

直筒炉冶炼钒铁钒收率影响因素及对策

游本银

(攀钢集团钒钛资源股份公司攀枝花钒制品厂 四川 攀枝花 617000)

摘要: 介绍了直筒炉冶炼钒铁工艺特点,以及国内外相关企业钒收率现状,全面分析了直筒炉生产钒铁冶炼收率的影响因素,指出氧化钒堆密度和炉衬打结质量是影响钒收率的主要原因。从冶炼工艺和参数优化方向着手,针对性地指出提高直筒炉冶炼钒铁的途径和措施,对攀钢现有钒铁生产技术经济指标的提高具有一定指导意义。具体包括:控制 V_2O_3 堆密度在 1.0 以上, V_2O_3/V_2O_5 值在 2.0 ~ 2.5; 确保炉衬打结质量,镁砂粒度 3 ~ 8 mm 比例 $\geq 60\%$; 烘烤小火温度 500 $^{\circ}\text{C}$ 、对应烘烤时间 4 h、大火烘烤温度 900 $^{\circ}\text{C}$ 、对应烘烤时间 11 h; 适当延长精炼时间,实施阶梯配铝等。优化后钒铁冶炼收率由 95.5% 提高到 96.4%。

关键词: 钒铁; 直筒炉; 电铝热法; 回收率; 渣态

中图分类号: TF841.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)04-0012-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Influencing Factors and Countermeasures for Vanadium Yield during Ferrovanadium Smelting in Cylinder Furnace

You Benyin

(Panzhihua Vanadium Products Factory, Pangang Group Vanadium and Titanium Resources Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: According to the characteristics of ferrovanadium smelting in cylinder furnace and the current state of vanadium recovery for ferrovanadium smelting in the world, the factors influencing the vanadium recovery were systematically analyzed, and the bulk density of vanadium oxides as well as the ramming quality of furnace lining were proposed as the main factors influencing the vanadium recovery for ferrovanadium smelting. From the aspect of process and parameters optimization, the measures for improving vanadium recovery during ferrovanadium smelting were provided which have a guiding significance for technical-economic index improvement for industrial ferrovanadium smelting. And the measures include bulk density of V_2O_3 controlled above 1.0, the mass ratio of V_2O_3 to V_2O_5 kept at 2.0 ~ 2.5, more than 60% of magnesite for ramming having 3 ~ 8 mm of particle size. Moreover, the roasting process of the furnace is suggested at 500 $^{\circ}\text{C}$ for 4 h followed by 900 $^{\circ}\text{C}$ for 11 h. The measures also include prolonging the refining time and adopting gradient aluminum addition etc. After optimization, vanadium recovery rate for ferrovanadium smelting in cylinder furnace increases from 95.5% to 96.4%.

Key words: ferrovanadium; cylindrical furnace; electro-aluminothermic process; recovery rate; slag state

0 引言

钒是最有效的合金元素之一,约 85% 左右的钒

应用于钢铁工业。其中,绝大多数钒以钒铁的形式加入钢液中生产合金钢,降低钢的过热敏感性,以改善钢的强度、硬度、韧性及耐磨性等综合机械性能。

收稿日期: 2020-03-19

作者简介: 游本银(1985—),男,云南昭通人,工程师,长期从事钒合金冶炼方面研究。E-mail: youbenyin@126.com。

在结构钢中加入 0.1% 的钒,其强度、硬度即提高 10% ~ 20% ,结构减重 15% ~ 25% ,降低成本 8% ~ 10%^[1]。钒还广泛应用于航空航天、化工以及核工业等方面^[2]。随着市场导向和用户要求的不断提高,品位高、杂质含量低的钒铁应用日趋广泛。

目前,国内规模性生产钒铁的企业有锦州钒业、承钢、峨铁、攀钢及攀枝花市的数家民营钒企业,主要采用金属铝和硅铁还原钒氧化物来制取高钒铁和中钒铁。其中锦州钒业、峨铁采用倾翻炉冶炼中钒铁,收率突破 96.5%;攀钢北海铁合金公司采用直筒炉 V_2O_5 铝热法生产高钒铁,通过喷吹精炼后,收率突破 98.5% ,处于世界先进水平;攀钢攀枝花钒制品厂采用 V_2O_5 电铝热法生产高钒铁,反应炉为直筒炉,冶炼收率低于 96.0% ,该法具有设备简单、流程短、易操作的特点,但最大的缺陷是对炉料适应性差、后续强化措施不够,冶炼收率偏低,一定程度上制约了钒铁生产成本。笔者结合攀钢实际,就如何提高钒回收率作一简单探讨,对

