

6-1-2020

Fluid Flow, Heat and Mass Transfer in Hot Dip Galvanizing Bath

Shouqun Sun

1. College of Mechanical Engineering, Shanghai 200093, China;;

Zhongshuang Wei

1. College of Mechanical Engineering, Shanghai 200093, China;;2. Shanghai Baosight Software Co., Ltd., Shanghai 201900, China;

Huayang Lu

2. Shanghai Baosight Software Co., Ltd., Shanghai 201900, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Fluid Flow, Heat and Mass Transfer in Hot Dip Galvanizing Bath

Abstract

Abstract: Zinc dross is produced inevitably as a metallurgical phenomenon of continuous hot galvanizing process, and the quality of galvanizing is affected. The phenomenon is closely related to the physical field of molten zinc and more surface defects are easily produced if the zinc dross removal process is improperly handled. *By constructing a three-dimensional viscous standard $k-\epsilon$ two equation turbulence model, the fluid flow, heat and mass transfer law and the distribution regularities of flow vortex were obtained under the specific initial conditions and boundary conditions.* The simulation results of the observation points are basically in agreement with the experimental results, and the accuracy of the calculation method is proved. *The theoretical calculation can be used to predict the distribution of zinc dross and operation risk zone of zinc dross removal. The research results provide theoretical basis and technical support for the optimization of hot dip process and dross removal design of dross removal robot.*

Keywords

hot dip galvanizing, fluid flow, heat transfer, mass transfer, surface defect, dross removing

Recommended Citation

Sun Shouqun, Wei Zhongshuang, Lu Huayang. Fluid Flow, Heat and Mass Transfer in Hot Dip Galvanizing Bath[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(7): 1538-1545.

热镀锌锅内锌液流动、传热及组分运输特性分析

孙首群¹, 韦忠爽^{1,2}, 卢华阳²

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海宝信软件股份有限公司, 上海 201900)

摘要: 锌渣的产生是连续热镀锌过程中一种必然的冶金行为, 影响着镀锌质量。渣体的产生与锌液物理场特性密切相关, 除渣不当会引起更多的表面缺陷。通过构建三维粘性标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型, 根据具体的初始条件与边界条件, 求解得到锌锅流域内流动、传热及组分运输规律, 确定漩涡分布特性, 观察点的仿真计算结果与实验结果基本吻合, 证明了计算方法的准确性。通过理论计算可以有效预测锌锅内锌渣的分布规律以及除渣作业危险区, 研究结果为热镀工艺的优化及除渣机器人的除渣设计提供理论依据和技术支持。

关键词: 热镀锌; 流动; 传热; 组分运输; 表面缺陷; 除渣

中图分类号: TB24

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 07-1538-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201707019

Fluid Flow, Heat and Mass Transfer in Hot Dip Galvanizing Bath

Sun Shouqun¹, Wei Zhongshuang^{1,2}, Lu Huayang²

(1. College of Mechanical Engineering, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Baosight Software Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: Zinc dross is produced inevitably as a metallurgical phenomenon of continuous hot galvanizing process, and the quality of galvanizing is affected. The phenomenon is closely related to the physical field of molten zinc and more surface defects are easily produced if the zinc dross removal process is improperly handled. By constructing a three-dimensional viscous standard $k-\varepsilon$ two equation turbulence model, the fluid flow, heat and mass transfer law and the distribution regularities of flow vortex were obtained under the specific initial conditions and boundary conditions. The simulation results of the observation points are basically in agreement with the experimental results, and the accuracy of the calculation method is proved. The theoretical calculation can be used to predict the distribution of zinc dross and operation risk zone of zinc dross removal. The research results provide theoretical basis and technical support for the optimization of hot dip process and dross removal design of dross removal robot.

Keywords: hot dip galvanizing; fluid flow; heat transfer; mass transfer; surface defect; dross removing

引言

热镀锌锅是带钢热镀锌的关键性设备, 其内的操作工艺对生产的镀锌产品质量产生直接的影响。

整个镀锌过程中涉及到锌液的流动、传热等规律, 这些规律可以用流体力学理论知识来解释。

目前这方面的研究成果较多, 本文主要综述了锌锅中数学模型的建立及计算过程, 并对锌锅中物理场分布的模拟结果等进行了介绍, 为实际生产提供参考。赖焕新等^[1], 通过实验获得的锌锅边界传热情况, 推算得到锌锅计算的边界条件, 并比较研究了带钢的宽度与运行速度对锌液流动的影响。朱



收稿日期: 2015-08-03 修回日期: 2015-12-11;
基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAK16B04);
作者简介: 孙首群(1964-), 男, 河南, 博士, 副教授, 研究方向为机电装备热分析; 韦忠爽(1989-), 男, 山东, 硕士, 研究方向为智能控制; 卢华阳(1981-), 男, 广西, 硕士, 研究方向为智能控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1538 •

