高性能炉料

高富氧喷吹条件下钒钛炉料的软熔性能

郑 魁[1]，胡 鹏[1]，黄 云[2]，尉继勇[3]，赵 鹏[3]，张建良[3]，徐润生[3]
（1. 钒钛资源综合利用国家重点实验室，四川 攀枝花 617000；2. 攀钢集团西昌钢钒有限公司，四川 西昌 610053；3. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083）

摘要：高炉炼铁工艺是钢铁冶金中能源消耗量最高的流程之一。在国家“降碳减碳”政策的号召下，保证高炉稳定顺行是节能减排的重要前提。高炉软熔带的位置、形状对炉内煤气流的分布状态及高炉的稳定顺行具有重要影响。本文通过模拟高富氧喷吹条件下高炉的还原性气氛，在不同还原性气氛条件下采用高温熔滴炉进行钒钛炉料的软化熔滴试验。结果表明：随着富氧率的提高，煤气中 CO 的体积分数增加，钒钛炉料的软化开始温度和软化结束温度均降低，软化温度区间变大；当 CO 体积分数从 30% 增加到 45% 时，软化开始温度下降 72 ℃，软化结束温度下降 43 ℃，软化温度区间扩大 29 ℃。富氧喷吹后，熔化开始温度升高，炉渣流动性变好，滴落物质量增加；富氧喷吹后，钒钛炉料的软熔带整体呈现“上移扩大”的趋势，软熔带的最高压差逐渐降低，透气性得到改善，Ti 元素向渣中迁移增强，Fe 元素向渣中迁移得到抑制。

关键词：钒钛炉料；高炉；富氧喷吹；软熔性能
中图分类号：TF537 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)05－0017－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.070

Soft melt performance of vanadium titanium charge under high oxygen-enriched injection conditions

ZHENG Kui[1], HU Peng[1], HUANG Yun[2], YU Jiyong[3], ZHAO Peng[3], ZHANG Jianliang[3], XU Runsheng[3]
(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Pangang Group Xichang Steel Vanadium Co., Ltd., Xichang 610053, Sichuan, China; 3. School of Metallurgy and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The blast furnace ironmaking process is one of the most energy-consuming processes in iron and steel metallurgy. Under the call of the national policy of “carbon reduction and carbon reduction”, ensuring the stable and smooth operation of blast furnace is an important prerequisite for energy conservation and emission reduction. The position and shape of the blast furnace soft melt zone have an important impact on the distribution state of the gas flow in the furnace and the stable anterograde of the blast furnace. The reducing atmosphere of the blast furnace under high oxygen-enriched injection conditions is simulated, and the softening droplet test of vanadium and titanium charge is carried out by using a high-temperature droplet melting furnace under different reducing atmosphere conditions. The results show that with the increase of oxygen enrichment, the volume fraction of CO in coal gas increases, the softening start temperature and

收稿日期：2023－10－28；**修回日期**：2024－03－28
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52274316)；国家重点研发计划资助项目(2022YFE0208100)；新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A01003)；山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目(ZDJB08)；安徽省重点研究与开发计划资助项目(202210700037)；中国五矿集团有限公司科技专项计划项目(2021ZXD01)
作者简介：郑 魁(1988—)，男，高级工程师，从事钒钛矿冶炼及高效利用方面的研究工作。
通信作者：徐润生(1988—)，男，教授，从事高炉炼铁、低碳冶金等方面的研究。

softening end temperature of vanadium and titanium charge decrease, and the softening temperature range becomes larger. When the CO volume fraction is increased from 30% to 45%, the temperature at the beginning of softening is decreased by 72 ℃, the temperature at the end of softening is decreased by 43 ℃, and the softening temperature range is expanded by 29 ℃. After oxygen-enriched injection, the melting start temperature increases, the fluidity of the slag becomes better, and the quality of the dripping matter increases. After oxygen-enriched injection, the soft melt zone of vanadium and titanium charge shows a trend of "moving up and expanding", the maximum pressure difference of the soft melt belt gradually decreases, the air permeability is improved, the migration of Ti elements to the slag is enhanced, and the migration of Fe elements to the slag is inhibited.