现有钒铁生产及指标改善具有一定指导意义。

1 直筒炉冶炼钒铁的特点

1.1 简要原理介绍

V_2O_5 与还原剂铝、石灰、铁质料以及部分返渣经配、混料后,分批加入冶炼炉,冶炼炉为一打结烘烤后的组合式炉筒,简称直筒炉。

直筒炉的内衬只能用一次。铝热还原 V_2O_5 的化学反应式为: $V_2O_5 + 2Al = 2V + Al_2O_3$,反应生成金属钒、氧化铝并放出大量的热,氧化铝与炉料中加入的造渣剂石灰结合形成低熔点的炉渣,反应放出的热促使炉料中铁屑熔化而与钒形成钒铁合金^[3]。冶炼完毕,将炉体吊运至冷却区域自然冷却 36 ~ 40 h 后拆炉分离渣铁而获得钒铁产品。

1.2 直筒炉冶炼钒铁钒走向分析

为摸清直筒炉冶炼钒铁的钒损失走向,特制作表 1 表征生产过程的钒平衡情况。

表 1 直筒炉电铝热法冶炼钒铁的钒平衡情况

Table 1 Vanadium equilibrium of ferrovanadium smelting by electro-aluminothermic method in cylinder furnace

编号	投入钒 / %	产出钒 / %					
		合金饼	刚玉渣	除尘灰	粉尘	富渣	其它损失
001	100	95.47	3.18	0.38	0.20	0.59	0.18
002	100	95.31	3.11	0.31	0.26	0.83	0.18
003	100	95.92	3.02	0.19	0.14	0.61	0.12
004	100	95.67	3.01	0.34	0.23	0.57	0.18
005	100	95.11	3.61	0.34	0.18	0.60	0.16
006	100	95.68	3.12	0.33	0.15	0.61	0.11

由表 1 可知,以 V_2O_5 为主料,直筒炉冶炼钒铁收率平均 95.5% ,且收率不稳定,波动 1% 左右,钒的主要损失为刚玉渣、富渣、以及除尘灰,分别占钒总损失的 71%、14%、11% ,生产过程带走少部分钒。随着质量压力的增大,要求合金杂质含量尤其是铝含量比较低。因此,原料配铝系数一般处于低位,否则容易导致合金中铝含量偏高甚至超标,使原料中部分有价氧化钒不能充分还原,炉渣残钒普遍高于 2.0% ,最终冶炼收率难以突破 96.0% ;此外,受炉衬打结质量的影响,部分打结料被炉渣侵蚀,导致炉渣中 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 含量波动较大,破坏炉渣结构和组分的稳定性,造成冶炼收率波动较大。

2 影响钒铁冶炼收率的因素

2.1 原辅材料的影响

2.1.1 V_2O_5 堆密度的影响

堆密度较低的 V_2O_5 在钒铁冶炼过程中更多的有价 V_2O_5 因除尘作用带离冶炼炉,同时由于堆密度太低,下料过程极为不畅,部分炉料散落在下料机外,相当部分炉料漂浮在熔池表面,熔渣粘度高于正常生产情况,反应动力学条件受限,未能与还原剂充分反应,造成刚玉渣中残钒偏高,对冶炼收率影响极大。

2.1.2 V_2O_5 品位和粒度的影响

从铝热法反应机理看, V_2O_5 品位越高,其氧含量相对偏低,铝热反应热效应偏低,不利于反应向右进行,如后续通电不及时很容易使反应不彻底^[4]。同时,若当炉品位波动大,难以掌握配料 Al/V ,容易造成还原度不足或过剩,影响产品质量和钒回收率。

直筒炉冶炼钒铁,炉料经一次性混料逐批加入冶炼炉中。如果原料粒度相差大,彼此间不能混合

均匀,在加料过程容易造成新的炉料偏析,影响化学反应的比表面积,从而影响反应的速率,熔渣粘度大、流动性差,还原反应不充分。原料粒度过细,反应热量集中,易引起反应物激烈喷溅损失。

