

引用格式:袁精华.多喷枪顶吹吹炼炉的现状与发展[J].有色设备,2024,38(4):107-112.

YUAN Jinghua. Present situation and development of multi-lance top blown converting furnace[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(4): 107-112.

多喷枪顶吹吹炼炉的现状与发展

袁精华

(中国瑞林工程技术股份有限公司, 江西南昌 330038)

[摘要] 本文从炉体结构、烟道、喷枪以及炉体寿命方面论述了多喷枪顶吹吹炼炉的现状,阐述了炉体结构的优化、冷却元件结构改进和设置、喷枪技术的突破、炉体寿命延长以及喷吹富氧浓度的提高以增加冷料的处理能力,指出了多喷枪顶吹吹炼炉的发展方向,特别是多喷枪顶吹吹炼炉信息模型的建立,有助于缩短工期,减少投资,降低运行成本,提高产品质量和生产效率,减少管理成本,提高管理效率以及实现“双碳”目标。

[关键词] 炉体结构; 冷却元件; 喷枪; 炉体寿命; 双碳目标; 多喷枪顶吹吹炼炉; 信息模型

[中图分类号] TF811 [文献标志码] A [文章编号] 1003-8884(2024)04-0107-06

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.04.016

0 前言

铜火法冶炼包含三个工序:熔炼、吹炼与精炼。吹炼起着承前启后的作用,相比前一段熔炼技术,吹炼技术还有待进一步发展,目前吹炼主要有转炉吹炼、奥斯麦特炉吹炼、底吹炉吹炼、闪速炉吹炼及多喷枪顶吹吹炼炉吹炼,这些吹炼方法各有其优缺点。转炉吹炼工艺已有百年以上的发展历史,世界上绝大部分的铜都是通过转炉吹炼的,该工艺具有技术成熟可靠、粗铜质量高、可处理冷料等优点,但是存在铜铈倒运、多台同时运作、炉寿命短等不足,虽然目前采用了炉口冒烟的捕集技术,仍不能完全消除低空污染^[1-3]。奥斯麦特炉吹炼工艺^[4]中,铜铈从熔炼炉通过溜槽排放到吹炼炉中,无需倒运,处理能力大、环保,但熔炼与吹炼操作不能匹配、易产生泡沫渣、不能实现真正意义上的连续吹炼,喷枪寿命低,需频繁更换,影响作业率。底吹炉吹炼工艺^[5-6]具有渣氧势低、连续吹炼等优势,但换喷枪时需要转动炉子,影响作业率,粗铜含硫较高,炉寿命短。闪速吹炼工艺^[7]处理能力大,并解决了转炉吹炼工艺存在的炉口SO₂烟气泄漏对环境造成的低空污染问题。但是,闪速吹炼炉工艺入炉原料是熔炼装置产

出的铜铈,其经过水淬固化后由铜铈喷嘴喷入,存在流程长、投资大、能耗高的缺点,生产成本较高,势必影响企业的效益。顶吹吹炼炉^[8-10]的特点在于:不同于PS转炉吹炼工艺,不需多台吹炼设备;不同于闪速吹炼炉,流程较短,熔炼装置产出的铜铈直接流入炉内;不同于奥斯麦特炉,不需停炉换喷枪;不同于底吹炉,不需转动炉子换喷枪,因设置多喷枪且有备用喷枪,换喷枪时不影响生产,且具有处理能力大、环保好、可处理冷料、连续吹炼、炉寿长等诸多优点。因此,相比其他吹炼炉,多喷枪顶吹吹炼炉更具有发展潜力,其市场占有率日益提高是可期的,但作为侧吹熔炼+顶吹吹炼炉工艺的核心生产设备顶吹吹炼炉还需不断地完善和发展,以充分挖掘其潜力,适应时代进步的需要。

1 多喷枪顶吹吹炼炉的现状

1.1 炉体结构

多喷枪顶吹吹炼炉的炉型主要有3种:①椭圆形;②圆形;③方形。3种炉型的优缺点见表1。

1.2 烟道结构

目前,多喷枪顶吹吹炼炉烟道主要有膜式壁烟道和砌砖烟道2种结构形式。膜式壁烟道及砌砖壁烟道在不同的冶炼厂均有应用,赤峰某铜业公司10万t项目的顶吹吹炼炉选用的是膜式壁烟道,南方某铜业公司30万t项目的顶吹吹炼炉选用的是