路等^[2]计算得到锌锅加热器中洛仑兹力及焦耳热的分布,并将其作为加热器区域流场计算时动量及能量的源项,从而实现了加热器中电磁场和流场耦合的锌锅全场计算。朱翊淳^[3]分析了锌锅温度场流场预测了连续热镀锌过程中锌锅内部锌渣生成的位置,并通过提高锌锭的入锅温度来减少锌锅中锌渣的生成量。张岩^[4]解决了锌层厚度控制中系统高阶非线性问题,能有效克服不确定系统参数的扰动,并能有效处理系统时变大滞后问题。富丰晶等^[5]为解决热镀锌过程中常出现的边部过镀锌缺陷,利用数值模拟方法对热镀锌气刀射流喷吹过程进行仿真研究,分析了挡板厚度对带钢边部压力场的影响,计算挡板厚度和边部角度对镀层厚度的作用关系;任玉森等^[6]对锌锅内锌渣的电磁分离技术做了深入研究,为热镀锌生产线的除渣工艺设计提供了理论依据。Mandal^[7]使用 0.2% 铝含量的锌锅来延缓锌铁化合物在镀锌过程中的形成。Dash^[8]采用标准 $k-\varepsilon$ 模型对热镀锌锅内锌液的流动状况进行模拟计算,给出了热镀锌锅的速度场分布规律的矢量图。Ajersch^[9]对锌锅在不同工艺参数情况下的物理场特性进行了分析,这些工艺参数包括锌锅大小及内部构件位置,加热器位置及锌锭熔化方式等。

渣体的产生与锌液物理场密切相关,精确掌握热镀锌锅内锌液物理场的动态特性并实时高效除渣是保障热镀锌板质量的关键。利用数值模拟方法可直观地研究锌锅中熔体运动及锌渣分布情况,“智慧钢铁 2015”后钢铁企业开始采用除渣机器人。通过对锌液物理场分析可以为机器人的除渣设计提供重要的理论依据。

1 热镀锌锅模型几何结构

热镀锌锅的三维模型如图 1 所示,其主要结构包括:带钢、电磁加热器、沉没辊、稳定辊(2 个)、棍子支架及加锌锭。

工作原理:在热镀锌生产过程中带钢以高于 460 °C 的温度由炉鼻进入熔融锌液,绕过沉没辊、穿过两个稳定辊离开锌液进入气刀系统,经过气刀吹锌留下均匀的镀锌层,两侧电磁加热器为锌锅提

供热源。在连续热镀锌过程中需要及时融化锌锭,以保持锌液液面高度。

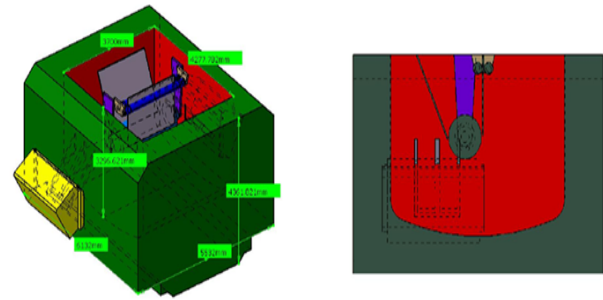


图 1 热镀锌锅模型

Fig. 1 Hot galvanizing pot model

2 数学模型

锌锅内的熔体是温度场、流场和浓度场相互耦合的复杂体系,流动、传热及组分运输规律由连续性方程、动量方程、能量方程、组分运输方程和湍流双方程描述:

$$\text{连续方程: } \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\text{动量方程:}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot [2(\mu + \mu_T) \dot{\gamma}(\mathbf{u})] - \rho g \beta_T (T - T_0) - \rho g \beta_{Al} (c_{Al} - c_{Al_0})$$

$$\text{能量方程:}$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot [(\lambda + \lambda_T) \nabla T] + S_{en}$$

$$\text{组分运输方程:}$$

$$\rho \frac{\partial c_i}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = \nabla \cdot [(D + D_T) \cdot \nabla c_i] + Q_i$$

$$\text{湍流 } k-\varepsilon \text{ 双方程:}$$

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla k \right) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P + G - \rho \varepsilon$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon \right) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] +$$

$$C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

式中: ∇ 为散度; $\mathbf{u}$ 为速度矢量; ρ 为熔体密度; t 为时间; p 为压力; μ 为熔体粘性系数; μ_T 为湍流粘性系数; $\dot{\gamma}$ 为应变率张量; g 为重力加速度; T 为温度; β_T 为热膨胀系数; β_{Al} 为熔体中 Al 的膨胀

系数 T_0 为起始温度; c_{Al0} 为熔体中 Al 的起始质量分数; c_{Al} 为 t 时刻对应的 Al 的质量分数; c_p 为比热; λ 和 λ_T 为热导率和湍流热导率; Q_i 为组分源项; $c_i (i=1, 2)$ 为瞬时质量分数, 分别可代表 Al 和 Fe; S_{en} 为能量源项; D 为分子扩散系数; D_T 为湍流扩散系数; P 是剪切项; G 是湍流产生的浮升力作用。

