

石煤提钒焙烧竖炉研究

冯军胜¹, 董辉¹, 李朋¹, 王爱华¹, 张井凡², 胡嘉³

(1. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 朝阳日隆钒钛有限公司, 辽宁 朝阳 122000; 3. 北京天瑞利达科技发展有限公司, 北京 100036)

摘要: 在分析传统石煤焙烧设备的基础上, 提出一种适用于石煤提钒的“导风墙-干燥床”式焙烧竖炉。通过与钒钛磁铁矿焙烧竖炉进行对比, 阐述了石煤焙烧竖炉独有的结构特点, 定量给出了其结构参数和操作参数, 并建成了国内第一台真正意义上的石煤焙烧竖炉。实践表明: 石煤焙烧竖炉是一种技术可靠、经济可行的石煤提钒焙烧设备, 它具有炉内温度气氛可控、利用系数较高、单位产品能耗较低、钒回收率较高等优点。对探索我国石煤提钒焙烧的新设备、促进石煤提钒行业的快速发展具有重要意义。

关键词: 石煤; 提钒; 焙烧; 竖炉

中图分类号: TF841.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2013)06-0012-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2013.06.003

Research on Roasting Shaft Furnace for Vanadium Extraction from Stone Coal

Feng Junsheng¹, Dong Hui¹, Li Peng¹, Wang Aihua¹, Zhang Jingfan², Hu Jia³

(1. SEPA Key Laboratory on Eco-industry, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Chaoyang Rilong Vanadium-titanium Co., Ltd., Chaoyang 122000, Liaoning, China; 3. Beijing Tianrui Lida Technology Development Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: Based on analyses on traditional stone coal roasting equipments, a roasting shaft furnace equipped with internal vertical air channels (IVAC) and drying bed for vanadium extraction from the stone coal was developed. Through comparison with the roasting shaft furnace for vanadium titaniferous magnetite, the unique structure characteristics of the roasting shaft furnace for stone coal was elaborated, and structural and operating parameters of the latter was given. Furthermore, the first roasting shaft furnace for stone coal in China was established on this basis. The practice shows that the roasting shaft furnace is a reliable and economical roasting equipment for vanadium extraction from stone coal. It has many advantages, including controllability of temperature and atmosphere in furnace, high utilization coefficient, low energy consumption per unit product, and high vanadium recovery rate. This paper aims at introducing a new furnace type for vanadium extraction from stone coal and promoting the development of vanadium industry.

Key words: stone coal, vanadium extraction, roasting, shaft furnace

收稿日期: 2013-04-22

基金项目: 科技型中小企业技术创新基金: 含钛冶炼炉渣钒钛分离工程化技术研发(12C26212101103); 辽宁省重大科技计划项目: 辽宁省节能减排技术评价指标体系与应用示范(2011229004)。

作者简介: 冯军胜(1988—), 男, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 主要从事竖式炉窑热工、气固流动与传热研究。董辉(1969—), 男, 辽宁黑山人, 教授, 主要从事竖式炉窑热工、冶金过程余热余能回收与利用等研究。

0 引言

我国钒资源主要有钒钛磁铁矿和石煤两大类。《钒钛资源综合利用和产业发展“十二五”规划》中指出^[1]:截至2010年底,我国探明钒资源储量占世界总储量的21%,其中,含钒石煤中钒资源占全国总储量的47%。石煤已逐渐成为我国提钒的一种主要原料。2011年,以石煤为原料的钒制品产量已达到全国总产量的30%左右^[2-3]。尽管我国石煤提钒制品的产量大幅增加,但石煤提钒工艺仍存在工艺装备落后、资源能源消耗高、环境污染严重等问题。目前,石煤提钒主要集中于湖南、湖北等民营中小型企业,主体工艺流程基本上照抄照搬钒渣提钒流程,主体设备或者是沿袭钒渣提钒设备,或者是采用手工作坊式的高耗能、高污染小型设备,致使我国石煤提钒能耗偏高、污染严重、钒制品档次较低,工艺与设备远远不能适应石煤提钒的发展需求。作为提钒流程的核心,焙烧直接影响着钒转化率、单位产品能耗和污染物排放等指标。回转窑,这种钒渣提钒的主体焙烧设备,因其初始投资高而很难在石煤提钒的中小型企业中得以应用,这就造成小平窑、小土竖炉等小型高耗能高污染设备成为目前我国石煤提钒的主体焙烧设备。因此,亟待研发出一种技术

