

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.04.008

热基镀锌脱锌缺陷分析及控制研究

张富明¹, 任志超^{1*}, 张秋生¹, 贾博¹, 李新²

(1. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 河北 唐山 063000; 2. 首钢技术研究院京唐技术中心, 北京 100043)

摘要: 热基镀锌超厚规格生产中, 频发折弯脱锌缺陷。通过扫描电子显微镜(SEM)分析脱锌产生的机理, 发现抑制层位置存在氧元素富集现象; 并根据 6σ 的方法筛选出产生脱锌的关键因子主要为炉压波动和热值波动。对关键因子深入分析, 借助计算机辅助系统 Fluent 软件, 模拟炉内快冷气体流场, 模拟结果显示调整快冷喷嘴角度和吸风口位置可改善炉压波动; 通过上述两点改善, 实现了辊室炉压从最低 0 Pa 提高至 100 Pa。针对热值波动范围 3 550~4 150 kcal N⁻¹ m⁻³ 的问题, 根据焦炉煤气热值测量值, 建立天然气的与焦炉煤气混合比的计算模型, 实现了焦炉煤气热值稳定至 (4 060±100) kcal N⁻¹ m⁻³。经以上措施有效解决了热基镀锌超厚规格带钢脱锌缺陷, 脱锌废品率由 0.285% 降低至 0.013%, 对其它卧式退火炉控制该缺陷具有借鉴意义。

关键词: 热基镀锌; 脱锌缺陷; 工艺参数; 产品质量

中图分类号: TG113.25

文献标识码: A

Analysis and control research of zinc slag of hot-base galvanizing

Zhang Fuming¹, Ren Zhichao^{1*}, Zhang Qiusheng¹, Jia Bo¹, Li Xin²

(1. Shougang Jingtang Iron & Steel Co. Ltd., Tangshan 063000, China; 2. Jingtang Technology Center Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China)

Abstract: In the production of hot base galvanized ultra-thick specifications, there are frequent bending and dezincification defects. The mechanism of dezincification was analyzed by scanning electron microscopy (SEM), and it was found that there was oxygen enrichment at the inhibiting layer. According to the method of 6σ , the key factors of dezincification are mainly furnace pressure fluctuation and calorific value fluctuation. Through in-depth analysis of key factors, the flow field of fast-cooling gas in the furnace was simulated with the help of computer aided system Fluent software. The simulation results showed that adjusting the Angle of the fast-cooling nozzle and the position of the suction can improve the pressure fluctuation of the furnace. Through the above two improvements, the furnace pressure of the roller chamber is increased from the lowest 0 to 100 Pa. Aiming at the calorific value fluctuation range of 3 550-4 150 kcal N⁻¹ m⁻³, the calculation model of the mixture ratio of natural gas and coke oven gas was established according to the measured calorific value of coke oven gas, and the calorific value of coke oven gas was stabilized to (4 060±100) kcal N⁻¹ m⁻³. Through the above measures, the dezincification defect of hot base ultra-thick zinc strip steel is effectively solved, and the dezincification waste rate is

收稿日期: 2024-12-10

修回日期: 2024-12-29

作者简介: 张富明(1989—), 硕士, 高级工程师, 研究方向为镀锌与退火炉专业技术, email: 1194823484@qq.com

通信作者: 任志超(1984—), 硕士, 工程师, 研究方向为冷轧技术与管理, email: rzc5930@163.com

引用信息: 张富明, 任志超, 张秋生, 等. 热基镀锌脱锌缺陷分析及控制研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 50-57.

Zhang Fuming, Ren Zhichao, Zhang Qiusheng, et al. Analysis and control research of zinc slag of hot-base galvanizing[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 50-57.

reduced from 0.285% to 0.013%, which has reference significance for other horizontal annealing furnaces to control the defect.

Keywords: hot-base galvanizing; defects of zinc slag; technical parameters; surface quality

热基镀锌产品主要用途有光伏支架、公路护栏、畜牧养殖料塔、建筑桁架等。某冷轧厂热基镀锌产线采用的改良的森吉米尔法生产锌铝镁产品,具有耐腐蚀性、高强度等一系列的优点^[1-4]。热基镀锌产线是独创的多模式连续铸轧生产线提供原料,生产规格厚度为0.8~6.0 mm,经过酸洗线处理后,再进行涂镀。热基镀锌产线采用的卧式退火炉,直燃段明火加热具有带钢快速升温、高热效率、产能大的优势^[5-6]。

热基镀锌超厚规格为国内生产,是首发产品,生产经验匮乏,可查阅的文献极少;但是随着市场拓宽,客户对产品质量的要求越来越高,带钢表面脱锌是质量的致命缺陷,一旦出现该缺陷直接判为废品^[7-10]。然而在生产实践中,频发折弯脱锌缺陷,为解决的此问题,本文从其形成的机理,分析产生原因,通过6 σ 的方法得出关键因子,针对关键因子进一步深入分析,探究改善措施,提高带钢表面质量。

