

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.025

体外循环条件下锌锅炉鼻子流场数值模拟与现场验证

杨启坤¹, 盛宏威², 唐成龙²

(1. 湛江钢铁有限公司冷轧厂, 广东 湛江 524072; 2. 宝钢股份中央研究院, 上海 201999)

摘 要:连续热镀锌生产线中,通常采用“加湿”气体方案解决炉鼻子内部蒸汽抑制问题,但却带来氧化锌杂质黏附、清理困难等问题,尤其在高铝产品中更为突出。提出采用体外循环方法降低炉鼻子内锌蒸汽的浓度,同时解决锌蒸汽回流至炉膛的问题。采用 CFD 分析软件,建立炉鼻子内部流场的流体动力学数值模型,研究得出多参数影响下炉鼻子内流场热量、压强和质量平衡变化规律。仿真和现场应用结果表明:体外循环措施可以有效控制腔内压强,抑制锌蒸汽回流。该研究可为新一代锌灰体外循环装置的优化设计提供重要支撑。

关键词:热镀锌;锅炉;流场模拟;动态平衡;炉鼻子

中图分类号:TH705 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0130-07

Fluid Dynamic Simulation and On-site Verification of Furnace Nose in Zinc Pot Zone under External Circulations

YANG Qikun¹, SHENG Hongwei², TANG Chenglong²

(1. Cold Rolling Plant of Zhanjiang Iron and Steel Co., Ltd., Zhanjiang 524072, China;

2. Baosteel Central Research Institute, Shanghai 201999, China)

Abstract:To resolve the difficulty in cleaning zing olive impurity adhesion inside furnace nose due to internal vapor suppression, especially for ZAM products, by usual humidification gas application in continuous hot-dip galvanizing production line, an external circulation method for zing vapor concentration reduction in furnace nose and zinc vapor backflow is proposed. With CFD analysis software, a fluid dynamics numerical model of flow field inside furnace nose is constructed, on which the reserch is conducted, and the changes law of heat, pressure, and quality balance of flow field inside furnace nose under multi-parameter influence are obtained. The simulation and on-site application results demonstrate that the external circulation method can effectively control the pressure in cavity and suppress zinc steam backflow, which strongly supports the optimization design for the new generation of zinc ash external circulation device.

Keywords:hot-dip galvanizing;furnace;flow field simulation;dynamic balance;furnace nose

0 引言

在连续热镀锌生产中,高品质的镀锌板具有卓越的耐蚀性、成形性、焊接性和涂装性等特征,在汽车、建筑和家电行业中日益广泛地替代了电镀锌及冷轧板的应用。然而,随着对热镀锌镀层质量要求的提高,锌灰已成为严重影响产品外观质量和耐蚀性的关键因素^[1-4]。

为了减少甚至切断锌的“蒸发”,当前业内普遍采取的是所谓的“增湿”方法,即向炉鼻子内部锌液上方通入一定量的“湿氮气”。虽然这种措施能够通过生成致密的保护膜来降低锌的蒸发,但当氧化膜层达到一定厚度后,它将黏附在钢带表面,导致“漏镀”缺陷^[5-6]。此外,在生产高铝、锌铝镁产品时,由于锌、铝、镁各自生成的氧化物

特性不同,无法形成致密的保护膜,从而无法切断锌锅液体“蒸发”,导致带钢表面更易氧化,更容易出现镀层缺陷。

为解决锌蒸汽冷凝后吸附在带钢上的问题,采取“以疏代堵”的策略。将炉鼻子锌灰体外循环装置布置在生产线上,基本能有效将炉鼻子内部的锌灰抽出并过滤,但仍存在改进空间,如气流通道设计及炉鼻子内气氛质量、温度及压强平衡控制等。

本研究为开发新一代高性能锌灰体外循环装置提供计算机模拟支持。在 CFD 软件平台上,实现对有关结构措施和参数设计结果的充分评估,减低设计风险,提高设计效率;在模拟基础上,对结构和参数进行综合优化,提供改进设计的思路 and 依据^[7-9]。通过本设计,可进一步缩短锌蒸汽

