气基烧结中氧含量对铁矿粉烧结基础特性的影响

姜翔波，陈铁军，周仙霖，万军营，任嫔婧，周镕昊
（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：气基烧结的高氧含量气氛与普通烧结的局部还原性气氛存在本质上的区别。烧结基础特性反映了铁矿粉的烧结行为，然而目前的试验均是在空气气氛下进行的，忽略了实际烧结过程气氛中氧含量的影响。本文通过在烧结基础特性炉中通入不同氧含量的气体，探究了氧含量对同化性、液相流动性、黏结相强度及铁酸钙生成特性的影响。结果表明，随着气氛中氧含量的提升，铁矿粉的同化温度下降，液相流动性、黏结相强度以及铁酸钙生成量均增大。

关键词：气基烧结；氧含量；铁矿粉；同化性；液相流动性；黏结相强度；铁酸钙生成特性
中图分类号：TF046.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0121－07
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.009

Effect of oxygen content in gas-based sintering on fundamental sintering characteristics of iron ore fines

JIANG Xiangbo, CHEN Tiejun, ZHOU Xianlin, WAN Junying, REN Pinjing, ZHOU Ronghao
(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: The atmosphere with high oxygen content in gas-based sintering is essentially different from the locally reducing atmosphere in conventional sintering. Fundamental sintering characteristics reflect the sintering behavior of iron ore fines, however, the current experiments are conducted under air atmosphere, the effect of oxygen content in actual sintering process is neglected. This study investigates the effect of oxygen content on assimilation performance, liquid phase fluidity, bonding phase strength, and calcium ferrite formation characteristics by injecting gases with different oxygen content into a fundamental sintering characteristics furnace. The results show that with the oxygen content in the atmosphere increases, the assimilation temperature of iron ore fines decreases, while the liquid phase fluidity, bonding phase strength, and calcium ferrite formation amount all increase.

Key words: gas-based sintering; oxygen content; iron ore fines; assimilation performance; liquid phase fluidity; bonding phase strength; calcium ferrite formation characteristics

钢铁行业正面临实现“双碳”目标与推行超低排放标准的双重压力[1]。作为长流程高炉炼铁的主要原料之一，烧结矿的生产过程已成为行业减污降碳、协同推进提质增效的关键环节[2]。气基

收稿日期：2025－09－18；**修回日期**：2025－11－07
基金项目：广西科技重大专项资助项目(桂科 AA24263047)
作者简介：姜翔波(1998—)，男，博士研究生，从事低碳铁矿烧结新工艺与污染物减排方面的研究。
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。

烧结技术通过采用清洁气体燃料替代传统固体燃料，为显著降低烧结过程的碳排放与污染物排放提供了一条有效路径[3-4]。该技术与传统烧结工艺在烧结气氛、供热机制及温度制度等方面存在显著差异。尤为关键的是，在高温焙烧阶段，气基烧结环境具有更高的氧含量，有效避免了局部还原性气氛的产生。

烧结基础特性多被用于预测烧结成矿效果，通过调整铁矿粉配比，改善烧结矿质量[5]。近年来，国内外学者基于铁矿粉的高温烧结基础特性开展了大量影响机制及优化配矿研究。对于同化性能，褐铁矿粉的同化性一般优于赤铁矿粉和磁铁矿粉，且随着 SiO_2、Al_2O_3 质量分数的增加，同化温度先降低后升高；随着 MgO 质量分数的增加，同化温度升高[6-8]。对于液相流动性，SiO_2、Al_2O_3、MgO 质量分数的增加不利于液相流动温度、液相流动率等指标[9-11]。王伟伟等[12]通过对烧结矿矿相定量研究，揭示了铁矿粉种类对烧结矿黏结相强度的影响机制。杨双平等[13]针对不同种类铁矿粉化学成分的差异，探究了 Al_2O_3、SiO_2 质量分数对基础特性的影响规律。国内企业也通过烧结基础特性的研究结果，对已有的铁矿粉种类配比进行优化，实现了烧结矿质量与经济效益的提升[14-19]。

上述研究主要聚焦于不同铁矿粉的种类及其化学成分对烧结基础特性的影响规律，旨在优化混合矿粉的烧结成矿效果。然而，需要指出的是，现有的烧结基础特性测试普遍在常规空气气氛下进行，未能充分反映传统烧结高温过程中实际存在的低氧含量气氛特征。因此，为提升烧结基础特性研究成果在传统烧结与气基烧结工艺中的适用性，深入研究不同氧含量对烧结基础特性的影响规律至关重要。

