

攀钢高炉不同炉料相互作用机理试验研究

谢洪恩, 朱凤湘, 胡 鹏, 郑 魁

(攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要:为探究攀钢高炉不同炉料在软熔过程中的相互作用机理,进行了单种原料及其混合矿软熔性能的测定以及由两种炉料组成的混合矿在特定温度软熔性能测定的中断试验。在试验条件下,块矿的滴落温度 T_d 最低。与球团矿相比,烧结矿的软化终了温度 T_{40} 低、滴落温度 T_d 高、软化温度区间 ΔT_s 窄、熔化温度区间 ΔT_m 宽。与烧结矿和球团矿相比,混合矿的滴落温度 T_d 明显降低。块矿软熔以后在荷重的作用下渗入烧结矿和球团矿的空隙间,促进其与烧结矿或球团矿中物相的相互侵蚀和元素在不同物相间的迁移,从而加速混合矿的软化熔融。

关键词:高炉; 炉料; 软熔性能; 相互作用

中图分类号: TF53

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)01-0119-10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.01.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Research on the interaction mechanism between different burden for blast furnace of Pangang

Xie Hong'en, Zhu Fengxiang, Hu Peng, Zheng Kui

(Pangang Group Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: In order to explore the interaction mechanism between different burdens in the softening-melting process of the blast furnace in Pangang, the softening-melting properties of different single burdens and their mixed burden were tested. Meanwhile, the interrupt experiment of softening-melting properties of the mixed burden by any two kinds of single burdens at a specific temperature was carried out. Under the experimental conditions, the dropping temperature T_d of lump ore is the lowest. Compared with the pellet, the sinter has a lower final softening temperature T_{40} , a higher dropping temperature T_d , a narrower softening temperature range ΔT_s , and a more comprehensive melting temperature range. Compared with the sinter and pellet, the dropping temperature T_d of mixed burden decreases. During softening and melting, the lump ore infiltrates into sinter or pellet under the action of load, conducive to the mutual erosion between lump ore and phases of the sinter or pellet as well as the migration of elements between different phases, thus promoting the softening and melting of mixed burden.

Key words: blast furnace, burden, softening-melting property, interaction

0 引言

软熔带是高炉内承上启下的重要区域,对煤气

流的分布、高炉的透气性等都有重要影响^[1-3]。炉料的软熔滴落性能是影响软熔带位置、高度和厚度的重要因素之一。在钢铁企业含铁原料种类和用量相

收稿日期: 2022-01-01

作者简介: 谢洪恩, 1977年出生,男,四川内江人,硕士研究生,研究方向: 钒钛矿高炉冶炼; E-mail: pzhxiehongen@163.com。

对稳定的条件下,炉料结构对混合矿的软熔性能有着决定性的影响。攀钢高炉以攀西地区钒钛磁铁矿为主要含铁原料生产的烧结矿和球团矿作为主要含铁炉料。攀西地区钒钛磁铁矿的 TiO_2 含量高,使得攀钢高炉炉料质量差、渣铁比高、炉渣 TiO_2 含量高,不仅料柱的透气透液性差,而且极易因 TiO_2 过量还原导致炉渣变稠甚至演变为顽固的炉缸堆积,因此攀钢高炉的冶炼难度极大,研究钒钛炉料及其混合矿的软熔性能对于指导攀钢高炉的生产意义重大。

已有的针对攀钢钒钛炉料软熔性能的研究结果表明^[4-20],钒钛烧结矿与钒钛球团矿的软熔性能与普通炉料区别明显,对于理解和指导攀钢高炉生产发挥了重要作用。但是,这些研究主要针对的是钒钛烧结矿或钒钛球团矿的软化温度、熔化温度、软化温度区间、熔化温度区间、软熔滴落特征值及其影响因素等^[4-12],或钒钛炉料的物相组成以及在还原过程中物相和有价元素定性的变化规律等^[13-20],对钒钛炉料之间及其与普通炉料之间的相互作用的研究却鲜见报道。在实际生产过程中,高炉炉料是由钒钛烧结矿、钒钛球团矿等多种炉料组成的混合矿,不同种类的炉料之间的相互作用使得混合矿的软熔性能明显不同于单种炉料。

使用普通块矿是攀钢高炉调节炉渣碱度和 TiO_2 含量的重要措施之一。但是,块矿使用比例高会使烧结矿 SiO_2 含量降低、 TiO_2 含量升高,导致烧结矿转鼓指数降低、烧结返矿率增加。其次,低品质块矿的化学成分波动大、有害元素高,不利于高炉的稳定顺行;而高品质块矿的价格很高,使高炉的原料成本显著增加。因此,块矿在攀钢高炉冶炼过程中的使用价值需要重新评估。

研究不同炉料之间的相互作用,对于攀钢优化高炉炉料结构、指导高炉生产更具实际意义。为此,以攀钢常用的钒钛烧结矿、钒钛球团矿和块矿为研究对象,进行了不同炉料之间相互作用机理的试验研究,以期提供更多的理论依据。

1 试验原料及方案

1.1 试验原料

试验所用烧结矿、球团矿、块矿和焦炭取自生产现场,化学成分见表 1、2。由表 1 可见,在这三种含铁炉料中,烧结矿的 CaO 、 FeO 含量和碱度高,球团矿的 TFe 、 MgO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 V_2O_5 含量高,块矿的 TFe 低, SiO_2 和 Al_2O_3 含量高、其主要作用是调节炉渣碱度和 TiO_2 含量。

表 1 试验原料的化学成分
Table 1 Chemical compositions of experimental burden

类别	$\text{TFe}/\%$	$\text{FeO}/\%$	$\text{SiO}_2/\%$	$\text{CaO}/\%$	$\text{MgO}/\%$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	$\text{TiO}_2/\%$	$\text{V}_2\text{O}_5/\%$	R_o
烧结矿	49.19	6.62	5.52	10.23	2.23	3.30		0.347	1.85
球团矿	52.75	3.86	5.52	0.72	3.61	4.04		0.671	0.13
块矿	40.88	1.03	26.66	0.93	0.84	6.64	0.21	0	0.03

