

细粒级钛精矿烧结试验研究

王禹键

(攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 针对钛精矿粒度细、电炉冶炼损耗高的问题, 着重对细粒级钛精矿烧结造块工艺进行了试验探索与研究。细粒级钛精矿烧结存在制粒效果差、能耗高、生产效率低的问题。通过理化检测及物相分析, 确定了钛精矿烧结的固结机理、烧结基本规律及制粒效果差的原因。优化制粒试验表明, 通过添加熔剂、优化燃料配比及水分, 并对钛精矿进行磨制处理后, 钛精矿烧结混合料制粒效果得到改善。通过降低烧结料层, 对磨制后的钛精矿造球并采用在料面分加燃料的方式进行烧结, 烧结技术经济指标得到显著改善, 钛精矿烧结+1 mm 比例由 50.3% 提高至 89.4%, 利用系数由 $0.177 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 提高至 $0.712 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。从烧结试验结果看, 采用该方法进行钛精矿烧结, 烧结过程钛精矿硫脱除率在 40% 左右, 影响 TiO_2 品位约 3~4 个百分点。

关键词: 钛精矿; 烧结; 细粒级; 脱硫效率

中图分类号: TF823 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)04-0024-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.04.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Experimental Study on Sintering of Fine Ilmenite Concentrate

Wang Yujian

(Pangang Group Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: In view of the problems of fine particle size and high loss during electric furnace smelting of ilmenite concentrate, the sintering process of fine ilmenite concentrate was studied in this paper. It has the disadvantages of poor granulating, high burnup and low production efficiency for sintering of fine ilmenite concentrate. By physical and chemical detection and phase analysis, the consolidation mechanism of titanium concentrate and the reasons for the poor granulating effect were determined. Experimental results show that by adding flux, optimizing ratio of fuel and water, and grinding the ilmenite concentrates, the granulating effect of the ilmenite concentrates is improved. Through reducing sintering material layer, pelletizing the grinded ilmenite concentrate and adopting fuel divided adding on surface of the material for sintering, the technical and economic indicators of sintering are improved significantly, with the ratio of particles of +1 mm increased from 50.3% to 89.4% and the utilization coefficient enhanced from $0.177 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ to $0.712 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, respectively. The desulfurization rate of ilmenite concentrate in the sintering process proposed in this paper is about 40%, influencing about 3%~4% of the TiO_2 grade.

Key words: ilmenite concentrate; sinter; fine grain; sulfur removal rate

0 引言

钛精矿是生产高钛渣的主要原料, 目前主要以电炉冶炼为主。近年来, 为了提高钛精矿的钛品位,

钛精矿粒度越来越细, 在电炉冶炼^[1]时受电弧的影响, 钛精矿损失严重。攀钢钛冶炼厂每年因此损失 1%~2% 的钛精矿原料, 高钛渣生产成本提高, 产品竞争力降低。另外钛精矿含硫量非常高, 电炉冶炼无

法有效进行脱硫^[2],也影响了产品的品质。开发一种减少钛精矿损失,同时兼顾脱硫效果的钛精矿冶炼新工艺具有重要的意义。

烧结是将粉矿通过一定的方法人工造块的工艺,具有处理量大、损耗小、脱硫能力强等优点^[3],这些优点正是钛精矿需要的。因此,借助铁精矿烧结工艺,开发钛精矿烧结+电炉冶炼工艺流程,从理

论上讲可以解决细粒级高品位钛精矿电炉冶炼目前存在的问题。为此,开展了钛精矿烧结探索性试验研究。

1 试验原料及条件

烧结试验在 Ø300 mm×800 mm 烧结杯中进行,其主要工艺参数见表 1。

表 1 烧结杯试验工艺参数
Table 1 Technological parameters of sintering experiments

铺底料		点火温度/℃	点火时间/min	点火负压/Pa	烧结负压/Pa	料层高度/mm	混合料水份/%
粒度/mm	重量/kg						
10~16	2.5	1 000±50	2.5	6 000	15 000	400~570	7.5~9.5

本次试验选择的钛精矿化学成分及粒度见表 2。

2 钛精矿混合料制粒试验研究

2.1 不同燃料配比钛精矿烧结试验

从钛精矿化学成分进行分析,烧结过程可能产生的粘接相为铁橄榄石($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$)或钛榴石

