

焦炭粒度对钛渣冶炼影响研究

李凯茂¹, 肖军¹, 马勇², 宋兵¹, 邱淑兴^{1,3}

(1. 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; 2. 攀钢集团钛业有限责任公司, 四川 攀枝花 617000; 3. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要: 根据颗粒在流体中自由沉降运动特点, 通过理论计算得到连续加料冶炼钛渣条件下被带出焦炭颗粒粒径最大值为 0.06 mm。结合工业上应用情况, 得到试验用焦炭粒度范围 2 ~ 8 mm。基于此, 考察了焦炭粒度对钛渣冶炼的影响, 结果表明, 在功率不变条件下, 焦炭粒度偏大、反应相对滞后引起冶炼过程烟气温、CO 浓度波动大, 冶炼初期存在电极位置快速上升等问题, 导致吨渣焦耗、百吨料耗时、吨渣电耗比基准期分别多 24 kg、0.18 h、52.07 kWh; 相较而言, 功率由 17.67 MW/h 提升至 18.14 MW/h (提升 0.47 MW/h) 时, 热力学和动力学条件得到改善, 促进焦炭充分反应, 消除炉内残碳量, 使冶炼更加稳定, 同时吨渣焦耗、吨渣电耗比“未提升功率的试验期”分别降低了 26 kg、128.12 kWh; 焦炭粒度分布变窄且均匀, 有利于钛渣冶炼过程和质量稳定控制, 而功率提升可有效降低焦炭粒度相对偏大对钛渣冶炼的不利影响。

关键词: 钛渣; 冶炼; 焦炭; 粒度下限; 电耗

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)03-0039-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.03.006

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者
聊科研

Study on the effect of coke particle size on titanium slag smelting

Li Kaimao¹, Xiao Jun¹, Ma Yong², Song Bing¹, Qiu Shuxing^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Pangang Group Titanium Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: According to the characteristics of free settling movement of particles in the fluid, the theoretical calculation results show that the maximum size of coke particles taken out under the condition of continuous feeding smelting titanium slag is 0.06 mm. Combined with the industrial application, the size range of coke for test is 2 ~ 8 mm. Based on this, the influence of coke particle size on titanium slag smelting was investigated. The results show that under the condition of constant power, the flue gas temperature and CO concentration fluctuate greatly in the smelting process, and the electrode position rises rapidly at the beginning of smelting, which is caused by the large coke particle size and relatively delayed reaction. As a result, the consumption per ton of slag coke, the time consumption per hundred tons of material, and the power consumption per ton of slag are respectively 24 kg, 0.18 h, 52.07 kWh more than the reference period. By contrast, the power is increased from 17.67 MW/h to 18.14 MW/h (increased by 0.47 MW/h), thermodynamic and kinetic conditions are improved, coke is fully reacted, carbon residue in the furnace is eliminated, and smelting is more stable. At the same time, coke consumption per ton of slag and power consumption per ton of slag are reduced by 26 kg and 128.12 kWh

收稿日期: 2023-02-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (52104323)。

作者简介: 李凯茂, 1984 年出生, 男, 山西大同人, 高级工程师, 长期从事钛渣冶炼相关研究, E-mail: ybni610@126.com。

respectively compared with "unraised power test period". The narrow and uniform coke particle size distribution is conducive to the titanium slag smelting process and quality stability control, while the increase of power can effectively reduce the adverse effect of relatively large coke particle size on titanium slag smelting.

