不同富氧阶段下烧结矿的矿相结构及软熔滴落性能

刘 磊[1]，朱 旺[1]，赵俊花[1]，张志东[1]，单长冬[2]，刘征建[2]，王耀祖[2]，李思达[2]
（1. 北京首钢股份有限公司，河北 唐山 064099；2. 北京科技大学，北京 100083）

摘要：为了深入探究不同富氧阶段下烧结矿的矿物组成及冶金性能，本文采用 SEM-EDS 和荷重软化熔滴设备研究在烧结前、中、后期采用富氧喷吹时烧结矿的矿相结构和软熔性能的变化规律和影响机理。试验结果表明：烧结矿的矿物组成主要包括赤铁矿、磁铁矿、铁酸钙、镁尖晶石和硅酸盐液相等；SEM 观察和面扫结果表明，随着烧结过程富氧阶段的后移，SFCA（复合铁酸钙）的形态由板条状、针状向熔蚀状转变，与硅酸盐液相交织更加紧密，孔隙率下降，矿物结晶聚集性更强；XRD 精修结果表明，随着富氧阶段的后移，铁酸钙在含铁矿物中的占比由 76.04% 下降到 69.77%；不同富氧阶段得到烧结矿的软化开始温度（T_{10}）均在 1 180 ℃以上，软化区间为 99 ~ 103 ℃，熔融区间为 212 ~ 218 ℃，烧结矿的滴落质量从 75.5 g 变化为 73.0 g 最终升高到 78.6 g，滴落速度在后期达到最大值 0.85 g/min，原因是高熔点物质的减少和低熔点物质的形成；在烧结过程后期进行富氧喷吹时渣铁分离度高，铁的聚集性强，导致炉料的滴落性变强。

关键词：富氧烧结；矿相结构；铁酸钙；熔滴性能；滴落速度
中图分类号：TF046.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000 - 8764(2024)01 - 0065 - 07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.01.009

Mineral structure and softening dropping property of sinter under different oxygen-rich stages

LIU Lei[1], ZHU Wang[1], ZHAO Junhua[1], ZHANG Zhidong[1], SHAN Changdong[2], LIU Zhengjian[2], WANG Yaozu[2], LI Sida[2]
(1. Beijing Shougang Co., Ltd., Tangshan 064099, Hebei, China; 2. University of Science & Technology Beijing, 100083, Beijing, China)

Abstract: In order to deeply explore the mineral composition and metallurgical energy of sinter under different oxygen-rich stages, SEM-EDS and load-softening droplet equipment are used to study the change law and influence mechanism of the mineral structure and softening performance of sinter when oxygen-rich injection is used before, during and after the sintering process. The results show that the mineral composition of sinter mainly includes hematite, magnetite, calcium ferrite, magnesium spinel and silicate liquid phase. The results of SEM observation and surface scanning result show that, with the backward movement of the oxygen-rich stage in the sintering process, the type of SFCA (calcium ferrite complex) is changed from slat-like and needle-like to eroded, and it is more closely intertwined with the silicate liquid phase, the porosity decreases while and the mineral crystallization aggregation is stronger. The XRD refinement results show that the proportion of calcium ferrite in iron-bearing minerals is decreased from 76.04% to 69.77% with the backward movement of the oxygen-rich stage. The softening starting temperature (T_{10}) of the sinter obtained in different oxygen-rich stages is above 1 180 ℃, the softening interval is 99 ~ 103 ℃, the melting interval is 212 ~ 218 ℃, the dripping mass of the sinter is

收稿日期：2022 - 07 - 06；**修回日期：**2022 - 09 - 22
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52174291）
作者简介：刘 磊（1977—），男，高级工程师，从事铁矿烧结工艺技术方面的工作。
通信作者：刘征建（1981—），男，教授，从事炼铁原料、高炉炼铁、氢冶金方面的研究。

changed from 75.5 g to 73.0 g, and finally is increased to 78.6 g, and the dripping velocity reaches the maximum value of 0.85 g/min in the later stage, due to the decrease of high melting point and the formation of low melting point substances. In the later stage of the sintering process, the slag iron separation is high, and the iron aggregation is strong, resulting in a strong dripping of the charge.