Key words: vanadium titanium charge; blast furnace; oxygen-enriched injection; soft melt properties

由于国内矿石资源不足，我国钢铁生产所需铁矿主要来源于巴西和澳大利亚等境外矿山，铁矿原料的对外依存度长期在80%左右。目前钒钛磁铁矿已探明的储量超过100亿吨，是我国储量丰富的铁矿资源[1]，主要分布在四川攀枝花、河北承德和安徽马鞍山等地。其中，攀西地区的钒钛矿储量最丰富[2-3]。此外，钒钛烧结矿、球团矿等炼铁炉料富含Fe、V、Ti等多种有价元素，钒钛磁铁矿资源的充分利用对我国钢铁行业摆脱进口矿依赖、提高金属资源的利用率具有重要意义[4-5]。为了充分利用攀西地区的钒钛磁铁矿资源，冶金工作者们在90年代初起经过长期试验研究，攻克了高炉冶炼钒钛矿的工艺难关，为攀钢高炉的建设和投产奠定了基础。钒钛矿使用比例提高后，炉渣中TiO_2的含量提高，造成冶炼过程中更容易生成难熔化合物TiC、TiN或Ti(C,N)；此外，在提升钒钛矿利用价值的同时，也使炉渣的黏度升高、流动性变差，严重时会在炉缸形成堆积，造成炉况失常等弊端[6]。目前，攀钢对钒钛磁铁矿中钒钛资源的高效回收与高价值利用依然采用高炉冶炼，炉渣中TiO_2的质量分数一般为20%以上[7-8]。高炉内炉料的软化性能决定软熔带的位置和形状，软熔带对炉内煤气分布及还原行为具有重要影响，因此，明确炉料的软化熔滴特性对高炉顺行具有重要意义。

软熔带是高炉透气性最恶劣的区域，其透气性大小直接决定高炉冶炼效率和顺行情况。然而，钒钛炉料在高炉中发生高温还原反应时，当还原温度过高时，炉料中的TiO_2会发生过还原反应产生TiC、TiN或固溶体Ti(C,N)，导致钒钛炉渣发生泡沫化现象[9]。难熔化合物Ti(C,N)的熔点一般在3 000 ℃以上，在高炉冶炼过程中很难被熔化，其进入炉渣后会显著提高炉渣黏度，降低炉渣流动性[10]。同时，此类难熔化合物与炉渣互不相溶且密度接近，它们通常以几微米大小固体悬浮物的形态弥散分布在液态炉渣中，显著增大炉渣的黏度。Ti(C,N)等弥散在渣中的化合物还会对渣、焦界面起到润湿作用，渣铁与焦炭发生润湿作用后使得料层透气性变差，加之黏稠的炉渣与泡沫渣共同作用，进一步恶化了软熔滴落带的透气性，产生渣铁堵塞与液泛等现象。因此，钒钛炉料在高炉冶炼时由于脉石含量高、产生的炉渣量大，可能造成渣铁分离困难、滴落温度较高，导致软熔带透气性变差。

相关研究[11]表明，提高鼓风空气中的富氧率可以减少Ti(C,N)的生成，改善炉渣的黏度。因此，为了进一步提高钒钛矿资源的综合利用率和保障高炉的稳定顺行，本文通过模拟高富氧喷吹条件下高炉的煤气气氛，研究不同还原性气氛条件下钒钛炉料软化熔分性能的变化情况，得到富氧条件对高炉软熔带透气性的影响及炉料中V、Ti、Fe元素的迁移情况，研究结果可为提高钒钛矿资源利用率和钒钛高炉稳定顺行提供理论支持。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