[收稿日期] 2024-05-20

[第一作者] 袁精华(1968—),男,江西南昌人,教授级高工,学士,主要研究方向为工业炉的设计。

表1 多喷枪顶吹吹炼炉的炉型优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of multi-lance top blown converting furnace shape

炉型	椭圆形	圆形	方形
优点	①耐火砖可设计成楔形,耐火材料稳定性较好; ②炉体受热膨胀较均匀; ③产量小时,有利于延长熔体反应及炉渣沉清时间	①耐火砖可设计成楔形,耐火材料稳定性好; ②炉体受热膨胀均匀	①可设计成弹性结构,有利于吸收炉体膨胀; ②炉底结构简单,易于设计炉底砖形,易于设计粗铜虹吸口; ③有利于工艺配置
缺点	①炉底砖形太多; ②炉底砌筑复杂、难度大、切砖多; ③炉底因砌筑复杂,膨胀设置较难,炉底工作层砖容易出现問題	①炉底砖形较多; ②炉底砌筑较复杂; ③不利于工艺配置	①炉墙耐火材料稳定性较差; ②炉体受热膨胀不均匀; ③4个转角设计不好,容易漏渣、漏铜
案例	烟台某铜业公司 20 万 t	刚果金某铜业公司 10 万 t	金川某铜业 30 万 t

砌砖壁烟道,这2种烟道各有优缺点。

1)膜式壁烟道作为锅炉的一部分,烟气的余热利用率高,自身重量较小,可采用吊挂形式,结构稳定。尽管膜式壁烟道本身投资少,但由于烟道很高,导致厂房钢结构、锅炉钢结构和锅炉本体投资较大,并且容易黏结。黏结后,如采用爆破清理,需掌握用药量及埋药深度,否则容易震裂膜式壁;如采用人工清理,清理难度较大和工期较长。此外,膜式壁烟道容易漏水,如果管壁出现漏水,在无法及时发现和处理时,可能会导致炉内熔体遇水爆炸,或大量水入炉后导致炉底耐火砖粉化,从而影响炉体安全运行。同时,膜式壁烟道也存在大块结渣掉落熔池引起喷炉的风险。

2)砌砖壁烟道可以避免膜式壁烟道漏水和喷炉带来的风险。由于砌砖壁烟道采用卧式锅炉结构,整个锅炉钢结构高度相对于膜式壁烟道来说较低,因此,整体投资较少。但是,砌砖壁烟道重量较大,且膨胀量较大,需分段支撑或吊挂,且需充分考虑耐火材料的膨胀量的设置,否则,容易引起烟道异常膨胀,给炉体带来安全风险。

1.3 炉体冷却元件

炉体冷却元件的设置是为了延长耐火材料的使用寿命至下一个冷修周期,针对的是炉体薄弱且容易受损的部位,包括熔体区、炉墙喷溅区、炉顶、烟道入口、烟道顶、铜铤入口以及排放口。

烟台某铜业公司多喷枪顶吹吹炼炉炉体冷却元件设置为:渣线区以及炉墙喷溅区采用水平铜水套;炉顶采用卧式锯齿镶砖式铜水套;烟道入口采用立

式锯齿镶砖式铜水套;烟道顶一般采用内侧为浇注料的水冷式钢板夹套。熔体区以及炉墙喷溅区的水平铜水套直接与耐火砖交替砌筑,熔体区水套间距较小,即153 mm,为2层耐火砖,炉墙喷溅区水套间距较大,即230 mm,为3层耐火砖,因炉子冷修周期一般为3~4年,无论是熔体区还是炉墙喷溅区水套间距均不是很大,则未另外设置水套支撑,而炉顶、烟道入口以及烟道顶的水套则需通过钢结构吊挂或支撑。

1.4 喷枪选用

在顶吹冶炼工艺中,熔炼工艺采用浸没式顶吹,喷枪插入渣层中,依靠气泡在熔池内部扩散来搅拌熔池,以达到高效率熔炼。但是多喷枪顶吹冶炼采用非浸没式顶吹,喷枪置于渣层上方,通过喷入高速气体对熔池产生冲击,加速富氧空气与铜、渣的混合与反应过程,从而提高吹炼工艺的效率,使生成的高纯度金属沉降至粗铜层。喷枪吹炼是多喷枪顶吹吹炼的关键环节,不仅关系到粗铜质量、弃渣含铜量、产能大小以及炉修周期,而且关系到阳极炉作业效率、阳极炉能源消耗。

