

## 铁矿粉吸液特性对烧结体固结强度的影响

彭建华<sup>1</sup>, 李和平<sup>2</sup>

(1. 上海梅山钢铁股份有限公司 炼铁厂, 江苏 南京 210039; 2. 宝钢股份研究院 梅钢技术中心, 江苏 南京 210039)

**摘要:** 本文采用微型烧结、矿相分析等方式研究了4种典型富矿粉的吸液特性及其吸液特性对烧结体固结强度的影响。研究表明: 在1 280 ℃、以配加质量分数为15% CaO的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>试剂作为黏附粉、典型富矿粉粗颗粒作为核颗粒条件下, 各铁矿粉吸液深度差异很大; 褐铁矿因其结构疏松吸液深度最大, 其有效液相流动性最小, 而致密赤铁矿吸液深度小, 其有效液相流动性大; 同时, 不同铁矿粉核颗粒烧结体的固结强度随着核颗粒吸液深度的增加而降低, 随着有效液相流动性的增加而升高。试验结果通过单种矿烧结杯试验得到进一步验证。实际生产中可采取合理配矿或优化烧结工艺的方式抑制强吸液性矿种的负面影响, 从而提高烧结矿的固结强度。

**关键词:** 铁矿粉; 吸液特性; 液相流动性; 固结强度

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)02-0038-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.02.023

## Effect of liquid absorption characteristics of iron ore powder on consolidation strength of sintered body

PENG Jianhua<sup>1</sup>, LI Heping<sup>2</sup>

(1. Iron-making Plant, Shanghai Meishan Iron & Steel Co., Ltd., Nanjing 210039, Jiangsu, China;

2. Meigang Technology Center of Baosteel Research Institute, Nanjing 210039, Jiangsu, China)

**Abstract:** The liquid absorption characteristics of four typical rich ore powders and their effects on the consolidation strength of sintered bodies are studied by micro sintering, ore phase analysis. The results show that, at 1 280 ℃, the absorption depth of each iron ore powder is very different under the conditions of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reagent with 15% CaO as the adhesive powder and the coarse particles of typical rich ore powder as the nuclear particles; limonite has the largest liquid absorption depth and the smallest effective liquid phase fluidity due to its loose structure, while dense hematite has a small liquid absorption depth and large effective liquid phase fluidity. At the same time, the consolidation strength of the sintered bodies of different iron ore powder nuclear particles decreases with the increase of the absorption depth of the nuclear particles, and increases with the increase of the effective liquid phase fluidity. The test results are further verified by the single-ore sintering cup test. In actual production, reasonable ore blending or optimizing the sintering process can be adopted to inhibit the negative impact of strong liquid absorption minerals, so as to improve the consolidation strength of sinter.

**Key words:** iron ore powder; liquid absorption characteristics; liquid phase fluidity; consolidation strength

众所周知, 掌握铁矿粉的性能, 尤其是铁矿粉的高温烧结特性, 是优化烧结配矿和提高烧结矿产质量指标的重要基础。吴胜利等<sup>[1]</sup>系统提出

了铁矿粉烧结基础特性的概念(同化性、液相流动性、黏结相强度、铁酸钙生成特性、连晶特性等)。不同种类铁矿粉的烧结基础特性存在明显差

收稿日期: 2024-09-03; 修回日期: 2025-03-26

作者简介: 彭建华(1970—), 男, 高级工程师, 从事炼铁行政管理、铁前生产及工艺技术管理工作。

通信作者: 李和平(1971—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事炼铁、烧结工艺技术研发及管理工作。

异,对于指导优化互补配矿有重要意义<sup>[2-3]</sup>。曹立刚<sup>[4]</sup>以包钢混合精矿和钒钛精矿的高温特性为基础,研究了不同配矿条件下的高温特性变化,得到通过配加10%钒钛精矿可提高烧结矿的强度。刘自民等<sup>[5]</sup>根据铁矿粉高温特性互补原理,验证了基于铁矿粉高温特性的优化配矿方法的可行性。在此基础上又拓展出铁矿粉的吸液特性<sup>[6-8]</sup>、熔融特性<sup>[9]</sup>等高温特性概念。

根据“准颗粒”模型<sup>[10-11]</sup>,制粒小球由核颗粒(大颗粒铁矿粉)和黏附粉(由小粒度铁矿粉、熔剂、燃料组成)组成。随着烧结温度的升高,黏附粉中接触条件较好的小粒度铁矿粉和熔剂发生同化反应生成低熔点物质,然后在更高温度条件下生成液相(初生液相——即由黏附粉内的铁矿粉和熔剂直接或间接反应生成的液相)。高温状态下生成的初生液相,将不可避免地地与核颗粒发生反应,并生成新的二次液相。

