

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.08.007

# 南非 PMC 钒钛精矿基础性能及对烧结过程的影响

王天雄<sup>1,2</sup>, 丁成义<sup>1</sup>, 赵伟<sup>2</sup>, 游志雄<sup>1</sup>

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆钢铁股份有限公司, 重庆 401258)

**摘要:** 本研究的目的是在查明南非 PMC 钒钛磁铁精矿物化性能基础上, 研究配加 PMC 精矿对烧结产质量指标的影响。通过化学分析、X 射线衍射分析、激光粒度分析、扫描电镜-能谱分析等, 分别研究了 PMC 精矿的化学成分、物相组成、粒度分布和颗粒形貌; 进而采用烧结杯试验, 考查了配加 PMC 精矿后利用系数、固体燃耗、转鼓指数等主要技术经济指标的变化规律, 并结合烧结矿微观结构, 揭示了 PMC 精矿对烧结过程的影响机制。研究表明, PMC 钒钛磁铁矿铁含量高达 63.46%, 脉石含量较低, 具有较高的利用价值; 其物相主要为磁铁矿, 粒度较细; 配加 10% PMC 精矿后恶化了烧结过程, 利用系数、转鼓指数均明显降低, 固体燃耗上升。其原因主要是 PMC 精矿烧结性能较差, 烧结过程液相生成不足, 影响了烧结矿强度, 且钙钛矿的生成破坏了液相的粘结作用和烧结矿良好的微观结构。

**关键词:** PMC 精矿; 基础性能; 烧结; 微观结构

**中图分类号:** TD981

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2019)08-059-08

## Basic properties and sintering performance of PMC vanadium titanium concentrate of South Africa

WANG Tianxiong<sup>1,2</sup>, DING Chengyi<sup>1</sup>, ZHAO Wei<sup>2</sup>, YOU Zhixiong<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;  
2. Chongqing Iron & Steel (Group) Co. Ltd., Chongqing 401258, P. R. China)

**Abstract:** The purpose of this paper is to study the physicochemical properties of PMC vanadium-titanium magnetite in South Africa, and reveal the effect of PMC concentrate on the sintering performances. The chemical and phase composition, size distribution and particle morphology were investigated by chemical analysis, XRD, LPSA and SEM-EDS, respectively. After that, sintering pot experiments were carried out to study the effect of PMC concentrate on the utilization factor, tumbler index and solid fuel consumption. The mechanism was clarified by investigating the microstructure of finished sinter. The results reveal that the iron content is as high as 63.460% while gangue content is low, which is of great value to the utilization. The main phase is magnetite and the fraction of particles not smaller than 74  $\mu\text{m}$  is close to 70%. The sintering pot test shows that the utilization and strength is deteriorated obviously after adding 10% PMC concentrate, and the solid fuel consumption increased correspondingly. This is mainly

**收稿日期:** 2019-04-20

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1900500)。

Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFC1900500).

**作者简介:** 王天雄(1973—), 男, 重庆大学博士研究生, 高级工程师, 主要从事铁矿造块、炼铁等工作, (E-mail) wtxtime@163.com。

**通讯作者:** 游志雄, 男, 博士, 讲师, 主要从事钢铁冶金领域的研究, (E-mail) youzx@cqu.edu.cn。

attributed to the relative poor sintering performance of PMC concentrate, which affects the generation of liquid phase during sintering process. As a result, the strength of finished sinter is influenced. Worse still, the formation of perovskite destroys the bonding effect of the liquid phase as well as the microstructure of sinter.

**Keywords:** PMC concentrate; basic properties; sintering; microstructure

钒钛磁铁矿主要分布于俄罗斯、南非、中国等地,我国的钒钛资源主要集中在攀枝花和承德地区。根据  $\text{TiO}_2$  含量高低,钒钛矿可分为高钛型(以攀西地区为代表)、中钛型(以承德地区为代表)和低钛型。攀西地区钒钛磁铁矿  $\text{TiO}_2$  含量约为 10%~13%,承德地区的钒钛磁铁矿  $\text{TiO}_2$  含量约为 6%~8%;相比之下,南非 PMC 精矿  $\text{TiO}_2$  含量比较低,约为 2%,属低钛型钒钛矿。PMC 精矿是南非 PMC 公司铜冶炼的尾矿,相比其它铁矿石,其具有铁品位高(大于 60%), $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  含量高, $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量低,且价格低的特点。 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  含量高有利于烧结降低熔剂消耗, $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量低,有利于提高入炉品位,降低燃料比和生产成本。因此,近年来 PMC 精矿很受国内钢铁企业的青睐,但其同化温度高达 1 350  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>,远高于一般铁精矿的同化温度,导致烧结过程形成的液相少,影响烧结矿的强度。由于该精矿是选铜的尾矿, $\text{Cu}$ 、 $\text{P}$ 、碱金属含量比较高, $\text{Cu}$  达到 0.0405%, $\text{P}$  达到 0.016%, $\text{Cu}$ 、 $\text{P}$ 、碱金属是高炉有害成分,将影响铁水质量和高炉正常生产。