Key words: oxygen-rich sintering, mineral structure, calcium ferrite, droplet properties, dripping velocity

铁矿烧结工序主要通过固体燃料燃烧提供热量，使铁矿石、熔剂、燃料和返矿熔化再结晶，最终获得强度和冶金性能优异的烧结矿熟料[1-2]。然而，烧结料层存在“自蓄热作用”，燃料的分布又难以做到“上多下少”，导致热量分布不均，表层烧结矿质量差，烧结矿产、质量受限[3-4]。而通过向烧结料面喷吹氧气可以促进固体燃料的燃烧，降低其消耗量，改善料层中局部的还原性气氛，以改善烧结过程中液相的生成和冷凝过程，提高烧结矿成品率和冶金性能[5]。

目前，对于铁矿富氧烧结研究已有大量的报道。LIU 等[6]采用烧结杯试验模拟了钒钛磁铁矿烧结过程中富氧时间、富氧负荷、点火温度等因素对烧结技术指标和烧结性能的影响，为富氧烧结各变量的选取提供了参考。RAJAK 等[7]采用坩埚烧结试验研究了顶部富氧对烧结过程和烧结矿指标的影响，发现顶层的时间温度曲线和烧结矿的 SFCA 相的变化规律，得到了最佳氧气喷吹体积分数。KANG 等[8]讨论了额外供氧与调整吹氧位置对烧结过程的影响，通过坩埚试验和烧结床模型计算的方法，探讨了烧结时间和有效供热量的变化程度与吹氧位置的关系。胡兵、黄克存、柳浩、韩凤光等[9-12]对铁矿富氧烧结进行了试验研究，主要观察富氧后烧结经济技术指标等的变化情况，结果表明：随着富氧时间的延长，垂直烧结速度、烧结利用系数、烧结矿成品率、烧结矿转鼓强度及还原性均逐渐增大，但会恶化烧结矿低温还原粉化性。国内攀钢、中天钢铁、梅钢、韶钢等单位[13-15]开展了富氧烧结工业试验研究，富氧烧结造成烧结料层中宏观氧化性气氛加强，使矿石中一部分 Fe_3O_4 氧化成 Fe_2O_3，导致烧结矿低温还原粉化指数下降 12.14%，富氧后引起烧结速度、烧结成品率、转鼓强度均有上升，返矿率、FeO 含量有所下降。目前，对于富氧烧结的研究集中在烧结矿技术指标和冶金性能最优的前提下得到最佳工艺参数，而关于不同富氧阶段下烧结矿的矿物组成和冶金性能方面的研究较少。

本文通过改变烧结过程中富氧喷吹的时机，分别在烧结前、中、后期向烧结料面喷吹氧气，并通过 SEM-EDS 研究不同富氧阶段下烧结矿的微观结构和矿物组成变化，进一步通过对 XRD 结果精修，以确定各含铁物相占比的变化规律，最后利用荷重软化装置研究烧结矿的熔滴性能，揭示不同富氧阶段下烧结矿矿相及冶金性能的变化规律，为优化富氧喷吹在烧结工艺中的使用提供理论基础和实践参照。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料与方案

烧结杯试验所用原(燃)料化学成分如表 1 所示，试验配矿方案如表 2 所示。试验燃料配比固定为 3.7%，烧结矿的二元碱度设定为 1.9。烧结杯试验过程中，点火负压和烧结负压分别控制为 8 kPa 和 12 kPa。设定烧结废气开始降温时为烧结过程完成。富氧烧结试验方案如表 3 所示。由表 3 可知：方案 1~3 选取氧气体积分数为 23%，方案 4~6 选取富氧率为 25%；设置 3 组富氧阶段：点火后立即开始喷吹、点火 10 min 后开始喷吹、点火 20 min 后开始喷吹；富氧喷吹时间全部为 10 min，富氧喷吹的方式为向料面喷吹氧气。富氧试验所得烧结矿的主要化学成分和性能指标如表 4 所示。荷重软化熔滴试验所使用的不同富氧阶段时烧结矿的粒度控制为 10.0~12.5 mm。

1.2 试验设备与检测方法

荷重软化熔滴试验设备为北京科技大学自制的熔滴炉，该装置示意如图 1 所示。试验将 500 g 烧结矿装入高度为 200 mm、内径为 95 mm 的石墨坩埚，并在烧结矿上、下层平铺 40 g 和 80 g 的焦炭，设置焦炭粒度为 10.0~12.5 mm。试验过程中，荷重设置为 1 kg/m^3，还原气体为 30% 的 CO

和 70% 的 N_2，升温速度和煤气成分模拟高炉生产条件(图 2)。使用环氧树脂对不同试验条件的烧结矿镶样后，进行磨样和抛光，采用 SEM-EDS 表征烧结矿的矿相结构。

表 1　试验所用原(燃)料的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1　Main chemical composition and burning loss of experimental materials　　%

原料名称	TFe	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	MnO	P	S	烧损
矿粉 A	66.40	29.00	0.22	6.23	0.58	0.42	0.06	0.03	0.08	-2.81
矿粉 B	61.14	0.56	0.10	3.84	0.07	2.13	0.25	0.19	0.07	5.65
矿粉 C	55.60	0.27	0.32	6.46	0.17	1.82	0.05	0.10	0.05	11.14
矿粉 D	60.82	0.44	0.04	3.16	0.10	2.43	0.12	0.17	0.12	6.59
矿粉 E	65.43	0.35	0.06	1.37	0.03	1.19	—	0.05	0.02	2.00
高炉返矿	56.71	—	9.66	5.04	1.68	—	—	—	—	2.00
烧结返矿	55.69	—	12.48	5.30	2.07	—	—	—	—	1.00
生石灰	—	—	78.07	3.07	6.40	—	—	—	—	8.45
石灰石粉	—	—	48.96	1.59	4.72	—	—	—	—	41.23
焦粉	—	—	0.57	6.46	0.15	4.71	—	—	0.05	84.62
煤粉	—	—	0.62	5.08	0.11	0.12	—	—	0.12	89.02

