

中钛型磁铁精矿对烧结性能影响的试验

蒋大军

(攀枝花钢钒有限公司炼铁厂, 四川 攀枝花 617024)

摘要: 攀枝花高铁型精矿($w(\text{TiO}_2) > 12.5\%$)烧结技术经济指标差, 一种 $w(\text{TFe})=55\%$ 、 $w(\text{TiO}_2)=9\%$ 、粒度小于0.074 mm粒级质量分数达到80%以上的中钛型精矿, 按一定比例配入高铁型精矿烧结, 能强化制粒、降低熔点、增加液相量而改善烧结矿性能指标, 最突出的价值在于节约高价富矿粉的用量, 降低烧结矿成本。该精矿化学成分、矿物组成与粒度分布、制粒性能、烧结性能与高铁型精矿有较大的差异, 在实验室与烧结机上进行了系统的试验研究。结果表明, 采用中钛型精矿替代部分高铁型精矿, 混合料粒度组成改善, 烧结速度加快, 增产效果明显, 每增加10%中钛型精矿, 增产幅度达到5.35%, 可弥补高铁型精矿烧结利用系数低的缺陷。采用中钛型精矿替代部分高铁型精矿, 烧结矿矿物组成改善, 铁酸钙体积分数呈增加趋势且高于基准期, 钙钛矿呈减少趋势, 硅酸盐也呈增加趋势, 冶金性能变化不大。工业试验结果表明, 采用25%中钛型精矿替代高铁型精矿, 利用系数比基准期上升0.023 t/(m²·h), 转鼓指数上升0.16%, 固体燃耗下降, 烧结总体效果优于高铁型精矿烧结。

关键词: 中钛型精矿; 制粒性能; 烧结特性; 矿物组成与结构; 综合效果

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)05-0018-07

Experiment on influence of sintering properties with a medium titanium magnetite concentrate

JIANG Da-jun

(Ironmaking Plant, Panzhihua Vanadium Steel Co., Ltd., Panzhihua 617024, Sichuan, China)

Abstract: As technical and economic indexes were worse with high titanium concentrate sintering, when a medium titanium concentrate of iron content 55%, TiO_2 9%, -0.074 mm size fraction more than 80% matched into high titanium concentrate of TiO_2 more than 12.5% sintering by suitable proportion what could strengthen granulation, lower melting point, increase amount of liquid phase and improve the sinter performance indexes so that the most prominent value was saving high price rich ore consumption and reducing sinter cost. The system experiment research was achieved in laboratory and sintering machine as chemical composition, mineral composition and particle size distribution of this medium titanium concentrate is more different comparing with high titanium concentrate. With medium titanium concentrate replacing part of high titanium concentrate sintering, experiment results in laboratory showed that mix particle size was improved, sintering speed accelerated, increasing yield effect was obvious, the rate of increasing output reached 5.35% by each increasing 10% medium titanium concentrate so that can make up the defects of low utilization coefficient of high titanium concentrate sintering. On the other hand, sinter mineral composition was improved, content of calcium ferrite increased and was higher than the reference period, perovskite showed a trend of decreasing, silicate content also increased, metallurgical properties had no change. With 25% medium titanium concentrate insteading of high titanium concentrate, the industrial test results showed that utilization coefficient rose 0.023 t/(m²·h), drum index increased 0.16%, solid fuel consumption decreased, so the sintering overall effect was superior than high titanium concentrate sintering.

Key words: medium titanium concentrate; prilling property; sintering characteristic; mineral composition and structure; comprehensive effect

钒钛磁铁精矿按 TiO_2 质量分数多少可分为高铁型、中钛型、低钛型3类。高铁型精矿 $w(\text{TiO}_2)=10\% \sim 15\%$, 中钛型 $w(\text{TiO}_2)=5\% \sim 10\%$, 低钛型 $w(\text{TiO}_2) < 5\%$ 。攀西地区存在部分高铁低钛的钒钛

磁铁矿资源, 其精矿铁品位为55%, $w(\text{TiO}_2)=9\%$, 小于0.074 mm粒级达到80%以上, 属中钛型钒钛磁铁精矿, 与现有的攀枝花精矿比较, 可磨可选性好, 精矿铁高、钛低、钒高、硫低、粒度细, 用于替代部分

作者简介: 蒋大军(1965—), 男, 大学本科, 高级工程师; E-mail: jiangdajun1@sina.com; 收稿日期: 2017-09-29

攀精矿, 可提高烧结矿品质或节约价格昂贵的富矿粉(或进口矿), 对改善烧结矿产质量和高炉冶炼的技术经济指标具有重要的作用。

中钛型精矿化学成分、矿物组成和粒度分布与高钛型精矿有较大的差异, 其烧结性能必然也有较大的不同^[1-10], 为此进行了系统的试验研究, 探索中钛型精矿使用比例与配矿结构对烧结性能与技术经济指标的影响, 为工业应用、提高烧结矿品质、降低