本文选用典型的烧结用进口铁矿粉作为研究对象，系统开展了不同氧含量气氛下的烧结基础特性试验研究，重点考察了同化性、液相流动性、黏结相强度及铁酸钙生成特性等关键指标的变化规律，并深入分析了氧含量影响烧结基础特性的内在机制。本研究一方面可以为普通烧结中铁矿粉的烧结基础特性提供补充，另一方面可以为气基烧结中铁矿粉的烧结基础特性提供理论基础。

1 原料与方法

1.1 试验原料

试验原料选用了烧结厂常见的铁矿粉以及 CaO 纯试剂，其中 PB 粉属于褐铁矿类铁矿粉，Car 粉属于赤铁矿类铁矿粉，铁矿粉主要化学成分与烧损见表1。

1.2 试验方法

铁矿粉的高温基础特性包括同化性、液相流动性、黏结相强度和铁酸钙生成量，试验过程如图1所示。首先，将铁矿粉研磨筛分，使原料粒度在0.075 mm以下，放入105 ℃的烘箱中烘干3 h。其次，按照不同高温基础特性的碱度需求，在铁矿粉中配加一定量的 CaO 试剂并混合均匀。然后，称取0.8 g混匀料，使用压片机在5 MPa压力下保持2 min，制成∅8 mm×10 mm的圆柱形小块。最后，通过控制空气与氧气的体积比调节烧结气氛中氧含量，在不同的氧含量，流量为3 L/min的条件下，将压制的小块在高温基础特性炉中焙烧，分别检测4种基础特性。

1.2.1 同化性

称取 CaO 试剂2.0 g，采用上述压块方式压制成∅25 mm×4 mm的圆柱形小块。将原始碱度的铁矿小块置于 CaO 小块上，放入高温基础特性炉中随炉以10 ℃/min的速度升温。待温度达到1 050 ℃，通过高温摄像头和计算机软件标定铁矿和 CaO 小块的总高度，随后继续升温，待高度下降至总高度的90%时记录温度，该温度为同化温度。同化温度越低，铁矿的同化性能越好。

1.2.2 液相流动性

制备碱度为3.0的铁矿小块，在摄像头下拍照并记录投影面积 S_1[13]。待高温基础特性炉温度稳定在1 280 ℃时，放入铁矿小块保持5 min后移出，待小块冷却后在相同的摄像头拍照并记录投影面积 S_2。液相流动性(S)的计算方法为 $S=(S_2-S_1)/S_1$。

1.2.3 黏结相强度

依据实际生产情况，制备碱度为2.0的铁矿小块。待高温基础特性炉温度稳定在1 280 ℃时，放入铁矿小块保持5 min后移出。待小块冷却后，

表 1　铁矿粉主要化学成分和烧损（质量分数）

Table 1　Main chemical composition and losses on ignition of raw materials　%

铁矿粉	TFe	FeO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	P	S	烧损
PB	61. 19	0. 35	4. 28	0. 270	1. 94	0. 10	0. 098	0. 020	5. 42
Car	65. 03	1. 00	1. 94	0. 034	1. 25	0. 05	0. 093	0. 023	3. 32

