

引用格式:许欣.侧吹浸没燃烧技术在镍闪速冶炼领域升级改造中的应用及实践[J].有色设备,2025,39(5):41-47.

XU Xin. Industrial application of side-blowing submerged combustion technology in revamp of a nickel flash smelter[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(5): 41-47.

侧吹浸没燃烧技术在镍闪速冶炼领域升级改造中的应用及实践

许欣

(中国恩菲工程技术有限公司,北京100038)

[摘要] 在高强度冶炼迅速发展的背景下,闪速冶炼技术呈现高投料量、高富氧浓度、高容积热强度、高镍硫品位等特性,为满足新的工艺要求,本研究对某镍冶炼厂闪速炉实施结构升级改造。针对炉体反应塔及沉淀池等关键部件不同位置的高热负荷、强冲刷等炉况,采用了多种形式的水套结构设计,并将侧吹浸没燃烧技术引入闪速炉贫化区,通过侧吹浸没喷枪为熔池提供动能和热能,改善贫化区中冶金过程的发生条件,强化炉渣还原。运行结果表明,本次升级将闪速炉年处理能力提升至85万t,反应塔处理量达到100t/h。新型水冷结构有效保障了炉体在高负荷下的安全稳定运行;侧吹技术的应用显著改善了贫化区的冶金环境,为提升有价金属回收率奠定了基础,为同类设备的技术升级提供了实践参考。

[关键词] 闪速炉;高强度冶炼;反应塔;铜水套;侧吹浸没燃烧技术;强化还原

[中图分类号] TF813 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)05-0041-07

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.05.005

1 闪速炉升级改造背景

1992年,某冶炼厂建成了一套采用闪速熔炼技术的镍冶炼生产系统,其关键设备闪速炉在国内首次应用于镍冶炼。该台闪速炉主要处理的是铜镍混合干精矿,精矿、熔剂、粉煤和烟灰经配加料系统配料混合后,随热风从精矿喷嘴喷入闪速炉反应塔,在2~3s内完成熔化和主要的化学反应,熔融物落入闪速炉沉淀池内,反应生成的低镍硫和渣在沉淀池中澄清分离,产出低镍硫和含镍较高的炉渣。低镍硫送转炉吹炼,炉渣经闪速炉贫化区继续加热贫化后排出,经水淬后拉运至渣场堆存,高温烟气从闪速炉上升烟道排入余热锅炉进电收尘系统。该系统于2010年进行了冷修技术改造,年精矿处理量已提升至70万t。

随着炉体服役进入中后期及生产负荷的持续提

高,系统在设备与工艺层面均面临以下挑战:①设备老化与安全风险。炉体冷却强度已无法满足生产工艺控制要求。至2021年,反应塔与沉淀池等高温反应区域的水套已出现烧损现象,个别水套渗漏,并引发局部炉壳过热发红,对闪速炉的安全、稳定、长周期运行构成了一定影响。②有价金属回收率偏低。在生产过程中,闪速炉炉渣中有价金属含量一直较高,制约了闪速炉有价金属直收率的提高,且随着闪速炉处理能力和富氧浓度的逐步提升,渣中金属损失进一步加剧。需要对炉渣进一步的强化还原处理,才能满足闪速炉高强度冶炼发展趋势的需求。

针对上述挑战,2022年对镍冶炼厂闪速炉系统实施了系统性的工艺技术优化与装备升级。项目实施后,闪速炉系统年精矿处理量提升至85万t,炉体整体装备水平也实现了升级,为工厂的高效、绿色、可持续发展提供了坚实的技术保障。