成本提供依据, 应用实践取得了明显效果。

1 中钛型精矿基础性能

1.1 化学成分

攀精矿与中钛型精矿原料成分见表1。由表1可见, 与高钛型攀精矿相比, 中钛型精矿具有TFe高(高1.08%)、TiO₂低(低3.32%)、CaO高、Al₂O₃低、S低、粒度细(小于0.074 mm粒级高16.86%)的特点。

表1 攀精矿与中钛型精矿原料成分

Table 1 Composition of high titanium and medium titanium magnetite concentrate

原料名称	TFe	FeO	SiO ₂	CaO	V ₂ O ₅	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	S	P	H ₂ O	%
攀精矿	53.73	31.94	3.32	1.15	0.56	12.51	2.78	3.76	0.76	0.00	10.15	67.47
中钛型精矿	54.81	30.59	5.07	1.55	0.58	9.19	2.86	3.13	0.62	0.03	10.11	84.33

1.2 精矿矿物组成

攀精矿和中钛型精矿的物相组成及体积分数见表2。由表可知, 中钛型精矿与攀精矿物相组成差别不大, 均由钛磁铁矿、钛铁矿、硅酸盐相、尖晶石、黄铁矿和磁黄铁矿构成, 钛磁铁矿的主要晶形有不规则三角形、四边形、细条形、多边形、浑圆形。两者的主要差别在于: (1) 中钛型精矿的含钛矿物(钛铁矿、钛赤铁矿等)、尖晶石、硅酸盐相均比

攀精矿低; (2) 攀精矿中铁、钛主要以网格状的钛铁晶石(2FeO·TiO₂)和钛铁矿(FeO·TiO₂)的形式存在, 属致密型共生, 而中钛型精矿中铁、钛主要以细丝状和不规则的网格状钛铁矿的形式存在; (3) 中钛型精矿中的钛磁铁矿粒度范围为0.002~0.170 mm, 攀精矿中的钛磁铁矿粒度范围为0.002~0.400 mm, 中钛型精矿的粒度明显比攀精矿细; (4) 与攀精矿相比, 中钛型精矿边缘呈锯齿状多, 呈浑圆平滑形状少。

表2 精矿物相组成及体积分数

Table 2 Mineral phase composition and volume content of vanadium titanium magnetite concentrate

名称	钛铁矿 FeO·TiO ₂	钛磁铁矿 FeO·(Fe·Ti) ₂ O ₃	钛赤铁矿 (Fe·Ti) ₂ O ₃	硅酸盐相	尖晶石 MgO·Al ₂ O ₃	硫化物 ^①
攀精矿矿物体积分数/%	2~3	76~79	1~3	16~19	2~4	1~2
中钛型精矿矿物体积分数/%	1~3	77~80	—	14~17	1~3	0.5~1
攀精矿矿物粒径/mm		0.002~0.400				0.004~0.050
中钛型精矿矿物粒径/mm		0.002~0.170				0.004~0.070

①为黄铁矿(FeS₂)和磁黄铁矿(Fe_{1-x}S)。

1.3 对烧结混合料熔化温度的影响

混合料软熔温度测定结果见表3。由表可知, 随着中钛型精矿配比增加, 混合料初熔和熔化温度

表3 混合料软熔温度测定结果

Table 3 Determination results of mixture softening and melting temperature

编号	中钛型精矿配比/%	初熔温度/℃	熔化温度/℃
B2	10	1 311	1 417
B3	20	1 302	1 401
B4	30	1 289	1 389
B5	40	1 280	1 374
B6	50	1 274	1 366

均下降。主要是中钛型精矿中含钛矿物(钛铁矿、钛赤铁矿等)、尖晶石(熔点为1 495 ℃)等高熔点物质体积分数降低。对烧结而言, 混合料初熔、熔化温度下降, 有利于液相早期生成而改善混合料的烧结性能。

2 实验室试验

2.1 试验方法

烧结试验在φ300 mm×800 mm烧结杯中进行, 点火负压为6 000 Pa, 烧结负压为12 000 Pa, 点火时间为2 min。固定料层厚度为650 mm, 烧结杯铺底料粒度为10~20 mm, 铺底料厚度为20 mm。

原料条件为高钛型精矿(攀精矿)+巴西矿+国内高粉+国内中粉,中钛型精矿按一定比例配入,替代部分攀精矿,调节其他矿石配比,燃料固定,熔剂配比微调,保持烧结矿成分稳定。

2.2 单烧试验

攀精矿和中钛型精矿单烧试验结果见表4。由表4可见,单烧攀精矿与中钛型精矿两种精矿的制粒与烧结性能具有明显的差别,中钛型精矿混合料

粒度优于攀精矿。烧结性能与攀精矿对比,中钛型精矿烧结速度快,烧结时间短,利用系数高,烧结矿结晶时间短,强度低,成品率低,烧结矿粒度细。因此,实际生产不宜单独烧结中钛型精矿,需要与其他矿石搭配使用,发挥中钛型精矿制粒性能好、熔点低、 $w(\text{TiO}_2)$ 低的优势,这正是克服攀精矿制粒性能差、 $w(\text{TiO}_2)$ 高、烧结液相量少等缺陷需要采取的强化措施之一。