表 2　烧结杯试验配矿方案(质量分数)

Table 2　Experimental scheme of sintering　　%

铁矿石	返矿	洗末煤	焦粉	生石灰	石灰石
58.40	25.60	1.60	2.10	5.30	7.00

表 3　富氧烧结试验方案

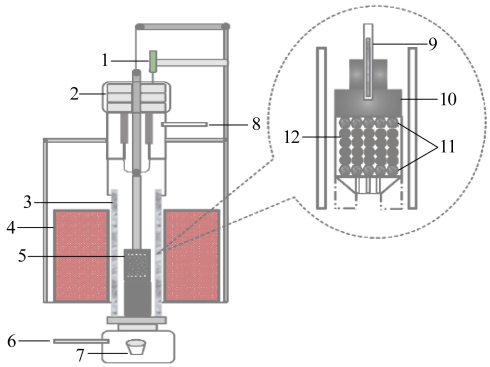
Table 3　Experimental scheme of oxygen-riched sintering

试验编号	氧气体积分数/%	富氧时间/min	富氧阶段	试验编号	氧气体积分数/%	富氧时间/min	富氧阶段
0#	21	0	无	4#	25	10	0 ~ 10 min(前期)
1#	23	10	0 ~ 10 min(前期)	5#	25	10	10 ~ 20 min(中期)
2#	23	10	10 ~ 20 min(中期)	6#	25	10	20 ~ 30 min(后期)
3#	23	10	20 ~ 30 min(后期)	7#	27	10	0 ~ 10 min(前期)

表 4　烧结矿的主要化学成分及性能指标

Table 4　Main chemical compositions and technical index of experimental materials

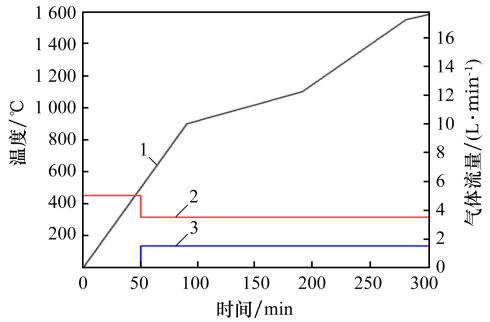
试验编号	化学成分(质量分数)/%						转鼓指数/%	还原度指数/%	碱度
	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	TiO_2			
0#	53.18	5.68	10.98	1.61	1.90	0.17	65.67	83.33	1.90
1#	53.39	5.75	11.07	1.53	1.91	0.18	69.90	88.28	1.92
2#	53.39	5.9	11.24	1.66	1.89	0.17	69.26	86.14	1.90
3#	53.35	5.68	11.00	1.68	1.91	0.16	66.55	83.85	1.94
4#	52.49	5.82	11.08	1.73	1.82	0.14	69.46	89.25	1.90
5#	53.38	5.57	10.60	1.55	1.88	0.15	66.78	88.57	1.90
6#	53.78	5.80	11.08	1.68	1.96	0.15	63.76	85.32	1.91
7#	53.68	5.80	11.21	1.65	1.97	0.15	62.77	84.32	1.93



1—位移计；2—荷重；3—刚玉管；4—Si_2Mo 加热器；5—石墨坩埚；6—进气口；7—滴落物；8—出气口；9—热电偶；10—活塞；11—焦炭；12—含铁炉料。

