氢基无碳烧结气氛对烧结成矿的影响

任嫔婧，陈铁军，万军营，周仙霖，姜翔波
（武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院；b. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室，
湖北 武汉 430081）

摘要：烧结工序降碳减排是钢铁行业长流程实现绿色低碳高质量发展的重要组成部分。无碳烧结概念的提出为烧结降碳提供了新思路，而利用氢基燃料进行气基无碳烧结，可以实现零碳排放，但氢气燃料燃烧会引入水蒸气气氛，影响烧结成矿。本文通过微型烧结试验，探究氧气体积分数和水蒸气体积分数对烧结成矿的影响，结果表明：在 O_2-N_2 气氛中，随着氧气体积分数的增加，试样抗压强度从 965 N 增加到 1 360 N，赤铁矿占比增加，磁铁矿和孔隙率占比减少，FeO 质量分数从 14.47% 降低到 2.6%；在 $H_2O(g)$-O_2-80% N_2 气氛中，当水蒸气体积分数从 0 增加至 20% 时，试样抗压强度从 1 360 N 减少为 825 N，赤铁矿和铁酸钙占比减少，磁铁矿和孔隙率占比增加，FeO 质量分数从 2.6% 增加到 13.07%；在 $H_2O(g)$-15% O_2-N_2 的气氛中，随着水蒸气体积分数增加，试样抗压强度从 1 224 N 减少为 962 N，FeO 质量分数从 3.11% 降低至 2.82%，在氧气和水蒸气的混合气氛中，氧化作用更强，当水蒸气体积分数小于 20% 时，对烧结试样影响不大。因此，使用氢基燃料无碳烧结是可行的，有更大的降碳减排潜力，但需要合理控制空燃比。

关键词：烧结；氢基燃料；抗压强度；降碳
中图分类号：TF046.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0111－10
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.008

Effect of hydrogen-based carbon-free sintering atmosphere on sinter formation

REN Pinjing, CHEN Tiejun, WAN Junying, ZHOU Xianlin, JIANG Xiangbo
(Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering;
b. Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources,
Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: Reducing carbon emissions in sintering process is a crucial component for achieving green, low-carbon, and high-quality development in long process of iron and steel industry. The concept of carbon-free sintering provides a new approach for reducing carbon emissions in sintering, and utilizing hydrogen-based fuels for gas-based carbon-free sintering can achieve zero carbon emissions; however, the combustion of hydrogen fuel introduces a water vapor atmosphere, which affects sinter formation. Through micro-sintering experiments, the effect of oxygen volume fraction and water vapor volume fraction on sinter formation was studied in this paper. The results show that in O_2-N_2 atmosphere, with the oxygen volume fraction increases, the compressive strength of the sample rises from 965 N to 1 360 N, the proportion of hematite increases, while the proportions of magnetite and porosity decrease, and the FeO content decreases from 14.47% to 2.6%. In $H_2O(g)$-O_2-80% N_2 atmosphere, with the water vapor volume fraction increases from 0 to 20%, the compressive strength of

收稿日期：2025－11－26；**修回日期**：2026－01－16
基金项目：广西科技重大专项资助项目(AA24263047)
作者简介：任嫔婧(1999—)，女，硕士研究生，从事铁矿烧结方面的研究。
通信作者：陈铁军(1973—)，男，教授，博士生导师，从事铁矿低碳造块与直接还原、复杂难选铁矿分选、冶金二次资源综合利用等方面的研究。

the sample decreases from 1 360 N to 825 N, the proportions of hematite and calcium ferrite decrease, while the proportions of magnetite and porosity increase, and the FeO content increases from 2.6% to 13.07%. In H_2O(g)-15% O_2-N_2 atmosphere, with the water vapor volume fraction increases, the compressive strength of the sample decreases from 1 224 N to 962 N, and the FeO content decreases from 3.11% to 2.82%. In the mixed atmosphere of oxygen and water vapor, the oxidation effect is stronger, and when the water vapor volume fraction is less than 20%, its effect on the sintered sample is not large, so it is feasible to use hydrogen-based fuels for carbon-free sintering, which has greater potential for carbon emission reduction, but it is required to reasonably control the air-fuel ratio.

Key words: sintering; hydrogen-based fuel; compressive strength; carbon reduction

我国钢铁生产目前仍以长流程为主，而烧结作为铁前工序中重要的一环，为高炉提供约70%的炼铁原料[1]。烧结工序作为污染物排放较大的工序[2]，碳排放量占钢铁总流程的11%~15%左右[3]。烧结固体燃料消耗占烧结工序能耗的75%~80%[4]，随着一系列环保政策的出台，烧结节能减排的形势变得十分严峻。因此，以中国“双碳”目标为背景，聚焦钢铁行业碳减排核心环节—烧结工序，深入探索其减排路径与技术策略。在烧结过程中减少污染和碳排放的方法主要集中于提高热效率和减少固体燃料用量[5]。近年来有不少学者，提出从源头控制、过程控制以及烧结新工艺等来减少烧结工序的碳排放，诸如：利用生物质燃料燃烧[6-7]，控制燃料粒度提高热效率[8]，采取烟气循环技术减少热量损失[9]，利用料面喷吹技术提高燃料燃烧效率[10-11]，使用微波烧结技术将电能转化为微波能进行加热进而充分燃烧[12]。然而由于工艺发展的限制，这些方法减碳效果十分有限，仍然需要大量的固体燃料为烧结反应过程提供热量。

无碳烧结是利用清洁能源包括但不限于清洁燃料、电力和微波能源，而不额外添加炭粉，燃烧提供烧结所需热量，从源头上实现降低烧结过程碳排放的目的[13-14]。基于现有设备技术水平，为推动无碳烧结的工业化应用，本文以成熟的带式焙烧工艺为参考，提出以气体燃料代替固体燃料为烧结过程供热，从而从源头实现烧结过程碳及其他污染物减排。同时，将这种以气体清洁燃料供热替代料层中固体燃料供热的技术称为气基无碳烧结技术。已有实验证明气基无碳烧结是可行的，可以形成理想的烧结结构，提高烧结矿的强度，优化烧结矿的还原粉化性能[15-17]。若使用氢基燃料进行气基无碳烧结，将进一步增大降碳力度，甚至达到零碳排放。氢燃料燃烧产物是水蒸气，在普通烧结过程中，水与固体燃料中的碳反应能够提升燃烧速率，但对于气基无碳烧结的影响尚不明确。因此，本文通过微型烧结试验，探究氢基无碳烧结气氛对烧结矿的矿物组成、矿物结构、抗压强度的影响，并分析其作用机理，以期为该技术的工业化应用提供理论基础。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料