表 2 焦炭的化学成分
Table 2 Chemical composition of experimental coke

F_{cad}	M_t	S_t	V_{daf}	A_d							合计
				K_2O	Na_2O	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	
85.88	0.23	0.63	1.09	0.08	0.10	0.49	7.24	0.13	3.73	1.03	12.80

1.2 试验设备及方案

参照国家标准《铁矿石高温荷重还原软熔滴落性能测定方法》(GB/T 34211-2017)测定含铁炉料的软熔性能,试验设备如图 1 所示。试验过程中自动记录石墨压头位移和料层压差随温度变化的曲线。以料柱收缩 10% 时的温度作为试样软化开始温度 T_{10} 、收缩 40% 时的温度作为试样软化终了温度 T_{40} ,

以压差为 0.98 kPa 时的温度作为熔化开始温度 T_s ,以滴落物质量达到 5.0 g 时的温度作为滴落温度 T_d ,以 T_{40} 和 T_{10} 之差为软化温度区间 ΔT_s ,以 T_d 和 T_s 之差为熔化温度区间 ΔT_m , ΔP_{max} 为软熔过程中料柱的最高压差,此时温度为 T_p ,以 T_d 对应的位移 t_d 和 T_s 对应的位移 t_s 之差为软熔带厚度 H ;以 ΔT_m 内压差对温度的积分值为软熔滴落特征值 S 。

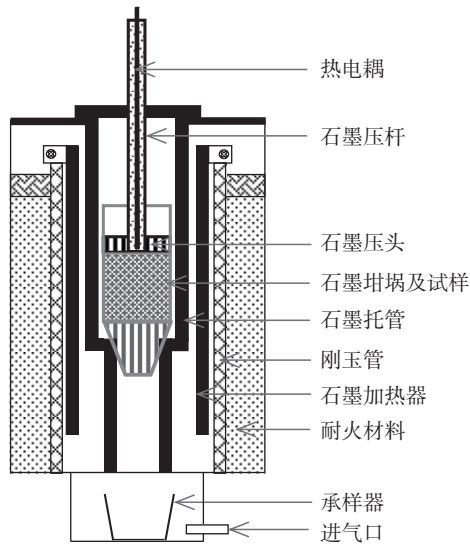


图 1 铁矿石软熔性能试验设备示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment for the softening-melting property of iron ore

依次将粒度为 10 ~ 12.5 mm 的焦炭 (高度约 20 mm)、矿石 (高度约 70 mm)、焦炭 (高度约 20 mm) 装入石墨坩埚中,通过石墨压杆和压头直接对上层焦炭施加 20 kg 的荷重。根据企业实际情况,在国标的基础上对测定过程中的升温速率、气体成分和流量等进行了调整,如表 3 所示。由表 3 可见,在 400 ~ 900 °C 时通入高纯 Ar 气作为惰性气体,在滴落温度 T_d 时断开电源停止升温,并用 Ar 气作为冷却气体直至温度降低至 400 °C 时结束试验。在 900 ~ 1 000 °C,由于高炉内炉料的升温通常较慢,升温速率为 3 °C/min; 1 000 °C 以后,升温速率提高至 6 °C/min。

根据软熔性能测定的结果,选择在适当的温度中断由不同单种炉料组成的混合矿的软熔性能测定,考察在此温度下不同炉料间的相互作用。

表 3 铁矿石软熔性能试验条件

Table 3 Experimental conditions for the softening-melting property of iron ore

温度范围/°C	升温速率/(°C·min ⁻¹)	气体成分/%			气体流量/(L·min ⁻¹)
		Ar	CO	N ₂	
0 ~ 400	6	0	0	0	3
400 ~ 900	7	100	0	0	3
900 ~ 1 000	3	0	30	70	10
1 000 ~ 终点	6	0	30	70	10
终点后		100	0	0	3

2 试验结果

2.1 不同炉料的软熔性能

不同单种炉料以及由 72% 烧结矿、25% 球团

矿和 3% 块矿组成的混合矿的软熔性能测定结果见表 4,其相应的位移和压差随温度变化的曲线见图 2。

表 4 不同原料软熔性能

Table 4 Softening-melting properties of different burdens

样品名称	$T_{10}/^{\circ}\text{C}$	$T_{40}/^{\circ}\text{C}$	$T_s/^{\circ}\text{C}$	$T_p/^{\circ}\text{C}$	$T_d/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_s/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_p/^{\circ}\text{C}$	$\Delta P_{\max}/\text{kPa}$	H/mm	$S/(\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C})$
烧结矿	1 092	1 158	1 191	1 227	1 488	66	297	21.52	38.63	3 340
球团矿	1 055	1 181	1 214	1 280	1 442	126	228	18.83	33.77	2 213
块矿	1 072	1 141	1 114	1 138	1 165	69	54	2.57	15.78	119
混合矿	1 075	1 138	1 183	1 225	1 390	63	207	20.43	35.79	2 140

由表 4 可见,不同原料的软熔滴落温度差别很大。与球团矿相比,烧结矿的软化终了温度 T_{40} 低,滴落温度 T_d 高,相应的软化温度区间 ΔT_s 窄,熔化温度区间 ΔT_m 宽。普通块矿在软化后迅速熔化,在其料层收缩率尚未达到 40% 时压差已迅速升高,其