吸液性是表征铁矿粉核颗粒与黏附粉初生液相反应程度的一种高温特性。当该反应程度高时,意味着铁矿粉核颗粒中的酸性脉石更多地融入初生液相,形成低碱度的二次液相,因黏度升高而液相流动性下降,从而导致起黏结作用的有效液相量减少,这一现象类似于铁矿粉核颗粒抢夺了烧结有效液相,称之为铁矿粉“吸液特性”<sup>[6,12]</sup>。一般而言,在混合料的核颗粒中,高吸液性铁矿粉的比例较高时,因其与初生液相发生大量吸液反应而导致低碱度二次液相增加、有效液相流动性减小,进而不利于提高烧结体的固结强度<sup>[13]</sup>。因此,实际烧结过程中,把握铁矿粉的吸液特性,对于烧结矿的液相有效固结具有重要的意义。

## 1 研究方法及物料特性

### 1.1 研究方法

试样采用微型烧结、矿相分析等方法,以化学试剂 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 与 $\text{CaO}$ ( $<0.15\text{ mm}$  粒度)按质量比为85:15配置成混合物,模拟黏附粉,将0.5 g混合物在20 MPa压力下压制成 $\varnothing 8\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 小饼试样;以典型干燥后铁矿粉粗颗粒( $>1\text{ mm}$  粒度)在20 MPa压力下压制成 $\varnothing 20\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的矿饼模拟核颗粒,并将黏附粉小饼置于其上,在 $1\ 280\text{ }^\circ\text{C}$

温度条件下进行微型烧结试验。

通过测定模拟核颗粒铁矿粉小饼与黏附粉初生液相发生吸液反应后,生成低碱度二次液相层在核颗粒层的渗透深度,以此表征铁矿粉作为核颗粒时对有效液相的影响程度,用吸液深度( $h$ )表征。铁矿粉吸液深度的示意如图1所示。

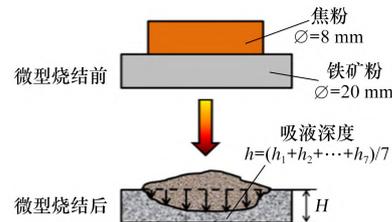


图1 铁矿粉吸液性示意

Fig. 1 Diagram of absorption characteristics on iron ore powder

此外,试验采用垂直投影面积法测量铁矿粉试样表面的液相流动性,以此表征有效液相流动性指数;采用微型烧结铁矿粉固结强度试验法,以配加质量分数为15%  $\text{CaO}$ 的 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 试剂作为黏附粉,以用典型富矿粉(1.8~2.0 mm 粒度)颗粒作为核颗粒,固定核粉比为6:4,通过圆盘造球法制粒,将烘干后的准颗粒进行微型烧结,烧结温度设定为 $1\ 280\text{ }^\circ\text{C}$ ,之后将试样取出测试其固结强度(落下强度)。

最后,采用单种矿烧结杯试验验证,其方法:烧结杯试验所用原燃料取自某厂烧结生产现场,以单种矿 $>2.0\text{ mm}$  粒度颗粒作为核颗粒, $<0.5\text{ mm}$  粒度颗粒作为黏附粉,核粉比为6:4。烧结杯试验参数:混合料水分为 $(6.8 \pm 0.15)\%$ ,试验烧结料层为700 mm,点火时间为120 s,点火温度设定为 $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ ,点火和冷却负压为8 kPa,烧结负压为15.5 kPa;混合料一混采用人工混合,二混在混合机中混合6 min,烧结混合料的实际上料量根据料层确定;烧结冷却至 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 时倒料,进行落下和筛分及转鼓指数测定。

### 1.2 物料特性

#### 1.2.1 铁矿粉化学成分

试验主要针对4种常用富矿粉(A、B、C、D分别为澳洲褐铁矿、澳洲半褐铁矿、巴西低硅赤铁矿、巴西高硅赤铁矿)进行吸液特性研究。4种铁矿粉主要化学成分及烧损如表1所示。

表 1 4 种铁矿粉主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions and losses on ignition of 4 iron ore powder

%

铁矿粉	TFe	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	P	水分	烧损
A	58.59	4.10	0.10	1.55	0.31	0.007	0.042	7.55	10.97
B	62.13	3.37	0.11	1.87	0.33	0.018	0.098	6.80	5.69
C	64.87	1.93	0.11	1.61	0.12	0.012	0.059	5.93	3.05
D	63.28	5.83	0.10	1.05	0.79	0.008	0.046	6.85	2.19