此外,PMC 精矿属于钒钛磁铁矿,是一种极其难烧结的复杂矿,原料中  $\text{SiO}_2$  含量低且含有  $\text{TiO}_2$ ,使得矿石软化温度高,烧结所需点火温度高,烧结过程液相生成量少,导致烧结矿质量差、成品率低;在烧结时  $\text{TiO}_2$  与  $\text{CaO}$  的结合能力大于  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  与  $\text{CaO}$  的结合能力,影响了粘结相铁酸钙的生成,且温度越高越易生成钙钛矿;在烧结过程中钙钛矿通过固相反应生成,并以固态形式分散于粘结相中,使烧结矿组成复杂并加剧烧结矿的粉化<sup>[2-3]</sup>。为强化钒钛磁铁矿烧结,采用低水、低碳、高点火温度以及大流量操作对钒钛磁铁矿精矿的烧结有利<sup>[4]</sup>。通过采取强化混合料制粒、优化烧结工艺、采用小球烧结、热风烧结等措施,在一定程度上改善了钒钛磁铁矿的烧结效果<sup>[5-8]</sup>。然而,即使在最适宜的烧结工艺制度下,钒钛磁铁矿精矿烧结的产质量指标相比普通烧结也相对较差。

因此,为充分利用 PMC 精矿,深入研究其基础物化性能,通过优化配矿,部分或全部替代其他铁精矿,对改善国内钢铁企业面临的资源现状,降低成本、提高竞争力具有重要意义<sup>[1,9]</sup>。笔者首先对 PMC 精矿的化学成分、物相组成、粒度组成、颗粒形貌等物化性能进行了研究,进而通过烧结杯试验,考查了配加 PMC 精矿后利用系数、固体燃耗、转鼓指数等主要技术经济指标的变化规律,并结合烧结产物微观结构,揭示了 PMC 精矿对烧结过程的影响机制。

## 1 试验原料与方法

### 1.1 试验原料

本研究中使用的 PMC 精矿来自南非 PMC 公司,实验用 PB 粉矿为澳矿,来自澳大利亚皮尔巴拉矿山,巴西粉即 CVRD 公司的标准粉。实验过程使用的除尘灰、氧化铁皮均来自钢铁厂内部,熔剂如白云石、石灰石、生石灰均购自国内。

### 1.2 原料物化性能分析

原料的化学成分主要采用化学分析方法,如分别采用 GB/T 6730.73—2016、GB/T 6730.8—2016 分析全铁(TFe)、亚铁含量,采用 GB/T 6730.9—2006 和 GB/T 6730.11—2007 分析原料中二氧化硅和氧化铝的含量等,S 含量采用高频红外 C/S 分析仪(中国纳克 CS 3000)。PMC 精矿的粒度采用马尔文 Mastersizer 3000 测试仪(荷兰)进行检测,XRD 检测采用日本 Rigaku D/max-2500X 射线衍射仪,同时采用扫描电子显微镜(日本 JEOL JSM-7800F)检测了 PMC 精矿的颗粒形貌。

### 1.3 烧结杯试验

烧结杯试验方法主要分为混合料准备、抽风烧结和产品性能检测 3 个主要步骤。配矿方案见表 1,混合料的成分及组成见表 2 和表 3。烧结试验主要工艺参数为:烧结杯尺寸  $\phi 300 \times 700$  mm、点火温度 1 100  $^{\circ}\text{C}$ 、点火时间 3.0 min、保温时间 1.5 min、烧结混合料水分 7.0%、料层厚度 700 mm、烧结负压 14.0 kPa。

烧结试验方案 1 和方案 2 对比了 PMC 精矿配比为 0 和 10% 时的烧结产质量指标,主要目的是为了考查配加 PMC 精矿后对烧结的影响。烧结矿二元碱度  $R_2$  固定为 1.85, MgO 含量为 2.15%。

