

10doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.05.012

热镀 Galvalume 锌渣生成机理研究现状

张满仓, 刘新华*, 李纪, 董妮妮, 黄旭, 吴广宇, 何万定, 杨冀

(首钢京唐钢铁联合有限责任公司 制造部, 河北 唐山 063200)

摘要: 本文从热力学和动力学两方面综述了镀铝锌硅(Galvalume, 简称 GL)生产过程中锌渣的研究现状, 阐明了热镀 GL 中锌渣的生成机理。从热力学角度讨论了熔池温度和 Si 含量对锌渣及 Fe 溶解度的影响。发现随着温度的升高, FeAl_3 相优势区变大; 随着 Si 含量增加, $\alpha\text{-FeAlSi}$ 稳定锌渣相逐渐向 $\alpha\text{-FeAlSi}+\text{FeAl}_3$ 稳定锌渣相转变; Fe 在 GL 中的溶解度随温度的升高而增加, 当 Si 含量为 1.6% 时, Fe 的溶解度最大。从动力学角度讨论了 Fe 在 GL 熔池中的溶解过程, 总结了浸镀速度对 Fe 溶解速率的影响及沉没辊结渣机理。发现随着浸镀速度的增加, Fe 的溶解速率增加, 并改变了熔池的溶度场、温度场及流场分布, 容易产生小而轻的悬浮渣。

关键词: Galvalume; 锌渣; 溶解度; 溶解速率

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A

Research status on formation mechanism of hot-dip Galvalume dross

Zhang Mancang, Liu Xinhua*, Dong Nini, Li Ji, Huang Xu,
Wu Guangyu, He Wanding, Yang Ji

(Manufacturing Division, Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, China)

Abstract: This paper reviews the recent development dross in Galvalume (GL) production from thermodynamics and kinetics. The effects of GL bath temperature and Si content on the balance of zinc slag and the solubility of Fe were discussed thermodynamically. It is suggested that the FeAl_3 phase becomes larger as the temperature increases. Besides, the $\alpha\text{-FeAlSi}$ dross phase gradually transforms into $\alpha\text{-FeAlSi}+\text{FeAl}_3$ phase with the increase of Si content. The solubility of Fe in GL increases with temperature increasing. While the Si content is 1.6%, the solubility of Fe reaches to the peak. The effect of immersion rate on Fe dissolution and the mechanism of sinking slagging in GL are discussed. The dissolution rate of Fe increases with the increase of immersion rate, changing the solubility field, temperature field and flow field distribution and suspension slag in GL bath.

Keywords: Galvalume; dross; solubility; dissolution rate

钢材的耐蚀性较弱, 使用过程中极易发生锈蚀, 从而提高钢材的使用成本并造成资源浪费。将钢材在 55 wt.% Al 和 1.6 wt.% Si-Zn 镀铝锌硅(GL)的

熔体中进行热浸镀处理, 可提高其使用寿命。该 GL 镀层钢板具备较高的耐蚀性, 且 GL 镀层钢板具有优质的焊接性、切口保护性、耐热性及观赏性, 成为

收稿日期: 2024-10-08 修回日期: 2024-11-14

作者简介: 张满仓(1994—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为涂镀工艺技术, email: zmc5125@163.com

通信作者: 刘新华, email: liuxinhua1030@126.com

引用信息: 张满仓, 刘新华, 李纪, 等. 热镀 Galvalume 锌渣生成机理研究现状[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(5): 80-85, 100.

Zhang Mancang, Liu Xinhua, Dong Nini, et al. Research status on formation mechanism of hot-dip Galvalume dross[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(5): 80-85, 100.

现今商业化应用最广泛的合金镀层钢板之一^[1-5]。但是,在连续热浸镀GL过程中会生成大量的锌渣^[6],锌渣在熔池内悬浮或沉底,进而影响熔池的均匀性。且沉没辊上也会结渣,造成镀层产品表面缺陷。锌渣不仅会造成Zn、Al资源的浪费,且还需要定期捞渣,降低生产效率。GL锌渣的产生无法避免,只能探明锌渣生成机理,通过改善GL生产工艺来减少锌渣的产生^[3,4,7]。