表4 单烧精矿试验结果

Table 4 Sintering test results with a single iron concentrate

单烧原料	湿筛混合料平均粒径/mm	干筛混合料平均粒径/mm	烧结时间/min	大于5 mm成品率/%	烧结速度/(mm·min ⁻¹)	利用系数/(t·m ⁻² ·h ⁻¹)	转鼓指数/%
攀精矿	4.54	3.60	35.67	62.75	17.80	1.19	58.67
中钛型精矿	5.33	3.87	31.03	60.20	20.95	1.34	55.33

2.3 中钛型精矿比例对烧结性能影响的试验

2.3.1 对混合料粒度的影响

不同中钛型精矿比例试验结果见表5。由表5可见,随着中钛型精矿配比提高,混合料粒度改善,1~3 mm与0~1 mm粒级质量分数明显减少,平均

粒度增大,主要原因是中钛型精矿粒度较细,小于0.074 mm粒级质量分数达到84.5%,高于攀精矿的65%,粒度细比表面积增大,制粒时与水分的毛细张力增加,有利于增强黏结性能,改善了混合料的粒度组成,强化烧结时能够加快垂直烧结速度与提高料层。

表5 不同中钛型精矿比例试验结果

Table 5 Sintering experiment results with different ratio of medium titanium magnetite concentrate

试验号	中钛型精矿配比/%	湿筛混合料平均粒径/mm	干筛混合料平均粒径/mm	烧结速度/(mm·min ⁻¹)	大于5 mm成品率/%	利用系数/(t·m ⁻² ·h ⁻¹)	转鼓指数/%
B1	0	2.79	2.39	18.07	66.55	1.197	56.67
B2	10	3.82	2.83	20.41	61.46	1.283	55.33
B3	20	4.33	3.27	21.78	63.76	1.434	54.67
B4	30	3.89	3.00	22.99	61.52	1.445	55.67
B5	40	4.24	3.06	24.46	59.22	1.480	56.67
B6	50	4.02	2.96	24.51	59.55	1.476	58.67
B7	74	4.43	3.29	26.00	56.04	1.497	57.33
试验平均值	37.3			23.36	60.26	1.436	56.39
与基准B1对比	37.3			+5.29	-6.29	+0.24	-0.28

2.3.2 烧结负压与废气温度

中钛型精矿烧结杯试验废气温度变化和负压变化分别如图1和图2所示。

由图1可知,B1曲线到达最高废气温度时间最长,而其他B2~B7到达最高废气温度的时间均少于B1曲线,到达烧结终点的时间缩短;当攀精矿停配(B7)时,到达最高废气温度的时间最短,B3~B6时间介于B1与B7之间,这说明随着中钛型精矿配比的提高,烧结时间缩短,烧结速度加快。

图2中负压变化也是B1曲线最高,这反映了烧结阻力的状况,B2~B7曲线均低于B1曲线,这

说明随着中钛型精矿的增加,透气性改善,烧结阻力与单位料层的压力降低,对加快烧结速度与提高产量有利。

2.3.3 对烧结速度的影响

图3所示为中钛型精矿配比对烧结速度的影响。由图3可见,随着中钛型精矿增加,烧结速度加快,且相关性很强,中钛型精矿配比由10%提高到74%(攀精矿停配),烧结速度由20.41提高到26 mm/min,平均达到23.36 mm/min,比基准期(B1)提高了5.29 mm/min,烧结时间由35.95缩短到28.01 min。烧结速度加快是提高产量的决定性因

素, 这正是钒钛磁铁精矿需要克服的缺陷, 采用制粒性能好的中钛型新型精矿可以消除这个弊端。

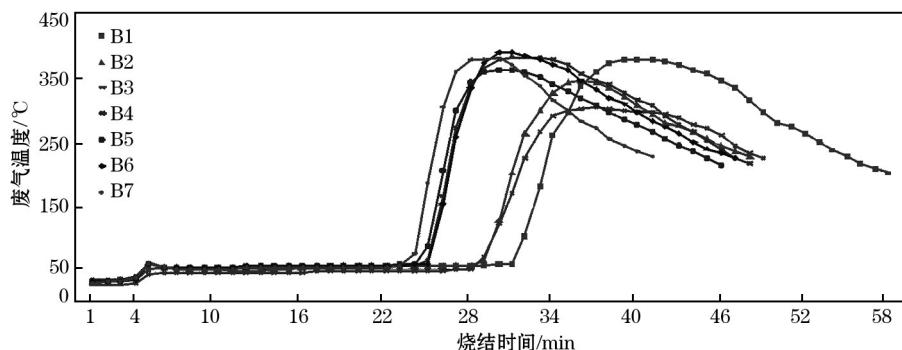


图 1 中钛型精矿烧结杯试验废气温度变化

Fig. 1 Exhaust gas temperature change on medium titanium concentrate sinting with sinter pot