2.1.3 原料杂质的影响

氧化钒杂质主要为 K_2O 和 Na_2O ,该杂质对冶炼反应过程影响较大,因为还原氧化钾、氧化钠要消耗铝,造成还原度的降低,氧化钒还原不充分。还原出来的 K 、 Na 在高温下易挥发,并被空气再氧化成为氧化钠白烟^[5],大量烟尘将带走部分钒。据文献^[5]可知,钒铁冶炼产生的烟尘中 2% 属于钒氧化物。

2.2 冶炼工艺参数的影响

2.2.1 配铝系数

增加炉料的配铝量,可使铝热反应进行得更完全,渣中残钒越低,从而获得较高的钒回收率,同时由于反应剧烈也能加速石灰的脱硫效果,从该角度出发,无疑配铝系数越高越好。然而,根据图 1 可知:一方面,当配铝系数超过 102% 时,熔体中残余的铝逐渐增多,局部富集的铝必然与还原产物钒结合成 $V-Al$ 合金,使得钒铁合金中铝含量也陡然上升;另一方面,由于合金铝含量高导致合金比重降低,影响合金在炉渣中的沉降效果,使得渣中夹杂的合金增多,钒回收率降低。这对高钒铁产品质量控制和钒收率的影响都是不利的。

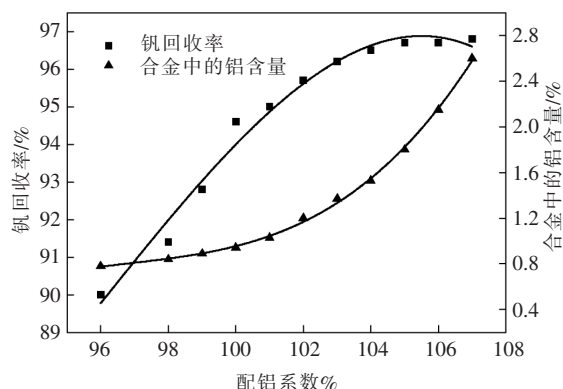


图 1 配铝系数与钒收率和合金铝含量的关系
Fig. 1 Relationship between aluminum addition coefficient and vanadium recovery and aluminum content of alloy

2.2.2 供电制度

铝热还原 V_2O_3 的反应热效应为 221.02 kJ/mol ,远小于自发反应所需热效应 301.39 kJ/mol ^[6],因此,必须外加热源才能使反应向右进行。供电制

度的及时合理对提高钒收率和产品质量有着举足轻重的作用,钒铁冶炼过程有还原期和精炼期,还原期主要任务是钒氧化物的还原,该阶段需要根据炉况不时变换供电参数,以确保炉料反应顺畅、快捷;精炼期主要任务是进一步降低渣中残钒以及促使钒铁合金小液滴能有效沉降。根据还原期和精炼期任务的不同以及炉料的性质灵活确定供电制度是提高钒收率的关键要素之一。

2.2.3 渣态的影响

无论是金属或合金的制取,熔渣是还原反应的积极参加者,是反应的重要组成部分,其冶炼过程都要求炉渣具有良好的物理化学性质,如熔点、粘度、密度、表面张力、电导率等。这些物理化学性质对铁合金产品的质量和各项经济指标有着积极的促进作用^[7]。直筒炉电铝热法生产钒铁熔渣主要化学成分见表 2。

表 2 钒铁冶炼炉渣主要成分
Table 2 Main compositions of slag for ferrovanadium smelting %

TV	Al_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	ΣFe
1.8 ~ 2.2	66 ~ 72	5 ~ 7	22 ~ 30	0.3 ~ 0.5	0.4 ~ 0.8

根据炉渣结构分子理论分析,其熔点 1700°C 左右、液态渣密度 $3.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,粘度在 $1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 以上,属于较为粘稠的炉渣。该性质大大制约现有钒铁质量的保障能力和相应指标的提高。东北大学彭可武等曾对 Al_2O_3-CaO 渣系进行相关性质的研究,用 CaF_2 对该渣系进行调渣试验, $Al_2O_3-CaO-CaF_2$ 渣系主要物象组成为 $CaAl_2O_4$ 、 $Ca_2Al_3O_4F$ 、 Ca_2AlF 以及 AlF_3 。当配入 20% CaF_2 时初晶温度为 1468°C ,初晶温度随 CaF_2 含量的增加而降低,热电势 $0.0095 \sim 0.01 \text{ V}$,在 1600°C 下的电导率为 $0.37 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,电导率随 CaF_2 含量的增加和温度的升高而降低^[8]。然而,该研究成果未充分考虑 MgO 的侵蚀,同时根据生产实践表明, CaF_2 对炉衬的侵蚀极为严重,渣中 CaF_2 含量超过 2.0% 时对炉衬寿命威胁很大,漏炉风险加大,很大程度上制约了该成果的应用实践。

