

攀钢铁矿粉高温性能及优化配矿研究

胡 鹏¹, 唐文博¹, 黄 楚², 饶家庭¹, 杨明睿¹

(1. 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 攀钢集团西昌钢铁有限公司, 四川 西昌 615000)

摘 要:通过微型烧结试验对攀钢铁矿粉高温性能进行了检测, 结果表明攀钢所用高钛型钒钛磁铁矿同化温度达到 1 320 ℃ 以上, 液相流动性指数仅 0.1, 粘结相强度大于 3 500 N, 需要通过优化配矿来改善烧结混匀矿性能。因此, 根据高温性能进行了优化配矿, 并开展了高温性能和烧结杯验证试验, 结果表明: TiO₂ 含量对铁矿粉烧结高温性能影响较大。随着 TiO₂ 含量从 7.0% 降低至 3.0% 时, 混匀矿的同化温度从 1 305 ℃ 降低至 1 280 ℃, 液相流动性指数从 0.42 提高至 0.78, 粘结相强度则从 2 640 N 降低至 1 915 N, 烧结矿成品率、转鼓强度和中低温性能显著提高, 且烧结过程中 TiO₂ 与 CaO 反应生成的结构致密、熔点较高的钙钛矿物相减少, 铁酸钙物相增加。

关键词: 钒钛磁铁矿; 烧结; 配矿; 高温性能

中图分类号: TF046

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)03-0118-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.03.019

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Study on high temperature properties and optimal ore blending of Pangang iron ore powder

Hu Peng¹, Tang Wenbo¹, Huang Chu², Rao Jiating¹, Yang Mingrui¹

(1. Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Pangang Group, State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Pangang Group Xichang Steel & Vanadium Co., Ltd., Xichang 615000, Sichuan, China)

Abstract: The results from micro sintering test on high temperature properties of Pangang iron ore powder show that the assimilation temperature of high V-Ti magnetite used in Pangang exceeds 1 320 ℃, while the liquid phase fluidity index is only 0.1 and the bonding phase strength is greater than 3 500 N. It is necessary to improve the performance of sinter blending by optimizing ore blending. Therefore, the ore blending was optimized based on high temperature performance, and the sintering verification tests had been conducted. It is found out that the content of TiO₂ has a great influence on the high temperature sintering properties of iron ore powder. When TiO₂ content decreases from 7.0% down to 3.0%, the assimilation temperature of mixed ore decreases from 1 305 ℃ to 1 280 ℃, the liquid phase fluidity index is increased from 0.42 to 0.78, and the bonding phase strength decreases from 2 640 N to 1 915 N. The sinter yield, drum strength, and medium and low temperature properties are significantly improved. During the sintering process, the calcium titanium mineral phase with dense structure and high melting point formed by the reaction of TiO₂ and CaO decreases, and the calcium ferrite phase increases.

Key words: vanadium-bearing titanomagnetite, sinter, ore blending, high temperature properties

收稿日期: 2022-02-25

作者简介: 胡鹏 (1988—), 男, 四川苍溪人, 高级工程师, 研究方向: 钒钛矿造块及高炉冶炼, E-mail: hupeng526417@163.com。

0 引言

随着高炉炼铁技术的进步,对烧结矿质量的要求越来越高,而传统烧结工艺仅停留在化学成分、粒度组成、制粒特性等常温性能方面,对铁矿石在烧结过程中表现出来的高温行为和作用相对研究较少。由于缺乏对铁矿石自身特性的综合认识,特别是不清楚铁矿石在烧结过程中反应出来的高温物理化学特性,故不能有目的地对各种铁矿石进行合理的选择和使用,从而无法实现真正意义上的“优化配矿”^[1]。

攀钢由于地理位置和资源条件的限制,一直以攀西地区高钛型磁铁矿粉为主进行配矿烧结,但由于烧结混合料中 TiO₂ 含量较高,烧结过程中形成了较多的性能较差的钙钛矿^[2],导致钒钛烧结矿总返

矿率高(>35%)、转鼓强度低(<72%)、低温还原粉化性能差(RDI_(-3.15 mm)>40%)。因此,笔者主要对铁矿石和钒钛烧结混合料的高温同化性、液相流动性和粘结相强度进行了研究^[3],并在此基础上提出了优化配矿方案,并进行了相应的烧结杯试验研究,以验证高温性能试验效果。