第一作者简介:杨启坤(1992—),男,河南驻马店人,本科,研究方向为钢铁行业热镀锌技术,lianchengzheng@nuaa.edu.cn。

或锌灰在炉鼻子内部的停留时间,在不增大风机功率的情况下,实现炉鼻子内气体的快速置换,从而显著降低锌灰落在钢带或锌液表面的可能性,有效避免镀锌质量缺陷。

1 锌锅炉鼻子流场动力学模型的建立

1.1 锌蒸汽体外循环结构改造

未改造前生产机组镀锌过程如图 1 所示。为进一步降低锌灰对镀锌质量的影响,本研究在此基础上,设计具有体外气体循环系统的锌锅炉鼻子,如图 2 所示。

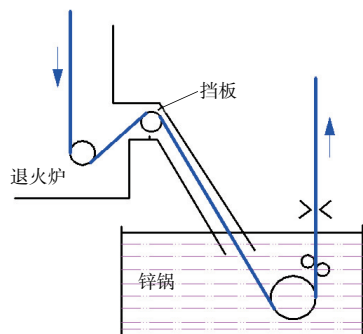


图 1 连续镀锌过程示意图

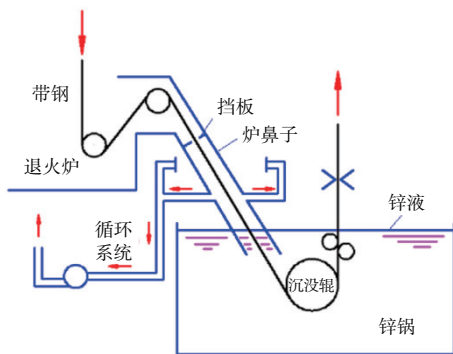


图 2 体外气体循环炉鼻子连续镀锌过程示意图

本研究主要针对炉鼻子气氛流场进行分析,因此忽略锌锅、退火炉等因素。改造后炉鼻子的气氛流场特征受到抽气量、补气量、缝隙开度等参数的影响,而且各个影响参数之间存在动态平衡,所以确定最优参数对提高炉鼻子的工作能力和效率至关重要。

1.2 炉鼻子建模及气氛流场仿真

在生产现场实际应用的场景下,显然不支持现场参数改进,所以本研究采用 CFD(集成在 ANSYS Workbench 中)仿真模拟平台进行炉鼻子建模,进行气氛特征仿真模拟,如图 3 所示,具体

参数如表 1 所示。

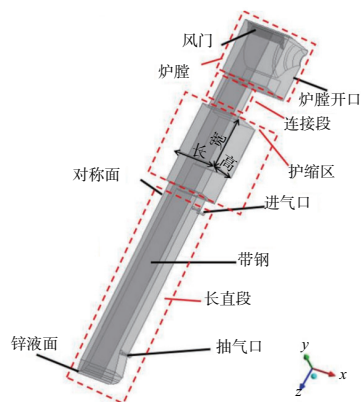


图 3 体外气体循环炉鼻子示意图

表 1 炉鼻子参数表

参数	数值
炉膛(长×宽×高)/m	1.294×1.294×0.944
扩缩区(长×宽×高)/m	0.105×0.125×0.843 0.102×0.715×0.67
连接段(长×宽×高)/m	0.694×0.887×0.27
长直段(长×宽×高)/m	0.850×4.581×0.375
风门面积/m ²	0.274
进气口尺寸/m ²	0.077
抽气口尺寸/m ²	0.102

利用 ANSYS Workbench 工程将几何模型导入 Geometry 中,在 Meshing 中划分网格,将流动计算进行离散化处理。由于炉鼻子总长度与带钢厚度、进气与出气口口径等尺寸差异达 4 个量级,在划分网格时必须将全局与局部区别处理。图 4 为炉鼻子网格模型,主体采用四面体网格,对所有壁面划分边界层为六面体网格。全局平均网格尺寸 50 mm,带钢壁面、进气、出气口等小尺寸区域的网格尺寸 5~20 mm。网格质量高于 0.2,充分保障计算的可靠性。