国内GL镀层生产线引入较晚,且国外对GL生产技术工艺保护严格,国内缺少GL锌渣的基础性认识,如锌渣生产机理、工艺条件对锌渣的生成影响等^[3,7,8]。为提高国内GL合金镀层的基础研究,探明GL锌渣的生成机理及影响因素,本文总结了国内外的GL熔池中锌渣的研究成果,从热力学上论述了锌渣与熔池的平衡物相关关系,从动力学上综述了Fe的溶解扩散过程,阐明了浸镀速度对锌渣形核、长大及分布的影响。

热浸镀GL时,带钢表面固相Fe与金属熔体接触,Fe-Al间发生剧烈的放热反应。在GL中加入1.5~1.6 wt.% Si可以抑制Fe-Al反应,获得较薄的Fe-Al-Si金属间化合物层^[3,8-10]。Si成分波动、熔池温度、熔池成分、带钢浸镀速度等因素对锌渣影响较大^[11-14]。因此本文从热力学上探讨GL熔池温度、Si含量对锌渣物相平衡和Fe溶解度的影响,从动力学上阐述带钢上Fe的溶解过程,讨论了浸镀速度对Fe溶解、锌渣生成的作用机理。

1 锌渣的物相组成及热力学讨论

1.1 热力学平衡讨论

热浸镀反应过程如图1所示。带钢在金属熔体中转动时,带钢上的Fe与金属熔体接触并发生固液界面反应。带钢界面上的固相Fe先发生溶解,此时界面上的Fe处于过饱和状态,与熔池原子相互扩散并反应,生成Fe-Al-Si-Zn金属间化合物层,成为合金镀层钢板的一部分;而未反应的Fe原子会扩散至熔池,使熔池中Fe的浓度增加,达到饱和后析出Fe-Al-Zn-Si多元固相金属间化合物即锌渣^[2,13,15]。

热浸镀GL时,金属熔体暴露在大气中,Al、Zn会不可避免地与氧气反应生成固态氧化物,这些氧化物浮在熔池顶部成为顶渣。此外,Fe、Al、Si会析出高熔点的金属间化合物,但金属间化合物之间的密度不同^[12,16,17]。密度大的会沉入GL锌锅底部成为底渣(如FeAl₃);密度略大于熔体的金属间化合物(如 α -FeAlSi)会受到流场及尺寸的影响,在锌锅中

悬浮成为悬浮渣。若悬浮渣在流场的作用下碰撞长大,会逐渐下沉变为底渣。部分悬浮渣与熔池表面的Al₂O₃及ZnO氧化物结合,成为顶渣^[18-20]。

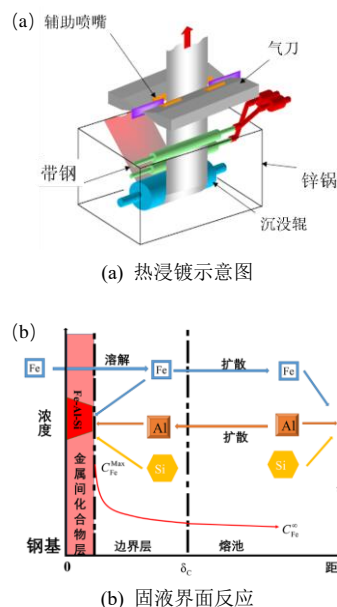


图1 热浸镀反应^[2,13,15]

Fig.1 Hot dip plating reaction^[2,13,15]

研究者做了Fe-Al-Zn-Si热力学上的相图分析及实验物相验证^[3,9,21,22],如图2所示。图2(a)为邹美平等^[21]计算的Al-Zn-Fe在590~610℃的等温截面图。由2(a)可知,随着温度的逐渐增加,液相区(Liq.)的优势区域增大;当镀液成分中Fe含量超过Fe的饱和和溶解度时,则析出的固相为FeAl₃。图2(b)为彭浩平等^[11]使用Thermo-Calc计算的Fe-Zn-Al-Si体系相图。由图2(b)可知,随温度升高,FeAl₃与 α -FeAlSi相转变所需的Si含量也略微增大;低Si时,平衡点位于Liq.+FeAl₃区域,此时熔池中锌渣为FeAl₃;高Si时,随着Fe含量增加,平衡相依次为Liq.+ α -FeAlSi及Liq.+ α -FeAlSi+FeAl₃。测得的Fe-Al-Zn-Si体系(Al_{0.55}/Zn_{0.45})_{1-x-y}Fe_xSi_y的伪三元相图,如图2(c)所示。图2(c)的相图中存在FeAl₃+Liq., α -FeAlSi(τ_5)+Liq.和 β -FeAlSi(τ_6)+Liq.三个两相平衡区域,得到的趋势与Thermo-Calc计算一致。图2(d)为笔者通过Factsage热力学软件计算得到的590、600和610℃三种温度下,GL熔体中的Si含量与锌渣物相平衡之间的关系。由图2(d)可知,随着温度的增加,锌渣物相转变点的Si含量逐渐增加;高温时FeAl₃相的优势区最大;低温时 α -FeAlSi优势区最大;随Si含量的增加,稳定的金属间化合物相依次是FeAl₃, α -FeAlSi^[3],与文献^[17,23-25]计算结果类似。