3 求解锌锅物理场边界条件

(1) 入口和出口:

感应加热器对锌液的加热, 简化为常热流加热热源来处理, 根据感应加热器入口和出口的流速和流量平衡, 采用质量流量为进出口边界条件:

$$M=P/(C_1 \Delta T)$$

式中: C_1 为液态锌比热容; P 为感应加热器的功率; ΔT 为感应加热器入口和出口锌液的温度差; 在本次研究中 $\Delta T=4$ K。

(2) 温度的边界条件:

温度的边界条件由温度壁面函数确定:

$$q_w = h_T(T - T_w); \quad h_T = \frac{\rho C_p C_\mu^{1/4} k_w^{1/2}}{T^+}。$$

式中: T_w 是壁面温度; T^+ 是 y^+ 的函数, 在锌锅的壁面处需要再考虑热流量的耗散, 壁面上的热流量为: $q_w = h_c(T_w - T_a)$, 其中: h_c 是热转换系数; T_a 是环境温度。

所以和壁面函数耦合之后如下:

$$q_w = \frac{h_T h_c}{h_T + h_c} (T - T_a)$$

锌锭的熔化简化为常热流吸热面来处理, 选用热流密度温度边界:

$$q_{Zn} = [GC_1(T_{熔} - T_0) + GL + GC_0(T_1 - T_0)]/A_0$$

式中: G 加入锌锅中的锌锭重量/时; L 为锌锭熔化的潜热; C_0 为固态锌比热容; C_1 为液态锌比热容; T_0 为锌锭初始温度; T_1 为锌液温度; $T_{熔}$ 为锌熔点; A_0 为浸入锌液的锌锭表面积。

带钢以较高温度持续进入锌锅, 经过 2 s 后出锌锅, 之间存在温度差, 选用热流密度边界:

$$q_{Fe} = C_2 \cdot m \cdot \Delta T / A$$

式中: C_2 为钢铁的比热; m 为钢带镀锌的生产率; ΔT 为钢带进出锌锅的温度差; A 为钢带的表面积。经过实际测量 $\Delta T=3.6$ K。

(3) 运动边界条件:

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}_{inductor} \text{ 位于 } \Gamma_{inductor}$$

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$$

$$[2(\mu + \mu_T) \dot{\gamma} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_w) \cdot \mathbf{n} - p \mathbf{n}] = \tau_w$$

位于 Γ_{strip} 和 Γ_{wall} ;

在非滑移边界上: $\mathbf{u}_w = 0$;

在滑移边界上: $\mathbf{u}_w = \mathbf{u}_{strip}$ 。

在 $k-\varepsilon$ 模型下, 壁面上使用了壁面函数, 壁面函数将切应力和边界层中的切向速度联系起来:

$$\tau_w = - \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_w^{1/2}}{U^+} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_w)$$

$$\text{其中: } U^+ = \begin{cases} y^+, y^+ < y_c^+ \\ \frac{1}{\kappa} \ln(E y^+), y^+ \geq y_c^+ \end{cases}; \quad y^+ = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_w^{1/2} y}{\mu}。$$

壁面的湍流耗散率: $\varepsilon_w = (C_\mu^{3/4} \kappa_w^{3/2}) / \kappa y$ 。

$\mathbf{u}_w$ 是壁面速度; y 是计算边界和壁面的距离;

κ 是卡曼常数 ($\kappa=0.41$); E 是粗糙度参数 ($E=0.9$), 垂直壁面的法向速度 $v=0$ 。

(4) 组分浓度边界条件:

带钢对 Al 的消耗, 假设发生在带钢进入锌液 0.1 s 后发生, 根据单面镀层重量及镀层中 Al 的含量, 写出带钢消耗 Al 的质量流量:

$$(q_{Al})_{steel} = -5 m_d \cdot c_d \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

带钢刚入锌锅时, Fe 元素的溶解速度大, 随着镀锌的进行, 带钢表面出现隔离层, Fe 元素溶解速度变小, 带钢的 Fe 溶解的质量流量按经验近似计算:

$$(q_{Fe})_{steel} = 0.75 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

当锌锭加入锌锅中时, 锌锭先吸收热量, 一段时间开始融化, 锌锭中 Al 开始进入锌锅中, 锌锭中 Al 质量流量为:

$$(q_{Al})_{ingot} = \begin{cases} 0 & t < t_1 \\ q_{Al}^* \left(1 - \frac{(t - t_2)^2}{(t_2 - t_1)^2} \right) & t_1 < t < t_2 \end{cases}$$

其中: t_1 锌锭开始融化时间 t_2 锭完全熔化时间、 q_{Al}^* 为在 t_1 时刻锌锭中 Al 质量流量。 2, 根据图表的相关数据计算出具体的边界信息。