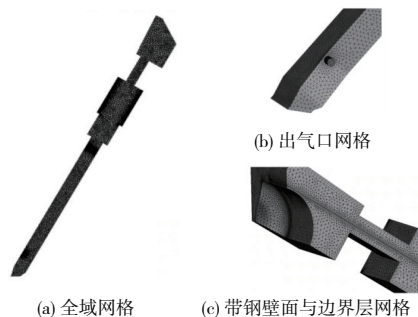


图 4 炉鼻子网格模型

炉鼻子流动区域内气氛的主要成分是 N_2 。

由于 H_2 量较少作忽略处理,则工作介质为 N_2 。高铝(ZAM)炉鼻子两端分别受退火炉 500°C 和锌锅 590°C 的高温影响,气体密度与比热受温度影响显著。因此考虑工作介质 N_2 为变物性介质,在不同温度下的密度由理想气体状态方程计算、比热为温度的函数。

炉鼻子内气氛为单相流动,计算连续性方程、NS 方程和能量方程。炉鼻子气氛流动达到稳定的湍流状态,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[10]。控制方程对离散化网格的计算采用有限体积法。采用基于压力的求解器,压力与速度耦合采用“SIMPLE”算法^[11],梯度离散化格式为“Least Squares Cell Based”;压力离散化格式为“Second Order”;动量、湍流动能、湍流耗散率离散化方法为“First Order Upwind”。

在仿真过程中,首先控制炉膛挡板缝隙开合度为 30° 。模拟不同抽气量下炉鼻子内气氛全局流动情况;模拟不同抽气量下锌液不同位置处,锌液面的气氛向炉膛方向运动情况;模拟抽气量及补气量对温度和压力平衡的影响;最后模拟炉膛挡板缝隙开合度对炉鼻子气氛的影响。

以上仿真分析,旨在确定较优影响因素,提高体外循环条件下锌锅炉鼻子工作能力及效率,降低锌灰对镀锌质量的影响,从而提高镀锌质量。

2 仿真结果及分析

2.1 抽气量对气氛流场特征的影响

体外循环抽气条件是炉鼻子内气氛流动的主要驱动力。首先分析不同抽气量下 ZAM 炉鼻子内气氛流场特征。选取炉膛挡板部分关闭的情况进行分析,即缝隙开度 $C=30^\circ$ 。图 5 为不同抽气量下气氛流动的全局三维流线图(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

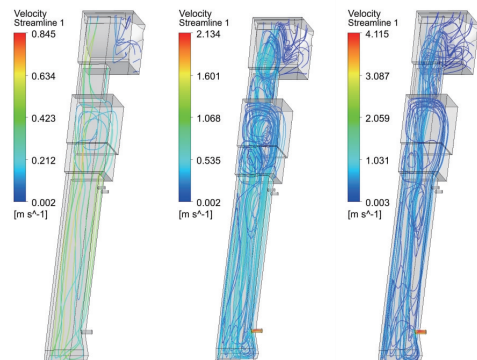


图 5 $C=30^\circ$ 时不同抽气量下的全局三维流线图

3 个抽气量下炉鼻子内均出现不同程度的涡流,涡流产生主要是由于炉鼻子近上端结构扩张导致气氛流动的突变。来自于炉膛的氮气进入炉鼻子后,先经较短的一段窄通道且在带钢分区的限制下,产生相对炉膛区而言较均匀的流动;接着氮气进入近上端的扩张区宽通道,流线急剧扩张,产生显著涡流;随后,氮气进入炉鼻子下部长直段窄通道,流动在狭窄通道内受限后稳定发展形成较均匀的流线;氮气在炉鼻子下端锌液面处受迫回流形成局部涡流。

图 5 中 3 个不同抽气量下炉鼻子内均出现了不同程度的涡流。抽气量为 $0\text{ m}^3/\text{h}$ 时,炉鼻子内流速较低,分布较均匀,在炉膛端风门附近区域的流动与炉鼻子内主流方向一致,流线较稳定,而此处下端炉膛通口处流速很低流动较混乱;抽气量为 $50\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 时,明显可见中心流线流速更高,是受带钢向下运动带动的气氛流动,外围流线流速较低但混乱程度更高。经上述分析,不同抽气量下炉鼻子内的全局流动情况未见显著区别。

