

工业生产条件下连续热镀锌锅中锌渣扩散的数值模拟

冒飞飞¹⁾, 董安平¹⁾✉, 疏达¹⁾, 王俊^{1 2)}, 孙宝德^{1 2)}

1) 上海市先进高温材料及精密成形重点实验室(上海交通大学), 上海 200240

2) 上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240

✉ 通信作者, E-mail: apdong@sjtu.edu.cn

摘 要 基于欧拉-拉格朗日方法的离散相模型, 针对锌液体外循环系统下连续热镀锌锅中三种不同类型的锌渣, 利用数值模拟的方法计算锌锅中锌渣的浓度差分布. 分析锌渣扩散得到了锌渣在带钢表面及锌锅中的运动轨迹和分布规律. 结果表明: 锌渣在带钢上的沉积率随着锌渣粒度的减小而升高; 由于锌渣密度的差异, 当锌渣直径小于 $80\ \mu\text{m}$ 时, 沉积率从高到低依次为悬浮渣、面渣和底渣. 面渣在带钢出口后侧区域的平均停留时间最长, 在该位置设置抽锌管将有利于面渣的去除; 在 V 形区内侧区域带钢上的悬浮渣质量浓度最高, 对带钢影响最大; 底渣主要运动区域为锌锅底部, 基本不会黏附于带钢表面, 对带钢质量影响最小.

关键词 热浸镀锌; 锌渣; 扩散; 除渣; 数值模拟

分类号 TG155.5

Numerical simulation of zinc dross diffusion in a continuous hot dip galvanized zinc pot under the industrial production condition

MAO Fei-fei¹⁾, DONG An-ping¹⁾✉, SHU Da¹⁾, WANG Jun^{1 2)}, SUN Bao-de^{1 2)}

1) Shanghai Key Lab of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2) The State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

✉ Corresponding author, E-mail: apdong@sjtu.edu.cn

ABSTRACT Based on the discrete phase model of the Euler-Lagrange equation, the concentration fields of three different types of zinc dross under a circulating purification system were calculated by using the numerical simulation method. The result shows that the deposition rate increases with the decrease of zinc dross size. When the zinc dross size is smaller than $80\ \mu\text{m}$, the order of deposition rate from high to low is suspending dross, top dross, and bottom dross. The average residence time of the top dross in the back area of the strip exit is the longest, and it will be beneficial to the removal of the top dross to install a pumping tube in this area. On the inner part of the V-shaped zone, the mass concentration of the suspending dross is the highest, and it has the biggest influence on the surface quality of steel strips. The main travel area of the bottom dross is close to the bottom of the zinc pot, and the bottom dross cannot adhere to the strip surface and it has minimal impact on the surface quality of steel strips.

KEY WORDS hot dip galvanizing; zinc dross; diffusion; dross removal; numerical simulation

近年来, 汽车用高品质热镀锌钢板成为我国钢铁企业开发的主要方向. 例如, 宝钢、武钢、鞍钢等钢铁

企业已经把汽车板尤其是高强度钢板及其热镀锌产品作为重点研发产品^[1-2]. 汽车板热镀锌过程中产生的

锌渣是影响镀锌板表面质量的最重要因素^[3], 锌渣在镀锌过程中很容易被镀锌钢板黏附, 从而形成锌渣缺陷. 控制锌渣的形成对提高热镀锌钢板的表面质量尤为重要^[4].

国内外学者关于热镀锌的研究大多数集中于锌锅中锌液流场和温度场. 为了更好地认识锌液的流动状态对锌渣去除的影响, 陈海瑞等^[5]对不同工况下锌锅内流动与传热进行了数值模拟研究. 朱翊淳^[6]对普通锌锅(无体外锌液净化循环系统)内的锌渣分布进行研究, 尝试通过添加挡板的方式减少锌渣在带钢上的附着. 赖焕新等^[7]提到锌渣的运动轨迹是受到其物理性质的影响, 运动轨迹的变化将对带钢镀层质量产生影响, 但并没有给出具体的影响规律. 因此, 研究锌渣的不同物性对带钢附着的影响显得非常必要.