1 试验条件与方法

1.1 试验条件

试验原料为攀钢常用的 5 种铁矿粉,化学成分检测结果如表 1 所示。由表 1 可知,攀精矿和白马精矿中 TiO₂ 含量都大于 10%,FeO 含量都大于 25%,属于典型的高钛型钒钛磁铁精矿;南非矿和国内高粉含铁品位较高,分别为 62.21% 和 59.61%,属于高品位粉矿;所用中粉则为 SiO₂ 含量较高、含铁品位较低的粉矿。

表 1 试验用原料化学成份和烧损
Table 1 Chemical compositions and burning loss of raw iron ore for test

矿粉名称	化学成分/%								lg/%
	TFe	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	
攀精矿	53.90	32.55	0.40	3.80	2.80	3.80	12.25	0.56	-1.36
白马精矿	56.36	27.30	0.37	3.79	3.36	3.28	10.51	0.71	-1.50
南非矿	62.21	0.72	0.27	6.22	0.05	1.91			2.00
国高粉	59.61	17.69	2.42	4.36	3.80	0.86	0.50		3.00
中粉	44.03	2.64	2.29	20.82	1.62	5.33	0.30	0.04	4.32

1.2 试验方法

1.2.1 铁矿粉的烧结基础特性

试验设备:卧式高温炉,其在 1 400 ℃ 的恒温带为 30 mm,误差为±1 ℃,升温速率为 0~80 ℃/min;压样机。为了模拟铁矿粉的烧结过程,一次试验从升温、恒温到冷却大约需要 30 min,但由于卧式管炉升温速度较慢,笔者对其进行了优化处理,具体方法为:设定卧式管炉中心部位温度为 1 400 ℃,通过控制卧式管炉右侧推进杆,将试验样品按照升温速率推送至样品焙烧要求温度即可。原料为表 1 中含铁原料经过干燥、研磨后制成小于 0.074 mm 的铁矿粉和化学纯试剂 CaO。

同化性:称量 0.8 g 铁矿粉,装进内径为 8 mm 的压样机中,在 15 MPa 的压强下保持 15 s,然后取出;称量 2 gCaO,装进内径为 20 mm 的压样机中,在 15 MPa 的压强下保持 15 s,然后取出;再将压制

好的铁矿粉样饼放置于 CaO 样饼上方,如图 1 所示;最后按照设定的温度曲线和试验气氛进行烧结,测定小饼接触面上生成略大于铁矿粉小饼一圈的反应物时的温度,记录为同化温度。

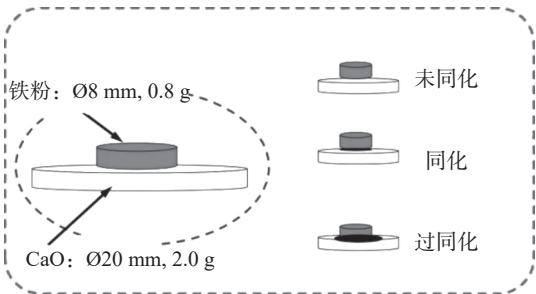


图 1 铁矿粉同化温度测定试验示意
Fig. 1 Schematic diagram of determination test on iron ore powder assimilation temperature

液相流动性:将 CaO 和铁矿粉按 4.0 的二元碱度制成小饼,然后放置于刚玉垫片上,如图 2 所示;

然后根据设定的试验气氛和升温曲线进行烧结(1 280 ℃, 恒温 5 min);最后计算烧结前后小饼面积差与原始小饼面积的比值, 试验重复 3 次取结果平均值作为该铁矿粉的液相流动性指数。