由表 1 可知, 矿粉 B、C 和 D 的  $w(\text{TFe})$  介于 62%~65%, 属于全铁含量较高的铁矿粉, 矿粉 A 的  $w(\text{TFe})$  低于 60%, 属于全铁含量低的矿粉; 矿粉 A、D 和矿粉 B、C 分别属于高 Si 矿和低 Si 矿;  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  介于 1%~2%, 属于中等  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量铁矿粉; 此外, 除澳洲褐铁矿烧损较高外, 其余矿粉烧损皆处于中等和较低水平。

### 1.2.2 粒度组成

试验采用的 4 种常用富矿粉的粒度组成及平均粒径见表 2。由表 2 可知, 4 种富矿粉的粒度组成呈现出  $C > A > D > B$ 。一般而言, 铁矿粉中粒径大于 1.0 mm 的部分为核颗粒, 粒径介于 0.25 ~ 1.00 mm 的为中间颗粒, 而粒径小于 0.25 mm 的部分为黏附粉。黏附粉被覆于核颗粒表面形成烧结准颗粒, 而中间粒级颗粒在制粒过程中既不作核颗粒也不作黏附粉。因此, 核颗粒和黏附粉的比例对准颗粒形成及透气性有着重要的影响。4 种铁矿粉的核颗粒、中间颗粒及黏附粉的比例如表 3 所示。

不同类型的富矿粉中适合作为“核颗粒”、“黏附粉”的粒级占矿粉总量的比例差异较大。其中, 铁矿粉 A、C 作为黏附粉粒级比例较少, 作为核颗粒比例较高; 而 B、D 作为黏附粉粒级比例较多, 而作为核颗粒的粒级比例较少。

### 1.2.3 矿物组成

以 4 种铁矿粉全粒级为研究对象, 按照 X 射线衍射分析制样要求。先将铁矿粉在 105 °C 的烘箱中烘干 24 h, 然后取出并研磨至 <0.074 mm 粒级以下, 进行 X 射线衍射试验, 并进行矿物分析。4 种铁矿粉的 X 射线衍射图谱如图 2 所示。

由图 2 可知: A 矿粉中针铁矿的衍射峰数量多且峰值高, 赤铁矿的衍射峰数量少且峰值低, 其脉石矿物主要以石英和高岭土形式赋存; B 矿粉的含铁矿物主要以针铁矿和赤铁矿为主, 且针铁矿含量略大于赤铁矿, 脉石矿物主要以石英和高岭土矿物为主; C 和 D 矿的含铁矿物以赤铁矿为主并含有极少量的针铁矿矿物, 二者脉石矿物赋存形式较为相似, 其中 Si 元素主要以石英形式赋存, Al 元素则主要以三水铝石形式赋存, 并且在脉石矿物中还含有少量高岭土矿物。

### 1.2.4 气孔率

研究针对常温条件下和在 400 °C 焙烧 1 h 后的 4 种典型富矿粉, 采用气体吸附法进行气孔率及气孔分布等气孔特性的测定, 结果如表 4 所示。

由表 4 可知: 常温下 4 种铁矿粉的气孔率大小顺序:  $A > B > C > D$ ; 脱除结晶水后铁矿粉的气孔率都有所增加, 并且结晶水含量越高, 气孔率的增加幅度越大。不同类型铁矿粉常温下气孔率存在的差异, 主要原因在于其成矿的地质条件及成矿机理的不同。一般而言, 褐铁矿质地疏松,

表 2 4 种铁矿粉的粒度组成(质量分数)

Table 2 Particle size composition of four iron ore powder

%

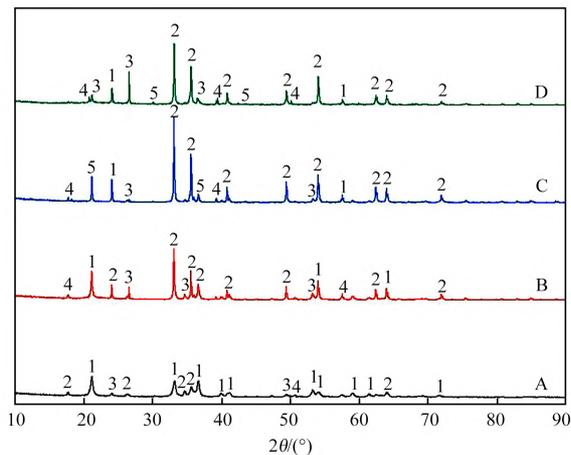
铁矿粉	粒度组成/mm								平均粒度/mm
	[0 ~ 0.15)	[0.15 ~ 0.25)	[0.25 ~ 0.50)	[0.50 ~ 1.00)	[1.00 ~ 3.15)	[3.15 ~ 6.30)	[6.30 ~ 10.00)	[10.00 ~ 15.00)	
A	0.76	0.72	2.92	11.91	33.73	25.58	15.26	9.12	4.23
B	6.23	7.51	8.31	15.10	30.10	22.29	9.72	0.74	2.63
C	2.49	2.37	6.28	13.39	26.29	23.86	13.17	12.15	4.26
D	24.51	12.12	7.76	8.79	14.76	15.12	11.72	5.22	2.77

