

引文格式:肖军,宋兵,叶良军,等. 兰炭对电炉还原熔炼制备钛渣的影响分析[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(2): 75-81.

XIAO Jun, SONG Bing, YE Liangjun, et al. Analysis of the influence of semi-coke on the preparation of titanium slag by electric furnace reduction smelting[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(2): 75-81.

兰炭对电炉还原熔炼制备钛渣的影响分析

肖 军¹, 宋 兵¹, 叶良军², 吕学明¹, 邱淑兴¹, 李凯茂¹

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

2. 攀钢集团钒钛资源股份有限公司, 四川 攀枝花 617000)

[摘 要] 碳质还原剂的特性对于电炉熔炼钛渣的产品及生产指标有较大影响,而兰炭具有固定碳含量高、反应活性强、低灰分、低硫分等优势,目前尚未有采用兰炭冶炼钛渣的文献报道。为了探究兰炭对钛渣冶炼的影响,本研究分析对比了兰炭和焦粉的气化反应性测试、热重分析、与钛精矿混合后的热重分析,及石墨化度分析,并进行了全焦粉冶炼钛渣与混合还原剂冶炼钛渣的对比分析,得出以下主要结论。分析结果表明,相同时间内兰炭失重率(89.7%)明显高于焦粉(44.1%),且兰炭挥发温度更低、石墨化度更低,说明兰炭气化反应速度更快、反应活性更高,有利于加速钛渣冶炼还原过程的进行。工业试验结果表明,使用混合还原剂(焦粉:兰炭=8:2,质量比)后,钛渣中TiO₂含量为74.93%,略低于全焦粉冶炼指标74.96%,但渣中FeO含量增加12.28%,CaO、MgO、SiO₂、Al₂O₃等含量减少10.76%;混合还原剂冶炼产生的煤气整炉平均CO浓度提高2.69%,H₂含量提升0.51%,煤气质量稳定提升;混合还原剂冶炼吨渣电耗降低25.19 kWh/t,冶炼周期缩短0.61 h。在焦粉中添加适量兰炭作为钛渣冶炼还原剂,可以提升钛渣质量,缩短冶炼周期,降低冶炼成本,但由于兰炭气化反应速度更快、反应活性高,应尽量优化电炉内部气体排出条件,降低气体集中产生量;从安全方面考虑,兰炭更适合连续加料冶炼工艺。

[关键词] 钛渣冶炼; 电炉熔炼; 兰炭; 焦粉; 热重分析; 石墨化度; 起始反应温度; 反应活性

[中图分类号] TF823 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)02-0075-07

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.02.008

0 引言

随着我国钛产业的进步,钛产品在当前社会中的角色日益突出,在国防建设、国民经济发展中均发挥重要作用^[1-3]。2023年我国钛白粉和海绵钛产量分别达到416万t、21.8万t,成为全球最大的海绵钛和钛白粉生产国^[4]。钛渣作为氯化法钛白粉和海绵钛生产的主要原料,是我国钛产业健康发展的基础^[5],其冶炼工艺及所使用的原料对钛渣的质量与成本起着决定性影响。

电炉熔炼法是钛渣生产的主流工艺,其原料主要包括钛精矿及碳质还原剂。当前国内钛渣冶炼企业多以冶金焦、石油焦、无烟煤作为碳质还原剂,在国内钛产业竞争日益激烈的背景下,探寻更为经济、环保且性能优良的还原剂,成为钛渣冶炼行业亟待解决的重要课题。

邱淑兴等^[6]研究了不同种类焦炭的成分、粒度、还原性与结构之间的差别,结合生产实践研究了其对攀枝花钛精矿冶炼钛渣的影响行为,提出降低石墨化程度,缩小微晶体积,增加单位微晶体积上反应活性点,缩小比表面积,可提高焦炭的反应活性。肖军^[7]研究了无烟煤、焦炭作为还原剂对钛渣冶炼的影响,结果表明无烟煤冶炼过程更加稳定、CO产生速度更快,具有更好的还原性能,可缩短冶炼时间、提高电炉热效率,烟气温度较焦炭冶炼高50℃左右。李凯茂等^[8]研究了焦炭粒度对钛渣冶炼的影

