

高强度冶炼闪速炉优化设计对策

袁精华

(中国瑞林工程技术股份有限公司, 江西 南昌 330031)

[摘要] 近些年侧吹炉工艺的发展对闪速炉构成了较大的竞争压力,闪速炉亟需从低反应塔热负荷、低投料量的冶炼炉发展成为反应塔热强度在 $2\,000\text{ MJ/m}^3\text{h}$ 以上、投料量在 230 t/h 以上的高强度冶炼设备。本文从设计角度对强化闪速炉冶炼能力进行了优化改进,具体包括以下几方面:适当增加反应塔净高,以适应高投料量的需要;反应塔筒体采用锯齿形水套+耐火砖结构,以适应烟气的剧烈冲刷;增加沉淀池内宽和净高,保证烟气流速设计在 6 m/s 以下,减缓高温烟气的冲刷及烟尘发生率;沉淀池气流区采用锯齿形铜水套+耐火砖结构;上升烟道背风面也应设置水平水套;炉顶采用嵌入耐火砖的卧式锯齿形水套结构,防止耐火砖脱落。另外,为确保高强度冶炼状态下的炉体安全,还应考虑炉底温度监控及冷却原件漏水监控。优化改进后的闪速炉可以达到预期的冶炼强度,而且运行平稳、安全可靠。

[关键词] 闪速炉;冶炼强度;热强度;投料量;反应塔;沉淀池;铜水套;耐火材料

[中图分类号] TF806.2 [文献标志码] B [文章编号] 1672-6103(2021)06-0039-05

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/TF.2021.06.008

20世纪90年代之后,随着改革开放的不断深入,房地产行业需求大量释放,而且投资盛行,我国铜需求量有了突飞猛进的提升,闪速炉工艺顺应时代的要求,也得到了超常规发展,但随着我国人口拐点的出现,人口红利将逐步消失,铜市场需求也趋于饱和,特别是随着铜精矿杂质含量不断增多以及由于铜品位的波动,闪速炉工艺优势越来越难以为继,同时近些年侧吹炉工艺的发展对其构成了较大的竞争压力。因此,闪速炉亟需从低反应塔热负荷、低投料量的冶炼炉发展成为反应塔热强度在 $2\,000\text{ MJ/m}^3\text{h}$ 以上、投料量在 230 t/h 以上的高强度冶炼设备。

本文从优化设计反应塔、沉淀池、上升烟道背风面侧墙、炉顶及耐火材料等关键部位来强化闪速炉的冶炼,达到高强度冶炼的目的。另外,为确保高强度冶炼状态下的炉体安全,还重点考虑了炉底温度监控及冷却原件漏水监控。

1 闪速炉结构及冶炼原理

闪速炉是一种强化冶炼设备,由中央喷嘴、反应塔、沉淀池及上升烟道四个主要部分组成,见图1。物料与富氧空气通过中央喷嘴混合并高速地喷入反应塔内,在高温下迅速地进行氧化脱硫、熔化、造渣等反应,形成的高温熔体落入沉淀池中进一步完成造渣过程,并分离成富集金属和炉渣,产生的烟气从上升烟道排出。