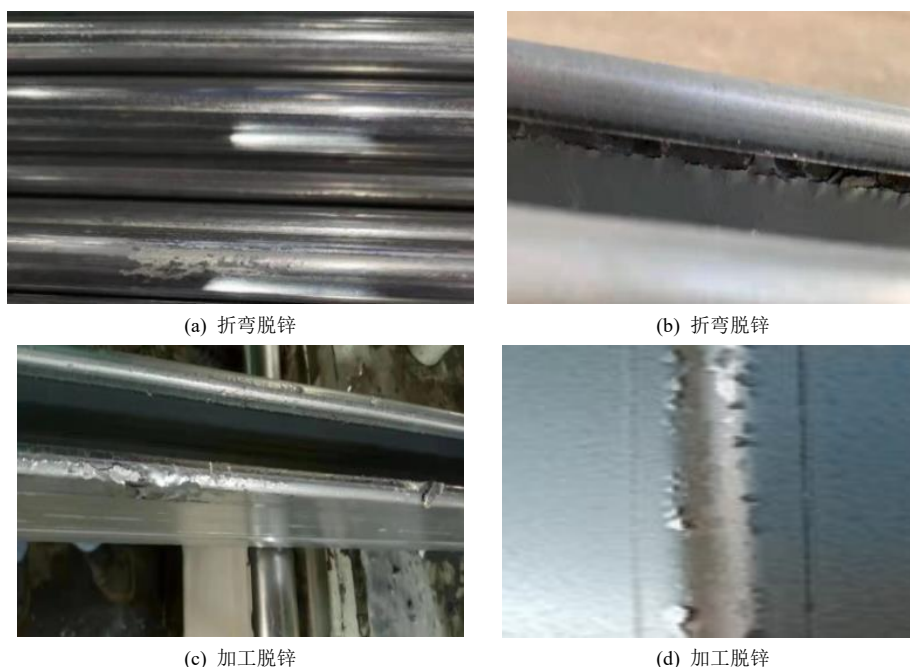


图 1 热基锌铝镁脱锌缺陷样品图片

Fig.1 Defect sample of hot-base Zn-Al-Mg dezincing

1 脱锌缺陷产生的机理分析

在对脱锌样进行分析时,首先对脱锌位置进行了扫描电子显微镜(SEM)的形貌分析^[11-15]。结果如下,脱锌表面存在氧元素富集现象,氧元素测量高达15.01%。

其次,在脱锌位置旁取未进行折弯的样品进行截面分析,结果表明其抑制层位置依然存在氧峰值富集现象。因此,根据实验结果可进一步确定由于带钢表面氧化,导致未形成良好的抑制层,从而引发脱锌缺陷。推断为炉区状态变化,在带钢表面形成一层氧化物,阻止了Fe₂Al₃抑制层的形成。

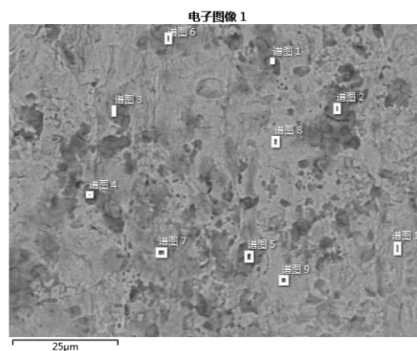


图 2 脱锌位置表面电镜(SEM)