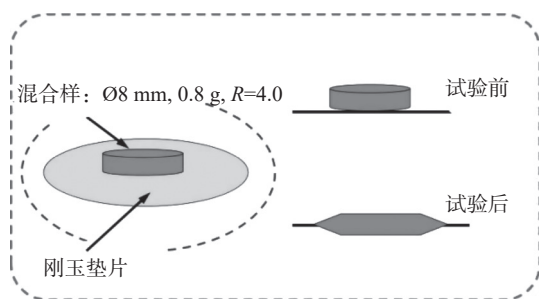


图2 铁矿粉液相流动性试验示意

Fig. 2 Schematic diagram of iron ore powder liquid phase fluidity test

粘结相强度: 将 CaO 和铁矿粉按 4.0 的二元碱度制成小饼, 共需压制三个试样;然后将三个试样放置于刚玉垫片上并置于样品台中, 推入卧式管炉中, 根据设定的试验气氛和升温曲线进行烧结(1 280 ℃, 恒温 5 min);最后通过压力试验机分别对三个试样进行抗压强度检测, 测出的数值取平均值后即为该种铁矿石的粘结相强度, 具体流程见图 3 所示。

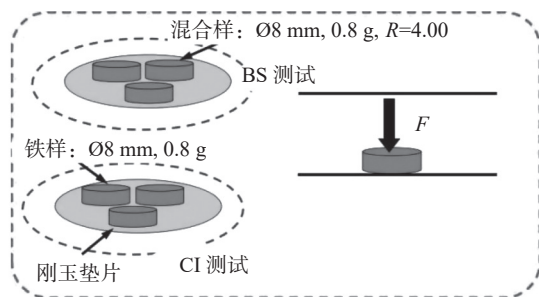


图3 铁矿粉粘结相强度试验示意

Fig. 3 Schematic diagram of iron ore powder bond phase strength test

1.2.2 烧结杯试验及冶金性能测试

烧结杯尺寸 $\varnothing 250\text{ mm}\times 700\text{ mm}$, 点火负压 6 kPa, 烧结负压 12 kPa, 点火时间 150 s, 点火温度 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 将烧结废气温度从最高点下降 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时定为烧结终点。烧结矿的转鼓指数检测根据 GB 8209—1987 进行, 中温还原和低温粉化性能按照 GB/T 13242—1991 进行测定^[4]。

2 试验结果及分析

2.1 攀钢铁矿粉高温性能试验结果及分析

2.1.1 同化性

攀钢 5 种常用铁矿粉的同化温度测试结果如

图 4 所示。由图 4 可知: ①两种高钛型钒钛磁铁矿同化温度均较高, 分别达到了 $1\,335\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1\,320\text{ }^{\circ}\text{C}$, 同化温度高说明其同化性能较差; ②其它三种铁矿粉同化温度较低, 同化性能较强, 特别是南非矿, 其同化温度仅 $1\,240\text{ }^{\circ}\text{C}$; ③不同种类铁矿粉的同化性温度不同, 并存在一定差异。相关研究指出, 决定铁矿粉同化性能的主要因素为其自身特性, 而铁矿粉的组分及其质量分数是其中重要因素之一。通过 Minitab 对影响铁矿粉同化温度的几大组元进行了多元回归分析, 结果表明铁矿粉同化温度受各种组元的交互影响, 其中 TFe、 TiO_2 和 SiO_2 三大组元对同化温度影响最为显著。

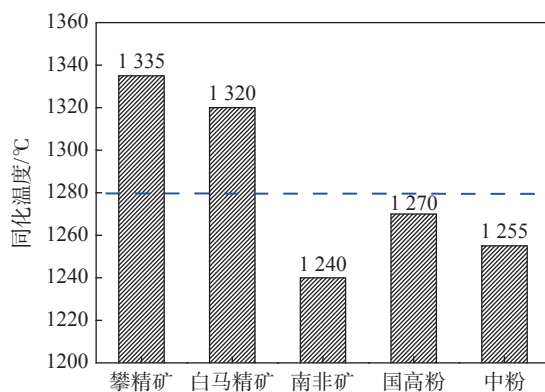


图4 铁矿粉同化性试验结果

Fig. 4 Assimilation test results of iron ore powder

烧结生产一般要求铁矿粉适宜的同化温度为 $1\,275\sim 1\,315\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同化温度过高则不能形成低熔点的液相, 不利于铁矿粉的液相粘结, 导致烧结矿强度下降; 但是同化温度过低, 烧结过程中产生的液相量过多, 导致起固结骨架作用的核矿石减少, 料层透气性恶化, 烧结矿的产量将降低^[5]。