表 1 锌液属性(460 °C)
Tab. 1 Zinc liquid properties(460 °C)

比热容 J/kg·K	混合液锌 密度/kg·m ⁻³	热传导率 W(m·k) ⁻¹	层流粘性系 /kg·(ms) ⁻¹	组分分子扩散 系数/m ² ·s ⁻¹	锌液热膨胀 系数 β_T	铝浓度膨胀 系 β_{Al}	动力黏度/Pa·s
49.99	6 513	51.8	0.004	1.9×10^{-10}	1.38×10^{-4}	1.66×10^{-2}	3.083×10^{-3}

表 2 初始条件与属性
Tab. 2 Initial condition and properties

带钢厚度 T/mm	带钢宽度 W/mm	镀层质量 g/g·m ⁻²	机组速度 v/m·min ⁻¹	带钢密度 ρ /g·m ⁻²	镀锌层质量 g ₂ /kg·s ⁻¹	熔化锌锭质 量 G/kg	锌液面散热表面 积 S ₁ /m ²
0.622	1 421.7	77.9/78.2	120	7 850	0.432 2	3 953.79	17.2
锌锅四周散 热表面积 S ₂ /m ²	锌锅底部散 热表面积 S ₃ /m ²	感应加热功率 (Q _电)/kW	锌锭初始温 度 T ₅ /K	锌液初始温 度 T ₁ /K	环境温度 T ₂ /K	锌锅外壁温 度 T ₃ /K	锌锅底部温度 T ₄ /K
67.10	26.28	639.733 5	315.15	733.14	319.10	360.18	364.18

4 数值模拟结果与分析

4.1 模拟结果的验证

采用热浸镀锌专用红外测温仪测温元件在感兴趣的 8 处温度观察点进行实时监测, 所测的温度如图 2 所示。

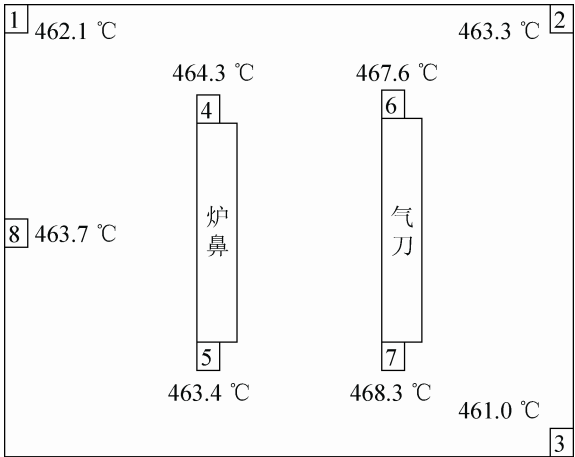


图 2 实测温度
Fig. 2 Measured temperature

热镀锌锌锅内锌液的表面温度模拟计算结果如图 3 所示, 图中, 锌液的表面温度整体变化不同, 变化范围在 460 °C~475 °C 之间。观察点的温度仿真结果与实验结果基本上吻合, 误差控制在 1%,

从而验证了理论计算结果的正确性及可靠性。因而, 可以通过理论计算结果, 有效预测锌锅内锌渣的分布规律以及除渣作业危险区。

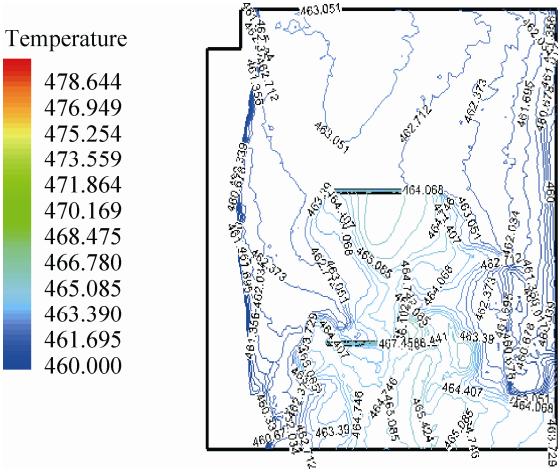


图 3 锌液表面温度场仿真计算结果
Fig. 3 Simulation results of Surface temperature field

4.2 锌渣产生的理论分析

锌渣是锌液中溶解的 Al, Fe 与 Zn 之间在高温下形成金属间化合物。锌渣分为浮渣, 底渣以及悬浮渣。底渣主要结构为 Fe-Zn 系二元金属间化合物, 以 ζ 相(FeZn₁₃)和 δ 相(FeZn₇)为主, 浮渣的主要结构为 Fe-Al 系金属间化合物, 以 η 相(Fe₂Al₅),

Zn 此二元化合物中有一定的溶解度, 浮渣的实际结构应为 $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_x$ 的三元金属间化合物。