Fig.2 Surface electron microscopy (SEM) at dezincing position

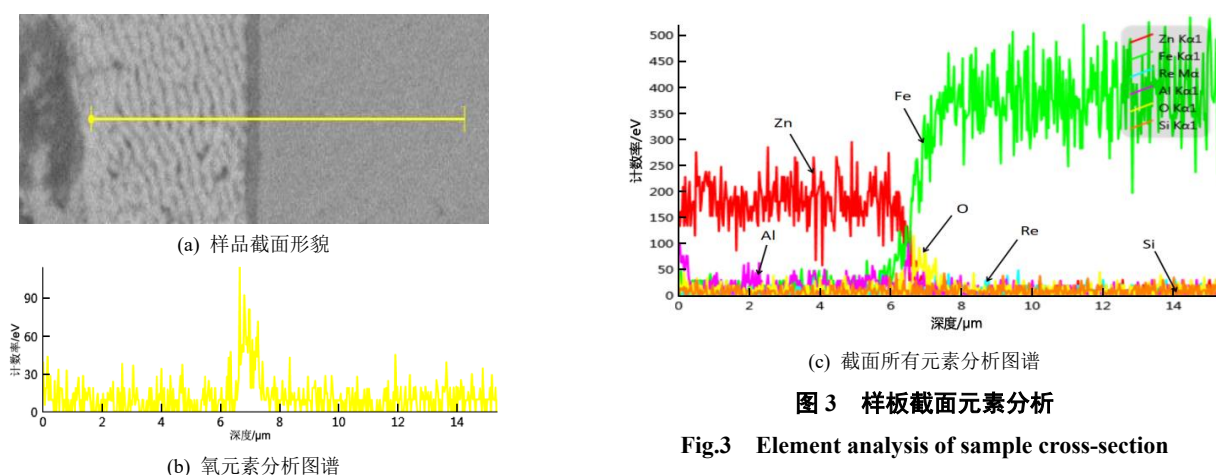


表1 脱锌表面各点元素含量

Tab.1 Content of elements at each point on the dezincing surface

| 谱图标签 | O | Mg | Al | Fe | Zn | 总量 |
|-------|-------|------|------|-------|------|--------|
| 谱图 1 | 23.28 | 1.45 | — | 73.82 | 1.45 | 100.00 |
| 谱图 2 | 29.25 | — | — | 65.93 | 4.81 | 100.00 |
| 谱图 3 | 6.24 | — | — | 93.76 | — | 100.00 |
| 谱图 4 | 10.98 | 2.26 | — | 81.49 | 5.28 | 100.00 |
| 谱图 5 | 16.42 | 1.79 | — | 77.58 | 4.21 | 100.00 |
| 谱图 6 | 15.80 | 1.27 | 2.24 | 78.05 | 2.64 | 100.00 |
| 谱图 7 | 9.31 | 1.65 | — | 84.55 | 4.49 | 100.00 |
| 谱图 8 | 10.97 | 1.25 | — | 84.34 | 3.44 | 100.00 |
| 谱图 9 | 12.92 | 1.63 | — | 82.32 | 3.14 | 100.00 |
| 谱图 10 | 3.07 | — | — | 94.79 | 2.14 | 100.00 |

2 脱锌缺陷关键因子的筛选及分析

运用统计学六西格玛的方法,针对脱锌并通过相应的原理和控制过程进行分析,统计前后生产24卷钢的工艺参数,对易产生波动的参数分别进行单

因子逻辑回归分析,进行了 P 值检验,表3据 $P < 0.05$ 的显著因子有两项。因此得出和脱锌有明显的相关性因子为热张辊室炉压波动低值和热值波动低值。为此对炉压波动和热值波动进行更深层的分析。

表2 工艺参数及脱锌情况

Tab.2 Process parameters and dezinc situation

| 卷序号 | 热值 $/(kcal \cdot N^{-1} \cdot m^{-3})$ | 均热露 点/ $^{\circ}C$ | 均热氢含 量/% | 均热氧含 量/% | 辊室炉压最低 值/Pa | 是否脱锌(0 不 脱锌/脱锌) |
|-----|---|-----------------------|-------------|----------------------|----------------|--------------------|
| 1 | 3 809.00 | -30.5 | 17.6 | 2.6×10^{-4} | 109 | 0 |
| 2 | 3 835.00 | -35.0 | 17.9 | 2.7×10^{-4} | 111 | 0 |
| 3 | 3 895.00 | -38.7 | 17.8 | 2.6×10^{-4} | 10 | 1 |
| 4 | 3 852.00 | -42.6 | 17.0 | 2.6×10^{-4} | 20 | 1 |
| 5 | 3 790.00 | -38.6 | 15.2 | 2.6×10^{-4} | 103 | 0 |
| 6 | 3 829.00 | -43.7 | 17.2 | 2.5×10^{-4} | 121 | 0 |
| 7 | 3 820.59 | -39.5 | 18.4 | 1.9×10^{-4} | 104 | 0 |
| 8 | 3 724.74 | -38.7 | 18.6 | 1.8×10^{-4} | 103 | 0 |