[收稿日期] 2025-10-25 [修订日期] 2025-12-02

[录用日期] 2025-12-05 [出版日期] 2026-04-01

[第一作者] 肖军(1986—),四川绵竹人,本科,正高级工程师,研究方向为钛渣冶炼及钛原料加工处理。

[通信作者] 邱淑兴(1990—),山东沂水人,博士,高级工程师,研究方向为煤焦资源的清洁高效利用。

响,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0.067 mm,结合工业上应用情况选择粒度范围2~8 mm的焦炭开展工业试验,结果表明焦炭粒度分布变窄后,有利于冶炼过程电极位置、气体产生和钛渣质量的稳定控制,吨渣焦耗较基准期降低2 kg/t。除此之外,尚未见采用不同还原剂冶炼钛渣的相关文献报道,能否找到新的可替代焦炭和无烟煤的还原剂,从而进一步降低钛渣生产成本有待研究。

兰炭作为一种具有独特理化性质的碳质还原剂,近年来逐渐在铁合金等冶炼领域崭露头角。与传统冶炼用焦相比,具有固定碳含量高、反应活性强、低灰分、低硫分等显著优势^[9-11]。这些特性使其在钛渣冶炼过程中能够展现出独特的作用机制,为

优化冶炼工艺、提升钛渣质量、降低生产成本提供了新的可能路径。

本文旨在通过试验研究与理论分析,研究兰炭在钛渣冶炼过程中的行为规律,剖析其对冶炼过程、钛渣质量以及经济效益等方面的影响,以期为兰炭在钛渣冶炼行业的广泛应用提供理论依据与实践指导。

1 试验条件及方法

1.1 原料条件

试验所用原料主要为攀钢集团自产钛精矿、攀钢自产焦粉及新疆某企业生产的兰炭,均为工业级原料。钛精矿的典型化学成分见表1,兰炭和焦粉的主要成分见表2。

表1 钛精矿成分分析(质量分数)

Table 1 Composition analysis of titanium concentrate(mass fraction)

%

成分	Fe ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅
含量	5.84	37.52	0.91	0.95	0.041	3.65	0.854	0.022	0.177	2.43	46.71	0.086

表2 碳还原剂指标(质量分数)

Table 2 Carbon reducing agent specifications
(mass fraction)

%

还原剂	固定碳	灰分	挥发分	S
兰炭	81.81	9.04	9.15	0.26
焦粉	84.74	13.82	1.38	0.61

1.2 试验设备

试验采用的主要设备包括:差热-热重分析仪(型号TGA/DSC1,瑞士METTLER TOLEDO公司)、行星式球磨机(型号WQMPULVERISETTE6,德国FRITSCH公司)、全自动铁前炉料冶金性能综合测定仪(型号KSZ-2015C-02,鞍山市科翔仪器仪表有限公司)、真空碳管炉(型号HFTHT-3010SMZ,天津迈瑞博科技设备研发有限公司)、X-ray衍射仪(型号X'Pert Pro,帕纳科Malvern Panalytical)。

1.3 试验方法

1.3.1 焦炭气化反应性(CRI)测试

取粒径2~4 mm的焦炭、兰炭样品放入120℃烘箱,干燥4 h。分别称取干燥后的样品各200 g,放入全自动铁前炉料冶金性能综合测定仪,按照15℃/min的升温速度升温至1 100℃,此过程中采用氮气保护(0.8 L/min)。当温度达到1 100℃后,将炉