表 1 混匀矿的配比(以质量分数计)

Table 1 The proportion of iron ores

%

方案	澳矿	巴西粉	PMC 精矿	除尘灰	氧化铁皮
方案 1	51.96	44.00	0	2.04	2.00
方案 2	49.04	36.99	10	1.97	2.00

表 2 混匀矿的成分

Table 2 The main chemical composition of mixed iron ores

%

方案	$\omega(\text{TFe})$	$\omega(\text{SiO}_2)$	$\omega(\text{CaO})$	$\omega(\text{MgO})$	$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{P})$	$\omega(\text{S})$	烧损
方案 1	60.70	4.41	8.09	0.78	1.99	0.08	0.03	3.85
方案 2	61.33	4.01	7.41	0.66	1.96	0.09	0.04	3.91

表 3 混合料的组成(以质量分数计)

Table 3 The proportion of sintering mixture

%

方案	混匀矿	白云石	石灰石	生石灰	燃料
方案 1	82.45	5.48	2.39	5.0	4.68
方案 2	83.58	5.44	1.10	5.0	4.88

#### 1.4 烧结矿性能检测方法

烧结试验结束后,分别对烧结利用系数、固体燃耗进行了计算,同时采用 GB 8209—87 方法对烧结矿转鼓强度、抗磨指数进行了检测。

#### 1.5 烧结矿微观结构分析

烧结矿的微观结构采用光学显微镜进行分析,显微镜型号为 Leica DM4P LED Basic Stand,产自德国。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PMC 精矿原料性能

#### 2.1.1 化学成分

PMC 精矿的化学成分如表 4 表示。从表 4 中可以看出,PMC 精矿具有较高的铁品位,达到 63.460%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  比较低,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  只有 0.720%,  $\text{SiO}_2$  只有 1.360%, MgO 含量高,达到 3.370%。与攀枝花、承德地区的精矿粉相比,PMC 精矿明显具有高铁、低硅、低铝的特征。攀钢用精矿粉铁品位只有 53.23%,  $\text{SiO}_2$  3.66%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  3.54%,  $\text{TiO}_2$  达到 12.75%;承钢用黑山精矿粉铁品位 60.26%,  $\text{SiO}_2$  2.28%,  $\text{TiO}_2$  7.72%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  3.78%;PMC 精矿的化学成分与攀枝花、承德地区的精矿粉相比存在明显差异。<sup>[2]</sup>

表 4 PMC 精矿的化学成分

Table 4 The main chemical composition of PMC concentrate

%

$\omega(\text{TFe})$	$\omega(\text{FeO})$	$\omega(\text{CaO})$	$\omega(\text{SiO}_2)$	$\omega(\text{MgO})$	$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{S})$	$\omega(\text{Cu})$	$\omega(\text{P})$	$\omega(\text{TiO}_2)$	$\omega(\text{V}_2\text{O}_5)$
63.460	25.980	1.480	1.360	3.370	0.720	0.026	0.041	0.016	2.300	0.143