续表 2

| 卷序 号 | 热值 /(kcal·N ⁻¹ ·m ⁻³) | 均热露 点/°C | 均热氢含 量/% | 均热氧含 量/% | 辊室炉压最低 值/Pa | 是否脱锌（0 不 脱锌/脱锌） |
|---------|---|-------------|-------------|----------------------|----------------|--------------------|
| 9 | 3 702.84 | -37.8 | 18.6 | 1.7×10 ⁻⁴ | 106 | 0 |
| 10 | 3 768.16 | -37.8 | 18.6 | 1.7×10 ⁻⁴ | 122 | 0 |
| 11 | 3 819.93 | -38.5 | 18.1 | 1.9×10 ⁻⁴ | 126 | 0 |
| 12 | 3 792.11 | -37.9 | 18.2 | 2.0×10 ⁻⁴ | 123 | 0 |
| 13 | 3 826.65 | -37.8 | 18.3 | 2.0×10 ⁻⁴ | 45 | 1 |
| 14 | 3 811.46 | -38.1 | 17.9 | 2.2×10 ⁻⁴ | 35 | 1 |
| 15 | 3 600.09 | -41.2 | 13.6 | 1.7×10 ⁻⁴ | 102 | 1 |
| 16 | 3 541.37 | -41.1 | 13.6 | 1.7×10 ⁻⁴ | 112 | 1 |
| 17 | 3 542.47 | -41.0 | 13.6 | 1.7×10 ⁻⁴ | 54 | 1 |
| 18 | 3 806.00 | -37.4 | 17.8 | 2.0×10 ⁻⁴ | 124 | 0 |
| 19 | 3 785.00 | -38.7 | 17.9 | 1.8×10 ⁻⁴ | 50 | 1 |
| 20 | 3 820.00 | -38.8 | 18.3 | 1.7×10 ⁻⁴ | 108 | 0 |
| 21 | 3 693.00 | -37.8 | 19.1 | 1.7×10 ⁻⁴ | 107 | 0 |
| 22 | 3 717.00 | -37.9 | 19.3 | 1.8×10 ⁻⁴ | 116 | 0 |
| 23 | 3 485.00 | -37.1 | 19.1 | 1.8×10 ⁻⁴ | 45 | 1 |
| 24 | 3 558.00 | -36.5 | 19.1 | 1.7×10 ⁻⁴ | 61 | 1 |

表 3 样本 P 值

Tab.3 P value of the sample

| 项目 | 热值/(kcal·N ⁻¹ ·m ⁻³) | 均热露点/°C | 均热氢含量/% | 均热氧含量/% | 热张辊室炉压最低值/Pa |
|-----|---|---------|---------|-----------------------|--------------|
| P 值 | 0.047 | 0.275 | 0.198 | 7.82×10 ⁻⁵ | 0 |

2.1 炉压波动

热基镀锌退火炉工艺段依次为预热段、直燃段、均热段、快冷段、热张紧辊室、炉鼻子等；炉膛气体的运行方向与带钢运行相反，NH混合气由热

张紧辊室注入，经过快冷段、均热段、直燃段、预热段，最后经过炉区入口的烟道排出^[16-17]。炉压波动位置主要集中在如图4所示热张紧辊及快冷区域。

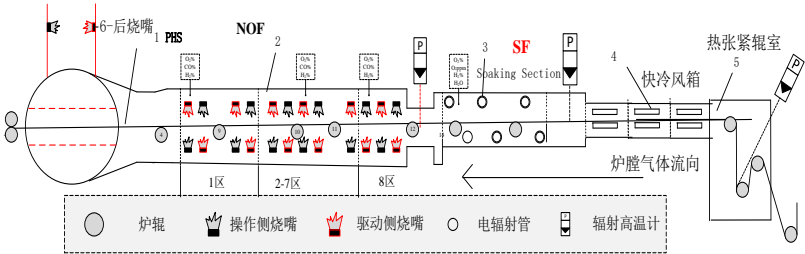


图 4 热基镀锌产线工艺布置图(卧炉)

Fig.4 Process layout of hot-base galvanizing production line

通过关键因子的筛选，炉压波动与脱锌具有很强的相关性。当热张紧辊室的炉压波动低于80 Pa时，存在脱锌的风险。炉压波动时，外界空气瞬间极速进入快冷负压区，直接喷到带钢上，氧化带钢，产生脱锌^[18]。为了解决热张紧辊室炉压波动问题，

其关键在于如何提高辊室炉压。
经过分析生产数据曲线，快冷风机转速变化时伴随着炉压波动，快冷风机转速与入锅温度为PID闭环控制。由于卧式炉短时间迅速加热，明火加热带钢主要靠辐射传热，带钢表面黑度不同，带钢吸

热速率不同, 导致带钢温度及入锅温度波动, 进而引发快冷风机转速波动, 风机转速波动时伴随着炉压波动。对标, 国内其他卧式直燃炉快冷风箱结构, 推断快冷风箱进吸风口的的位置对提升炉压存在优化空间。

对快冷区和热张紧辊室建模及Fluent分析, 运用Ansys fluent软件对快冷循环风系统进行流体力学数值模拟。首先建立流体模型, 工程案例简化模型选择建立快冷和辊室的上半部分建模。运用Mesh模块进行网格划分, 如图4所示; 然后进行边界条件的设定, 将吸风口的边界条件设定为18 m/s, 将进风口的速度设定11 m/s, 将流体介质选择氮氢混合气; 边界条件设定后, 进行模拟计算。结果在带钢的平面建立Plane, 得出带钢平面上的压力分布图(图5)。图5为模拟的原始状态, 辊室区域由于快冷从辊室吸风作用, 导致辊室炉压为0 Pa, 甚至负值。