可靠、经济可行的节能环保型石煤焙烧设备。

根据待焙烧原料的形状,可分为粉料焙烧和块料焙烧。粉料焙烧,需要较大的气固换热面积,因此设备外形庞大,初始投资高,如回转窑。相比之下,块料焙烧设备,则具有外形尺寸较小、初始投资低等优点。基于此,笔者同所在研究小组成员,借鉴钢铁行业的球团竖炉,提出了“导风墙—干燥床”式块料焙烧竖炉^[4-5],并开展了相关研究。其中,文献[5]阐述了以辽西高品位钒钛磁铁矿为原料的焙烧竖炉,侧重对氧化钠化焙烧机理和钒回收率的研究;文献[6]系统研究了钒钛磁铁矿焙烧竖炉操作参数。笔者旨在前期研究的基础上^[4-6],开展石煤提钒竖炉结构形式、结构参数和操作参数的研究,研发一种利用系数高、单位产品能耗低、污染物排放少的中小型焙烧设备,从而为我国石煤提钒焙烧探索出一种新的炉型,以促进我国石煤提钒技术的发展。

1 石煤提钒焙烧竖炉的提出

1) 基于现有石煤焙烧设备的不足,提出了竖炉焙烧工艺。

现有的石煤焙烧设备包括平窑、多膛炉、沸腾焙烧炉和回转窑等^[7],参见表1。

表1 传统石煤焙烧设备特点
Table 1 Characteristics of traditional stone coal roasting equipments

项目	平窑	多膛炉	沸腾炉	回转窑
典型设备概述	较早应用于石煤焙烧,入炉物料需制粒,需配以工业煤,以层燃方式进行传热	焙烧设备内径较大,分多层。物料从炉子上部投入,从上往下依次为脱水预热区、烧成区和冷却区	物料从炉顶加入,与自下而上的空气进行接触燃烧,物料呈现微沸腾状态,可实现较高的焙烧温度	在焙烧时,窑内分成3个工作区,即预热区、焙烧区和冷却区
优点	结构较为简单,投资少,砌筑便易,造价低,建设周期短,操作技术较易掌握	由于多膛炉焙烧过程对炉料的搅动、炉料与空气的接触均有利,因此焙烧效果良好	炉内具有较好的氧化气氛,传热传热好,炉床能力较大,设备结构简单,生产环境好,石煤脱碳彻底,转化率高	可实现石煤焙烧的连续生产,废气从窑头较易收集,可实现石煤的规模化生产
缺点	焙烧条件不易控制,温度分布不均匀,焙烧料转化率差别大,且占地面积较大,劳动条件较差	结构复杂,砌炉要求高,辅助设备多,国内生产厂家较少;炉内耙臂、耙齿等炉内机械部件是易损设备,不仅影响生产连续性,而且增加生产费用	焙烧烟气中粉尘量大,造成被烟气带走的物料量也较多,须在设备末端增设高效的除尘设备,投资大,耗电量大,操作技术要求也较高	对操作工人熟练程度要求较高;焙烧设备占地面积大,且焙烧时温度难以控制;高温带过短,焙烧料高温区停留时间难以满足工艺要求,能源利用率低
应用情况	新建钒厂已经很少采用该种设备	因初始投资高,国内钒厂应用少	因初始投资高,国内钒厂应用较少	新建钒厂逐步开始应用

由表1可知,传统石煤焙烧设备具有初始投资高、结构复杂、操作难度高、能源利用率低等缺点,在一定程度上阻碍了我国石煤提钒行业的快速发展。

2) 焙烧竖炉设计要考虑石煤焙烧和钒钛磁铁矿焙烧两者间的共性与各自特性。

从焙烧机理上看,石煤焙烧与钒钛磁铁矿焙烧

均为氧化钠化焙烧。通过氧化焙烧可将石煤和钒钛磁铁矿中各种价态的钒尽可能转化为五氧化二钒，而通过钠化焙烧可实现五氧化二钒与钠盐或钠碱的反应，生成可溶于水的钒酸钠。

但石煤焙烧有其独有的特性：①由于石煤中含有碳，故其焙烧温度比钒钛磁铁矿要低很多。石煤中的碳含量直接决定焙烧过程的温度。碳含量低，通常发热量较低，要达到焙烧的理想温度就要提高入炉焙烧风的温度。对于含碳量过高的石煤在焙烧过程中很可能导致焙烧温度超过理想温度，从而引起大量偏硅酸盐的生成，由于熔化的偏硅酸盐玻璃体包裹了钒，阻碍了氧的扩散和钒酸盐的生成，这样就必须要降低入炉焙烧风的温度^[8]。②由于石煤中的碳在反应中需消耗大量的氧气，故在同一利用系数下，焙烧石煤所需的氧量要远远高于焙烧钒钛磁铁矿所需的氧量。计算表明，石煤焙烧竖炉的焙烧风中的氧含量需达到 8% 以上，才能满足石煤氧化过程中的氧需量。若焙烧石煤的入炉焙烧风氧浓度不足，就会导致焙烧风中的氧气优先与石煤中反应活性较强的碳进行氧化反应，影响石煤的氧化焙烧效果，从而降低钒总的回收率。③由于在钒钛磁铁矿焙烧过程中既要进行钒的转化和回收，还要进行原料除杂，而石煤焙烧只需要进行钒的转化和回收，这样一来石煤焙烧的时间要少于钒钛磁铁矿焙烧。在钒钛磁铁矿焙烧过程中加入除杂的环节是为后续生产高钛渣做准备，这也增加了焙烧所需的时间。