试验中使用的铁矿石来自于国内某钢铁厂，其主要化学成分与烧损可见表1。由表1可知，选用的PB粉属于褐铁矿，其TFe的质量分数为61.19%，FeO的质量分数为0.35%。

表1 铁矿石主要化学成分与烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and losses on ignition of iron ore %

TFe	FeO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO
61.19	0.35	4.28	0.27	1.94	0.10
P	S	K_2O	Na_2O	烧损	
0.098	0.02	0.02	0.046	5.42	

1.2 试验方法

烧结试验装置包括配气系统和反应系统，具体如图1所示。试验首先将原料磨制筛分至<150 μm，用纯CaO将碱度[w(CaO)/w(SiO_2)]调整为2.0，使用压块机在10 MPa、2 min的恒压条件下将0.8 g混匀料压制成直径约为8 mm的圆柱体小块。随后将10个试样置于刚玉坩埚中，在反应系统内进行微型烧结。升温阶段通入N_2作为保护气体，在1 300 ℃时通入不同的气氛烧结5 min，在N_2氛围中降温至200 ℃，所有试验均在此热工制度下进行。

图1中，配气系统由高压气瓶提供气源，N_2、

O_2、CO_2纯度均≥99.999%，N_2为平衡气，通过控制流量计，按试验方案配置不同体积分数的进口气体，以 3 L/min 的总流量通入反应系统。水蒸气由蒸汽发生装置产生，高纯水经过注射泵进入加热管(130 ℃)汽化，流经水蒸气的部分均做伴热处理。

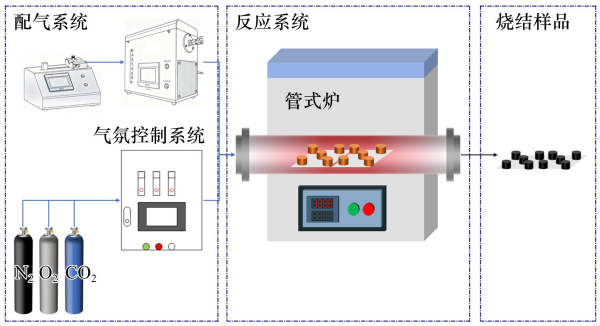


图 1　烧结试验装置

Fig. 1　Sintering experiment device

把烧结后的试样，检测抗压强度对烧结矿质量进行评价[15]。经 X 射线衍射仪确定试样物相组成。另外，取出完整的块状试样，使用金相镶嵌固定，通过磨抛机打磨出平整的断面、抛光后，在光学显微镜下观察试样断面的显微结构和物相变化。随后分析试样的整体显微图像，借助 ImageJ 软件来计算各种矿物成分的面积百分比并统计结果。

为深入探究氧分压、水蒸气含量对无碳铁矿试样烧结过程中矿相演变及成矿质量的影响机制，本研究分别设计不同 O_2体积分数、$H_2O(g)$体积分数的对比试验，如表 2 所示。用流量计对纯 O_2、纯 N_2及 $H_2O(g)$流量调节：试验 I 为 O_2-N_2混合气氛下，调节 O_2体积分数进行试验；试验 II 为 $H_2O(g)$-O_2-80% N_2混合气氛下，即固定 N_2体积分数为 80%，调节 $H_2O(g)$与 O_2体积分数进行试验；试验 III 为 $H_2O(g)$-15% O_2-N_2混合气氛下，即固定 O_2体积分数为 15%，调节 $H_2O(g)$与 N_2体积分数进行试验。

表 2　氢基无碳烧结试验气相组成条件(体积分数)

Table 2　Experimental conditions for hydrogen-based carbon-free sintering vapor composition　%

试验组序	O_2	H_2O	N_2
I	0～20	0	100～80
II	0～20	20～0	80
III	15	0～20	85～65

2　结果与分析

2.1　氧气体积分数对无碳烧结成矿的影响

不同氧气体积分数下(试验 I)烧结试样抗压强度如图 2 所示。由图 2 可知，随着氧气体积分数的增加，烧结后试样的抗压强度呈现出递增规律。在只有 N_2气氛下(即氧气体积分数为 0 时)，试样抗压强度最低，为 965 N；当氧气体积分数为 20%时，试样抗压强度最大，为 1 360 N。当氧气体积分数在 10%以下时，试样抗压强度的提升幅度不大；当超过 10%后，试样抗压强度有了较为显著的提升。

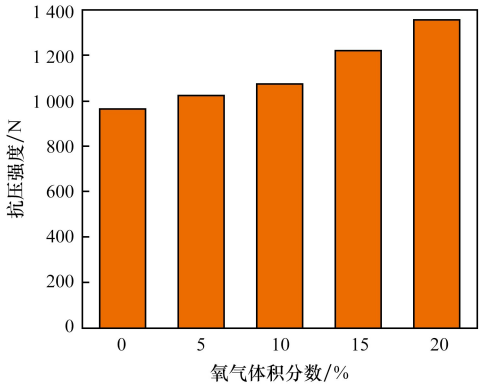


图 2　不同氧气体积分数下烧结试样抗压强度

Fig. 2　Compressive strength of sintered samples under different oxygen volume fractions

在保证烧结矿强度的条件下，降低 FeO 含量，有利于降低烧结工序能耗和高炉工序的焦比，改善烧结矿还原性[18-19]。不同氧气体积分数下烧结试样 FeO 质量分数如图 3 所示。由图 3 可知，随着氧气体积分数的增加，FeO质量分数先急剧下