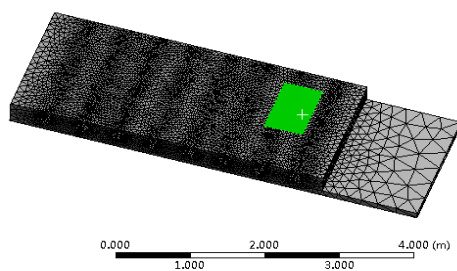


图5 快冷风箱简化模型的网格划分

Fig.5 Mesh of simplified model of fast air cooler

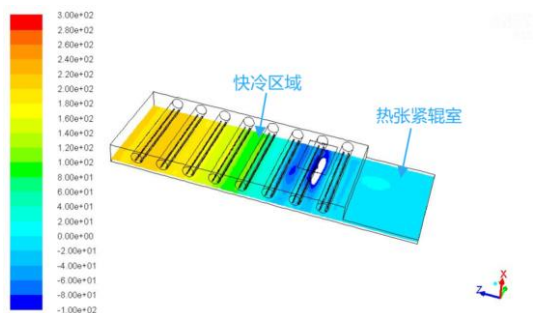


图6 原设计状态下辊室压力分布图

Fig.6 Pressure distribution diagram of the roller chamber in the original design state

为弥补辊室压力低问题, 模拟调整快冷喷嘴角度。修改喷嘴角度模型, 将喷嘴角度向辊室方向旋转30°, 然后进行网格划分、边界条件设定均和原始模型一致; 进行数值模拟, 结果显示调整喷嘴角度30°后, 对辊室压力具有改善作用。如图7所示, 辊室区域的压力, 由低压变为微正压50 Pa以上。

同样为了弥补热张紧辊室负压问题, 模拟调整

吸风口位置的炉压分布情况。将吸风口向前移动至中间位置, 边界条件与原始状态相同情况下。模拟结果显示向前移动吸风口的的位置, 对提高辊室炉压具有明显的促进作用, 如图8所示, 辊室区域达到正压120 Pa左右。

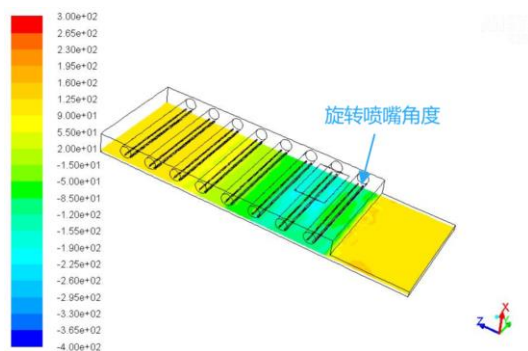


图7 调整喷嘴角度后辊室压力升高现象

Fig.7 Phenomenon of increased pressure of the roller chamber after adjusting the nozzle Angle

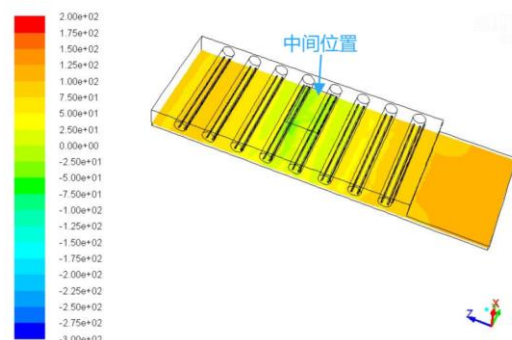


图8 吸风口移至中间位置的的压力分布图

Fig.8 Pressure distribution diagram with the middle position of suction tuyere

根据现场的位置, 把吸风口的的位置继续向前移动, 对其修改后的模型再次进行流场模拟, 如图9所示, 结果显示辊室的炉压明显增强至150 Pa。

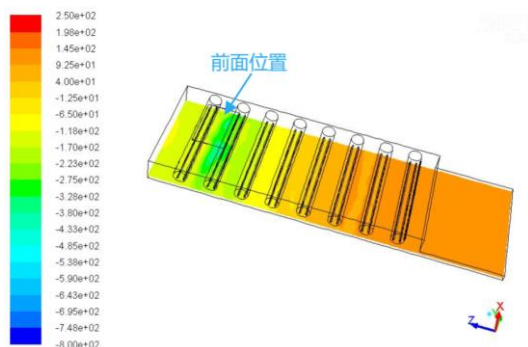


图9 吸风口移至入口位置的的压力分布图

Fig.9 Pressure distribution diagram with the position of inlet of suction tuyere

通过数值模拟分析,得出提高辊室炉压有两种途径:调整快冷喷梁的喷嘴角度;调整吸风口位置。模拟结果显示以上两种方式可以明显改善快冷和辊室区域的炉压现状。

2.2 热值波动

用立式炉生产时产品发生脱锌缺陷,国内外均认为是炉内含氧量异常所导致。在卧式炉生产实践过程当中,直燃段是明火加热,处于一个水蒸气微氧化的气氛当中。如果出现产品的脱锌缺陷,炉内残余的CO含量超标应为主因^[19-20]。在生产实践中,卧炉直燃段残余CO含量为1.5%以上,氧含量测量值为0.01%,无变化。直燃段要保证较强的还原性,残余的CO、H₂含量要达到厚规格锌铝镁的技术要求,对于厚规格热基锌铝镁生产,卧炉直燃段CO含量控制值应不低于1.5%。