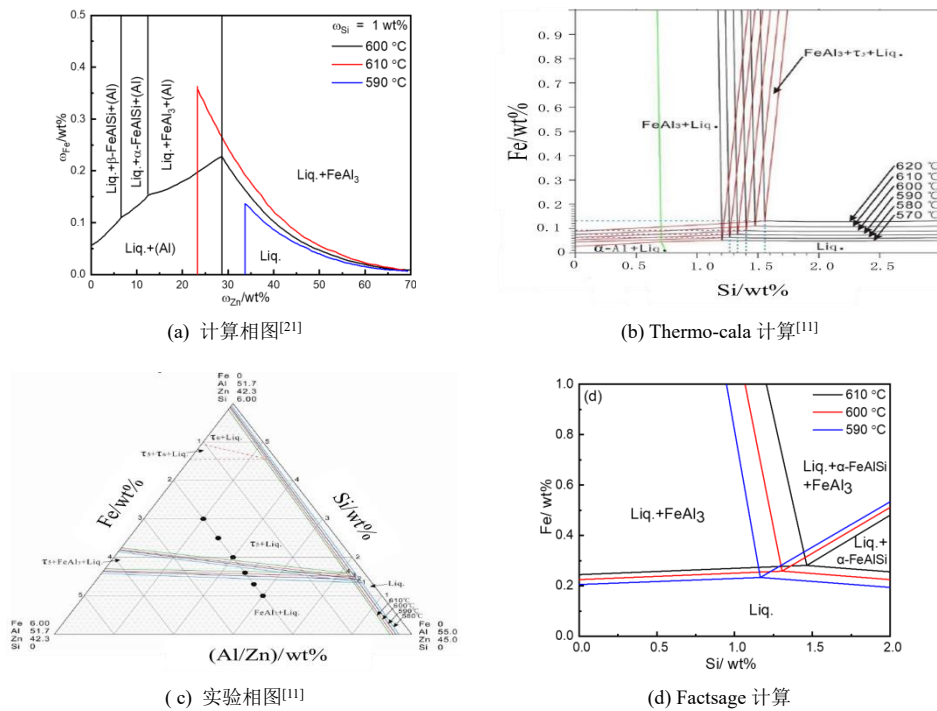


图2 GL 熔池温度与 Si 含量对锌渣物相平衡影响

Fig.2 Effect of temperature and Si content on phase equilibrium of dross in GL bath

然而实际生产中的锌渣类型与实验室锌渣类型存在偏差, 主要原因是生产中GL锌锅熔体是处于亚稳态平衡状态, GL中Fe为过饱和状态 [19, 21]。实验室条件下, 学者们[9, 12, 24]认为在55Al-1.6Si-Zn熔池锌渣实验中仅存在FeAlSi渣, 无FeAl₃渣。实际工业生产中Fe处于亚稳态(过饱和)状态[11]。

1.2 Fe 在 GL 中的溶解度

从图2看出, 熔池温度、熔池Si含量影响着锌渣与GL熔体之间的平衡, 且温度与Si含量对Fe溶解度的影响与前人的工作存在差异[4, 24, 26]。Thermo-calc与Factsage等热力学数据计算的是平衡态溶解度, 而实际生产中Fe的亚稳溶解度要远高于理论计算值。理论计算的溶解度如图3所示, 实测溶解度如表1所示。

图3为GL熔池温度及Si含量对Fe溶解度的影响。可以看出Thermo-Calc与Factsage理论模型计算中Fe的溶解度数值上存在差异, 但Fe在GL中的溶解度趋势一致, 都随着Si含量的增加先增加后减小, 当Si含量为1.6 wt.%左右时, Fe的溶解度达到峰值, 随后随Si量的增加而降低。在不同Si含量下, Fe在GL中的溶解度随着温度的升高而增加, 且变化很明显。因此, 在停工生产捞取底渣时, 往往将GL熔池温度降低到590 °C以下, 使Fe达到过饱和, 以锌渣形式将Fe排出。