Key words: titanium slag, smelting, coke, lower limit of particle size, power consumption

0 引言

钛渣冶炼是利用固体还原剂(焦炭或无烟煤)选择性还原钛精矿中铁氧化物为金属铁,然后分离铁富集钛的过程。还原剂质量直接影响钛精矿还原速率、钛渣冶炼时间、钛渣质量和铁水质量,还原剂作为钛渣冶炼主要原料具有重要作用。据有关文献报道,韩丰霞、马翔等人^[1-2]相继开展了无烟煤配加量对钛渣品位的影响。肖军^[3]考察了无烟煤和焦炭对钛渣冶炼的影响。邱淑兴^[4]等人深层次剖析了焦炭碳结构、焦炭比表面积对焦炭反应活性的影响,进一步考察了不同焦炭对钛渣冶炼的影响。以上研究重点考察了无烟煤配加量、还原剂种类、不同焦炭对钛渣冶炼的影响,但它们对还原剂粒度范围要求各不相同。如云南某企业使用无烟煤粒度范围为 5~25 mm,此粒径比例不低于 85%;攀枝花某企业使用无烟煤粒度范围为 2~8 mm,此粒径比例大于 98%,使用焦炭粒度范围为 3~8 mm,此粒径比例大于 50%,而粒径小于 1 mm 的比例为 10%~20%。

粒度是钛渣冶炼对还原剂指标的重要要求,其控制指标直接关系到炉况稳定和钛渣质量。从反应动力学上讲,还原剂粒度越小,还原反应速度越快,但是还原剂粒度过小,容易进入后续除尘系统或沉降在炉膛上部挂渣层上,两者均会导致配比波动,影响钛渣质量稳定。经过调研发现,实际生产所用焦炭粒径小于 1 mm 比例较高时可达 50%~70%,对钛渣冶炼和产品质量稳定控制影响较大。此外,细粒径焦炭可利用途径主要是电炉增碳剂、高炉喷煤冶炼、煤制油领域等^[5-7]。因此,笔者结合某钛渣厂实际情况,通过理论测算了连续加料冶炼钛渣条件下焦炭粒度下限,结合生产实践,确定焦炭粒度控制范围。在此基础上,研究了焦炭粒度对钛渣冶炼的影响。

1 焦炭粒度下限理论计算

连续加料冶炼钛渣时生成的气体是均匀的,由此认为焦炭颗粒在此流体中作自由沉降运动。根据

颗粒在流体中自由沉降运动特点,首先计算出连续加料过程混合气体成分及流量,进而推算出混合气体的粘度、密度和流速;然后计算出颗粒在此流体中的雷诺系数,并得到颗粒运动状态;最后根据与之对应的颗粒沉降速度公式,计算出连续加料冶炼钛渣时焦炭粒度下限。

某厂生产酸溶性钛渣主要参数包括送电功率为 18 MW/h,吨渣冶炼电耗为 2 200 kWh,钛收率为 97%,碳过量系数 120%。根据上述参数和酸溶性钛渣的成分(表 1)、攀枝花钛精矿的成分(表 2)、焦炭成分(表 3),得到小时钛精矿、焦炭加入量和小时钛渣产出量分别为 13.17、1.36、8.18 t。结合钛渣熔炼基本反应($\text{FeO}+\text{C}=\text{Fe}+\text{CO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3+3\text{C}=2\text{Fe}+3\text{CO}$ 、 $3\text{TiO}_2+\text{C}=\text{Ti}_3\text{O}_5+\text{CO}$),采用热力学计算方法,依据文献[8]提到冶炼过程约 5% 的 CO 氧化生成 CO₂,甲烷主要来自焦炭中挥发分等关于煤气成分计算方法,得到了连续加料冶炼钛渣时纯气体和混合气体流量及体积百分数,其结果见表 4。

表 1 酸溶性钛渣的成分指标

Table 1 The component index of acid-soluble titanium slag %

ΣTiO_2	TiO_2	FeO	Ti_3O_5
74.55	57.03	5.78	16.35

表 2 钛精矿主要化学成分

Table 2 Main chemical composition of titanium concentrate %

TiO_2	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	S
47.73	36.33	5.33	2.53	0.765	3.58	0.18

表 3 焦炭成分及粒度指标

Table 3 Coke composition and grain size index %

类别	Fcd	Ad	Vd	S	占比		
					+8 mm	+2 mm ~ 8 mm	-2 mm
基准期	83.95	14.49	1.41	0.74	7.04	52.50	40.46
试验期	83.53	14.94	1.40	0.70	5.50	90.57	3.93