#### 2.1.2 物相组成

从 PMC 精矿的 XRD 图谱(图 1)中可以看出,PMC 精矿主要为磁铁矿,由于该精矿是选铜的尾矿,原料中仍夹杂有少量的黄铜矿。

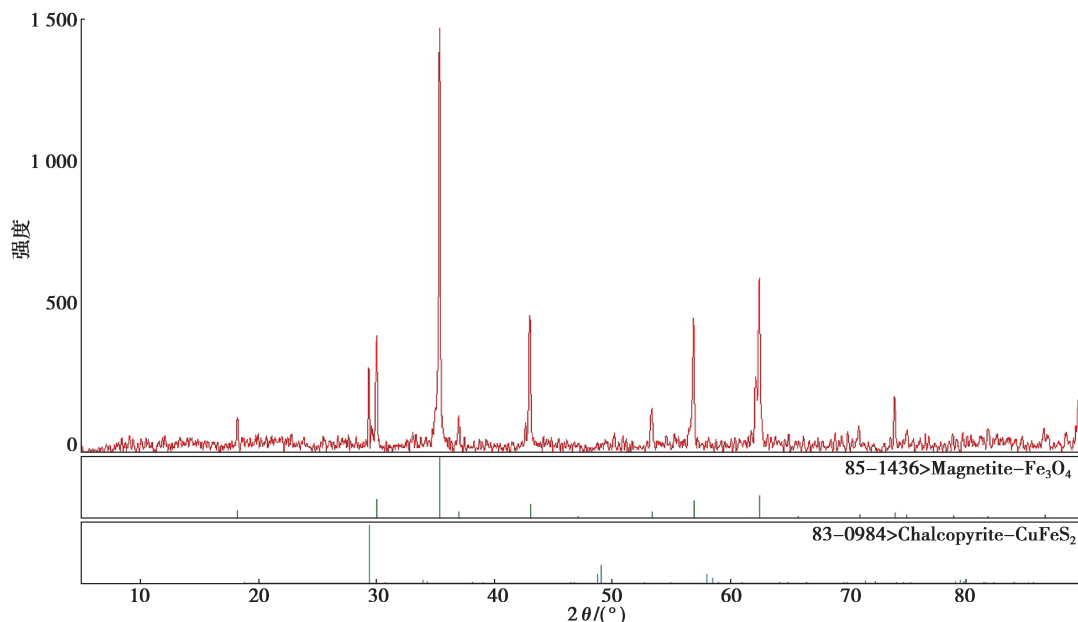


图 1 PMC 精矿的 XRD 图

Fig. 1 The XRD pattern of PMC concentrate

### 2.1.3 粒度组成

PMC 精矿的粒度分布和粒度组成见图 2 和表 5。从其粒度组成可以看出,相对于烧结原料,PMC 精矿的粒度比较细,平均粒径为  $61.74 \mu\text{m}$ ,  $\leq 74 \mu\text{m}$  ( $\leq 200$  目) 粒级高达 69.69%,但在制粒中它通常作为粘附粒子粘附在其他物料上。而相对于造球原料,该精矿粒度比较粗,不易成球,如欲用于球团生产,还需进行预处理,使其适合球团制备<sup>[10]</sup>。

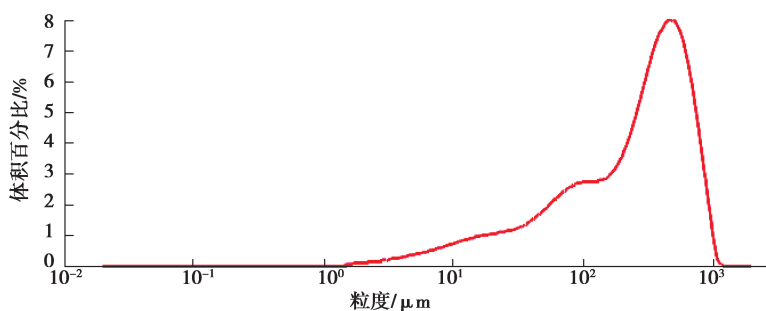


图 2 PMC 精矿的粒度分布

Fig. 2 The size distribution of PMC concentrate

表 5 PMC 精矿的粒度组成

Table 5 The size distribution of PMC concentrate

$\leq 3 \mu\text{m}$ 颗粒含量/%	$\leq 74 \mu\text{m}$ 颗粒含量/%	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	表面积平均粒径/ $\mu\text{m}$	体积平均粒径/ $\mu\text{m}$
4.42	69.69	0.097 2	61.74	323.31

### 2.1.4 微观形貌

研究表明,矿物颗粒的形状、表面的光滑程度、亲水性等对其成球性有较大的影响<sup>[11]</sup>。矿物亲水性由强到弱依次为磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿、褐铁矿。PMC 精矿的微观形貌如图 3 所示。从图中可以看出,PMC 精矿颗粒表面比较粗糙,并粘附一定数量的微细颗粒,部分细颗粒呈片状和粒状,少部分微细颗粒聚集成团。PMC 精矿是磁铁矿,具有较强的亲水性,且表面粗糙,粘附性强,它可以粘附在烧结物料上,有利于提高烧结