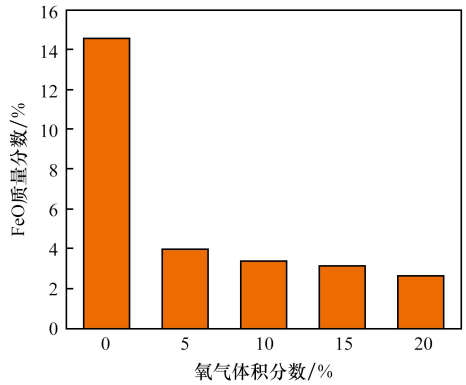
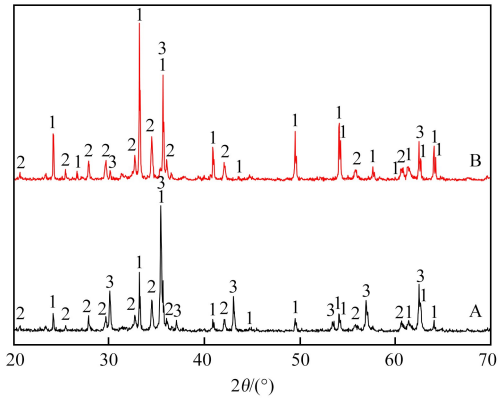


图 3　不同氧气体积分数下烧结试样的 FeO 质量分数

Fig. 3　The mass fraction of FeO of sintered samples under different oxygen volume fractions

降再趋于平稳，在纯 N_2 气氛下，试样中的 FeO 质量分数高达 14.47%。

不同氧气体积分数下试样的 XRD 图谱如图 4 所示。由图 4 可知，两种气氛下试样的物相组成存在明显差异。在纯 N_2 的条件下，烧结样品的矿物组成主要为磁铁矿、赤铁矿与铁酸钙；在氧气体积分数为 20% 的条件下，烧结样品中赤铁矿的特征衍射峰相对更为突出，矿物组成主要以赤铁矿与铁酸钙为主。随着氧气体积分数从 0 增加到 20%，磁铁矿峰强度降低，赤铁矿峰强度增强。



氧气体积分数/%：A—0；B—20

1—赤铁矿；2—SFCA；3—磁铁矿。

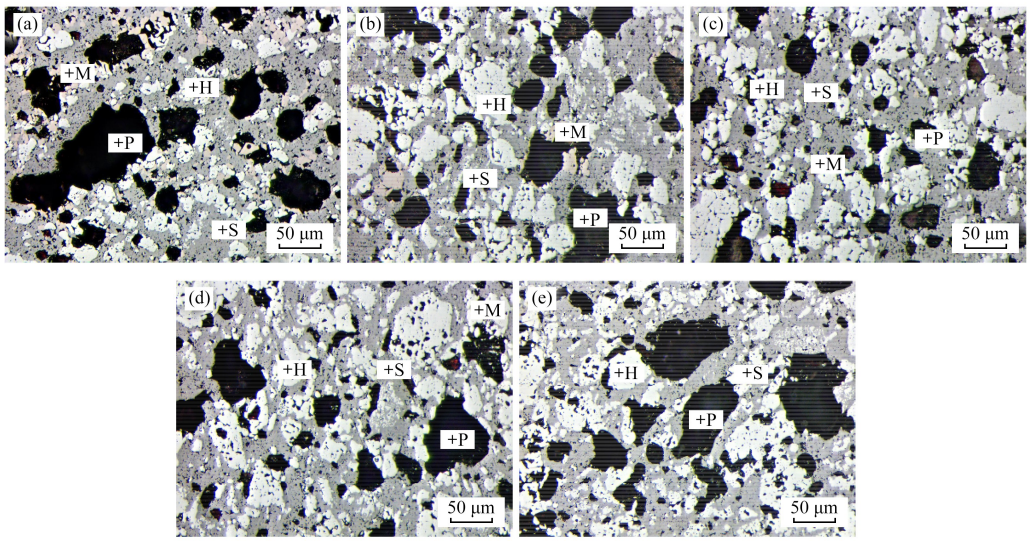
图 4 不同氧气体积分数下烧结试样 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of sintered samples under different oxygen volume fractions

不同氧气体积分数下试样的显微结构具体如图 5 所示。由图 5 可以看出，当氧气体积分数为 0 时，磁铁矿晶体存在，磁铁矿、赤铁矿与铁酸钙呈相互熔蚀状，同时附近还存在少部分的铁橄榄石液相。随着氧气体积分数从 0 增加到 5%，试样开始以赤铁矿晶体为主，伴有少量的磁铁矿晶体。当氧气体积分数为 10% 与 15% 时，试样中赤铁矿晶粒分布较多，仅存在微量的磁铁矿晶粒，铁酸钙呈熔蚀状结构充填在赤铁矿晶粒之间。当氧气体积分数为 20% 时，试样几乎不存在磁铁矿晶粒，赤铁矿晶粒之间的缝隙由铁酸钙液相填充。可以看出，随着氧气体积分数的增加，氧化作用加强，氧化反应占主导地位，以赤铁矿晶粒为主要组成，铁酸钙与赤铁矿交织熔蚀，而磁铁矿晶粒逐渐减少。

不同氧气体积分数下试样矿物成分的面积百分比如图 6 所示。由图 6 可知，随着氧气体积分数从 0 逐步增加至 20%，铁酸钙的体积分数始终占据主导地位，且整体保持相对稳定；赤铁矿的体积分数呈现出缓慢上升的趋势；而磁铁矿和孔洞的面积百分比呈下降趋势，这也与前文显示的变化趋势一致。氧含量的增加使孔洞减少、铁酸钙含量增加，促使了抗压强度的提升。