熔化开始温度 T_s 低于软化终了温度 T_{40} ,滴落温度 T_d 也仅比 T_{40} 高 24 °C,软熔滴落特征值只有 119 kPa·°C。由图 2 可见,烧结矿和混合矿在约 1 200 °C 以后位移增大变缓,在熔化过程的最后阶段又迅速增大。而球团矿和块矿在软化开始以后,其料层的位移随

着温度升高而增大的速率变化不明显。

与烧结矿和球团矿相比,混合矿的滴落温度 T_d 低,熔化温度区间 ΔT_m 窄。由此可知,在软熔过

程中不同炉料间的相互作用促进了混合矿的熔化,使混合矿的软熔性能影响明显不同于烧结矿和球团矿。

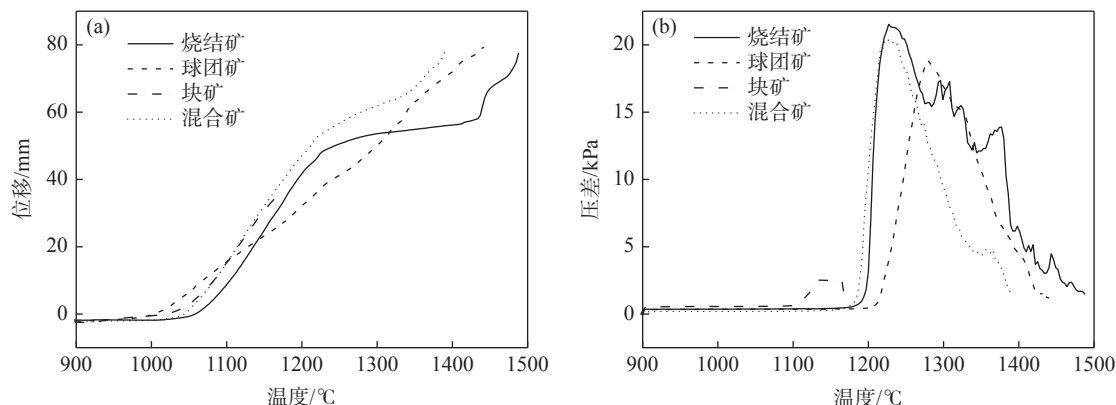


图 2 不同原料的位移和压差随温度变化的曲线
Fig. 2 Contraction curves and pressure drop curves for different temperature

2.2 不同炉料相互作用

为进一步探究软熔过程中不同单种炉料间的相互作用,揭示其对混合矿软熔性能的影响机理,分别进行了由烧结矿和块矿、烧结矿和球团矿、球团矿和块矿两种单种炉料组成的混合矿软熔性能测定中断试验,试验方法如 1.2 所示。为便于观察两种炉料间的相互作用,将单种炉料分层装入石墨坩埚内,块矿置于烧结矿或球团矿的下方,球团矿置于烧结矿下方,每种炉料的质量均为 250 g。根据表 4 中软熔性能测定的结果,设定在 1 200 °C 中断软熔性能测定。

试验样品冷却后,其宏观形貌如图 3~5 所示。由图 3~5 可见,在 1 200 °C 时,由烧结矿和块矿组成的混合矿的软熔料层明显变薄,有部分炉料从石墨压头上渗出形成液泛炉料;由烧结矿和球团矿组成的混合矿粘结在一起,底部和周围明显可见金属铁;由球团矿和块矿组成的混合矿的软熔料层变薄,并有液泛炉料从石墨压头上渗出。

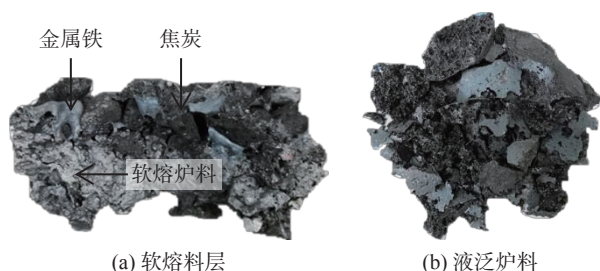


图 3 烧结矿与块矿试验样品形貌
Fig. 3 Morphologies of the sinter and lump ore mixed ore specimens

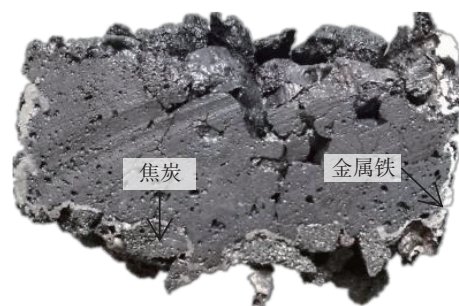


图 4 烧结矿与球团矿的混合矿试验样品形貌
Fig. 4 The morphology of the sinter and pellet mixed ore specimen

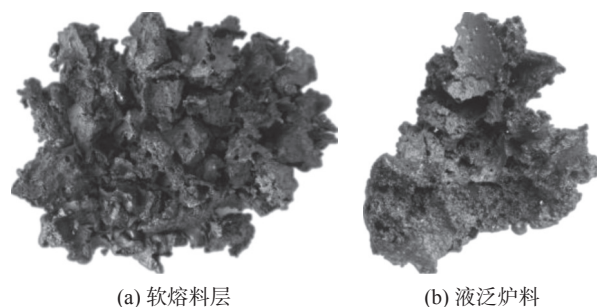


图 5 球团矿与块矿试验样品形貌
Fig. 5 Morphologies of the pellet and lump ore mixed ore specimens

图 3~5 中试验样品的化学成分见表 5。表 5 中烧+块 I 表示烧结矿与块矿组成的混合矿的软熔料层,烧+块 II 为其液泛炉料,球团矿与块矿组成的混合矿的样品编号意义与此类同。