董安平^[8]尝试将电磁净化分离技术应用到热镀锌锅中锌渣的去除, 通过抽取锌锅内的锌液至外加电磁净化流槽中, 经体外循环净化后的锌液再经回锌管重新流回锌锅内, 达到降低锌锅内锌渣浓度的目的. 由于抽锌管、回锌管及锌液泵的安置, 导致锌锅的流场、温度场和锌渣浓度场均发生变化, 特别是锌渣浓度场的变化可能会为钢板表面质量带来较大的影响. 因此, 研究体外循环系统下锌渣在带钢上的浓度分布及锌渣在锌锅内的扩散显得很有必要.

本文通过 Ansys Fluent 对锌锅内锌渣的扩散和运动规律进行数值模拟, 采用基于欧拉-拉格朗日方法的离散相模型(discrete phase model, DPM), 模拟流场中的离散相, 可以对锌渣颗粒运动轨迹进行跟踪. 假设体外循环系统净化效率 0% 的情况下, 分析通过回锌管的锌渣颗粒的扩散, 并且给出不同锌渣颗粒在带钢上的沉积规律及在在锌锅内的扩散轨迹, 从而为合理制定体外电磁循环净化分离锌渣的方案提供依据.

1 物理和数值计算方法

1.1 物理模型

根据某钢厂在役锌锅尺寸建立如图 1 模型(电磁净化装置不是本文分析重点, 故进行简化处理), 其几何尺寸为 7.12 m × 3.64 m × 2.50 m, 其中抽锌管与回锌管直径为 0.1 m. 坐标原点位于锌液表面最右侧中心位置 A 点.

1.2 离散相模型

假设锌渣为球形颗粒, 锌渣颗粒在 Lagrangian 坐标系下模拟离散相并弥散在连续相锌液中. 根据作用在锌渣颗粒上平衡力, 可以得到锌渣颗粒在 Lagrangian 坐标系下的运动方程(颗粒惯性 = 作用在颗粒上的各种力), 如式(1)所示.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho) / \rho_p + F_x \quad (1)$$

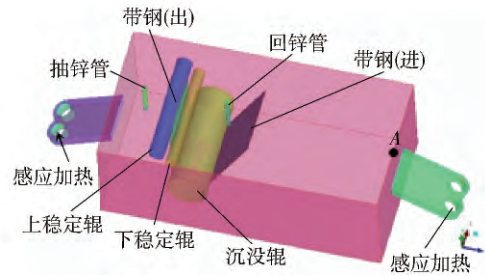


图1 锌锅物理模型

Fig.1 Physical model of the zinc pot

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (2)$$

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d(u - u_p)}{dt} \quad (3)$$

式中: u 是连续相速度; u_p 是颗粒速度; μ 是流体的分子黏性系数; g_x 为 x 方向的重力加速度; ρ 和 ρ_p 分别是流体与颗粒的密度; F_x 是 x 方向的其他作用力, 这些“其他”作用力中最重要的是附加质量力, 是为了使颗粒周围流体加速而引起的附加作用力; D_p 是颗粒直径; Re 是相对雷诺数; C_D 为曳力系数; α_1 、 α_2 和 α_3 是由 Re 确定的系数^[9], 表达式如下:

$$Re = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu} \quad (4)$$

$$C_D = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{Re} + \frac{\alpha_3}{Re^2} \quad (5)$$

这里采用随机轨道模型来计算锌液湍流流动对锌渣运动轨迹的影响. 该模型假定锌渣和锌液湍流之间的相互影响等同于很多小漩涡的干扰过程. 同时假定每个漩涡上速度的脉动分量满足正态分布. 对于 $k-\varepsilon$ 模型计算的流动, 各点的湍动能是已知的, 根据各向同性假设, 则有

$$u' = \xi \sqrt{u'^2} = \xi \sqrt{2k/3} \quad (6)$$

式中 u' 为流体脉动速度, ξ 为正态分布的随机数, $\sqrt{u'^2}$ 为当地速度脉动的均方根值, k 为湍流动能. 通过以上各式, 即可求出锌渣颗粒在各个方向上的瞬时速度和随机轨道位置.