[收稿日期] 2025-03-06

[第一作者] 许欣(1983—),女,河北唐山人,硕士,高级工程师,主要从事有色冶金炉窑咨询及设计工作。

2 闪速炉炉体升级改造方案

闪速炉主要由反应塔、沉淀池、贫化区、电极、上升烟道、水冷元件、耐火材料、骨架等部件组成,其结构示意图如图 1 所示。此次闪速炉炉体改造总体方案

为:炉子主体钢结构维持现状;炉体长度和宽度、基础标高和熔体排放口标高不变;炉底耐火材料不动;针对侵蚀严重、冷却要求高的部位的水冷系统进行重新设计;并更换沉淀池炉墙部分水冷元件及耐火材料。

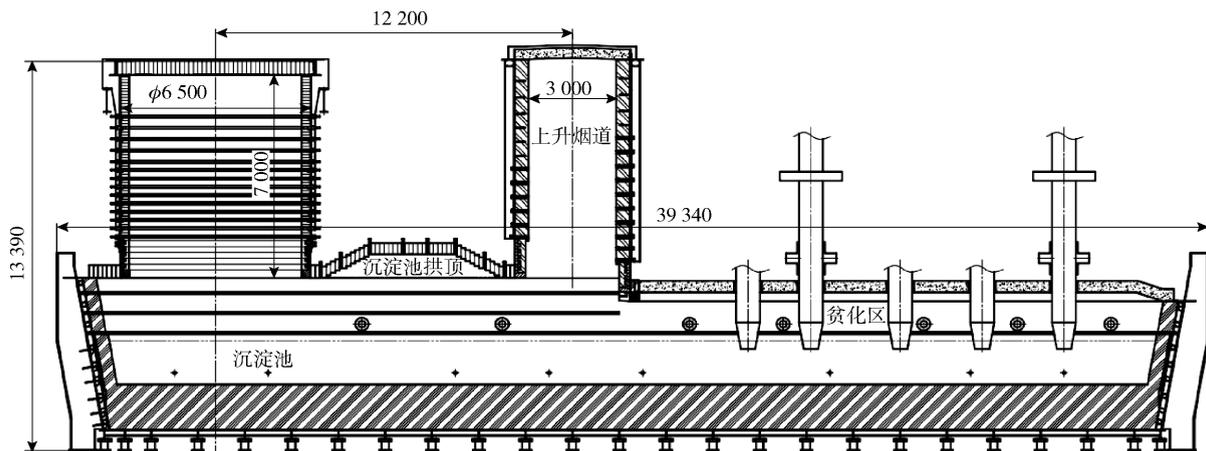


图 1 闪速炉炉体示意

Fig. 1 Schematic diagram of the flash furnace

2.1 反应塔优化设计

反应塔是闪速炉的关键部位,混合物料与热风经精矿喷嘴高速喷入反应塔内,细小的精矿颗粒迅速完成脱硫、熔化、造渣等反应,熔炼强度高。因此,塔壁承受着高温、物理冲刷与化学侵蚀等多种复杂且恶劣的工况考验。

该项目闪速炉在改造前,反应塔的干精矿处理量为 $60 \sim 90$ t/h,塔内直径 5.9 m,高度 7 m,其塔壁采用传统结构:上部无水套,全部砌砖;中上部设 4 层平水套,每 3 层砖设置 1 层平水套;中下部设 10 层平水套,每 2 层砖设置 1 层平水套;最下部设置齿形水套加内衬砖结构,如图 2 所示。

本次升级改造的基本目标是将反应塔干精矿处理量提升至 100 t/h,加料量的提升首先带来反应塔热负荷加大的问题,需对现有反应塔的尺寸进行重新核算。同时,热负荷分布也会发生变化,需根据热负荷分布有针对性的进行反应塔水套设计,才能既达到安全生产、延长反应塔寿命的目的,又不会因为使用过多的水冷原件带来不必要的热损失和增加投资、生产成本。