2.1.2 液相流动性

攀钢 5 种常用铁矿粉的液相流动性指数测试结果如图 5 所示。由图可知: ①攀钢所用高钛型钒钛磁铁矿液相流动性指数均较小, 仅 0.11 和 0.09; ②液相流动性指数最高的是国高粉, 达到了 1.03, 其次是南非粉矿, 达到了 0.56; ③目前攀钢所用的矿石冶炼流动性指数均较差, 未达到烧结所要求的平均水平, 故只能通过配矿来提高烧结混合料的液相流动性指数。

烧结生产一般要求铁矿粉的适宜液相流动性指数为 $0.7\sim 1.6$, 铁矿粉的液相流动性过低, 烧结过程中液相粘结周围物料的能力下降, 部分散料得不到有效粘结, 烧结矿强度降低, 但液相流动性也不能过

大, 过大后液相对周围物料的粘结层厚度变薄, 烧结合易形成薄壁大孔结构, 烧结合矿的强度也会降低^[6]。因此, 攀钢烧结合配料过程中需要适当提高国高粉配比以利于提高液相流动性指数, 达到改善钒钛烧结合矿质量的目的。

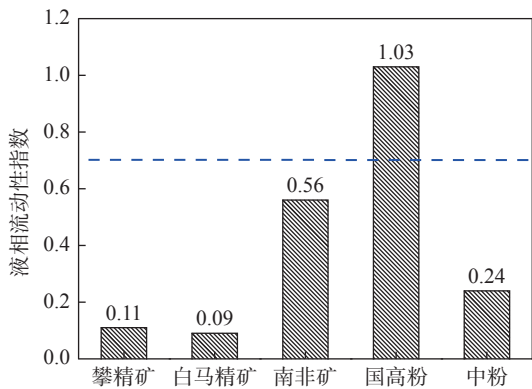


图 5 铁矿粉的液相流动性指数
Fig. 5 Liquid phase fluidity index of iron ore powder

2.1.3 粘结相强度

攀钢 5 种常用铁矿粉的粘结相强度测试结果如图 6 所示。由图可知: ①两种高钛型钒钛磁铁矿的粘结相强度均较高, 达到了 3 500 N 以上, 而其它三种普通矿的粘结相强度较低, 仅在 1 500 N 左右, 钒钛磁铁矿精矿粘结相强度较高的主要原因在于高温烧结合过程中生成的钙钛矿属于自身硬度较大且结构致密的物相, 导致采用正面压溃时的强度较高; ②白马钒钛精矿粘结相强度较攀精矿高的原因在于白马精矿 TFe 质量分数和粒度组成优于攀精矿, 导致烧结合过程中固相固结作用优于攀精矿; ③烧结合选择配矿品种时, 不但要求铁矿粉同化性和液相流动性指数要好, 还要充分考虑粘结相强度, 一般要求铁矿粉的粘结相强度大于 2 000 N。

2.2 钒钛混匀矿烧结合高温性能结果及分析

2.2.1 钒钛混匀矿配矿方案

结合上述单种含铁物料的基础特性研究以及攀钢原料供应与烧结合生产实际情况, 以攀钢本部烧结合厂钒钛混匀矿中 TiO_2 含量为基础, 通过逐步降低混匀矿中 TiO_2 含量, 保持 SiO_2 、 CaO 含量基本不变的配矿原则, 设计了 5 组优化配矿方案, 如表 2 所示, 混匀矿化学成分如表 3 所示, 其中基准为攀钢本部烧结合厂实际生产过程中含铁物料的配矿方案。

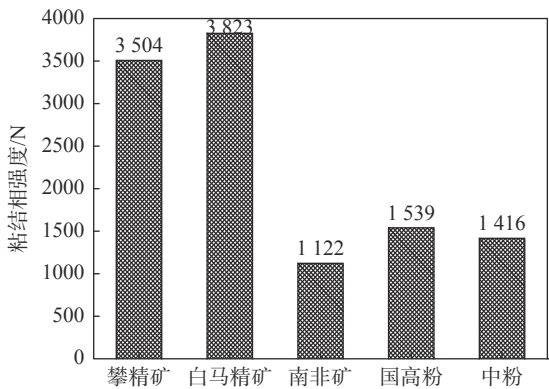


图 6 铁矿粉的粘结相强度
Fig. 6 Bond phase strength of iron ore powder

表 2 铁矿粉配矿试验方案
Table 2 Iron ore powder blending test scheme

配矿方案	矿粉比例/%			
	攀精矿	南非矿	国内高粉	国内中粉
JZ	56	10	23	11
S1	47.5	10	32	10.5
S2	39	10	40.5	10.5
S3	30.5	10	49.5	10
S4	22	10	58.5	9.5