由表 5 可见,无论是由烧结矿与块矿还是球团矿与块矿组成的混合矿,液泛炉料的 TFe 均比较熔料层的 TFe 低,而 CaO 和 SiO₂ 含量则更高,在此温

度下未发现有 TiC 和 TiN 生成。如只考虑 CaO、SiO₂、MgO、Al₂O₃ 和 TiO₂ 这五种主要的造渣组分, 它们的相对含量如表 6 所示。由表 6 可见, 液泛炉料的 MgO、Al₂O₃ 和 TiO₂ 的含量比软熔炉料的低, 可见其中更多的炉料来自于块矿, 而软熔料层中更

多的炉料来自于烧结矿或球团矿。由此可知, 在软熔过程中, 荷重使先软熔的块矿向上运动, 并吸收了烧结矿或球团矿的成分, 在促进这两种炉料相互作用的同时, 使新形成的软熔混合料脱离料层, 从石墨压头上渗出。

表 5 软熔炉料的化学成分
Table 5 Chemical compositions of different experimental samples

样品编号	TFe/%	FeO/%	MFe/%	CaO/%	SiO ₂ /%	MgO/%	Al ₂ O ₃ /%	TiO ₂ /%	TiC/%	TiN/%	R ₂
烧+块 I	59.00	61.75	7.50	4.90	9.41	2.38	3.39	4.32	<0.1	<0.01	0.52
烧+块 II	33.15	33.06	7.10	14.39	27.26	2.77	7.50	5.82	<0.1	<0.01	0.53
烧+球	49.76	41.39	17.57	8.15	8.00	4.21	5.55	12.57	<0.1	<0.01	0.98
球+块 I	52.88	55.87	5.70	1.50	12.89	3.04	4.85	9.00	<0.1	<0.01	0.10
球+块 II	41.50	46.83	4.60	2.61	26.00	3.56	6.50	7.07	<0.1	<0.01	0.12

表 6 软熔炉料造渣组分的相对含量
Table 6 Relative contents of the main slagging compositions of different experimental samples %

样品编号	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂
烧+块 I	20.08	38.57	9.75	13.89	17.70
烧+块 II	24.92	47.21	4.80	12.99	10.08
球+块 I	4.80	41.21	9.72	15.51	28.77
球+块 II	5.71	56.84	7.78	14.21	15.46

3 分析及讨论

3.1 炉料熔滴性能分析

不同含铁炉料的物相组成不同是导致它们软熔滴落性能差别的主要原因。图 6 为烧结矿和球团矿的扫描电镜图片 (FEI Quanta 650FEG 扫描电镜)。由图 6 可见, 烧结矿的主要物相是钛赤铁矿和钛磁铁矿; 造渣物相除了高熔点的钙钛矿外, 还有较多的玻璃相、铁酸钙等 SiO₂ 含量较高、熔点较低的物相, 这些物相在软熔过程中较易软化熔融, 在上部荷重的作用下被挤出料层, 而不易变形的物相留在料层

中, 使料层位移在较长时间内变化不明显。球团矿的主要物相是钛赤铁矿和钛铁矿, 主要造渣物相是其数量较少而且还原性能较差的橄榄石和斜长石等, 料层的变形主要依赖于含钛的铁氧化物的还原进度。由于 TiO₂ 限制了球团矿中铁氧化物的还原, 且 CaO 含量低使其不足以形成大量玻璃相等低熔点的物相, 因此其料层位移在软熔过程中的增大幅度没有显著变化。块矿的还原性能较差, 其中的 Fe³⁺ 迅速被还原为 Fe²⁺ 后与 SiO₂ 形成大量低熔点的铁橄榄石, 使得整个料层的流动性显著改善, 大量 FeO 未及时还原就滴落了。

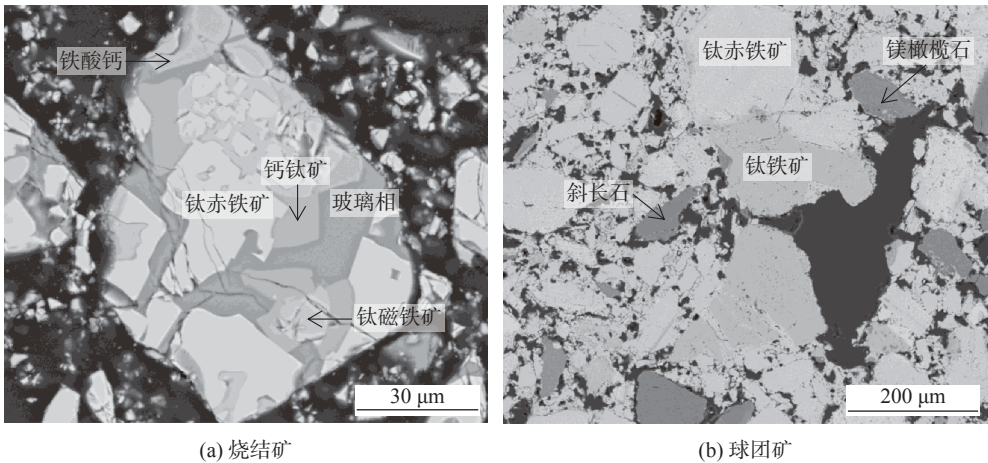


图 6 烧结矿和球团矿的扫描电镜照片
Fig. 6 SEM images of sinter and pellet

混合矿中以烧结矿居多,因此其料层的位移和压差的变化规律在很大程度上受烧结矿的影响。但是,由于不同炉料间的相互作用促进了烧结矿和球团矿的软化熔融,使得混合矿的软熔性能又与烧结矿有较为明显的区别。