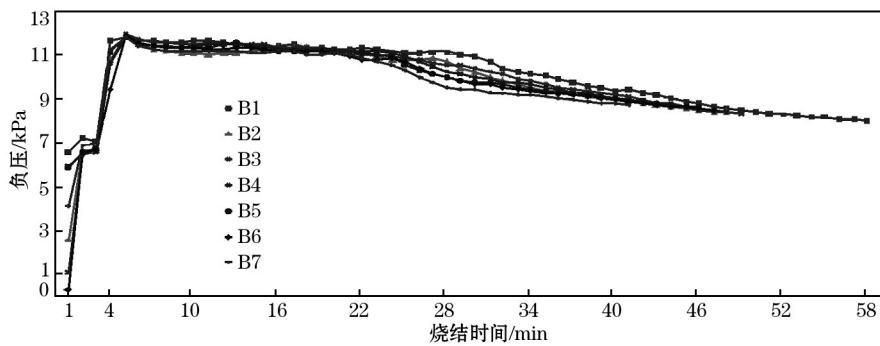


图 2 中钛型精矿烧结杯试验负压变化

Fig. 2 Negative pressure change on medium titanium concentrate sinting with sinter pot

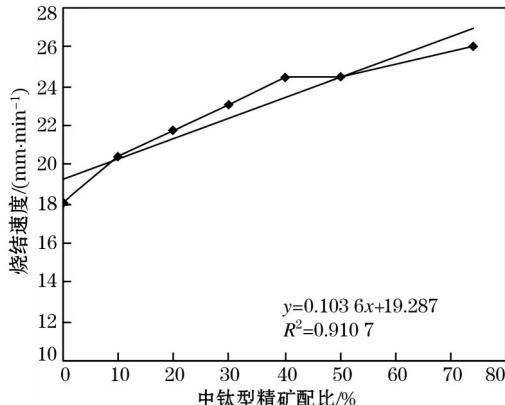


图 3 中钛型精矿配比对烧结速度的影响

Fig. 3 Influence of medium titanium concentrate ratio to sintering speed

2.3.4 对利用系数的影响

图 4 所示为中钛型精矿配比对利用系数的影响。由图可见, 随着中钛型精矿增加, 利用系数呈上升趋势, 且相关性很强, 中钛型精矿配比由 10% 提高到 74%, 利用系数由 1.283 提高到 1.487 $t/m^2 \cdot h$, 平均达到 1.436 $t/m^2 \cdot h$, 比基准期提高了 0.239 $t/m^2 \cdot h$, 增产幅度达到 20%, 平均每增加 10% 中钛型精矿, 增产幅度达到 5.35%。产量主要由垂直烧结速度与成

品率共同决定, 增加中钛型精矿后因粒度改善, 烧结速度大幅度提高, 而因烧结时间缩短、成品率下降, 烧结速度增加的幅度高于成品率下降幅度, 最终结果产量上升。

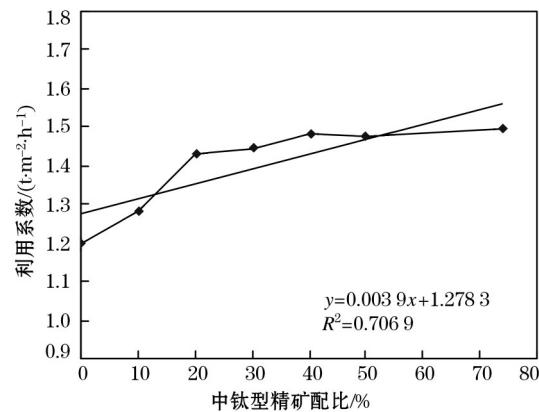


图 4 中钛型精矿配比对利用系数的影响

Fig. 4 Influence of medium titanium concentrate ratio to utilization coefficient

2.3.5 对烧结矿强度的影响

图 5 和图 6 所示分别为中钛型精矿配比对转鼓指数和成品率的影响。由图 5 可见, 随着中钛型精矿增加, 总体转鼓强度下降, 相关性较弱。但中钛

型精矿配比为 20%~50%，转鼓指数呈上升趋势，由最低 54.67% 达到最高 58.67%，中钛型精矿配比达到 74% 时，转鼓指数回落到 57.33%，比基准期 B1 高得多。烧结矿强度由液相量、矿物组成与结晶程度决定，中钛型精矿熔点低，液相量增加，对提高强度有利，但烧结时间缩短，矿物结晶不充分，对强度又不利，综合效果是试验强度比基准期下降了 0.28%，幅度不大。随着中钛型精矿增加，成品率下降，相关性很强，中钛型精矿配比由 10% 提高到 74%，成品率由 61.46% 下降到 56.04%（图 6）。成品率主要受多种因素影响。