表 3 混匀矿化学成分检测结果
Table 3 Chemical compositions of mixed ore

配矿方案	化学成分/%						
	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	V_2O_5	TiO_2
JZ	54.96	6.04	1.06	2.63	3.10	0.32	7.00
S1	55.52	6.01	1.23	2.72	2.83	0.27	6.01
S2	56.01	6.06	1.40	2.81	2.58	0.22	5.01
S3	56.57	6.02	1.58	2.90	2.31	0.17	4.01
S4	57.13	5.99	1.75	3.00	2.04	0.13	3.00

2.2.2 钒钛混匀矿同化性能

结合同化性能检测方法, 对上述不同 TiO_2 含量

的混匀矿进行了同化温度检测, 结果见图 7。从图可以看出: 混匀矿同化温度和 TiO_2 含量呈现显著的

相关性,当 TiO_2 含量从 7.0% 降低至 3.0% 时,同化温度从 1 305 $^{\circ}\text{C}$ 降低至 1 280 $^{\circ}\text{C}$,降低了 25 $^{\circ}\text{C}$ 。降低的主要原因在于:随着钛质量分数的降低,钛形成的高熔点物质逐渐减少,从而提高了混匀矿的熔化粘结,同时 TiO_2 和 CaO 反应生成钙钛矿等结构致密的物质数量降低,从而提高了其它组元与 CaO 反应的热力学、动力学条件,降低了同化温度,提高了同化性能^[7]。结合生产实际出发,降低 TiO_2 质量分数有助于提高烧结矿质量。

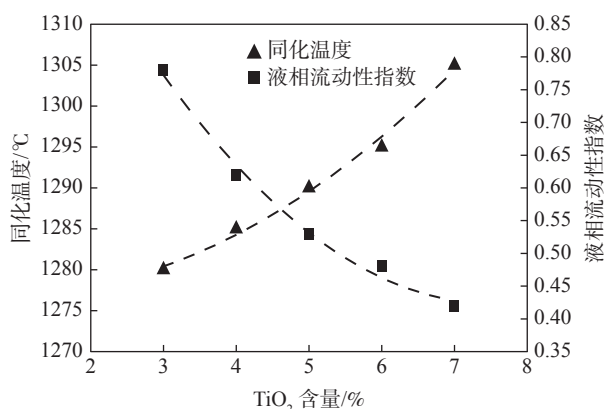


图7 混匀矿同化温度和液相流动性指数随 TiO_2 含量变化规律

Fig. 7 Variation of assimilation temperature and liquid phase fluidity of mixed ore with TiO_2 content

2.2.3 钒钛混匀矿液相流动性

结合液相流动性检测方法,对上述不同 TiO_2 含量的混匀矿进行了液相流动性指数检测,结果见图7。从图7可以看出:随着混匀矿中 TiO_2 含量逐渐降低,混匀矿液相流动性指数先缓慢升高,后迅速升高,升高的主要原因在于随着钛质量分数的降低,烧结液相的形成温度逐渐降低,液相生成量逐渐增多且流动性大大提高,从而使流动性指数明显升高,特别是当结构致密的钙钛矿物相生成减少后, CaO 和铁氧化物的接触显著提高,从而使低熔点物质形成增多,提高了混匀矿的液相流动性^[8]。

2.2.4 钒钛混匀矿粘结相强度

结合粘结相强度检测方法,对上述不同 TiO_2 含量的混匀矿进行了粘结相强度检测,结果见图8。从图可以看出:①随着混匀矿中 TiO_2 含量的降低,混匀矿的粘结相强度逐渐降低,主要原因在于随着钛质量分数的降低,烧结过程中与 CaO 反应生成的结构致密且硬度较大的钙钛矿含量降低,从而降低了粘结相强度;②当混匀矿中 TiO_2 含量降低至 3% 时,其粘结相强度降低到了 1 915 N,低于烧结