绘制锌液面上随机 20 个位置产生的三维流线如图 6 所示。进一步分析流动均匀性,重点关注锌液面处的气氛流动。抽气量由 $0\text{ m}^3/\text{h}$ 提高至 $50\text{ m}^3/\text{h}$ 后,锌液面上气氛一部分直接被抽出;一部分往炉膛方向运动,但在上端扩-缩结构产生折返运动,小部分气氛继续向上运动;抽气量继续提高至 $100\text{ m}^3/\text{h}$,锌液面上的气氛大量由抽气口离开,往上运动的气氛更是在扩缩结构后绝大部分气氛折返。显然,抽气量的增加明显抑制锌液面的气氛向炉膛方向运动,进而减少向炉膛方向运动的锌灰量。

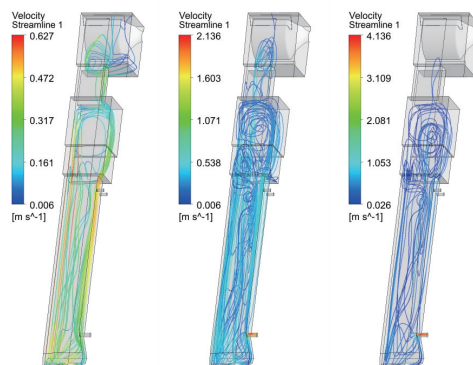


图 6 $C=30^\circ$ 时不同抽气量下锌液面上的三维流线图

2.2 抽气量对温度与压力平衡的影响

体外循环抽气条件有效地引导了炉鼻子内的

气氛流动,从而提高了其流动的均匀性。但是温度与压力的平衡性成为评价体外循环抽气条件可靠性的另一必要条件。

炉鼻子内全局气氛温度主要受炉膛恒定不变的 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及两侧恒定 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的壁面加热条件控制,在锌液面恒温 $590\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,无抽气条件下气氛温度从炉膛向锌液面方向逐渐由 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加至 $590\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

如图 7(a) 所示,抽气量为 $0\text{ m}^3/\text{h}$ 时, $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的等温面落在离炉膛开口很近的位置,且可以看到等温面是扭曲的,在有带钢的区域等温面较无带钢区域更远离开口,即炉膛 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的影响在带钢区域更加显著,表明带钢的运动加强了气氛沿带钢运动方向的热对流;而如图 7(b) 所示,抽气量为 $50\text{ m}^3/\text{h}$ 时, $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的等温面往锌液面端移动,气氛热对流得到加强;如图 7(c) 所示,抽气量达 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 时, $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的等温面已经覆盖到炉鼻子长直段的大部分区域。此时抽气条件已经对炉鼻子内流动产生极大影响,炉鼻子内气氛温度主要受炉膛温度控制。但抽气口附近没有出现 $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的等温面,表明炉鼻子内并未出现局部过低温度,这主要是受两侧壁面恒温加热影响及炉膛气氛在炉鼻子里强烈热对流共同作用。

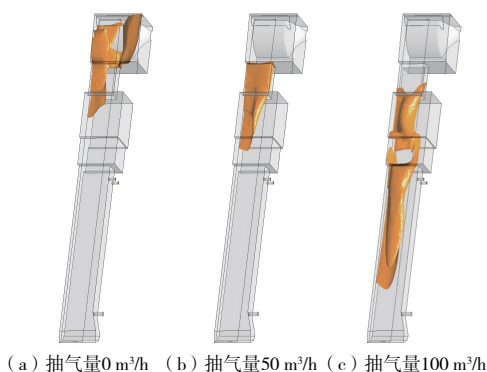


图 7 $C=30^{\circ}$ 时不同抽气量下的 $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温面

炉鼻子全局温度随抽气量变化曲线如图 8 所示。可以观察到有抽气条件相比无抽气条件的最大温度和平均温度都更低,全局平均温度均小于恒温条件的壁面温度 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明炉鼻子里存在一定程度热对流,气氛主要受炉膛来流温度控制;而抽气条件加强了炉鼻子内的热对流使得温度较低;全局最小温度依然保持炉膛来流温度 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$,整体气氛温度主要受炉膛温度控制。