2 优化设计要点

2.1 反应塔

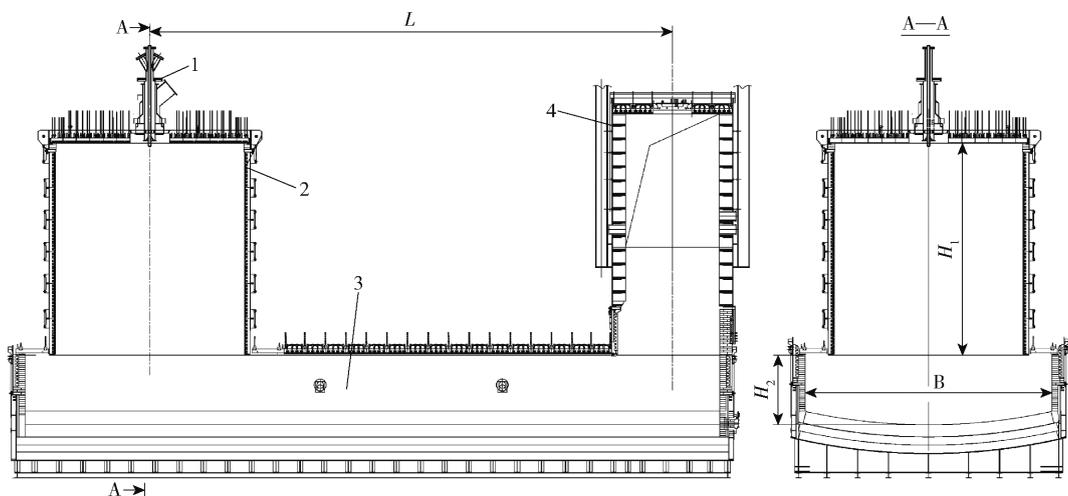
2.1.1 反应塔高度

反应塔高度 H_1 的选定实质上是保证物料的反应时间,防止下生料的重要参数。采用高投料量、高富氧浓度、高铜品位、高热强度操作的闪速炉,相比传统操作的闪速炉,反应焦点上移,反应塔高度可适当缩短。可是,如果投料量加大到 230 t/h 以上,采用中央扩散式精矿喷嘴的反应塔高度应适当加长^[1]。原因有:①投料量加大后,工艺风量、中央氧量、分散风量需要相应加大,这就导致工艺风、中央氧、分散风出口的速度都会加大,高速气流势必将燃烧的高温烟气下压,造成剧烈反应区、高温区下移;②投料量、工艺风量、中央氧量、分散风量加大后,从

[收稿日期] 2021-06-10

[作者简介] 袁精华(1968—),男,汉族,江西南昌人,本科,教授级高级工程师,从事冶金炉设计方面的工作。

[引用格式] 袁精华.高强度冶炼闪速炉优化设计对策[J].中国有色冶金,2021,50(6):39-43.



1 - 中央喷嘴; 2 - 反应塔; 3 - 沉淀池; 4 - 上升烟道

图1 闪速炉总图

常温到高温需要吸收更多的热量,将会引起感应区最低温度下降,这样精矿着火延迟,反应延缓,反应塔内剧烈反应区下移,反应区拉长;③投料量加大后,实际生产中很难实现均匀的布料,下料更易偏析,塔内气体与精矿颗粒混合均匀难度更大,着火延迟,精矿在塔内的反应时间缩短。鉴于此,近些年设计的闪速炉反应塔净高都在 7 m 以上,甚至接近 8 m,以满足高强度冶炼的需要。

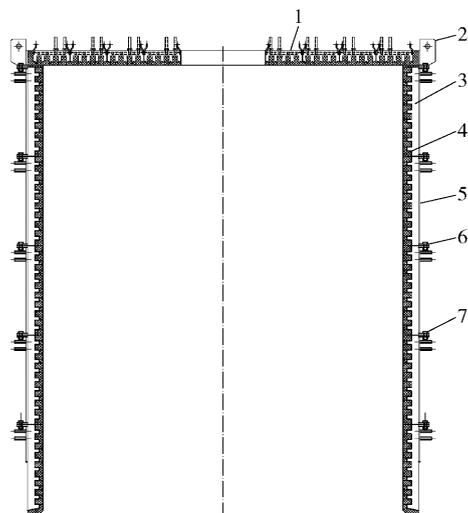
2.1.2 反应塔结构

高强度冶炼的闪速炉反应塔内的热负荷较高,烟气中熔体浓度更大,因此,高温烟气对反应塔的冲刷更加剧烈,显然,单靠使用水平铜水套,增加水平铜水套的层数,减小水平铜水套的间距来冷却保护耐火材料已无法达到目的。高强度冶炼状态下需要对反应塔内耐火材料进行立体冷却,也就是说需要一种新型的反应塔结构^[2-3];反应塔筒体均由镶耐火砖的锯齿形水套组成。为方便今后冷修时耐火砖的砌筑,铜水套凹槽不是燕尾形,而是直槽,凸形齿也不是内小外大,而为直齿,这样的结构有利于耐火砖的砌筑,但必需设计合适的凸形齿伸出长度,以防止耐火砖掉落。反应塔结构见图 2。