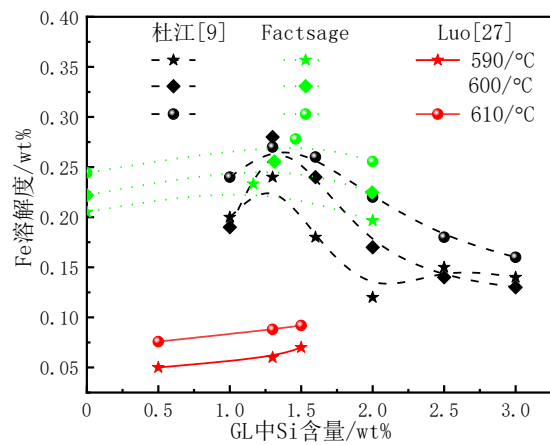


图3 GL 熔池温度及 Si 含量对 Fe 溶解度的影响[9,27]

Fig.3 Effect of temperature and Si content on the solubility of Fe in GL bath[9,27]

表1 Fe 的溶解度测量值

Tab.1 Measured solubility of Fe

温度/°C	Fe 溶解度/wt.%	
	文献[26]	工业实验
460	0.030	—
590	—	0.434
600	0.450	0.462
610	—	0.487

对比表1与图3可知, 现场试验数据远远大于理

论计算值。这是由于理论计算的溶解度为Fe的平衡溶解度，而实验测量为亚稳态溶解度^[9, 28, 29]。浸镀时Fe基与GL熔池处于亚稳平衡状态^[29]，铁的亚稳溶解度要比平衡状态溶解度高出许多(平衡状态下铁的溶解度非常有限)。在热浸镀过程中，熔池中的铁含量达到过饱和(亚稳态)状态，锌渣不断的从熔池中析出^[30]。

2 浸镀过程中 Fe 的溶解机理讨论

2.1 Fe 的溶解机理

在热浸镀过程中，钢基表面和熔池之间存在一系列的物理化学变化过程。目前，众多学者对热浸镀过程中钢基(Fe)在金属熔体中的反应溶解与扩散动力学做出了大量的工作，研究得出钢基上Fe原子在熔池中的溶解速率主要由扩散所控制^[14, 28, 31-33]。

一些学者^[33-36]认为：固相Fe的溶解分为以下步骤：(1) Fe与金属熔体发生界面反应，生成金属间化合物(IMC)；(2) Fe与熔池原子通过IMC层的相互扩散，IMC同时生长；(3) IMC层继续与金属熔体发生界面反应；(4) Fe原子通过IMC层后再向金属熔体中

扩散。即固相Fe的溶解扩散模型。

固相Fe在金属熔体中的溶解规律符合Fick第二扩散定律及Nernst-Bruner方程，据此前人建立了溶解动力学方程^[14, 28, 35, 37]：

$$\ln \frac{w_{\text{Fe}}^{\text{MAX}} - w_{\text{Fe}}^{\infty(i)}}{w_{\text{Fe}}^{\text{MAX}} - w_{\text{Fe}}^{\infty(f)}} = \ln K_m = k_{\text{dif}} \frac{S}{V} t_f \quad (1)$$

式中： w_{Fe}^{∞} 与 $w_{\text{Fe}}^{\text{MAX}}$ 分别表示Fe在熔池内部与平衡条件下的质量浓度，wt.%； k_{dif} 表示Fe在熔池中的扩散速率常数， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； S 表示带钢与熔池的接触面积， m^2 ； V 为熔池体积， m^3 ； t_f 表示时间，s。

将实验中不同时间的熔池浓度数据带入上式，即可得到溶解速率常数 k_{dif} ，如图4所示。Giorgi等^[15]在实验室条件下根据旋转圆盘法设计了Fe在0.2Al-Zn中的溶解实验，如图4(a)所示。从图中可看出，随着转速的增大，直线的斜率变大，表明此时固相Fe在0.2Al-Zn中的溶解速度增大。Lin等^[14]依据韩国浦项工业条件下，热浸镀0.2Al-Zn熔池中不同转速与Fe的溶解速率关系，发现溶解速率常数随着带钢速度的增加而增加，与Giorgi^[15]的实验室实验结论相同。