气孔率较高,而赤铁矿的质地紧密,气孔率较低。而经 400 °C 处理后铁矿粉气孔率增加的主要原因可能在于经过 400 °C 的热处理后,铁矿粉含有的结晶水分解逸出,造成铁矿粉矿物组成和结构发生变化,在矿物内部产生一定的孔隙和裂纹,导致气孔率增加。

表 3 4 种铁矿粉中核颗粒、中间颗粒及黏附粉的占比  
(质量分数)

Table 3 Proportion of core particles, intermediate particles and adhesion powder of four iron ore powder

铁矿粉	核颗粒 ( >1.0 mm)	中间颗粒 (0.5 ~ 1.0 mm)	黏附粉 ( <0.5 mm)	%
A	83.69	14.83	1.48	
B	62.85	23.41	13.74	
C	75.47	19.67	4.86	
D	46.82	16.55	36.63	



1—针铁矿; 2—赤铁矿; 3—石英;

4—高岭土; 5—三水铝石。

图 2 全粒级铁矿粉 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction pattern of full-size iron ore powder

表 4 4 种铁矿粉脱水除结晶水前后气孔率测定结果

Table 4 Porosity measurement results before and after dehydration of four kinds of iron ore powder

铁矿粉	原矿 气孔率	脱水后 气孔率	气孔率增量 (绝对值)	气孔率增量 (相对值)	%
A	19.27	22.24	2.97	15.41	
B	11.57	13.27	1.70	14.69	
C	4.16	4.81	0.65	15.63	
D	1.47	2.07	0.60	40.82	

## 2 铁矿粉吸液特性

### 2.1 铁矿粉吸液深度

按照试验方法,4 种铁矿粉试样微型烧结后显微矿相分析分别如图 3~6 所示,吸液深度如图 7 所示。

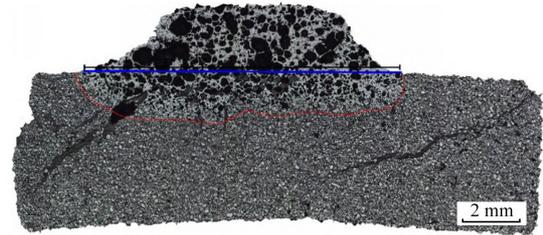


图 3 1 280 °C 条件下 A 试样的显微矿相

Fig. 3 Micrographic phase of sample A in 1 280 °C

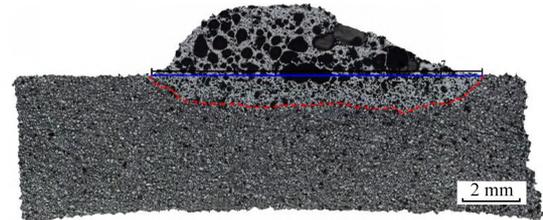


图 4 1 280 °C 条件下 B 试样的显微矿相

Fig. 4 Micrographic phase of sample B in 1 280 °C

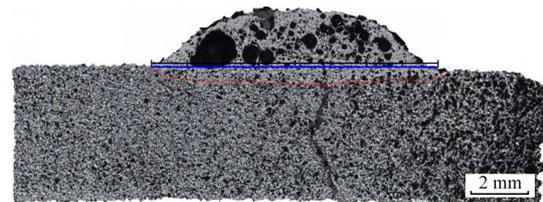


图 5 1 280 °C 条件下 C 试样的显微矿相

Fig. 5 Micrographic phase of sample C in 1 280 °C

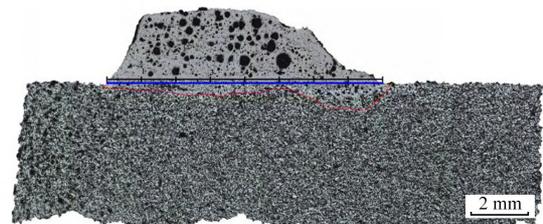


图 6 1 280 °C 条件下 D 试样的显微矿相

Fig. 6 Micrographic phase of sample D in 1 280 °C

根据图 3~6 可知,在 1 280 °C 的烧结温度下,4 种典型铁矿粉的吸液深度( $h$ ):  $h_{(A)} > h_{(B)} > h_{(D)} > h_{(C)}$ 。其中,褐铁矿的吸液深度最大,为 1.50 mm,半褐铁矿次之。主要原因:褐铁矿原矿气孔率较大,且结晶水含量较高,烧结后结晶水