2 边界条件

2.1 壁面条件

锌锅四周及底部按照壁面处理, 为无滑移边界条件, 锌渣颗粒与锌锅壁及带钢碰撞类型为 trap, 抽锌管与回锌管设为 escape 类型. 带钢设为移动边界, 稳定辊及沉没辊设为旋转边界. 锌渣的初始体积分数为 0.12%. 本实验工况的带钢速度为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 带钢宽度为 1800 mm, 带钢进锅温度为 465°C , 抽锌管和回锌管的质量流量为 $10 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$.

2.2 物性参数

采用闭合取样装置在锌锅 V 形区的表面、中间和底部取锌液,待凝固后利用锌的蒸汽压比较低特性,在高温真空条件下实现锌渣与纯锌的分离,分离后的锌渣利用 PPMS-9T 型物性测量系统(physical property measurement system,PPMS)测量锌渣的物性参数,如表 1 所示。

2.3 锌渣颗粒

图 2(a) 为在锌锅中间位置取样的锌液经凝固后的金相组织,图中深灰色的颗粒即为锌渣颗粒。采用闭合取样装置在锌锅 V 形区的表面、中间和底部取样,凝固后进行金相制样观察,每个位置在 100 倍下分

别选取 10 个视场,采用金相分析软件 DT2000 进行锌渣粒度分析,锌渣尺寸分布如图 2(b) 所示。

表 1 材料物性参数

Table 1 Thermo-physical properties used in this calculation

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热传导系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	动力黏度/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
锌液	6513	499.9	51.8	3.08×10^{-3}
面渣	4200	500	60	—
悬浮渣	6500	505	60	—
底渣	7250	512	60	—

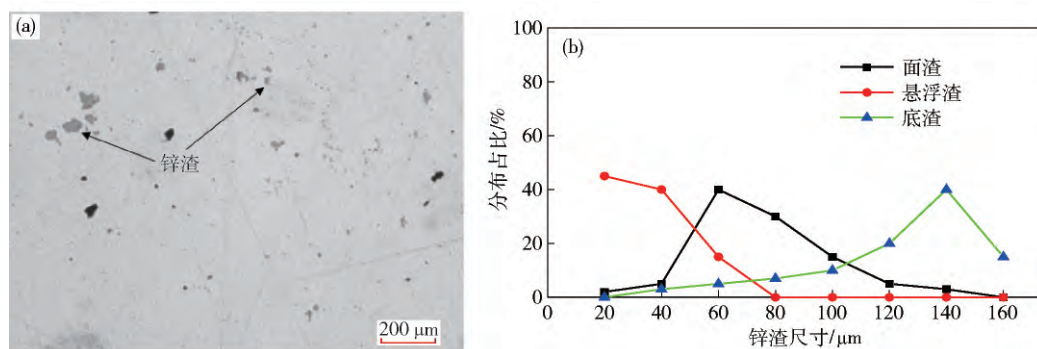


图 2 锌渣金相组织及尺寸分布。(a) 锌渣金相;(b) 锌渣尺寸分布

Fig. 2 Zinc dross and its size distribution: (a) zinc dross microstructure; (b) zinc dross size distribution

根据锌渣颗粒分布,进行了 Rosin-Rammler 分布拟合,该拟合假定锌渣颗粒直径与大于此直径的颗粒的质量分数 Y_d 之间存在如式(7)所示的指数关系^[10]:

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \quad (7)$$

式中 \bar{d} 为 $Y_d = e^{-1} \approx 0.368$ 时颗粒直径, d 为锌渣粒径, n 为分布指数。得到如表 2 所示的锌渣粒径分布参数。配合分布指数 n ,将最小粒径、平均粒径和最大粒径全部用于数值模拟。

表 2 Rosin-Rammler 粒径分布参数

Table 2 Dross distribution parameters by the Rosin-Rammler equation

锌渣	质量流率/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	分布指数	最小粒径/m	平均粒径/m	最大粒径/m
面渣	2.150×10^{-3}	3.09	1.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}	1.35×10^{-4}
悬浮渣	3.333×10^{-3}	1.75	5.0×10^{-6}	2.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}
底渣	3.172×10^{-3}	4.95	2.2×10^{-5}	1.2×10^{-4}	1.6×10^{-4}

3 数值模拟结果及讨论

3.1 锌渣沉积规律

图 3 与图 4 为 V 形区内侧带钢(进)与带钢(出)上的锌渣质量浓度。进口带钢中锌渣质量浓度从大到小依次为悬浮渣、面渣和底渣,其中面渣与悬浮渣均在带钢中下部有较多的聚集,该位置对应着回锌管流出的锌液对带钢的冲刷部位;底渣密度大,在经回锌管后会随锌液向下运动,故底渣在带钢的最下部边缘位置聚集较多,并且该位置的底渣极易被沉没辊碾压,造成带钢表面的点状压痕。出口带钢上锌渣质量浓度从

大到小依次为悬浮渣、面渣和底渣,其中面渣在带钢上半部有较多的聚集,悬浮渣在带钢上分布较均匀,底渣在带钢上基本没有聚集。

图 5 为带钢上锌渣质量浓度与锌渣尺寸的关系。锌渣越小,其在带钢上的质量浓度越高,即沉积率越高。锌渣在带钢表面的质量浓度最高的尺寸范围分别是:面渣为 30 ~ 70 μm;悬浮渣为 0 ~ 30 μm;底渣为 70 ~ 100 μm。根据董安平^[8]的研究,当锌渣尺寸超过 20 μm,锌渣经过体外电磁净化装置的去除效率可以达到 90% 以上。因此,当锌渣粒径小于 80 μm 时,锌渣的沉积率从大到小为:悬浮渣、面渣和底渣。在考虑所有