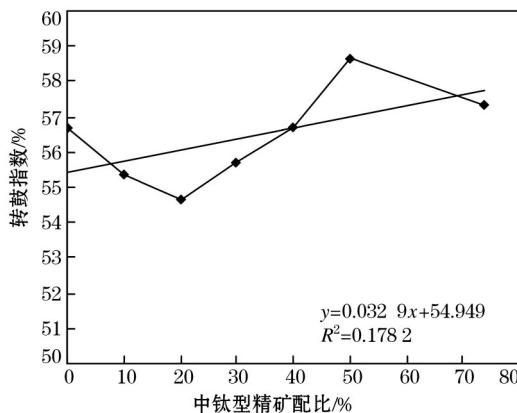


图 5 中钛型精矿配比对转鼓指数的影响

Fig. 5 Influence of medium titanium concentrate ratio to drum indexes

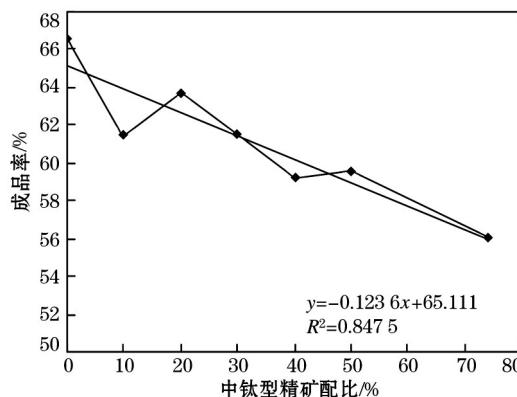


图 6 中钛型精矿配比对成品率的影响

Fig. 6 Influence of medium titanium concentrate ratio to rate of finished products

2.4 烧结矿矿物组成与结构

该 4 组烧结矿样品均由钛磁铁矿、钛赤铁矿、钙钛矿、铁酸钙、钛榴石和玻璃相 4 种主要物相组成，其中黄铁矿和硅酸二钙相对较低，见表 6。随着中钛型精矿增加，对强度与冶金性能有利的铁酸钙呈增加趋势，B4 的铁酸钙最高达到 8%~12%，而对强度与冶金性能不利的钙钛矿呈减少趋势，B2~B7 的钙钛矿均少于基准期 B1。除铁酸钙之外，对强度有利的硅酸盐也呈增加趋势，B4、B7 的硅酸盐达到 21%~27%，高于基准期 B1 的 18%~22%。

表 6 烧结矿中物相体积分数组成

Table 6 Mineral phase composition and volume content of sinter

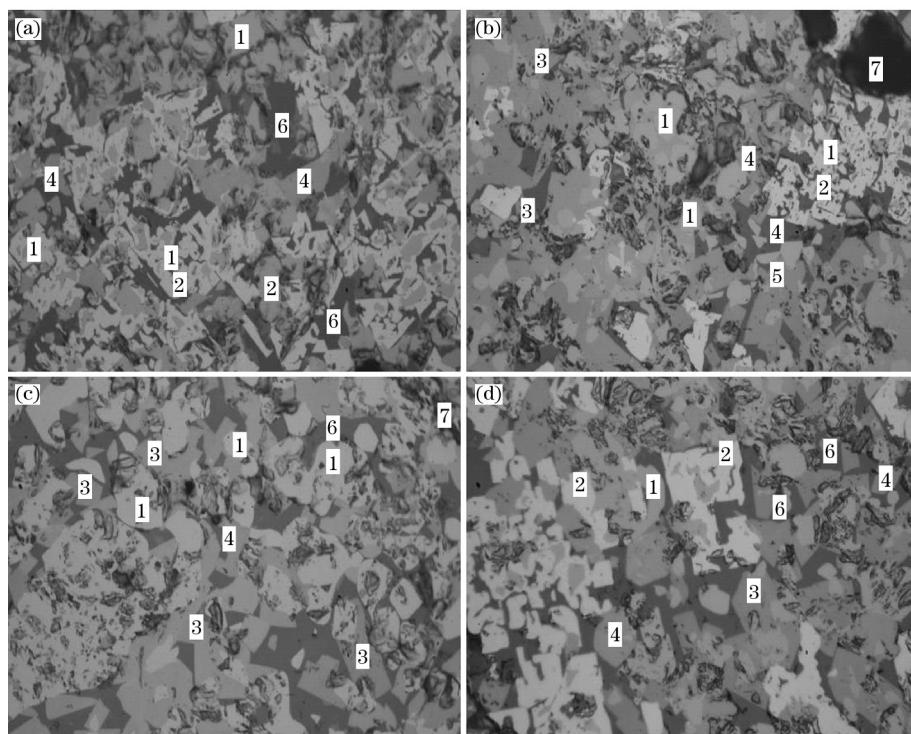
试验号	中钛型精矿	钛磁铁矿	钛赤铁矿	铁酸钙	钙钛矿	黄铁矿	硅酸盐相				%
							钛榴石	硅酸二钙	玻璃相	合计	
B1	0	46~50	10~14	4~6	13~17	—	3~5	—	14~18	18~22	
B2	10	58~62	5~9	4~6	6~8	1	3~5	2~3	13~15	18~22	
B4	30	28~32	23~27	8~12	8~12	—	13~17	—	8~12	23~27	
B7	74	43~47	14~18	5~9	8~12	—	3~7	2~4	13~17	21~25	