内气体由氮气切换为CO₂气体(5 L/min),并保温130 min,保温结束将CO₂切换为N₂(2 L/min)随炉冷却。通过测量CO₂和还原剂反应后失重率K(式(1)),判断还原剂反应性能。

$$K = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \quad (1)$$

式中: m_1 为还原剂初始质量,g; m_2 为还原剂反应后质量,g。

1.3.2 热重分析

将兰炭、焦炭均破碎至200目(74 μm)以下,基本消除粒度对后续性能评价的影响。称取一定量(不超过热重样品坩埚的1/2)的兰炭、焦粉,分别进行差热热重分析。在氩气保护状态下,按照20℃/min的升温速度升至1 300℃分析两种还原剂的热重变化特征。

按照固定碳配比相同的原则(钛精矿:焦粉=100:10,钛精矿:兰炭=100:10.36),称取一定量(不超过热重样品坩埚的1/2)的混合料,分别进行差热热重分析。在氩气保护状态下,按照20℃/min的升温速度升至1 300℃,分析两种还原剂对钛精矿的还原热重变化特征。

1.3.3 还原剂石墨化度分析

采用200目以下的兰炭和焦粉样品,通过XRD

法测量石墨化度^[12]。首先根据XRD测量结果计算石墨(002)晶面层间距 d_{002} , 见式(2)。

$$d_{002} = \frac{\lambda}{2\sin\theta_e} \quad (2)$$

式中: λ 为入射的X射线的波长, $\lambda=0.154\,056\,2\,\text{nm}$; θ_e 为002峰的衍射角度, $(^\circ)$ 。

之后将 d_{002} 计算结果代入Mering-Maire公式计算石墨化度 g , 见式(3)。

$$g = \frac{d_{\max} - d_{002}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (3)$$

式中: $d_{\min}=0.335\,4\,\text{nm}$, 为理想石墨晶体的层间距; $d_{\max}=0.344\,0\,\text{nm}$, 为完全非石墨结构的(002)晶面的层间距。

2 不同还原剂冶金性能对比分析

2.1 气化反应性(CRI)分析

图1为两种还原剂CRI分析结果, 可以看出当温度达到 $1\,100^\circ\text{C}$ 并将炉内气氛切换为 CO_2 后, 兰炭和焦粉均出现不同程度失重, 这主要是由于还原剂中C与 CO_2 反应生成CO并随气体排出。通过曲线可以看出相同时间内兰炭失重率(89.7%)明显高于焦粉(44.1%), 说明兰炭气化反应速度更快、反应活性更高。据此推测, 在钛渣冶炼过程中使用兰炭可以提高钛精矿还原反应速率, 有利于缩短冶炼时间、节约能耗。

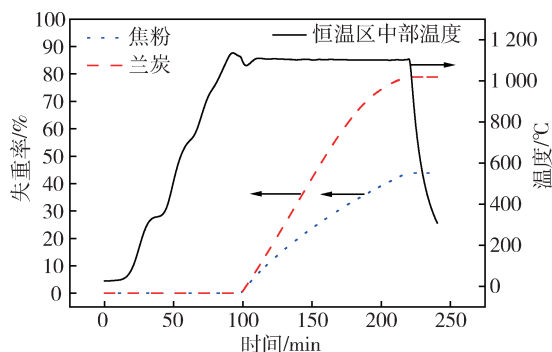


图1 还原剂反应性测试结果

Fig. 1 Reducing agent reactivity test results

2.2 挥发分对钛渣冶炼的影响分析

从焦粉和兰炭的热重曲线(图2)可以看出, 兰炭失重率可以达到29.03%, 而焦粉仅失重5.71%。在 100°C 左右, 兰炭出现明显失重, 主要是由于兰炭结合水失水导致(失重率约2.5%)。当温度达到 739.48°C 时兰炭开始快速失重, 而焦粉的快速失重

温度达到 $1\,036.62^\circ\text{C}$, 这主要是由于兰炭的烧成温度约 600°C , 其残余挥发分较高, 当加热到 600°C 以上时, 有机物大量挥发。此外, 在快速失重前, 两种还原剂均出现少量失重。