根据此次改造的工艺参数计算数据,如表 1 所示。按以下公式^[1]计算出,改造后反应塔内烟气速度为 1.85 m/s。现有反应塔的高度为 7 m,则反应

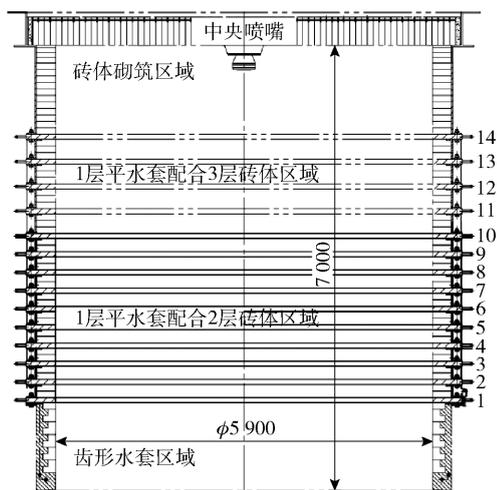


图 2 改造前反应塔基本结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the basic structure of the reaction tower before renovation

塔内烟气滞留时间为 3.78 s。闪速炉反应塔内混合烟气一般停留时间为 3 s 左右,现有高度为 7 m 的反应塔满足改造后的生产要求。升级改造后反应塔体积热强度约 $1\,520$ MJ/m³·h,尽管较现有反应塔热强度增加,但仍符合当前高强度冶炼条件下闪速炉反应塔热负荷的要求,且适当地提高热强度更有利于反应塔内化学反应的发生,对提高生产率具有正向影响。

$$D_{\text{塔内}} = 1.13 \sqrt{\frac{P}{\alpha_{\text{塔}}}} \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{塔}} = \frac{86400\omega_{\text{塔}}\eta}{V(1+\beta t)} \quad (2)$$

式中: $D_{\text{塔内}}$ 为反应塔内直径,m; P 为日处理精矿量, t/d ; $\alpha_{\text{塔}}$ 为反应塔床能率, $t/(m^2 \cdot d)$; $\omega_{\text{塔}}$ 为反应塔内烟气速度,m/s; η 为反应塔作业率,经验参数一般取0.9~0.98; V 为单位精矿产生的烟气体积, m^3/t ; β 为温度系数; t 为反应塔内平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

表1 闪速炉反应塔主要技术性能参数

Table 1 Main technical performance parameter table of the flash furnace reaction tower

名称	升级改造后计算值
年处理镍精矿量/ $(t \cdot a^{-1})$	~800 000
作业率/%	98
反应塔总热量/ $(MJ \cdot h^{-1})$	~290 000
反应塔内直径/m	5.9
反应塔高度/m	7
工艺风富氧浓度/%	80
反应塔出口烟气体积/ $(Nm^3 \cdot h^{-1})$	~28 000
反应塔出口烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	~1 500

反应塔热强度提升后,现有反应塔冷却结构的设计需要进行相应的优化。在闪速炉反应塔内温度场分布研究^[2-3]表明,增强水套冷却能力,可促使反应塔内壁形成稳定的挂渣,对保护反应塔塔壁内衬、延长反应塔寿命效果显著。在该台闪速炉数次冷修实践中,该研究结果也得到了充分的生产验证。此次优化设计即采用该思路,将原平水套夹砖的塔壁设计改为E形水套衬砖的结构,E形水套结构如图3所示,该水套较原平水套大幅增加了冷却面积,且水套的内侧齿面对内衬的砖体有更好的承托作用。

若将整个反应塔塔壁均用E形水套覆盖,虽能保护炉衬、延长反应塔寿命,但也会导致热损失加大、热量浪费、投资成本升高的问题。因此,需对反应塔塔壁进行精细化设计,估算反应塔热负荷分布趋势,对反应塔壁分区域进行水冷结构设计。反应时间主要取决于反应塔内的体积热强度、精矿粒度、精矿冶炼反应速度等,通常认为反应塔中的主要反应在由喷嘴喷入后的2 s内即可完成,结合烟气体积计算值,主要反应区集中于喷嘴下方3.7 m位置