样品的显微结构与形态形貌如图 7 所示。4 组样品大部分钛磁铁矿以自形-半自形晶形式产出，钛赤铁矿主要是自形-半自形晶以骸晶的形式产出，内部嵌有熔滴状的钛磁铁矿，钛磁铁矿与赤铁矿晶型发育良好，是主要矿物；铁酸钙以自形-半自形晶形式存在，多以板状、针柱状为主；钙钛矿较多，多以纺锤状单独析出，在玻璃相中或者与钛磁铁矿形成共晶结构；玻璃相为无固定晶形，B2 样品出现少量孔洞或裂隙。中钛型精矿配比对烧结矿的显微结构没有大的影响，各种矿物分布均匀，即使是采用全中钛型精矿烧结（B7 样品），矿物组织与结构仍然分布均匀，发育

完整，对烧结矿强度与冶金性能不会产生大的影响。

2.5 冶金性能

对 B1、B2、B4、B7 4 组样品进行了冶金性能检测，结果见表 7。由表 7 可见，随着中钛型精矿的增加，烧结矿低温还原粉化率（小于 3.15 mm 粒度的比例）有变好的趋势，B7 样品 RDI 最低仅 46.8%，B2、B4 样品 RDI 与 B1 接近。这说明增加中钛型精矿对低温还原粉化率没有不利影响，这对改善高炉上部透气性没有负面影响。中温还原度有降低趋势，但变化不大，B2~B7 样品 RI 基本维持在 74%~77%，约低于基准期 B1 样品 RI 的 80.12%，但处于正常的还原区间。



1—钛磁铁矿; 2—钛赤铁矿; 3—铁酸钙; 4—钙钛矿; 5—钛榴石; 6—玻璃相; 7—孔洞或裂隙。

(a) B1; (b) B2; (c) B4; (d) B7。

图7 样品的显微结构

Fig. 7 Microstructure of samples

表7 冶金性能检测结果

Table 7 Determination results metallurgical

properties of sinter %

试验号	中钛型 精矿	低温还原粉化率 (RDI _{<3.15 mm})	中温还原度 RI
B1	0	65.37	80.12
B2	10	67.22	76.57
B4	30	65.79	75.98
B7	74	46.8	73.92

3 中钛型精矿比例工业试验

试验在一台 260 m²烧结机上进行, 中钛型精矿按 5% 的台阶逐步上调, 每阶段试验 7 d 左右, 中钛型精矿平均达到 25%。试验结果见表 8。

3.1 中钛型精矿对工艺参数的影响

试验期中钛型精矿配比控制在 15%~35%, 平均达到 25%。由于中钛型精矿 w(TiO₂) 低, 性价比比富矿粉高得多, 在维持烧结矿 TiO₂ 平衡的条件下,

表8 中钛型精矿烧结工业试验主要生产技术指标

Table 8 Main production technical indicators of industry experiment with medium titanium magnetite concentrate in sintering machine

阶段	中钛型 精矿配 比/%	利用系数/ (t·m ⁻² ·h ⁻¹)	固体单耗/ (kgce·t ⁻¹)	转鼓 指数/%	综合评 价指数	料层 厚度/ mm	主管 负压/Pa	垂直烧 结速度/ (mm·min ⁻¹)	单位料层 压降/ (Pa·mm ⁻¹)	废气 温度/℃	点火 温度/℃	混合料粒度 (>3 mm)/%
基准	0	1.485	37.05	72.59	97.99	716	14 050	20.89	19.63	133	1 044	63.19
试验 1	15	1.494	38.75	72.54	96.90	716	14 000	20.99	19.56	133	1 045	62.96
试验 2	20	1.521	35.86	72.76	99.86	716	14 220	20.70	19.85	133	1 034	64.67
试验 3	25	1.477	37.10	72.86	97.90	717	13 930	21.20	19.44	132	1 036	63.17
试验 4	30	1.524	36.81	72.72	99.13	718	13 930	21.13	19.40	133	1 036	65.63
试验 5	35	1.525	36.61	72.87	99.38	718	13 900	20.74	19.35	132	1 031	63.50
试验平均	25	1.508	37.02	72.75	98.62	717	14 000	20.95	19.52	133	1 036	63.98
比基准	+25	+0.023	-0.02	+0.16	+0.63	+2	-50	+0.06	-0.11	0	-7	+0.79

富矿粉配比降低了 6.56%，可以节约大量的原料成本。

随着中钛型精矿配比的增加，参数总体变化趋势是料层提高，机速稳定而微调；混合料水分保持了稳定，混合料粒度组成改善，大于 3 mm 粒级提高 0.79%，有利于改善透气性；负压呈下降趋势（下降 50 Pa），垂直烧结速度呈上升趋势，单位料层压降呈下降趋势，有利于增产。试验期间混合料温度稳定，主管废气温度与终点废气温度稳定，点火温度下调 7 ℃，适应中钛型精矿与富矿粉熔点低于攀精矿的需要，防止表层矿过熔与结壳。