1.4.1 喷枪布置

目前,喷枪采用单排布置,相比于多排布置,可省去双排喷枪排与排之间的相互影响,提高了喷吹效率。为了提高喷枪喷吹的效率,喷枪高度与喷枪喷出的富氧空气的速度需适宜,喷枪距渣面高度宜为200~250 mm,富氧空气的喷出速度宜为350~550 m/s。

喷枪位置过高以及富氧空气的喷出速度过低,

则喷出的富氧空气对渣层的冲击过小,不利于气体与铜、渣的混合与反应;喷枪位置过低以及喷出气体的速度过高,则会导致富氧空气对渣层的冲击过大,使得粗铜层向上翻动,渣层含铜量过高,炉子的实际产能下降,能耗升高,对炉子稳定运行不利,反而降低气体与渣之间的反应速率,而且会导致炉渣飞溅程度过大,对炉墙与炉顶形成过度冲刷,特别是对炉底的强烈冲击,影响到炉体的寿命。

1.4.2 升降控制

喷枪升降控制有2种:①卷扬控制;②喷枪自动提升装置控制。

1)卷扬控制方式虽然控制简单,但是升降过程不够稳定和精准,由于喷枪下降时靠枪体自重,当枪体在炉顶被黏结后卡住或遇到其他阻力时,就无法下降,而且卷扬和滑轮结构较复杂,体积较大,需要单独占用一层平台布置卷扬,不过喷枪间距较小,有利于喷枪在炉顶的布置。

2)喷枪自动提升装置控制依靠喷枪小车控制喷枪上升和下降,运行稳定和精准,喷枪也不会被卡住,并且因为没有卷扬装置,无需增设平台,节省了空间,减少了建设成本,但喷枪间距需适当放大,由卷扬控制的600 mm增加到620 mm。

南方某铜业公司30万t项目的多喷枪顶吹吹炼炉的喷枪采用卷扬控制,喷枪间距为600 mm;烟台某铜业公司20万t项目的多喷枪顶吹吹炼炉的喷枪采用自动提升装置控制,喷枪间距为620 mm。

1.4.3 更换

多喷枪顶吹吹炼炉的喷枪为自耗式,需要根据消耗情况定期更换,喷管更换采用焊接或者螺纹连接的方式。相对来说,采用焊接更换,需要的时间较长,但由于布置有多支喷枪,更换喷枪时不需要停产,不影响炉子作业率。目前,喷枪更换的时机不好把控,无法通过设备检测发现,只能定期打开设置在炉墙的观察门,通过人工观察确定,给炉子操作带来不便。

1.5 炉体寿命

为了延长顶吹炉的使用寿命^[11],合理地设计了砖体的结构,根据各部分的使用环境选用合适的耐火材料,且设置较多的冷却元件,特别是熔体区,有的项目还采用垂直与水平双向立体冷却,炉底采用风冷,但炉体的寿命总的来说还是偏短,目前一般只有3~4年。南方某铜业公司30万t项目的多喷枪

顶吹吹炼炉投产2年后就进行冷修,炉内耐火材料几乎全部更换,表明炉体寿命有很大的提升空间。

2 多喷枪顶吹吹炼炉技术发展

2.1 冷料处理

顶吹炉在吹炼过程会放出大量的热量,如果不被吸收,会导致熔体过热,影响到耐火材料的使用效能,进而影响炉体的寿命,因此,一般需加入冷料,一方面可吸收多余的热量,另一方面可提高炉子的产能。冷料处理能力与富氧浓度相关,在一定的范围内,富氧浓度越高,冷料处理能力越大,但最终的冷料处理能力由入炉的铜锍品位决定。

多枪顶吹吹炼炉的富氧浓度控制十分关键,富氧浓度过低,达不到处理冷料的目的,造成熔体温度过低,影响炉渣的流动性,炉渣排放困难;富氧浓度过高,造成单位时间炉内反应热提高过快,熔体温度过高,影响炉子寿命。因此,需要根据冷料情况以及工艺要求,合理地调整富氧浓度,可加快硫化物的反应速度,降低烟气量,减少烟气带走的热损失,控制炉内熔体温度,保持好渣的流动性,促进铜、渣分离,以降低渣含铜量。目前,多喷枪顶吹吹炼炉的富氧浓度多在23%~28%,为了提高冷料的处理能力可根据入炉的铜锍品位适当加大富氧浓度。