物料的成球性,从而改善烧结混合料的透气性。

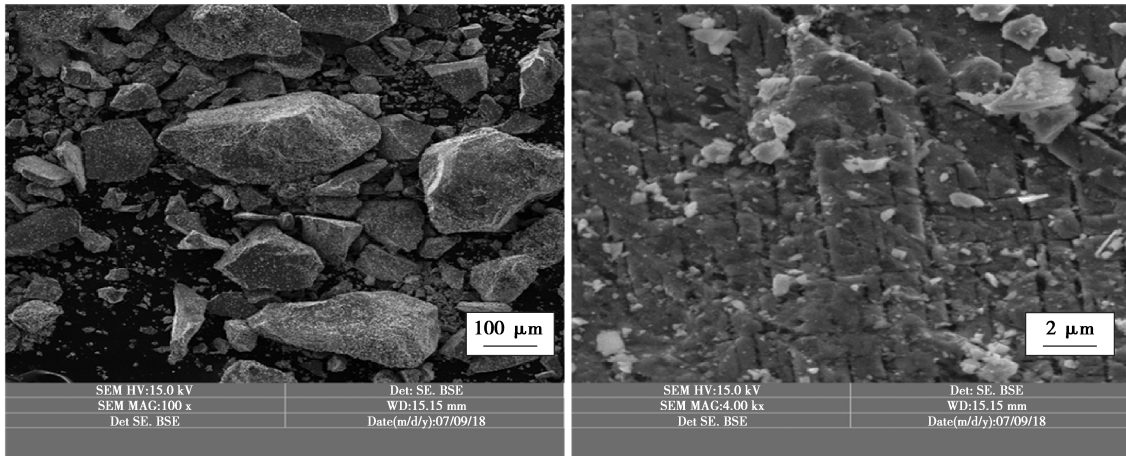


图 3 PMC 精矿的电镜扫描图

Fig. 3 The particle morphology of PMC concentrate

PMC 精矿颗粒表面的能谱分析如图 4 所示,从图中可以看出,PMC 精矿呈粗颗粒和细颗粒两部分分布,颗粒粒度不均匀,形状不规则,表面粗糙。能谱分析结果表明,PMC 精矿主要为磁铁矿,与物相分析结果一致,其内固溶有少量的 Si、Ca、Mg。