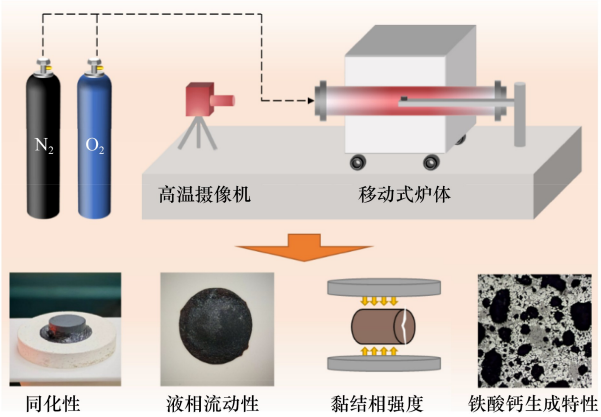


图 1　烧结基础特性试验示意

Fig. 1　Schematic diagram of high-temperature sintering characteristics

将圆柱形小块横向置于抗压强度测定仪上，测定小块的抗压强度，最终取 3 个小块的平均抗压强度作为铁矿粉的黏结相强度。

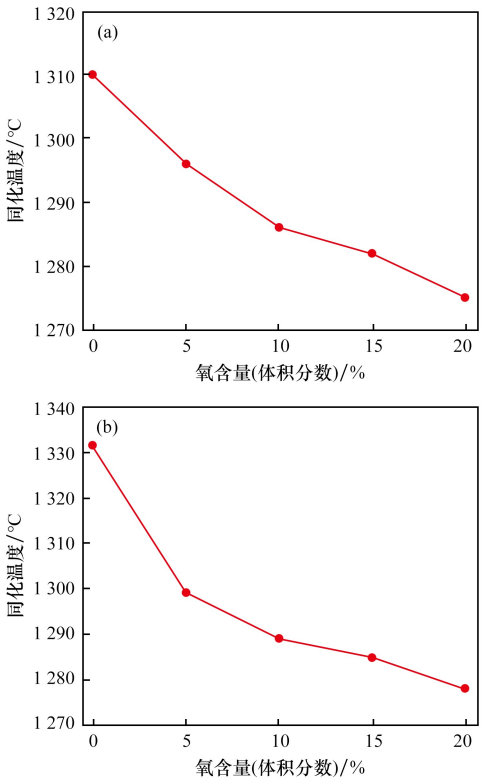
1. 2. 4　铁酸钙生成量

依据实际生产情况，制备碱度为 2. 0 的铁矿小块。待高温基础特性炉温度稳定在 1 280 ℃时，放入铁矿小块保持 5 min 后移出。待小块冷却后，使用环氧树脂进行镶嵌，然后在磨抛机上磨片抛光。通过光学显微镜观察铁酸钙矿相的组成与结构，利用 ImageJ 的交互式阈值功能对图像进行二值化处理，进而计算铁酸钙的面积分数。

2　结果与讨论

2. 1　氧含量对同化性的影响

同化性反映了烧结过程中铁矿石和熔剂反应生成液相的难易程度，同化温度越低，越容易生成液相。氧含量对同化温度影响如图 2 所示。由图 2 可知，随着烧结气氛中氧体积分数由 0 增加至 20%，PB 粉的同化温度由 1 310 ℃逐渐降低至 1 275 ℃，Car 粉的同化温度由 1 331 ℃逐渐降低至 1 278 ℃。褐铁矿粉的同化温度相对于赤铁矿粉较低，这与前人的研究结论一致[20]。由于褐铁矿粉中存在结晶水，在高温烧结过程中经过脱水后变的疏松多孔，大大增加了比表面积。该变化使褐铁矿粉更容易与熔剂反应产生液相。两种铁矿粉，均是在高氧含量的烧结气氛下，更容易产生液相。烧结气氛中的氧气，促进了 Fe_2O_3 与 CaO 之间的反应，有利于液相的生成。然而实际烧结气氛中的氧含量，尤其是燃烧带位置，会由于固体燃料的燃烧而降低，这是不利于铁酸钙液相生成的。



（a）PB 粉；（b）Car 粉

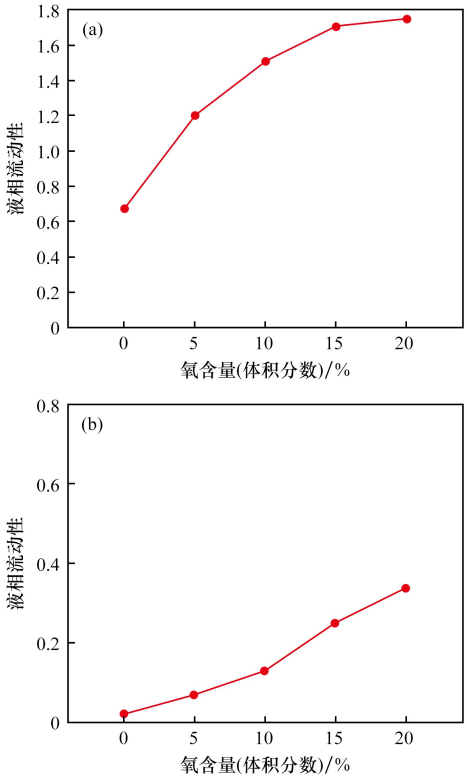
图 2　氧含量对不同铁矿粉同化温度的影响

Fig. 2　Effect of oxygen content on assimilation temperature of different iron ore fines

2. 2　氧含量对液相流动性的的影响

液相流动性是烧结矿固结成矿能力的基础。烧结混匀料在高温下生成的液相通过流动将固体颗粒黏结在一起，形成具有机械强度的块状烧结矿。氧含量对液相流动性的影响如图 3 所示。由图 3 可知，随着烧结气氛中氧体积分数由 0 增加