3.2 炉料相互作用机理

1) 烧结矿和块矿的相互作用

图 7 为烧结矿和块矿组成的混合矿的扫描电镜照片,表 7 为其微区能谱分析。从图 7 可以观察到橄榄石镶嵌于钛磁铁矿和钛铁晶石的晶粒的空隙间,未发现烧结矿中常见的钙钛矿。表 7 中橄榄石的 Ti 和 V 的含量均较高且 Ca 含量超过了 Si 含量,而普通块矿中橄榄石不含 Ti 和 V 且 Ca 含量远低于 Si 含量。在烧结矿单独还原过程中,钛赤铁矿和钛磁铁矿逐渐还原为钛磁铁矿、钛铁晶石和金属铁^[7-8],但钙钛矿不会消失,也不会出现普通块矿中常见的橄榄石。这些现象证明烧结矿和块矿之间强烈的相互作用。在软熔过程中,块矿明显早于烧结矿软化

和熔融,在荷重的作用下渗入烧结矿的空隙间,促进了二者之间的相互作用。化学成分是不同炉料相互作用最重要的驱动力^[21],如表 1 所示,块矿的化学成分与烧结矿差别明显,熔化后渗入烧结矿中,侵蚀其中的钙钛矿、玻璃相、铁酸钙等物相,使这些物相消失,而橄榄石的 Ca、Ti 和 V 含量则升高。

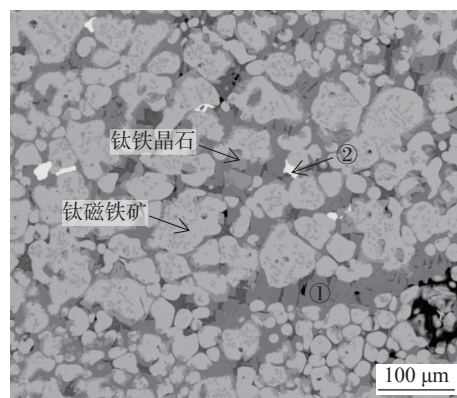


图 7 烧结矿和块矿相互作用的扫描电镜照片
Fig. 7 SEM images of sinter and lump ore mixed ore

表 7 烧结矿和块矿相互作用的微区能谱分析
Table 7 EDS analysis result of sinter and lump ore mixed ore

物相编号	物相名称	O	Mg	Al	Ca	Si	Ti	V	Mn	C	Fe
①	钙铁橄榄石	41.8	3.66	0.32	13.68	16.70	0.46	0.21	0.78		22.39
②	金属铁					0.97	1.18	0.67		3.93	93.25

2) 烧结矿和球团矿的相互作用

图 8 为烧结矿和球团矿组成的混合矿的扫描电镜照片,表 8 为其微区能谱分析 (Zeiss Sigma 500 扫描电镜)。由图 8 可以观察到,在 1 200 °C 时这两种炉料在微观上存在明显的界限。在扫描电镜所示的区域内,既有钛赤铁矿也有磁铁矿。钛赤铁矿为球团矿中的物相,磁铁矿为烧结矿中的物相。在烧结矿一侧可以观察到钙钛矿,在两种炉料的界面处的橄榄石中 Ca 含量高于 Si 含量。在远离两种炉料界面的区域,在烧结矿中可以观察到钛磁铁矿晶粒间的钙钛矿。由此可见,在 1 200 °C 时,这两种炉料只在直接接触的区域及其附近发生了相互作用,在远离界面的区域,炉料仍按单独软熔时的方式还原,烧结矿和球团矿之间远不如烧结矿与块矿之间的相互作用强烈。虽然烧结矿和球团矿的化学成分特别是 CaO 含量相差较大,但这两种炉料的软化温度都较高,而且在熔化初期没有块矿形成的流动性较好

的熔体,因此在熔化初期二者之间的接触条件远不如烧结矿与块矿好。可以预测的是,随着温度升高和还原反应的进行,铁氧化物逐渐被还原为金属铁,液相的流动性变好,熔化的炉料之间的接触条件和传质条件改善,这两种炉料间的相互作用会逐渐增强,使混合矿的滴落温度明显低于单种烧结矿或球团矿。

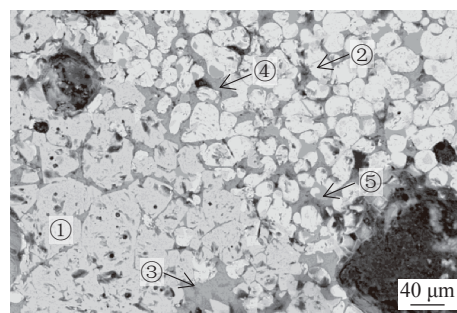


图 8 烧结矿与球团矿相互作用的扫描电镜图片
Fig. 8 SEM photoes of sinter and pellet mixed ore

表 8 烧结矿与球团矿相互作用的微区能谱分析
Table 8 EDS analysis result of sinter and pellet mixed ore

物相编号	物相名称	O	Si	Ca	Mg	Al	Ti	V	Fe
①	钛赤铁矿	21.34			1.69	3.09	8.44	0.90	64.55
②	磁铁矿	19.62			1.27				79.11
③	橄榄石	30.67	12.65	29.40	2.97				24.31
④	橄榄石	30.69	12.61	31.16	3.45				21.64
⑤	钙钛矿	30.28	0.59	31.45		0.60	31.55		5.53

3) 球团矿和块矿的相互作用

图 9 为球团矿和块矿组成的混合矿的扫描电镜照片, 表 9 为其微区能谱分析。在图 9 中球团矿和块矿间未观察到如烧结矿和球团矿那样明显的界限。球团矿中的钛赤铁矿被还原为钛磁铁矿和浮氏体, 有的钛磁铁矿尚未开始还原, 有的则已还原为浮氏体, 钛磁铁矿中的 Ti 和 V 的含量明显比浮氏体高。未发现球团矿中常见的钛铁矿, 却有大量的橄榄石以及少量钙铁辉石和玻璃相存在, 铁橄榄石成为最主要的造渣物相且大量存在于软熔炉料中。由此可知, 在软熔过程中, 块矿软熔后渗入球团矿的空隙间, 吸收脱离钛赤铁矿和钛磁铁矿束缚的 Ti 和 V, 在冷却后形成含 Ti 和 V 的橄榄石、钙铁辉石和玻璃相。上部荷重加剧了这种相互作用的进行; 其次在本试