逸出,使得结构疏松;赤铁矿的吸液深度较小且远低于褐铁矿,主要是赤铁矿气孔率较低,颗粒相对致密所致。

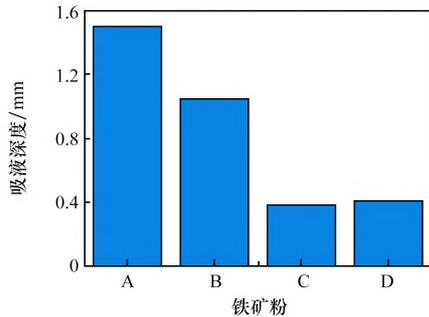


图 7 1 280 °C条件下 4 种铁矿粉试样吸液深度

Fig. 7 Suction depth of four iron ore powder sample in 1 280 °C

## 2.2 铁矿粉有效液相流动性

铁矿粉初生液相和有效液相流动性在铁矿粉烧结过程紧密关联、相互影响,共同决定烧结效果与烧结矿质量。根据微型烧结有效液相流动性试验法,测定 1 280 °C 温度条件下,以配加质量分数为 15% CaO 的  $Fe_2O_3$  试剂作为黏附粉初生液相及 4 种典型铁矿粉为核颗粒情况下试样的有效液相流动指数,结果如表 5 所示,其宏观形貌如图 8 所示。

由表 5 可知,在 1 280 °C 烧结温度条件下,4 种典型铁矿粉的有效液相流动性指数:  $C > B > D > A$ 。

由图 8 可知,在 1 280 °C 烧结温度条件下,黏附粉在不同核颗粒基座试样上的液相流动性面积不同,其中 C 试样的流动性面积较大,而 A 试样的有效液相流动性面积较小,且各试样的流动面积均小于 1 280 °C 条件下的初生液相流动面积。

研究表明,烧结体的固结强度与铁矿粉有效液相量紧密相关。而有效液相量的变化,又受到铁矿粉吸液性的显著影响<sup>[14]</sup>。1 280 °C 条件下铁矿粉试样有效液相流动性与吸液深度的关系如图 9 所示。

表 5 1 280 °C 条件下初生液相及 4 种铁矿粉的有效液相流动性指数

初生液相	A	B	C	D
1.53	0.88	1.13	1.37	1.11

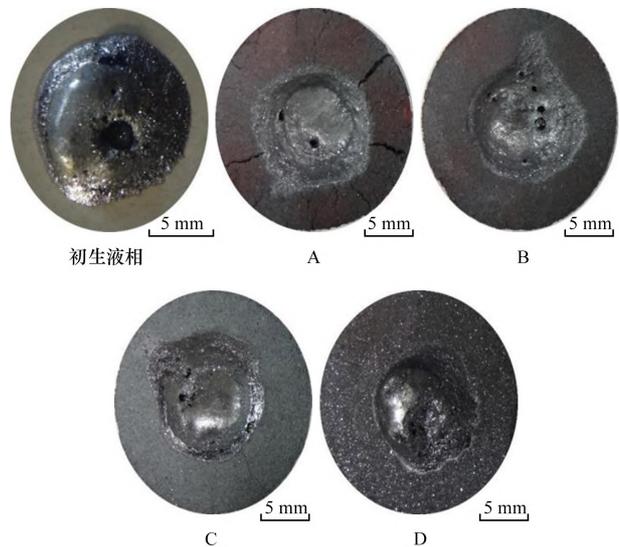


图 8 1 280 °C 条件下各试样的宏观形貌

Fig. 8 Macroscopic appearance of all sample in 1 280 °C

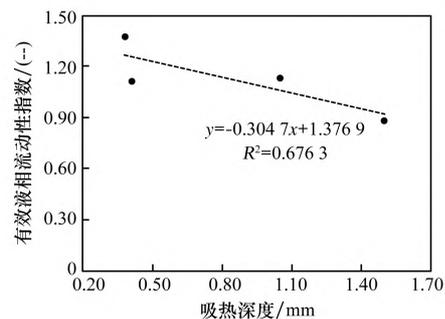


图 9 1 280 °C 条件下铁矿粉试样有效液相流动性与吸液深度的关系

Fig. 9 The relation of effective liquid phase fluidity and suction depth of all sample in 1 280 °C