矿要求的粘结相强度大于 2 000 N 的标准,故仅从粘结相强度来看,笔者认为钒钛烧结矿适宜的高钛型钒钛磁铁精矿配比在 20% 左右,烧结矿中 TiO_2 含量保持在 3% 左右最为适宜。

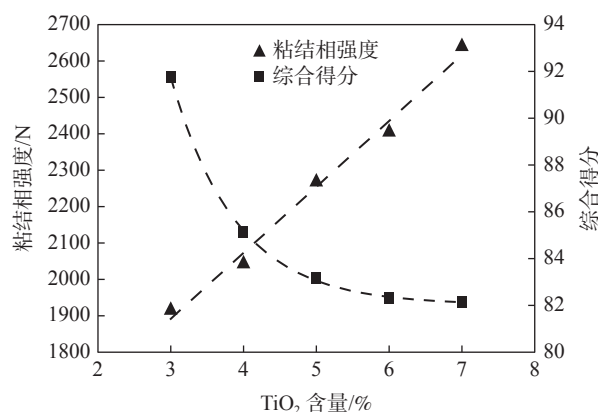


图8 混匀矿粘结相强度和综合得分随 TiO_2 含量变化规律
Fig. 8 Variation of bond phase strength and comprehensive score of mixed ore with TiO_2 content

2.2.5 综合评价指标

上述三种指标中:同化性能是指铁矿石在烧结过程中与 CaO 的反应能力,它标志的是铁矿石在烧结过程中生产液相的难易程度,仅揭示了低熔点液相的生产能力;液相流动性能是指烧结过程中铁矿石与 CaO 反应生成的液相的流动能力,与烧结成品率和还原性密切相关;粘结相强度是指铁矿石在烧结过程汇总形成的液相对周围核矿石进行固结的能力,与烧结矿转鼓强度有着重要影响。因此,结合烧结生产经验,按照同化性能:液相流动性能:粘结相强度=30:40:30 进行综合评分,结果见图8。从图8可以看出,随着混匀矿中 TiO_2 含量逐渐降低,混合矿综合得分逐渐升高,特别是当 TiO_2 含量降低至 4% 和 3% 时,综合得分显著提高。

2.3 烧结杯验证试验结果及分析

对以上 5 组配矿方案进行了烧结杯验证试验,试验时通过外配熔剂(石灰石、生石灰或活性炭)来控制烧结矿二元碱度为 2.0,外配燃料(焦粉或煤粉)来控制配碳量为 4.2%,使形成的烧结混合料水分控制在 7.5% 左右,然后对混合料进行混匀、制粒、抽风烧结和冷却检测,所得烧结矿的性能测试结果如表4所示。由表4可知:①降低 TiO_2 含量的四组烧结矿各项技术指标均高于基准组;②随着混匀矿中 TiO_2 含量逐渐降低,烧结矿成品率逐渐升高,从基准时的 70.75% 升高至 TiO_2 含量为 3% 时的 85.43%,这说明混匀矿的液相流动性能是不断改善的,从而

使其粘结周围物料的能力增强,使更多的未熔散料得到了有效粘结,提高了烧结矿成品率;③随着混匀矿中 TiO_2 含量逐渐降低,烧结矿转鼓强度也逐渐升高,从基准的 52.60% 逐渐提高至 TiO_2 含量为 3% 时的 63.13%,主要原因在于烧结矿的固结主要是通过生成液相对周围未熔物料浸润、反应、粘结而完成,足够的粘结相数量是烧结矿固结的基础^[8],同时优质的铁酸钙物相也大量生成,进一步提高了烧结

矿转鼓强度;④随着烧结矿中 TiO_2 含量降低,烧结矿的低温还原粉化指数和中温还原性随混匀矿液相流动性增大而改善,铁矿粉液相流动性的提高促进烧结矿中粘结相增多,使烧结矿低温还原粉化指数得到改善,同时液相流动性好的矿粉生成更多的低熔点物质,使烧结矿气孔率升高,增大了还原性气体与反应界面的接触面积,从而提高了烧结矿的还原度^[9]。

