

# 各种铁矿粉的同化性及其互补配矿方法

阎丽娟<sup>1,2)</sup> 吴胜利<sup>1)</sup> 尤艺<sup>2)</sup> 裴元东<sup>1)</sup> 张丽华<sup>1)</sup>

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 宝钢股份有限公司, 上海 201900

**摘要** 对来自巴西、澳大利亚、南非以及国产的 19 种铁矿粉的同化性进行了实验测定和考察分析, 在此基础上研究了基于铁矿粉同化性的互补配矿方法, 并设计了九组烧结优化配矿方案. 结果表明: (1) 不同类型铁矿粉的同化性存在显著差异, 巴西赤铁矿和国产磁铁矿的同化性低, 而澳大利亚含结晶水的赤铁矿的同化性高; (2) 铁矿粉的烧损含量、气孔率和  $Al_2O_3$  含量等与其同化能力呈正相关关系; (3)  $SO_2$  和  $Al_2O_3$  以黏土形式存在的铁矿粉呈现出同化性较高的特征; (4) 铁矿物晶粒小的铁矿物有相对高的同化性; (5) 采用本研究的配矿方法, 当劣质铁矿粉用量达 50% 水平时, 仍可获得烧结技术指标和冶金性能优良的烧结矿, 显示出基于同化性的互补配矿技术的有效性和优越性.

**关键词** 铁矿粉; 烧结; 同化性; 配矿方法

**分类号** TF046.4

## Assimilation of iron ores and ore matching method based on complementary assimilation

YAN Li-juan<sup>1,2)</sup>, WU Sheng-li<sup>1)</sup>, YOU Yi<sup>2)</sup>, PEI Yuan-dong<sup>1)</sup>, ZHANG Li-hua<sup>1)</sup>

1) School of Metallurgical and Ecological Engineering University of Science and Technology Beijing Beijing 100083, China

2) Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China

**ABSTRACT** Assimilation of 19 kinds of ores from Brazil, Australia, South Africa and China was evaluated and analyzed, based on which the ore matching method was researched and 9 groups of optimizing ore matching schemes were designed. The ores of different types have apparently differences in assimilation, for example, Brazilian hematite ore and Chinese magnetite ore have very low assimilation, while Australian limonite ore has high assimilation. The assimilation of the ores has positive correlation with burning loss, porosity and  $Al_2O_3$  content. The iron ores in which  $SO_2$  and  $Al_2O_3$  exist in the form of clay and the iron ores with small crystal size have relatively higher assimilation. By using the ore matching method introduced in this study, sinter ores with good sintering indexes and metallurgical properties can be obtained when low quality ores are used by the proportion of 50%, indicating the validity and superiority of the ore matching method according to complementary assimilation.

**KEY WORDS** iron ores; sintering; assimilation; blending method

在铁矿粉烧结过程中, 烧结料经过制粒形成准颗粒结构的小球, 其中准颗粒的外层为细粒铁矿粉和熔剂组成的黏附层, 内层为粗粒核矿石. 低温烧结过程中, 随着温度的升高, 黏附层内的铁矿粉与钙质熔剂同化而首先形成熔相, 然后熔相逐渐增多, 并继续同化粗粒核矿石, 当熔相冷凝时, 最终形成非均相结构烧结矿. 因此, 研究铁矿粉与熔剂反应形成液相的能力, 即铁矿粉的同化性, 对

掌握铁矿粉在烧结过程中的液相形成能力有着重要的意义.

前人对铁矿粉的同化性进行过很多研究<sup>[1-8]</sup>. 结果表明, 黏附层中的同化反应所形成的初相的性质决定着形成黏结相的结构, 对烧结过程起着重要的作用<sup>[1]</sup>. 影响同化性的因素很多, 有铁矿粉的类型、黏附层中的化学成分和核矿石的气孔率大小等, 如褐铁矿极易同化, 赤铁矿次之, 磁铁矿则最难同

收稿日期: 2009-06-03

作者简介: 阎丽娟 (1967-), 女, 首席工程师, 博士研究生, E-mail: yanlijuan@baosteel.com; 吴胜利 (1955-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wushengli@ustb.edu.cn

化<sup>[2]</sup>。不同类型铁矿粉在同化性上的这种差异引起了烧结工作者的重视,并且针对此差异进行了评价指标的定量化研究<sup>[3-4]</sup>,而根据不同铁矿粉(尤其是针对褐铁矿)的同化特征提出的使用对策也不少<sup>[5-10]</sup>,但基于同化性进行优化配矿的工作还未见报道。因此,有必要在全面掌握铁矿粉同化特性的基础上,针对适宜于低温烧结的、基于铁矿粉同化性的配矿方法加以深入研究。

为此,在本研究中,首先利用微型烧结试验装置对国内外典型的 19 种铁矿粉的同化性进行测定,并分析导致各种铁矿粉同化性差异的因素,在此基础

上研究基于铁矿粉同化性的配矿方法,设计若干组优化配矿方案,并通过烧结杯试验和还原性能的测试,对优化配矿方案进行验证,考察基于同化性互补配矿技术的可行性。

## 1 试验原料和方法

本研究共选取 19 种铁矿粉,其中,国外矿包括 7 种澳矿 OA~OG,1 种南非矿 OH,以及 4 种巴西矿 OI~OL;国内矿共 7 种,分别为东北的 OM 和 ON,河北的 OO 和 OP,以及山东的 OQ、OS 和 OR。19 种铁矿粉的主要化学成分(质量分数)如表 1 所示。