2.2 沉淀池

2.2.1 沉淀池内宽

表面上看,沉淀池内宽 B 与沉淀池渣线面积有关,以满足沉淀池澄清及储存功能,但是实际上,渣线面积大小可通过反应塔与上升烟道的中心距 L 来确定,沉淀池内宽的确定实质上要考虑从反应塔出来夹带熔体的高温烟气的冲刷强度。如果反应塔内



1 - 卧式齿形水套; 2 - 吊耳; 3 - 立式齿形水套; 4 - 耐火砖; 5 - 铜壳; 6 - 法兰; 7 - 螺栓

图2 反应塔结构图

壁距沉淀池内壁宽度过小,夹带熔体的高温烟势必对沉淀池内壁产生强烈冲刷,沉淀池寿命也会大幅度缩减。常规冶炼状态下,反应塔内壁距沉淀池内壁宽度一般为 850 mm 以下;在高强度冶炼状态下,其宽度设计以 1 000 mm 以上为宜,以减轻高温烟气对侧墙的卷吸冲刷。因此,为满足高强度冶炼的需要,沉淀池内宽需要比常规冶炼的内宽多出 300 mm 以上。

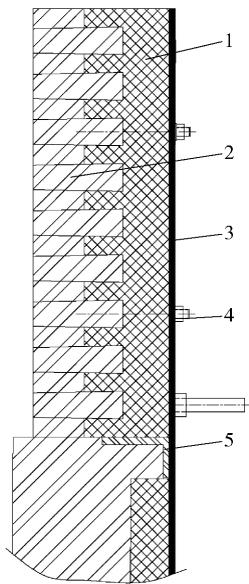
2.2.2 沉淀池净高

选择沉淀池净高 H_2 本质上是选择烟气的流速。过高的烟气流速不光对沉淀池侧墙造成强烈的冲刷。而且对沉淀池顶也带来强烈的冲刷,常规冶炼

状态下,烟气流速一般较大,甚至接近 10 m/s 若其他条件不变,高强度冶炼状态下应适当加大沉淀池净高,使烟气流速设计在 6 m/s 以下,这样既可减少烟气的冲刷,又可降低烟尘发生率。

2.2.3 沉淀池气流区结构

常规冶炼状态下,沉淀池气流区一般采用水平水套夹 2~4 层耐火砖的结构形式,水平水套的层数为 2~3 层。但处于高强度冶炼状态下,这种结构耐火砖消耗很快,特别是反应塔下部的三面沉淀池侧墙,运行不到 3 年的时间,耐火砖残存的长度有的不足 100 mm,有的地方甚至不足 40 mm,致使外侧钢板发红。上面提到的增加沉淀池内宽以及加大沉淀池净高都是为了减轻烟气的冲刷,但这还不能适应高强度冶炼状态下的工作条件,与反应塔一样,需要采取立体冷却的结构,也就是采用一种新型的沉淀池气流结构^[4],实质上是嵌入耐火砖的立式锯齿形水套结构。采用这种结构,铜水套内的槽与齿的形状跟反应塔一样都是直形,方便冷修期间砌筑耐火砖。沉淀池气流区结构见图 3。



1 - 立式齿形水套;2 - 耐火砖;3 - 侧板;4 - 螺栓;5 - 角钢

图 3 沉淀池气流区结构图

2.3 上升烟道背风面侧墙

常规冶炼状态下,上升烟道背风面侧墙没有设置水平水套;在 高强度冶炼状态下,从现场观看,上升烟道背风面钢壳温度很高,晚上可见暗红,由于钢壳是主要受力构件,不得不在外侧强制冷却保护。针对此薄弱的部位,为适应高强度冶炼的需要,上升烟道背风面也应设置水平水套。