图 1 熔滴装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of melt-drop device



1—温度；2—N_2；3—CO。

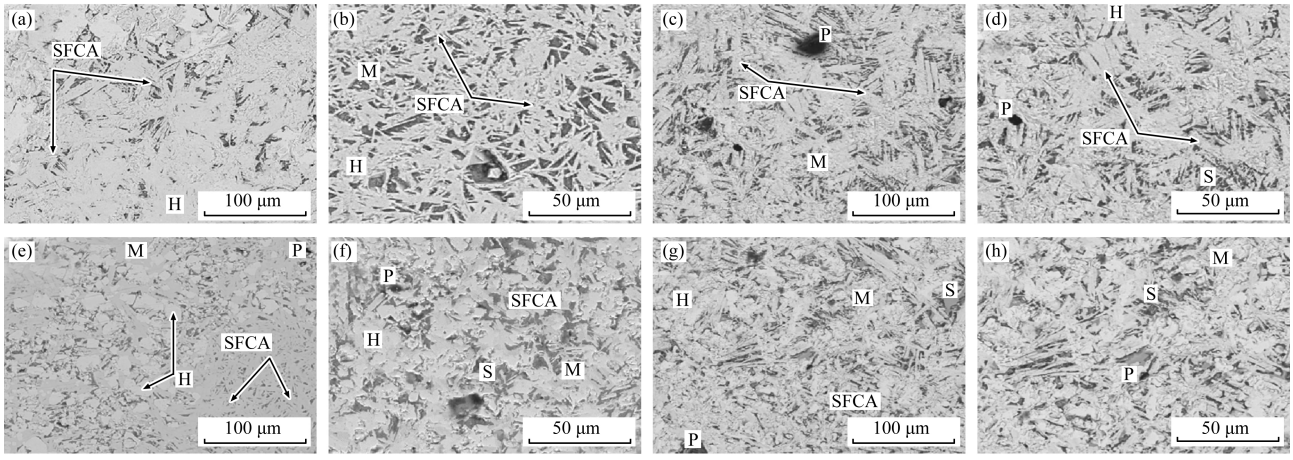
图 2 荷重软化熔滴试验升温制度和气体组分

Fig. 2 Temperature schedule and atmosphere condition for softening-melting test under load

2 试验结果与讨论

2.1 不同富氧阶段烧结矿的矿相结构

为了研究不同富氧阶段下烧结矿矿相结构的变化规律，本文通过扫描电子显微镜观察烧结矿的微观结构，结果如图 3 所示。由图 3 可知：基准组[图 3(a)、(b)]未富氧时，烧结矿主要的矿物组成包括赤铁矿、磁铁矿、铁酸钙、镁尖晶石和硅酸盐液相等；当在烧结前期进行富氧喷吹时，烧结矿中含有较多的磁铁矿、SFCA 和赤铁矿[图 3(c)、(d)]，且赤铁矿、磁铁矿和 SFCA 呈交织状，SFCA 形态规则，呈板条状，部分呈针状，分布不均匀，结晶粒度较粗，硅酸钙主要呈斑状，部分呈柳叶状，并与 SFCA 和磁铁矿形成相互交织结构[16]，此结构有利于烧结矿的强度和还原性；在烧结中期[图 3(e)、(f)]进行富氧喷吹时，因为料层的自蓄热作用使得烧结温度已经达到成矿的最佳条件，此时富氧喷吹导致温度进一步提升，铁酸盐液相的生成和流动进一步加剧，反应物界面进一步扩大，黏结相的质量分数增加，烧结矿化反应速度加快，导致板条状铁酸钙向交织－熔蚀状转变，气孔的数量减少[17]；此外，在烧结中期进行富氧喷吹可以看到板条状 SFCA 向熔蚀状转变的过程，图 3(f)中显示的矿相结构主要是交织－熔蚀结构；在烧结后期[图 3(g)、