高炉炉料结构中，烧结矿和球团矿的配比分别为64%和36%。试验所用钒钛烧结矿、球团矿和焦炭均取自攀钢某公司现场，试验原料性质如表1所示。由表1可知：烧结矿的TFe质量分数为50.53%、二元碱度为2.08；球团矿的TFe质量分数为53.16%、二元碱度为0.11。焦炭的CRI(焦炭反应后强度)和CSR(焦炭反应性)分别为24.20和66.35，Fe_2O_3质量分数为7.25%；焦炭

表 1　试验所用钒钛烧结矿、球团矿和焦炭灰分中的化学成分和碱度

Table 1　Chemical composition and basicity of vanadium-titanium sinter, pellets and coke ash used in the test

原料名称	化学成分(质量分数)/%											碱度
	TFe	FeO	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	TiO_2	K_2O	Na_2O	S	其他	
烧结矿	50.53	8.18	—	2.46	3.12	5.62	11.67	5.03	0.23	0.10	—	13.06	2.08
球团矿	53.16	2.54	—	3.42	3.96	5.48	0.60	9.65	0.08	0.07	—	21.04	0.11
焦炭	—	—	7.25	2.53	22.48	53.51	5.10	—	0.10	0.11	0.68	8.24	—

中 S 平均质量分数为 0.68%。焦炭中的 S 是高炉内 S 的主要来源之一，其用量应当严格控制，以降低高炉的 S 负荷，并减少脱硫工序的能源消耗。焦炭灰分中的 Al_2O_3、SiO_2 质量分数分别为 22.48%、53.51%。

1.2　试验方法

按照 64%烧结矿 +36%球团矿设置综合炉料，在石墨坩埚下部先装 80 g 焦炭压平，然后装混合后的综合炉料(烧结矿 320 g + 球团矿 180 g)压平，最后在坩埚上部装 40 g 焦炭。含铁炉料和焦炭的粒径均为 10.0 ~ 12.5 mm。

采用如图 1 所示的自制熔滴炉检测装置进行软化熔滴试验。试验流程：将石墨坩埚放入熔滴炉内进行加热，以 10 ℃/min 的升温速率将炉料加热至 900 ℃，然后以 3 ℃/min 的升温速率将炉料从 900 ℃加热至 1 100 ℃，再以 5 ℃/min 的升温速率将炉料从 1 100 ℃加热到 1 600 ℃；炉料中心温度从室温到 500 ℃的过程中通入 5 L/min 的保护氮气，500 ℃以后将保护氮气转变为还原性气体，待试验结束后关闭还原性气体继续通入 3 L/min 的保护氮气直至炉料冷却至 200 ℃以下。整个过程中通过采集系统自动记录炉料的中心温度、位移值和压差。试验过程中，采用改变还原性气体的成分来模拟高比例富氧喷吹条件下高炉炉内的气体氛围。试验前期，通过数值模拟研究得到不同富氧条件下高炉内的还原性气氛。具体还原性气体配比方案如表 2 所示。