至 20%，PB 粉的液相流动性由 0.67 增加到 1.75，Car 粉的液相流动性由 0.02 增加到 0.34。褐铁矿粉的液相流动性远大于赤铁矿粉，这是因为褐铁矿粉在结晶水脱除后会在内部留下微孔、裂隙和通道。疏松多孔的结构一方面促进了液相的生成，另一方面通过毛细作用促进液相的渗透与流动。两种铁矿粉，均是在高氧含量的烧结气氛下，具有更好的液相流动性。随着氧含量的增加，对于褐铁矿粉类型的 PB 粉，液相流动性的增长率随着氧含量的增加不断减小，而对于赤铁矿粉类型的 Car 粉，液相流动性近似呈线性增长。气氛中的氧含量会影响 Fe 元素的价态，当氧含量过低时，混合料中 Fe^{2+} 比例增加，此时生成的液相多为铁橄榄石(Fe_2SiO_4)相，相比于铁酸钙($CaO\cdot Fe_2O_3$)相，其黏度高，流动性差，这成为了铁矿粉在低氧含量时，液相流动性差的主要原因。



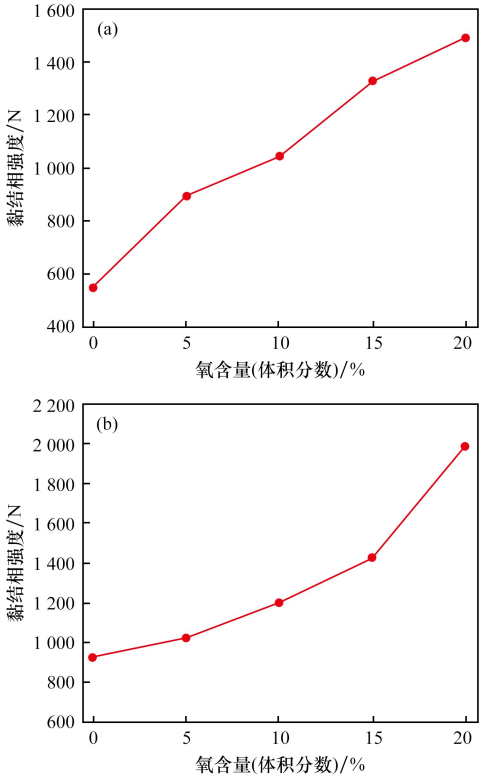
（a）PB 粉；（b）Car 粉

图 3 氧含量对不同铁矿粉液相流动性的影响

Fig. 3 Effect of oxygen content on liquid phase fluidity of different iron ore fines

2.3 氧含量对黏结相强度的影响

黏结相强度决定了烧结矿整体的机械强度。强度的影响因素包括矿相组成、微观结构与孔隙分布等。氧含量对黏结相强度的影响如图 4 所示。由图 4 可知，随着烧结气氛中氧质量分数由 0 增加至 20%，PB 粉的黏结相强度由 549 N 增加到 1 493 N，Car 粉的黏结相强度由 928 N 增加到 1 989 N。在不同氧含量下褐铁矿粉的黏结相强度均小于赤铁矿粉。褐铁矿在烧结过程脱除结晶水后在其内部留下孔隙，在高温时易形成大孔薄壁结构，使烧结矿的机械强度恶化。对于同种铁矿粉，在高氧含量时，更有利于铁矿粉形成强度更好的烧结矿。



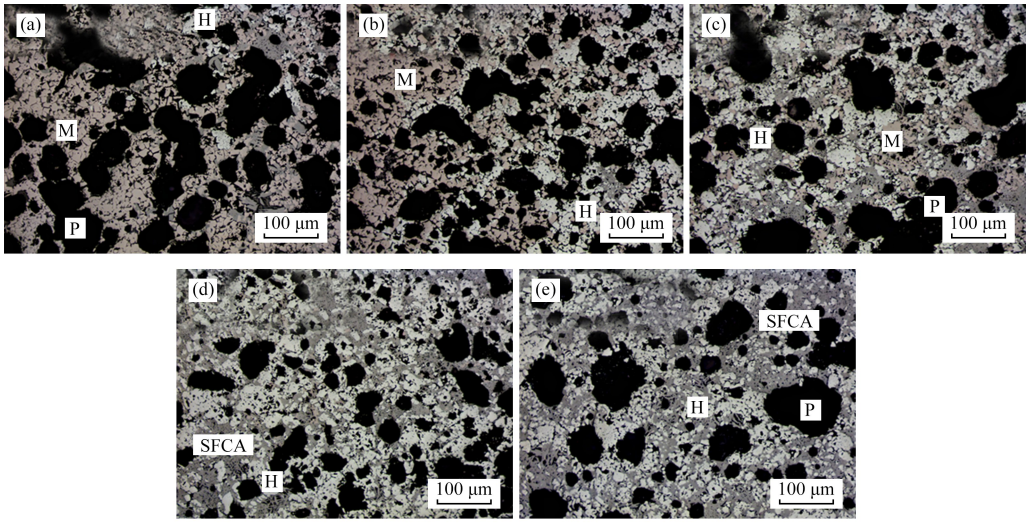
（a）PB 粉；（b）Car 粉

图 4 氧含量对不同铁矿粉黏结相强度的影响

Fig. 4 Effect of oxygen content on strength of bonding phase of different iron ore fines