在钛渣冶炼过程中, 兰炭挥发温度更低、挥发量更大, 再加上其还原速度更快, 可能导致冶炼烟气量增加(烟气温度升高), 熔池液面上涨速度较快, 泡沫渣出现概率更高。因此, 使用兰炭冶炼钛渣时应尽量优化气体排出条件, 降低气体集中产生量, 故而从安全方面考虑, 其更适合连续加料冶炼工艺。

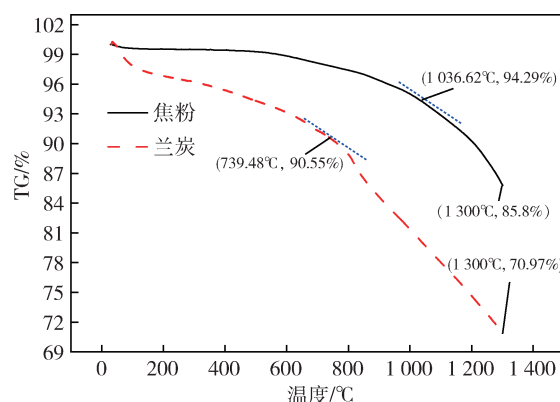


图2 不同还原剂升温热重曲线

Fig. 2 Temperature-rising TG curves of different reducing agents

2.3 不同还原剂与钛精矿反应速度分析

将钛精矿与兰炭/焦粉按相同的固定碳配比混合后进行热重测试分析, 在测试温度范围内主要发生固固还原反应, 以 45° 切线切点作为快速失重起始温度点。由图3可知, 当温度升高至 600°C 左右时添加兰炭的样品开始缓慢失重, 当温度达到 868.94°C 时其失重率为2.36%, 而添加焦粉的样品在此阶段基本没有重量变化。结合图2兰炭TG曲线, 可以判断此阶段主要是兰炭挥发分损失。当温度升高至 868.94°C 时, 添加兰炭的样品开始快速失重, 而添加焦粉的样品仍然没有出现失重, 此时兰炭已经与钛精矿发生快速的还原反应。当温度升高至 $1\,063.62^\circ\text{C}$ 时添加焦粉的样品开始出现快速失重, 此时焦粉与钛精矿发生快速的还原反应。继续升温至 $1\,260.42^\circ\text{C}$, 添加兰炭的样品基本完成本阶段反应, 重量不再变化, 其整体失重率为15.12%。当温度升至 $1\,300^\circ\text{C}$ 时, 添加焦粉的样品仍在继续失

重(失重率12.31%),未达到平衡点。由此看出,兰炭与钛精矿反应起始温度更低、反应速度更快,有利于固相阶段还原反应。这主要是由于兰炭具有更好的反应活性,且其气化成分中存在大量 H_2 ,可有效促进还原反应的进行。

由此可见,采用兰炭作为还原剂冶炼钛渣可有效提高还原反应速率,对钛渣提产、降耗具有积极作用。

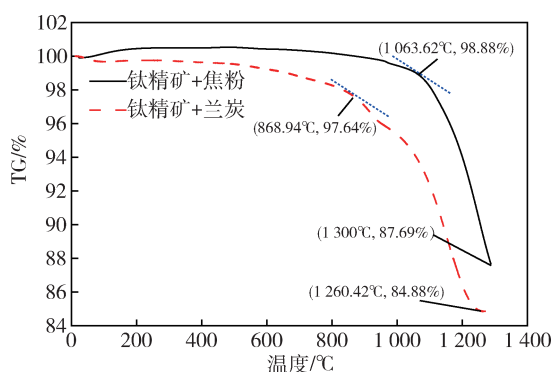


图3 不同还原剂与钛精矿反应热重曲线

Fig. 3 TG Curves of titanium concentrate reduced by different reducing agents

2.4 不同还原剂石墨化度分析

通过分析石墨化程度,进一步研究兰炭和焦粉的还原反应活性差异的原因。通过XRD法测量不同还原剂的石墨化度,设备设置参数为Cu靶、电压40 kV、电流40 mA、步长 0.02° 、扫描范围 $10\sim90^\circ$ (2θ),通过HighScore软件处理相关试验数据。