不同抽气量下炉鼻子对称面上的压力分布如图 9 所示。总体上压力均呈现由炉膛向锌液面轻

微的增加。比较图 9(a)—图 9(c),无抽气条件较有抽气条件,气氛在炉鼻子区域内受限流动,涡流形成产生局部压力增加。

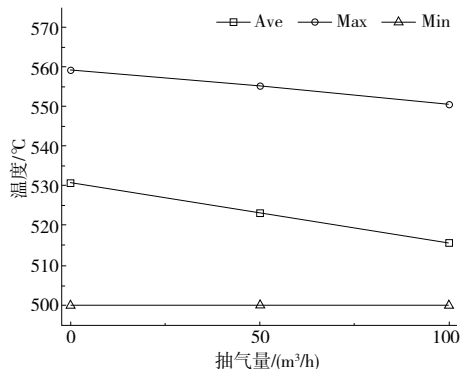
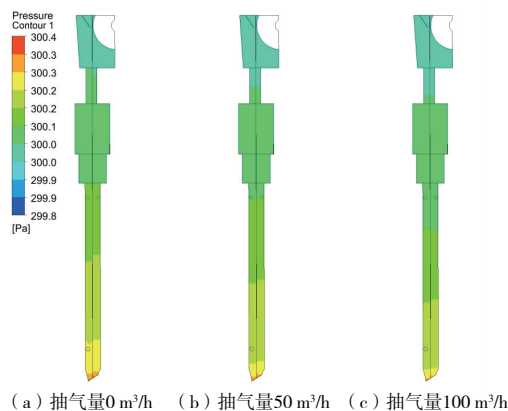


图 8 $C=30^{\circ}$ 时全局温度随抽气量的变化曲线



(a) 抽气量 $0\text{ m}^3/\text{h}$ (b) 抽气量 $50\text{ m}^3/\text{h}$ (c) 抽气量 $100\text{ m}^3/\text{h}$

图 9 $C=30^{\circ}$ 时不同抽气量下对称面上的压力云图

炉鼻子全局压力随抽气量变化曲线如图 10 所示。不同抽气量下的最大压力和全局平均压力几乎一致,最小压力随着抽气量提高而降低。最小压力处于抽气口位置,但并未出现负压情况。

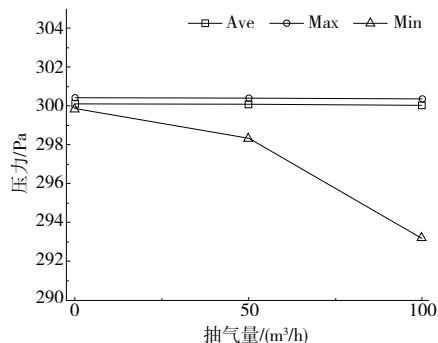


图 10 $C=30^{\circ}$ 时全局压力随抽气量的变化曲线

2.3 补气量对气氛流场特征的影响

为了得出不同补气流量与炉鼻子内气氛回流的规律,采用控制变量法控制抽气流量($50\text{ m}^3/\text{h}$)。首

先分析开启补气口后的气氛流场特征,图 11 为不同补气量下的全局三维流线图。当开放补气口并增加补气量后,炉鼻子内流场被明显扰动,在其内中部及以下产生大量涡流。然而总的来看,炉鼻子内部的气氛流动没有发生显著变化。

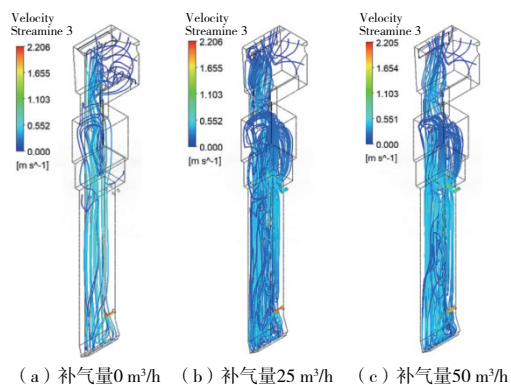


图 11 不同补气量下的全局三维流线图

2.4 补气量对温度与压力平衡的影响

为研究开启补气条件后的温度平衡,选取抽气量为 50 m³/h 时的情况。全局温度随补气量的变化曲线如图 12 所示。开启补气条件后的全局平均温度降低,说明炉鼻子内的热对流得到加强,总体小于恒温条件的壁面温度 550 °C,表明炉膛来流气氛主要受炉膛温度控制;全局最小温度依然保持在炉膛的 500 °C,全局最大温度无显著差别。