3) 石煤提钒焙烧设备的构想及结构形式特点。

笔者在前期提出的“导风墙—干燥床”式钒钛磁铁矿焙烧竖炉^[4-5]的基础上，通过增加双火道、多风道等结构和导风墙出口面积可调等特点，构造了适用于石煤提钒的焙烧竖炉，如图 1 所示。

与钒钛磁铁矿焙烧竖炉相比，石煤焙烧竖炉还具有其独特的结构特点：①将钒钛磁铁矿焙烧竖炉的单火道改为由主火道和辅火道组成的双火道。主火道出口采取向下倾斜的方式，主要是为了增强焙烧风的穿透性，使得焙烧风能够充满整个焙烧段，以提高石煤的焙烧效果。辅火道的作用主要是为均热段的氧化钠化焙烧提供热量和氧气，加速石煤中碳的氧化反应，为石煤的钠化焙烧提供足够的热量。②冷却段由钒钛磁铁矿焙烧竖炉的单风道改为多风道的结构形式，以增强石煤的冷却效果，同时改善炉内的气流分布。冷却段出口采取水封的方式阻止了

部分可用冷却风的逸出，从而在一定程度上提高了热量的利用率。③导风墙出口面积具有可调性，以改善炉内的气流分布，进而调节炉内气氛和石煤的焙烧温度。当竖炉利用系数、焙烧风与冷却风的温度和流量不变时，导风墙出口面积过小会导致气流通过导风墙的阻力增加，冷却风进入导风墙的趋势减小，冷却风上行通过焙烧段的趋势增加，从而降低焙烧段的温度，增加炉内的氧浓度，反之亦然。导风墙出口面积可调这一特点可以使该石煤焙烧竖炉尽可能地适合各种石煤焙烧的工况，当石煤中的碳含量过高时，可以减小导风墙出口的面积，使得冷却风上行趋势增加，为碳氧化提供足够的氧气，同时还可以有效的降低焙烧温度，防止由于焙烧温度过高而影响焙烧效果。

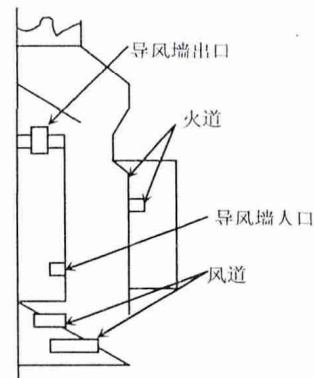


图 1 石煤焙烧竖炉结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of stone coal roasting shaft furnace

这种石煤焙烧竖炉具有炉内温度气氛可控、利用系数高、单位产品能耗低、钒回收率高等优点，同时物料在炉内的停留时间可满足焙烧工艺的要求，物料出炉前的显热也可被回收利用。

2 石煤提钒焙烧竖炉的结构参数和操作参数

1) 结构参数确定

焙烧竖炉的结构参数主要指预热焙烧段、均热段和冷却段的高度和宽度，喷火口（即火道）和冷却风道（即风道）面积及分布，烘干床面积及倾角。其中，各段的高度主要由料球在各段的停留时间所决定，各段的宽度应保证气流的穿透性，使得气固充分接触，以满足料球的焙烧效果。

石煤焙烧一般分为干燥、氧化、烧成和冷却 4 个

步骤,其中,氧化过程主要包括石煤中碳的氧化反应和低价态钒氧化物的氧化反应,烧成主要指五氧化二钒与钠盐或钠碱充分反应生成可溶于水的钒酸盐的过程。干燥和氧化所需的时间一般在1h以上,主要发生在预热焙烧段。烧成主要发生在均热段,但烧成开始于预热焙烧的末尾段,因为石煤在进行氧化反应的同时也在进行着钠化反应,这个区域的温度和气氛已经满足了石煤钠化反应所需要的条件,而烧成所需要的时间也在1h以上,这样才能使得五氧化二钒与钠盐或钠碱充分反应。石煤的冷却发生在冷却段,但需要较短的时间使其冷却,目的是为了阻止可溶性钒酸盐缓慢冷却时结晶脱氧变成可溶性差的钒青铜,因此冷却过程的时间越短越好,即快速冷却能最大限度地抑制钒青铜的生成^[8]。