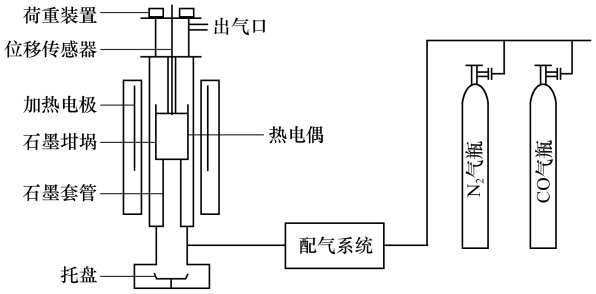


图 1　高温熔滴炉示意

Fig. 1　Diagram of a high-temperature droplet furnace

表 2　还原性气体配比方案

Table 2　Ratio scheme of reducing gas

CO 体积分数/%	30	33	35	38	40	43	45
N_2 体积分数/%	70	67	65	62	60	57	55

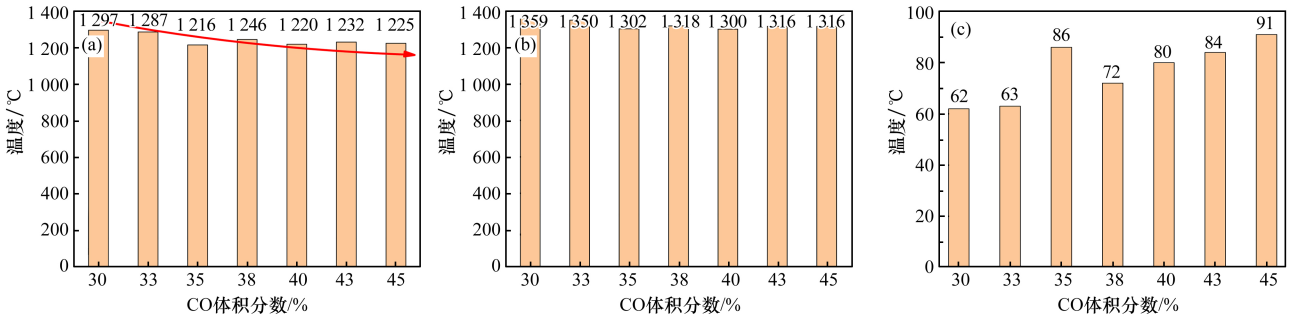
2　结果与讨论

2.1　软化性能

炉料的软化温度变化曲线如图 2 所示。由图 2 可见，随着气相还原性的提高，炉料的软化开始温度(T_{10})和软化结束温度(T_{40})呈现减小的趋势。由于 FeO 易与脉石相形成低熔点化合物[12-14]，炉料的软化性能主要取决于进入软熔带前含铁炉料中 FeO 的质量分数。随着气相还原性的提高，含铁炉料的还原度提高，促进了高价铁氧化物向 FeO 的转变，含铁炉料中 FeO 质量分数增加，因此，含铁炉料在较低的温度下形成了低熔点化合物，炉料的软化温度降低。在软化结束温度附近，炉料内已经开始大量形成金属铁，所以，随着还原性的提高，炉料软化结束温度的下降幅度变小。因此，随着还原性的提高，炉料的软化区间呈现增加的趋势[15]。

2.2　熔化性能

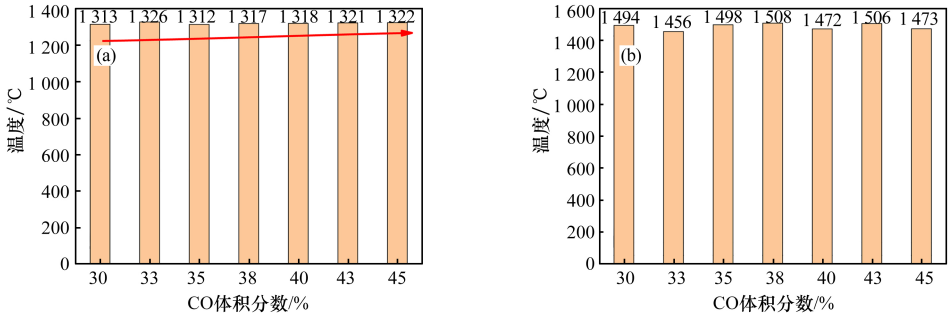
炉料熔化开始温度(T_s)的变化曲线如图 3(a)所示。炉料的熔化开始温度阶段是指当料层压力开始急剧上升时，炉料开始进入熔体的渗出阶段。料层压力上升是因为初渣和初铁中的铁相熔体冲破金属铁壳渗出的结果[16]。炉料熔化开始温度主要取决于炉渣的熔点和金属铁壳的强度[17]。由图 3(a)可以看出，随着气相还原性的提高，炉料的熔化开始温度逐渐升高。气相还原性提高，炉料的还原度增加。金属炉料的还原度越高，金属铁