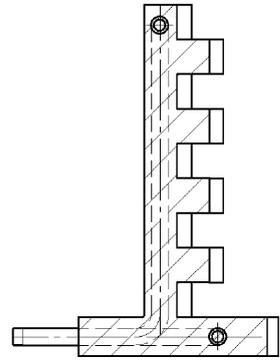


图3 反应塔E形水套示意

Fig. 3 Schematic diagram of the E-shaped water jacket of the reaction tower

附近。因此,本次升级改造只针对该区域进行强化水冷设计,其他区域保留原设计。具体方案为:拆除原1~9层平水套,改为3层E形水套,每层E形水套高861 mm,每层分为20块水套。改造后的闪速炉反应塔结构如图4所示。

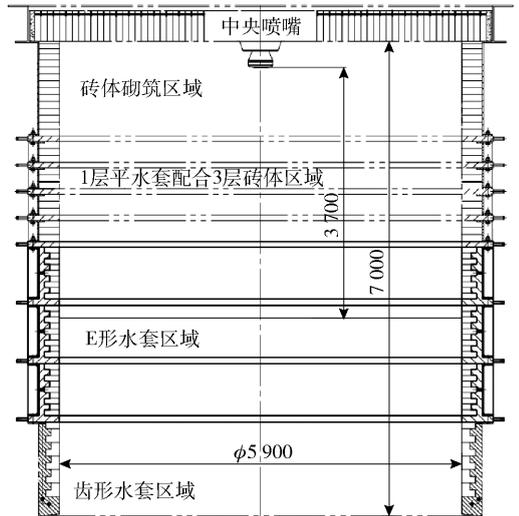


图4 改造后反应塔基本结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the basic structure of the reaction tower after renovation

2.2 沉淀池优化设计

2.2.1 炉顶结构优化

原沉淀池二次平顶全部为吊挂砖设计,2010年大修时在二次平顶4个角设置8块铸造平水套,其他区域为吊挂砖顶。在反应塔下部齿形水套外侧与铸造平水套之间保留2环吊挂砖,方便拆卸、更换齿形水套。在长期运行中,二次平顶处吊挂砖常出现因膨胀挤压不均造成砖体变形,以及局部砖缝变大

漏烟跑烟。此外,平水套底部的锚固件出现侵蚀后会脱落,难以挂住浇注料,裸露的平面水套也不利于挂渣。

根据近年来的生产经验,反应塔下部齿形水套运行平稳可靠,几乎不用拆卸更换,本次升级改造取消原反应塔外侧与二次平顶搭接的 2 环吊挂砖。整个二次平顶仅保留二次平顶外侧与拱脚梁之间的砖

作为调节手段,取消全部吊挂砖。设计 12 块铸造水套对二次平顶进行全覆盖,避免不均匀膨胀的产生,使二次平顶有更好的使用寿命和整体性,减少烟气从砖缝逸散造成的环境污染。平水套底部不再设锚固钩,而是采用燕尾槽的形式挂浇注料,利于挂渣。平面水套复合浇注料的结构形式及改造后燕尾槽复合浇注料的结构形式对比如图 5 所示。

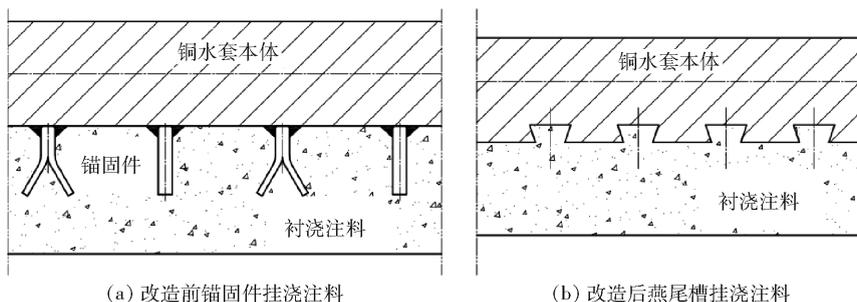


图 5 吊挂水套复合浇注料结构对比

Fig. 5 Comparison diagram of the structure of the composite castable for the hanging water jacket