2.4 氧含量对微观结构及铁酸钙生成特性的影响

铁酸钙是烧结矿最主要的液相，其生成特性决定着烧结矿的还原性和强度。不同氧含量气氛下 PB 粉和 Car 粉烧结矿铁酸钙微观组成及结构分别如图 5、6 所示。由图 5、6 可知，氧含量的改变影响了两种铁矿粉烧结矿的矿相组成，在烧结气氛中氧含量较高时，烧结矿主要由赤铁矿相、铁酸钙相和硅酸盐相组成。然而，在氧含量较低时，烧结矿中的赤铁矿相被磁铁矿相所取代，且

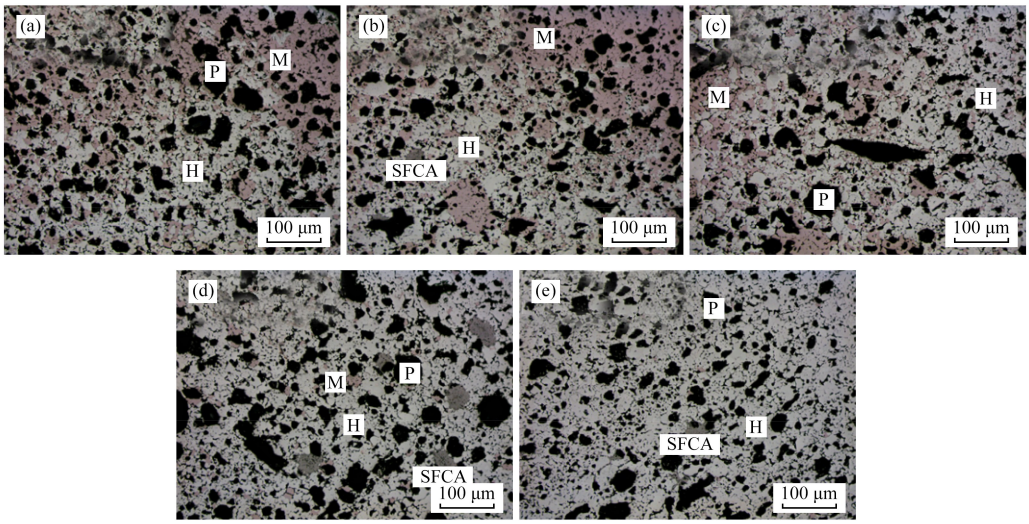


氧含量(体积分数)/%：(a) 0；(b) 5；(c) 10；(d) 15；(e) 20

H—赤铁矿；M—磁铁矿；SFCA—铁酸钙；P—孔洞。

图 5　不同氧含量气氛下 PB 粉烧结矿微观组成及结构

Fig. 5　Microstructure and composition of PB fine sinter under different oxygen content atmospheres



氧含量(体积分数)/%：(a) 0；(b) 5；(c) 10；(d) 15；(e) 20

H—赤铁矿；M—磁铁矿；SFCA—铁酸钙；P—孔洞。

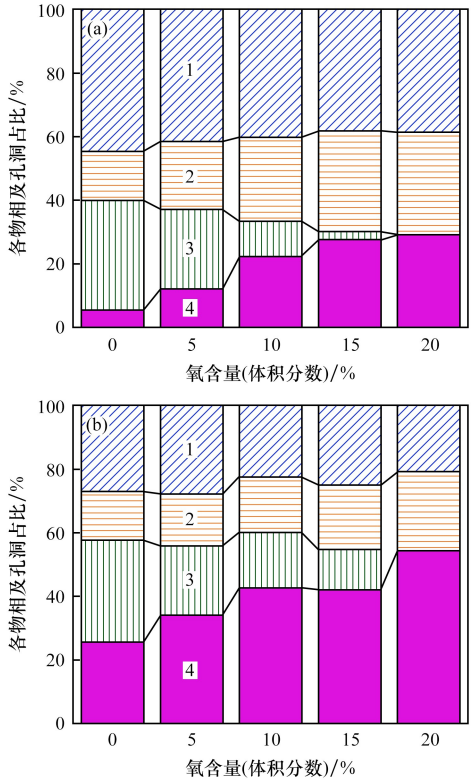
图 6　不同氧含量气氛下 Car 粉烧结矿微观组成及结构

Fig. 6　Microstructure and composition of Car fine sinter under different oxygen content atmospheres