热基锌铝镁产线燃气为焦炉煤气,由于受焦炉煤气的工艺条件限制,导致热值的稳定差,煤气热值不断下降,火焰刚性变差,燃烧后的气氛,已经不能满足较强的还原性,虽然氧含量没有检测到异常变化,但是残余的H₂、CO含量不断波动,残余CO含量降低至1.0%以下,此时氧含量无变化,一直为0.01%。还原性变弱,导致带钢表面在NOF段带钢被氧化,经过均热段,未完全还原成海绵状的铁,从而造成折弯脱锌缺陷。

经过现场调查分析及结合能源部测量的焦炉煤气的热值数据,测量的其波动情况如图9所示,波动范围为3 550~4 150 kcal·N⁻¹·m⁻³,推断热值波动导致烧嘴的燃烧状态发生变化,还原性气氛稳定性难以保证。热值稳定性问题,必须及时解决,否则将会给带钢的表面质量带来巨大的脱锌隐患。热值稳定可以有效解决直燃段由于燃烧系统产生的脱锌缺陷。

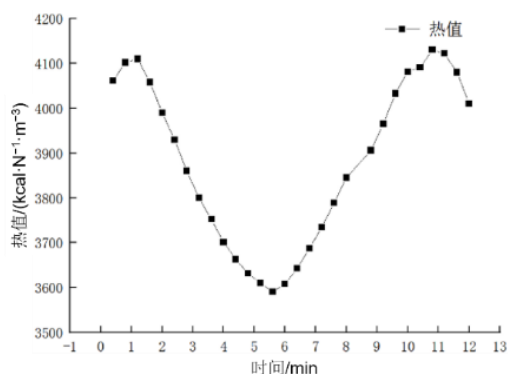


图 10 热值监测曲线

Fig.10 Calorific value detection curve for the energy sector

3 控制措施

针对热基镀锌产线在生产过程中的脱锌缺陷。主要从优化炉压和稳定煤气热值两方面进行重点分析及控制。

3.1 优化辊室炉压

Ansys Fluent数值模拟结果得出调整快冷风箱喷嘴角度和调整吸风口的位置可以有效的增强辊室炉压。利用检修时间对喷嘴角度进行调整,喷梁角度示向辊室方向旋转30°,其如图11所示。调整新增快冷风箱吸风口和进风口的位置,将吸风口的位置向前移动,进风口的位置向辊室方向移动,如图13所示。

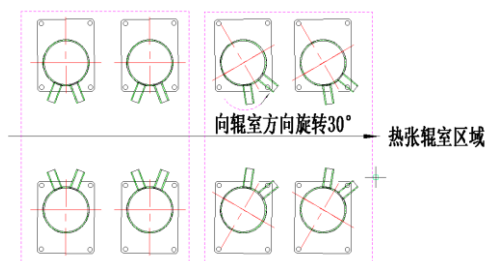


图 11 调整喷嘴角度示意图

Fig.11 Schematic diagram of adjusting nozzle angle

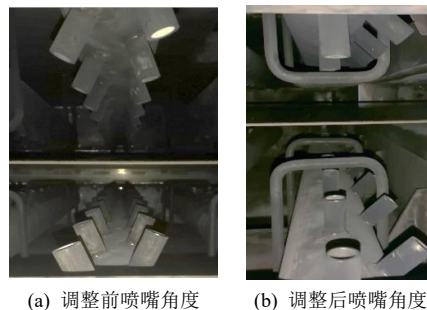


图 12 现场调整喷嘴角度实物图

Fig.12 Real picture of nozzle angle adjustment on site

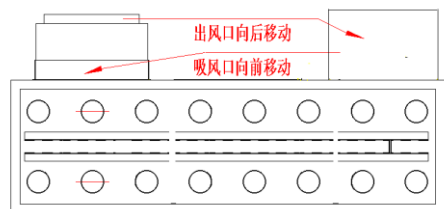


图 13 调整进吸风口位置图

Fig.13 Position diagram of adjusted intake and suction vents

经以上两方面优化,对每卷带钢的最低炉压进行记录,辊室炉压较之前有大幅改善,效果显著,如图14所示。从而有效解决了由于辊室炉压波动导致的脱锌问题。

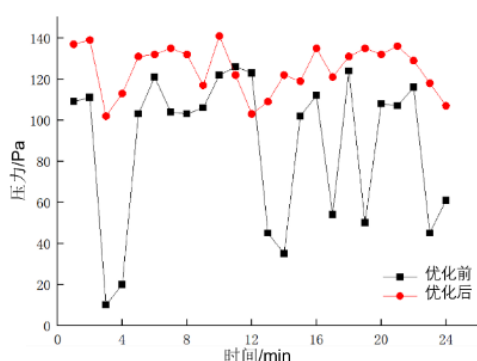


图 14 优化前后辊室最低炉压

Fig.14 Minimum furnace pressure in the roller chamber before and after optimization