由以上分析可知，气氛中的氧气体积分数对烧结试样物相转变具有重要影响。氧气作为氧化

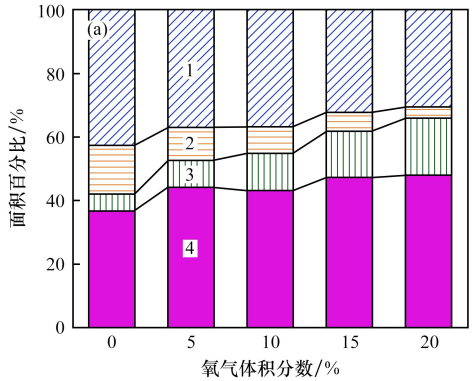


氧气体积分数/%：（a）0；（b）5；（c）10；（d）15；（e）20

M—磁铁矿；H—赤铁矿；P—孔洞；S—铁酸钙。

图 5 不同氧气体积分数下烧结试样光学显微结构

Fig. 5 Optical microstructures of sintered samples under different oxygen volume fractions



1—孔洞；2—磁铁矿；3—赤铁矿；4—SFCA。

图 6　不同氧气体积分数下试样矿物成分的面积百分比

Fig. 6　Area percentages of mineral compositions in samples under different oxygen volume fractions

反应的关键组分，有效促进了磁铁矿向赤铁矿以及铁酸钙等复合铁酸盐的转变。铁酸钙作为高炉炼铁等过程中重要的黏结相，其在烧结试样矿物成分中的占比对烧结矿的冶金性能至关重要。在 N_2 气氛下，磁铁矿则表现出更高的稳定性。烧结矿的理想显微结构是铁酸钙和赤铁矿较多，同时尽量减少二次赤铁矿、裂纹和孔洞。氧气体积分数的增加促进形成高强度的铁酸钙，这有利于烧结试样质量提升，符合前文抗压强度的变化趋势。在低氧条件下，形成的硅酸盐液相黏度高、流动性差；在高氧条件下，生成的铁酸钙液相黏度低于硅酸盐液相，流动性更好，结构更均匀致密，最终使烧结矿抗压强度显著提升。

2.2　水蒸气－氧气体积分数对无碳烧结成矿的影响

在实现气基无碳烧结的过程中，水蒸气含量的增加往往伴随着氧气浓度的相应下降。不同水蒸气－氧气体积分数下(试验 II)烧结试样抗压强度如图 7 所示。由图 7 可知，在 $H_2O(g)$-O_2-80% N_2 的气氛中，随着水蒸气体积分数的增加(氧气体积分数的减少)，烧结后试样的抗压强度呈现下降趋势。在不添加水蒸气的气氛中(此时氧气体积分数为 20%)抗压强度最高为 1 360 N；当水蒸气体积分数为 20%(此时氧气体积分数为 0)时，抗压强度最低为 825 N。当水蒸气体积分数从 0 增加到 5%(即焙烧气氛组成从 20% O_2 变为 5% H_2O + 15% O_2)，抗压强度有了明显的下降；当水蒸气体积分数超过 5% 后，随着水蒸气含量的增加，抗压强度下降幅度减弱。在水蒸气体积分数为 20% 时，与纯 N_2 气氛相比，此时抗压强度更低。结合图 2 分析得出，随着水蒸气的引入，水蒸气和氧气混合后烧结试样的抗压强度虽然均低于仅有氧气存在时的抗压强度，但是差值不大。因此，当氧气体积分数相同、水蒸气体积分数在 20% 以下时，对烧结固结过程及强度的影响较小。

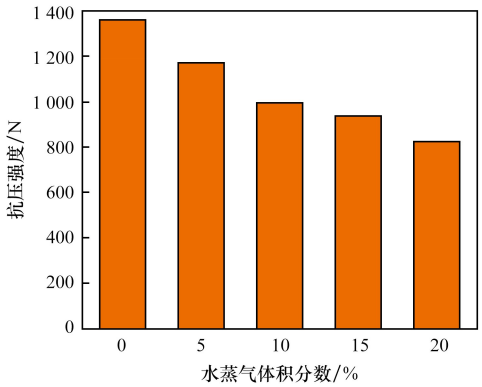


图 7　不同水蒸气－氧气体积分数下(试验 II)烧结试样抗压强度

Fig. 7　Compressive strength of sintered samples under different steam-oxygen volume fractions(test II)

不同水蒸气－氧气体积分数下烧结试样 FeO 质量分数如图 8 所示。由图 8 可知，在 $H_2O(g)$-O_2-N_2 气氛中，随着水蒸气体积分数的升高，FeO 质量分数整体呈上升趋势，从 2.6% 增长到 13.07%。纯 N_2 气氛中，试样 FeO 质量分数稍高，这是因为与纯 N_2 气氛相比，水蒸气有一定的氧化氛围，但氧化作用微弱。当气氛从 5% O_2 + 15% H_2O 变为20% H_2O时，FeO质量分数出现了显著增加。前

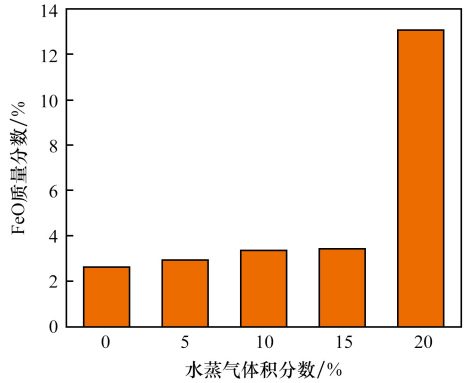
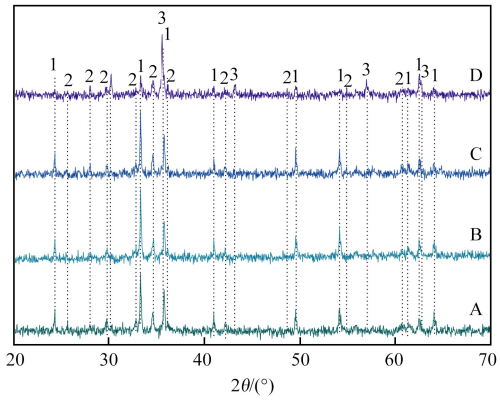


图 8　不同水蒸气－氧气体积分数下(试验 II)烧结试样的 FeO 质量分数

Fig. 8　The mass fraction of FeO of sintered samples under different steam-oxygen volume fractions(test II)