图4为兰炭和焦粉的XRD分析图谱,分析表明焦粉峰的峰强更高、峰型更窄,这一定程度说明焦粉具有比兰炭更高的石墨化程度。进一步通过石墨化度计算方法计算得到的兰炭和焦粉的石墨化度结果,见表3。

计算表明,焦粉的石墨化度达到0.821,远高于兰炭。这主要是由于焦粉生产温度更高,有利于焦粉石墨片层的堆砌和石墨网面的发育,从而使 d_{002} 减小,石墨化度增加。理论分析表明,碳质还原剂

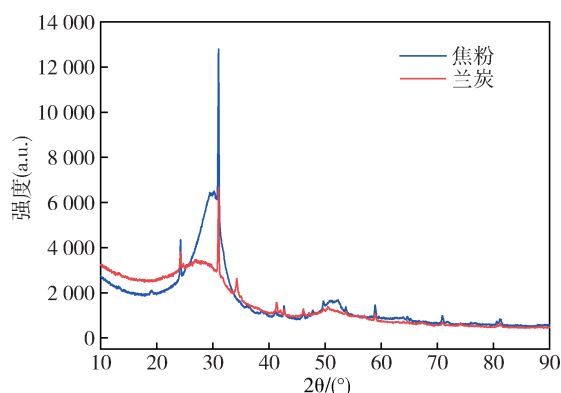


图4 兰炭和焦粉的XRD检测图谱

Fig. 4 XRD spectra of semi-coke and coke

表3 兰炭和焦粉石墨化度计算结果

Table 3 Graphitization degree of semi-coke and coke

样品名称	$2\theta/(^\circ)$	d_{002}/nm	g
焦粉	26.342	0.336 9	0.821
兰炭	26.217	0.339 9	0.476

的石墨化程度越高化学反应活性越差,对还原反应越不利^[13]。由此可见,兰炭具有比焦粉更好的化学反应活性,有利于加快钛渣冶炼还原过程的进行。

3 兰炭冶炼钛渣产业化试验

通过上述分析可以看出,与传统冶金焦炭相比,兰炭具有挥发温度低、挥发分高、反应温度低、反应速度快等特点,在钛渣冶炼过程中可以缩短冶炼时间、降低冶炼电耗,但是必然导致冶炼气体产生量增加,泡沫渣等异常炉况出现概率增加。为了验证兰炭在钛渣工业生产中的应用效果,同时降低生产风险,利用攀钢大型钛渣电炉,采用混合还原剂(焦粉:兰炭=8:2,质量比)开展相关工业试验。

3.1 钛渣质量分析

试验过程中主要冶炼工艺参数与基准期基本相同(电流:33 000~38 000 A,电压:300~340 V,加料速度:15~20 t/h)。分别取基准期(还原剂为100%焦粉)和试验期(焦粉:兰炭=8:2,质量比)钛渣样品进行综合分析,结果见表4。

表4 钛渣主要成分对比(质量分数)

Table 4 Main component comparison of titanium slag (mass fraction)

%

成分	Al_2O_3	C	CaO	MgO	S	SiO_2	TiO_2	FeO
全焦粉冶炼钛渣	2.44	0.023	1.8	7.19	0.156	5.2	74.96	7.82
混合还原剂冶炼钛渣	2.04	0.004	1.64	6.48	0.156	4.68	74.93	8.78

从表 4 可以看出,使用兰炭后钛渣中 CaO、MgO、SiO₂、Al₂O₃ 含量均有不同程度降低。这主要是由于在钛渣冶炼过程中除铁氧化物之外的其他氧化物均大部分进入渣中,兰炭灰分比焦粉低 5 个百分点左右,进入渣中杂质总量减少,因此有利于降低渣中杂质含量。使用兰炭后渣中 C 含量略低于焦