3.2 中钛型精矿对主要生产技术指标的影响

随着中钛型精矿增加，烧结机利用系数呈上升趋势，试验平均利用系数达到 1.508 t/(m²·h)，比基准期上升 0.023 t/(m²·h)，主要是中钛型精矿制粒性能提高，混合料粒度组成改善，透气性改善，垂直烧结速度加快，有利于增产。烧结矿转鼓指数呈上升趋势，平均达到 72.75%，比基准期上升 0.16%，主要是中钛型精矿与富矿粉熔点低，液相量增加，同时保持了厚料层烧结，料层厚度控制在 715 mm 以上，高温保持时间延长，矿物结晶充分，强度改善。

烧结固体燃耗数呈下降趋势，平均固体燃耗为 37.02 kgce/t，比基准期下降 0.02 kgce/t。主要是厚料层烧结自动蓄热作用增强，同时，由于精矿总配比增加，精矿中 FeO 氧化放热增加，有利于降低燃耗，但由于烧结矿 FeO 略有增加，燃耗降低幅度不大。

3.3 工业试验中钛型精矿效果综合评价

烧结生产中最重要的技术经济指标是利用系数、转鼓指数、固体燃耗，按利用系数：转鼓指数：固体燃耗 = 35:35:30 的权值综合评价烧结总体效果，结果综合评价指数呈上升趋势，试验平均综合指数达到 98.62，比基准期上升 0.63。因此，采用中钛型精矿替代攀精矿后烧结总体效果提高。中钛型精矿配加 20% 时烧结总体效果最好，综合指数达到 99.86（最高），为试验最优方案。

3.4 生产应用实践

2016 年 4 台烧结机中钛型精矿使用比例平均为 4.75%，使用方式为间断使用，集中在 1 台或 2 台机上使用，配比控制在 15%~25%。工业应用过程中采用 15 000 Pa 以上高负压、700 mm 厚料层、适宜 FeO 烧结技术，采用生石灰与活性灰、新型衬板强化造球技术，实施分段点火、控制点火温度，优化控制燃料粒度、物料结构与工艺参数等措施^[6-10]，由于受钢铁市场行情影响，在高炉与烧结限产、原燃料与生产条件变差、烧结矿碱度 1.75（处于劣势区间）等

不利条件下，生产正常稳定，烧结矿品质提升。中钛型精矿由于低钛，在维持烧结矿 TiO₂ 平衡的条件下，节约富矿粉降低原料成本，创造了显著的经济效益，同时充分利用了攀西地区的钒钛矿资源，为强化高钛型精矿烧结与降低成本开辟了新的途径。

4 结论

(1) 中钛型精矿具有高铁、低钛、粒度细的特点，按一定比例配入高钛型精矿烧结能改善烧结矿性能指标与节约高价富矿粉，降低烧结矿成本。

(2) 实验室研究表明，采用中钛型精矿替代部分高钛型精矿，混合料粒度组成改善，烧结速度加快，增产效果明显，平均配加 37.3% 中钛型精矿，利用系数平均上升 0.239 t/(m²·h)，每增加 10% 中钛型精矿，增产幅度达到 5.35%，可弥补高钛型精矿利用系数低的缺陷。

(3) 采用中钛型精矿替代部分高钛型精矿，烧结矿矿物组成改善，铁酸钙体积分数呈增加趋势且高于基准期，钛矿呈减少趋势，硅酸盐也呈增加趋势；与基准对比，冶金性能变化不大。

(4) 工业试验表明，采用 25% 中钛型精矿替代高钛型精矿，利用系数比基准期上升 0.023 t/(m²·h)，转鼓指数上升 0.16%，固体燃耗下降 0.02 kgce/t，烧结总体效果优于高钛型精矿烧结。使用中钛型精矿具有显著的技术经济价值已为生产实践所证明。

参考文献：

- [1] 蒋大军. 钒钛磁铁精矿的矿物特性与造块强化技术[J]. 钢铁, 2010, 46(1): 24. (JIANG Da-jun. Mineral property and agglomeration intensification technology of vanadium and titanium magnetite concentrate[J]. Iron and Steel, 2010, 46(1): 24.)
- [2] 蒋大军. 攀钢炼铁精料技术进步及冶炼实践[J]. 钢铁, 1999, 35(2): 1. (JIANG Da-jun. Technological development of burden preparation and melting practice of ironmaking at Panzhihua Iron and Steel(Group)Co.[J]. Iron and Steel, 1999, 35(2): 1.)
- [3] 徐瑞图, 吴胜利. 中国铁矿石烧结研究——周取定教授论文集[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. (XU Rui-tu, WU Sheng-li. Sintering Research of Iron Ore in China—Papers of Professor ZHOU Qu-ding[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997.)
- [4] 潘巨宝, 张成吉. 中国铁矿石造块适用技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000. (PAN Ju-bao, ZHANG Cheng-ji. Agglomeration Appropriate Technology of Iron Ore in China[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.)
- [5] 王喜庆. 钒钛磁铁矿高炉冶炼[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994. (WANG Xi-qing. Blast Furnace Smelting of Vanadium and Titanium Magnetite[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.)