(a)、(b)：未富氧烧结矿的矿相；(c)、(d)：烧结前期富氧的矿相；(e)、(f)：烧结中期富氧的矿相；(g)、(h)：烧结后期富氧的矿相

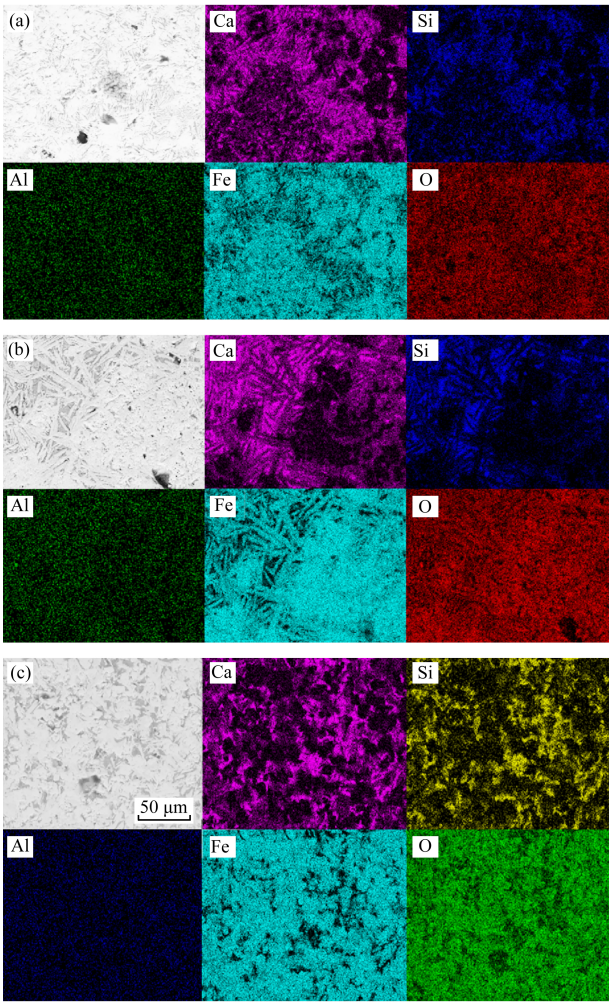
H—赤铁矿；M—磁铁矿；SFCA—铁酸钙；P—孔洞；S—硅酸盐矿物。

图 3 不同富氧阶段烧结矿的矿相结构

Fig. 3 Mineral phase structure of sinter at different oxygen enrichment stages

(h)]进行富氧喷吹时，烧结矿的孔洞基本消失，硅酸盐与 SFCA 相交织更加紧密，硅酸盐液相区域被分割成面积较小的部分，熔蚀状的 SFCA 代替了针状和板条状 SFCA，烧结矿的转鼓强度降低，还原度指数下降。

不同富氧阶段烧结矿的代表矿相结构的面扫结果如图 4 所示。图 4(a)为在烧结前期富氧喷吹时烧结矿的矿相以及各元素的面扫结果，由图 4(a)可知：Ca 元素和 Si 元素赋存形成硅酸盐结构，Fe 元素和 O 元素结合在一起，以赤铁矿和磁铁矿形式存在；在交织结构中出现针状 SFCA，Al 元素分散分布，且分布较为均匀。在烧结中期进行富氧喷吹时，出现板条状SFCA与硅酸盐交织结构，二者的交织结构与赤铁矿、磁铁矿之间出现明显的分隔[图 4(b)]。图 4(c)为在烧结后期进行富氧喷吹时烧结矿的矿相以及各元素的面扫结果，此时的 SFCA 的形态主要为熔蚀状，Al 元素相比之前出现了聚集现象，含铁矿物的分布面积显著增加。随着富氧阶段的后移，燃烧带温度提高，恶化料层透气性，针状 SFCA 的形成受到阻碍，生成的赤铁矿和磁铁矿呈熔融态的矿相增多，SFCA 呈熔蚀状，熔体的流动性显著增加，但烧结矿的强度和还原性受到影响[18]。



（a）烧结前期富氧矿物组成；（b）烧结中期富氧矿物组成；（c）烧结后期富氧矿物组成

图 4　不同富氧阶段烧结矿矿相面扫图

Fig. 4　Microstructure of sinters with different oxygen-rich stage

对烧结矿的 XRD 结果进行全谱拟合技术精修来确定不同烧结矿的矿物组成，其结果如表 5 所示。由表 5 可知：对于不同富氧阶段的烧结矿而言，其主要的矿相结构较为一致，含铁矿物主要是赤铁矿、磁铁矿、铁酸钙($CaO·2Fe_2O_3$)以及复合铁酸钙(SFCA)；随着富氧阶段的后移，Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 的含量逐渐增加，SFCA 的含量下降，在烧结后期进行富氧喷吹营造的氧化性气氛和烧结温度条件不利于 SFCA 的形成[19]。

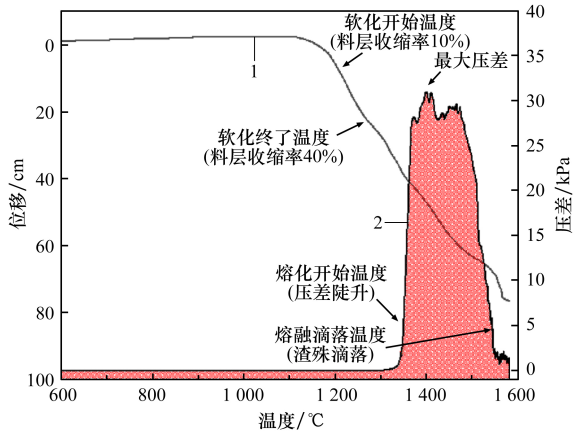
表 5　烧结矿中含铁物相占比(质量分数)

Table 5　Percentage of iron-bearing phases in sinter %

试验编号	Fe_2O_3	Fe_3O_4	$CaFe_4O_7$	$Ca_{2.8}Fe_{8.7}Al_{1.2}Si_{0.8}O_{20}$
4#	13.30	10.62	47.53	28.51
5#	16.56	9.75	57.56	16.09
6#	18.79	11.43	47.87	21.90