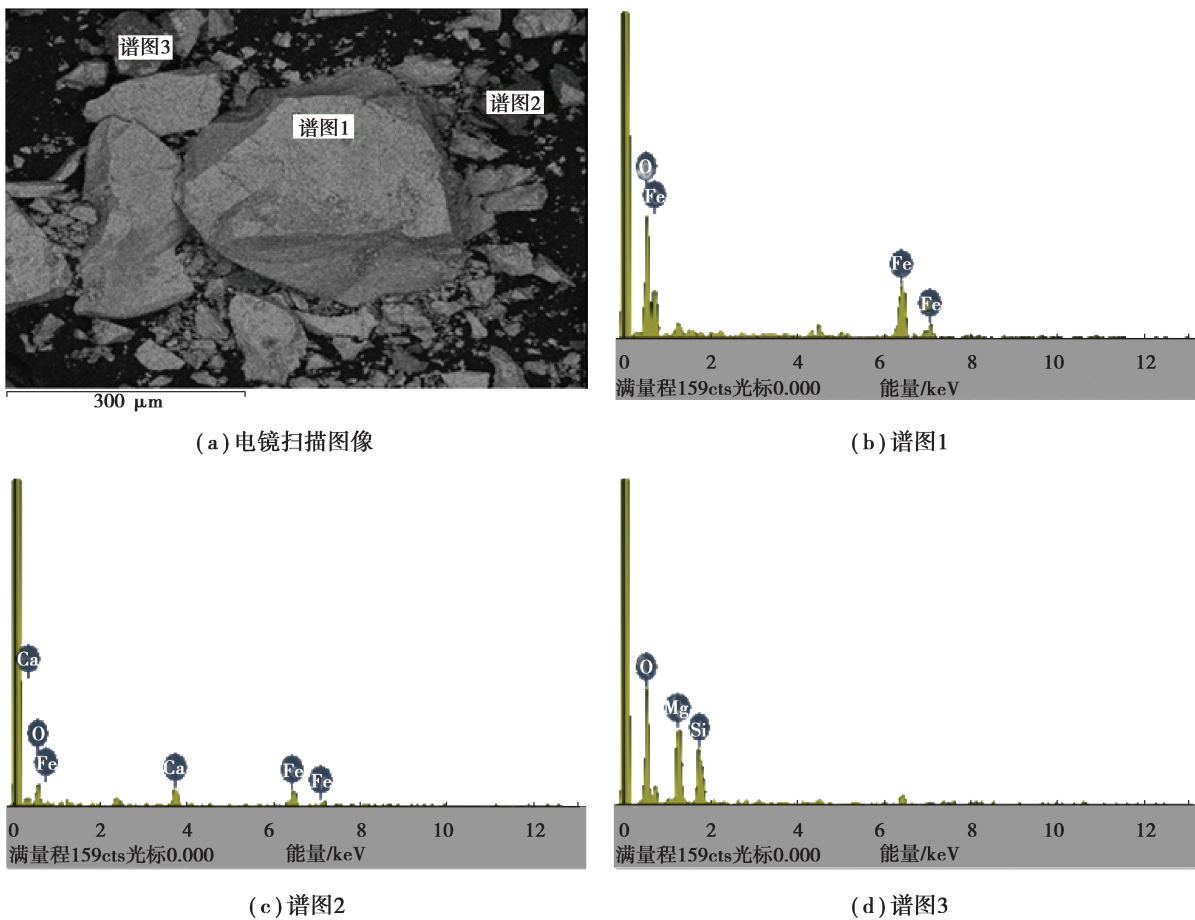


图 4 PMC 精矿的扫描照片和能谱分析

Fig. 4 The SEM-EDX results of the PMC concentrate

## 2.2 烧结试验结果

### 2.2.1 烧结矿的化学成分

烧结矿的化学成分见表 6, 配入 10% 的 PMC 精矿后, 烧结矿铁品位提高了 0.83%,  $\text{SiO}_2$  含量下降了 0.62%,  $\text{TiO}_2$  上升了 0.33%。与攀钢、承钢生产的烧结矿相比最明显的特征是低钛、低铝、低硅。有研究将攀钢、承钢、马钢烧结矿分为高钛、中钛和低钛型烧结矿, 其  $\text{TiO}_2$  分别达到 10.11%、7.40%、1.32%。因此, 配加 PMC 精矿后烧结矿  $\text{TiO}_2$  为 0.47%, 属于低钛型烧结矿。

表 6 烧结矿的主要化学成分

Table 6 The main chemical composition of finished sinter

%

	$w(\text{TFe})$	$w(\text{FeO})$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{TiO}_2)$	$R_2$
方案 1	56.430	9.550	5.340	9.860	2.160	2.300	0.078	0.017	0.140	1.85
方案 2	57.260	9.480	4.720	8.750	2.150	2.270	0.087	0.018	0.470	1.85
方案 2 与 1 之差	0.830	-0.070	-0.620	-1.110	-0.010	-0.030	0.009	0.001	0.330	0.00

### 2.2.2 烧结主要技术经济指标

表 7 所示为烧结主要技术经济指标的对比, 配加 10% PMC 精矿后, 烧结利用系数呈下降趋势, 未配加 PMC 精矿时烧结利用系数为  $1.209 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 配加 PMC 精矿后烧结利用系数下降至  $1.171 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 烧结矿转鼓指数从 77.94% 下降到 77.02%, 固体燃耗呈现明显上升趋势。由此可知, 配加 10% PMC 精矿恶化了烧结过程, 对烧结产质量指标产生了不利影响。

表 7 烧结主要技术指标

Table 7 The main technical indexes of sintering

方案	利用系数/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	固体燃耗/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	转鼓指数/%	筛分指数/%
方案 1	1.209	47.30	77.94	5.10
方案 2	1.171	47.80	77.02	5.34
方案 2 与 1 之差	-0.038	0.50	-0.92	0.24

### 2.2.3 烧结矿微观结构

烧结矿的微观结构如图 5 所示。从矿相结构图中可以看出, 方案 1 (未配加 PMC 精矿) 的矿相结构中存在明显的粘结相硅酸盐和铁酸钙, 且主要是铁酸钙。铁酸钙已将大部分铁氧化物熔蚀, 但是铁酸钙的结晶仍不完全, 未形成理想的微观组织和结构。从图中可以看到少量小孔洞存在, 这有利于还原过程气体的扩散, 改善还原性<sup>[12]</sup>。粘结相中分布有熔蚀状铁酸钙, 在孔洞周围存在明显的针状铁酸钙, 且整体烧结矿中针状铁酸钙的含量较少, 蚀状铁酸钙含量较多。