2.2.2 炉墙结构优化

反应塔下侧的沉淀池炉墙侵蚀最为严重,尽管在 2010 年大修时,在反应塔下方沉淀池侧墙两层平水套之间已增设立水套,但冷却效果仍不理想。本次升级改造包括整面端墙和南北侧墙直到反应塔中心线西侧 5 800 mm 的范围内,取消此区域上部炉墙的 3 层平水套结合立水套的形式,采用冷却性能更好的倒 F 形水套,其结构如图 6 所示。此次沉淀池其他区域保留原平水套的设计,仅在大修过程中根据损坏情况,对个别平水套进行更新。

沉淀池炉底情况良好,因此本次升级改造保留炉底砖。在大修期间,根据实际情况对局部损伤严重的拱脚砖进行更换,更换全部沉淀池炉墙拱角砖以上的砖体。在生产过程中,渣线附近的砖体在生产一段时间后会侵蚀掉,直至砖体减薄到可以挂上渣,才最终稳定下来。稳定的渣皮对炉墙耐材和炉墙水套都是很好的保护。鉴于目前生产中挂渣操作的实践经验,此次升级改造将渣线附近炉墙砖由原来的 250 mm 厚减薄至 150 mm,力求投产后尽早达到稳定的挂渣状态,也可在一定程度上避免砖体浪费,减少投资成本。

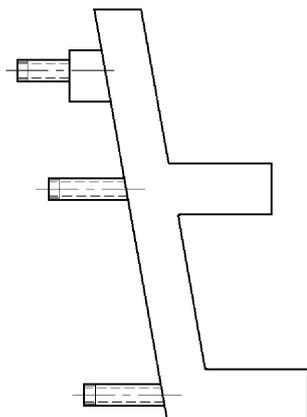


图 6 沉淀池炉墙倒 F 形水套示意

Fig. 6 Schematic diagram of inverted F-shaped water jacket of the furnace wall

有别于其他闪速炉的设计,该台闪速炉的沉淀池炉顶不是平顶而是拱顶。拱顶的设计可以增大沉淀池区域炉膛空间,降低从反应塔下来的混合烟气流速,对降低烟气含尘有正向影响。该区域拱顶原设计为 H 形水冷梁结合吊挂砖的形式,水冷梁在长期运行时易烧坏漏水,因此在 2010 年大修时改为吊挂铜水套结合吊挂砖的形式,但该区域承受高温烟气冲刷较为厉害,改造后仍多次出现吊挂砖变形、掉砖的情况,吊挂水套烧损也较严重。为减少该区域烟气外溢,延长水套使用寿命,减少维护工作量,本次升级改造对沉淀池拱顶进行了重新设计,取消全部吊挂砖,采用全水套覆盖。设置爬坡段吊挂水套 4 块、平顶段吊挂水套 8 块、下坡段吊挂水套 4 块、北侧直立水套 4 块、南侧直立水套 4 块,共计 24 块

水套。采用铸造铜水套,内侧面开燕尾槽挂浇注料,留设块煤孔、探料孔及测温测压孔。

2.3 贫化区强化还原优化设计

该闪速炉渣含镍较高,镍量损失较大,镍金属回收率较低,影响经济效益,如何对贫化区渣进行深度还原成为此次升级改造的重点。传统方法通过延长沉淀池来保证澄清时间,以达到降低渣含镍的目的。2010年闪速炉大修时,将贫化区延长了3 200 mm,实际生产中降低渣含镍的效果并不明显。针对闪速炉渣深度还原的研究中提出^[4-5],随着反应时间的延长,渣中金属的还原率仅在一定范围内增加并达到一极限值。目前闪速炉贫化区的长度已经满足沉淀澄清时间,再加长贫化区除了带来生产成本增加、热损失加大等问题,不能带来更多收益。