2.4 炉顶

闪速炉炉顶分三部分:反应塔顶、沉淀池顶和上升烟道顶。常规冶炼状态下,各个顶部一般采用条形铜水套与耐火砖组合形式。考虑到高强度冶炼状态下工作环境的苛刻,为了与其他部位保持炉修周期的同步,采用嵌入耐火砖的卧式锯齿形水套结构。这种结构的铜水套内槽形状为燕尾形,可防止耐火砖脱落,另外,为了维修的方便,每一块锯齿形水套不宜过大。

2.5 耐火材料

由于高强度冶炼的闪速炉最为关键的措施是加强炉体冷却,闪速炉基本上是“铜墙铁壁”,耐火材料的选择不再那么重要,采用昂贵的进口耐火材料没有必要。实际上,由于冲刷强烈,镶入铜水套的耐火砖会很快地消耗掉,而是靠铜水套挂渣来工作的,挂渣起到了替代耐火材料的作用。

3 设计手段

3.1 Solidworks 三维设计软件的应用

高强度冶炼的闪速炉结构复杂,采用 Solidworks 三维设计能完美地表达设计构想,清楚地把握炉体结构,去除不合理的部分,优化整体设计,及时发现碰撞与干涉,减少设计失误,防止安装返工。另外,三维图因具有形象、直观的特点,设计人员与业主方、监理方、施工方沟通更方便、快捷,能更好地传达设计者的设计思路。

3.2 ANSYS 软件的应用

3.2.1 主框架结构受力计算

以往在设计炉体主框架的结构及其立柱和横梁尺寸时,一般是采用手算,并参考以前类似项目,这样容易缺乏经济性,精准度也不高,而且说服力不够强。因此,采用合适的计算软件来计算主框架结构受力是闪速炉技术发展的必然要求,能使闪速炉设计更加精细、准确、高效、科学。ANSYS 有限元分析软件可作为设计提升手段,能满足高强度冶炼的闪速炉主框架受力计算的要求。

3.2.2 反应塔仿真分析

建立反应塔三维仿真模型,利用流体动力学分析软件 ANSYS FLUENT 对反应塔进行数学仿真研究^[5-11],对反应塔壁面温度以及反应塔内的温度场和速度场进行分析计算,得出反应塔壁面温度的分布情况以及反应塔高度方向及圆周方向的挂渣厚度,用于指导铜水套冷却强度、反应塔高度及反应塔

直径设计。

3.2.3 上升烟道仿真分析

建立上升烟道数学模型,利用流体动力学分析软件 ANSYS FLUENT 对其进行数学仿真研究^[12],对上升烟道内壳温度以及上升烟道出口温度场和速度场进行分析计算,用于指导上升烟道的设计,特别是上升烟道的出口大小的设计,使得高强度冶炼的闪速炉上升烟道出口烟气速度控制在合理的范围之内,并确保内壳温度低于所用钢材的最高使用温度,保证钢板使用安全。

4 炉体监控

4.1 炉底温度

4.1.1 炉底结构形式及温度分布

一般情况下,炉底由半再结合镁铬砖、直接结合镁铬砖、高铝砖、黏土砖和钢板构成。以铜陵金冠项目为例,沉淀池底各层耐火材料的材质及厚度见表 1。

表 1 耐火材料的材质及厚度

材料	半再结合 镁铬砖	直接结合 镁铬砖	高铝砖	黏土砖	钢板
厚度/mm	450	300	250	300	25

炉底的温度分布不能直接测量得到,可以采用模拟仿真的手段计算得到。为计算方便,可将炉底简化为二维模型,在长度方向选取某一截面,炉内半再结合镁铬砖与熔体接触面可视为恒温边界,炉底钢板与外界接触面作为自然对流边界,建立的模型如图 4 所示。