由图 9 可知,在 1 280 °C 的烧结温度下,随着铁矿粉基座试样吸液深度的增加,黏附粉试样的有效液相流动性指数降低。这是由于随着反应温度的升高,黏附粉产生的初生液相与核矿石的反应程度更加剧烈,一方面随着吸液深度的增加,初生液相向核颗粒中渗透量增加,导致有效液相量减少;另一方面,随着二次液相反应的进行,核矿石中的脉石及含铁矿物成分溶解进入初生液相从而使得初生液相与核颗粒接触界面边界层的黏度增加,有效液相的流动性降低。

## 3 铁矿粉吸液特性对固结强度的影响

试验根据配料方案称取一定质量的核颗粒及黏附粉,通过圆盘造球制粒(制粒水分为 8%,制粒时间为 15 min),并筛选 2.0 ~ 3.0 mm 粒级小球

进行试验,从而得到以不同富矿粉颗粒作为核颗粒条件下烧结体的固结强度。4种富矿粉粗颗粒作为核颗粒条件下烧结体宏观形貌如图10所示,不同核颗粒所构成的烧结体固结强度对比分析如图11所示。

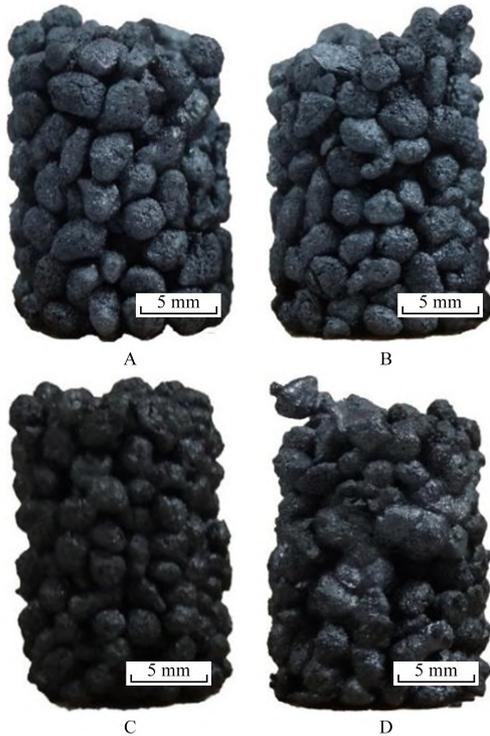


图10 不同核颗粒条件下烧结体的宏观形貌

Fig. 10 Macroscopic appearance of sintering body on difference stripped particle

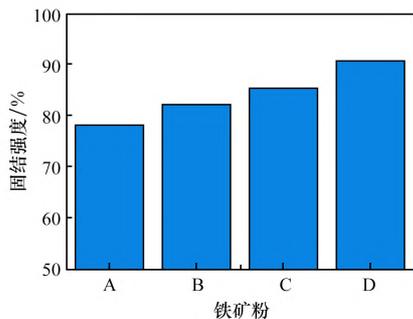


图11 不同核颗粒所构成的烧结体固结强度

Fig. 11 Consolidation strength of sintered body made from different core particle

由图10可以看出,以赤铁矿A和B作为核颗粒烧结体表面孔隙较多,液相生成较少。以赤铁矿C和D作为核颗粒的准颗粒之间黏结相黏结充分,液相呈片状黏结。结合图11可知,当以配加质量分数为15%CaO的赤铁矿试剂作为黏附粉,

致密的赤铁矿D作为核颗粒情况下,烧结体固结强度最高。

烧结体固结强度与核颗粒吸液深度的关系如图12所示,烧结体固结强度与黏附粉有效液相流动性的关系如图13所示。

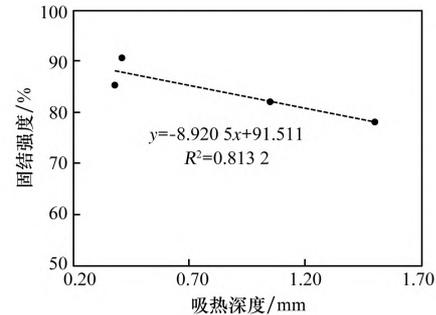


图12 烧结体固结强度与核颗粒吸液深度的关系

Fig. 12 Relationship of consolidation strength on sintered body and suction depth on care particle

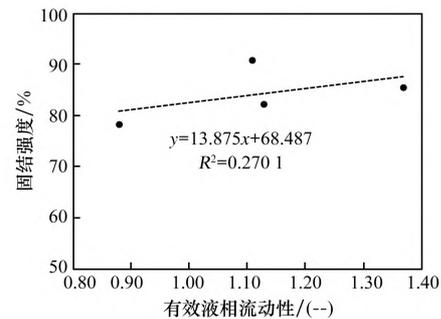


图13 烧结体固结强度与粘附粉有效液相流动性的关系

Fig. 13 Relationship of consolidation strength on sintered body and effective liquid phase fluidity on adhesion powder