2.2.4 加料速度

冶炼加料速度对钒铁产品质量和钒冶炼回收率也有一定影响。加料速度过快,部分炉料在熔体表面浮动,同时因下料过快导致炉料大量飞扬和溅落而加大过程损耗,炉料来不及充分反应,炉温升不上去,使钒冶炼回收率下降;加料速度过慢,通电时间

延长,不仅增加了钒的挥发损失和冶炼电耗,而且可能导致合金增碳,不利于其他指标的提高。正常生产情况总加料时间控制在180~220 s为宜。

2.3 炉衬质量的影响

因钒铁生产要求的出炉温度大于1500℃,而冶炼过程的最高温度可达到1800℃以上,这就要求炉衬有较高的耐火度以及相应的抗渣性能,也要求打结所用的耐火材料必须有较高的熔点,通常选用镁质耐火材料打结,打结好的炉衬送烘烤区域烘干烘透后方可使用。生产实践表明,炉衬质量对钒铁冶炼收率影响极大。若炉衬质量不高,在冶炼过程中炉衬材质会被炉渣大量侵蚀,使炉渣中MgO含量大增,破坏了炉渣结构,熔渣碱度增大,流动性变差,进而影响渣铁分离。同时,合金液容易渗透到打结层,形成大量的合金饼边缘夹渣和炉底巴渣。该部分富集渣与炉衬粘结紧密,分离难度很大,同时MgO含量高达80%以上,回收利用相当困难,造成一定数量的钒损失。

2.4 喷吹工艺的影响

喷吹工艺是在铝热反应基本结束后,借鉴高炉喷吹技术,在精炼期进行电加热→喷吹→电加热的一个冶炼过程,利用气体为载体把喷吹料喷入熔渣中,主要作用是促进渣中合金液加速沉降,喷入还原剂进一步对渣中氧化物进行再还原,以降低渣中TV含量,加速钒铁微粒的沉降,促使更多的钒进入合金;并利用气体的搅拌作用,加速传质过程,改善熔池反应动力学条件。

2.4.1 喷吹时间

增大喷吹料与熔渣的接触面积,加强还原效果,同时利用气体的搅拌作用,加速传质过程。喷吹时间对精炼效果影响较大,若喷吹时间短,造成部分喷吹料局部堆积,与炉渣未能充分接触,烧损严重,未能起到精炼作用;若喷吹时间过长,当高速气体吹入熔渣中时,造成了大量的热损失,反而对渣态无益。由于钒铁冶炼过程是固-固和固-液反应,表面张力对生产过程的界面现象、新相生成以及渣铁分离都有很大影响。为保障冶炼顺畅以及操作方便连续,喷吹时间一般控制在8~10 min为佳。

2.4.2 喷吹料的组成

根据钒铁冶炼精炼期的主要目的,喷吹料由细粒度的铝粉和铁粉组成,铝粉主要强还原渣中残钒的作用,配入定量铁粉便于还原得到的金属钒迅速结合成钒铁合金而向下沉降,喷吹料的加入量直接关系到熔

渣残钒含量以及冶炼炉温。若加入量少,则残钒被还原出的少,不利于已生成钒铁微粒沉降,加入量过多则会导致合金中铝含量超标以及钒品位下降。

3 提高钒铁冶炼收率的措施

3.1 原辅材料方面

3.1.1 严格控制 V_2O_3 堆密度

为保障钒铁质量,提高钒铁质量控制力,笔者曾选取不同堆比重 V_2O_3 冶炼钒铁试验,不改变现有冶炼制度,重点考察 V_2O_3 堆比重对冶炼过程、高钒铁产品质量、钒收率等技术经济指标的影响情况,试验情况见图2。