表 1 铁矿粉化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of iron ore powders

|    |       |       |                  |       |       |                                |       | %  |       |       |                  |       |       |                                |      |
|----|-------|-------|------------------|-------|-------|--------------------------------|-------|----|-------|-------|------------------|-------|-------|--------------------------------|------|
| 矿粉 | TFe   | FeO   | SiO <sub>2</sub> | CaO   | MgO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | LOI   | 矿粉 | TFe   | FeO   | SiO <sub>2</sub> | CaO   | MgO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | LOI  |
| OA | 57.87 | 0.40  | 4.18             | 0.012 | 0.051 | 1.59                           | 10.71 | OK | 64.05 | 1.070 | 4.35             | 0.052 | 0.036 | 0.73                           | 1.75 |
| OB | 57.08 | 0.13  | 4.80             | 0.310 | 0.120 | 2.82                           | 10.58 | OL | 67.53 | 0.210 | 1.14             | 0.034 | 0.013 | 0.39                           | 0.40 |
| OC | 62.66 | 0.11  | 3.40             | 0.010 | 0.038 | 2.26                           | 4.31  | OM | 65.14 | 27.20 | 5.60             | 0.240 | 0.630 | 1.22                           | 0.67 |
| OD | 61.54 | 0.50  | 3.06             | 0.100 | 0.080 | 2.18                           | 5.83  | ON | 66.00 | 27.65 | 6.94             | 0.440 | 0.410 | 0.75                           | 0.61 |
| OE | 62.89 | 0.30  | 2.80             | 0.016 | 0.160 | 1.71                           | 4.80  | OO | 62.24 | 26.00 | 5.15             | 1.920 | 1.630 | 0.92                           | 0.70 |
| OF | 59.50 | 0.13  | 7.12             | 0.260 | 0.120 | 3.07                           | 4.42  | OP | 64.26 | 25.80 | 5.35             | 0.290 | 0.970 | 1.47                           | 1.38 |
| OG | 64.00 | 0.46  | 2.97             | 0.013 | 0.051 | 1.73                           | 2.57  | OQ | 65.60 | 25.85 | 3.65             | 0.880 | 1.020 | 0.88                           | 1.23 |
| OH | 65.50 | 0.26  | 3.86             | 0.090 | 0.039 | 1.43                           | 0.90  | OR | 66.07 | 23.66 | 3.75             | 0.670 | 0.590 | 0.98                           | 1.14 |
| OI | 66.53 | 0.10  | 1.32             | 0.036 | 0.032 | 0.79                           | 1.63  | OS | 66.50 | 25.46 | 3.24             | 1.120 | 1.760 | 0.80                           | 1.11 |
| OJ | 65.83 | <0.01 | 3.35             | 0.045 | 0.036 | 0.64                           | 0.81  |    |       |       |                  |       |       |                                |      |

铁矿粉的同化性是指其在烧结过程中与 CaO 熔剂反应的能力,它表征铁矿粉在烧结过程中生成液相的难易程度,是烧结矿有效固结的基础。本试验采用微型烧结法,通过测定铁矿粉与 CaO 在其相互接触面上发生反应而开始生成液相的“最低同化温度”来评价铁矿粉的同化性,其具体测定方法参见文献[4]。

铁矿粉的气孔率采用气体吸附法进行检测,所用设备为美国康塔公司的 AUTOSORB-1C-TCD 气体吸附分析仪,所测得的气孔率是单位质量的样品所含的气孔量( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )。

## 2 铁矿粉同化性测定结果及其影响因素分析

### 2.1 同化性测定结果

19 种铁矿粉最低同化温度试验测定结果如图 1 所示。由试验结果可知:4 种巴西铁矿粉和国产精粉的最低同化温度较高,故它们均属于同化性较低的铁矿粉。其中,巴西精粉同化性最低;而澳大利亚和南非的赤铁矿的最低同化温度较低,低

于 1280℃,都属于同化性较高的铁矿粉;褐铁矿和半褐铁矿的最低同化温度都很低,尤其前者的同化温度在 1200℃ 的水平,显示了其很高的同化性。

### 2.2 铁矿粉同化性影响因素分析

同化性是铁矿粉的重要自身特性之一,影响铁矿粉同化性的因素主要包括含铁矿物类型、铁矿物的晶粒大小和形貌、SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量、脉石矿物的赋存状态、烧损率以及致密程度等。

#### 2.2.1 铁矿物类型

本试验所用的国内矿均属于磁铁矿类型,其同化性较低,而澳大利亚和南非出产的赤铁矿粉则表现出较高的同化性,这是因为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 需氧化成 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后才能与 CaO 反应的缘故。但是,同样属于赤铁矿类型的巴西铁矿粉,其同化性却普遍很低,这与其微观结构有关(下文分析)。对于具有多孔结构的褐铁矿和半褐铁矿,因 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 CaO 的反应动力学条件良好而具有同化性很高的特征。这种规律与作者以前的研究结果以及国外对铁矿粉同化性的报道相符<sup>[2-4,6]</sup>。