闪速炉贫化区熔炼渣中渣含Ni 0.25% ~ 0.5%,金属镍多以氧化物即NiO的形式存在,并嵌于渣相晶格中,不易聚集。为对其进行进一步的深度还原,生产现场通常采用块煤作为还原剂,但大部分块煤在熔池表面即完成了燃烧放热,无法进入熔池内部参与还原反应,还原利用率较低,且易造成炉膛过热,甚至烧炉顶的情况。为改善这一情况,现场进行了加入碳化钙进行强化还原的研究^[6],试验过程中渣含镍平均下降约11%,还原效果不甚理想,经济性也有待提升,渣含镍仍有可降低空间。

在实际生产中,闪速炉贫化区靠近两侧壁处存在若干“死区”,该区域熔体温度降低,炉结不断产生,减小了贫化区的有效流通面积,低温区也给渣中镍的进一步还原增加了难度。近年来随着冶炼技术的不断发展,对强化熔池熔炼技术的研究和实践越来越多^[7-10],中国恩菲工程技术有限公司开发了具有自主知识产权的侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术^[11]。此次升级改造即考虑将该技术引入闪速炉贫化区设计中,利用侧吹浸没燃烧技术给贫化区熔池熔体带来更好的热力学和动力学条件。

此次优化设计中,在现有贫化区侧墙立水套上选择7个侧吹送风位,现贫化区中熔体液面总高度为1.5 m,低镍钼液面高度为0.7 m,渣层高度为0.8 m,侧吹送风位高度布置在距离炉底1 m处。为减少气流冲击对贫化区电极的影响,7个送风位在贫化区两侧交错布置,侧吹送风位不正对电极。熔池充分的搅动会对渣的澄清分离带来一定影响,但实际上鼓入熔池的气体在侧吹喷枪送风口处以一定速度进

入熔池后,在浮力作用下迅速上浮,对送风口以下的区域影响较弱,喷枪以下熔池仍保持相对的平稳,对渣的沉降分离影响较小,且送风位布置更靠近上升烟道一端,离放出口保持一段距离,具体布置位置如图7所示。

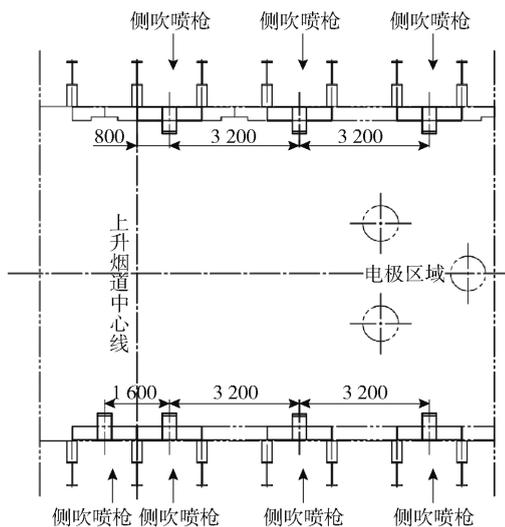


图7 天然气侧吹喷枪布置位置示意

Fig. 7 Schematic diagram of the layout position of the natural gas side-blown lance

侧吹喷枪插入送风位将天然气和富氧风送入贫化区熔体中,设计每只喷枪的天然气流量为50 Nm³/h,天然气与氧气在枪口位置剧烈燃烧,提高熔池温度,可将现有贫化区侧壁炉结熔化,扩大贫化区熔渣的有效接触面积,温度的升高也能加速熔池中还原反应的发生。喷枪口高速喷入的气体在熔渣中形成一定的搅拌作用,促进传热传质动力学条件的形成,进一步强化还原反应的发生。贫化区动力学条件的改善可以将块煤或碳化钙等还原剂从熔池表面搅入熔池内部,一方面减少块煤在空间燃烧浪费热量,另一方面也加大了还原剂与渣的接触面积,提升还原剂利用率,起到强化还原的目的。控制天然气和富氧风中氧气的比例,天然气本身也可作为还原剂与渣中有价金属氧化物发生还原反应,强化贫化区还原气氛。