由12、13可知,试样固结强度随着铁矿粉吸液深度的增加而降低,而随着有效液相流动性的增加而升高。通过对各种铁矿粉高温吸液性和有效液相的研究,可以通过不同铁矿粉的指标预测其烧结矿固结强度从而进行合理配矿。

## 4 烧结杯试验

### 4.1 烧结杯试验方案

为进一步研究铁矿粉高温吸液性和有效液相对烧结性能的影响,对以上4种指标各异的富矿粉进行烧结杯试验。熔剂及焦粉的化学成分如表6所示,综合考虑微型烧结试验方法及现场实际生产情况,烧结杯试验配矿方案如表7所示。熔剂分别包括白云石粉、生石灰及石灰石,3种熔剂在

表 6 熔剂、焦粉主要化学成分与烧损(质量分数)

Table 6 Main chemical compositions and losses on ignition of raw materials of flux and coke powder

原料名称	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	P	水分	烧损
白云石粉	4.00	30.18	20.56	0.50	0.06	4.19	44.09
生石灰	2.60	80.84	3.73	0.00	0.00	0.00	12.11
石灰石	2.14	52.97	0.96	0.68	0.00	1.43	42.04
焦粉	6.09	0.74	0.45	3.90	0.02	5.34	85.17

表 7 烧结杯试验配矿方案(质量分数)

Table 7 Blending scheme of sintering test ore

方案编号	A	B	C	D	白云石粉	生石灰	石灰石	焦粉	合计
1	83.8	0	0	0	3.50	4.30	3.90	4.50	100
2	0	83.8	0	0	3.50	4.30	3.90	4.50	100
3	0	0	83.8	0	3.50	4.30	3.90	4.50	100
4	0	0	0	83.8	3.50	4.30	3.90	4.50	100

烧结杯试验方案中质量分数分别为 3.50%、4.30%、3.90%，焦粉的质量分数为 4.5%，单种矿配入质量分数为 83.8%。

#### 4.2 烧结杯试验结果分析

4 种富矿粉烧结杯试验相关结果见表 8。由表 8 可知，方案 3 的垂直烧速度最快，因为其对应 C 矿的平均粒径较大，料层的冷态透气性较好；方案 1 的成品率最差，这是由澳洲褐铁矿的有效液相流动性最差所致，而方案 3 的成品率最高，这是因为其所对应的巴西低硅赤铁矿有较高的有效液相流动性，同时极大地降低了作为核颗粒条件下吸液性对于烧结矿固结强度的不利影响，从而使得成品率显著提高；方案 3 液相生成条件较好，C 矿抑制了核矿石的吸液性程度，从而使得烧结合成品率和垂直烧速度都得到有效提高，因此，方案 3 烧结利用系数最高，为 1.81 t/(m<sup>2</sup>·h)；4 种富矿粉单烧烧结体转鼓指数分别为 61.68%、63.95%、66.73%、65.84%，方案 3 转鼓指数最

表 8 烧结杯试验结果

Table 8 Results of sintering test

方案编号	垂直烧速度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	成品率/ %	利用系数/ (t·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	转鼓指 数/%
1	25.30	73.45	1.69	61.68
2	26.54	70.51	1.71	63.95
3	25.23	73.69	1.81	66.73
4	26.11	69.23	1.75	65.84

高。一方面是由于 C 矿 SiO<sub>2</sub> 含量较低，不易形成硅酸盐矿物；另一方面是由于 C 矿含有较高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量，可改善复合铁酸钙(SFCA)的生成量和形貌，从而改善黏结相的质量，使得烧结矿的转鼓强度得到提高。试验结果与微型烧结法烧结体固结强度排序总体一致但稍有差异，分析认为其主要与单种矿吸液特性有关外，还可能与单烧法烧结体碱度、烧结时间有关。

综合考虑垂直烧速度、成品率、利用系数及转鼓强度指数情况，方案 3 烧结杯试验产、质量指标均较好。其中方案 3 转鼓指数较其它方案有较大提升，综合上述研究，这归因于方案 3 铁矿粉较高的有效液相流动性和较低的吸液深度。故在后续配矿方案中，对于同类型矿粉，可使用铁矿粉 C 进行不同比例替代生产。

## 5 结论

(1) 在 1 280 °C 烧结温度下，不同类型铁矿粉吸液性差异大。褐铁矿因结构疏松、气孔率高且结晶水含量多，吸液深度最大；赤铁矿则因质地致密、气孔率低，吸液深度较小。