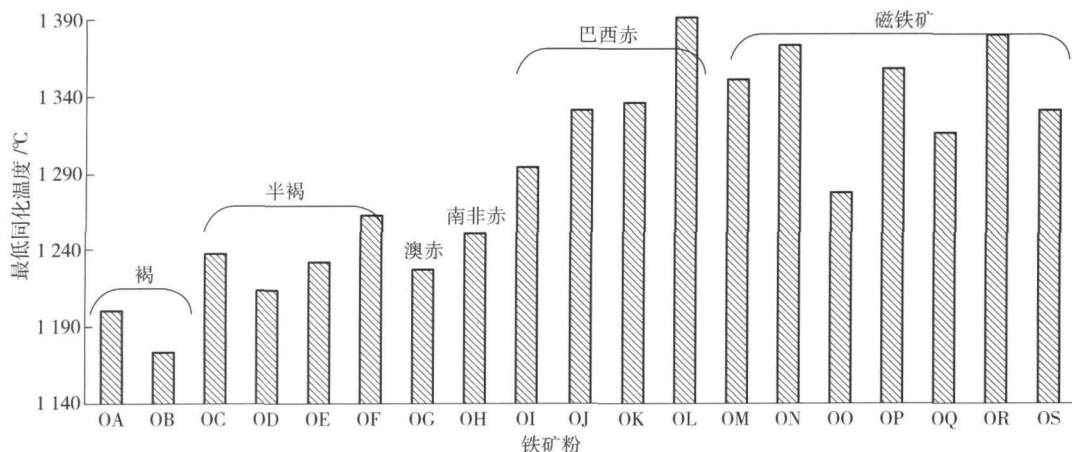


图 1 各种铁矿粉的最低同化温度

Fig 1 The lowest assimilation temperature of the 19 kinds of ores

### 2.2.2 铁矿粉中 $SiO_2$ 和 $Al_2O_3$ 的含量及其赋存状态

图 2、图 3 分别为铁矿粉  $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  质量分数与最低同化温度的关系图。由图可见，铁矿粉  $SiO_2$  含量和最低同化温度之间没有明显的相关关系，而  $Al_2O_3$  含量则与铁矿粉的最低同化温度呈现明显的负相关关系，即高  $Al_2O_3$  含量的铁矿粉具有较高同化性。

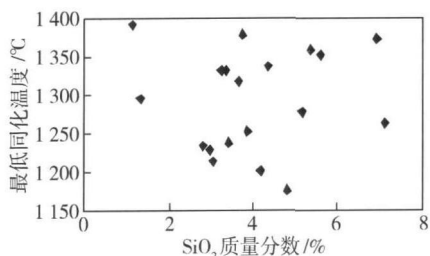


图 2 铁矿粉  $SiO_2$  质量分数与最低同化温度的关系

Fig 2 Relationship between  $SiO_2$  content and the lowest assimilation temperature

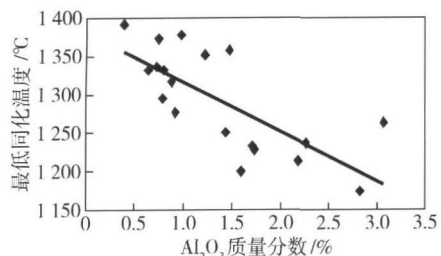


图 3 铁矿粉  $Al_2O_3$  质量分数与最低同化温度的关系

Fig 3 Relationship between  $Al_2O_3$  content and the lowest assimilation temperature

由图 2 可知， $SiO_2$  含量与铁矿粉同化性之间没有明显的规律。造成这种现象的原因是：①虽然  $CaO$  与  $SiO_2$  的反应能力较强，但是在数量上  $Fe_2O_3$  远比  $SiO_2$  多，故  $Fe_2O_3$  与  $CaO$  的反应起主导作用；

②铁矿粉的  $SiO_2$  含量与其矿粉类型没有直接的相关关系；③不同铁矿粉中的  $SiO_2$  的赋存状态也有差异，势必影响铁矿粉的矿化能力。这些因素导致  $SiO_2$  含量对铁矿粉同化性的影响规律变得不明显。

分析铁矿粉  $Al_2O_3$  含量的影响 (图 3) 可知：①铁矿粉中  $Al_2O_3$  有促进复合铁酸钙形成的作用；②  $Al_2O_3$  能增加液相表面张力，促进氧离子扩散，有利于铁氧化物的氧化；③铁矿粉中的  $Al_2O_3$  含量与其铁矿物类型密切相关，澳大利亚褐铁矿、半褐铁矿的  $Al_2O_3$  含量相对较高，而巴西赤铁矿、国内磁铁矿则含较少的  $Al_2O_3$ 。

分析  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$  在铁矿粉中赋存状态不同对其同化性的影响可知，当  $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  以黏土形式存在 (多见于澳矿) 时，它们与  $CaO$ 、 $Fe_2O_3$  更容易生成低熔点的液相体系，即反应活性高，因而会提高铁矿粉的同化性；若铁矿粉中的  $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  分别以石英和三水铝石形式存在 (多见于巴西矿和国内矿) 时，则对同化性有一定的抑制作用，这是因为游离态的石英和三水铝石对低熔点液相生成不利的缘故。

图 4 为本研究中三种铁矿粉的 X 射线衍射图，图中各种字母所代表的矿物名称如表 2 所示。由图 4 可见，澳大利亚半褐铁矿 (OC) 的脉石主要以高岭土为主，而巴西矿 (OK) 的脉石则以石英和三水铝石形式存在，国内矿 (OS) 的脉石以石英为主，并含有少量的高岭土和三水铝石。

### 2.2.3 铁矿粉的气孔率和烧损率

图 5 和图 6 分别为铁矿粉的气孔率和烧损率与最低同化温度的关系图。由图可见，铁矿粉的气孔率和烧损率越高，其同化性越高。其原因为：气孔率高的铁矿粉与  $CaO$  的反应界面大，有助于提高同化