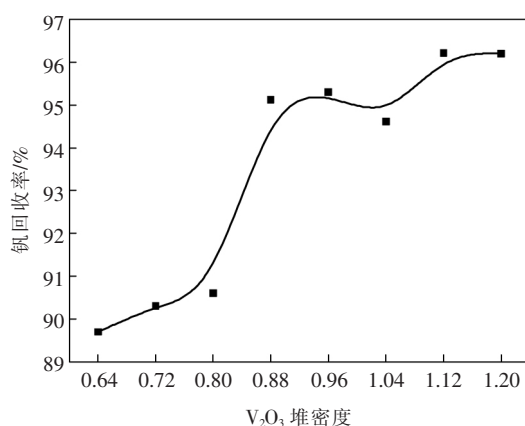


图2 V_2O_3 堆密度与钒回收率的关系

Fig. 2 Relationship between bulk density of V_2O_3 and vanadium recovery

从图2可以看出:堆密度小于1时, V_2O_3 堆密度与冶炼收率近似呈直线关系,堆密度在0.8~1.0呈跳跃式增长,当堆密度高于1.0以后,趋势线趋于平缓。由此可知,为保证质量和冶炼收率指标, V_2O_3 入炉堆密度最好控制在1.0以上。

3.1.2 优化炉料结构

在保证原辅材料质量稳定的前提下,同一炉批炉料中 V_2O_3 的TV含量的差值(绝对值)不超过1%,控制炉料反应均衡性,有利于冶炼炉况的控制。同时合理确立 V_2O_3/V_2O_5 值是保证冶炼质量的重要保证,片钒配入量偏低不能顺利起弧,后续电加热很难快速提温,反应迟缓;若片钒配入量过多,则反应初期喷溅损失严重,供电制度调整也很困难,不利于收率的提高。正常生产中, V_2O_3/V_2O_5 值在2.0~2.5较为合适,将一部分片钒作为引弧料,其余片钒与主料同步加入,既避免了片钒集中反应造成的

喷溅现象,也合理利用了反应热。

3.2 冶炼工艺方面

3.2.1 优化供电制度

高钒铁冶炼过程主要有还原期和精炼期,还原期应尽可能将氧化钒彻底还原,需要及时补足反应所需的热量,采取高电流供电,电流 $\geq 10\,000\text{ A}$ 。实际生产中,起弧反应至55 min左右称为还原期间,在这期间内大部分炉料均参与反应,炉渣残钒可降至5.0%以下。精炼期主要作用是维持炉渣温度,保持一定流动性,使反应后期合金小液滴能迅速团聚并有效沉降,精炼时间对钒回收率影响很大。精炼时间由15 min延长至25 min,渣中残钒降低至1.8%以下,冶炼收率提高0.1~0.3个百分点。

3.2.2 实施阶梯配铝工艺

阶梯配铝工艺来源于“两步法”冶炼工艺,两步法冶炼钒铁工艺由奥地利的特雷巴赫化学工业公司首先提出,该工艺冶炼收率达98%以上。具体工艺路线为第一步使用过量的铝,把钒尽量还原进金属相,此时得到渣为贫渣,将大部分贫渣放出炉外,鉴于贫渣含钒小于0.3%,可直接丢弃;第二步使用钒的氧化物从熔融的金属中把过剩的铝氧化成渣相,获得富渣和合格的产品,富渣返回下一炉循环使用,避免部分有价钒的无偿流失^[9]。受此启发,攀枝花钢铁研究院与攀钢钒制品厂共同制定阶梯配铝现场探索性试验,通过分批加料的方式实现阶梯配铝功能,即前期炉料配铝系数由102%降至85%,后期炉料配铝系数提高至115%~120%,该工艺在直筒炉冶炼高钒铁生产中取得明显效果,冶炼收率提高0.6~0.8个百分点。

3.3 炉衬制备工艺优化

如前所述,炉衬质量对冶炼炉况控制以及钒收率的影响极大,炉衬质量的不稳定性是导致冶炼收率波动的主要原因之一。炉衬质量的好坏主要受打结料质量、烘烤制度的影响。通过对影响炉衬质量的主要因素做正交试验,得出影响打结质量最大的因素是烘烤制度,其次是打结料配比。打结料中冶金镁砂配比比较小时,冶炼炉体不够紧实,无法起到“骨料”的支撑作用,当冶金镁砂比例过大时,在打结过程中镁火泥和卤水对镁砂的粘结性能减弱,合金熔体更容易经气孔侵蚀炉衬,通过试验得出:镁砂粒度3~8 mm比例 $\geq 60\%$ 可保证炉衬打结质量。对烘烤而言,最大的影响因素为小火温度和大火烘烤时间,小火烘烤时间和大火温度的影响极小,最佳