产生的磁铁矿相分布在烧结矿样品的外层，恶化了样品的机械强度。此外，从图中可以观察到，Car 粉样品的孔洞小于 PB 粉样品。这是由于赤铁矿在空气气氛下，温度达到约 1 325 ℃时会发生赤铁矿分解反应，生成磁铁矿和氧气。然而随着氧含量的降低，会促进该反应的正向进行，赤铁矿可在 1 280 ℃左右下发生上述反应生成磁铁矿[4]。

随后，通过 ImageJ 软件对上述图像进行二值化处理并分析。氧含量对烧结矿物相及孔洞占比的定量分析如图 7 所示。由图 7 可知，随着烧结气氛中的氧体积分数由 0 逐步增加至 20%，PB 粉铁酸钙相的占比不断增加。高氧含量的气氛更有利于烧结矿液相的生成，同时增加物相中赤铁矿的占比，降低磁铁矿的占比；相比于 PB 粉，Car 粉由于属赤铁矿，其生成铁酸钙能力较弱，因此铁酸钙的变化较小，赤铁矿和磁铁矿相的变化规律与 PB 粉一致。此外，其因烧失量较小，样品的孔洞占比更少，整体结构更加紧密。综上可得，

气氛中的氧含量在高温时可维持 Fe^{3+} 不向 Fe^{2+} 转变，为铁酸钙的生成提供基础。



（a）PB 粉；（b）Car 粉

1—孔洞；2—铁酸钙；3—磁铁矿；4—赤铁矿。

图 7 不同氧含量下 PB 粉和 Car 粉烧结矿中各物相及孔洞占比

Fig. 7 Proportion of phases and voids in PB and Car fines sinters with different oxygen content

3 结 论

（1）烧结气氛中氧含量的增加会使同化温度下降，同化性能增强。在高氧含量气氛下，同化性主要由赤铁矿和氧化钙生成低熔点铁酸钙的反应为主导，此时同化温度较低。随着气氛中氧含量逐渐降低，赤铁矿向磁铁矿的转变逐渐增多，这阻碍了低熔点铁酸钙的生成，导致了同化温度的升高。

（2）烧结气氛中氧含量的增加会使液相流动性升高，PB 粉和 Car 粉分别从 0.67、0.02 增至 1.75 和 0.34。高氧含量气氛抑制高温条件下 Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 的转化，有利于低黏度的铁酸钙液相生成。PB 粉因析出结晶水后形成多孔结构，更利于液相的生成与流动，其流动性远高于结构致密的赤铁矿粉。

（3）烧结气氛中氧含量的增加会使黏结相强度升高。在高氧含量气氛下，烧结矿微观形貌由均匀分布的赤铁矿、铁酸钙和孔洞组成，此时赤铁矿晶粒首尾相接，缝隙由铁酸钙液相填充，样品的强度最高。随着氧含量的逐渐降低，样品的气固界面出现更多的磁铁矿相，形成了强度较赤铁矿差的磁铁矿外壳，导致样品机械强度降低。

（4）烧结气氛中氧含量的增加有利于提升铁酸钙生成特性。在高氧含量的气氛下，铁酸钙数量更多，结晶状态好，均匀分布在赤铁矿晶粒的间隙，充分发挥了黏结相的作用。该结构的烧结矿具有良好的机械强度以及还原性。

参考文献：

[1] 赵紫薇,孔福林,童莉葛,等. 基于“3060”目标的中国钢铁行业二氧化碳减排路径与潜力分析[J]. 钢铁,2022,57(2):162－174.
ZHAO Ziwei,KONG Fulin,TONG Lige,et al. Analysis of CO_2 emission reduction path and potential of China's steel industry under the “3060” target[J]. Iron and Steel,2022,57(2):162－174.

[2] 陈思凡,项子豪,阮锦琦,等. 超厚料层烧结极致能效减碳研究进展与思考[J]. 烧结球团,2025,50(2):1－9.
CHEN Sifan,XIANG Zihao,RUAN Jinqi,et al. Research progress and thinking on extreme energy efficiency and carbon reduction of ultra-thick material layer sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(2):1－9.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 吴胜利,刘宇,杜建新,等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念[J]. 北京科技大学学报,2002(3):254－257.
WU Shengli,LIU Yu,DU Jianxin,et al. New concept of iron ores sintering basic characteristics[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2002(3):254－257.

