与传统高炉相比，HyCROF 碳循环和 HyCROF 碳循环 – 富氢气氛下烧结矿内部金属 Fe

含量显著增加，高还原势富氢气氛不仅加速FeO→Fe 的转变，还促进金属铁以弥散状分布，增强烧结矿的金属化程度。

（3）富氢碳循环气氛通过增强还原势，促进低温阶段 FeO 的生成及低熔点渣相的形成，导致软化开始温度降低、软化区间拓宽，有利于高炉内软熔带的稳定形成。高温下氢气对 FeO 的高效还原减少了初渣中低熔点组分，使熔化开始温度升高、熔滴区间收窄，有助于高炉下部透气性与滴落性能的改善。

参考文献：

[1] 王广，王静松，左海滨，等. 高炉煤气循环耦合富氢对中国炼铁低碳发展的意义[J]. 中国冶金，2019，29(10)：1－6.
WANG Guang，WANG Jingsong，ZUO Haibin，et al. Effect of blast furnace gas recycling with hydrogen injection on low carbon development of Chinese ironmaking[J]. China Metallurgy，2019，29(10)：1－6.

[2] 滕飞，郭培民，孔令兵，等. 炼铁流程用氢减碳潜力分析[J]. 烧结球团，2022，47(1)：18－23.
TENG Fei，GUO Peimin，KONG Lingbing，et al. Potential analysis on carbon dioxide reduction with hydrogen in iron-making process[J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(1)：18－23.

[3] 张淑会，武校章，刘然，等. 喷吹富氢气体高炉冶炼特点及存在问题的探讨[J]. 钢铁，2024，59(1)：1－11.
ZHANG Shuhui，WU Xiaozhang，LIU Ran，et al. Discussion on smelting characteristics and problems of blast furnace with hydrogen-rich gas injection[J]. Iron & Steel，2024，59(1)：1－11.

[4] 张卫国，张宗旺，徐润生，等. 富氢气体喷吹对高炉冶炼工况的影响规律[J]. 钢铁研究学报，2023，35(9)：1065－1073.
ZHANG Weiguo，ZHANG Zongwang，XU Runsheng，et al. Effect of hydrogen-rich gas injection on smelting operation of blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research，2023，35(9)：1065－1073.

[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] 田野，吕庆，刘小杰，等. 烧结矿在 CO-H_2-CO_2-N_2 气氛下还原粉化行为研究[J]. 烧结球团，2016，41(6)：1－4.
TIAN Ye，LÜ Qing，LIU Xiaojie，et al. Study on reduction and disintegration behavior of sinter under CO-H_2-CO_2-N_2 conditions[J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(6)：1－4.

[7] 邓奇虎，薛正良，吴映江，等. 喷吹 H_2 条件下高炉冶炼参数及炉料还原行为研究[J]. 炼铁，2025，44(3)：71－76.
DENG Qihu，XUE Zhengliang，WU Yingjiang，et al. Study on the BF smelting parameters and the reduction behavior of iron containing charge under H_2 injection[J]. Ironmaking，2025，44(3)：71－76.

[8] 王煜，何志军，湛文龙，等. 富氢气氛下不同含铁炉料的还原行为[J]. 钢铁，2020，55(7)：34－40.
WANG Yu，HE Zhijun，ZHAN Wenlong，et al. Reduction behavior of iron-bearing burdens in hydrogen-rich stream[J]. Iron and Steel，2020，55(7)：34－40.

[9] 蓝荣宗，王静松，韩毅华，等. 高还原势气氛下烧结矿低温还原粉化试验研究[J]. 有色金属科学与工程，2012，3(1)：5－9.
LAN Rongzong，WANG Jingsong，HAN Yihua，et al. On the low temperature reduction degradation of sinter in high reduction potential atmosphere[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering，2012，3(1)：5－9.

[10] 赵立卓. 铁矿球团气基低温还原强度及其粉化行为研究[D]. 长沙：中南大学，2013.
ZHAO Lizhuo. Study on reduction intensity and disintegration of iron ore pellets at low temperature gas-based direct reduction[D]. Changsha：Central South University，2013.