（a）软化开始温度；（b）软化结束温度；（c）软化温度区间

图 2 炉料的软化温度的变化

Fig. 2 Change of softening temperature of furnace burden



（a）熔化开始温度；（b）滴落温度

图 3 炉料的熔化性能变化

Fig. 3 Melting performance change of furnace burden

壳厚度越厚，强度越高，熔体越不容易渗出，所以 T_s 增大。

炉料的滴落温度如图 3(b)所示。随着金属铁大量产生并聚集，渣铁开始逐渐分离。然而高黏度 Ti(C,N)的存在致使金属铁从炉渣中的分离受到抑制，因此部分金属铁被 Ti(C,N)所包裹，导致渣铁难分。Ti(C,N)的产生主要通过渣焦反应和渣铁反应(铁液中的溶解碳)两种方式产生。提高气相中 CO 体积分数后，N_2 体积分数减小，促进了钒钛矿的还原，抑制了 Ti(C,N)的生成[18]。所以，软熔区炉渣中 Ti(C,N)的生成量减少，炉渣黏度降低，渣铁分离变易，所以应该更易滴落。但就滴落温度的试验结果来看，其变化规律相对不明显。各组炉料的滴落物重量如表 3 所示。由表 3 可以看出，随着气相还原性的提高，滴落物的重量呈现上升的趋势。这主要是炉渣的流动性提高，渣铁分离效果变好，促进了渣铁的滴落。

整体来看，提高气相中 CO 体积分数后，高炉内炉料的软熔区间将呈现“上移扩大”的趋势。软熔区间在高炉内呈现扩大趋势的主要原因：① 还原反应的增强。CO 作为一种还原性气体，它与炉料中的氧化铁反应生成金属铁和二氧化碳。提高 CO 的体积分数会加快还原反应的速率，导致铁氧化物在较高位置上被更快还原为金属铁。这使得软熔带(即炉料开始软化并逐渐熔融的区域)提前形成，并向上移动。② 温度梯度的变化。高炉内部温度随高度的降低而升高。在 CO 体积分数提高的情况下，由于还原反应放热及反应加速，炉内温度分布可能发生改变，从而影响软熔带的位置。软化熔融的起始温度在更高的位置上达到，从而导致软熔区间的上移。③ 软熔区间的扩大。提高

表 3 各组炉料的滴落物重量

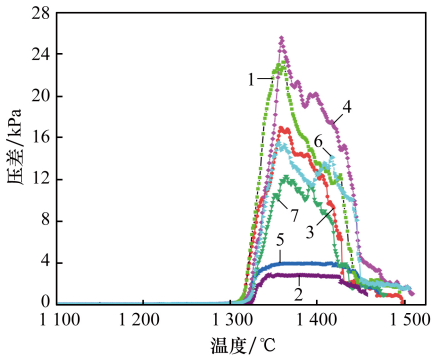
Table 3 Weight of droppings of furnace burdens in each group

CO 体积分数/%	滴落物重量/g	软熔温度/℃	CO 体积分数/%	滴落物重量/g	软熔温度/℃
30	103.1	197	40	157.0	252
33	183.0	169	43	234.1	274
35	204.0	282	45	178.0	248
38	211.1	262	—	—	—

CO 体积分数后，还原反应更迅速且更广泛地发生，使得炉料在更大的温度范围内经历软化和熔融过程。

2.3　软熔区透气性

炉料软化熔滴过程中的压差曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出，在不考虑试验误差的情况（如 CO 的体积分数分别为 33% 和 40% 时）下，随着气相还原性的提高，炉料软熔区的最高压差逐渐降低，表明软熔区的透气性和透液性逐渐有所改善，这主要与炉渣黏度有关。气相还原性提高后，Ti(C,N)的生成量减小，炉渣黏度减小，流动性得到改善，所以软熔区的透气性、透液性得到改善。同时，还原性气氛增强导致炉料在软熔区内的渣铁相分离更为彻底，渣和铁的流动性提高。良好的流动性使得液态渣铁更容易穿过料层，炉料层内的堵塞现象减轻，从而降低了气流通过软熔区时的阻力。除此之外，随着铁氧化物还原为金属铁，炉料的体积可能会发生收缩，料层的孔隙度增大，透气性得到改善。这使得气流更容易通过软熔区，降低了气体在该区域的流动阻力，进而使得压差减小。