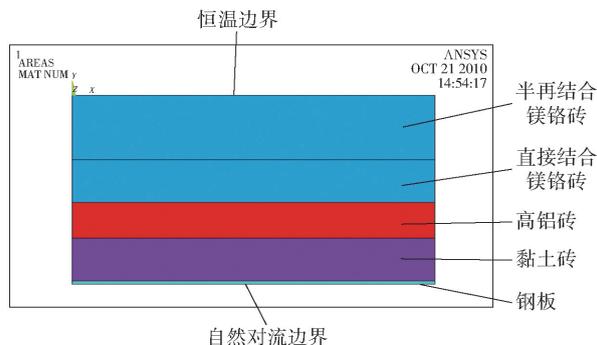


图 4 沉淀池底温度计算模型

以铜铈与半再结合镁铬砖交界面为原点,沉淀池底沿垂直方向的温度变化如图 5 所示。现场测温点安装在直接结合镁铬砖与高铝砖交界处,即距炉

内表面 0.75 m 处,该点温度为 771 ℃,沉淀池底钢板温度为 154 ℃。

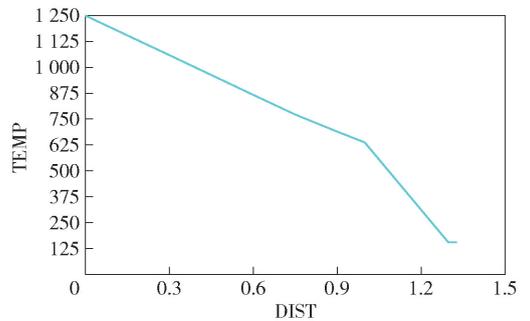


图 5 沉淀池底温度分布计算结果

实际上,炉子在生产过程中会有结底,特别是高强度冶炼状态下,由于富氧浓度、铜铈品位较高,使得 Fe_3O_4 生成量较大。因此,在正常冶炼有结底存在的情况下,沉淀池底的温度分布计算结果见表 2。

表 2 结底厚度不同的计算结果

结底厚度/mm	0	50	100	150	200	250	300
测温点温度/℃	771	761	752	743	734	725	717
炉壳钢板温度/℃	154	152	151	149	148	146	144

4.1.2 炉底温升监控

相比常规冶炼的闪速炉,高强度冶炼的闪速炉过热程度更大,铜铈的温度也更高,沉淀池底的温度也相应升高,特别是反应塔下部的沉淀池炉底温度。因此,为了沉淀池炉底的安全,设计时采用炉底风冷结构,如果炉底温度过高,可对炉底进行强制通风冷却。在闪速炉的实际操作时,采用测温热电偶监测炉底温度的变化,对照表 2 的计算结果,并结合检尺的检测,保持炉底结底在 200 mm 左右,既可确保炉底耐火砖处于安全的工作状态,又可防止炉底结底过高造成沉淀池存储铜铈的容积减少,以及排渣时带出铜。

4.2 冷却元件漏水的监控

随着国家应急管理部对安全生产要求越来越严格,加上高强度冶炼的闪速炉使用大量的铜水套,有必要对铜水套漏水的现象加以防控,以免发生重大生产安全事故。不仅需对各铜水套出水温度进行监测、报警,还需对各冷却元件进、出水流量进行监测,自动对比进、出水流量的差值与设定值,如超过限定值,则报警并快速切断该冷却元件回路的进水,防止大量的水漏入炉内,确保炉体的安全。

5 结论

面对侧吹炉工艺的发展,增强冶炼能力是闪速炉占领冶炼设备市场的重要途径。本文从设计角度对强化闪速炉冶炼能力进行了优化改进,具体包括以下几方面。

1)改进闪速炉结构尺寸,以适应强化冶炼的需要。适当增加反应塔净高,以适应高投料量;增加沉淀池内宽和净高,保证烟气流速设计在6 m/s以下,减缓高温烟气的冲刷及烟尘产生率。