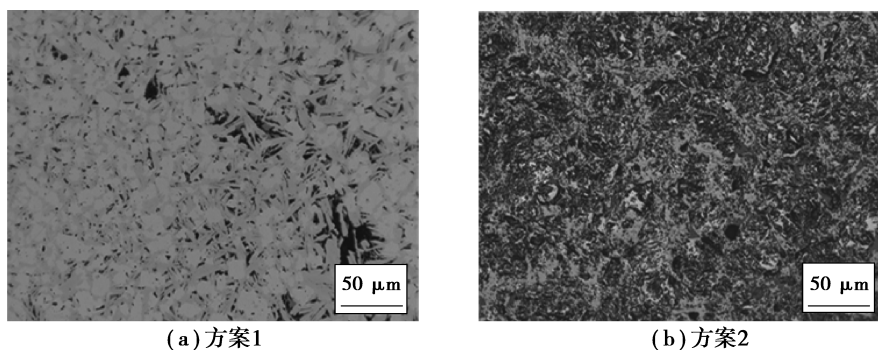


图 5 烧结矿显微结构

Fig. 5 The microstructure of finished sinter

从方案2(配加10%PMC精矿)的矿相结构图可以看出,烧结矿呈交织熔蚀结构,局部有骸晶结构,矿相结构不均匀。烧结矿粘结相比较少,粘结相为硅酸盐和铁酸钙,主要是硅酸盐,铁酸钙的量明显降低。磁铁矿、赤铁矿、铁酸钙为主要含铁物相,少量铁酸钙分布于磁铁矿的周围。钙钛矿呈不定形晶和它形晶,分布在磁铁矿晶粒间,钙钛矿分散在粘结相中,不具有粘结作用<sup>[13]</sup>。不仅如此,烧结矿中存在大量的孔洞和裂纹,主要是烧结局部存在还原性气氛,赤铁矿还原成磁铁矿,体积膨胀,产生裂纹,钙钛矿的存在加剧了裂纹的扩散,所以钒钛磁铁矿粉化比较严重。从图中还可观察到大量未与CaO结合的赤铁矿,且烧结矿中磁铁矿的含量较高。由于烧结矿中SiO<sub>2</sub>含量低,烧结生成液相少,铁酸钙生成不足<sup>[14]</sup>。其矿相组成和结构充分说明了烧结矿强度差、生产指标不好的原因。

造成上述差异的主要原因是PMC精矿熔点高,同化温度高,液相生成能力差,烧结性能差,PMC精矿对烧结过程液相生成影响显著,使用PMC精矿必将造成烧结矿强度下降、能耗上升、还原性下降、利用系数降低的情况。而且钙钛矿的存在破坏了液相粘结作用,骸状结构和树枝状钙钛矿明显增加,严重加剧了烧结矿裂纹的扩散,进一步造成烧结矿质量下降<sup>[15-16]</sup>。

为降低TiO<sub>2</sub>对烧结矿性能的影响,可以采取以下措施对生产工艺进行优化:

1)对配矿结构进行优化,增加高硅矿,提高烧结矿SiO<sub>2</sub>含量,增加烧结液相量来弥补其液相不足的缺陷,提高烧结矿强度。

2)因PMC精矿熔点高,在烧结过程生成高熔点、强度差的钙钛矿,要生成强度和冶金性能好的铁酸钙,可通过提高料层厚度以充分利用料层的自动蓄热作用,降低燃料消耗,提高烧结液相量。

3)烧结时间越长,生成的液相和铁酸钙越多,在保证烧结矿产量前提下可尽量延长烧结时间。

## 4 结 论

1)PMC精矿具有高铁、低硅、低铝的特点,具有较高的利用价值;原料中主要物相为磁铁矿,≤74 μm 粒级约占70%,作为烧结原料粒度较细,且表面粗糙、粘附性强,有利于成球。

2)配加10%PMC精矿后,对烧结过程产生了明显的不利影响。烧结利用系数和转鼓强度呈下降趋势,分别由未配加时的1.209 t/(m<sup>2</sup>·h)和77.94%下降至1.171 t/(m<sup>2</sup>·h)和77.02%,固体能耗则由47.30 kg/t显著上升至47.80 kg/t。

3)PMC精矿烧结性能较差、同化温度高、液相生成能力差,是造成烧结技术经济指标恶化的重要原因;而且烧结矿中钙钛矿的生成破坏了液相粘结作用,骸状结构和树枝状钙钛矿明显增加,加剧了烧结矿裂纹的扩散,进一步影响了烧结矿质量。