锌液中的 Al 是影响锌渣结构、化学成分和形态的最重要因素。由 Fe-Zn-Al 在富锌角相图(如图 4 所示)可知。Al 的溶解度从 0 增加到 0.14 wt% 时, 锌浴中的锌渣相接 l , ζ , δ , η 的顺序依次出现, 最终形成 $\eta\text{-Fe}_2\text{Al}_5$ 相。

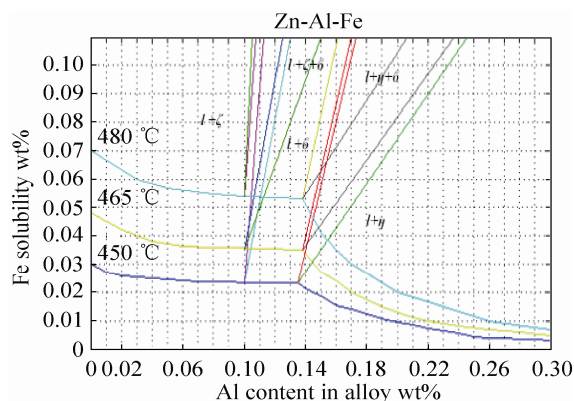


图 4 Fe-Zn-Al 在富锌角的相图
Fig. 4 Phase diagram of Fe-Zn-Al in Zinc rich Angle

在对小于 0.3 wt %Al 含量的锌液中锌渣生成的规律研究后发现, 当 Al 含量小于 0.12 wt% 时, 易形成 δ 相, 溶解度曲线中有明显的拐点, 在拐点两侧会形成不同的中间相。Al 含量高于 0.14 wt% 时, 锌液中易形成 $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_x$ 浮渣。当 Al 的浓度低于拐点处浓度时, 生成 δ 相底渣。当 Al 的浓度(<0.1 wt%), 会形成另外一种中间相 ζ , 由于锌锅中 Al 的含量一般是超过这个范围的, 所以锌渣中 ζ 相的含量很少。

4.3 计算结果分析

数值计算结果显示: 连续热镀锌生产过程中锌锅内锌液的流动规律为整体流动比较平缓。

感应加热器区域附近, 锌液的流动主要受温度影响。带钢的运动是锌锅流场主要驱动力。图 5 给出了锌锅中对称面上的钢带区域速度场矢量图, 在带钢附近, 由于带钢及沉没辊的运动, 锌液运动相对剧烈, 并且带钢速度越大在此区域流体运动越激烈。带钢 V 区域和稳定辊附近形成漩涡, V 形

区中紧贴带钢漩涡为逆时针方向, 很容易将浮渣卷附到带钢表面。沉浸辊上方的涡为顺时针方向, 漩涡带走的浮渣到达锌锅顶面, 除渣速度应平缓, 这样可以减少锌渣卷入到沉浸辊上。带钢出口处 3 个涡, 在理论上, 锌锅顶面附近的涡是最危险的涡, 浮渣会卷入漩涡继而依附到带钢上, 但实际上位于带钢出锅口上方的气刀吹锌工艺环节产生的气流, 使得带钢出口处锌液面基本无浮渣, 此区域无需除渣, 即使这一区域生成锌渣。带钢左侧表面锌液会向带钢方向缓慢运动, 如果锌锅顶面浮渣清除不及时, 顶面附近的锌液流动会把浮渣卷到带钢上, 要减少或避免浮渣依附到带钢表面, 应该及时将浮渣除走, 且除渣动作需平缓。在带钢进入端, 左侧表面锌液会随着带钢的传动缓慢的移向带钢。加入锌锭的位置, 锌锭熔化吸收大量热, 造成区域内温度降低, 出现了明显的自然对流现象, 部分区域的流动由自然对流作用主导, 但自然对流的区域离带钢较远, 对带钢附近区域的熔体运动没有明显影响。在沉浸辊下方并接近锌锅底部存在较大的低速区域, 这一区域容易形成底渣, 锌渣在低速流动区域停留的时间越长, 黏附在带钢上的可能性就越大。

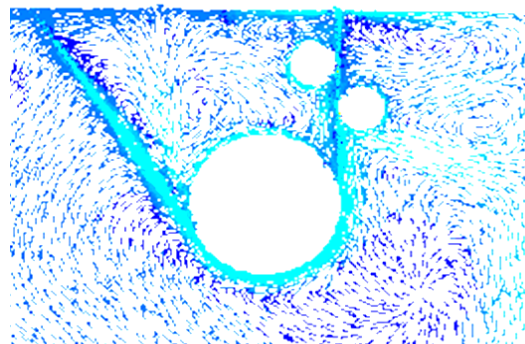
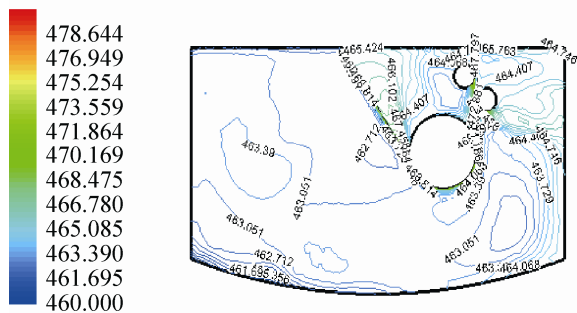