3.2 建立天然气与焦炉煤气混合比模型

通过热值数据曲线分析,热值最难的控制点为总是偏低于下限值。为此,根据焦炉煤气热值测量值,建立天然气的与焦炉煤气混合比的计算模型,实现燃气热值稳定控制。

当退火炉直燃段的热值低于目标热值时(目标值为烧嘴的设计值 $4060 \text{ kcal} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$),天然气供气系统自动开启,向煤气管道中注入天然气气体,使退火炉直燃段的热值升高至目标热值。具体的计算方法如下:

热值仪检测值 LCV_0 低于目标值,甲烷气体系统启动,开始向焦炉煤气管道中注入甲烷气体,甲烷气体的流量计算如下所示:

$$\frac{L_{\text{CH}_4} \times F_1 + LCV_0 \times F_0}{F_1 + F_0} = L_{\text{set}} \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{F_0 \times (L_{\text{set}} - LCV_0)}{L_{\text{CH}_4} - L_{\text{set}}} \quad (2)$$

式中: F_0 为焦炉煤气的流量; F_1 为注入甲烷气体的流量; LCV_0 为焦炉煤气检测到的热值; LCV_1 为混合后热值仪检测到的热值; L_{set} 为热值的目标热值; L_{CH_4} 为甲烷气体的理论热值。

根据上式计算出的结果,向焦炉煤气管道中注入流量为 F_1 的甲烷气体,混合后检测到的热值 LCV_1 理论上与 L_{set} 相等,但实际会存在偏差,为此需对加入的甲烷气体流量进行修正。

修正公式为:

$$\alpha = \alpha_{\text{max}} - \frac{LCV_1 - L_{\text{min}}}{L_{\text{set}} - L_{\text{min}}} (\alpha_{\text{max}} - \alpha_{\text{min}}) \quad (3)$$

修正后甲烷气体的流量:

$$F_1 = \frac{F_0 \times (L_{\text{set}} - LCV_0)}{L_{\text{CH}_4} - L_{\text{set}}} \times$$

$$\left[\alpha_{\text{max}} - \frac{LCV_1 - L_{\text{min}}}{L_{\text{set}} - L_{\text{min}}} (\alpha_{\text{max}} - \alpha_{\text{min}}) \right] \quad (4)$$

式中: α 为其修正系数, α 设定上下限; α_{min} 为 α 的设定下限; α_{max} 为 α 的设定上限; L_{min} 为热值的要求下限; L_{set} 为目标热值; LCV_1 为混合后检测到的热值。

修正系数 α 的范围不宜过大,起到微调的作用,一般范围为1.0~1.05。根据如上所计算出的结果,对注入的焦炉煤气管道的甲烷气体进行修正,采用修正后的甲烷流量向焦炉煤气管道中注入甲烷气体,使得退火炉直燃段的热值升高至目标热值。

通过调燃气混合比,用模型计算出煤气和甲烷的流量优值,据此进行生产控制,实现了热值稳定控制,满足了烧嘴设计要求。

模型投用前煤气的波动范围为 $3550 \sim 4150 \text{ kcal} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,投用后热值的波动范围为 $(4060 \pm 100) \text{ kcal} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,投用前后的热值对比曲线如15所示。解决了焦炉煤气热值不稳定导致退火炉直燃段还原性气氛变差的问题,提高了带钢表面质量和带钢生产的效率,避免带钢在镀锌后出现漏镀或者脱锌缺陷。

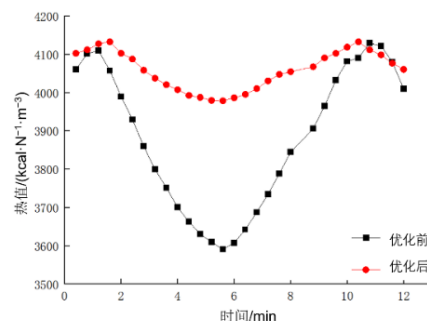


图 15 天然气与焦炉煤气混合比模型投用前后的热值对比

Fig.15 Comparison of the mixture ratio model of natural gas and coke oven gas before and after operation

4 结论

(1) 通过扫描电子显微镜 (SEM) 分析脱锌缺陷为带钢基板存在氧富集,未形成良好的 Fe_2Al_5 抑制层,导致锌层的粘附性变差。运用 6σ 的方法,分析锌层粘附性变差的关键因子主要为辊室炉压和热值波动。

(2) 根据Fluent数值模拟分析,旋转喷嘴角度 30° 、互换快冷吸风口的位置,可有效改善辊室炉压。实施后,辊室炉压从最低0 Pa提升至最低100 Pa以上。