CO 体积分数/%：1—30；2—33；3—35；4—38；5—40；6—43；7—45。

图 4　软熔过程的压差曲线

Fig. 4　Pressure difference curve of soft melting process

3　元素在渣、铁间的分布规律

采用荧光光谱分析法对滴落物中炉渣的化学成分进行检测，结果如表 4 所示。由表 4 可以看出：随着气相还原性的提高，炉渣中的 CaO 质量分数明显增加，SiO_2 质量分数略有增加，计算得到的炉渣碱度提高；此外，还可以观察到炉渣的含铁量逐渐降低，含钛量逐渐提高。这表明提高气相还原性，有利于高炉冶炼钒钛磁铁矿，促进铁氧化物的还原和渣铁分离，减小炉渣中的含铁量，并可以促进钒钛炉料中的 Ti 元素进入炉渣中，提高铁水质量。研究发现，炉渣中的 TiO_2 质量分数提高后，渣系的黏度会降低，炉渣流动性变好[19]。因此，富氧喷吹后，气相还原性提高，促进了 Ti 元素向渣中迁移，抑制了 Fe 元素向渣中迁移。

采用 X 射线衍射仪结合 Jade 软件分析软化熔滴试验过程中滴落物炉渣的物相组成，结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，钒钛炉料的滴落渣主要由钛酸钙（$CaTiO_3$）、硅酸二钙（Ca_2SiO_4）、铝酸三钙（$Ca_3Al_2O_6$）、辉石[$Ca(Mg,Al)Si_2O_6$]和 FeO 组成，其中 Ti 元素在炉渣中主要以 $CaTiO_3$ 的形式存在。

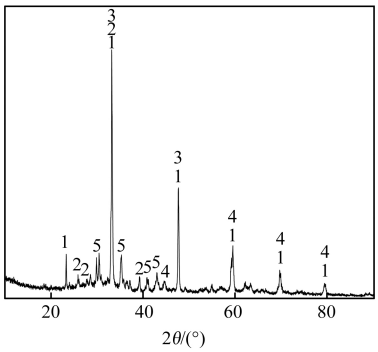
采用扫描电镜结合 EDS 能谱观察软化熔滴实验过程中的滴落物炉渣的微观形貌，结果如图 6 所示。由图 6 可见：钛酸钙呈条状大量分布在炉渣中，辉石分布在钛酸钙的周围，钛酸钙嵌布于辉石中，硅酸钙和铝酸三钙渣相也很明显地分布于渣中。

结合表 4、图 5 和图 6 可以看出：随着气相还原性的提高，炉渣中的 Ti 质量分数逐步上升，Fe 质量分数显著下降；同时，在滴落物炉渣的微观形貌中发现Ti元素主要以$CaTiO_3$的形式嵌布于辉

表 4　炉渣的主要化学成分（质量分数）

Table 4　Main chemical composition of slag　　%

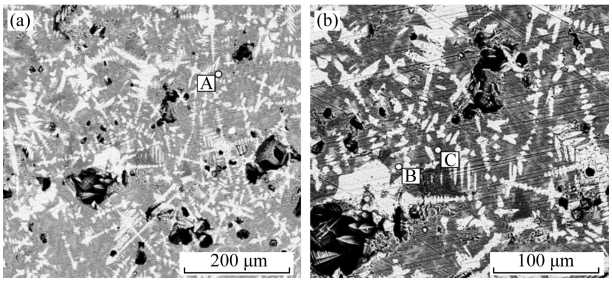
CO 体积分数	CaO	TiO_2	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	MnO	K_2O	Na_2O
30	26.349	23.166	19.203	11.995	8.175	7.663	1.449	0.352	0.287
35	27.937	24.209	20.408	11.917	4.285	8.553	1.512	0.316	0.277
40	27.494	24.109	19.735	11.563	5.841	8.465	1.627	0.334	0.293
43	27.571	24.609	19.725	11.447	4.887	8.940	1.697	0.321	0.285
45	28.699	25.228	19.980	11.741	2.321	9.503	1.611	0.251	0.253