图 5 锌液速度矢量图(X=0)
Fig. 5 Velocity vector(X=0)

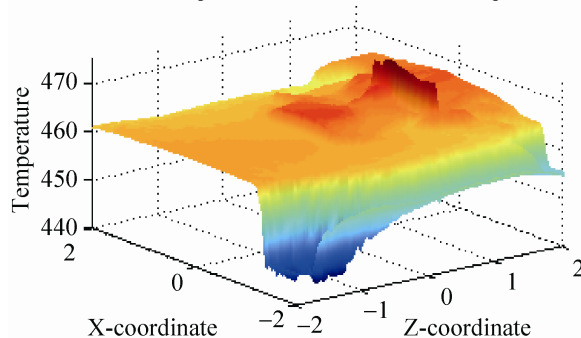
锌锅的热支出项主要为: 锌液表面对流散热、锌锅表面辐射散热量和熔化锌锭所消耗热量, 钢带带入锌锅的热量为主要热收入项, 通过热平衡计算得知锌锅的热收入项与热支出项相差不大, 锌锅内热量基本保持收支平衡。在锌锅感应加热器和带带钢入锌液的热量是锌锅内的主要热源。图 6(a)(x=0)

由于锌锅的热收支相对平衡, 锌锅中整体温度基本保持稳定。带钢经过的区域温度较高如图 6(b)($Y=1.5$), 锌锅壁散热对温度场的影响不明显。由于锌液表面有热损失, 相比锌液内温度锌液表面温度有所降低。锌锅中加入锌锭的位置出现了较大的温度场波动。在锌锭熔化过程中, 熔锌锭表面附近区域相对于其他区域温度较低, 液体密度相对较大, 锌熔化后直接流向锌锭下方区域, 导致该区域熔体温度较低。同时, 随着锌液流动, 表面较冷的锌液会沿着锌锅壁流动分布, 但对带钢附近区域的锌液温度没有明显影响。

Temperature

(a) 温度等值图($X=0$)

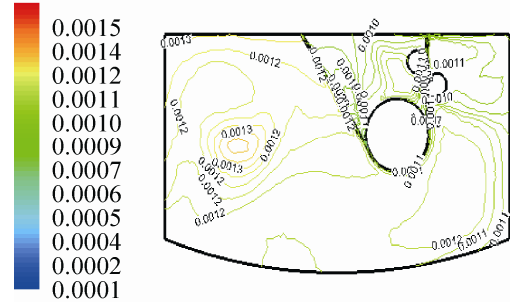
Surface temperature field before removal process

(b) 锌液表面温度场($Y=1.5$)图 6 锌液温度场分布($X=0, Y=1.5$)
Fig. 6 Temperature field($X=0, Y=1.5$)

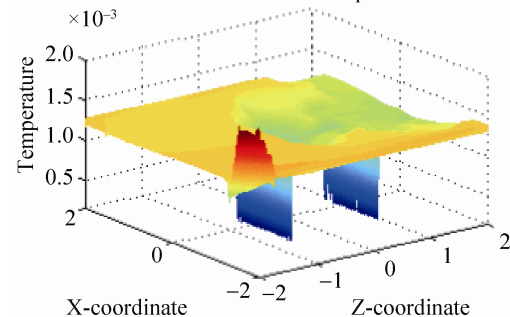
如图 7 所示, 锌液中 Al 的来源主要是锌锭中的 Al 块的熔化。由于 Al 在镀锌层中不断消耗, 带钢区域 Al 的浓度较低, 2 个稳定辊后方得不到锌锭中 Al 的及时补偿, Al 浓度相对较低。在存在锌锭截面的区域内 Al 的浓度较高, 分布呈现较大梯度。

锌液中 Fe 的来源主要是带钢钢基的溶解和 Fe 质锌锅的浸蚀。锌锅中整体 Fe 的浓度要大于初始值, 且一直处于饱和状态。如图 8 所示, 由于一直有带钢上的 Fe 进入锌锅内, 特别是带钢经过的区域, Fe 的浓度明显较高。

al-1

(a) Al 浓度等值图($X=0$)

Aluminum concentration of surface before removal process

(b) 锌液表面 Al 浓度分布($Y=1.5$)图 7 Al 浓度分布图($X=0, Y=1.5$)Fig. 7 Aluminum concentration field($X=0, Y=1.5$)图 8 Fe 浓度分布图($X=0$)Fig. 8 Fe concentration field($X=0$)