表 4 烧结矿性能检测结果
Table 4 Sinter performance test results

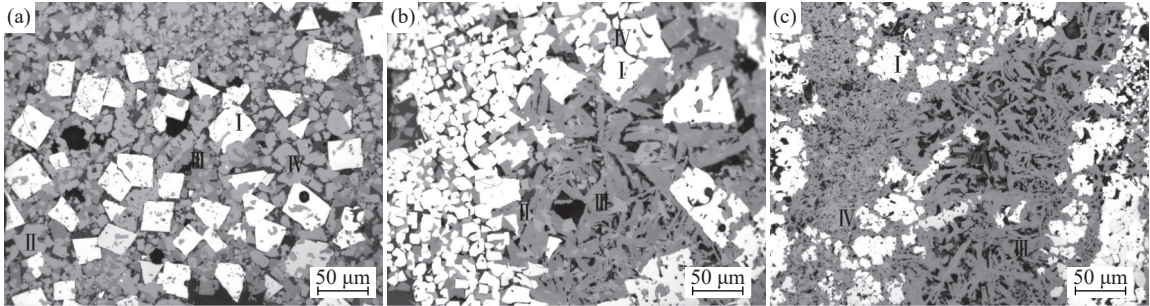
配矿方案	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/[t·(m ² ·h) ⁻¹]	RDI _{(+3.15 mm)/%}	RI/%
JZ	70.75	52.60	1.442	54.37	86.77
S1	75.91	56.27	1.437	55.92	87.15
S2	79.35	58.27	1.360	57.39	87.72
S3	85.78	61.53	1.391	61.80	88.50
S4	85.43	63.13	1.622	62.80	90.87

同时对三组典型烧结矿(基准组、S2 和 S4 组)进行了微观结构分析,结果见表 5 和图 9。从表和图可以看出:①钒钛烧结矿中矿物主要以钛赤铁矿、钛磁铁矿、铁酸钙、钙钛矿和硅酸盐相组成,此外还有部分少量的镁铝尖晶石;②随着烧结矿中 TiO_2 含量下降,铁酸钙含量呈显著上升趋势,从基准的 19%~23% 升高至 28%~32%,钛赤铁矿、钙钛矿和硅酸盐相呈下降趋势,其中钙钛矿下降幅度最大,

从 7%~11% 降低至 2%~6%;③同时烧结矿中铁酸钙物相形态也发生了明显变化,从基准期的板状、片状逐渐向树枝状和熔融交织状变化,且铁酸钙出现的面积越来越多,越来越大^[10];④烧结矿中呈现黑色大孔洞逐渐减小、减少,整体结构也由疏松、松散状向网状、均匀状转变,进一步佐证了随着烧结矿中 TiO_2 含量降低,中温还原性逐渐改善的现象。

表 5 典型烧结矿物相体积分数组成
Table 5 Volume fractions of typical sintered mineral phases

矿物方案	矿物组成/%					
	钛赤铁矿	钛磁铁矿	铁酸钙	钙钛矿	镁铝尖晶石	硅酸盐
JZ	18~22	23~27	19~23	7~11	0~2	22~26
S2	18~21	24~27	25~30	5~9	0~2	20~23
S4	16~20	24~28	28~32	2~6	0~2	16~20



I - 钛赤铁矿 (亮白色); II - 钛磁铁矿 (灰褐色); III - 铁酸钙 (深灰色); IV - 钙钛矿 (浅灰色); V - 硅酸二钙 (深黑色)
(a) JZ; (b) S2; (c) S4

图 9 不同配矿方案下烧结矿矿物形貌
Fig. 9 Mineral morphology of sinters obtained from different ore blending schemes

3 结论

1)攀钢常用5种含铁矿粉的化学成分、烧结高温基础性能方面存在明显差异,其中2种高钛型钒钛磁铁矿同化温度分别高达1335℃和1320℃,液相流动性指数仅0.11和0.09,同化性能和液相流动性能最差,粘结相强度则最高,达到3500N以上,需要通过优化配矿来获得钒钛混匀矿的适宜烧结高温性能。

2)当混匀矿TiO₂含量从7%降低3%时,同化温度从1305℃逐低至1280℃,液相流动性指数

从0.42升高至0.78,同化和液相流动性性能逐渐改善,粘结相强度从2640N降低至1915N,粘结相强度逐渐恶化。变化的原因在于钛质量分数降低,烧结过程中与CaO不断反应生成的结构致密的高熔点钙钛矿等物质减少,低熔点的优质铁酸钙等物质增加,从而提高了同化性能和液相流动性性能。