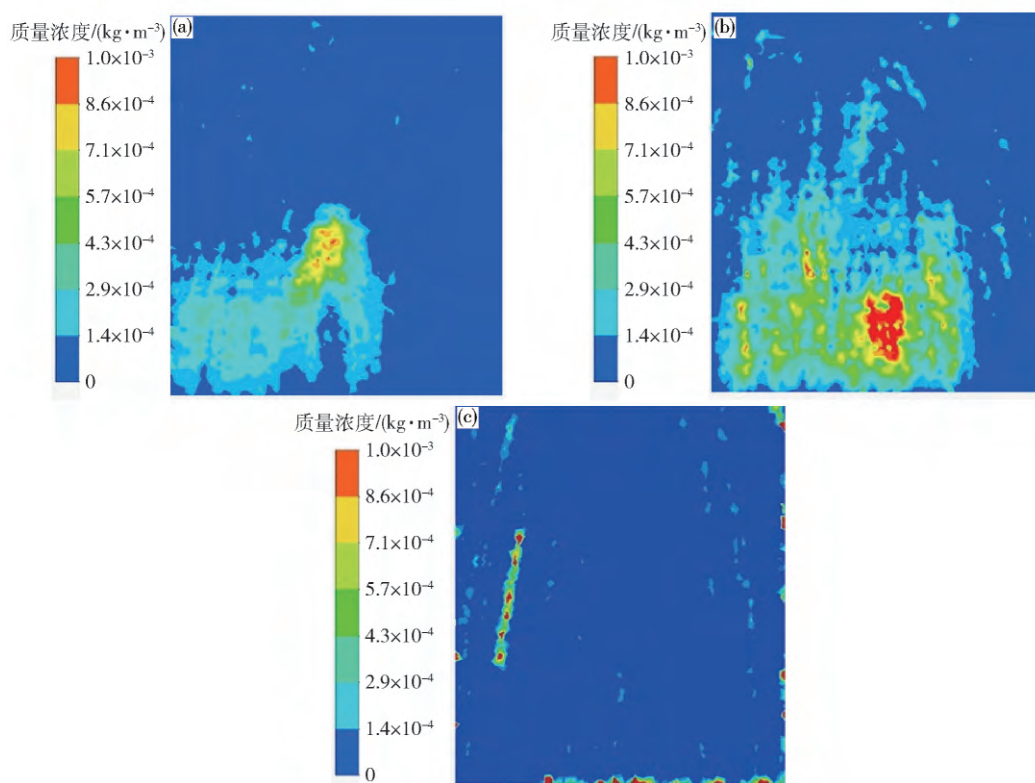


图3 带钢(进)表面的锌渣质量浓度分布。(a)面渣;(b)悬浮渣;(c)底渣

Fig. 3 Zinc dross concentrations on the steel strip (going in): (a) top dross; (b) suspending dross; (c) bottom dross

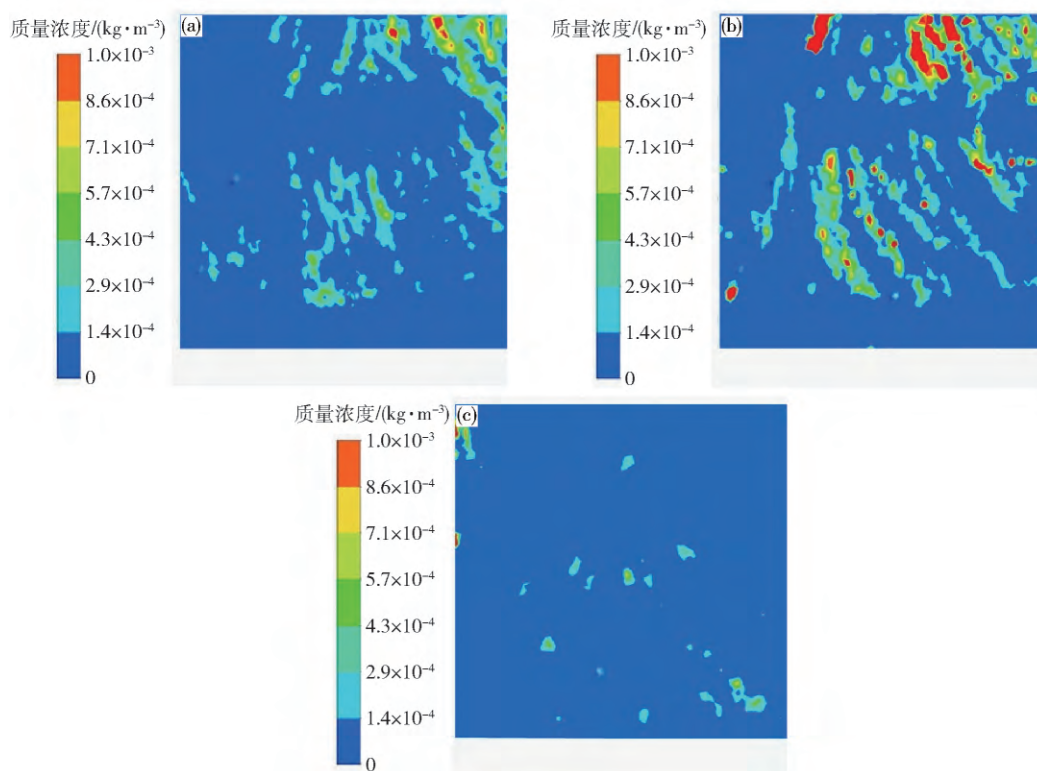


图4 带钢(出)表面的锌渣质量浓度分布。(a)面渣;(b)悬浮渣;(c)底渣

Fig. 4 Zinc dross concentrations on the steel strip (going out): (a) top dross; (b) suspending dross; (c) bottom dross