综合以上分析,针对该石煤焙烧竖炉,石煤在预热焙烧段的停留时间设置为1.5h,在均热段的停留时间设置为1.5h,在冷却段的停留时间设置为0.5h,这样石煤焙烧的总时间为3.5h,这要远远低于钒钛磁铁矿焙烧所需的时间。采用文献[4]、[9]中焙烧竖炉结构参数的计算方法,再结合石煤提钒竖炉的年产量和利用系数,就可以得出其结构参数。表2为石煤焙烧竖炉与钒钛磁铁矿焙烧竖炉在相同年产量和利用系数条件下结构参数的对比。

表2 两种焙烧竖炉结构参数的对比
Table 2 Comparison of structural parameters for the two kinds of roasting shaft furnaces

炉型	预热焙烧段高度	均热段高度	冷却段高度	各段宽度
钒钛磁铁矿焙烧竖炉	H_1	H_2	H_3	W
石煤焙烧竖炉	$0.75H_1$	$0.375H_2$	$0.25H_3$	W

由表2可见,在相同年产量的情况下,石煤焙烧竖炉的整体高度要低于钒钛磁铁矿焙烧竖炉。考虑到气流穿透性的原因,两种焙烧竖炉各段的宽度选

用相同的尺寸。

2) 操作参数确定

焙烧竖炉的操作参数主要指焙烧风的流量和温度,以及冷却风的流量和温度。其中,焙烧风量和冷却风量是由炉内的气固水当量比的大小所决定的,而气固水当量比的大小是由炉内气固传热量和气固传热速率所决定的^[10-11]。炉内气固水当量比是判定炉内焙烧风和冷却风是否充足的主要依据,因此将气固水当量原理引入到石煤焙烧竖炉中来确定操作参数。

石煤焙烧的温度一般为800~850℃,远远低于钒钛磁铁矿的焙烧温度。由于石煤中含有一部分的碳,在焙烧过程中会放出大量的热,从而促进焙烧的进行,故石煤焙烧竖炉焙烧段的气固水当量比要低于钒钛磁铁矿焙烧竖炉焙烧段的气固水当量比^[6],为0.6~0.7,而冷却段由于需要快速冷却,气固水当量比为0.9~1.1。在利用系数为1.2t/(m²·h),焙烧面积为6.8m²,采用热值为4900kJ/m³的发生炉煤气作为燃料的条件下,石煤焙烧竖炉与钒钛磁铁矿焙烧竖炉操作参数的对比如表3所示。

3 应用实例

依据上述研究结果,国内第一台真正意义上的“导风墙—干燥床”式石煤提钒焙烧竖炉在湖南建成,并进行了小型化试产。其中,石煤选用保靖石煤,其五氧化二钒含量在0.89%~1.0%,燃料采用发生炉煤气。该石煤焙烧竖炉年处理石煤量约为5万t,焙烧面积为6.8m²,利用系数为1.2t/(m²·h),比传统的竖式炉窑利用系数高3~4倍,大幅度提高了单炉的年处理量。目前,焙烧1t石煤矿能耗为35kg标准煤,相比传统石煤焙烧设备,耗煤量减少了近三分之一^[5],大大降低了工艺能耗。同时,焙烧过程中钒回收率在80%以上,钒总回收率在75%以上,该指标在国内石煤提钒行业中处于领先水平。

表3 两种焙烧竖炉操作参数的对比

Table 3 Comparison of operational parameters for the two kinds of roasting shaft furnaces

焙烧炉类型	焙烧温度/℃	焙烧风温度/℃	焙烧段的气固水当量比	冷却段的气固水当量比	焙烧风流量/(m ³ ·h ⁻¹)	冷却风流量/(m ³ ·h ⁻¹)	煤气量/(m ³ ·h ⁻¹)	助燃空气量/(m ³ ·h ⁻¹)
石煤焙烧竖炉	850	1060	0.7	1.0	3936.4	4827.5	1327.2	2866.7
钒钛磁铁矿焙烧竖炉	1150	1430	0.8	0.6	3977.4	2910	1840	2445.4