在连续镀锌生产中, Fe 的不断溶解、Al 的加入、锌锅内各处温度场的不均匀等客观存在的原因, 使得锌渣的产生成为一种必然的冶金行为。结

合锌液表面 Al, Fe 浓度等值图可知锌锭熔化区域容易产生 η 相, 此区域内浮渣比较多, 是除渣作业的重点区域。在带钢区域容易生成 δ 相, 此区域底渣比较多, 底渣的去除作业需要镀锌生产线停运时才能进行。

表面的锌渣积聚过多会带来大量的表面缺陷, 因此应及时除渣, 但表面覆盖的锌渣的减少会增加锌液表面散热, 改变表面锌液表面的热传导系数 (如图 9), 从而加剧浮渣快速生成, 除渣的同时会影响铝浓度分布, 降低了铝的整体浓度, 使铝浓度分布更加均匀, 增加了生成底渣的可能性。

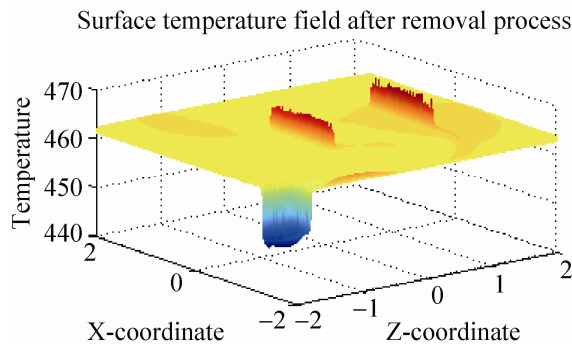


图 9 除渣后表面温度场分布

Fig. 9 Surface temperature field after removal process

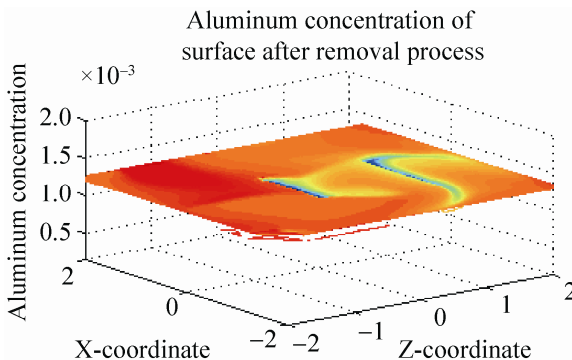


图 10 除渣后表面铝浓度场分布

Fig. 10 Aluminum concentration of surface after removal process

从图 11 除渣频率与渣体量的实测数据可以看出: 除渣频率的增加会引起更多渣体的产生, 因此除渣频率不宜过于频繁, 但必须将浮渣覆盖范围控制在离带钢 50 cm 之外, 才能最大程度地减少浮渣带来的缺陷。

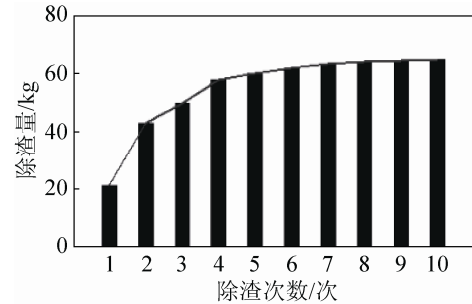


图 11 除渣频率与渣体产生量的实测数据

Fig. 11 Measured data of dross removing frequency and dross quantity

图 12 采用机器人除渣前后锌渣缺陷的实测数据, 1-6 月为采用人工除渣时锌渣缺陷情况, 产生总量为 516 t, 7-12 月为采用机器人除渣时锌渣缺陷情况, 产生总量为 285 t, 相比减少了 44.7%, 数据表明采用除渣机器人除渣相比人工除更能有效降低锌渣缺陷。

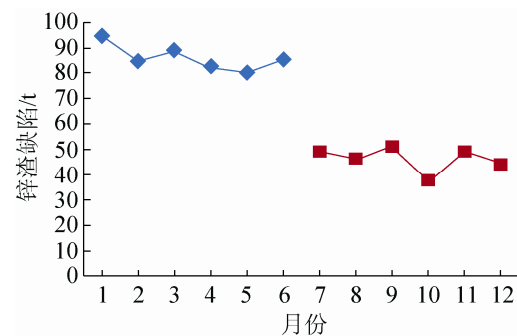


图 12 采用机器人除渣前后锌渣缺陷的实测数据

Fig. 12 Measured data of dross defect before and after using dross removing robot

5 结论

通过对机器人除渣前锌锅内锌液流动、传热和组分运输规律进行数值计算, 有效的预测渣体产生的位置以及除渣作业危险区。计算结果为指导除渣作业提供了重要理论依据, 对提高除渣效率和镀锌层质量有重要意义。模拟了除渣环节锌锅内物理场变化, 得到了锌锅内物理场的变化规律, 此次研究对存在除渣动作的锌锅内流体计算具有指导意义。通过对比采用除渣机器人前后锌渣缺陷产生情况, 说明采用除渣机器人除渣相比人工除更能有效降低锌渣缺陷。