(下转第 67 页)

- [24] 任学平, 唐荻, 张海冰, 等. 变形功与冷却速度对金属组织细化的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(3): 295. (REN Xue-ping, TANG Di, ZHANG Hai-bing, et al. Effect of deformation work and cool speed on the microstructure refinement of metals[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(3): 295.)
- [25] 朱静. 超低碳微合金钢中铁素体晶粒的细化机制[C]//2003 中国钢铁年会. 北京: 中国金属学会, 2003: 2504. (ZHU Jing. Mechanism of refining ferrite in an ultra-low carbon steel[C]//2003 China Iron and Steel Annual Meeting. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2003: 2504.)
- [26] 王学敏, 尚成嘉, 杨善武, 等. 组织细化的控制相变技术机理研究[J]. 金属学报, 2002, 38(6): 661. (WANG Xue-min, SHANG Cheng-jia, YANG Shan-wu, et al. RPC processing to refine bainite[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(6): 661.)
- [27] 廖波, 肖福仁. 针状铁素体管线钢组织及强韧化机理研究[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(2): 57. (LIAO Bo, XIAO Fu-ren. Research on microstructure and strength-toughening mechanism of acicular ferrite pipeline steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(2): 57.)
- [28] 全珂, 庄传晶, 刘强, 等. 高钢级管线钢中M/A岛的微观特征及其对力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2011, 35(2): 4. (TONG Ke, ZHUANG Chuan-jing, LIU Qiang, et al. Microstructure characteristics of M/A islands in high grade pipeline steel and its effect on mechanical properties[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011, 35(2): 4.)
- [29] 刘莉, 赵亚娟, 王秀芳. 高强度微合金管线钢中的MA岛对性能的影响[J]. 南钢科技与管理, 2008(1): 1. (LIU Li, ZHAO Ya-juan, WANG Xiu-fang. Influence of MA island on property in the high strength micro-alloy pipeline steel[J]. NISCO Technology and Management, 2008(1): 1.)
- [30] 高惠临, 董玉华, 王荣. 管线钢焊接接界粗晶区局部脆化现象的研究[J]. 材料热处理学报, 2001, 22(2): 60. (GAO Hui-lin, DONG Yu-hua, WANG Rong. Study on local brittle zone phenomena of intercritically reheated coarse-grained heat-affected zone in pipeline steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2001, 22(2): 60.)

(上接第 24 页)

- [6] 蒋大军, 宋剑, 何木光, 等. 钒钛磁铁矿烧结降低返矿率技术研究与实践[J]. 中国冶金, 2014, 24(4): 39. (JIANG Da-jun, SONG Jian, HE Mu-guang, et al. Technology research and practice on decreasing return fines ratio for vanadium-titanium magnetite concentrates sintering[J]. China Metallurgy, 2014, 24(4): 39.)
- [7] 蒋大军, 何木光, 甘勤, 等. 高碱度条件下 FeO 对烧结矿性能的影响[J]. 中国冶金, 2008, 18(11): 14. (JIANG Da-jun, HE Mu-guang, GAN Qin, et al. Experiment on influence of FeO on sinter property under high basicity condition[J]. China Metallurgy, 2008, 18(11): 14.)
- [8] 蒋大军, 何木光, 杜斯宏, 等. 大型烧结机烧结钒钛磁铁精矿的工艺优化方法: 中国, CN201110174613.3[P]. 2013-07-17. (JIANG Da-jun, HE Mu-guang, DU Si-hong, et al. The Technology Optimization Method of a Large-Type Sinterer Sintering Vanadium-Titanium Magnetite Concentrate: China, CN201110174613.3[P]. 2013-07-17.)
- [9] 蒋大军, 何木光, 杜斯宏, 等. 一种高负压大风量烧结钒钛磁铁精矿的方法: 中国, CN201110174638.3[P]. 2014-04-02. (JIANG Da-jun, HE Mu-guang, DU Si-hong, et al. A Method on Sintering of Vanadium Titanium Magnetite Concentrate with High Negative Pressure and Large Air volume: China, CN201110174638.3 [P]. 2014-04-02.)
- [10] 蒋大军, 杜斯宏, 何木光, 等. 高钛型钒钛磁铁精矿添加硼化物的烧结方法: 中国, CN201110174629.4[P]. 2013-11-06. (JIANG Da-jun, DU Si-hong, HE Mu-guang, et al. The Sintering Method of High Titanium Type Vanadium-Titanium Magnetite Concentrate Adding Boride: China, CN201110174629.4[P]. 2013-11-06.)