表 2 X 射线衍射谱图中字母所代表的矿物名称

Table 2 Corresponding minerals of letters shown in X-ray diffraction patterns

| 矿物名称 | 赤铁矿 | 磁铁矿 | 针铁矿 | 方解石 | 钠闪石 | 石英 | 高岭土 | 三水铝石 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|------|
| 代码   | He  | M   | Ge  | Ca  | R   | Q  | K   | Gib  |

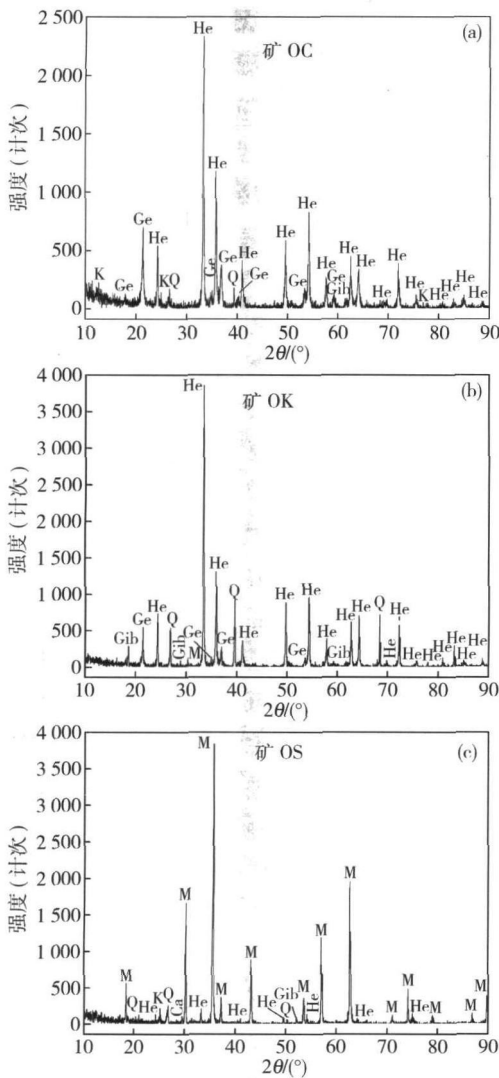


图 4 铁矿粉的 X 射线衍射图

Fig 4 X-ray diffraction patterns of iron ore powders

反应的速率;铁矿粉的气孔率与烧损含量有着较强的正相关关系(图 7),加之结晶水挥发后会产生更多的气孔和裂纹,从而提高其同化性.这也进一步解释了褐铁矿同化性远高于其他类型铁矿粉同化性的现象.

### 2.2.4 铁矿物的形貌及铁矿粉致密程度

图 8 给出了 SEM 测定的六种铁矿粉的微观形貌图.由图可见:澳大利亚褐铁矿 OB 的铁矿物晶粒小,其反应比表面积大,又为豆状且结构疏松,反应活性强;与褐铁矿类似,澳大利亚赤铁矿 OG 晶粒亦小,且含不少豆状晶粒;南非矿 OH 的晶粒稍大且结构较为致密,但大多呈片状,亦有利于其反应活性的

提高;相反,巴西赤铁矿 OJ 及国内矿 OP 和 ON,结构致密、晶粒粗大且呈块状,故不利于铁矿粉与 CaO 的同化.

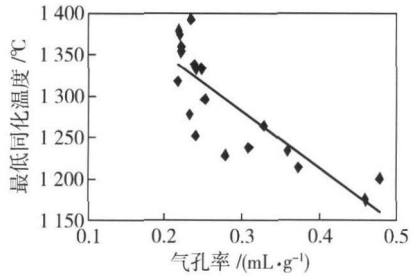


图 5 铁矿粉气孔率与最低同化温度的关系

Fig 5 Relationship between porosity and the lowest assimilation temperature

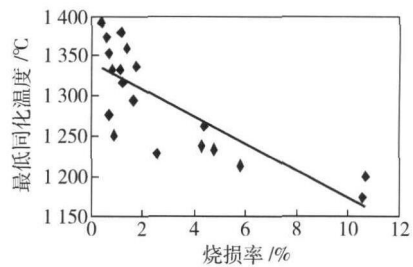


图 6 铁矿粉烧损率与最低同化温度的关系

Fig 6 Relationship between burning loss rate and the lowest assimilation temperature

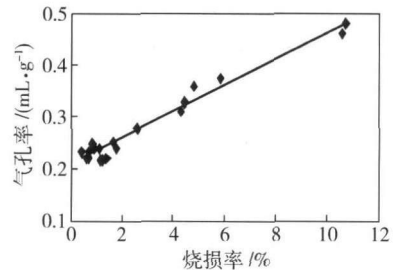


图 7 铁矿粉烧损率与气孔率的关系

Fig 7 Relationship between the burning loss rate and porosity

铁矿物晶粒大小与同化性的关系如图 9 所示.由图可见,晶粒越小,铁矿粉的同化性越高,晶粒粗大则减弱铁矿粉的同化性.