尺寸锌渣的情况下,面渣会略大于悬浮渣 $0.00049 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,说明面渣中存在较多的大粒径锌渣。

3.2 锌渣分布及运动规律

图6为面渣、悬浮渣和底渣从回锌管流出后的运

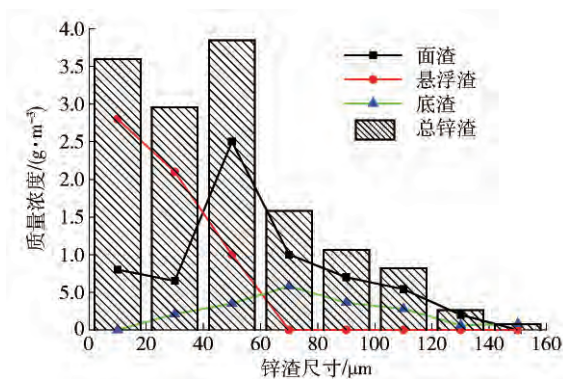


图5 带钢上锌渣质量浓度与锌渣尺寸的关系

Fig. 5 Relationship between the mass concentration of zinc dross in steel strips and the zinc dross size

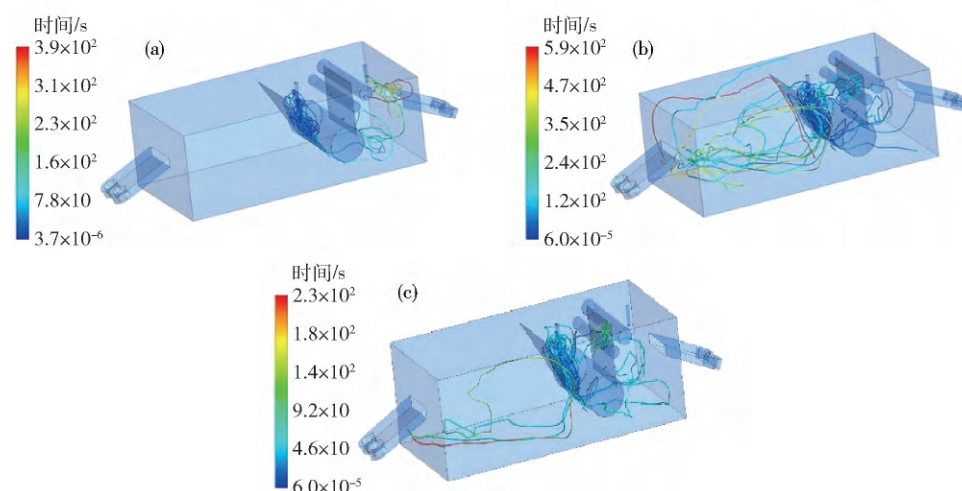


图6 锌渣运动轨迹与平均停留时间的关系: (a) 面渣运动轨迹; (b) 悬浮渣运动轨迹; (c) 底渣运动轨迹

Fig. 6 Relationship between dross motion trail and residence time: (a) top dross motion trail; (b) suspending dross motion trail; (c) bottom dross motion trail