2)炉体采用新型水套+耐火砖结构。反应塔筒体采用锯齿形水套+耐火砖结构,以适应烟气的剧烈冲刷;沉淀池气流区采用锯齿形铜水套+耐火砖结构;上升烟道背面也应设置水平水套;炉顶采用嵌入耐火砖的卧式锯齿形水套结构,防止耐火砖脱落。

3)为确保高强度冶炼状态下的炉体安全,还应考虑炉底温度监控及冷却原件漏水监控。

优化改进后的闪速炉可以达到反应塔热强度2 000 MJ/m³h以上、投料量230 t/h以上的要求,而且运行平稳、安全可靠。

[参考文献]

- [1] 周俊,黄永峰.金隆闪速炉炼铜操作技术的进步[J].有色金属(冶炼部分),2000(5):2-6.
- [2] 中国瑞林工程技术股份有限公司.一种闪速炉反应塔结构:CN204555669U[P].2015-08-12[2021-3-17].
- [3] 袁精华.闪速炉设计及操作中的节能技术和措施[J].有色冶金节能,2000,16(3):9-11,40.
- [4] 中国瑞林工程技术股份有限公司.一种闪速炉沉淀池气流区结构:CN202692706U[P].2013-01-23[2021-3-17].
- [5] 陈卓,梅焱,周萍,等.闪速炉反应塔炉壁温度场的数值解析[J].有色金属,2001(1):32-35.
- [6] 梅焱,陈卓,任鸿九,等.闪速炉反应塔炉膛内形的数值模拟与在线显示[J].中国有色金属学报,2001(4):716-720.
- [7] 谢锴,梅焱,任鸿九,等.铜闪速炉悬浮熔炼反应过程机理的研究(I)——反应塔中物料颗粒的取样分析[J].铜业工程,2007(3):13-17.
- [8] 谢锴,梅焱,任鸿九,等.铜闪速炉悬浮熔炼反应过程机理的研究(II)——粒子脉动碰撞模型[J].铜业工程,2007(4):19-26.
- [9] 李欣峰,梅焱,张卫华.铜闪速炉数值仿真[J].中南工业大学学报(自然科学版),2001(3):262-266.
- [10] 梅焱,陈卓,任鸿九,等.闪速炉生产合理强化方案的计算机仿真研究[J].有色金属,2000(4):51-54.
- [11] 梅焱,谢锴,陈红荣,等.闪速炼铜“高效反应区”的形成条件与应用效果[J].有色金属,2003(4):85-88.
- [12] 熊宗维,黄文华,袁精华.闪速炉水冷上升烟道的CFD数值仿真[J].有色金属(冶炼部分),2013(2):21-23.

Optimized design countermeasures for high-intensity smelting flash furnace

YUAN Jing-hua

Abstract: In recent years, the development of the side-blowing furnace has constituted a great competitive pressure on the flash furnace, which urgently requires the latter to be developed from a smelting furnace with low reactor heat load and low feed capacity into a high intensity smelting equipment with reactor heat intensity above 2 000 MJ/m³h and the feed capacity above 230 t/h. In this paper, the intensified smelting capacity of flash furnace is optimized and improved from a design perspective including the following aspects: increase the net height of reactor to meet the needs of high feeding amount; sawtooth water jacket + refractory brick structure adopted for the reactor cylinder to adapt to the intense erosion of off-gas; increase the internal width and net height of the settling tank, ensure the designed off-gas flow rate below 6 m/s, and slow down the erosion of high temperature off-gas and the dust generation; adopt copper water jacket + refractory brick structure in the gas flow area of settling tank; the leeward side of uptake flue should also be provided with horizontal water jacket; the furnace roof adopts horizontal sawtooth water jacket structure with embedded refractory to prevent the refractory bricks from falling off. In addition, to ensure the safety of the furnace under the condition of high intensity smelting, the monitoring of the furnace bottom temperature and cooling water leakage shall also be considered. The optimized and improved flash furnace can satisfy the expected smelting intensity with stable, safe and reliable operation.

Key words: flash furnace; smelting intensity; heat intensity; feeding amount; reactor; settling tank; copper water jacket; refractory materials