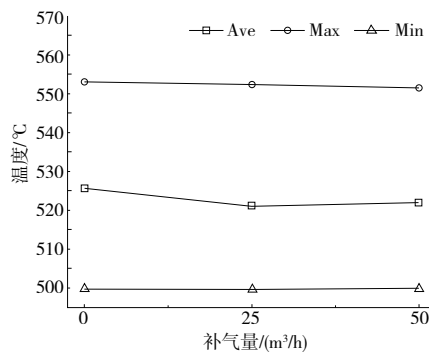


图 12 全局温度随补气量的变化曲线

用相似方法作全局压力曲线如图 13 所示。补气量增加后,最小压力与最大压力之差增加,但整体平均压力无显著区别。

2.5 缝隙开度对炉鼻子气氛流场平衡的影响

可以通过改变缝隙开度来改变炉膛口的缝隙大小,从结构上对炉鼻子气氛向炉膛运动产生抑制作用。因此部分关闭炉膛挡板,即减小缝隙处

通流面积,是实际操作中常用的抑制锌灰向上运动的主要手段。

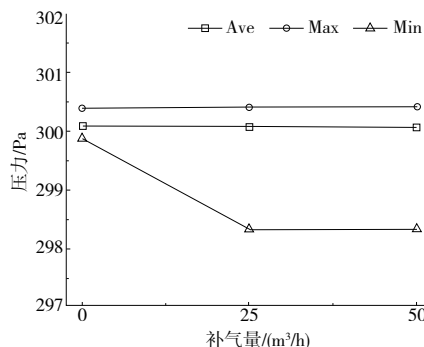


图 13 全局压力随补气量的变化曲线

取 6 个炉膛挡板角度条件下,炉鼻子全局温度的平均值描点连线如图 14 所示。每一点上下虚线表示全局温度最大和最小值。

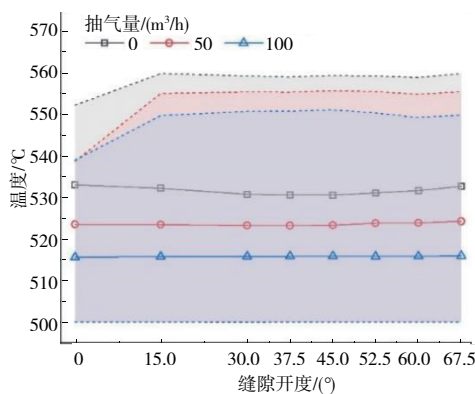


图 14 全局温度随缝隙开度的变化曲线

利用相似方法,作全局压力的曲线如图 15 所示。不同的抽气量、不同的缝隙开度产生的炉鼻子全局平均压力和最大压力几乎一致,而产生的最小压力有显著不同。总体上,由于抽气带来的局部压力损失,抽气量越大,全局最小温度越低。但并未对全局产生显著影响。

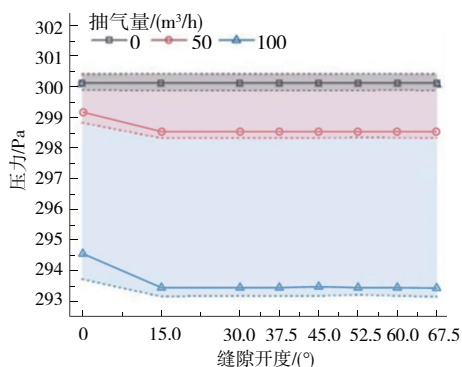


图 15 全局压力随缝隙开度的变化曲线

2.6 正交分析确定最优运行参数

抽气流量、补气流量和缝隙开度 3 个运行参数是实际工艺操作中可调参数。在此运行参数范围内寻求最优组合^[12],采取正交分析,进行三因素三水平的正交试验。由于补气量受限于抽气量,因此补气量采用相对值。将 3 个工艺参数进行分级,抽气流量分为 3 个分级:10 m³/h、50 m³/h、100 m³/h;补气流量 3 个相对值分级:0、0.5、1.0。缝隙开度 3 个分级:0°、30.0°、67.5°。