## 3 基于铁矿粉同化性的配合性评价方法

铁矿粉的同化性过低或过高均难以获得产、质量指标优良的烧结矿.因此,在烧结生产进行配矿时,应重视同化性能不同的铁矿粉搭配使用

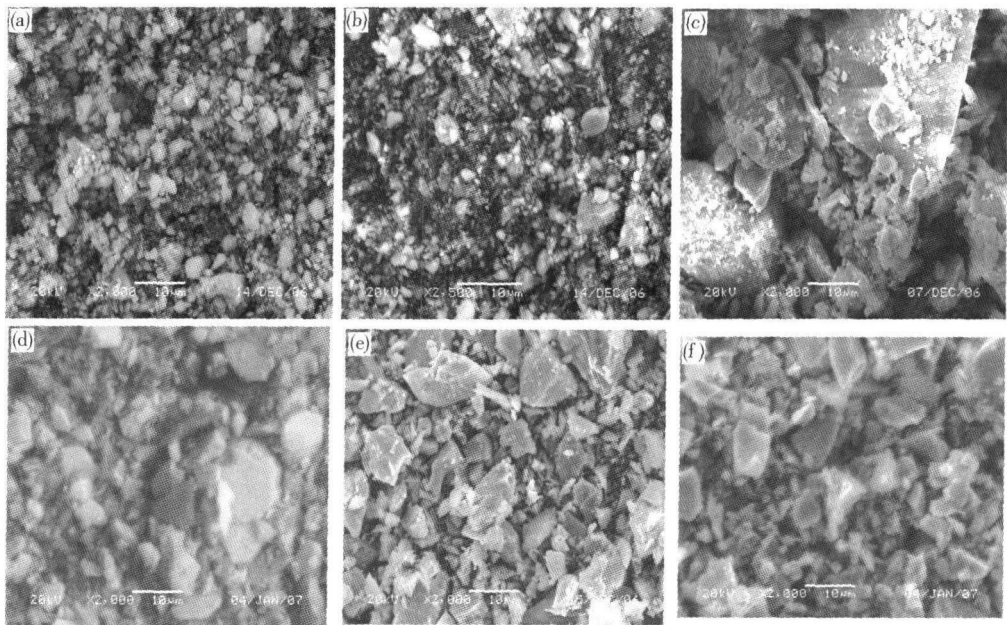


图 8 铁矿粉的微观形貌. (a) OB: (b) OG: (c) OJ (d) OH: (e) OP: (f) ON

Fig 8 Micro-morphologies of iron-ore powders. (a) OB: (b) OG: (c) OJ (d) OH: (e) OP: (f) ON

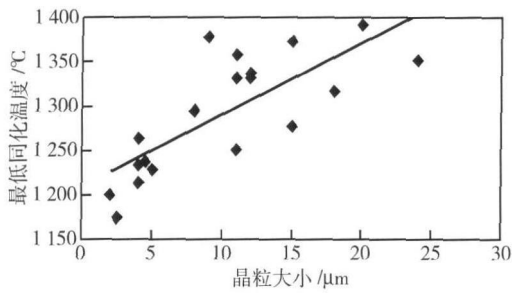


图 9 铁矿粉铁矿物晶粒大小与同化性的关系

Fig 9 Relationship between grain size and assimilation of iron-ore powders

以达到互补或改善的效果. 例如, 国内矿和巴西矿同化性较低, 南非矿和澳矿的则较高, 这两种类铁矿粉应互补搭配, 以获得综合同化性合适的烧结混合矿.

为了定量评价混合矿的同化性, 假设混合矿的最低同化温度存在一个适宜温度范围, 即  $T_{\text{适宜}} \in (T_1, T_2)$ , 其中,  $T_1$  和  $T_2$  分别为烧结过程中适宜最低同化温度的下限值和上限值, 则基于同化性的铁矿粉配矿设计时, 应确保搭配后混合矿的最低同化温度 (表示为  $T_{\text{混合}}$ ) 也处于该温度范围, 即  $T_{\text{混合}} \in (T_1, T_2)$ . 另外, 最新研究结果<sup>[11]</sup>表明: 混合矿的同化性与单种矿的同化性存在线性关系, 故可以根据各单种矿的最低同化温度及其配比来评价混合矿的综合同化性.

本文以最简单的两类铁矿粉相互搭配为例, 针对它们相互搭配时在同化性方面的变化特征, 对其配合性做出评价. 首先, 确定其中一类矿 (单种矿或

者多种矿的混匀矿) 为“基准矿”, 其最低同化温度表示为  $T_{\text{基}}$ , 另一类后加入的矿 (单种矿或者多种矿的混匀矿) 为“搭配矿”, 其最低同化温度表示为  $T_{\text{搭配}}$ ; 其次, 根据试验测定结果, 将  $T_{\text{基}}$  与  $T_{\text{适宜}}$  相比较, 明确是“高”还是“低”, 抑或在其范围内; 再者, 基于  $T_{\text{搭配}}$  以及与“基准矿”搭配后混合矿最低同化温度 (表示为  $T_{\text{混合}}$ ) 的变化特征进行配合性评价. 通过分析可归纳出八类情况, 如表 3 所示, “搭配矿”的加入对改善“基准矿”同化性的影响, 可分别评价为“适宜”、“互补”、“不适宜”和“不定”, 并分别用字母 A、B、C 和 D 表示.

根据上述配合性的评价方法, 表 4 给出了本研究所涉及的 19 种铁矿粉基于同化性的配合性评价结果. 表中第 1 列铁矿粉作为“基准矿”, 从上到下, 铁矿粉的同化性从大到小变化; 第 1 行铁矿粉为“搭配矿”, 从左到右, 铁矿粉的同化性从大到小变化.