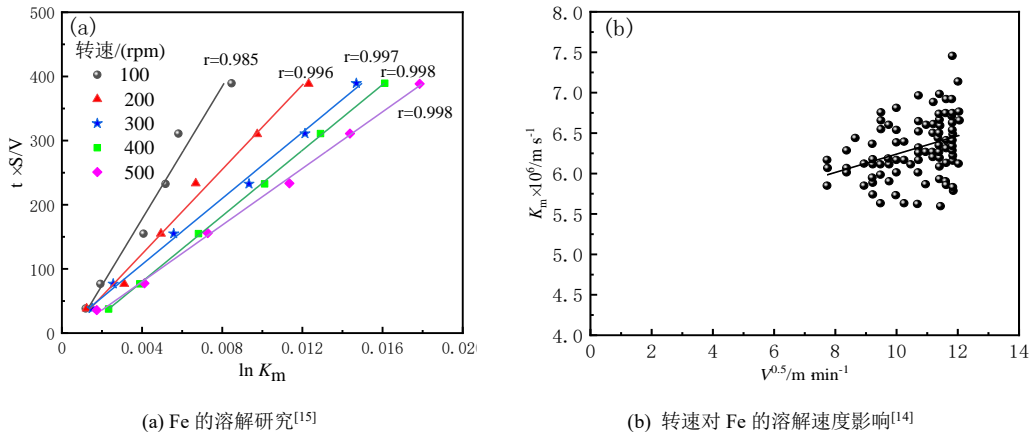


图4 热镀0.2Al-Zn

Fig.4 Hot dip of 0.2Al-Zn

有些学者提出了IMC层生成-溶解模型^[28, 38-40]，该模型认为浸镀过程中Al、Zn、Si原子首先扩散至带钢，并在扩散的一瞬间在带钢与金属熔池界面形成IMC层，一方面IMC层的厚度随着熔池原子的扩散会增加，另一方面IMC层受到金属熔池的侵蚀并溶解减薄，使IMC层中的Fe原子溶解至金属熔体中，式(2)是IMC生长与溶解动力学方程。

$$\frac{dX}{dt} = \frac{K_1}{X} - \frac{C_s K}{\rho_{\text{IMC}} \gamma_{\text{IMC}}} \quad (2)$$

式中： X 表示IMC层的实际厚度，mm； t 表示界面反应时间，s； K_1 表示生长动力学常数， m^2/s ； C_s 表示熔池中Fe的饱和成分，wt.%； K 表示IMC在熔池中的溶解速率常数， $\mu \cdot \text{min}^{-1}$ ； ρ_{IMC} 表示IMC层的密度， kg/m^3 ； γ_{IMC} 表示IMC层中含Fe量，wt.%。

将IMC厚度 X 与时间 t 的实验数据代入上式进行拟合求解，便可得出 K 与 K_1 的值^[38-41]。李华飞^[41]在实验室条件下，用Q235与55 wt.% Al-Zn熔体进行不同温度下的IMC生长动力学实验与Fe的溶解实验，

得到了不同温度条件下IMC的实际厚度。并根据式(2),通过试验数据曲线拟合,获得了不同温度下IMC层的 K 与 K_1 。

2.2 浸镀速度对锌渣的影响

对于一种工业化的镀层而言,生产过程中熔体温度与熔体成分波动较小。但当镀层的规格厚度变化时,带钢的浸镀速度必然波动很大。浸镀速度变化时会引起带钢上Fe的溶解速度的变化^[14,15],并对熔池中的温度场、浓度场及流场造成影响^[42],进而改变熔池中锌渣的生成量及分布^[43],导致悬浮渣与底渣的物相组成复杂^[9]。

刘春富^[30]发现当浸镀速度快时,Fe的溶解量较大,在Fe扩散均匀之前,会快速析出颗粒小而多的铝铁硅相悬浮渣,而底渣产生较少;流速低时,尺寸大的铝铁硅相会沉到锅底,成为底渣。即生产薄规格镀层钢板时,浸镀速度较快,产生小而多的悬浮渣颗粒;当生产厚规格合金钢板时,底渣产生量大^[7]。Willis等^[20]根据 $K-\varepsilon$ 湍流模型模拟了55%Al-Zn熔池中流体流动和温度分布情况,结果表明:流速大、浓度场与温度场梯度较小,易产生悬浮渣;搅拌量力度小、流场梯度大,存在较大面积的低流速区。Kurobe等^[18]根据水模型模拟了熔池中锌渣分布及流动长大的动态行为,发现底渣颗粒容易留在沉辊下方的底壁上和入口处,顶部和底部的锌渣颗粒最有可能聚集在带钢与沉没辊所围成的区域中。