采取三因素三水平的正交试验,进行 9 次数值模拟。正交试验方案如表 2 所示。

表 2 正交试验方案

编号	补气流量 相对值	抽气流量/ (m ³ /h)	缝隙 开度/(°)
1	0	10	0
2	0	50	67.5
3	0	100	30.0
4	0.5	10	67.5
5	0.5	50	30.0
6	0.5	100	0
7	1.0	10	30.0
8	1.0	50	0
9	1.0	100	67.5

数值模拟以开口回流比为目标结果,采取直观分析法,计算各水平所对应的回流比均值 K 作为评价指标作图分析,各因素对应的各水平对指标的影响趋势如图 16 所示。折线的变化趋势越大,说明该因素对指标的影响越显著。从图 16 中可知,抽气量对回流比的影响最显著,随着抽气量 B1(10 m³/h) 提高到抽气量 B3(100 m³/h),回流比从 0.323 大幅下降到 0.025,说明了抽气量对抑制回流的显著作用。随着补气量的提高,回流比呈现增大的趋势,最大回流比与最小回流比的差值为 0.12,说明补气流量对回流比的影响较小。对于缝隙开度,最大回流比与最小回流比的差值仅为 0.01,回流比的变化趋势相对其他参数最小,主要原因是开放补气与抽气对炉鼻子内流场的影响较大,使得风门限流的影响可以忽略不计。综上所述,3 个因素对气氛回流影响的主次顺序为:抽气、补气和缝隙开度。

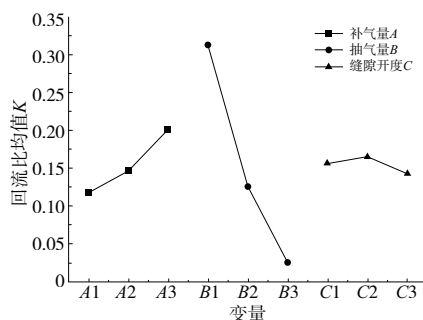


图 16 因素与指标折线图

结合正交分析来预测最优参数组合^[13]:抽气流量对回流的影响最大。较大的抽气流量能有效抑制回流,因此控制抽气流量的大小是首要问题。提高补气流量对炉鼻子内流场扰动作用明显,在炉鼻子内中部及以下产生大量涡流,容易使锌灰随气流迂回,进而增加锌灰回流至退火炉的可能性,因此不建议开启补气口。缝隙开度对抑制回流的影响最不显著,较小流通面积下的气氛流速更快,对回流比减小起到贡献作用,因此选取缝隙开度 67.5°最优。综上所述,预测补气流量 0 m³/h、抽气流量 100 m³/h 以及缝隙开度 67.5°的参数组合最优。

3 现场应用验证

确定最优参数后,所开发的炉鼻子净化技术及新研制的装备自 2022 年 5 月投入实际运行,经过约 15 个月的优化和完善,运行实绩如下。

炉鼻子内壁基本无积灰,新增系统单位时间内锌灰发生量的抽出和过滤达 75%以上,解体后观察热交换器翅片以及炉膛内壁积灰情况如图 17 所示。直接观察可知当新增系统正常工作时,无气流回流,实际和仿真结论一致。

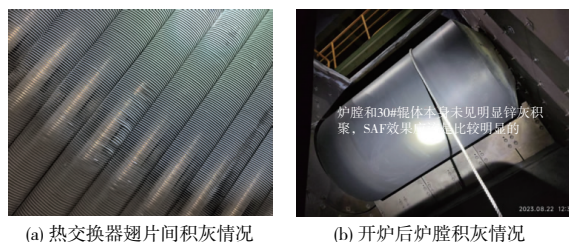


图 17 热交换器翅片间和炉膛内壁积灰情况

炉鼻子净化技术及新研制的装备自使用后,近 6 个月的锌灰改判率实际数据符合项目要求,D308 机组的年度锌灰改判率在 0.6% 的基础上平均下降 0.15 个百分点以上,系统投入后数据