($\text{Ca}_3(\text{Fe},\text{Ti})_2[(\text{Si},\text{Ti})\text{O}_4]_3$),属于烧结中硅酸铁(FeO-SiO_2)体系^[4]。该体系中的液相生成条件要求有较高的温度和还原性气氛,即要求有较多的燃料,以保证形成必要的 FeO ^[5]。因此,可判断钛精矿烧结燃料配比要高于铁精矿烧结。设计不同焦粉配比的钛精矿烧结杯试验,试验情况见表 3、4。

表 2 钛精矿的化学成分及粒度
Table 2 Chemical compositions and particle size of ilmenite concentrate

化学成分								%
TiO_2	FeO	Fe_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	S	-0.074 mm 比例
48.32	35.60	2.14	0.888	5.31	2.66	0.973	0.16	74.74

表 3 不同燃料配比钛精矿烧结试验情况
Table 3 Sintering experiments of ilmenite concentrate with different fuel ratios

编号	钛精矿配比/%	焦粉配比/%	混合料水份/%	废气温度/℃	备注
RL-1	94	6	7.5		未烧结成功
RL-2	92	8	7.5		未烧结成功
RL-3	90	10	7.5	440	烧结成功
RL-4	88	12	7.5	640	烧结成功

表 4 RL-3 烧结矿中物相体积分数组成
Table 4 Phase volume fraction in RL-3 sintering sample

钛铁矿	钛赤铁矿	钛磁铁矿	钙钛矿	钛榴石	玻璃相
69~73	5~8	4~8	1~5	7~12	2~5

RL-3 钛精矿烧结中金属矿物主要为钛铁矿^[6],钛赤铁矿、钛磁铁矿含量较少;硅酸盐相则主要为钛榴石相和玻璃相,钛铁矿晶体主要呈板状、粒状或无定形状,晶粒表面较光滑,钛榴石晶体主要以无定形状分布于钛铁矿粒间,见图 1、2。

从矿物形貌看,钛精矿烧结中钛铁矿($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$)主要以板状形晶^[5],孔隙率小,其结构十分致密,烧结过程透气性差,传热时间慢;钛铁矿熔点($1\,400\text{ }^\circ\text{C}$)高于铁精矿烧结中的磁铁矿、赤铁矿等物相,升温需要更多时间与燃料,这些主观因素导致了钛精矿烧结高燃耗、低效率。从表 3 的试验结果看,钛精矿烧结焦粉配比控制在 10% 左右,不高于 12% 应较为合理。

2.2 钛精矿烧结制粒试验

水分、混料时间及燃料配比是影响混合料制粒效果的重要条件,细粒级精矿通常有利于烧结

制粒,一般来讲,混合料中+3 mm 比例越高,制粒效果越好^[7]。

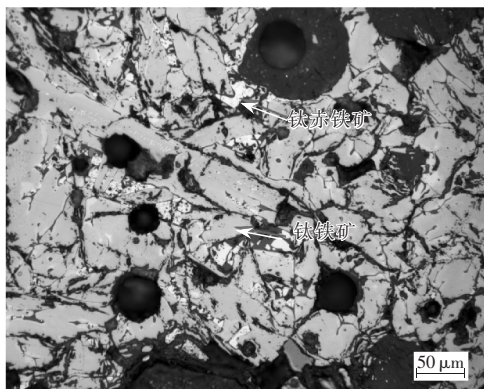


图 1 RL-3 钛精矿中板状钛铁矿

Fig. 1 Plate ilmenite in RL-3 ilmenite concentrate

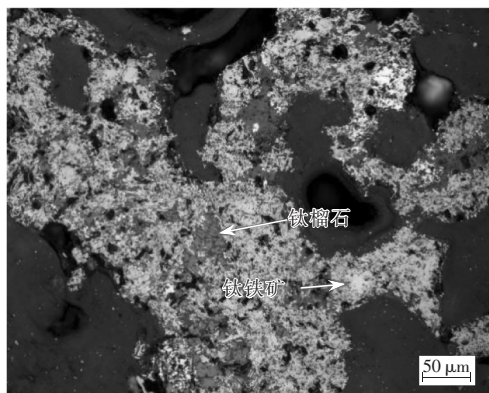


图 2 RL-3 钛精矿中的无定形状钛榴石

Fig. 2 Amorphous titanite in RL-3 ilmenite concentrate

本次制粒试验设计如下: 烧结干料重 20 kg, 外配 20% 返矿(-5 mm 成品钛精矿), 焦粉配比、混料时间、水分三因素三水平正交试验, 试验方案见表 5, 烧结制粒试验结果见表 6。