天然气侧吹喷枪的引入对枪口区炉墙砖体冲刷和侵蚀会加剧,因此在枪口区域设置铜水套枪座,保护枪口附近炉墙砖体,同时延长侧吹喷枪自身的使用寿命。该铜水套在靠近熔池侧200 mm范围内堆焊耐磨高温合金,抗击熔池的冲刷和天然气燃烧带

来的高温烘烤,延长铜水套自身的使用寿命。在铜水套深入熔池的一侧做燕尾槽式设计,增大冷却面积,在结构上也便于挂渣,渣壳的形成能在很大程度上保护铜水套。

3 改造实施与效果分析

2022年8月闪速系统全面停炉检修,以闪速炉炉体检修为主工期,同时配套完成镍精矿蒸汽干燥技术改造、48万t硫酸系统性能升级改造、环集烟气除尘技术改造、返料破碎系统升级改造、转贫系统改造、生产运行智能集中管控中心升级改造等多个子项的工程。项目于2022年9月完成并点火烘炉。改造后,闪速炉系统镍精矿年处理量提升至85万t,反应塔干精矿处理量提升至100 t/h^[12-15]。

本次闪速炉改造实施过程中,反应塔水套的拆除和安装是重点。反应塔E形水套外为整圈钢壳,水套通过螺栓把持在钢壳上,为保证水套对钢壳的冷却效果,铜水套外表面与钢壳的内表面需贴实。整圈水套及钢壳在地面完成组合安装及调整,保证整圈水套与钢壳的同心度与垂直度,整圈水套齿槽需对齐,调整完毕后再将该段塔壁整体吊装到安装平台进行反应塔安装。每安装好一节钢壳,均要反应塔对同心度、垂直度进行检查,调整合格后方可进行下一节安装。

投产后,闪速炉炉体改造部分水冷元件均正常运行,冷却水温升均控制在设计合理范围。贫化区加装侧吹喷枪后,侧墙炉结得以清理,贫化区的动力学条件得到提升,贫化区电极也未受到侧吹气流冲击的明显影响,渣含镍指标的改善还有待进一步的验证。

同时,贫化区侧吹喷枪的引入也带来了一些问题。在生产过程中,贫化区出现了烧炉顶的现象,主要原因在于,未在熔池内完全燃烧的天然气的CO在炉膛空间燃烧造成的。目前,闪速炉贫化区渣液液面离炉顶的炉膛高度为1.6 m,炉膛净空很小,二次燃烧空间不足,考虑在后续改造中可适当加高炉顶,或对炉顶进行水冷改造。同时,在生产中进一步对不同压力、不同流量下的天然气喷吹进行试验,摸索适当的喷吹压力和气量。

4 结论

针对某镍冶炼厂闪速炉在运行中后期面临的生

产负荷提升与设备老化之间的矛盾以及炉渣有价金属回收率偏低的工艺瓶颈,本研究开展了一次全面的炉体升级改造,旨在解决因冷却能力不足导致的安全隐患,以满足高强度冶炼下产能提升与可持续发展的需求。

本研究对反应塔区域进行了分区强化水冷设计,投产后冷却水温升稳定,运行平稳,既满足了强化冶炼的需求,保证了反应塔寿命,又在一定程度上控制了过度的热损失,降低投资和生产成本。在沉淀池区域,强化了渣线附近的水冷,结合渣线区域砖体设计,实现挂渣操作。在贫化区,首次引入侧吹浸没燃烧技术,适当的喷吹位置设置结合控制合适的气量和喷吹压力可以有效降低侧吹对电极的冲击。