应当指出: 上述配合性的评价方法, 虽然是以两种铁矿粉相互搭配为例描述的, 但对于多种矿搭配也适用, 只要把“基准矿”看成是几种矿的混匀矿, 在确定其同化性后, 依据“搭配矿”的加入在混合矿综合同化性方面的变化特征, 就可以获得与表 3 类似的配合性评价结果, 这对实际烧结生产的优化配矿有重要的指导作用; 再者, 虽然表 4 形式的铁矿粉配合性评价给出的是基于适宜同化性的半定量配矿指导, 但依据其可以筛选“不适宜”的“搭配矿”, 从而避免配矿的盲目性, 提高配矿设计的效率; 另外,

表 3 基于同化性的铁矿粉搭配评价体系

Table 3 Evaluation system of iron ore powders matching based on assimilation

| 编号 | 基准矿和搭配矿   | 混合矿   | 评价     |
|----|---|---|--------|
| 1  | $T_{基} > T_2, T_{搭配} \in (T_1, T_{基})$                | $T_{混合}$ 较 $T_{基}$ 更加接近 $T_{适宜}$                    | 适宜 -A  |
| 2  | $T_{基} < T_1, T_{搭配} \in (T_{基}, T_2)$                | $T_{混合}$ 较 $T_{基}$ 更加接近 $T_{适宜}$                    | 适宜 -A  |
| 3  | $T_{基} \in (T_1, T_2), T_{搭配} \in (T_1, T_2)$         | $T_{混合} = T_{适宜}$                                   | 适宜 -A  |
| 4  | $T_{基} \in (T_1, T_2), T_{搭配} > T_2$ 或 $T_{搭配} < T_1$ | $T_{混合}$ 是否“适宜”，还需要根据“搭配矿”的最低同化温度及其配比来判定            | 不定 -D  |
| 5  | $T_{基} > T_2, T_{搭配} < T_1$                           | 二者的同化性高低“互补”，但 $T_{混合}$ 是否“适宜”，还要依据二者的最低同化温度及其配比来判定 | 互补 -B  |
| 6  | $T_{基} < T_1, T_{搭配} > T_2$                           | 二者的同化性高低“互补”，但 $T_{混合}$ 是否“适宜”，还要依据二者的最低同化温度及其配比来判定 | 互补 -B  |
| 7  | $T_{搭配} > T_{基} > T_2$                                | $T_{混合}$ 较 $T_{基}$ 更加偏离 $T_{适宜}$                    | 不适宜 -C |
| 8  | $T_{搭配} < T_{基} < T_1$                                | $T_{混合}$ 较 $T_{基}$ 更加偏离 $T_{适宜}$                    | 不适宜 -C |

注：通过统计大量实际生产数据，解析出烧结混合矿最低同化温度的适宜范围为 1240~1290℃，即  $T_1 = 1240^\circ\text{C}$ ， $T_2 = 1290^\circ\text{C}$ 。

表 4 基于同化性的铁矿粉配合性评价结果

Table 4 Evaluation results of iron ore powders matching based on assimilation

| 矿粉 | OB | OA | OD | OG | OE | OC | OH | OF | OO | OI | OQ | OJ | OS | OK | OM | OP | ON | OR | OL |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| OB | —  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  |
| OA | C  | —  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  |
| OD | C  | C  | —  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  |
| OG | C  | C  | C  | —  | A  | A  | A  | A  | A  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  |
| OE | C  | C  | C  | C  | —  | A  | A  | A  | A  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  |
| OC | C  | C  | C  | C  | C  | —  | A  | A  | A  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  | B  |
| OH | D  | D  | D  | D  | D  | D  | —  | A  | A  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  |
| OF | D  | D  | D  | D  | D  | D  | A  | —  | A  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  |
| OO | D  | D  | D  | D  | D  | D  | A  | A  | —  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  | D  |
| OI | B  | B  | B  | B  | B  | B  | A  | A  | A  | —  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C  |
| OQ | B  | B  | B  | B  | B  | B  | A  | A  | A  | A  | —  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C  |
| OJ | B  | B  | B  | B  | B  | B  | A  | A  | A  | A  | A  | —  | C  | C  | C  | C  | C  | C  | C  |
| OS | B  | B  | B  | B  | B  | B  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | —  | C  | C  | C  | C  | C  | C  |
| OK | B  | B  | B  | B  | B  | B  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | —  | C  | C  | C  | C  | C  |
| OM | B  | B  | B  | B  | B  | B  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | —  | C  | C  | C  | C  |
| OP | B  | B  | B  | B  | B  | B  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | —  | C  | C  | C  |
| ON | B  | B  | B  | B  | B  | B  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | —  | C  | C  |
| OR | B  | B  | B  | B  | B  | B  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | —  | C  |
| OL | B  | B  | B  | B  | B  | B  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | A  | —  |

在表 4 形式的配合性评价基础上，依据混合矿同化性与单种矿同化性之间的“线性加和”关系，即可计算出定量的配矿方案。

### 4 基于同化性的配矿方案设计及其烧结杯试验

实际烧结生产中需要多种铁矿粉混合使用，多种铁矿粉的搭配可以看作是铁矿粉两两搭配的“加

和”，而多种铁矿粉配合后的同化性适宜与否，可以通过本文上述方法进行分析。同时，考虑国内矿和国外矿搭配、精粉和富矿粉搭配、常温特性和价格等因素，对本研究涉及的 19 种铁矿粉进行烧结优化配矿设计，表 5 给出了九组优化配矿方案。