表4 纯气体和混合气体流量及体积百分数指标
Table 4 Flow and volume percent indexes of pure gas and mixed gas

气体	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	体积百分数/%	摩尔质量/(g·mol ⁻¹)
CO	1 636.72	81.86	28
CH ₄	26.58	1.33	16
CO ₂	86.14	4.31	44
N ₂	250.00	12.50	28
混合气体	1 999.44	100.00	28.53

依据文献[9-10]提供的关于气体粘度计算相关数据(表5)、Sutherland的粘度计算公式(1)、常压下气体混合物粘度计算公式(2),得到高温下纯气体和混合气体的粘度,主要计算结果见表5。

表5 纯气体和混合气体粘度
Table 5 Viscosity of pure gas and mixed gas

气体组分	C	K	温度范围/K	高温下气体粘度/(Pa·s)
CO	145.442 4	15.215 55	273 ~ 1 300	4.93×10 ⁻⁵
CO ₂	276.205 4	16.721 58	238 ~ 973	4.06×10 ⁻⁵
CH ₄	166.386 8	10.143 28	77 ~ 1 050	2.84×10 ⁻⁵
N ₂	192.860 8	15.535 29	871 ~ 1 552	5.44×10 ⁻⁵
O ₂	237.923 6	19.154 05	758 ~ 1 700	6.93×10 ⁻⁵
H ₂	151.834 0	7.396 744	321 ~ 1 060	2.11×10 ⁻⁵
混合气体				4.93×10 ⁻⁵

纯气体粘度计算公式:

$$\eta = \frac{KT^{3/2}}{C+T} \quad (1)$$

式中, η 表示纯气体的粘度,Pa·s;C和K为两个常数; T 表示温度,K。

混合气体粘度计算公式:

$$\mu = \frac{\sum V_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum V_i M_i^{1/2}} \quad (2)$$

式中, μ 表示混合气体的粘度,Pa·s; μ_i 表示纯*i*组分的粘度,Pa·s; V_i 表示混合气体中*i*组分的体积分数,%; M_i 表示混合气体中*i*组分的摩尔质量,g/mol。

混合气体流速计算公式:

$$u_q = \frac{4q_v}{\pi(d_z - 2d_g)^2} \quad (3)$$

式中, u_q 为混合气体的流速,m/s; q_v 为混合气体流量,m³/h; d_z 为炉膛直径,m; d_g 为挂渣层厚度,m。

结合圆形电炉主要技术参数:挂渣层厚度为

1 m、炉膛直径为 9.8 m,炉内温度为 1 700 ℃,炉内压强可近似为 1.013 25×10⁵ Pa,依据理想气体状态方程,得到高温下混合气体流量为 14 443.33 m³/h、混合气体密度为 0.18 kg/m³;依据气体流速计算公式(3)得到混合气体流速为 0.084 m/s。根据雷诺系数计算公式,由此推导出,当焦炭颗粒粒径<6.66 mm时,雷诺系数<2,此时焦炭颗粒沉降速度应满足以下方程:

$$u_k = \frac{gd^2(\rho_s - \rho)}{18\mu} \quad (4)$$

式中, u_k 为焦炭颗粒沉降速度,m/s; g 为重力加速度,取值为 9.8 m/s²; d 为焦炭颗粒粒径,m; ρ_s 为焦炭颗粒真密度,kg/m³; ρ 为混合气体的密度,kg/m³; μ 表示混合气体的粘度,Pa·s。

当 $u_k < u_q$,即焦炭颗粒沉降速度小于混合气体流速时,焦炭颗粒将被带出,反之,焦炭颗粒不被带出。当 $u_k = u_q$,即焦炭颗粒沉降速度等于混合气体流速时,根据式(1)求得满足被带出焦炭颗粒粒径最大值关系式如式(5)所示。

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{18\mu u_q}{g(\rho_s - \rho)}} \quad (5)$$