验条件下块矿和球团矿各占 50%; 因此, 在扫描电镜下可以观察到大量的铁橄榄石等造渣物相。

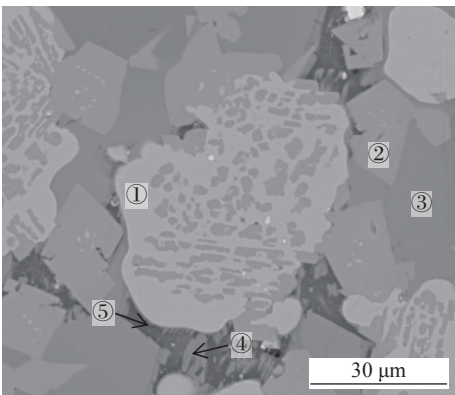


图 9 球团矿与块矿相互作用的扫描电镜图片
Fig. 9 SEM photoes of pellet and lump ore mixed ore

表 9 球团矿与块矿相互作用的微区能谱分析
Table 9 EDS analysis result of pellet and lump ore mixed ore

物相编号	物相名称	O	Si	Ca	Mg	Al	Ti	V	K	Na	Fe
①	浮氏体	16.96					2.11	0.92			80.01
②	钛磁铁矿	20.46			2.66	6.72	13.99	1.91			54.26
③	铁橄榄石	24.10	18.05		7.11	1.32	1.43	0.90			47.09
④	钙铁辉石	25.43	17.85	11.24	3.09	3.38	1.24	0.89	3.22		33.66
⑤	玻璃相	29.44	23.26	4.40		14.27	1.80	0.70	10.38	4.64	11.11

球团矿和普通块矿的 CaO 含量极低, 没有足够的 CaO 参与对 TiO₂ 的争夺以形成钙钛矿^[20]。另一方面, 球团矿中钛赤铁矿和钛铁矿的 Ti 含量高, 但 Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄ 对 Ti 的束缚作用强, 在铁氧化物未被还原时, 大量 Ti 仍被束缚于铁氧化物中, 因此钛磁铁矿的 Ti 含量很高, 浮氏体中的 Ti 含量也达到 2.0% 以上。因此在熔化初期, 只有少部分 Ti 在铁氧化物被还时进入造渣物相。而渗入球团矿中的块矿熔体增加了混合矿中酸性造渣物相的数量, 通过增加熔化过程中液相量使混合矿的熔化温度降低。

4) 荷重对相互作用的影响

为了探究荷重对炉料在软熔过程中行为的影响, 分别进行了烧结矿与块矿以及球团矿与块矿在无荷重的作用的软熔性能中断试验, 中断温度 1 200 ℃, 烧结矿和球团矿均置于块矿之上。冷却后的样品如图 10、11 所示。由图可见, 在无荷重的作用下, 在 1 200 ℃ 时, 仍有部分烧结矿和球团矿保持较为完整的颗粒状; 下层的块矿已经熔化但并没有渗入上层炉料中, 只在与上层炉料接触的地方粘结在一起。

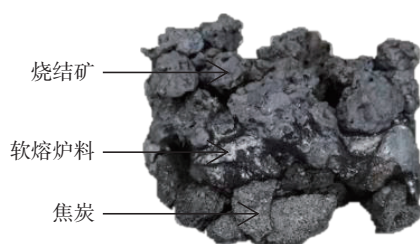


图 10 无荷重条件下烧结矿与块矿的软熔炉料

Fig. 10 Melting mixed ore of sinter and lump ore without load

试验样品的扫描电镜图片见图 12、13, 相应的微区成分分析见表 10、11。由图 12(a) 和表 10 可见, 在无荷重时, 在烧结矿和块矿之间可见明显的界面, 在靠近界面块矿一侧的铁橄榄石和浮氏体中已有少量 Ti 和 V, 铁橄榄石中 Ca 的含量远低于 Si 的

含量, 明显不同于图 6 中橄榄石的 Ca 含量与 Si 接近的情况。如图 12(b) 所示, 在两种炉料相互作用较为发展的区域, 可见大量橄榄石分布于钛磁铁矿和钛铁晶石之间。

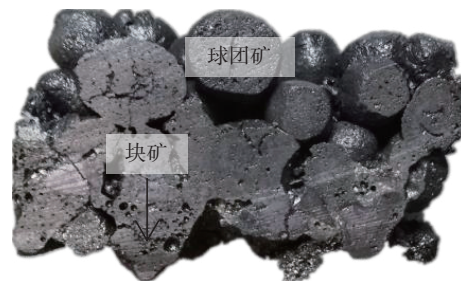
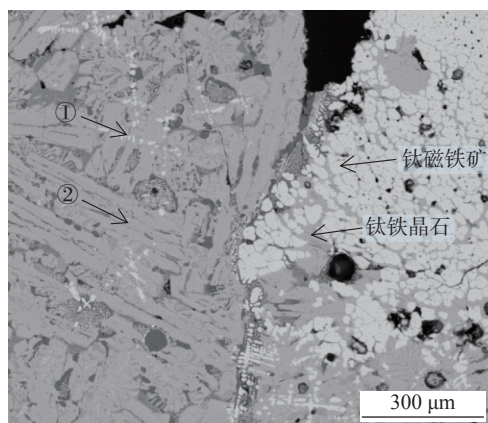
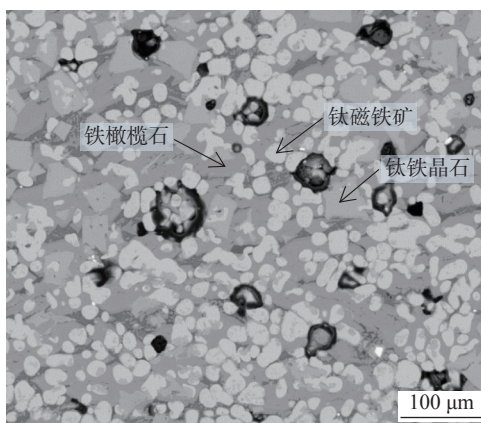