者气氛中的 O_2 氧化能力远大于水蒸气的氧化能力。因此氧化气氛更强，FeO 质量分数更低。

不同水蒸气 – 氧气体积分数下试样的 XRD 图谱如图 9 所示。由图 9 可以看出，随着水蒸气体积分数从 5% 增加到 20%，磁铁矿峰强度增强，赤铁矿峰强度降低。但仅在水蒸气体积分数为 20% 时，出现显著的磁铁矿衍射峰。在水蒸气体积分数小于 20% 时，XRD 图谱中各组分的衍射峰分布相似、峰强度变化不大。



水蒸气体积分数/%：A—5；B—10；C—15；D—20

1—赤铁矿；2—SFCA；3—磁铁矿。

图 9 不同水蒸气 – 氧气体积分数下(试验 II)烧结试样 XRD 图谱

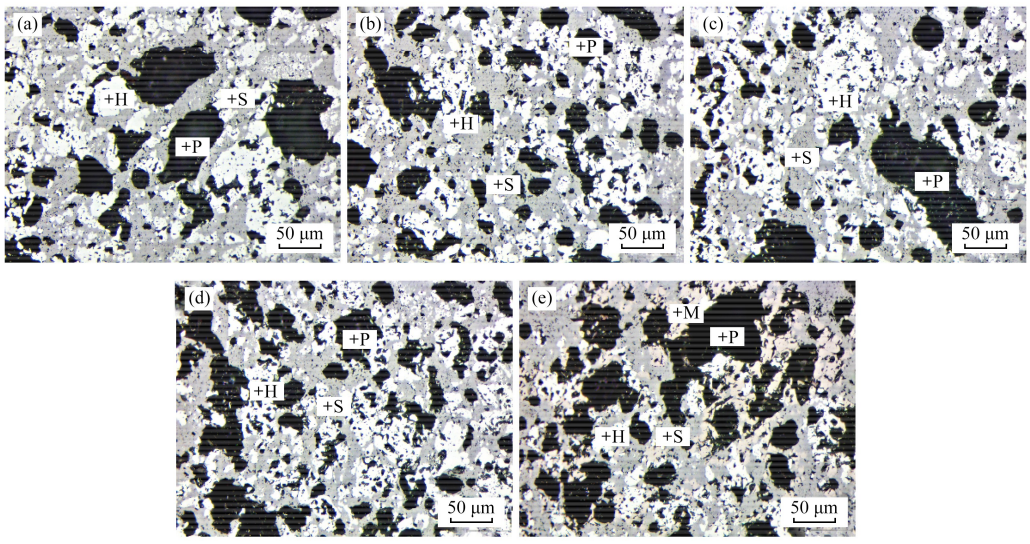
Fig. 9 XRD patterns of sintered samples under differentsteam-oxygen volume fractions(test II)

结合图 4 可知，20% 水蒸气体积分数下与 N_2 气氛下的 XRD 衍射峰分布相似，均表现为磁铁矿的特征衍射峰相对更为突出，赤铁矿以及 SFCA 的衍射峰强度则相对较弱。

不同水蒸气 – 氧气体积分数下试样的显微结构具体如图 10 所示。由图 10 可以看出，当水蒸气体积分数为 0 时，赤铁矿与铁酸钙呈交织状分布在试样中，赤铁矿主要为自形晶和半自形晶，铁酸钙为非自形晶。随着水蒸气体积分数从 5% 增加到 15%(氧气体积分数从 15% 减少到 5%)，试样中矿相仍以赤铁矿和铁酸钙为主，未观察到磁铁矿相。当水蒸气体积分数为 20% 时，试样出现了大量的磁铁矿相，赤铁矿相减少，磁铁矿、赤铁矿与铁酸钙呈相互熔蚀状。

结合图 5 可知，20% $H_2O(g)$ 体积分数下与 N_2 气氛下的矿相结构相似，均表现为磁铁矿在试样大量出现；当有氧气存在时，试样呈现出赤铁矿与铁酸钙交织状存在。

不同水蒸气氧气体积分数下烧结后试样中各种矿物成分的面积百分比如图 11 所示。由图 11 可知，随着水蒸气体积分数从 0 逐步增加至 20%，赤铁矿和铁酸钙的体积分数呈下降趋势；而磁铁矿和孔洞的面积百分比呈上升趋势，这也与 XRD 图谱显示的变化趋势一致。这种变化为水蒸气含

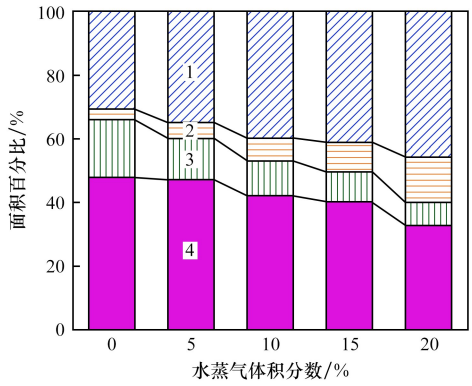


水蒸气体积分数/%：(a) 0；(b) 5；(c) 10；(d) 15；(e) 20

M—磁铁矿；H—赤铁矿；P—孔洞；S—铁酸钙。

图 10 不同水蒸气 – 氧气体积分数下(试验 II)烧结试样光学显微结构

Fig. 10 Optical microstructures of sintered samples under different steam-oxygen volume fractions(test II)



1—孔洞；2—磁铁矿；3—赤铁矿；4—SFCA。

图 11　不同水蒸气 – 氧气体积分数下试样矿物成分的面积百分比

Fig. 11　Area percentages of mineral compositions in samples under different steam-oxygen volume fractions

量增加时抗压强度降低的现象提供了依据。

结合图 6 可知，在气氛中增加了水蒸气后，其矿物组成无变化，但各矿物组成的面积占比有所差异。对比 20% H_2O（g）体积分数条件下与 N_2 条件下试样的面积百分比图，两者均表现出孔洞的面积大于铁酸钙的面积。当水蒸气体积分数小于 20% 时，两种气氛下的烧结试样中各矿物组成的占比相似。当氧气体积分数相同时，在 H_2O(g)-O_2-N_2 混合气氛中烧结后试样的磁铁矿占比略低于在 O_2-N_2 气氛烧结后的试样；而孔洞的占比则高于仅有氧气存在时，这也解释了当烧结气氛中有水蒸气时抗压强度更低这一现象。