根据表 5 所列的优化配矿方案，进行了烧结杯试验和烧结矿的冶金性能测试。九组配矿方案的烧结杯技术指标和冶金性能测试结果列于表 6。

表 5 烧结杯试验方案  
Table 5 Schemes of sinter pot test

| 方案   | 中国矿 |    |    |    |    |    |    | 巴西矿 |    |    |    | 澳大利亚矿 |    |    |    |    | 南非矿 |    |    |    |
|------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|-------|----|----|----|----|-----|----|----|----|
|      | OQ  | OR | OS | OO | OP | OM | ON | OI  | OJ | OK | OL | OA    | OG | OB | OC | OD | OE  | OF | OH |    |
| YH-1 | 27  |    |    |    |    |    |    |     |    | 25 | 5  |       | 10 |    | 15 |    |     |    | 18 |    |
| YH-2 |     | 20 |    |    |    |    |    | 22  |    |    |    |       |    |    | 22 |    |     |    | 21 | 15 |
| YH-3 |     | 20 |    |    |    |    |    |     |    | 15 | 7  | 18    | 20 |    |    |    |     |    |    | 20 |
| YH-4 |     |    | 24 |    |    |    |    |     |    |    |    | 9     |    | 4  | 9  | 9  | 9   |    |    | 36 |
| YH-5 |     |    |    | 22 |    |    |    |     | 30 |    | 8  | 9     |    | 4  | 9  | 9  | 9   |    |    |    |
| YH-6 |     |    |    |    | 22 |    |    | 30  |    |    | 8  | 9     |    | 4  | 9  | 9  | 9   |    |    |    |
| YH-7 |     |    |    |    | 22 |    |    | 30  |    |    | 8  | 9     |    | 4  | 9  | 9  | 9   |    |    |    |
| YH-8 |     |    |    |    |    | 22 |    | 30  |    |    | 8  | 9     |    | 4  | 9  | 9  | 9   |    |    |    |
| YH-9 |     |    |    |    |    |    | 22 | 30  |    |    | 8  | 9     |    | 4  | 9  | 9  | 9   |    |    |    |

表 6 配矿方案的烧结指标和冶金性能比较

Table 6 Comparison of ore matching schemes parameters of sinter pot test and metallurgy properties

| 方案   | 配水量 % | 垂直烧结速度 /<br>(mm·m in <sup>-1</sup> ) | 成品率 % | 利用系数 /<br>(t·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 转鼓指数 % | 粒度组成 % |         |        | 固体燃耗 /<br>(kg·t <sup>-1</sup> ) | RI /<br>% | RDI <sub>-0.5</sub> /<br>% | RDI <sub>+3.15</sub> /<br>% |
|------|-------|--------------------------------------|-------|---|--------|--------|---------|--------|---------------------------------|-----------|----------------------------|-----------------------------|
|      |       |                                      |       |   |        | >25mm  | 25~10mm | 10~5mm |                                 |           |                            |                             |
| YH-1 | 6.46  | 19.32                                | 78.87 | 1.43  | 65.67  | 57.10  | 25.87   | 17.03  | 59.12                           | 88.8      | 8.1                        | 62.8                        |
| YH-2 | 6.43  | 22.39                                | 83.74 | 1.74  | 65.34  | 49.07  | 33.74   | 17.19  | 54.70                           | 87.6      | 7.4                        | 63.9                        |
| YH-3 | 6.37  | 19.91                                | 79.24 | 1.46  | 65.67  | 49.73  | 32.43   | 17.84  | 59.21                           | 88.6      | 6.7                        | 62.8                        |
| YH-4 | 6.56  | 27.45                                | 83.73 | 2.06  | 66.00  | 49.34  | 30.93   | 19.74  | 56.43                           | 94.7      | 5.6                        | 68.7                        |
| YH-5 | 6.87  | 21.74                                | 83.63 | 1.65  | 65.33  | 50.25  | 34.31   | 15.44  | 57.27                           | 90.2      | 9.3                        | 56.1                        |
| YH-6 | 8.04  | 30.30                                | 82.53 | 2.18  | 61.33  | 40.64  | 38.62   | 20.74  | 57.67                           | 84.2      | 6.6                        | 67.2                        |
| YH-7 | 7.33  | 26.25                                | 82.25 | 1.91  | 63.33  | 46.63  | 33.79   | 19.58  | 58.15                           | 96.3      | 6.7                        | 65.5                        |
| YH-8 | 7.60  | 26.18                                | 81.99 | 1.87  | 64.00  | 45.34  | 37.80   | 17.79  | 59.49                           | 87.2      | 6.1                        | 67.7                        |
| YH-9 | 7.30  | 26.50                                | 80.67 | 1.89  | 63.33  | 50.91  | 29.50   | 20.53  | 60.88                           | 86.1      | 6.1                        | 67.8                        |

注:烧结杯大小 200mm×550mm;烧结矿目标 S<sub>D2</sub> 质量分数为 5.15%, MgO 质量分数为 2.26%, R<sub>2</sub>=2.0(YH-1、YH-2和 YH-3的 R<sub>2</sub>为 1.95)。还原性能测试气体组成: CO 体积分数为 30%, N<sub>2</sub> 体积分数为 70%;流量为 15 L·m in<sup>-1</sup>; T=900℃, 3h 低温还原粉化性能测试气体组成: CO 体积分数为 20%, CO<sub>2</sub> 体积分数为 20%, N<sub>2</sub> 体积分数为 60%;流量为 15 L·m in<sup>-1</sup>; t=500℃, 1h