图 11 无荷重条件下球团矿与块矿的软熔炉料

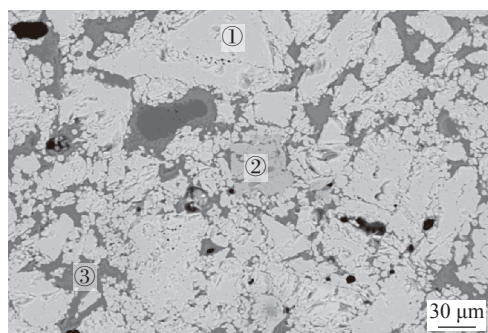
Fig. 11 Melting mixed ore of pellet and lump ore without load



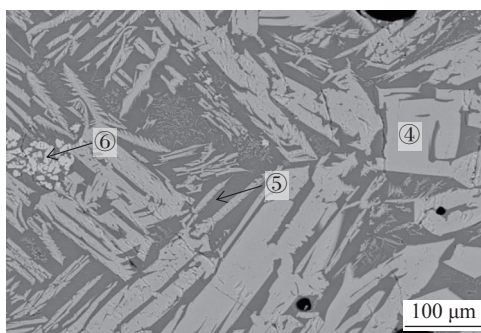
(a) 界面



(b) 相互作用区域

图 12 无荷重时烧结矿与块矿相互作用的扫描电镜图片
Fig. 12 SEM photoes of sinter and lump ore mixed ore without load

(a) 球团矿区域



(b) 块矿区域

图 13 无荷重时球团矿与块矿相互作用的扫描电镜图片
Fig. 13 SEM photoes of pellet and lump ore mixed ore without load

由图 13 和表 11 可见, 在无荷重时, 在远离两种炉料界面的区域, 球团矿和块矿仍与单独软熔时一样, 其物相的分布明显不同于图 9 中大量铁橄榄石和辉石与含钛的铁氧化物交错分布的情况。在

球团矿中仍然大量存在钛赤铁矿和钛铁矿, 很少见到橄榄石相。在块矿中, 主要是铁橄榄石和玻璃相。球团矿中橄榄石的 Ca 含量明显比块矿中的橄榄石相高。

表 10 无荷重时烧结矿与块矿相互作用的微区能谱分析
Table 10 EDS analysis result of sinter and lump ore mixed ore without load

物相编号	物相名称	Fe	O	Mg	Al	Ca	Si	Ti	V
①	浮氏体	58.19	37.76	0.42	0.67	0.50	0.89	1.10	0.47
②	铁橄榄石	35.74	44.66	1.80	0.88	0.75	14.83	0.79	0.56

表 11 无荷重时球团矿与块矿相互作用的微区能谱分析
Table 11 EDS analysis result of pellet and lump ore mixed ore without load

物相编号	物相名称	Fe	O	Mg	Al	Ca	Si	Ti	V	Mn	K	Na
①	钛赤铁矿	63.83	24.43	1.19	1.46			9.43				
②	钛铁矿	17.41	57.44	2.67	2.01			20.48				
③	橄榄石	6.55	40.11	2.91	9.47	8.08	29.05	1.42	0.71			1.70
④	铁橄榄石	59.15	25.75	2.58			11.90			0.62		
⑤	玻璃相	23.50	36.29		9.41	6.06	20.80				3.94	
⑥	浮氏体	73.16	22.41		4.44							

由此可见, 在无荷重时不同炉料之间的相互作用程度明显不如有荷重时强烈。在有荷重时, 荷重给先软熔的块矿施加外力, 促使其进入烧结矿和球团矿的空隙间, 增加了块矿与其接触面积, 促进不同炉料间物相的侵蚀和元素在不同物相间的迁移, 从而促进了两种炉料间的相互作用。

4 结论

1) 攀钢高炉不同原料的熔滴性能差别明显。与球团矿相比, 烧结矿的软化终了温度 T_{40} 低、滴落温度 T_d 高、软化温度区间 ΔT_s 窄、熔化温度区间

ΔT_m 宽, 在熔化以后位移增速变缓。与烧结矿和球团矿相比, 混合矿的滴落温度 T_d 明显降低, 当烧结矿占多数时其位移变化规律与烧结矿相似。

2) 单种炉料的软熔性能和化学成分的差异以及荷重促进了不同炉料间的相互作用, 是混合矿的软熔性能明显不同于单种炉料的主要原因。块矿的软熔滴落温度低, 软熔以后在荷重的作用下渗入烧结矿和球团矿的空隙间, 增大了二者的接触面积, 有利于其与烧结矿或球团矿中物相的相互侵蚀和元素在不同物相间的迁移。

参考文献

[1] Zhou Chuandian. Technical manual of blast furnace ironmaking[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018: 127.
(周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018: 127.)

[2] Du Hegui, Che Chuanren. Influence of softening-melting zone on the hard driving of blast furnace[J]. Iron and Steel, 1980, 15(4): 21-27.
(杜鹤桂, 车传仁. 软熔带对高炉强化冶炼的影响[J]. 钢铁, 1980, 15(4): 21-27.)

[3] Zhang Qiang, Gao Bin, Ding Jiankun, et al. Pressure field in lower region of blast furnace with different shapes of cohesive zone[J]. Research on Iron & Steel, 2012, 40(4): 21-24.
(张强, 高斌, 丁建坤, 等. 软熔带形状参数对高炉下部压力场的影响[J]. 钢铁研究, 2012, 40(4): 21-24.)