表 5 正交制粒试验方案

Table 5 Scheme of orthogonal experiments for granulation

编号	钛精矿配比/%	焦粉配比/%	混料时间/min	水分/%
ZL-1	90	10	10	7.5
ZL-2	90	10	12	8.5
ZL-3	90	10	14	9.5
ZL-4	89	11	10	8.5
ZL-5	89	11	12	9.5
ZL-6	89	11	14	7.5
ZL-7	88	12	10	9.5
ZL-8	88	12	12	7.5
ZL-9	88	12	14	8.5

由表 6 所示, 编号 ZL-4 试验组中+3 mm 比例最高, 说明该组制粒条件最优, 但可以看出即便是 ZL-4 试验组+3 mm 比例也只有 40% 左右, 制粒效果在同等条件下较钒钛铁精矿差^[8]。

2.3 钛精矿改性试验

为了得到更好的混合料粒度, 考虑添加熔剂改善混合料制粒效果^[9]。钛精矿混合料+3 mm 较差, 通过调查发现, 钛精矿在浮选作业过程中加入了疏水的浮选药剂, 钛精矿表面疏水极性分子聚集, 实现钛精矿上浮, 该极性分子与水分子之间分子作用力相斥^[9], 这样的性质严重影响了混合料制粒效果。考虑采用化学和物理两种方法改变钛精矿表面疏水性, 化学方法是添加阴离子表面活性剂提高其表面亲水性^[10]; 物理方法是对通过磨制破坏其表面疏水性^[11]。

表 6 钛精矿烧结制粒试验混合料粒度

Table 6 Granulating experiments of sintering mixture of titanium concentrate grain size

编号	粒度组成/%					
	+8 mm	5 ~ 8 mm	3 ~ 5 mm	1 ~ 3 mm	-1 mm	+3 mm
ZL-1	5.9	8.1	19.2	50.3	16.5	33.2
ZL-2	6.3	8.2	19.4	50	16.1	33.9
ZL-3	6.4	9	21.2	49.1	14.3	36.6
ZL-4	6.7	9.9	25.6	48.1	9.7	42.2
ZL-5	6.4	8	18.6	52	15	33
ZL-6	6	8.6	20.7	51.3	13.4	35.3
ZL-7	6.5	9.3	23.6	48.8	11.8	39.4
ZL-8	5.8	7.8	19.4	53.9	13.1	33

2.3.1 化学改性对烧结制粒的作用

化学改性试验选择试剂: ①膨润土, ②硅酸钠(水玻璃), ③木质素磺酸钙(木钙), ④十二烷基苯磺酸钠, ⑤十二烷基苯酸钠, 其中前两种为熔剂, 后

三种试剂为阴离子表面活性剂, 其他试验条件与 ZL-4 试验组相同。试验方案见表 7, 烧结制粒试验结果见表 8。

据表 8, RJ-1、RJ-2 试验组混合料+3 mm 比例

较 JZ-4 提到 5 ~ 7 个百分点 ,说明添加 1.5% 膨润土、0.75% 水玻璃对改善钛精矿烧结混合料制粒有一定效果。

HX-1 ~ HX-8 试验结果显示 ,采用在混合料水

溶液中、混合料中添加阴离子表面活性剂的方式改善钛精矿烧结混合料制粒效果不明显 ,分析可能是因为改性作用时间不够 ,作用量不足所致。总体来看 ,RJ-1 试验组效果最好。

表 7 化学改性试验方案
Table 7 Experimental scheme of chemical modification

编号	混合水种类	熔剂	钛精矿 / %	焦粉 / %
RJ-1	水	1.5% ①号试剂	87.5	11
RJ-2	水	0.8% ②号试剂	88.2	11
HX-1	水	1.5% ③号试剂	87.5	11
HX-2	水	1.5% ④号试剂	87.5	11
HX-3	水	1.5% ⑤号试剂	87.5	11
HX-4	水	1% ①号试剂+1% ③号试剂	87	11
HX-5	浓度 2% ③号水溶液	无	89	11
HX-6	浓度 1% ③号水溶液	1% ①号试剂	88	11
HX-7	* 浓度 0.3% ④号水溶液	1% ①号试剂	88	11
HX-8	* 浓度 0.3% ⑤号水溶液	1% ①号试剂	88	11