式(5)中混合气体流速 u_q 取值为 0.084 m/s,混合气体的密度 ρ 取值为 0.18 kg/m³,混合气体的黏度 μ 为 4.93×10⁻⁵ Pa·s,焦炭颗粒真密度 ρ_s 取值为 2.08×10³ kg/m³, g 取值为 9.8 m/s²,由此计算出被带出焦炭颗粒粒径最大值为 0.06 mm。因此,当颗粒粒径>0.06 mm时,焦炭颗粒不被带出。

结合被带出焦炭颗粒粒径最大值测算结果,参考钛渣冶炼企业所用无烟煤粒度范围,同时考虑工业上焦炭粒度筛分经济性,得到试验使用焦炭粒度范围为 2 ~ 8 mm。

2 试验原料及设备

2.1 试验原料

本次试验用钛精矿质量稳定,可排除对试验的干扰,其主要化学成分见表2,-200目(74 μm)占比 37.54%。试验用焦炭为经振动筛分级处理得到的筛上物,其成分及粒度见表3。

2.2 试验设备

试验在某大型钛渣电炉上开展,其主要设备包括:电炉本体系统,自焙电极,出渣和出铁的开口、堵口机,煤气回收系统。电炉主要技术参数见表6。

表 6 钛渣电炉主要技术参数
Table 6 Main technical parameters of titanium slag electric furnace

变压器容量/MW	炉膛直径/mm	挂渣层厚度/mm	电极直径/mm	出渣口数量/个	出铁口数量/个	煤气回收工艺
25.5	9 800	1 000	1 000	1	1	干法除尘

3 试验结果与讨论

选择试验时间较近,且连续生产时间较长时间段作为“基准期”,而试验分两阶段,一是功率不变条件下考察焦炭粒度变化对特征曲线、产品质量、冶炼指标影响,具体指标见“试验期 1”;二是功率提升条件下考察焦炭粒度变化对特征曲线、产品质量、冶炼指标的影响,具体指标见“试验期 2”。

3.1 特征曲线

1) 电极位置

电极位置反映了冶炼过程中电极端部上下运动趋势。通常用标准差表示单个炉次电极位置波动情况,标准差的方差表示一段时间内电极位置波动情况,其结果见表 7。

表 7 电极位置标准差及标准差的方差
Table 7 Standard deviation of electrode position and variance of standard deviation

类别	标准差平均值/mm	标准差的方差/mm ²
基准期	349.49	5 340.54
试验期 1	331.13	4 043.09
试验期 2	325.92	1 743.48

由表 7 可知,“试验期 1”、“试验期 2”的电极位置标准差平均值、标准差的方差均比基准期低,表明焦炭粒度分布变窄且均匀,有利于钛渣冶炼过程电极稳定控制。此外,试验过程发现,冶炼开始后电极位置快速上升,且 30 min 左右电极位置达到最高值,甚至有些炉次达到电极运动设定上限。为此,对试验期冶炼开始阶段电极位置变化进行统计分析,冶炼开始电极位置变化即冶炼 30 min 左右电极位置达到最高值与冶炼开始电极位置的差值,其结果见图 1。从图 1 可知,“试验期 1”的电极位置快速上升,并在 30 min 左右达到最高值甚至出现达到电极运动设定上限现象,可能原因是上炉含有未反应碳参与下炉反应,因热碳反应活性远高于冷碳缘故,下炉冶炼初期反应迅速生成电导率较高的熔渣,导致电极位置快速提升。由此推测,试验期所用焦炭粒度在 2~8 mm 范围内比例提高 38.07 个百分点,虽然粒度分布变窄,但整体粒度较基准期偏大,造成

焦炭反应相对滞后,使未反应碳留在炉内是导致此现象的主要原因。

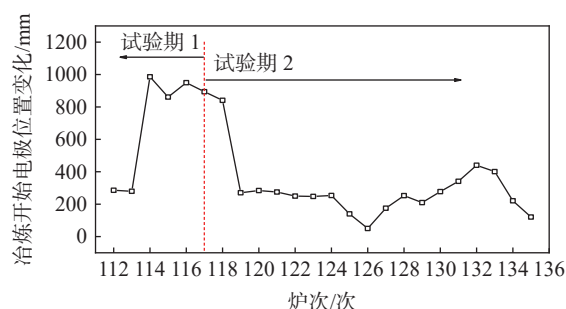


图 1 冶炼开始阶段电极位置变化
Fig. 1 Change of electrode position at the beginning of smelting