粉,说明兰炭反应速度更快、利用率更高。

3.2 煤气质量分析

钛渣冶炼过程中,碳质还原剂与氧化物的还原反应产生煤气,该煤气经过除尘系统处理后可进一步用作其他工序燃料或者发电。表 5 为基准期和试验期所产煤气的成分对比情况。

表 5 煤气成分对比
Table 5 Coal gas component comparison

项目	CO				H ₂		
	最大浓度/%	平均浓度/%	标准差	达标时间/min	最大浓度/%	平均浓度/%	标准差
全焦粉冶炼	62.64	42.55	12.00	38.27	3.18	1.73	1.00
混合还原剂冶炼	64.82	45.24	11.18	23.92	4.06	2.24	1.00
差值	2.19	2.69	-0.82	-14.35	0.88	0.51	0.00

注:①基准期数据为使用 100% 焦粉作为还原剂冶炼 10 炉钛渣的平均值,试验期数据为使用混合还原剂冶炼 10 炉钛渣的平均值;②“达标时间”表示每炉送电开始至尾气中 CO 浓度>30% 所需时间。

由表 5 可以看出,在还原剂中添加兰炭可使钛渣冶炼产生的尾气中 CO 含量明显增加,整炉平均 CO 浓度提高 2.69%,最大浓度提高 2.19%,同时标准差降低 0.82,煤气质量稳定性提升。同时,添加兰炭后尾气中 CO 浓度增加速度更快,其满足 CO>30% 的达标时间较焦粉提前 14.35 min。

使用兰炭后,整炉平均 H₂ 含量提升 0.51%,最大值提升 0.88%,并未出现明显的 H₂ 含量升高现象。这可能是由于兰炭加入量较少,虽然挥发分高于焦粉,但由于电炉密闭不佳,产生的少量氢气被

部分燃烧。以上分析表明,进一步增加兰炭使用量有利于提升煤气质量。

3.3 冶炼指标分析

表 6 为基准期和试验期的冶炼指标对比情况。数据表明,与全焦粉冶炼相比,混合还原剂冶炼吨渣电耗降低 25.19 kWh/t,吨料电耗降低 0.04 MWh/t,百吨料耗时降低 0.34 h,冶炼周期缩短 0.61 h。由此可以看出,在还原剂中适当添加兰炭可以提高电炉热效率,起到降低冶炼电耗、缩短冶炼时间的目的,这与实验室分析情况基本一致。

表 6 冶炼指标对比
Table 6 Comparison of smelting indicators

类别	炉前吨渣电耗/kWh	吨料电耗/MWh	吨渣还原剂消耗/kg	冶炼周期/h	百吨料耗时/h
全焦粉冶炼	1 932.06	1.19	151.01	12.23	6.43
混合还原剂冶炼	1 906.86	1.16	151.12	11.62	6.09
差值	-25.19	-0.04	0.11	-0.61	-0.34

注:“百吨料耗时”表示每冶炼 100 t 混合料所需时间。

在兰炭固定碳含量比焦粉降低 2.93% 的条件下,混合还原剂冶炼钛渣吨渣还原剂消耗仅比全焦粉冶炼高 0.11 kg,同时钛渣平均品位仅比基准期低 0.03 个百分点。这可能是由于在钛渣冶炼过程中兰炭反应速度快,一定程度上弥补其固定碳含量低的缺点,降低了还原剂烧损量,还原剂利用率略高于焦粉。

以上分析表明,在还原剂中适当添加兰炭冶炼

钛渣,有利于降低钛渣生产成本,对提高钛渣产品综合竞争力具有积极作用。

4 结论

为了探究兰炭对钛渣冶炼的影响,本研究分析对比了兰炭和焦粉的气化反应性测试、热重分析、与钛精矿混合后的热重分析,及石墨化度分析,并进行了全焦粉冶炼钛渣与混合还原剂冶炼钛渣的