3)从烧结杯验证试验来看,钒钛烧结矿各项技术指标与混匀矿的烧结高温性能关系密切,随着混匀矿TiO₂含量的降低,烧结矿成品率、转鼓强度、中低温性能随着烧结高温性能改善而提高。因此,实际生产过程中,综合利用矿石资源,减少攀钢混匀矿中TiO₂含量可提高高炉生产。

参考文献

- [1] Wu Shengli, Liu Yu, Du Jianxin, *et al.* A new concept of basic sintering characteristics of iron ore[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005, 24(3): 254-257.
(吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿石的烧结基础特性之新概论[J]. *北京科技大学学报*, 2005, 24(3): 254-257.)
- [2] Hu Peng, Rao Jiating, Fu Weiguo, *et al.* Effect of SiO₂ and CaO content on the high-titanium V-Ti sinters performance[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2017, 42(3): 16-20.
(胡鹏, 饶家庭, 付卫国, 等. 高钛型钒钛烧结矿不同硅钙水平研究[J]. *烧结球团*, 2017, 42(3): 16-20.)
- [3] Yan Bingji, Zhang Jianliang, Yao Zhaoquan, *et al.* Ore-blending optimization model based on liquid phase formation characteristics of iron ore fines[J]. *Iron and Steel*, 2015, 50(6): 40-45.
(闫炳基, 张建良, 姚朝权, 等. 基于铁矿粉液相生成特性互补优化配料模型[J]. *钢铁*, 2015, 50(6): 40-45.)
- [4] Liu Song, Li Fumin, Lv Qing. Basic sintering characteristics of low titanium mixed iron ore[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2015, 36(50): 74-78.
(刘颂, 李福民, 吕庆. 低钛性混匀矿的烧结基础特性[J]. *钢铁钒钛*, 2015, 36(50): 74-78.)
- [5] Wang Wenshan, Ren Gang, Lv Qing, *et al.* Study on optimization of Chengde vanadium-titanium magnetite sintering process[J]. *Hebei Metallurgy*, 2009, 174: 3-5.
(王文山, 任刚, 吕庆, 等. 承钢钒钛粉的烧结基础性能研究[J]. *河北冶金*, 2009, 174: 3-5.)
- [6] Wu Shengli, Du Jianxin, Ma Hongbin, *et al.* Fluidity of liquid phase in iron ores during sintering[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005, 27(3): 291-293.
(吴胜利, 杜建新, 马洪斌, 等. 铁矿粉烧结液相流动特性[J]. *北京科技大学学报*, 2005, 27(3): 291-293.)
- [7] Lv Qing, Zhang Xusheng, Liu Xiaojie, *et al.* Influence of titanium on the basic characteristics of sinter[J]. *Iron and Steel*, 2015, 50(5): 13-18.
(吕庆, 张旭升, 刘小杰, 等. 钛对烧结矿基础性能的影响[J]. *钢铁*, 2015, 50(5): 13-18.)
- [8] Liu Zimin, Wu Shengli, Jin Jun, *et al.* Study on optimizing the sintering proportioning in Masteel[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2012, 37(2): 13-18.
(刘自民, 吴胜利, 金俊, 等. 马钢烧结优化配矿技术的研究[J]. *烧结球团*, 2012, 37(2): 13-18.)
- [9] Wang Zhe, Zhang Jianliang, Zuo Haibin, *et al.* Study on sintering proportioning optimization based on basic high temperature properties of iron ore fines[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2013, 38(3): 1-4.
(王喆, 张建良, 左海滨, 等. 基于铁矿粉高温基础性能的烧结配料优化研究[J]. *烧结球团*, 2013, 38(3): 1-4.)
- [10] Lin Wengkang, Hu Peng. Influence of TiO₂ content and basicity level on the metallogenic regularity of V-Ti sinter[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41(2): 94-100.
(林文康, 胡鹏. TiO₂含量和碱度水平对钒钛烧结矿成矿规律的影响研究[J]. *钢铁钒钛*, 2020, 41(2): 94-100.)