高温无碳条件下，在气氛中仅存在水蒸气与氮气时，与铁矿石的反应更趋向于分解赤铁矿。首先在高温环境中赤铁矿不稳定，会发生部分分解，转化为磁铁矿，如式(1)所示。此外，反应(2)为吸热反应，虽然高温利于其正向进行，反应右侧的 H_2 是作为水蒸气反应后的生成物存在，整个系统本身并未有还原气体存在。在反应达到平衡时，其浓度受到限制，不足以有效还原铁氧化物，还原能力在高温下相对较弱。同时水蒸气分解需要极高的温度，而在 1 300 ℃下，该反应是非常微弱的。相比之下，式(1)反应在 1 300 ℃时更容易发生，赤铁矿的分解温度随着氧分压的降低而降低，而在只有水蒸气存在时，由于其氧化能力远弱于氧气，导致赤铁矿的分解温度降低，分解反应提前，促使反应向生成磁铁矿的方向进行。而在 H_2O(g)-O_2-N_2 体系中，水蒸气的加入提升了整体的氧化能力，有利于赤铁矿的稳定生成。

$$6Fe_2O_3 \rightarrow 4Fe_3O_4 + O_2(g) \quad (1)$$

$$2Fe_3O_4(s) + H_2O(g) \rightleftharpoons 3Fe_2O_3(s) + H_2(g)\ (\Delta H > 0, \text{吸热反应}) \quad (2)$$

2.3　水蒸气含量对无碳烧结成矿的影响

为明确水蒸气在烧结成矿过程中的单独影响，鉴于实际烧结过程的氧体积分数通常为 15%～18%，将气氛中的氧体积分数固定为 15%，通过调节水蒸气浓度来探究其影响，并以氮气作为平衡气体，开展微型烧结试验。

在氧气体积分数为 15%、不同水蒸气体积分数下(试验 III)烧结试样抗压强度如图 12 所示。由图 12 可知，随着水蒸气体积分数的增加，烧结后试样的抗压强度呈现出下降趋势。在水蒸气体积分数为 0 时，抗压强度最大为 1 224 N；在水蒸气体积分数为 20% 时，抗压强度最低为 962 N，但仍高于 N_2 气氛条件下的抗压强度。

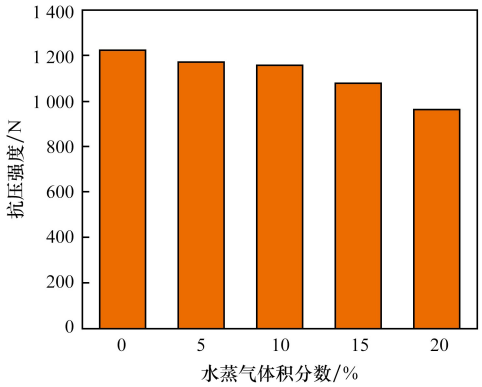


图 12　不同水蒸气体积分数下烧结试样的抗压强度(氧气体积分数为 15%)

Fig. 12　Compressive strength of sintered samples under different steam volume fractions (oxygen volume fraction is 15%)

在氧气体积分数为 15%、不同水蒸气体积分数下烧结试样 FeO 质量分数如图 13 所示。由图 13 可知，随着水蒸气体积分数的增加，FeO 质量分数整体呈下降趋势，从 3.11% 降低到 2.82%。在相同氧气体积分数时，氧气和水蒸气的共同作用加速氧化，使得氧化反应更容易发生，低熔点化合物铁酸钙的量相应增加，熔化的试样引起透气性变差，被包裹在内的烧结料中的 Fe_2O_3，被还原成 Fe^{3+} 的能力降低，抑制了磁铁矿的生成，从而

降低了烧结矿中 FeO 的含量。结合图 8 可知，当水蒸气体积分数在 20% 以下时，与前文氧气氛围中的 FeO 质量分数相比，虽有影响，但是变化不大。结合试样的抗压强度与 FeO 质量分数的变化趋势，分析结果表明水蒸气体积分数在 20% 以下时，对烧结固结过程及强度的影响较小。因此，使用氢基燃料进行气基无碳烧结是可行的，关键在于合理调控氢基燃料的空燃比，以避免因水蒸气生成量过高而对烧结工艺及烧结试样产生不利影响。

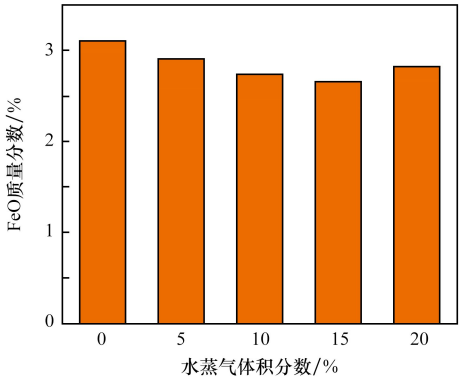
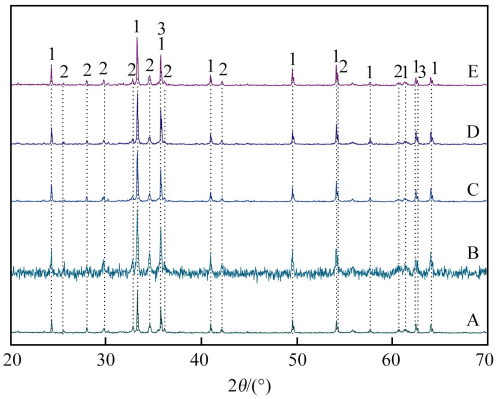


图 13 不同水蒸气体积分数下烧结试样的 FeO 质量分数（氧气体积分数为 15%）

Fig. 13 The mass fraction of FeO of sintered samples under different steam volume fractions (oxygen volume fraction is 15%)