基于此,后续开展提升功率对电极位置变化影响。结果表明,“试验期 2”冶炼开始阶段电极位置得到有效控制,提升功率可有效降低炉内残碳对电极位置的不利影响。

2) 烟气温度及 CO 浓度

钛渣冶炼过程烟气温度和 CO 浓度变化可直接反映炉内反应情况。通常用标准差表示单个炉次烟气温度/CO 浓度波动情况,而标准差的方差表示一段时间内烟气温度/CO 浓度波动情况,试验结果如表 8 所示。由表 8 可知,“试验期 1”的烟气温度标准差平均值、CO 浓度标准差平均值均比基准期低,表明焦炭粒度分布变窄且均匀,有助于气体均匀产生和烟气温度稳定控制。另外,“试验期 1”的烟气温度标准差的方差、CO 浓度标准差的方差均比基准期高,可能原因为试验用焦炭整体颗粒粒度比基准期偏大,反应相对滞后,难以准确预判反应情况,容易造成焦炭颗粒在炉内堆积。在功率不变条件下,忽视焦炭粒度偏大对其影响,导致部分炉次出现气体产生量不均衡、时大时小等问题,进而造成一段时间内烟气温度、CO 浓度波动大。

“试验期 2”的烟气温度平均值、烟气温度标准差平均值和 CO 浓度标准差平均值均比“试验期 1”低,且“试验期 2”的烟气温度标准差的方差、CO 浓度标准差的方差比基准期低,表明功率提升后,熔池更加活跃,加入物料能及时熔化并充分反应,烟气温度及 CO 浓度波动相对较小。

表8 烟气温度及CO浓度
Table 8 Flue gas temperature and CO concentration

类别	烟气温度			CO浓度		
	平均值/℃	标准差 平均值	标准差 的方差	平均值/%	标准差 平均值	标准差 的方差
基准期	331.20	55.54	56.51	33.78	13.91	2.50
试验期1	335.72	50.10	157.49	31.68	12.76	3.32
试验期2	326.29	41.96	33.39	34.60	12.61	1.97

3.2 产品质量

1) 钛渣质量

根据以往生产实践和相关文献报告^[11],采用相同成分钛精矿和还原剂进行冶炼钛渣,得到钛渣中杂质元素含量变化较小。因此,焦炭粒度变化带来钛渣质量波动主要体现在钛渣品位上,通常用方差表示钛渣品位波动情况。

将各个阶段钛渣品位数据进行方差化处理分析,由此得到基准期、“试验期1”、“试验期2”钛渣品位的方差分别为1.60、0.69、0.41。以上数据显示,“试验期1”的钛渣品位的方差均比基准期低,表明焦炭粒度分布变窄且均匀,有利于钛渣质量稳定控制。此外,通过延长冶炼时间使焦炭充分参与反应,尽可能降低在功率不变条件下焦炭反应相对滞后对钛渣品位波动的影响,这有可能是“试验期1”的特征曲线波动较大而钛渣质量波动小的主要原因。而“试验期2”的出渣品位方差最小,表明功率提升可有效降低焦炭粒度对钛渣质量的不利影响。