* 注: 浓度 1% ④、⑤号水溶液易混合料粘接成团 ,且气味较大 ,故采用 0.3% ④、⑤号浓度水溶液。

表 8 化学改性试验烧结混合料粒度
Table 8 Chemical modification experimental sintering mixture particle size

编号	粒度组成 / %					
	+8 mm	5 ~ 8 mm	3 ~ 5 mm	1 ~ 3 mm	-1 mm	+3 mm
JZ-4	6.7	9.9	25.6	48.1	9.7	42.2
RJ-1	7.7	11.7	29.1	37.8	13.7	48.5
RJ-2	8.6	13.6	25.1	36.5	16.2	47.3
HX-1	7.4	9.6	24.5	37.9	20.6	41.5
HX-2	10.6	8.8	20.6	39.1	20.9	40
HX-3	11.5	10.8	19.6	39.8	18.3	41.9
HX-4	8.1	9.9	27.9	44.7	9.4	45.9
HX-5	7.1	10.5	24.4	43	15	42
HX-6	8.8	12.5	25.6	41.1	12	46.9
HX-7	8.6	10.8	23.9	34.7	22	42.7
HX-8	9.1	10.4	24.4	33.3	22.8	42.9

2.3.2 物理改性对烧结制粒的作用

物理改性试验所用钛精矿原料先在 30 kg 级圆筒球磨机上进行不同时间的磨制 ,粒度见表 9 ,其他试验条件与 RJ-1 试验组相同。烧结制粒度试验结果见表 10。

表 9 不同磨制时间钛精矿粒度对比
Table 9 Comparison in particle size of ilmenite concentrate with different grinding time

编号	磨矿时间 / min	粒度检测情况 / %	
		-0.074 mm	-0.045 mm
WL-1	30	75.34	44.74
WL-2	60	76.13	45.08
WL-3	120	77.99	47.13

据表 10 ,烧结混合料中 +3 mm 比例较 RJ-1 有不同程度提高 ,特别是 WL-3 组 ,+3 mm 比例超过

65% ,较 RJ-1 提高近 20 个百分点 ,说明物理改性对改善钛精矿烧结混合料制粒效果显著 ,且磨制时间越长 ,效果越好。

3 钛精矿烧结杯试验研究

3.1 烧结成品率及加工效率

钛冶炼厂现场实践表明 ,电炉冶炼入炉粒度 >1 mm 的粉料基本没有损失 ,钛精矿烧结粒度 >1 mm 就可以成为成品矿。针对钛精矿烧结速度慢的问题 ,设计开展了钛精矿烧结优化试验 ,设计了打孔、撒焦、造球^[8]及磨制处理相结合的烧结工艺。除试验中出 TJ-1 料层为 650 mm 外 ,其他试验组料层均 500 mm ,制粒条件与 RJ-1 相同 ,试验方案见表 11 ,试验结果见表 12。

表 10 物理改性试验烧结混合料粒度
Table 10 The physical modification experimental sintering mixture particle size

编号	粒度组成 / %					
	+8 mm	5 ~ 8 mm	3 ~ 5 mm	1 ~ 3 mm	-1 mm	+3 mm
RJ-1	7.7	11.7	29.1	37.8	13.7	48.5
WL-1	8.8	12.7	30.8	37.7	10	52.3
WL-2	10.6	15.4	31.6	34.1	8.3	57.6
WL-3	14.3	19.4	32.6	24.7	9	66.3

表 11 钛精矿烧结杯试验方案
Table 11 Experiment scheme of sintering of ilmenite concentrate

编号	钛精矿 / %	焦粉 / %	膨润土 / %	备注
TS-1	87.5	11	1.5	撒焦
TS-2	87.5	11	1.5	撒焦
TS-3	87.5	11	1.5	撒焦、打孔
TS-4	89% 钛精矿球	11	0.6	撒焦
TS-5	87.5	11	1.5	磨制 30 min、撒焦、打孔
TS-6	87.5	11	1.5	磨制 60 min、撒焦、打孔
TS-7	87.5	11	1.5	磨制 120 min、撒焦、打孔
TS-8	91% 钛精矿球	9	0.6	磨制 60 min、撒焦
TS-9	89.5	9	1.5	撒焦、打孔
TS-10	89.5	9	1.5	磨制 60 min、撒焦、打孔
TS-11	92% 钛精矿球	8	0.6	磨制 60 min、撒焦