氧气体积分数为 15%、不同水蒸气含量下试样的 XRD 图谱如图 14 所示。由图 14 可知，从衍射峰的强度与分布来看，随着水蒸气体积分数从 0 增加到 20%，各物相的衍射特征相似。试样的整体矿物组成变化不大，均表现为赤铁矿的特征衍射峰相对更显著，矿物组成主要以赤铁矿与铁酸钙为主，磁铁矿衍射峰不明显。

氧气体积分数为 15%、不同水蒸气体积分数下试样的显微结构具体如图 15 所示。由图 15 可以看出，当水蒸气体积分数为 0 时，试样出现少量的磁铁矿相，呈现出磁铁矿、赤铁矿与铁酸钙相互交织状。在氧气体积分数为 15% 时，随着水蒸气体积分数的增加，试样中赤铁矿与铁酸钙为主要组成，未观测到磁铁矿相。但当水蒸气体积分数为 20% 时，试样还存在少部分的铁橄榄石液相，赤铁矿与铁酸钙分布不均匀。这一现象也与图 14 所呈现的规律吻合，同时也验证了前文的结



水蒸气体积分数/%：A—0；B—5；C—10；D—15；E—20。

1—赤铁矿；2—SFCA；3—磁铁矿。

图 14 不同水蒸气体积分数下烧结试样 XRD 图谱（氧气体积分数为 15%）

Fig. 14 XRD patterns of sintered samples under different steam volume fractions (oxygen volume fraction is 15%)

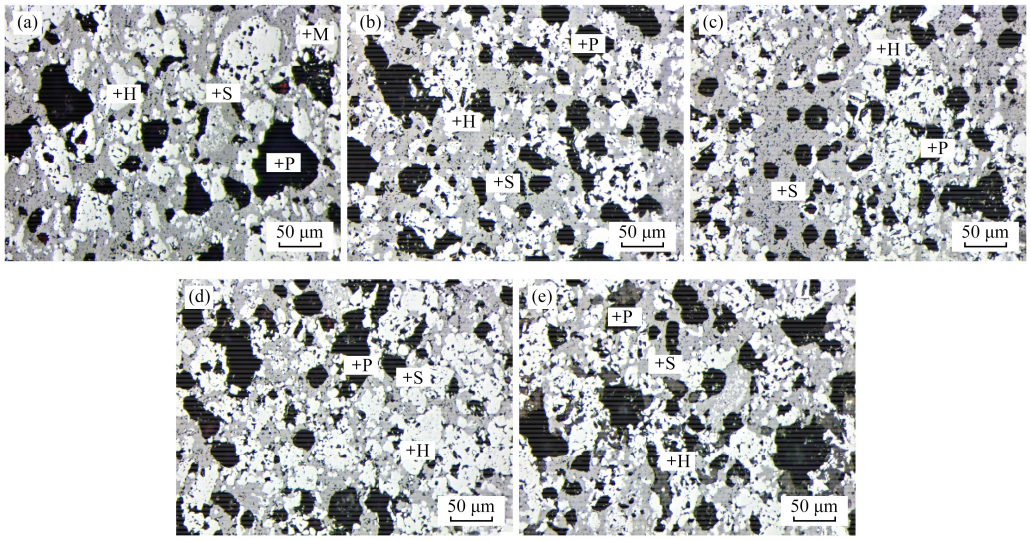
论，即在氧气存在的情况下，赤铁矿与铁酸钙是主要生成物；此时的水蒸气与氧气共同形成氧化气氛，整体以氧化反应为主。

氧气具有强氧化性，其氧化能力远大于水蒸气。在纯水蒸气气氛中，仅考虑 H_2O-H_2 之间的转化平衡，如式(3)所示。但在氧气体积分数为 15% 时，体系中存在的自由氧消除了水蒸气作为还原剂的可能性，水蒸气所产生的微量的 H_2 会被氧气重新氧化为 H_2O。经计算，在 1 300 ℃时，对于式(3)而言，反应达到平衡时的氧气体积分数约为 0.01%。当气氛组成为 $O_2 + H_2O$ 的混合气氛时，整体变为氧化气氛，氧气的引入能够快速地提高有效氧势，由氧气的直接氧化作为主要反应；水蒸气在高温下可以分解为氢气和氧气，尽管平衡时氧气分压很低，但水蒸气的存在改变了氧化过程中的传质机制[20]，氧化速率更快，从而增强氧化动力学。

$$H_2O(g) \rightleftharpoons \frac{1}{2}O_2(g) + H_2(g)\ (\Delta H > 0, \text{吸热反应}) \quad (3)$$

3 结 论

(1) 在 O_2-N_2 的气氛中，随着氧气体积分数从0增加到20%，烧结试样的抗压强度从965 N



水蒸气体积分数/%：（a）0；（b）5；（c）10；（d）15；（e）20

M—磁铁矿；H—赤铁矿；P—孔洞；S—铁酸钙。

图 15　不同水蒸气体积分数下烧结试样光学显微结构（氧气体积分数为 15%）

Fig. 15　Optical microstructures of sintered samples under different steam volume fractions (oxygen volume fraction is 15%)

增加到 1 360 N；矿物组分则表现为更趋于赤铁矿的生成，孔隙率和磁铁矿占比减少；FeO 质量分数从 14.47% 降低到 2.6%。

（2）在 $H_2O(g)$-O_2-80% N_2 的气氛中，当水蒸气体积分数从 0 增加至 15% 时，抗压强度从 1 360 N降低为 936 N；赤铁矿和铁酸钙面积占比减少，磁铁矿和孔隙率增加，FeO 质量分数从 2.6% 增加到 3.41%；当气氛组成为 20% H_2O + 80% N_2 时，此时抗压强度最低为 825 N，出现了显著的磁铁矿衍射峰，FeO 体积分数为 13.07%。

（3）在 $H_2O(g)$-15% O_2-N_2 混合气氛下，磁铁矿占比相对减少，FeO 含量更低。水蒸气体积分数在 20% 以下时，对烧结固结过程及强度的影响较小。

（4）使用氢基燃料进行气基无碳烧结是可行的，其在碳减排方面有很大的潜力，但要合理控制氢基燃料的空燃比，避免过量的水蒸气产生。

参考文献：

[1] 王海东，余海钊，范晓慧，等. 铁矿烧结过程能耗数学模型的研究进展[J]. 钢铁，2018，53(10)：1－7.
WANG Haidong, YU Haizhao, FAN Xiaohui, et al. Progress in research on mathematical model of energy consumption of iron ore sintering process[J]. Iron and Steel，2018，53(10)：1－7.