跟踪对比如表3所示。锌灰改判率的下降是对研究成果的直接认可,证明了新技术和装备在实际生产中取得了一定的效果,验证了该装备的有效性。

表3 系统投入后数据跟踪对比表

2023年	机组 产量/t	锌灰发 生量/t	锌灰改判 率/%	锌灰改判率 下降 百分点	是否达标 (>0.15 个百分点)
3月	22 838	53.66	0.23	0.37	√
4月	25 189	0	0.00	0.60	√
5月	25 107	3.49	0.01	0.59	√
6月	23 849	46.96	0.20	0.40	√
7月	21 271	35.10	0.17	0.43	√
8月	24 570	17.02	0.07	0.53	√

从实际看,改造后炉鼻子对高铝生产长周期支撑作用明显,尤其表现在风机色差控制上和对冷却段风机换热器的维护上。以往在高铝生产后期,风机往往因锌粉堵塞而导致功率下降,出风机色差,此时只能限速,且需要随后检修进行换热器拆除清灰,目前则大为改观。

此外,在高铝和纯锌共线的机组中,不用开炉清灰,只需要更换炉鼻尖即可,将原先30h切换时间缩短至18h。按照每月切换1次节省12h,预计1年可节省停机时间144h,提升高铝年产能4380t。

4 结语

通过研究补气条件、抽气条件、缝隙开度等运行参数对炉鼻子气氛流场的影响,主要对气氛流场特征、温度与压力平衡进行分析。经过优化设计、开发的炉鼻子净化技术及新研制的装备,使炉鼻子内壁基本无积灰,新增系统单位时间内锌灰发生量的抽出和过滤75%以上,能有效地缩短炉鼻子内的锌蒸汽或锌灰停留时间,大大降低了锌灰落在钢带或锌液表面的可能性,从而有效避免镀锌质量缺陷。综合之前的评估和模拟分析,此研究为开发新一代高性能的锌灰体外循环装置提供了重要的支持,对于未来提升镀锌产品的生产效率和产品质量具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 崔凤伟. 热镀锌生产中锌灰对产品表面质量的影响和解决方法[J]. 辽宁科技学院学报, 2010, 12(2): 13-14.
- [2] 谈轶文. “锌灰”缺陷的原因分析及解决措施[J]. 轧钢, 2011, 28(6): 52-54.
- [3] 翟立刚. 冷轧热镀锌带钢表面锌灰缺陷形成原因分析及控制[J]. 科技资讯, 2015, 13(9): 99.
- [4] 孙宁. 连续热镀锌线在线清理锌灰应用[J]. 山东工业技术, 2018(12): 18.
- [5] 齐达, 李润昌. 热镀锌钢板漏镀缺陷的成因与对策[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(20): 1100-1103.
- [6] 董子亮, 段晓溪, 张学范, 等. 炉鼻子氮气露点对带钢表面质量的影响及控制[J]. 轧钢, 2021, 38(2): 90-93.
- [7] VUOKILA A, MATTILA O, KEISKI R L, et al. CFD study on the heavy oil lance positioning in the blast furnace tuyere to improve combustion [J]. ISIJ International, 2017, 57(11): 1911-1920.
- [8] KUANG M, ZHU Q Y, YANG G H, et al. The fate of shrinking boiler nose to improve the flow-field deflection and asymmetric combustion in a 600MWe supercritical down-fired boiler [J]. Fuel Processing Technology, 2017, 167: 371-381.
- [9] RADYUK A G, TITLYANOV A E, SKRIPALENKO M M, et al. Modeling of the temperature field of air tuyeres in the blast furnaces with thermal insulation of the nose portion [J]. Metallurgist, 2018, 62(3): 310-313.
- [10] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269-289.
- [11] PATANKAR S V, SPALDING D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(10): 1787-1806.
- [12] 刘琪麟, 唐成龙, 赖焕新. 炉鼻子内保护气流场分析与增湿气导入方式的改进[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2018, 44(3): 439-447.
- [13] 李蓝影. 基于吹吸方式的炉鼻子内锌蒸气控制研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.

收稿日期: 2024-08-19