[6] 单长冬,张建良,刘征建,等. 铁矿粉烧结基础特性之同化性研究进展[J]. 中国冶金,2022,32(12):1 – 6.
SHAN Changdong, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Research progress on assimilation property in basic sintering characteristics of iron ore powder[J]. China Metallurgy,2022,32(12):1 – 6.

[7] 吴胜利,刘宇,杜建新,等. 铁矿粉与 CaO 同化能力的试验研究[J]. 北京科技大学学报,2002,24(3):258 – 261.
WU Shengli,LIU Yu,DU Jianxin,et al. Experiment study of assimilation ability between iron ores and CaO[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002,24(3):258 – 261.

[8] 阎丽娟,吴胜利,朱娟,等. 铁矿粉的化学成分劣质化对其烧结同化性的影响研究[J]. 太原理工大学学报,2014,45(1):19 – 24.
YAN Lijuan, WU Shengli, ZHU Juan, et al. Influence of chemical composition deterioration of iron ores on sintering assimilation[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2014,45(1):19 – 24.

[9] 付忠旺,莫朝兴,陈小敏,等. 铁矿粉烧结液相流动性特征数的影响因素[J]. 钢铁,2018,53(12):18 – 23.
FU Zhongwang, MO Chaoxing, CHEN Xiaomin, et al. Influence factors of fluidity characteristic number of iron ore powder[J]. Iron & Steel,2018,53(12):18 – 23.

[10] 吴胜利,贝纪承,朱娟,等. 化学成分对铁酸盐烧结液相流动性的影响[J]. 钢铁研究学报,2015,27(9):7 – 13.
WU Shengli, BEI Jicheng, ZHU Juan, et al. Influence of chemical composition on liquid fluidity of ferrite[J]. Journal of Iron and Steel Research,2015,27(9):7 – 13.

[11] 吴胜利,苏博,齐渊洪,等. 铁矿粉液相流动性的主要液相生成特征因素解析[J]. 工程科学学报,2018,40(3):321 – 329.
WU Shengli, SU Bo, QI Yuanhong, et al. Major melt formation characteristic factor analysis of iron ore liquid phase fluidity during the sintering process[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2018, 40(3):321 – 329.

[12] 王伟伟,韩秀丽,段博文,等. 铁矿粉矿物学特性及其黏结相强度影响机理[J]. 烧结球团,2025,50(4):122 – 130.
WANG Weiwei, HAN Xiuli, DUAN Bowen, et al. Mineralogical characteristics of iron ore powder and its influencing mechanism of bonding phase strength[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(4):122 – 130.

[13] 杨双平,于成刚,何少红,等. 铁矿粉化学成分对烧结高温基础特性的影响[J]. 中国冶金,2023,33(2):47 – 54.
YANG Shuangping, YU Chenggang, HE Shaohong, et al. Influence of chemical composition in iron ore powder on basic characteristics of sintering at high temperature[J]. China Metallurgy,2023,33(2):47 – 54.

[14] 唐珏,王茗玉,储满生,等. 国内外烧结优化配矿研究进展[J]. 钢铁,2024,59(9):102 – 113.
TANG Jue, WANG Mingyu, CHU Mansheng, et al. Process of ore blending optimization in sintering at home and abroad[J]. Iron and Steel,2024,59(9):102 – 113.

[15] 章新宇,潘从元,袁溢,等. 烧结优化配矿研究现状[J]. 中国冶金,2025,35(7):96 – 108.
ZHANG Xinyu, PAN Congyuan, YUAN Yi, et al. Research status of sintering optimization ore blending[J]. China Metallurgy,2025,35(7):96 – 108.

[16] 杨双平,孙海兴,张甜甜,等. 低硅矿烧结高温基础特性及优化配矿研究[J]. 钢铁研究学报,2023,35(6):659 – 670.
YANG Shuangping, SUN Haixing, ZHANG Tiantian, et al. Research on high temperature basic characteristics and optimized ore blending of low silicon ore sintering blending[J]. Journal of Iron and Steel Research,2023, 35(6):659 – 670.

[17] 张国成,罗果萍,柴轶凡,等. 褐铁矿在烧结工艺中的优化配置[J]. 工程科学学报,2022,44(1):39 – 49.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, CHAI Yifan, et al. Optimal allocation of limonite in sintering process[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(1):39 – 49.

[18] 张国成,罗果萍,邬虎林,等. 包钢烧结合理利用巴西高硅混合粉实验[J]. 钢铁研究学报,2019,31(10):875 – 881.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, WU Hulin, et al. Experimental research on rational utilization of Brazil high-silicon mixed powder in sintering process at Baotou Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(10):875 – 881.