[2] 于勇，朱廷钰，刘霄龙. 中国钢铁行业重点工序烟气超低排放技术进展[J]. 钢铁，2019，54(9)：1－11.
YU Yong，ZHU Tingyu，LIU Xiaolong. Progress of ultra-low emission technology for key processes of iron and steel industry in China[J]. Iron and Steel，2019，54(9)：1－11.

[3] FAN X H, WONG G, GAN M, et al. Establishment of refined sintering flue gas recirculation patterns for gas pollutant reduction and waste heat recycling[J]. Journal of Cleaner Production，2019，235：1549－1558.

[4] NAITO M, TAKEDA K, MATSUI Y. Ironmaking technology for the last 100 years：Deployment to advanced technologies from introduction of technological know-how，and evolution to next-generation process[J]. ISIJ International，2015，55(1)：7－35.

[5] LI C Q, QIN S, WANG X, et al. Reduction of carbon emission in iron sintering process based on hot air sintering technology[J]. Journal of Cleaner Production，2024，471：143403.

[6] 何志军，盛宏沅，高立华，等. 利用生物质能实现低碳炼铁的研究进展[J]. 钢铁，2025，60(1)：1－14.
HE Zhijun, SHENG Hongyuan, GAO Lihua, et al. Research progress on utilizing biomass energy to achieve low-carbon ironmaking[J]. Iron and Steel，2025，60(1)：1－14.

[7] 雷玉办,王岩,李雪妹,等. 生物质燃料用于铁矿烧结的研究进展[J]. 烧结球团,2024,49(1):18-26.
LEI Yuban, WANG Yan, LI Xuemei, et al. Research progress on use of biomass fuels for iron ore sintering [J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(1):18-26.

[8] 刘燊辉,白凯凯,倪桂虎,等. 燃料粒度对铁矿烧结的影响研究[J]. 烧结球团,2019,44(6):17-22.
LIU Shenhui, BAI Kaikai, NI Guihu, et al. Study on influence of fuel size on iron ore sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(6):17-22.

[9] 陈富松,袁亚强,康宏毅,等. 当前形势下烟气循环烧结工艺发展现状及展望[J]. 中国冶金,2024,34(2):21-34.
CHEN Fusong, YUAN Yaqiang, KANG Hongyi, et al. Development status and prospect of flue gas recirculation sintering process under current situation[J]. China Metallurgy,2024,34(2):21-34.

[10] WANG Y F,YANG T,WANG H Y,et al. Application of steam injection in iron ore sintering: Fuel combustion efficiency and CO emissions[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2023,30(1):31-39.

[11] WANG J K,MENG H X,LIU X,et al. Effect of ammonia injection stages and segregation degrees on the characteristics of iron ore sintering process[J]. Fuel, 2023,352:128998.

[12] 王兆才,刘臣,李继淦,等. 烧结烟气 CO_x 的生成机理及减排措施[J]. 烧结球团,2021,46(1):14-22.
WANG Zhaocai, LIU Chen, LI Jigan, et al. Generation mechanism and emission reduction measures of CO_x in sintering flue gas[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(1):14-22.

[13] JIANG X B, CHEN T J, ZHOU X L, et al. Effect of process parameters on mineralisation consolidation in carbon-free iron ore sintering process[J]. ISIJ International,2023,63(10):1587-1594.

[14] 陈铁军,万军营,周仙霖,等. 一种铁矿粉无碳烧结系统:CN214300280U[P]. 2021-09-28.
CHEN Tiejun, WAN Junying, ZHOU Xianlin, et al. A carbon-free sintering system for iron ore powder: CN202120212221.0[P]. CN214300280U[2025-11-22].

[15] JIANG X B, CHEN T J, ZHOU X L, et al. Limonite micro-sintering behaviors in the presence and absence of solid fuels: Feasibility analysis of carbon-free sintering [J]. Fuel,2025,393:135087.

[16] 刘佳文,陈铁军,周仙霖,等. 基于无碳烧结的褐铁矿型红土镍矿固结机理研究[J]. 烧结球团,2022,47(3):1-7.
LIU Jiawen, CHEN Tiejun, ZHOU Xianlin, et al. Research on consolidation mechanism of limonite-type laterite nickel ore based on carbon-free sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(3):1-7.

[17] 陈铁军,万军营,周仙霖,等. 一种实验室无碳焙烧系统:CN217110469U[P]. 2022-08-02.
CHEN Tiejun, WAN Junying, ZHOU Xianlin, et al. A laboratory-scale carbon-free roasting system:CN217110469U [P]. 2022-08-02.

[18] 唐佳润,刘月明,张福明,等. 烧结矿 FeO 含量预测技术的探讨[J]. 烧结球团,2025,50(1):21-30.
TANG Jiarun, LIU Yueming, ZHANG Fuming, et al. Discussion on prediction technology of FeO content in sinter [J]. Sintering and Pelletizing, 2025, 50(1): 21-30.

[19] 边妙莲,吴胜利,张丽华,等. 低 FeO 烧结条件下的适宜配碳量和碱度[J]. 钢铁,2012,47(3):6-10.
BIAN Miaolian,WU Shengli,ZHANG Lihua,et al. Proper carbon addition and basicity of regulation technology under low-FeO sintering[J]. Iron and Steel, 2012, 47(3):6-10.

[20] CHEN J R,SHEN Z,ZHANG J Q. Effect of water vapor and oxygen partial pressure on oxidation of Fe and Fe-Cr alloys[J]. High Temperature Corrosion of Materials, 2023,99(1):15-46.