2) 铁水质量

由于铁水中其它杂质元素含量较小,焦炭粒度变化对铁水质量影响主要体现在铁水渗碳上。因此,重点关注试验过程铁水中C含量变化,其结果见图2。

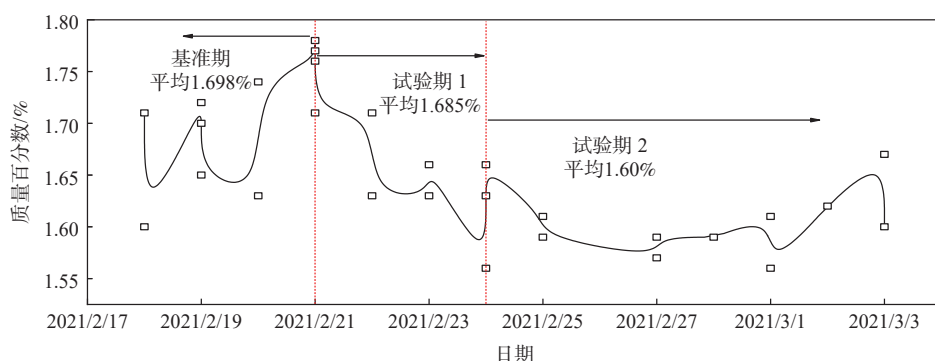


图2 铁水中C含量变化趋势
Fig. 2 Change trend of C content in molten iron

由图2可知,随着试验逐渐进行,铁水中C含量呈下降趋势。试验期焦炭粒度偏大,减少焦炭与铁水接触面积,使铁水增碳作用减弱。通过分析除尘灰中C含量发现,基准期、试验期的C含量平均值分别为1.03%、0.85%,表明试验期所用焦炭抽损相对较少,未参与反应碳没有完全进入铁相,而留在熔渣内,是“试验期1”冶炼初期电极位置快速上升且不可控的主要原因。

3.3 冶炼指标

主要冶炼指标对比见表9。由表9可知:

表9 主要冶炼指标
Table 9 Main smelting indexes

类别	吨渣焦耗/t	功率/(MW·h ⁻¹)	百吨料耗时/h	吨渣电耗/kWh
基准期	0.143	17.64	7.15	2 287.46
试验期1	0.167	17.67	7.33	2 339.53
试验期2	0.141	18.14	6.80	2 211.41

1)与基准期相比,“试验期1”的吨渣焦耗、吨渣电耗分别升高了24 kg、52.07 kWh,百吨料耗时延长了0.18 h。在功率和钛精矿原料不变条件下,焦炭颗粒粒度偏大,反应速率相对较慢,导致冶炼指标变差。

2)与“试验期1”相比,“试验期2”的吨渣焦耗、吨渣电耗降低了26 kg、128.12 kWh,百吨料耗时缩短了0.53 h。功率提升0.47 MW/h,改善热力学和动力学条件,促进焦炭充分反应,使得冶炼指标得到显著提升。

综上分析,钛渣冶炼过程和质量稳定控制与输入功率、焦炭粒度有关。当功率较低时,焦炭粒度越大,焦炭反应相对越滞后,烟气温度和CO浓度标准差波动越大,此时只有通过延长反应时间,降低焦炭反应相对滞后对钛渣质量波动的影响;当功率较高时,烟气温度、CO浓度标准差波动较小,此时功

率提升可有效降低焦炭粒度相对偏大带来的不利影响。因此,焦炭粒度分布变窄且均匀,有利于钛渣冶炼过程和质量稳定控制,但相应指标提升需考虑功率提升对其产生的影响。

4 结论

1)根据颗粒在流体中自由沉降运动特点,结合文献提供气体相关数据、公式和电炉主要技术参数,得到连续加料冶炼钛渣条件下被带出的焦炭颗粒粒径最大值为0.06 mm。参考钛渣冶炼所用无烟煤粒度范围,结合工业上焦炭粒度筛分经济性,得到试验使用焦炭粒度范围为2~8 mm。

2)在功率不变条件下,“试验期1”的烟气温度、

CO浓度波动较大,同时冶炼初期存在电极位置快速上升且不可控的问题。“试验期1”的吨渣焦消耗、百吨料耗时、吨渣电耗比基准期分别多24 kg、0.18 h、52.07 kWh。以上均是因试验使用焦炭粒度偏大、反应相对滞后引起的。

3)功率提升0.47 MW/h,“试验期2”的烟气温度、CO浓度波动较小,且冶炼初期电极位置更加受控,“试验期2”的出渣品位方差最低。与“试验期1”相比,“试验期2”吨渣焦耗、吨渣电耗分别降低了26 kg、128.12 kWh,百吨料耗时缩短了0.53 h。以上表明功率提升可有效降低焦炭粒度相对偏大带来的不利影响。