表 12 钛精矿烧结杯试验结果统计
Table 12 Results of sintering of ilmenite concentrate

	烧结时间 / min	废气温度 / °C	* 成品矿比例 / %	利用系数 / (t · m ⁻² · h ⁻¹)
TS-1	145	358	50.3	0.177
TS-2	132	199	71.7	0.277
TS-3	114	358	75.6	0.338
TS-4	81	441	93.6	0.589
TS-5	78	300	86.2	0.563
TS-6	73	315	89.6	0.625
TS-7	68	299	88.0	0.659
TS-8	64	283	89.4	0.712
TS-9	107	331	72.3	0.344
TS-10	79	317	84.3	0.544
TS-11	60	280	81.7	0.694

* 注: 成品矿是指+1 mm 的钛精矿烧结。

打孔: 在烧结杯料面用直径为 3 mm 的钢针均匀打出深度约为 100 ~ 150 mm 的孔, 数量约为 30 ~ 40 个。

撒焦: 烧结配料时, 预留总焦粉量的 10%, 待布料完成后, 均匀撒在烧结料面, 此操作在打孔操作之前。

造球: 99% 钛精矿+1.0% 膨润土在圆盘造球机上生产粒度 3 ~ 6 mm, 水分 8.5% 的生球。

磨制: 使用圆筒球磨机对钛精矿进行预处理。

据表 9 所示, 当钛精矿烧结料层为 650 mm 时, 成品矿比例仅在 50% 左右, 分析主要因为钛精矿表面疏水, 烧结过程中受重力影响, 易形成过湿层, 风

穿透料层的阻力增大^[5], 造成烧结时间长, 成品率低。适当降低烧结料层后, 烧结时间、成品率比例有明显提高。

从打孔、撒焦、磨制及造球等方法对烧结的效果看, TS-8 试验组成品率、利用系数最优, 说明磨制后, 造球料层表面撒焦相结合的方法对改善钛精矿烧结技术经济指标有显著效果; 从磨制时间长短对烧结指标的影响看, 磨制时间约长, 烧结指标越好, 但磨制 120 min 与 60 min 指标差距不明显, 从效率来看, 磨制 60 min 最为合适。在降低焦粉配比至 8% 后, 烧结成品率机利用系数指标略有降低。本轮试验表明, 钛精矿烧结工艺上是可行的, 通过对钛精矿磨制 60 min 后造成 3 ~ 6 mm 小球, 适当降低钛精矿料层厚度, 烧结布料时在料层表面撒焦粉方式进行烧结, 烧结指标可以得到明显改善。

3.2 S 脱除效率及对 TiO₂ 品位影响

烧结工艺对高硫铁精矿脱硫具有较好的效果^[3], 钛精矿进行烧结的一个重要目的是脱硫, 由于在配料中加入了熔剂, 会降低烧结矿的 TiO₂ 品位, 为了考察钛精矿烧结的脱硫效果及对 TiO₂ 品位影响程度, 表 13 给出了钛精矿烧结试验化学检测及脱硫情况。

据表 13 所示, 烧结中配加 1.5% 的膨润土后, 钛精矿中 TiO₂ 品位降低约 3 ~ 4 个百分点, 其 FeO

含量在 12% ~ 25% 变化,随焦粉配比降低而降低,烧结过程钛精矿 S 脱除率在 30% ~ 45%,主要受烧结时间及燃料配比影响。

表 13 钛精矿烧结杯试验化学检测及脱硫情况
Table 13 Chemical compositions and desulfurization rate for sintering of ilmenite concentrate

编号	化学成分 / %			总硫量 / %	S 脱除率 / %
	S	TiO ₂	FeO		
返矿	0.141	44.34	16.44		
TS-1	0.117	44.84	19.22	0.21	44.29
TS-2	0.135	44.87	24.61	0.21	35.71
TS-3	0.134	45.00	17.07	0.21	36.19
TS-4	0.141	44.83	23.82	0.21	32.86
TS-5	0.136	42.5	23.24	0.203	33.00
TS-6	0.132	45.10	23.81	0.203	34.98
TS-7	0.139	44.34	24.37	0.203	31.53
TS-8	0.119	44.76	14.56	0.194	38.66
TS-9	0.128	44.69	14.36	0.194	34.02
TS-10	0.116	44.28	13.67	0.194	40.21
TS-11	0.117	44.82	12.12	0.191	38.74