2.2　不同富氧阶段烧结矿的熔滴性能

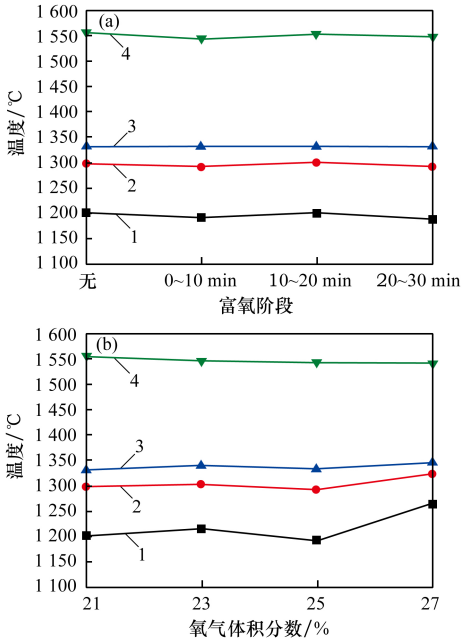
烧结矿的典型软熔曲线如图 5 所示。本文采用目前具有代表性的指标来表征炉料的软熔性能：T_{10}(软化开始温度)和 T_{40}(软化终了温度)为试样收缩率达到 10% 和 40% 时的温度；$T_{40}-T_{10}$ 为软化温度区间；T_s(熔化开始温度)为压差陡升温度；T_d(滴落温度)为 60 s 内滴落量达到 15 g 时的温度；T_d-T_s 为熔融区间。不同富氧阶段烧结矿的软熔性能如图 6 所示。由图 6 可以看出：各组烧结矿的 T_{10} 均在 1 180 ℃以上，比普通烧结矿高，这与烧结矿的碱度有直接关系[20]；不同富氧阶段下烧结矿的软化温度和熔融温度变化较小，3 组试验烧结矿的软化区间为 99 ~ 103 ℃，熔融区间为 212 ~ 218 ℃，烧结矿的软熔性能主要受化学成分(CaO、SiO_2、MgO、Al_2O_3)的影响。而烧结矿的



1—位移；2—压差。

图 5 烧结矿的典型软熔曲线

Fig. 5 Typical soft fusion curve of sinter



（a）不同富氧阶段；（b）不同富氧率

1—T_{10}；2—T_{40}；3—T_s；4—T_d。

图 6 不同富氧阶段及氧气体积分数下烧结矿的软熔性能

Fig. 6 Soft fusion properties of sinter at different oxygen enrichment stages

软化区间窄，熔融区间宽对于间接还原的发展是不利的[21]。随着氧气体积分数的提升，烧结矿的软化开始温度有提升的趋势，滴落温度下降，熔融区间整体变窄，有利于改善高炉软熔带的透气性。

不同富氧阶段烧结矿的滴落速度和滴落质量变化如图 7 所示。本文将从开始发生滴落现象到滴落温度时的总质量记为滴落质量，将滴落质量与所需要时间的比值记为滴落速度。随着烧结过程富氧阶段的后移，烧结矿的滴落质量从 75.5 g 变化为 73.0 g 最终升高到 78.6 g，滴落速度在后期达到最大值 0.85 g/min，原因可能是高熔点物质的减少和低熔点物质的形成，烧结过程后期富氧时渣铁分离度高，铁的聚集性强，导致炉料的滴落性变强，这方面的深层次原因还有待进一步的研究。

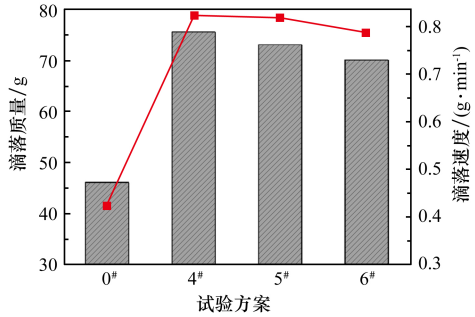


图 7 不同富氧阶段烧结矿的滴落性能

Fig. 7 Dripping performance of sinter at different oxygen enrichment stages

3 结 论

（1）烧结矿的矿物组成主要包括磁铁矿、赤铁矿、铁酸钙、硅酸盐相和镁尖晶石等。当在烧结前期进行富氧喷吹时，烧结矿中含有较多的针状和板条状铁酸钙，随着富氧阶段的后移，烧结矿的孔洞减少，铁酸钙主要以熔蚀状形态存在，硅酸盐聚集区域更分散，与含铁矿物交织紧密。

（2）对烧结矿的 XRD 结果进行全谱拟合技术精修确定含铁矿物的百分比。含铁矿物主要是赤铁矿、磁铁矿、铁酸钙（$CaO \cdot 2Fe_2O_3$）以及复合铁酸钙（SFCA）。随着富氧阶段的后移，Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 的含量逐渐增加，SFCA 的含量下降，烧结后期富氧营造的氧化性气氛和烧结温度条件不利于 SFCA 的形成。

（3）各组烧结矿的软化开始温度均在 1 180 ℃以上，不同富氧阶段下烧结矿的软化温度和熔融温度变化较小，烧结矿的软化区间为 99 ~ 103 ℃，熔融区间为 212 ~ 218 ℃，滴落速度在后期达到最大值 0.85 g/min，原因可能是高熔点物质的减少和低熔点物质的形成使得渣铁流动性变好，导致炉料的滴落速度加快。综上，在烧结前期进行富

氧喷吹时烧结矿的矿物组成较好，在后期进行富氧喷吹时烧结矿的软熔滴落速度较快。

参考文献：

[1] 周浩宇,王赛辉,甘敏,等. 铁矿烧结低热值点火富氧预热技术试验研究[J]. 工业炉,2021,43(2):1－5.
ZHOU Haoyu, WANG Saihui, GAN Min, et al. Experimental study on oxygen-rich preheating technology for low calorific value ignition of iron ore sintering[J]. Industrial Furnace,2021,43(2):1－5.