1—$CaTiO_3$；2—Ca_2SiO_4；3—$Ca_3Al_2O_6$；
4—$Ca(Mg,Al)Si_2O_6$；5—FeO。

图 5 滴落物炉渣的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of dripping slag



放大倍数：(a) 500；(b) 1 000

A—钛酸钙($CaTiO_3$)；B—辉石[$Ca(Mg,Al)Si_2O_6$]；
C—硅酸二钙(Ca_2SiO_4)和铝酸三钙($Ca_3Al_2O_6$)

图 6 滴落物炉渣的微观形貌

Fig. 6 Microscopic morphology of dripping slag

石中。在软熔过程中，烧结矿中的钛赤铁矿、钛磁铁矿、钛铁晶石、钛铁矿、钛榴石等逐渐还原为金属铁，赋存于其中的 Ti、V、Mg、Al 等元素逐渐摆脱 Fe 的束缚向炉渣中迁移。

4 结 论

富氧喷吹会促进高炉风口回旋区煤粉的燃烧，减少高炉上升煤气流中 N_2 的体积分数，增加还原性气体中 CO 的体积分数。富氧喷吹对高炉软熔带的影响如下。

(1) 气相还原性提高后，炉料还原速率加快，导致在较低的温度下炉料收缩率达到 10% 和 40%。所以软化开始温度 T_{10} 和软化结束温度 T_{40} 均降低。因此，随着还原性的提高，炉料的软化区间呈现增大的趋势。

(2) 渣中 FeO 被还原成金属铁，导致渣熔点升高，熔体不易渗出，炉料的熔化开始温度呈现上升的趋势。炉渣流动性提高，渣铁分离效果变好，促进了渣铁的滴落，滴落物的重量呈现增加上升的趋势。

(3) 炉料的软熔带在高炉中呈现出“上移扩大”的趋势。高炉软熔带的透气性有所改善，最高压差逐渐减小。

(4) 气相还原性提高，促进 Ti 元素向渣中迁移，抑制 Fe 元素向渣中迁移。钒钛炉料的滴落渣主要由钛酸钙($CaTiO_3$)、硅酸二钙(Ca_2SiO_4)、铝酸三钙($Ca_3Al_2O_6$)、辉石[$Ca(Mg,Al)Si_2O_6$]组成。

参考文献：

[1] 邓国珠. 世界钛资源及其开发利用现状[J]. 钛工业进展,2002,19(5):9－12.
DENG Guozhu. Titanium resources in the world and its development and utilization status[J]. Titanium Industry Progress,2002,19(5):9－12.

[2] 邓青宇. 钒钛磁铁矿高炉冶炼过程中碳氮化钛形成条件与调控机制研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
DENG Qingyu. Research on formation of TiCN and regulation mechanism in blast furnace process treating vanadic titanomagnetite[D]. Chongqing: Chongqing University,2012.

[3] 杨文康,杨广庆,邢宏伟,等. 钒钛烧结矿与普通烧结矿软熔性能对比研究[J]. 钢铁钒钛,2017,38(4):118－122.
YANG Wenkang, YANG Guangqing, XING Hongwei, et al. Comparative study on softening-melting properties between vanadium titanium sinter and ordinary sinter[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2017,38(4):118－122.

[4] 李小松,杨广庆,杨文康,等. 攀钢钒钛烧结矿与莱钢普通烧结矿冶金性能对比研究[J]. 烧结球团,2018,43(1):10－14.
LI Xiaosong, YANG Guangqing, YANG Wenkang, et al. Comparative study on metallurgical properties between Pangang vanadium titanium sinter with Laigang ordinary sinter[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(1):10－14.

[5] 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 & Steel,2023,58(5):31 – 38.

[6] 王福佳. 高炉冶炼钒钛磁铁矿软熔滴落性质的研究[D]. 唐山:华北理工大学,2016.
WANG Fujia. Study on softening dropping property of V-Ti-burden in blast furnace[D]. Tangshan:North China University of Science and Technology,2016.