3 结论

GL作为第三代商业化镀层,可以大幅度提高钢材的耐蚀性,但在生产中会产生大量的锌渣,影响生产效率与镀层产品质量。本文分别从热力学及动力学角度总结了锌渣的生成机理,综述了GL熔池温度与Si成分对锌渣-锌液成分平衡及溶解度的影响,探讨了Fe的溶解过程及工艺参数对锌渣生成的影响。

(1) 热力学的研究表明:随着温度升高,Fe在GL中的溶解度上升,FeAl₃相的优势区变大, α -FeAlSi优势区减小;当Si含量为1.6 wt.%左右时,Fe的溶解度达到峰值;随Si含量的增加,稳定的的金属间化合物相依次是FeAl₃、 α -FeAlSi。

(2) 从动力学上描述了锌渣的两种机理模型。研究发现随着浸镀速度的增大,Fe的溶解速率越大,熔池湍流强度变大,容易生成小而多的悬浮渣;浸镀速度低时,Fe的溶解速度变小,锌渣有足够的长大时间,容易生成大而少的底渣。

参考文献

- [1] Fei H, Li J, Li H. Size effect on flow field and dynamic deposition of bottom dross in a molten zinc pot[J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 2021(5): 8-10.
- [2] 杜昕, 张满仓, 段生朝, 等. 高耐蚀铝锌镁镀层研究现状[J]. 北京科技大学学报, 2019, 041(7): 847-856.
- [3] 李伟刚, 柴立涛, 王伟峰. 不同工艺对热浸镀铝锌钢板形貌及组织的影响分析[J]. 中国冶金, 2023, 33(7): 115-123.
- [4] 杨亚晴. 改良森吉米尔法热镀铝锌钢板生产工艺研究[D]. 北京:北京科技大学, 2016.
- [5] 黎志鸿. Si、Zr对热浸镀铝锌镀层组织的影响及相关平衡研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2017.
- [6] Li J P, Qiao D G, Li X D. Effects of cooling rate on microstructure and microhardness of directionally solidified galvalume alloy[J]. China Foundry, 2024, 21(3): 213-220.
- [7] 张文军, 张冀, 邱木生, 等. 热镀铝锌机组沉没辊系关键工艺参数优化[J]. 钢铁, 2023, 58(6): 93-101.
- [8] Reiss G, Ei W, Strutzenberger J, et al. Reversible reaction kinetics model for the formation of dross particles in hot-dip galvanizing lines[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(6): 3833-3841.
- [9] 杜江, 许秀飞, 冉从锦. 热浸镀铝锌硅渣的产生与控制[J]. 轧钢, 2016, 33(4): 74-78.
- [10] Varadarajan A. Dross formation mechanism and development of wear resistant scraper in 55al-1.5si-zn coating bath [D]. Morgantown: West Virginia University, 2008.
- [11] 王银军, 李远鹏, 江社明, 等. 热浸镀铝锌熔池锌渣形成的研究进展[J]. 材料保护, 2020, 53(10): 85-92.
- [12] 潘修河, 涂浩, 苏旭平, 等. 温度和铝含量对铝锌池中锌渣形成的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2015, 20(2): 258-265.
- [13] Yu K R. CFD-DPM modelling and analysis of dross particle dynamics in hot-dip galvanizing baths[D]. Morgantown: West Virginia University, 2021.
- [14] Kang Y L. The dissolution of iron from automotive steel sheets in a molten zinc bath and the kinetics of the nucleation and growth of dross particles[D]. Cleveland: Case Western Reserve University, 2011.
- [15] Giorgi M L, Guillot J B, Nicolle R. Theoretical model of the interfacial reactions between solid iron and liquid zinc-