对比分析,得出以下主要结论。

1)分析结果表明,相同时间内兰炭失重率(89.7%)明显高于焦粉(44.1%),且兰炭挥发温度更低、石墨化度更低,说明兰炭气化反应速度更快、反应活性更高,有利于加速钛渣冶炼还原过程的进行。

2)工业试验结果表明,使用混合还原剂(焦粉:兰炭=8:2,质量比)后,钛渣中 TiO_2 含量为74.93%,略低于全焦粉冶炼指标74.96%,但渣中FeO含量增加12.28%,CaO、MgO、 SiO_2 、 Al_2O_3 等含量减少10.76%;混合还原剂冶炼产生的煤气整炉平均CO浓度提高2.69%, H_2 含量提升0.51%,煤气质量稳定提升;混合还原剂冶炼吨渣电耗降低25.19 kWh/t,冶炼周期缩短0.61 h。

3)在焦粉中添加适量兰炭作为钛渣冶炼还原剂,可以提升钛渣质量,缩短冶炼周期,降低冶炼成本,但由于兰炭气化反应速度更快、反应活性高,应尽量优化电炉内部气体排出条件,降低气体集中产生量;从安全方面考虑,兰炭更适合连续加料冶炼工艺。

[参考文献]

- [1] 杨绍利, 马兰, 王军, 等. 攀西钛资源综合利用技术应用现状及发展方向[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(6): 2-12.
YANG Shaoli, MA Lan, WANG Jun, et al. Application status of comprehensive utilization technologies of titanium resources in Panxi[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(6): 2-12.
- [2] 李兰杰, 张彩东, 刘洋, 等. 钒钛磁铁矿非高炉冶炼与钛渣综合利用技术研究进展[J]. 中国冶金, 2025, 35(3): 44-54, 64, 168.
LI Lanjie, ZHANG Caidong, LIU Yang, et al. Research progress of direct reduction of vanadium titanium magnetite and resource utilization of titanium-bearing slag[J]. China Metallurgy, 2025, 35(3): 44-54, 64, 168.
- [3] 刘娟. 攀枝花钛资源制备沸腾氯化用富钛原料研究进展[J]. 中国有色冶金, 2018, 47(6): 49-53.
LIU Juan. Development of study on preparation of Ti-rich raw materials for boiling chlorinated from Panzhihua titanium resources [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018, 47(6): 49-53.
- [4] 安仲生, 陈岩, 赵巍, 等. 2023年中国钛工业发展报告[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(3): 1-8.
AN Zhongsheng, CHEN Yan, ZHAO Wei, et al. 2023 CHINA titanium industry development report [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2024, 45(3): 1-8.
- [5] 丁瑞锋, 张大伟, 秦子然, 等. 我国钛产业高速发展下的资源安全保供分析[J]. 冶金管理, 2023(22): 43-51.
DING Ruifeng, ZHANG Dawei, QIN Ziran, et al. Analysis of Ensuring Resource Security and Supply Amid the High-speed Development of China's Titanium Industry [J]. China Steel Focus, 2023(22): 43-51.
- [6] 邱淑兴, 肖军, 李凯茂, 等. 盘江焦炭对攀枝花钛精矿冶炼钛渣的影响[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(2): 24-29.
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.
- [7] 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, 57.
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, 57.
- [8] 李凯茂, 肖军, 马勇, 等. 焦炭粒度对钛渣冶炼影响研究[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(3): 39-44.
LI Kaimao, XIAO Jun, MA Yong, et al. Study on the effect of coke particle size on titanium slag smelting [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(3): 39-44.
- [9] 付林林, 孙涛, 方俊杰, 等. 烧结过程用兰炭作为燃料替代焦粉的生产试验[J]. 河南冶金, 2012, 20(4): 6-8, 16.
FU Linlin, SUN Tao, FANG Junjie, et al. Production test of semi-coke as fuel instead of pulverized coke in sintering process [J]. Henan Metallurgy, 2012, 20(4): 6-8, 16.
- [10] 李杰, 李小静, 李帮平, 等. 兰炭用作高炉喷吹燃料的试验分析[J]. 中国冶金, 2019, 29(12): 14-18, 39.
LI Jie, LI Xiaojing, LI Bangping, et al. Experimental analysis on use of semi-coke as fuel for blast furnace injection [J]. China Metallurgy, 2019, 29(12): 14-18, 39.
- [11] 王星, 张海燕, 赵金巍, 等. 全精粉烧结配加兰炭替代部分焦粉的探讨[J]. 新疆钢铁, 2017(3): 36-39.
WANG Xing, ZHANG Haiyan, ZHAO Jinwei, et al. Discussion on adding semi-coke to replace part of coke powder on all fine powder sintering process [J]. Xinjiang Iron and Steel, 2017(3): 36-39.
- [12] 施洋, 范启明, 刘自宾, 等. 煅后石油焦石墨化度计算的修正方法研究[J]. 石油炼制与化工, 2022, 53(4): 89-94.
SHI Yang, FAN Qiming, LIU Zibin, et al. Study on optimization method for calculation of graphitization degree of calcined petroleum coke [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2022, 53(4): 89-94.
- [13] 党晓娥, 唐晨, 吕军, 等. 兰炭焦粉的石墨化探索性研究[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3): 1438-1444.
DANG Xiaoe, TANG Chen, LYU Jun, et al. Exploratory study on graphitization of semi-coke powder [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(3): 1438-1444.