多数冶炼厂加入的冷料一般为残阳极板,此外,还可加入冷料堆分拣杂铜、缓冷场分拣白铜锍、粗铜块、碎铜屑、铜坯、阳极炉炉前后杂铜、破碎站及渣选回收杂铜^[12]。但是加入冷料时,需控制冷料的粒度大小和加入速度,如果冷料粒度较大,由于其熔化速度较慢,在放渣时炉内还有块状冷料,会使粗铜黏结在没有熔化的块状冷料上以机械夹杂的方式进入炉渣内,导致炉渣含铜量升高。如果冷料加入过快,会导致炉内温度迅速下降,炉渣流动性恶化,影响铜、渣分离,渣含铜量升高,并且排渣困难;如果冷料加入过慢,会导致炉内温度迅速升高,不仅高温熔体余热没有利用好,造成热量损失,而且炉内高温及温度波动过大会缩短炉体的使用寿命。因此,必须严格控制冷料加入粒度大小和加入速度,以保证炉况和技术性能指标的稳定。

2.2 炉型选用

为了实现规模效益,各冶炼厂产能不断提升,相应地,单套侧吹熔炼+顶吹吹炼的产能也不断地提高。目前,新项目都倾向选用单套产能在300 kt/a

及以上,这就为多喷枪顶吹吹炼炉选用方形炉创造了条件,前文提到过方形炉子相比于椭圆形及圆形炉子具有较大的优势,而其缺点可通过设计得以解决。炉墙耐火材料稳定性较差可通过侧拉的设置解决;炉体受热膨胀不均匀可通过膨胀缝的设置和弹簧的调节解决;4个转角容易漏渣、漏铜可通过结构的优化解决。因此,方形炉型将是处理能力大的多喷枪顶吹吹炼炉首选炉型。

2.3 耐材使用

有色冶金行业作为能耗和二氧化碳排放大户,推进“双碳”目标则是重中之重。由于当前冶金炉使用了大量的耐火材料,不仅造成冷修期过短需要增加烘炉次数,每一次烘炉直接增加能耗约600 t标煤和11 t二氧化碳排放,而且造成因耐火材料的消耗而需要重新生产和运输,从而间接增加能耗和二氧化碳排放。因此,所有的冶金炉应朝尽量少用或不用耐火材料的方向发展,多喷枪顶吹吹炼炉也不例外。应多设置水冷元件,使炉体依靠挂渣工作,推动多喷枪顶吹吹炼炉向低碳零碳方向转型,实现低能耗绿色发展的目标。

2.4 冷却元件设置

除炉底及炉底拱脚砖外,其他炉体部位都可不使用耐火材料,烟道也可视情况完全不使用耐火材料,耐火材料用量的减少,必然带来冷却元件用量的增加。为应对这种新变化,不仅要增加冷却元件的用量,还须根据不同部位工作环境的恶劣程度而采用不同类型的冷却元件,并且冷却元件的工作层都需要设计成利于挂渣的结构,以延长冷却元件的使用寿命。

炉顶承受夹杂熔体的高温烟气的冲刷以及高温熔体的喷溅。炉顶可设计成内表面带凹槽的卧式铜水套,炉墙烟气区可设计成内表面带凹槽的立式铜水套,从而适应工作环境的要求。但是,炉墙熔体区工作环境则较为恶劣,不仅熔体上部需承受炉渣的侵蚀,而且熔体中下部存在铜水套与粗铜的同质熔损,此外,熔体高度处于波动状态,导致工作温度及铜渣界面频繁波动,炉墙熔体区直接制约着整台炉子的使用寿命,是整台炉子最为关键的部分,因此,炉墙熔体区不但要设计成内表面带凹槽的立式铜水套,而且需在内侧熔合一层耐冲刷、耐炉渣侵蚀又不能被粗铜置换的合金层^[13],合金层厚度宜为8 mm。

烟道承受带熔体的高温烟气的冲刷,因此,烟道

连接部及烟道筒体可设计成内表面带凹槽的立式铜水套,烟道顶部可设计成内表面带凹槽的卧式铜水套,为了节省投资,与炉顶及炉墙烟气区一样,工作面也不需再熔合一层合金层。

2.5 炉体寿命提高

采用更适应炉体热胀冷缩要求的弹性结构炉体,并根据开停炉炉体温度的变化情况相应调节弹簧的受力,优化炉底及炉底拱脚砖结构,以及采用适应各区域工作环境的冷却元件,炉底设置风冷装置,加上选用易于冷却元件挂渣的铁酸钙渣型,并对炉底耐火砖的各个温度测点的监控。通过以上措施,炉体寿命有望从目前的3~4年大幅延长至10年以上。