参考文献

- [1] Han Fengxia, Lei Ting, Zhou Lin, *et al.* Ratio of anthracite to ilmenite of titanium slag smelted by 30MVA DC arc furnace[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012, 36(2): 298-303.
(韩丰霞, 雷霆, 周林. 30MVA直流电弧炉冶炼钛渣配碳比研究[J]. 稀有金属, 2012, 36(2): 298-303.)
- [2] Ma Xiang, Han Fengxia, Lei Ting. Factor of reductant carbon during titanium slag smelting in closed direct current arc furnace[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 38(5): 6-10.
(马翔, 韩丰霞, 雷霆. 密闭直流电弧炉钛渣生产还原剂碳因素分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2013, 38(5): 6-10.)
- [3] Xiao Jun. Study on the influence of different reductants on titanium slag of Panzhihua titanium concentrate smelting[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018, 47(2): 35-38.
(肖军. 不同还原剂对攀枝花钛精矿冶炼钛渣影响研究[J]. 中国有色冶金, 2018, 47(2): 35-38.)
- [4] Qiu Shuxing, Xiao Jun, Li Kaimao, *et al.* Impact of Panjiang coke on titanium slag smelting with Panzhihua titanium concentrate[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(2): 24-29.
(邱淑兴, 肖军, 李凯茂, 等. 盘江焦炭对攀枝花钛精矿冶炼钛渣影响研究[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(2): 24-29.)
- [5] Li Jie, Song Canyang, Li Xiaojing, *et al.* Research and application of combustibility and reactivity of pulverized coal injected in blast furnace[J]. China Metallurgy, 2019, 29(1): 8-13.
(李杰, 宋灿阳, 李小静, 等. 高炉喷吹煤粉燃烧性与反应性的研究与应用[J]. 中国冶金, 2019, 29(1): 8-13.)
- [6] Gu Longjian, Li Chongchao, Liang Surong, *et al.* Effect of different carburizing agents on carburizing and its influence on steel quality[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1992, 13(2): 18-26.
(古隆建, 礼重超, 梁素荣, 等. 不同增碳剂增碳效果及对钢质量影响的研究[J]. 钢铁钒钛, 1992, 13(2): 18-26.)
- [7] Correspondent. Antway helps Shenhua Ningxia coal to liquids project with an annual output of 4 million t/a run at full capacity[J]. Chemical Fertilizer Design, 2018, 56(2): 14.
(本刊通讯员. 安特威助力神华宁煤年产400万t/a煤制油项目满负荷运行[J]. 化肥设计, 2018, 56(2): 14.)
- [8] Li Kaimao. Discussion on recycling of gas from titanium slag electric furnace[J]. Light Metals, 2014, (12): 39-41.
(李凯茂. 钛渣电炉煤气回收利用的探讨[J]. 轻金属, 2014, (12): 39-41.)
- [9] Ma Peisheng, Jiang Biyun, Zhang Jianhou. Critical assessment of viscosity and its correlation with temperature for gaseous substances under normal pressure[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 1981, (3): 193-205.
(马沛生, 江碧云, 张建侯. 气体常压粘度数据的评定和对温度的关联[J]. 化工学报, 1981, (3): 193-205.)
- [10] Tian Linan. Viscosity calculation of pure gas, gas mixture and liquid[J]. Chemical Fertilizer Design, 1997, (6): 9-13.
(田立楠. 纯气体、混合气体及液体粘度的计算[J]. 化肥设计, 1997, (6): 9-13.)
- [11] Li Kaimao. Economic analyzing on slag grade and power consumption for smelting Panzhihua titanium concentrates[J]. Light Metals, 2015, (10): 46-50.
(李凯茂. 攀枝花钛精矿冶炼钛渣的经济品位及电耗分析[J]. 轻金属, 2015, (10): 46-50.)