改造实践表明,本次升级将闪速炉年处理能力提升至85万t,反应塔处理量达到100 t/h。反应塔的分区冷却设计有效应对了热负荷增加的挑战,保障了炉体的安全稳定运行。本次改造的成果证实,通过针对性的结构创新,能够有效延长老旧闪速炉的服务寿命,并显著提升其技术经济指标。

[参考文献]

- [1] 梅焱,周萍. 有色金属炉窑设计手册[M]. 长沙:中南大学出版社,2018.
- [2] 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.
- [3] 熊宗维. 闪速炉反应塔壁面挂渣机理研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2015(11):7-9.
- [4] 韩跃新,马松勃,高盈,等. 某镍冶炼炉渣深度还原过程中铁的成长特性研究[J]. 矿冶,2015,24(1):26-30.
- [5] 马松勃,韩跃新,王虹. 某镍冶炼炉渣深度还原过程中的动力学分析[J]. 矿冶,2014,23(6):32-35.
- [6] 高宏伟,齐红斌,张威. 碳化钙降低闪速炉渣含镍的研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2020(2):27-30.
- [7] 周俊,陈卓. 闪速炉沉淀池中的冶金过程与炉况控制[J]. 有色金属(冶炼部分),2021(12):1-10.
- [8] 李世旺,王仕博,王华,等. 多孔道底吹喷枪搅拌的数值模拟与强化机理分析[J]. 化工进展,2020,39(9):3563-3573.
- [9] 王书晓,陈学刚,温治. 侧吹炉内气流穿透和搅动行为实验研究[J]. 中国有色冶金,2021,50(6):97-102.
- [10] 陆金忠,孙晓峰,李海春. 顶侧复合连续炼铜系统开发之工艺流程再造[J]. 绿色矿冶,2024,40(2):1-5.
- [11] 陈学刚. 侧吹浸没燃烧熔池冶炼技术的现状与持续发展[J]. 中国有色冶金,2017,46(1):5-10,29.

- [12] 陈学刚, 祁永峰. 红土镍矿侧吹还原造钽熔炼试验研究[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(1): 33 - 39.
- [13] 陈学刚, 裴忠冶, 代文彬, 等. 侧吹浸没燃烧熔炼技术(SSC)在红土镍矿领域的应用及展望[J]. 中国有色冶金, 2018, 47(6): 1 - 7.
- [14] 张玉涛, 张成江, 蒋玉铃. 富氧侧吹熔化炉处理含锌物料的探索及应用[J]. 云南冶金, 2023, 52(6): 100 - 102.
- [15] 许良, 马绍斌. 侧吹浸没燃烧炉 + 烟化炉处理锌渣技术[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(2): 40 - 44.

Industrial application of side-blowing submerged combustion technology in revamp of a nickel flash smelter

XU Xin

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Driven by the rapid development of high-intensity smelting, flash smelting technology is trending towards higher feed rates, oxygen enrichment, volumetric heat intensity, and matte grades. To meet these demanding process requirements, the study details a structural upgrade of a flash furnace at a nickel smelter. To address severe operational conditions, such as high thermal loads and intense erosion in critical components like the reaction shaft and settling chamber, a variety of advanced water jacket designs were employed. Furthermore, side-blowing submerged combustion technology was introduced into the slag cleaning zone. This technology utilizes submerged lances to inject kinetic and thermal energy into the molten bath, thereby improving metallurgical conditions and enhancing slag reduction. Operational results demonstrate that the new cooling structures have effectively ensured the safe and stable operation of the furnace under high loads. The application of side-blowing technology has significantly improved the metallurgical environment in the slag cleaning zone, laying a solid foundation for increasing the recovery rate of valuable metals. The study provides a valuable practical reference for the technological upgrading of similar furnaces.

Keywords: flash furnace; high-intensity smelting; reaction tower; copper water jacket; SSC; intensified reduction