烘烤制度为:小火温度500℃、对应烘烤时间4 h、大火烘烤温度900℃、对应烘烤时间11 h。在此烘烤制度下可保证炉衬自由水分在相对缓慢的条件下100%脱出,结合水分99%以上脱出。显著提高炉衬的耐高温性能和耐侵蚀性能,减少合金饼夹渣。

综上,攀钢钒制品厂通过优化炉料配比、合理配置通电制度、采取阶梯配铝等措施后,高钒铁综合收率达96.4%,较优化前提高0.9个百分点,在行业内具有较强的借鉴意义。后续将继续推进喷吹工艺、渣态优化研究工作。

4 进一步提高回收率的方向及探索

4.1 选取复合还原剂

直筒炉冶炼钒铁由于受冶炼时间的限制,通常选用还原性较强的金属铝还原 V_2O_5 制得。金属铝熔点660℃,燃点仅550℃,密度 2.7 g/cm^3 ,而钒铁冶炼温度几乎在1500℃以上,根据熔渣分子理论,钒铁冶炼炉渣液态密度在 3.4 g/cm^3 以上。导致铝在反应过程中的利用系数较低,尤其是中后期形成一定的熔池后利用率相当低,一方面由于铝的熔点和燃点相对冶炼温度太低,部分铝在高温下燃烧、挥发较多,另一方面,铝的密度低于熔渣密度,部分铝不能渗透到熔渣内部参与反应,使得后期还原效果较差^[10]。因此,选取一种熔点较高、密度与熔渣相近的复合还原剂至关重要。按此指导思想,建议采用铝铁合金代替部分铝粉作为还原剂, FeAl80 熔点接近1200℃,密度 3.5 g/cm^3 左右,能有效提高还原剂的利用率,保证中后期的还原度,促使炉料反应充分。同时,能有效缩短V-Fe合金形核时间,合金液相对沉降时间延长。

4.2 开展渣态优化研究

由于铝热法冶炼钒铁的炉渣熔点高、粘度大,炉渣中的合金颗粒沉降速度较慢,因此有必要加入适量的熔剂来改善渣态,系统研究冶炼过程不同阶段炉渣的特性,包括成分、物相、熔点、粘度等,了解该渣系对钒铁冶炼过程的影响机理。利用选择性还原理论选择炉渣添加剂,研究单一和组合添加剂对实际生产渣系 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ 熔点和粘度的影响规律;同时系统研究炉衬 MgO 砖侵蚀的侵蚀情况。在此基础上,结合生产实际情况,提出合适的添加剂种类和含量,使冶炼炉渣熔点降低100℃左右,有利于还原反应彻底以及后续合金液的有效沉降。

4.3 开展细粒度 V_2O_3 造球工艺研究

在氧化钒生产中因沉钒质量、废水池中红钒回收以及除尘料的回用,不可避免地产生部分细颗粒 V_2O_3 。细粒度 V_2O_3 因单体质量较轻,堆密度一般不高,给配料和冶炼控制都带来很大困难。粉尘损失率偏高,不利于合金质量和收率的提高。据此,设想在氧化钒生产中增设筛分装置,将粒度在 $124\ \mu\text{m}$ 以下的 V_2O_3 以及含钒高的除尘灰进行造球处理,通过添加一定粘结剂(以石灰水为佳),选用合适的造球设备,使细粒度 V_2O_3 紧密团聚,让其具有一定的强度和合适粒度,再返回配料与高堆密度 V_2O_3 配加使用,能有效减少除尘损失,提高冶炼效率。

4.4 含钒富渣和除尘灰有效回收

用直筒炉电铝热法冶炼钒铁生产中,由于受原材料和冶炼工艺设备条件的限制,难免会产生少量含钒量较高的粉尘($TV>35\%$)和富渣($TV>10\%$)。目前主要将富渣破碎后与粉尘配入炉料中来回收其中的钒,回收效果较差。可考虑在倾翻炉内集中回收其有价钒,具体做法是:将富渣、除尘灰、铁粒与过量的还原剂(铝或硅铁)经配料,在还原度很高的前