(3) 根据焦炉煤气热值的测量值,建立天然气

的与焦炉煤气混合比的计算模型,减小热值波动,实现燃气热值稳定控制。优化后,煤气热值由 $3\,550\sim 4\,150\text{ kcal}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 稳定在 $(4\,060\pm 100)\text{ kcal}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(4) 通过以上措施有效的解决了热基镀锌产品带钢表面氧化造成的脱锌缺陷,为卧式直燃炉的工艺控制提供了借鉴意义。

参考文献

- [1] 弓俊杰. 热镀锌铝镁镀层板发展及河钢唐钢应用现状[J]. 河北冶金, 2020(12): 1-8.
- [2] 宋雅琼. 热基镀锌产品表面质量优化研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2017.
- [3] Peng S, Xie S K, Lu J T, et al. Surface characteristics and corrosion resistance of spangle on hot-dip galvanized coating[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 11(2): 726-728.
- [4] 李九龄. 带钢连续热镀锌[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
- [5] 孙乾. 冷轧镀锌退火炉内气氛研究[J]. 工业加热, 2024, 53(6): 32-34.
- [6] 范春磊. 邯钢改良森吉米尔法热镀锌机组脱锌原因分析及对策[J]. 金属材料及热处理, 2020(4): 38-40.
- [7] 李远鹏, 江社明, 张启富, 等. 高强度热镀锌双相钢的可镀性问题研究[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(4): 1-5.
- [8] Huang Geng. Analysis of stamping dezincification of DP590 alloyed hot dip galvanized dual phase steel[J]. Journal of Physics, 2022, 2390(1): 012015.
- [9] 张青. 无锌花热基镀锌折弯脱锌成因分析及控制[J]. 河北冶金, 2022(10): 39-44.
- [10] 李研, 崔阳, 徐海卫, 等. 双相钢热镀锌表面漏镀缺陷分析及对策[J]. 电镀与涂饰, 2013, 32(5): 32-34.
- [11] 许红. 新型锌铝镁合金镀层工艺及其耐蚀机理的研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [12] 李娇娇. 钢基表面状态对热镀锌层组织的影响[D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- [13] Khaidarov T. B. Development of a dezincing method for iron-containing wastes by heat treatment in a reducing atmosphere[J]. Refractories and Industrial Ceramics. 2022, 62(6): 706-710.
- [14] 郑艳坤. 热镀锌 DP980 脱锌原因分析及措施[J]. 金属世界, 2023(4): 6-11.
- [15] 颜飞, 陈莹莹, 邓照军, 等. 氧元素对热镀锌双相钢锌层附着力的影响[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 36(5): 370-374.
- [16] 谢天华. 改良森吉米尔法退火炉中带钢的氧化研究[J]. 工业加热, 2015, 44(1): 39-40, 51.
- [17] 姜嘉玮. 从表面处理形式分析冷轧热镀锌板冲压脱锌原因及解决方案[J]. 山西冶金, 2023, 46(9): 51-53.
- [18] 郭强. 镀锡基板生产连续退火炉压力波动原因分析及治理[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(7): 529-532.
- [19] 马骏. 热基镀锌线改良森吉米尔法加热炉 NOF 段控制方法的改进[J]. 山西冶金, 2016, 39(2): 59-63.
- [20] 熊自柳. 热基热镀锌板锌层粘附性控制机理[J]. 热加工工艺, 2016, 45(14): 110-113, 116.

上接 41 页

- fatigue behavior[J]. Materials Science and Engineering Technology, 2018, 49(3): 264-272.
- [14] 赵起越, 贾志浩, 赵晋斌, 等. 阳极氧化 6061 铝合金在工业海洋大气环境长周期暴晒时的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(6): 1249-1262.
- [15] 拓晓颖. 腐蚀环境下铝合金失效行为的预测[D]. 宁夏: 宁夏大学, 2020.
- [16] Chen Y, Kong F, Yang J, et al. Damage behavior of 2198-T8 Al-Li alloy with different corrosion fatigue modes[J]. International Journal of Fatigue, 2022(156): 0142-1123.
- [17] Guo T, Chen Y, Cao R, et al. Cleavage cracking of ductile-metal substrates induced by brittle coating fracture[J]. Acta Materialia, 2018(152): 77-85.
- [18] Patrlarca L, Foletti S, Beretta S. A comparison of DIC-based techniques to measure crack closure in LCF[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018(98): 230-243.
- [19] FintováS, Kuběna I, Trško L, et al. Fatigue behavior of AW7075 aluminum alloy in ultra-high cycle fatigue region[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020(774): 138922.
- [20] Bahmani A, Lotfpour M, Taghizadeh M, et al. Corrosion behavior of severely plastically deformed Mg and Mg alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(10): 2607-2648.