- aluminium alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40(9-10): 2263-2268.
- [16] 刘连涛. 钢—铝复合界面组织结构研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [17] 涂浩, 潘修河, 吴长军, 等. 锌铝池中 Si 含量对渣相形成的影响[J]. *工程科学学报*, 2016, 38(7): 945-951.
- [18] Kurobe J, Iguchi M. Cold model experiment on dynamic behavior of dross in hot dip plating bath[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2000, 1(4): 251-259.
- [19] Kurobe J, Iguchi M. Size effect on dynamic behavior of dross in model hot dip plating bath[J]. *Materials Transactions*, 2003 68(5): 792-799.
- [20] Willis D J, Ilinca F, Ajersch F, et al. Fluid flow modelling in a 55% Al-Zn coating metal pot[J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics: An International Journal*, 2007, 7(2/3/4): 183-185.
- [21] 邹美平, 李谦, 李国洋, 等. 热浸镀 55%Al-Zn 镀液中底渣的分析与计算[J]. *宝钢技术*, 2012, (4): 45-47.
- [22] Liu L, Pan X, Lu L, et al. Phase equilibria of 600 °C isothermal section of Zn-Al-Fe-Si quaternary system[J]. *Journal of Phase Equilibria & Diffusion*, 2016, 37(6): 1-9.
- [23] 彭浩平, 苏旭平, 王建华, 等. 热浸镀锌铝的界面反应机理[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(11): 3168-3175.
- [24] 潘修河. Zn-Al-Fe-Si 四元系相关关系研究及其在热浸镀锌锌渣分析中的应用[D]. 常州: 常州大学, 2015.
- [25] Bao J. Role of silicon in solidification microstructure in hot-dipped 55wt% Al-Zn-Si coatings[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 473(1-2): 76-80.
- [26] 李九岭. 带钢连续热镀锌. 第3版[M]. 冶金工业出版社, 2010: 158-160.
- [27] Luo Q, Jin F, Li Q, et al. The mechanism of dross formation during hot-dip al-zn alloy coating process[J]. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 2013, 13(1-2): 85-89.
- [28] 孔纲, 刘仁彬, 车淳山, 等. 固相 Fe 在高温液相 Zn 中的溶解行为[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(11): 132-137.
- [29] Paik D J, Hong M H, Huh Y, et al. Metastable phases of dross particles formed in a molten zinc bath and prediction of soluble aluminum during galvannealing processes[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2012, 43(6): 1934-1943.
- [30] 刘春富, 彭浩平, 苏旭平, 等. 热浸镀 Galvalume 熔池中铝锌渣的形态及分布[J]. *云南冶金*, 2012, 41(6): 44-48.
- [31] Chen S, Yang D, Zhang M, et al. Interaction between the growth and dissolution of intermetallic compounds in the interfacial reaction between solid iron and liquid aluminum[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47(10): 5088-5100.
- [32] Mondal A, Chakraborty A, Bysakh S, et al. Nucleation and growth behaviour of iron-zinc intermetallic phases in prior-copper coated galvanized steels[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 699: 947-958.
- [33] Noeppl A, Ciobanas A, Wang X D, et al. Influence of forced/natural convection on segregation during the directional solidification of Al-based binary alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2010, 69(2): 47-49.
- [34] Mandal G K, Balasubramaniam R, Mehrotra S P. Theoretical investigation of the interfacial reactions during hot-dip galvanizing of steel[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, 40(3): 637-645.
- [35] Giorgi M L, Durighello P, Nicolle R, et al. Dissolution kinetics of iron in liquid zinc[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(18): 5803-5808.
- [36] O'Dell S, Charles J, Vlot M. Modelling of iron dissolution during hot dip galvanising of strip steel[J]. *Materials Science and Technology: MST: A publication of the Institute of Metals*, 2004, 20(2): 251-256.
- [37] Nakhaie D, Asselin E. Dissolution kinetics of pure zinc: the effect of bulk solution concentration and temperature studied by the lead-in pencil electrode technique[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017, 164(13): C758-C767.
- [38] 刘根凡, 李华飞, 郑家燊, 等. 热镀 55%Al-Zn 时化合物层生长动力学研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(7): 7-10.
- [39] 孟荣祥, 杨熙珍. 热浸镀 55%Al-Zn 合金过程中化合物层生长动力学分析[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1987(1): 8-18.
- [40] 孟荣祥, 杨熙珍. 硅的添加量对铝锌合金热镀层的组织及耐蚀性的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1986, 6(2): 91-102.
- [41] 李华飞. 钢材热浸镀 55% Al-Zn 合金工艺及其性能的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [42] 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[J]. *材料热处理学报*, 2015, *下转 100 页*