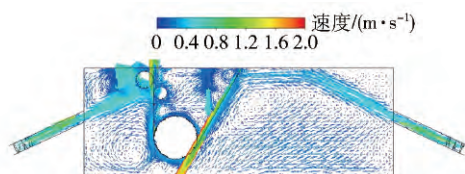


图7 YZ 对称面速度矢量图

Fig. 7 Velocity vector in the YZ symmetry plane

4 结论

(1) 锌渣粒径越小,其在带钢上的沉积率越高。在粒径小于 $80\text{ }\mu\text{m}$ 的锌渣中,沉积率从大到小依次为悬浮渣、面渣和底渣。

(2) 面渣在带钢出口后侧的平均停留时间最长,该位置放置抽锌管将有利于面渣的去除。悬浮渣主要运动区域为带钢进口前侧,其运动轨迹与锌液流动的涡流一致;在 V 形区内侧悬浮渣在带钢上的质量浓度最高,其对带钢表面质量影响最大。底渣主要贴近锌锅底部运动,基本不会黏附于带钢,对带钢影响最小。

动轨迹及锌渣的平均停留时间。面渣最终运动至锌锅表面且在带钢出口后侧的平均停留时间最长,即面渣在带钢背面聚集将会增加,这也解释了在带钢 V 形区内侧悬浮渣浓度高于面渣,但带钢正反面面渣的浓度却略高于悬浮渣的情况,因此该区域放置抽锌管可以通过体外循环装置有效净化面渣;悬浮渣在 V 形区会有较短的停留,大部分时间在带钢进口前侧运动,其运动轨迹遵循图 7 中锌液流动的涡流流动;而底渣则大部分在锌锅下半部运动,驻留时间最长的是带钢进口前侧贴近锅底的位置,该位置的底渣对带钢基本不会造成影响。

参 考 文 献

- [1] Wang L, Zhang P J, Lu J X. Development and application of automobile steel sheet produced at Baoshan Iron and Steel. *Spec Steel*, 2003, 24(1): 55
(王利, 张丕军, 陆匠心. 宝钢汽车板的开发及应用. 特殊钢, 2003, 24(1): 55)
- [2] Zhang L Y, Zuo L, Li J, et al. Development of cold rolled and zinc coated steel sheet for auto. *Spec Steel*, 2004, 25(6): 1
(张理扬, 左良, 李俊, 等. 冷轧和镀锌汽车板的发展. 特殊钢, 2004, 25(6): 1)
- [3] Bandyopadhyay N, Jha G, Singh A K, et al. Corrosion behaviour of galvanized steel sheet. *Surf Coat Technol*, 2006, 200(14-15): 4312
- [4] Santos D, Raminhos H, Costa M R, et al. Performance of finish coated galvanized steel sheets for automotive bodies. *Prog Org Coat*, 2008, 62(3): 265
- [5] Chen H R, Peng H P, Su X P, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer in hot dip Galvalume bath. *Trans Mater Heat Treat*, 2015, 36(1): 223
(陈海瑞, 彭浩平, 苏旭平, 等. 热浸镀 Galvalume 熔池流动

- 与传热的数值模拟. 材料热处理学报, 2015, 36(1): 223)
- [6] Zhu Y C. *Research on Zinc Pot Devices based on Numerical Simulation* [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013
(朱翊淳. 基于数值模拟对锌锅装置的研究[学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2013)
- [7] Lai H X, Zhu L, Tang C L. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in galvanizing bath. *J Therm Sci Technol*, 2015, 44(1): 33
(赖焕新, 朱路, 唐成龙. 热镀锌锌锅中的流动与传热数值研究. 热科学与技术, 2015, 44(1): 33)
- [8] Dong A P. *Theoretical and Experimental Study on Electromagnetic Separation of Zinc Dross from Galvanizing Zinc Melt* [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009
(董安平. 热镀锌液中锌渣的电磁分离理论及实验研究[学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2009)
- [9] Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. *J Fluid Mech*, 1972, 55(2): 193
- [10] Dai L Y. Study on function of Rosin-Rammler particle size distribution. *Ind Saf Dust Control*, 2000(5): 6
(戴丽燕. 关于 Rosin-Rammler 粒径分布函数的研究. 工业安全与防尘, 2000(5): 6)