2.6 喷枪控制

由于自动提升装置控制的喷枪优于卷扬控制的喷枪,在性价比合适的情况下,自动提升装置控制的喷枪将成为冶炼厂的首选。喷枪控制升降的技术仍需不断摸索和提高,喷枪升降应随渣面的波动和消耗情况,根据设定的离渣面高度而相应的动态变化,从而真正做到自动控制,不再需要打开观察门通过人工来控制。可利用喷枪长度与富氧空气压力之间的关系或超声测距来检测喷枪高度,从而实现自动控制,可简化操作或达到无人值守。

为了做到少更换或不需要更换,喷枪本身的结构和材质也需要改进。目前自耗式喷枪可改进成永久式喷枪。喷枪头部材料可以选用耐高温和耐腐蚀性能优于常规的304和316L等耐热不锈钢的镍基合金材料或者陶瓷材料,同时结合对喷枪进行水冷,喷枪的使用寿命可大幅延长。

2.7 多喷枪顶吹吹炼炉信息模型的建立

多喷枪顶吹吹炼炉信息模型是在设计、制造、施工、操作、监控及检修全生命周期内,对其物理和功能特性进行数字化表达,是一门智能动态控制和管理技术。通过信息模型,可实现可视化沟通、多方案比较、可持续性分析、高效优化设计、多专业集成、施工交底、施工方案确定、施工进度控制、竣工资料记录、炉体运行、检测监控、问题诊断、炉修时间精准确定等。建立多喷枪顶吹吹炼炉信息模型可以缩短工期、减少投资,降低运行成本、提高产品质量和生产效率、减少管理成本、提高管理效率以及实现“双碳”目标等。

在设计过程中,将多喷枪顶吹吹炼炉信息模型的设计结果导入流体分析软件,通过算法可对炉内

气流场和温度场进行计算机模拟分析,从而对炉体冷却元件进行合理设置以及对炉体结构优化设计;在运行操作阶段,导入流体分析软件和受力分析软件可根据对炉内气流场、温度场和受力分析的结果来指导操作、监控炉体和及时发现问题,确保炉体的安全运行;在施工阶段,利用多喷枪顶吹吹炼炉信息模型的设计结果导入施工软件,进行施工模拟,可直观展视施工细节,增加施工过程的可控性,以避免返工或出差错,并可节省大量的人力。

虽然建立多喷枪顶吹吹炼炉信息模型好处众多,但还任重道远。目前只是最原始的三维模型的搭建以及二维工程图的输出,并且只有单个冶金炉

专业参与,还未进行多专业、多工种的协同,且信息不公开。要建立信息模型,需要国家及行业政策的推动和标准规范的制定,规定参与各方工作范围、管理权限以及成果交付标准等,实现从设计、制造、施工到运行维护全生命周期信息共享,实现炉体真正意义上数字化、智能化,以构建智能工厂。建立多喷枪顶吹顶吹炉信息模型还可进一步提升有色冶金行业的信息化整体水平,进一步提升信息模型、互联网、物联网、大数据、云计算、智能化等技术集成应用的能力,打造低能耗、绿色化、智能化的有色冶金行业的崭新态势,促进行业的转型升级。多喷枪顶吹吹炼炉信息模型机理示意图见图1。