[19] 谢运强,张中中,王子宏,等. 某钢铁企业常用铁矿粉烧结基础性能及优化配矿[J]. 中国冶金,2018,28(3):9 – 15.

(下转第 145 页)

55 – 59.

[18] 王新东,刘存强,刘磊,等. 碱性球团生产技术研究及高炉高比例应用实践[J]. 河北冶金,2025(2):1 – 11.
WANG Xindong, LIU Cunqiang, LIU Lei, et al. Research on production technology of alkaline pelletizing and application of high proportion in blast furnace[J]. Hebei Metallurgy,2025(2):1 – 11.

[19] 于丽娟,宋宪平,王义达,等. 鞍钢合理炉料结构的形成[J]. 钢铁,2003,38(11):1 – 4.
YU Lijuan, SONG Xianping, WANG Yida, et al. Rationalization of burden composition at Anshan steel [J]. Iron & Steel,2003,38(11):1 – 4.

[20] 邓睿,苏鸿,韩基祥,等. 高球比炉料结构下镁质球团的冶金性能研究[J]. 烧结球团,2020,45(2):31 – 35.
DENG Rui, SU Hong, HAN Jixiang, et al. Study on metallurgical properties of magnesium pellet under the burden structure of high pellet ratio[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):31 – 35.

[21] 司金凤,贾彦忠,李凤臣. 配加高镁球团矿高炉炉料结构的研究[J]. 钢铁研究,2016,44(3):1 – 5.
SI Jinfeng, JIA Yanzhong, LI Fengchen. Study on burden structure of blast furnace with adding high magnesium pellets[J]. Research on Iron and Steel, 2016, 44(3): 1 – 5.

[22] 滕召杰,王凯,陈建,等. 首钢京唐 3 号高炉高比例球团矿冶炼实践[J]. 炼铁,2021,40(4):29 – 32.
TENG Zhaojie, WANG Kai, CHEN Jian, et al. Smelting practice of Shougang jingtang No. 3 BF under high rate of pellets[J]. Ironmaking,2021,40(4):29 – 32.

[23] 毛庆武,章启夫,李欣,等. 特大型高炉使用高比例球团矿技术研究及应用[J]. 炼铁,2020,39(6):1 – 6.
MAO Qingwu, ZHANG Qifu, LI Xin, et al. Study and application of high pellet rate technology in super-large sized BF[J]. Ironmaking,2020,39(6):1 – 6.

[24] 张旭升,何友国,曹树志. 唐钢新区 2 922 m^3 高炉高球比生产的操作制度[J]. 炼铁,2024,43(2):20 – 24.
ZHANG Xusheng, HE Youguo, CAO Shuzhi. Operating system of 2 922 m^3 BF under high rate of pellets in Tangshan steel new district[J]. Ironmaking, 2024, 43(2):20 – 24.

[25] 李朝旺,庞真丽,董国强,等. 唐钢熔剂性球团矿的开发研究及高炉高球比冶炼[J]. 炼铁,2023,42(6):60 – 64.
LI Chaowang, PANG Zhenli, DONG Guoqiang, et al. Technology development of Tangshan steel in fluxed pellets and smelting with high pellet rate in BF[J]. Ironmaking,2023,42(6):60 – 64.

[26] 张建良,刘征建,李克江,等. CaO 对球团矿还原行为及结构的影响[J]. 北京科技大学学报,2015,37(10):1261 – 1268.
ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, LI Kejiang, et al. Effect of CaO on reduction behavior and structure of iron ore pellets[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2015,37(10):1261 – 1268.

[27] 朱德庆,郭正启,李建,等. 高碱度烧结矿与酸性球团矿综合炉料的还原性能[J]. 钢铁研究学报,2010,22(5):1 – 5.
ZHU Deqing, GUO Zhengqi, LI Jian, et al. Reduction properties of complex burden composed of high basicity sinter and acid pellet[J]. Journal of Iron and Steel Research,2010,22(5):1 – 5.

(上接第 127 页)

XIE Yunqiang, ZHANG Zhongzhong, WANG Zihong, et al. Sintering basic characteristics of iron ores used in an iron and steel plant and optimum proportioning ores [J]. China Metallurgy,2018,28(3):9 – 15.

[20] 马辉,秦华伟. 铁矿石同化性能试验研究与配矿优化[J]. 烧结球团,2022,47(5):13 – 19.
MA Hui, QIN Huawei. Experimental research on assimilation performance of iron ore and ore matching optimization[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(5): 13 – 19.