4 结论

1) “导风墙—干燥床”式石煤提钒焙烧竖炉充

分考虑了石煤焙烧的工艺特性,其结构除了具有钒钛磁铁矿焙烧竖炉的特点外,还具有双火道、多风道、导风墙出口面积可调等优点。

2) 该焙烧竖炉主要的结构与操作参数为:石煤在预热焙烧段的停留时间为1.5 h,在均热段的停留时间为1.5 h,在冷却段的停留时间为0.5 h,石煤焙烧的总时间为3.5 h。焙烧段的气固水当量比为0.6~0.7,冷却段的气固水当量比为0.9~1.1。

3) 该焙烧竖炉小型化试产实践表明,利用系数

可达 $1.2 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,焙烧1 t石煤矿能耗为35 kg标准煤,焙烧过程中钒回收率在80%以上,钒总回收率在75%以上。

4) 石煤提钒焙烧竖炉离产业化推广还有很长的路要走,还需要众多学者和工程技术人员的齐心协力,需要科研院所和企业的大力支持。

参考文献

- [1] National Development and Reform Commission. Comprehensive utilization of vanadium and titanium resources and the 'Twelfth Five-Year Plan' for industrial development [R]. 2012.
(中华人民共和国国家发展与改革委员会. 钒钛资源综合利用和产业发展“十二五”规划[R]. 2012.)
- [2] Sun Zhaohui. Analysis on new vanadium technology and prospect of vanadium industry [J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2012, 33(1): 1-7.
(孙朝晖. 钒新技术及钒产业发展前景分析[J]. 钢铁钒钛 2012, 33(1): 1-7.)
- [3] Ning Shunming, Ma Rongjun. The technology development and striving direction of vanadium extraction from stone coal in our country [J]. Mining and Metallurgy Engineering 2012, 32(5): 57-61.
(宁顺明, 马荣骏. 我国石煤提钒的技术开发及努力方向[J]. 矿冶工程 2012, 32(5): 57-61.)
- [4] Zhang Jingfan, Dong Hui, Cai Jiuju *et al.* A shaft furnace-type roasting way and equipment of oxidation and sodium treatment: Chinese Patent 201110371297.9. [P]. 2011-11-21.
(张井凡, 董辉, 蔡九菊 等. 一种竖炉式氧化钠化焙烧方法及装置: 中国发明专利, 201110371297.9 [P]. 2011-11-21.)
- [5] Dong Hui, Feng Junsheng, Li Peng *et al.* Research on a new-style roasting shaft furnace of vanadium oxide [J]. Journal of Industrial Furnace 2012, 34(6): 5-8.
(董辉, 冯军胜, 李朋 等. 一种新型钒氧化钠化焙烧竖炉的研究[J]. 工业炉 2012, 34(6): 5-8.)
- [6] Dong Hui, Feng Junsheng, Li Peng *et al.* Determination of operating parameters for a new roasting shaft furnace for vanadium products [J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2013, 34(2): 11-15.
(董辉, 冯军胜, 李朋 等. 新型钒制品焙烧竖炉操作参数的确定[J]. 钢铁钒钛 2013, 34(2): 11-15.)
- [7] Lan Tao, Zhang Xiaoyu. The technology of vanadium extraction from stone coal and the cleanness evaluation of roasting equipment [J]. Safety and Environmental Project 2011, 18(3): 46-50.
(兰涛, 张晓瑜. 石煤提钒工艺及焙烧设备的清洁性评价[J]. 安全与环境工程 2011, 18(3): 46-50.)
- [8] Ning Hua, Zhou Xiaoyuan, Shang Delong *et al.* Analysis on roasting process of vanadium extraction from stone coal [J]. Non-ferrous Metals, 2010, 62(1): 80-83.
(宁华, 周晓源, 尚德龙 等. 石煤提钒焙烧工艺分析[J]. 有色金属 2010, 62(1): 80-83.)
- [9] Dong Hui, Cai Jiuju, Wang Guosheng *et al.* Design principles in structural and operating parameters of pelleting shaft furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research 2007, 19(7): 14-18.
(董辉, 蔡九菊, 王国胜 等. 球团竖炉结构和操作参数设计原则[J]. 钢铁研究学报 2007, 19(7): 14-18.)
- [10] Teaching and Research Office of Metallurgical Furnace of Northeast Institute. Theoretical basis of metallurgical furnace [M]. Beijing: Chinese Industry Press, 1961: 608-636.
(东北工学院冶金炉教研室. 冶金炉理论基础[M]. 北京: 中国工业出版社, 1961: 608-636.)
- [11] Dong Hui. The research and application of gas flow rule in pellet shaft furnace [D]. Northeastern University, 2006.
(董辉. 球团竖炉内气体流动规律的研究及其应用[D]. 东北大学, 2006.)

编辑 余文华