Analysis of the influence of semi-coke on the preparation of titanium slag by electric furnace reduction smelting

XIAO Jun¹, SONG Bing¹, YE Liangjun², LYU Xueming¹, QIU Shuxing¹, LI Kaimao¹

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

2. Pangang Group Vanadium & Titanium Resources Co., Ltd., Panzhihua 617000, China)

Abstract: The properties of carbonaceous reductants have a significant influence on the product quality and production indicators of titanium slag smelting in electric furnaces. Semi-coke has advantages such as high fixed carbon content, strong reactivity, low ash content, and low sulfur content. However, there have been no literature reports on the use of semi-coke for titanium slag smelting. To investigate the effect of semi-coke on titanium slag smelting, this study compared and analyzed the gasification reactivity, thermogravimetric analysis, thermogravimetric analysis after mixing with ilmenite concentrate, and graphitization degree of semi-coke. A comparative analysis was also conducted between titanium slag smelting using pure coke breeze and that using a mixed reductant, leading to the following main conclusions. The analysis results show that the weight loss rate of semi-coke (89.7%) is significantly higher than that of coke powder (44.1%) at the same time, and the volatilization temperature of semi-coke and the graphitization degree is lower, indicating that the gasification reaction speed of semi-coke is faster and the reaction activity is higher, which is beneficial to accelerate the reduction process of titanium slag smelting. The industrial test results show that the content of TiO_2 in titanium slag is 74.93% after using mixed reducing agent (coke powder:semi-coke = 8:2, mass ratio), which is slightly lower than the coke powder smelting index of 74.96%, but the content of FeO in slag increases by 12.28%, and the content of CaO, MgO, SiO_2 and Al_2O_3 decreases by 10.76%. The average CO concentration of the gas produced by the mixed reducing agent smelting is increased by 2.69%, the H_2 content is increased by 0.51%, and the gas quality is steadily improved. The power consumption of smelting per ton of slag by mixed reducing agent is reduced by 25.19 kWh/t, and the smelting cycle is shortened by 0.61 h. Adding an appropriate amount of semi-coke to coke powder as a reducing agent for titanium slag smelting can improve the quality of titanium slag, shorten the smelting cycle and reduce the smelting cost. However, due to the faster gasification reaction speed and high reactivity, the internal gas discharge conditions of electric furnace should be optimized as far as possible to reduce the concentrated gas production. Considering the safety, semi-coke is more suitable for continuous charging smelting process.

Key words: titanium slag smelting; electric furnace smelting; semi-coke; coke breeze; thermogravimetric analysis; graphitization degree; initial reaction temperature; reactivity