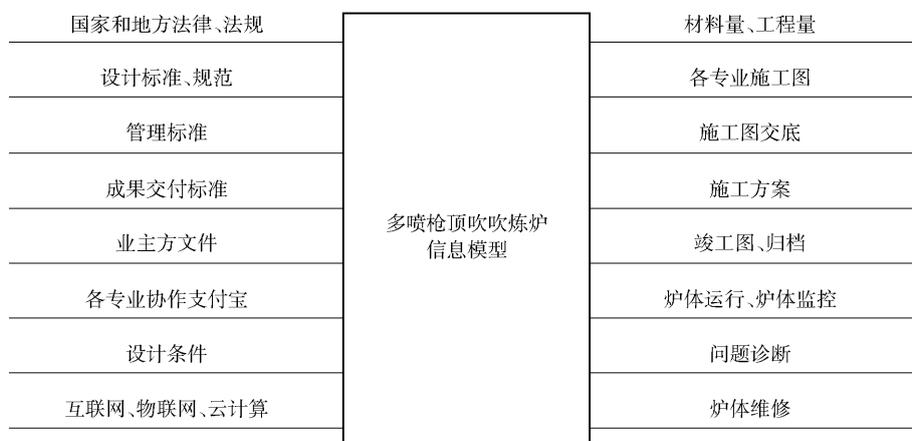


图1 多喷枪顶吹吹炼炉信息模型机理示意

Fig.1 Information model mechanism schematic diagram of multi-lance top blown converting furnace

3 结语

随着侧吹熔炼+顶吹吹炼炉技术的发展,特别是近5年的高速发展,多枪顶吹吹炼炉技术水平已日趋完善,包括炉体结构、冷却元件、耐火材料选用、炉子寿命、喷枪以及渣型确定等方面都有较大的提升,但是,为了尽最大可能发挥多喷枪顶吹吹炼炉的潜能,炉体结构还需进一步优化,冷却元件结构和设置还需要改进,喷吹富氧浓度还可提高,冷料的处理能力需要增加,喷枪技术还有待突破,炉体寿命还需延长。特别需要强调的是多喷枪顶吹吹炼炉信息模型的建立,该信息模型的建立,必然给设计、制造、施工到运行维护与管理带来质的变化,不亚于一场技术革命,相关方需要鼎力合作和共同努力,为跨入智能时代作好充分的准备。

[参考文献]

- [1] 周俊. 铜冶炼工艺技术的进展与我国铜冶炼厂的技术升级[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(8): 1-10.
- [2] 高永亮, 张哲铠. 富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼炼铜工艺炉渣元素分布及其矿相特征[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(6): 49-55, 102.
- [3] 徐风. 三连炉连续炼铜工艺生产实践[J]. 有色冶金节能, 2022, 38(2): 45-48.
- [4] 蒋继穆. 连续炼铜杂谈[J]. 中国有色冶金, 2020, 49(5): 1-8.
- [5] 袁俊智, 王新民. 华鼎铜业双底吹连续炼铜的生产实践[J]. 有色设备, 2017(6): 34-37.
- [6] 赵体茂, 吴艳新. 双底吹连续炼铜工艺装备及产业化应用[J]. 世界有色金属, 2015(12): 16-21.
- [7] 唐尊球. 论我国铜吹炼技术发展方向[J]. 有色冶炼, 2002(6): 6-7.
- [8] 韩志. 双炉侧顶吹粗铜连续吹炼工艺介绍及应用意义

- [J]. 科技与创新,2015(19):84-85.
- [9] 李建辉,葛晓鸣,柳庆康. 富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜技术的开发、工业化应用及发展方向[J]. 有色设备,2021,35(3):64-67.
- [10] 崔大韡. 铜铋多枪顶吹连续吹炼炉设计与展望[J]. 有色设备,2021,35(3):89-91.
- [11] 中国瑞林工程技术股份有限公司. 一种顶吹吹炼炉:CN219342188U[P]. 2023-07-14.
- [12] 余彬,张鑫,赵立恒,等. 转炉渣含铜影响因素分析及生产措施[J]. 中国有色冶金,2021,50(1):9-13.
- [13] 袁精华. 闪速吹炼炉炉体寿命大幅度提高的对策[J]. 有色设备,2023,37(3):79-83.

Present situation and development of multi-lance top-blown converting furnace

YUAN Jinghua

(China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang 330038, China)

Abstract: This article discusses the present situation of the multi-lance top-blown converting furnace from the aspects of the furnace body structure, flue duct, lance, and furnace body life, elaborates on the optimization of the furnace body structure, the improvement and setting of the cooling element structure, the breakthrough of the lance technology, the extension of the furnace body life, and the increase of the oxygen-enriched concentration of the injection to increase the processing capacity of the cold material, and points out the development direction of the multi-lance top-blown blowing furnace, especially the establishment of the information model of the multi-lance top blown converting furnace, which helps to shorten the construction period, reduce investment, reduce operating costs, improve product quality and production efficiency, reduce management costs, improve management efficiency, and achieve the dual-carbon goal.

Key words: furnace structure; cooling element; lance; furnace body life; Dual-carbon goal; multi-lance top blown converting furnace; information mode