### 参考文献:

- [1] 刘凯,陈树军,吕庆. PMC 磁铁矿粉性能的研究[J]. 烧结球团, 2016, 41(4): 54-57.  
LIU Kai, CHEN Shujun, LV Qing. Study on properties of PMC magnetite concentrate[J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(4): 54-57. (in Chinese)
- [2] 李超. 承德钒钛磁铁矿烧结成矿机理研究[D]. 河北唐山: 河北联合大学, 2014.  
LI Chao. Study on sintering ore-forming mechanism of vanadium-titanium magnetite in Chengde[D]. Tangshan, Hebei: Hebei United University, 2014. (in Chinese)
- [3] 吕庆,黄宏虎,万新宇,等. 承德钒钛磁铁矿烧结过程中液相生成能力[J]. 钢铁, 2015, 50(3): 19-24.  
LU Qing, HUANG Honghu, WAN Xinyu, et al. Liquid generation capabilities of Chengde vanadium-titanium magnetite during sintering[J]. Iron & Steel, 2015, 50(3): 19-24. (in Chinese)
- [4] 王喜庆. 钒钛磁铁矿高炉冶炼[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.  
WANG Xiqing. Blast furnace smelting of vanadium-titanium magnetite [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [5] Fan X H, Wang Q, Chen X L, et al. Research on sintering properties of vanadium-titanium magnetite concentrate[C]// 3rd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons,

- Inc., 2012: 299-305.
- [6] Yu Z W, Li G H, Jiang T, et al. Effect of basicity on titanomagnetite concentrate sintering[J]. ISIJ International, 2015, 55(4): 907-909.
- [7] Jiang T, Yu Z W, Peng Z W, et al. Preparation of BF burden from titanomagnetite concentrate by composite agglomeration process (CAP)[J]. ISIJ International, 2015, 55(8): 1599-1607.
- [8] Yu Z W, Li G H, Liu C, et al. Comparison of reduction disintegration characteristics of  $\text{TiO}_2$ -rich burdens prepared with sintering process and composite agglomeration process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2016, 23(4): 389-398.
- [9] Tugrul N, Derun E M, Piskin M. Effects of calcium hydroxide and calcium chloride addition to bentonite in iron ore pelletization[J]. Waste Management & Research, 2006, 24(5): 446-455.
- [10] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2016.  
JIANG Tao. Principle and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha: Central South University Press, 2016. (in Chinese)
- [11] 王筱留. 钢铁冶金学(炼铁部分)[M]. 3 版. 北京: 冶金工业出版社, 2013.  
WANG Xiaoliu. Metallurgy of iron and steel (iron smelting part)[M]. 3<sup>rd</sup> ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [12] Noguchi D, Ohno K I, Maeda T, et al. Effect of CO gas concentration on reduction rate of major mineral phase in sintered iron ore[J]. ISIJ International, 2013, 53(4): 570-575.
- [13] 孙艳芹, 王瑞哲, 吕庆, 等.  $\text{TiO}_2$  质量分数对中钛型烧结矿质量影响的研究[J]. 中国冶金, 2013, 23(10): 6-9, 13.  
SUN Yanqin, WANG Ruizhe, LÜ Qing, et al. Study of the effect of  $\text{TiO}_2$  content on the quality of vanadium-titanium in sinter[J]. China Metallurgy, 2013, 23(10): 6-9, 13. (in Chinese)
- [14] 张建良, 刘东辉, 曹祥宇.  $\text{TiO}_2$  对钒钛烧结矿的强度及冶金性能的影响[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集. 中国金属学会, 宝钢集团有限公司, 2016: 314-316.  
ZHANG Jianliang, LIU Donghui, CAO Xiangyu. Effects of  $\text{TiO}_2$  on strength and metallurgical properties of vanadium titanium sinter[C]// Proceedings of the 10<sup>th</sup> CSM Steel Congress & the 6<sup>th</sup> Baosteel Biennial Academic Conference. The Chinese Society for Metals, and Baosteel Group Corporate, 2016: 314-316. (in Chinese)
- [15] 刘然, 刘朝卿, 刘小杰, 等. 钙钛矿含量对钒钛磁铁矿烧结性能的影响[J]. 过程工程学报, 2015, 15(1): 62-67.  
LIU Ran, LIU Chaoqing, LIU Xiaojie, et al. Effect of perovskite content on the properties of vanadium-titanium magnetite sinter[J]. Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 15(1): 62-67. (in Chinese)
- [16] Bristow N J, Loo C E. Sintering properties of iron ore mixes containing titanium[J]. ISIJ International, 1992, 32(7): 819-828.

(编辑 罗 敏)