燃料是烧结硫磺的主要来源,在降低焦粉配比后 S 的脱除率没有显著提高,分析是因为在燃料烧结脱硫过程是氧化脱硫^[8],该过程是一个吸热过

程,燃料配比降低后,提供的热量减少,不利于脱硫反应的进行。

4 结论

1) 改性试验表明,磨制处理对改善钛精矿疏水性有利,且磨制时间越长,效果越好,混合料中添加熔剂,也对改善制粒效果有利,其中以膨润土最为明显。

2) 不同燃料配比试验结果及制粒试验结果表明,在尽量少的的影响烧结中 TiO₂ 品位条件下,87.5% 钛精矿、11% 焦粉及 1.5% 膨润土,混料时间 10 min,混合料水分 8.5%,钛精矿烧结混合料中+3 mm 比例最高。

3) 从烧结杯试验结果看,降低烧结料层至 500 mm,将磨制 60 min 后的钛精矿造球,并采用料面分加燃料的方式进行烧结,焦粉配比由 11% 降低至 9%,钛精矿烧结+1 mm 比例由 50.3% 提高至 89.4%,利用系数由 0.177 t/(m²·h) 提高至 0.712 t/(m²·h),烧结过程钛精矿硫脱除率在 40% 左右,影响 TiO₂ 品位约 3 ~ 4 个百分点。

参考文献

- [1] Mo Wei, Deng Guozhu. Titanium metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988.
(莫畏, 邓国珠. 钛冶金 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.)
- [2] Wang Yanzhong. Discussion on the thermodynamics of melting titanium concentrate in electric furnace [J]. The South Metallurgical 2004(6): 10-13.
(王延忠. 电炉熔炼钛精矿的热力学讨论 [J]. 南方冶金 2004(6): 10-13.)
- [3] Zhou Chuandian. Technical manual of blast furnace iron making [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
(周传典. 高炉炼铁技术手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.)
- [4] Central South Institute of Mining and Metallurgy Group Mining Teaching and Research Office. Iron ore pellets [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1978.
(中南矿冶学院矿教研室. 铁矿粉造块 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1978.)
- [5] Jiang Tao. Technical manual for production of sintered pellets [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
(江涛. 烧结球团生产技术手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.)
- [6] Deng Chaoshu, Wang Mingjie. Consolidation mechanism of vanadium titanium magnetite concentrate sinter [J]. Sintering and Pelletizing, 1985(1): 28-33.
(邓朝枢, 王敏杰. 钒钛磁铁矿烧结矿固结机理 [J]. 烧结球团, 1985(1): 28-33.)
- [7] Hu Peng. Study on different levels of silicon and calcium in high titanium vanadium titanium sinter [J]. Sintering and Pelletizing, 2017(3): 16-20.
(胡鹏. 高钛型钒钛烧结矿不同硅钙水平研究 [J]. 烧结球团, 2017(3): 16-20.)
- [8] Jiang Dajun. Sintering characteristics and strengthening measures of vanadium titanium magnetite concentrate [J]. Sintering and Pelletizing, 1997(1): 4-10.
(蒋大军. 钒钛磁铁矿的烧结特性及强化措施 [J]. 烧结球团, 1997(1): 4-10.)
- [9] Yang Daoguang. Experimental study on flotation of coarse-grained ilmenite by a new collector [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019(1): 84-87.
(杨道广. 新型捕收剂浮选粗粒级钛铁矿试验研究 [J]. 钢铁钒钛, 2019(1): 84-87.)
- [10] Du Yusheng. Experimental study on flotation of a refractory ilmenite concentrate in panxi area [J]. Metal mine, 2019(4): 82-87.
(杜雨生. 四川攀西某难选钛铁矿重选精矿浮选试验研究 [J]. 金属矿山, 2019(4): 82-87.)
- [11] Ren Yunfu. Metallurgical process mineralogy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
(任允芙. 冶金工艺矿物学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.)

编辑 张继东