[2] 吴宏亮,罗云飞,周江虹,等. 富氧协同烟气循环对烧结矿质量指标和 CO 排放的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(4):1179－1188.
WU Hongliang, LUO Yunfei, ZHOU Jianghong, et al. Effect of oxygen-enriched synergistic flue gas circulation on quality index and CO emission of sintered ore[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition),2022,53(4):1179－1188.

[3] 叶恒棣,周浩宇,王业峰,等. 分层供热富氢烧结关键技术探索与研究[J]. 钢铁,2021,56(12):134－141.
YE Hengdi, ZHOU Haoyu, WANG Yefeng, et al. Exploration and research on key technology of stratified heating and hydrogen-rich sintering[J]. Iron & Steel, 2021,56(12):134－141.

[4] 张俊杰,裴元东,龙红明,等. 中天钢铁烧结富氧点火研究与应用[J]. 中国冶金,2021,31(8):54－59.
ZHANG Junjie, PEI Yuandong, LONG Hongming, et al. Research and application of oxygen-enriched ignition for sintering in Zhongtian iron and steel[J]. China Metallurgy, 2021,31(8):54－59.

[5] 王强,王玮,李强,等. 太钢低碳低排放烧结技术研究与应用[J]. 烧结球团,2022,47(1):104－111.
WANG Qiang, WANG Wei, LI Qiang, et al. Research and application of low carbon and low emission sintering technology of TISCO[J]. Sintering and Pelletizing,2022, 47(1):104－111.

[6] LIU H, QIN Y, WU X, et al. Experimental study on oxygen-enriched sintering of vanadium-titanium magnetite [J]. Journal of Chemistry,2018(6):1－9.

[7] RAJAK D K, BALLAL N B, VISWANATHAN N N, et al. Effect of oxygen enrichment on top layer sinter properties [J]. ISIJ International,2021,61(1):79－85.

[8] KANG H, CHOI S, YANG W, et al. Influence of oxygen supply in an iron ore sintering process[J]. ISIJ international,2011,51(7):1065－1071.

[9] 胡兵,黄柱成,姜涛,等. 铁矿石富氧烧结点火试验研究[J]. 钢铁研究学报,2010,22(12):17－21.
HU Bing, HUANG Zhucheng, JIANG Tao, et al. Experimental study of oxygen-rich sintering ignition of iron ore[J]. Journal of Iron and Steel Research,2010, 22(12):17－21.

[10] 黄克存,班友合,孟德礼,等. 富氧烧结试验研究[J]. 河北冶金,2013(11):1－4.
HUANG Kecun, BAN Youhe, MENG Deli, et al. Experimental study on oxygen-rich sintering[J]. Hebei Metallurgy,2013(11):1－4.

[11] 柳浩,秦跃林,万新. 高配比钒钛磁铁精粉富氧烧结试验研究[C]//2017 年全国高炉炼铁学术年会论文集(下). 昆明:中国金属学会,2017:9.
LIU Hao, QIN Yuelin, WAN Xin, et al. Experimental study on oxygen-rich sintering of high ratio vanadium-titanium magnetite fine powder[C]//Proceedings of the 2017 National Academic Conference on Blast Furnace Ironmaking(below). Kunming:Chinese Society for Metals, 2017:9.

[12] 韩凤光,刘佩秋. 铁矿石富氧烧结试验研究[J]. 上海有色金属,2014,35(2):66－70.
HAN Fengguang, LIU Peiqiu. Experimental study on oxygen-rich sintering of iron ore[J]. Shanghai Nonferrous Metals,2014,35(2):66－70.

[13] 郭玉盛. 富氧烧结试验[J]. 烧结球团,1992,17(1):16－19.
GUO Yusheng. Oxygen-rich sintering test[J]. Sintering and Pelletizing,1992,17(1):16－19.

[14] 吴宏亮,罗云飞,周江虹等. 富氧协同烟气循环对烧结矿质量指标和 CO 排放的影响[J]. 中南学学报(自然科学版),2022,53(4):1179－1188.
WU Hongliang, LUO Yunfei, ZHOU Jianghong, et al. Effects of oxygen enrichment and flue gas cycling on quality index and CO emission of sinter[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2022,53(4):1179－1188.