提下将富渣和除尘灰中的钒转化为 $V\text{-Fe-Al}$ 或 $V\text{-Fe-Si}$ 合金,贫渣丢弃,复合合金可直接外卖或返回钒铁正常生产线回用,回收利用率较高。

5 结论

1) 堆密度低的氧化钒在冶炼过程中炉况很差,通过除尘带走的有价钒较多,对直筒炉冶炼钒铁收率影响极大,要获得高的钒收率, V_2O_3 堆密度必须控制在 1.0 以上。

2) 炉衬质量是影响钒收率关键因素之一,炉衬质量高能有效抵御炉渣对炉衬的侵蚀,渣中 MgO 含量较低,降低渣的熔点,同时大大降低了烧结渣和炉底含钒富渣粘结量,减少钒的流失。

3) 开展渣态研究,保证渣态具有良好的物理化学性能,改善炉料反应动力学条件,还原反应更彻底,促进精炼后期合金小液滴凝聚和有效沉降,是提高钒铁冶炼收率的主要方向。

4) “两步法”工艺能显著提高钒铁冶炼收率,是未来钒铁冶炼技术发展趋势,应加快该工艺研究应用步伐。

参考文献

- [1] Duan Lian, Tian Qinghua, Guo Xueyi. Advances in production and application of vanadium resources in China [J]. Hunan Non-ferrous Metals, 2006, 22(6): 17-22.
(段炼, 田庆华, 郭学益. 我国钒资源的生产及应用研究进展 [J]. 湖南有色金属, 2006, 22(6): 17-22.)
- [2] Liu Shiyu. Application and prospect of vanadium [J]. Rare Metals and Cemented Carbide, 2000(2): 58-61.
(刘世友. 钒的应用于展望 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2000(2): 58-61.)
- [3] Wang Liangwen, Wei Shitong, Yin Zhishuang, et al. Industrial test of smelting high ferrous vanadium with vanadium pentoxide and vanadium trioxide mixture [J]. Ferro-alloy, 2003(2): 35-38.
(汪良文, 韦世通, 殷志双, 等. 使用五氧化二钒和三氧化二钒混合料冶炼高钒铁工业试验 [J]. 铁合金, 2003(2): 35-38.)
- [4] Yi Binghua. Factors affecting vanadium yield in high vanadium iron production [J]. Ferro-alloy, 2003(2): 169.
(易炳华. 高钒铁生产中影响钒收率的因素 [J]. 铁合金, 2003(2): 169.)
- [5] Liao Shiming, Bo Tanlun. Foreign vanadium metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 267-269.
(廖世明, 柏谈论. 国外钒冶金 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 267-269.)
- [6] Wang Yonggang. V_2O_3 and V_2O_5 discussion on smelting ferrovanadium process [J]. Ferroalloy, 2002(3): 164.
(王永刚. V_2O_3 和 V_2O_5 冶炼钒铁工艺探讨 [J]. 铁合金, 2002(3): 164.)
- [7] Li Chunde. Ferroalloy metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991.
(李春德. 铁合金冶金学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.)
- [8] Liu Kuiren, Han Qing, Wang Zhaowen, et al. $Al_2O_3\text{-CaO-CaF}_2$ characteristics of slag system [J]. Ferro-alloy, 2010(6): 215.
(刘奎仁, 韩庆, 王兆文, 等. $Al_2O_3\text{-CaO-CaF}_2$ 渣系性能研究 [J]. 铁合金, 2010(6): 215.)
- [9] Sun Chaohui, Yang Yangjun, Zhang Fan. Discussion on two-step smelting process of high vanadium iron [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2010, 31(1): 1-7.
(孙朝晖, 杨仰军, 张帆. 两步法冶炼高钒铁工艺探讨 [J]. 钢铁钒钛, 2010, 31(1): 1-7.)
- [10] Bai Fengren. Using special lean reducing agent for smelting iron vanadium [J]. Ferro-alloy, 1999(2): 19-23.
(白凤仁. 使用专用贫化还原剂冶炼钒铁 [J]. 铁合金, 1999(2): 19-23.)

编辑 杨冬梅