由表 6 可知,九组烧结杯的试验结果均良好。特别是大量使用劣质铁矿粉的方案 YH-6、YH-7、YH-8和 YH-9,其中澳大利亚褐铁矿和半褐铁矿配比达到 40%,巴西球精粉达到 8%,仍表现出优良的烧结指标和冶金性能,同时可以明显降低烧结配矿成本,这也证明了基于同化性互补配矿的优越性。

另外,九组优化配矿方案的烧结试验结果表明,基于本研究方法,可明显地扩大铁矿粉的使用范围,深化了多种类型铁矿粉、多来源铁矿粉搭配使用的理念,提高铁矿粉使用效率。为兼顾铁矿粉资源战略、实现钢铁企业的“降本增效”以及铁矿粉高效使用新技术的开发提供了理论依据和技术对策。

显,澳大利亚的褐铁矿、半褐铁矿、赤铁矿以及南非赤铁矿的同化性较高,而巴西赤铁矿和国产磁铁矿的同化性较低。

(2) S<sub>D2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 以黏土形式存在时会提高铁矿粉的同化性,二者分别以石英和三水铝石形态存在时则降低同化性。铁矿粉的气孔率和烧损含量对同化性起促进作用;铁矿物晶粒小且呈豆状、片状的铁矿粉同化性高,而晶粒大且呈块状、板状的铁矿粉同化性低。

(3) 实际烧结过程要求混合矿有合适的同化性,故在烧结配矿时应运用基于铁矿粉同化性互补的配矿方法,以求更好地满足低温烧结技术条件。

## 5 结论

(1) 不同产地、类型的铁矿粉,其同化性差别明

## 参 考 文 献

[1] Debrincat D, Loo C E, Hutchens M F. Effect of iron ore particle

- assimilation on sinter structure ISIJ Int 2004, 44(8): 1308
- [2] Yang L X, Davis L. Assimilation and mineral formation during sintering for blends containing magnetite concentrate and hematite/pisolite sintering fines ISIJ Int 1999, 39(3): 239
- [3] Wu S L, Liu Y, Du J X, et al. New concept of iron ores sintering basic characteristics J Univ Sci Technol Beijing 2002, 24(3): 254  
(吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 254)
- [4] Wu S L, Liu Y, Du J X, et al. Experimental study of assimilation ability between iron ores and CaO. J Univ Sci Technol Beijing 2002, 24(3): 258  
(吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿粉与 CaO 同化能力的试验研究. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 258)
- [5] Ohtomo T, Takasaki Y, Kawaguchi T. Properties of core ore in quasi-particle required for large amounts usage of limonite ores in iron ore sintering process ISIJ Int 2005, 45(4): 532
- [6] Yang L X, Witchard D, Yu Z N. Introduction of pisolitic goethite ore into a Chinese ore blend ISIJ Int 2000, 40(7): 647
- [7] Ohtomo T, Taguchi N, Kasai E. Suppression of the formation of large pores in the assimilated parts of sinter produced using pisolitic ores ISIJ Int 1996, 36(11): 1338
- [8] Loo C E. A Perspective of goethitic ore sintering fundamentals ISIJ Int 2005, 45(4): 436
- [9] Wu S L, Du J X, Ma H B, et al. Fluidity of liquid phase in iron ores during sintering J Univ Sci Technol Beijing 2005, 27(3): 291  
(吴胜利, 杜建新, 马洪斌, 等. 铁矿粉烧结液相流动特征. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 291)
- [10] Wu S L, Pei Y D, Chen H, et al. Evaluation on liquid phase fluidity of iron ores in sintering J Univ Sci Technol Beijing 2008, 30(10): 1095  
(吴胜利, 裴元东, 陈辉, 等. 铁矿粉烧结液相流动性评价. 北京科技大学学报, 2008, 30(10): 1095)
- [11] Pei Y D. Ore Proportioning During Sintering and its Application Technology [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing 2008: 50  
(裴元东. 铁矿粉的烧结配合性及其应用技术研究 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2008: 50)

## (上接第 281 页)

- (顾铁凤. 采场飓风冲击灾害分析. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26: 11)
- [7] Zheng Z H, Zha Z X. Theoretical analysis of high pressure shock wave caused by roof falling in underground space Tunnel Constr 2004, 24(1): 15  
(郑志辉, 查支祥. 地下空间顶部塌落产生高压气浪的理论分析. 隧道建设, 2004, 24(1): 15)
- [8] Li D Y, Zhang K Z, Yu H L, et al. Research on the mine shock air bump and anti-shock bulkhead J Shandong Univ Sci Technol 2008, 27(2): 13  
(李大勇, 张开智, 俞海玲, 等. 矿震冲击气浪与防冲密闭研究. 山东科技大学学报, 2008, 27(2): 13)
- [9] Yan G C, Xi J B, Song X M, et al. Simulation of lashing blast of compressed air in coal face J Liaoning Tech Univ Nat Sci 2009, 28(2): 177  
(严国超, 息金波, 宋选民, 等. 采场冲击气浪的灾害模拟. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(2): 177)
- [10] Zheng H C, Li M, Zhang J, et al. The prediction of the hazard caused by weighting over great extent of top layer in mine worked-out section area Ind Miner Process 2005, 34(11): 9  
(郑怀昌, 李明, 张军, 等. 采空区顶板大面积积冒落危害预测. 化工矿物与加工, 2005, 34(11): 9)