[15] 张铁梁,吴敏艳,唐新明,等. 韶钢 360 m^2 烧结机富氧烧结试验[J]. 烧结球团,2007,32(4):22－24.
ZHANG Tieliang, WU Minyan, TANG Xinming, et al. Oxygen- enriched sintering test of 360 m^2 sintering machine of Shaogang[J]. Sintering and Pelletizing, 2007,32(4):22－24.

（下转第 79 页）

Beijing,2002,24(3):258 – 261.

[10] 周东辉,孙挺,白丽群. 含硼添加剂改善烧结矿质量的实验研究[J]. 东北大学学报,2004,25(5):439 – 441.
ZHOU Donghui, SUN Ting, BAI Liqun. Experimental study on the improvement of sinter quality with boron additives[J]. Journal of Northeastern University,2004,25(5):439 – 441.

[11] 王英杰,高斌,韦火明,等. 硼粉对钒钛烧结矿质量影响的实验研究[C]//2012 年河北省炼铁技术暨学术年会论文集. 石家庄:河北省冶金学会,2012:63 – 65.
WANG Yingjie, GAO Bin, WEI Huoming, et al. Experimental study on the effect of boron concentrate on the quality of vanadium titanium sinter[C]//2012 Hebei Iron Making Technology and Academic Annual Conference Proceedings. Shijiazhuang:Hebei Metallurgical Society,2012:63 – 65.

[12] 郝德胜. 含硼复合添加剂对烧结矿性能和烧结的影响[D]. 沈阳:东北大学,2008:19 – 20.
HAO Desheng. Study on the experiment and mechanism of boracic complex additive to the sinter[D]. Shenyang: Northeastern University,2008:19 – 20.

(上接第 71 页)

[16] 陈霄,冯帅,刘小杰. 河钢烧结矿冶金性能和矿相的研究[J]. 四川冶金,2020,42(3):27 – 31.
CHEN Xiao, FENG Shuai, LIU Xiaojie. Study on the metallurgical properties and ore phases of HISCO sintered ore[J]. Sichuan Metallurgy,2020,42(3):27 – 31.

[17] 韩秀丽,司天航,刘盈盈,等. 不同含量 Al_2O_3 烧结矿矿相结构与 $RDI_{+3.15\ mm}$ 的定量关系[J]. 中国冶金,2022,32(2):34 – 38;59.
HAN Xiuli,SI Tianhang,LIU Yingying,et al. Quantitative relationship between the mineral phase structure and $RDI_{+3.15\ mm}$ for sintered ores with different Al_2O_3 contents [J]. China Metallurgy,2022,32(2):34 – 38;59.

[18] 承强,张建良,邵久刚,等. 炼钢污泥对烧结矿矿相结构及冶金性能的影响[J]. 烧结球团,2020,45(2):61 – 66.
CENG Qiang,ZHANG Jianliang,SHAO Yonggang,et al. Effect of steel sludge on the phase structure and metallurgical properties of sintered ore[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):61 – 66.

[19] 孟凡俭,孙长余,李廷乐,等. 烧结矿中复合铁酸钙形成影响因素[J]. 钢铁,2018,53(7):16 – 23.
MENG Fanjian, SUN Changyu, LI Tingle, et al. Factors influencing the formation of complex calcium ferrate in sintered ore[J]. Iron & Steel,2018,53(7):16 – 23.

[20] 辛红艳,高艳甲,时国松. 碱度对烧结矿软熔性能的影响[J]. 河北联合大学学报(自然科学版),2012,34(3):1 – 3.
XIN Hongyan, GAO Yanjia, SHI Guosong. Effect of alkalinity on the soft fusion properties of sintered ore [J]. Journal of Hebei Union University(Natural Science Edition),2012,34(3):1 – 3.

[21] 李廷乐,孙长余,汪琦. $w(MgO)$ 和 $w(Al_2O_3)$ 对混合炉料软熔性能的影响[J]. 钢铁,2019,54(4):12 – 18.
LI Tingle,SUN Changyu,WANG Qi. Effect of $w(MgO)$ and $w(Al_2O_3)$ on the soft melting properties of blended furnace charge[J]. Iron & Steel,2019,54(4):12 – 18.

2023 年度《烧结球团》优秀青年编委

《烧结球团》青年编委会是《烧结球团》编辑部的辅助办刊机构，在专家、作者、读者与编辑部之间发挥桥梁和纽带作用。青年编委会承担撰稿、组稿、审稿、专刊策划、宣传、学术会议等工作，协助编辑部不断提升期刊的学术水平和影响力。根据 2023 年度青年编委的投稿量、审稿量、年会参与以及期刊宣传等工作情况，评选出 12 位优秀青年编委。

2023 年度《烧结球团》优秀青年编委(按姓氏拼音排序)

春铁军　杜　胜　郭正启　季志云　刘卫星　魏汝飞　徐润生　杨本涛　杨聪聪　余正伟　周　密　周仙霖