(2) 不同铁矿粉核颗粒烧结体的固结强度随着铁矿粉吸液深度的增加而降低，而随着有效液相流动性的增加而升高。试验结果通过单种矿烧结杯试验得到进一步验证，有较高有效液相流动性和较低吸液深度的铁矿粉烧结质量指标较好。

(3) 抑制核颗粒的吸液行为有利于提高烧结

矿的固结强度。一方面可根据不同铁矿粉的吸液特性进行合理配矿;另一方面可从优化烧结工艺角度出发以抑制强吸液性矿种的负面影响。

(4) 单种矿烧结杯试验对优化配矿有重要意义,可在同类型矿粉中,为不同比例矿粉替代后的烧结杯产、质量起预测作用,对于提高烧结矿的生产效率和经济效益都具有重要的实际意义。

### 参考文献:

- [1] 吴胜利,刘宇,杜建新,等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念[J]. 北京科技大学学报,2002,24(3):254-257.  
WU Shengli, LIU Yu, DU Jianxin, et al. New concept of iron ores sintering basic characteristics[J]. Chinese Journal of Engineering, 2002, 24(3): 254-257.
- [2] 阎丽娟,吴胜利,尤艺,等. 各种铁矿粉的液相流动性及其互补配矿方法的研究[J]. 烧结球团, 2013, 38(6):1-5.  
YAN Lijuan, WU Shengli, YOU Yi, et al. Study on liquid phase fluidity of iron ores and its complementary ore proportioning[J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(6):1-5.
- [3] 吴胜利,戴宇明, Dauter Oliveira, 等. 基于铁矿粉高温特性互补的烧结优化配矿[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(6):719-724.  
WU Shengli, DAI Yuming, OLIVEIRA Dauter, et al. Optimization of ore blending during sintering based on complementation of high temperature properties[J]. Chinese Journal of Engineering, 2010, 32(6): 719-724.
- [4] 曹立刚. 包钢用铁矿粉的烧结基础特性研究[J]. 烧结球团, 2005, 30(5):5-7.  
CAO Ligang. The study on basic sintering specialty of fine ores used in Baogang[J]. Sintering and Pelletizing, 2005, 30(5): 5-7.
- [5] 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.  
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.
- [6] 邓秋明,吴胜利,韩宏亮. 兴澄特钢烧结优化配矿的研究[J]. 烧结球团, 2009, 34(2):11-16.  
DENG Qiuming, WU Shengli, HAN Hongliang. Study on optimizing ore proportioning for sintering in Xingcheng special steel enterprise [J]. Sintering and Pelletizing, 2009, 34(2): 11-16.
- [7] ZHANG G L, WU S L, CHEN S G, et al. Optimization of dolomite usage in iron ore sintering process [J]. ISIJ International, 2013, 53(9):1515-1522.
- [8] WU S L, ZHANG G L. Liquid absorbability of iron ores and large limonite particle divided adding technology in the sintering process[J]. Steel Research International, 2015, 86(9):1014-1021.
- [9] 吴胜利,边妙莲,王清峰,等. 铁矿粉的烧结熔融特性及其评价方法[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(12):1526-1531.  
WU Shengli, BIAN Miaolian, WANG Qingfeng, et al. Fusion characteristics of iron ore fines and its evaluation method[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(12): 1526-1531.
- [10] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2014.  
JIANG Tao. Production technology manual of sintering and pelletizing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
- [11] 范晓慧. 铁矿烧结优化配矿原理与技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2013.  
FAN Xiaohui. Principle and technology of iron ore matching for sintering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [12] 寇明银,张众,曾旺,等. 铁矿粉烧结优化配矿及其模型研究进展[J]. 钢铁, 2022, 57(2):1-11.  
KOU Mingyin, ZHANG Zhong, ZENG Wang, et al. Research progress on optimization technology and its model of ore-blending for sinter process[J]. Iron & Steel, 2022, 57(2): 1-11.
- [13] 张国成,罗果萍,宋巍,等. 不同类型进口铁矿粉的烧结基础性能分析[J]. 烧结球团, 2021, 46(4):7-13.  
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, SONG Wei, et al. Analysis on basic sintering properties of different types of imported iron ore powder[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(4): 7-13.
- [14] 吴胜利,苏博,宋天凯,等. 铁矿粉烧结优化配矿技术的研究进展[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集 III. 上海:中国金属学会, 2015:14.  
WU Shengli, SU Bo, SONG Tiankai, et al. Research progress of optimization technology of ore-blending for sintering[C]//Proceedings of the 10th China Iron and Steel Annual Conference and the 6th Baosteel Academic Annual Conference III. Shanghai: The Chinese Society for Metals, 2015: 14.