参考文献:

- [1] 赖焕新, 朱路, 唐成龙. 热镀锌锅中的流动与传热数值研究 [J]. 热科学与技术, 2015, 14(1): 33-35. (Lai Huanxin, Zhu Lu, Tang Chenglong. Numerical investigation on flow and heat transfer in hot dip galvanizing zinc pot [J]. Journal of Thermal Science and Technology (S1671-8097), 2015, 14(1): 33-35.)
- [2] 朱路, 唐成龙, 赖焕新. 热镀锌锅的电磁-流体耦合计算 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2014, 40(4): 530-538. (Zhu Lu, Tang Chenglong, Lai Huanxin. Calculation of the coupled electromagnetic and flow fields in a hot dip galvanizing bath [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition) (S1006-3080), 2014, 40(4): 530-538.)
- [3] 朱翊淳, 李健. 锌锅内锌渣形成的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2014, 43(2): 199-201. (Zhu Yichun, Li Jian. Numerical simulation of dross formation inside a zinc pot [J]. Hot Working Technology (S1001-3814), 2014, 43(2): 199-201.)
- [4] 张岩, 邵富群, 吴鲲鹏, 等. 基于无模型自适应控制的锌层厚度预估模型 [J]. 系统仿真学报, 2013, 27(6): 1060-1064. (Zhang Yan, Shao Fuqun, Wu Kunkui, et al. Coating weight predictive model based on model-free adaptive control [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2013, 27(6): 1060-1064.)
- [5] 富聿晶, 张红梅, 李培兴, 等. 热镀锌过程挡板对镀层均匀性影响的模拟研究 [J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(4): 70-74. (Fu Yujing, Zhang Hongmei, Li Peixing, et al. Computational studies on coating uniformity influenced by baffle in hot dip galvanizing process. Materials Science and Technology (S1005-0299), 2013, 27(6): 1060-1064.)
- [6] 任玉森, 沈建国, 张宏伟, 等. 热镀锌液中锌渣的电磁分离 [J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(7): 51-54. (Ren Yusen, Shen Jianguo, Zhang Hongwei, et al. Electromagnetic separation of zinc dross in hot dip galvanizing melt using [J]. Journal of Iron and Steel Research (S1001-0963), 2008, 20(7): 51-54.)
- [7] Mandal S K Das, R Balasubramaniam, S P Mehrotra. Evolution of micro-structures of galvanized and galvanized coating formed in 0.2 wt% aluminium-zinc bath [J]. Materials Science and Technology (S0267-0836), 2011, 27(8): 120-126.
- [8] Dash S K, Dutta M, Rajesh N. Use of flow barriers to eliminate vortex in the flow field generated in a continuous galvanizing bath [J]. ISIJ International (S0915-1559), 2005, 45(7): 1059-1065.
- [9] Ajersch F, Ilinca F, Hétu J F, et al. Numerical simulation of the rate of dross formation in continuous galvanizing baths [J]. Iron and Steel Technology (S1547-0423), 2006, 3(8): 93-101.
- [18] Tedesco J W, Ross C A, McGill P B, et al. Numerical analysis of high strain rate concrete direct tension tests [J]. Computer and structure (S0045-7949), 1991, 40(2): 313-327.
- [19] Tedesco J W, Ross C A, Brunair R M. Numerical analysis of dynamic split cylinder tests [J]. Computer and structure (S0045-7949), 1989, 32(3/4): 609-624.
- [20] Cai M, Kaiser P K, Suorineni F, et al. A study on the dynamic behavior of the Meuse/Haute-Marne argillite [J]. Physics and Chemistry of the Earth (S1474-7065), 2007, 32(8/14): 907-916.
- [21] Schuler H, Maythofer C, Thoma K. Spall experiments for the measurement of the tensile strength and fracture energy of concrete at high strain rate [J]. International Journal of Impact Engineering (S1025-2495), 2006, 32(10): 1636-1650.
- [22] Gálvez Díaz-Rubio F, Rodríguez Pérez J, Sánchez Gálvez V. The spalling of long bars as a reliable method of measuring the dynamic tensile strength of ceramics [J]. International Journal of Impact Engineering (S1025-2495), 2002, 27(2): 161-177.
- [23] Wu H J, Zhang Q M, Huang F L, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete [J]. International Journal of Impact Engineering (S1025-2495), 2005, 32(1/4): 605-617.
- [24] 刘智光. 混凝土破坏过程细观数值模拟与动态力学特性机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012. (Liu Z G. Research on fracture simulation and dynamic behavior of concrete [D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2012.)
- [25] Hao Y, Hao H, Li Z X. Influence of end friction confinement on impact tests of concrete material at high strain rate [J]. International Journal of Impact Engineering (S1025-2495), 2013, 60(60): 82-106.

(上接第 1537 页)