[7] 谢洪恩,胡鹏,郑魁,等. 钒钛烧结矿软熔滴落过程中的物相组成及化学成分变化规律研究[J]. 钢铁钒钛,2022,43(2):107 – 117.
XIE Hongen,HU Peng,ZHEN Kui,et al. Study on phase and chemical composition of V-Ti sinter during softening, melting and dripping process[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2022,43(2):107 – 117.

[8] 苏玉波. 高炉软熔带内矿焦耦合反应及熔滴特征的基础研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2023.
SU Yubo. Basic study on coupling reaction of ore and coke and droplet characteristics in soft melting zone of blast furnace[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning,2023.

[9] 邓朝枢. 从 0.8 m^3 高炉解剖看钒钛烧结矿在高炉内还原过程及其渣铁形成特点[J]. 四川冶金,1985(2):4 – 18.
DENG Chaoshu. From the 0.8 m^3 blast furnace dissection, the reduction process of vanadium titanium sinter in the blast furnace and the characteristics of its slag iron formation are observed[J]. Sichuan Metallurgy, 1985(2):4 – 18.

[10] 周凯. 钒钛炉料软熔性能及物相变化规律研究[D]. 重庆:重庆大学,2020.
ZHOU Kai. Study on softening-melting property and phase transformation of vanadium titanium burden[D]. Chongqing:Chongqing University,2020.

[11] 宋家齐. 变压条件下钒钛烧结矿的高温还原软熔行为研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
SONG Jiaqi. Study on the softening and melting behavior of vanadium-titanium sinter under variable load[D]. Chongqing:Chongqing University,2021.

[12] KAUSHIK P, FRUEHAN R J. Mixed burden softening and melting phenomena in blast furnace operation Part 3: Mechanism of burden interaction and melt exudation phenomenon [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2007, 34(1):10 – 22.

[13] KAUSHIK P, FRUEHAN R J. Mixed burden softening and melting phenomena in blast furnace operation Part 1: X-ray observation of ferrous burden[J]. Ironmaking & Steelmaking,2006,33(6):507 – 519.

[14] KAUSHIK P, FRUEHAN R J. Mixed burden softening and melting phenomena in blast furnace operation Part 2: Mechanism of softening and melting and impact on cohesive zone [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2006, 33(6):520 – 528.

[15] 王宏涛. 热压铁焦低碳高炉炼铁新炉料基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2019.
WANG Hongtao. Fundamental study on innovative burden of iron coke hot briquette aimed to low carbon blast furnace ironmaking[D]. Shenyang: Northeastern University,2019.

[16] YI L Y, HUANG Z C, JIANG T, et al. Iron ore pellet disintegration mechanism in simulated shaft furnace conditions[J]. Powder Technology,2017,317:89 – 94.

[17] 牛乐乐,刘征建,张建良,等. 鼓风条件及块矿比例对炉料软熔性能的影响[J]. 中国冶金,2019,29(7):6 – 12.
NIU Lele,LIU Zhengjian,ZHANG Jianliang,et al. Effect of blast conditions and lump ore ratio on softening-melting properties of iron-bearing charge[J]. China Metallurgy,2019,29(7):6 – 12.

[18] 赵伟. 钒钛磁铁矿含碳复合新炉料基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2019.
ZHAO Wei. Basic research on new carbon bearing composite charge of vanadium-titanium-magnetite[D]. Shenyang:Northeastern University,2019.

[19] 宋国才,苑天宇,陈小武. 高炉冶炼钒钛烧结矿软熔滴落带物相组成研究[J]. 钢铁钒钛,1996,17(2):25 – 27.
SONG Guocai, YUAN Tianyu, CHEN Xiaowu. Study on phase composition of the cohesive dropping zone in BF during smelting V-bearing titaniferous magnetite sinter [J]. Iron Steel Vanadium Titanium,1996,17(2):25 – 27.