[4] Writing group of 《Data compilation of beneficiation, sintering and blast furnace smelting test of Panzhihua vanadium-bearing titanomagnetite》. Data compilation of beneficiation, sintering and blast furnace smelting test of Panzhihua vanadium-bearing titanomagnetite[R]. Beijing, 1978:167-498.
(《攀枝花钒钛磁铁矿选矿烧结高炉冶炼试验资料汇编》编写小组. 攀枝花钒钛磁铁矿选矿烧结高炉冶炼试验资料汇编[R]. 北京, 1978: 167-498.)

[5] Guha M, Sinha M. Tracking softening-melting behaviour of blast furnace burden[J]. ISIJ International, 2015, 55(9) : 2033-2035.

- [6] Chen Lijie. Optimization on softening-dripping behaviors of blast furnace comprehensive burdens for vanadium-titanium magnetite smelting[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
(陈立杰. 高炉冶炼钒钛铁磁铁矿综合炉料熔滴性能优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.)
- [7] Bao Yicheng, Jia Xueqing, Song Guocai. Simulation study on reduction process of softening-melting and dripping zone in blast furnace smelting for vanadium-titanium sinter[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 1993, 14(2): 1-11.
(包毅成, 贾学庆, 宋国才. 钒钛烧结矿高炉冶炼软熔滴落带还原过程模拟研究[J]. *钢铁钒钛*, 1993, 14(2): 1-11.)
- [8] Diao Risheng. Difference in behaviors of V-Ti bearing and common iron ores within blast furnace[J]. *Iron and Steel*, 1996, 31(2): 12-16, 38.
(刁日陞. 钒钛矿与普通矿在高炉各带行为差异的研究[J]. *钢铁*, 1996, 31(2): 12-16, 38.)
- [9] Yang Wenkang, Yang Guangqing, Xin 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.
(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.)
- [10] Gan Qin. Effect of rich ore ratio on softening-melting and dripping performance of vanadium titanium sinter[J]. *Ironmaking*, 1997, 16(5): 35-36.
(甘勤. 不同富矿比对钒钛烧结矿软熔滴落性能的影响[J]. *炼铁*, 1997, 16(5): 35-36.)
- [11] Gan Qin, He Qun, Wen Yongcai. Study on influence of MgO on mineral composition and metallurgical properties of V-bearing titaniferous magnetite sinter[J]. *Iron and Steel*, 2008, 43(8): 7-11.
(甘勤, 何群, 文永才. MgO对钒钛烧结矿矿物组成及冶金性能影响的研究[J]. *钢铁*, 2008, 43(8): 7-11.)
- [12] Liu Z G, Chu M S, Wang H T, *et al.* Effect of MgO content in sinter on the softening-melting behavior of mixed burden made from chromium-bearing vanadium-titanium magnetite[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2016, 23(1): 25-32.
- [13] Yang Guangqing, Yang Wenkang, Li Xiaosong, *et al.* Comparative study of microstructure changes in vanadium titanium sinter and ordinary sinter during reduction process[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2018, 39(2): 102-109.
(杨广庆, 杨文康, 李小松, 等. 钒钛烧结矿与普通烧结矿还原过程中微观结构变化对比研究[J]. *钢铁钒钛*, 2018, 39(2): 102-109.)
- [14] Song Guocai, Yuan Tianyuan, 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.
(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.)
- [15] Wang H T, Zhao W, Chu M S, *et al.* Effect and function mechanism of sinter basicity on softening-melting behaviors of mixed burden made from chromium-bearing vanadium-titanium magnetite[J]. *Journal of Central South University*, 2017, 24: 39-47.
- [16] Zhang Jianliang, Yang Guangqing, Guo Hongwei, *et al.* Microstructure change of V-Ti magnetite concentrate pellets during reduction[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013, 35(1): 41-48.
(张建良, 杨广庆, 国宏伟, 等. 含钒钛铁矿球团还原过程中微观结构变化[J]. *北京科技大学学报*, 2013, 35(1): 41-48.)
- [17] Liu Jianxing. The migration mechanism of valuable components for high chromia vanadium-titanium magnetite in cohesive zone[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
(刘建兴. 软熔滴落带高铬型钒钛磁铁矿有价组元迁移机理[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.)
- [18] Liu Songli, Bai Chenguang, Hu Tu, *et al.* Quick and direct reduction process of vanadium and titanium iron concentrate with carbon-containing pellets at high temperature[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(1): 60-65.
(刘松利, 白晨光, 胡途, 等. 钒钛铁精矿内配碳球团高温快速直接还原历程[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(1): 60-65.)
- [19] Chen Shuangyin, Tang Yu, Chu Mansheng, *et al.* Reduction progress of vanadium titanomagnetite with coal powder[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2013, 13(2): 236-240.
(陈双印, 唐钰, 储满生, 等. 钒钛磁铁矿的煤粉还原过程[J]. *过程工程学报*, 2013, 13(2): 236-240.)
- [20] Deng Chaoshu. Phase transformation of V-Ti-bearing sinter during reduction in BF[J]. *Iron and Steel*, 1985, 20(12): 46-51.
(邓朝枢. 钒钛烧结矿在高炉内的还原相变[J]. *钢铁*, 1985, 20(12): 46-51.)
- [21] Wu Shengli, Han Hongliang, Xu Haifa, *et al.* Research on mechanism of interaction between sinter and lump ores in blast furnace[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2010, 10(Z1): 37-42.
(吴胜利, 韩宏亮, 许海法, 等. 高炉内烧结矿与块矿高温交互反应机理研究[J]. *过程工程学报*, 2010, 10(Z1): 37-42.)