

热镀锌电磁封流技术的研究综述

侯帅¹, 花福安^{2,3}

(1.河北工程大学 信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038;
2.钢铁共性技术协同创新中心, 沈阳 110004;
3.东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要: 热镀锌是镀锌板生产过程中必不可少的步骤, 而热镀锌电磁封流技术相对于传统热镀锌技术具有带钢表面无划伤、沉没辊和稳定辊不被腐蚀、维修频率低和工作效率高的优势, 具有重要的工程应用价值。首先, 介绍了热镀锌电磁封流技术的特点和意义。其次, 分别介绍了电磁泵热镀锌电磁封流技术、CVGL热镀锌电磁封流技术、直流磁场热镀锌电磁封流技术和永磁感应密封热镀锌电磁封流技术的工作原理、研究现状、技术组成及其优缺点。再次, 分析了热镀锌电磁封流工作过程中, 温度场、流场、固体结构力学场和电磁场之间复杂耦合的特点, 并且依据热镀锌电磁封流过程的技术特点, 指出了热镀锌电磁封流过程中带钢振动的抑振技术、锌液不稳定流动抑制技术、温度稳定性控制技术、张力控制等关键技术。最后, 提出了电磁装置结构参数优化、带钢振动抑制技术和基于大数据的过程控制技术是提高热镀锌电磁封流工作过程的关键技术。

关键词: 电磁封流; 电磁泵电磁封流技术; CVGL 电磁封流技术; 直流磁场电磁封流技术; 永磁感应电磁封流技术

中图分类号: TG174.443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)04-0165-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.04.027

Research Progress of Electromagnetic Enclosed Slot Technology in Hot Galvanizing

HOU Shuai¹, HUA Fu-an^{2,3}

(1.School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2.Collaborative Innovation Center of Steel Generic Technology, Shenyang 110004, China;
3.State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

ABSTRACT: Hot galvanizing is an indispensable process during the production process of galvanized sheet. Compared with traditional hot galvanizing technology, the hot galvanizing electromagnetic enclosed slot technology featured in non-scratch on band steel surface, non-corrosion of sink roll and stabilizer roll, less maintenance and high efficiency, hence it was of vital engineering application value. Firstly, characteristics and significance of electromagnetic enclosed slot technology of hot galvanizing were introduced. Secondly, working principle, research status, technology composition as well as advantages and disadvantages of such technologies of electromagnetic pump type, CVGL electromagnetic enclosed slot type, DC magnetic field type and per-

收稿日期: 2016-12-29; 修订日期: 2017-03-20

Received: 2016-12-29; Revised: 2017-03-20

基金项目: 钢铁共性技术协同创新中心开放课题 (2015001); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (1621211041-2); 河北省自然科学基金资助项目 (E2017402115)

Fund: Supported by the Collaborative Innovation Center of Steel Technology Open Subject (2015001); Handan City Science and Technology Research and Development Projects (1621211041-2); The Natural Science Foundation of Hebei Province of China (E2017402115)

作者简介: 侯帅 (1984—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为垂直热镀锌装置的研究。

Biography: HOU Shuai (1984—), Male, Ph. D., Lecturer, Research focus: vertical hot dip galvanizing device.

manent magnet induction sealing type were introduced. Thirdly, features of complicated coupling among temperature field, flow field, solid structure mechanics field and electromagnetic field were analyzed. Based on technical characteristics of electromagnetic enclosed slot process of hot galvanizing, key technologies including strip vibration suppression technology, suppression technology of liquid zinc unstable flowing, control technology of temperature stability and tension control were put forward. Finally, parameters optimization of electromagnetic device structure, suppression technology of strip vibration and large data-based process control technology were key technologies of improving the working process.

KEY WORDS: electromagnetic enclosed slot; electromagnetic pump sealing slot technology; CVGL electromagnetic enclosed slot technology; direct magnetic field electromagnetic enclosed slot technology; permanent magnet induction electromagnetic enclosed slot technology

近年来,随着轿车、家用电器、信息电子和高端设备制造行业的发展,世界市场对镀锌板的需求快速增长。全世界热镀锌的产能已经超过了 1 亿吨,其中中国的热镀锌产能超过了 3000 万吨。目前热镀锌行业仍随着世界经济的发展而发展,热镀锌板的工艺和关键装备也不断发展^[1-17]。

热镀锌工艺和关键装备的发展历史可分为两个阶段。第一阶段是单张钢板热镀锌工艺发展阶段,其中单张钢板经过浸泡酸洗、涂镀剂和烘干过程被制作成镀锌板,但这种工作方式的效率低下,不能满足工业生产的需求。第二阶段是在线带钢连续热镀锌生产阶段。森吉米尔于 1931 年在波兰首先成功地把钢板的连续退火和带钢的连续热浸锌组合为一个机组,创建了早期的在线带钢连续热镀锌生产线,该方法被称为森吉米尔法。1948 年美国钢铁公司采用新型脱脂技术设计并投产了一条在线热镀锌带钢生产线,该方法称为美钢联法。1965 年阿姆柯钢铁公司针对森吉米尔法的不足,发展了改进的森吉米尔法。上述的森吉米尔法、美钢联法和改进的森吉米尔法仅在脱脂方式上有差别,而在带钢的热浸镀技术没有差别^[18-24]。在线带钢连续热浸镀装置是带钢热镀锌机组流程中的核心部分,也是影响带钢表面质量及生产率的重要因素之一,主要由沉没辊、锌锅、气刀及稳定辊等组成,其结构如图 1 所示^[25-27]。

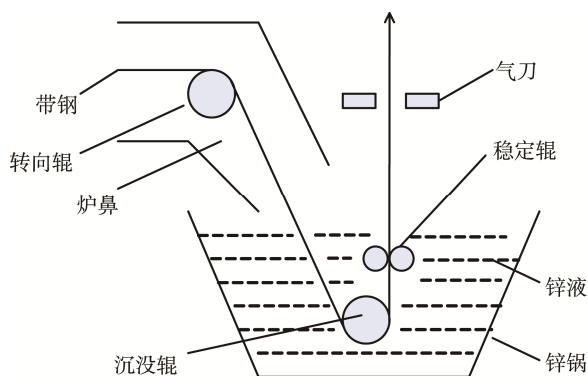


图 1 传统热镀锌装置结构

Fig.1 The traditional device structure chart of hot dip galvanized

在热浸镀过程中,带钢经炉鼻进入锌锅内进行热浸镀,再通过锌锅内的沉没辊转向后垂直穿过稳定辊,经过气刀控制带钢表面镀层的厚度,然后进入合金化炉。传统热镀锌方式存在以下几个问题:(1) 锌液中的沉没辊靠带钢与辊子表面的摩擦力来驱动,是一个被动的转向辊,如果辊面产生相对运动或稍有偏差,带钢就会被划伤;此外,沉没辊、稳定辊在与带钢长期接触的过程中被磨损,更容易在带钢表面产生划伤^[28]。(2) 沉没辊、稳定辊及其轴套被锌液严重腐蚀,大约 2 周至 1 个月需要更换一次,更换时间较长,降低了生产效率,增加了生产成本,并且 Fe 元素溶入到锌液中,影响了锌液的纯净度,进而影响了镀锌质量。(3) 锌液侵蚀辊子的过程中,辊面出现的腐蚀点、金属化合物和锌渣(杂质及浮渣)均会破坏辊面的光洁度,降低镀锌板的表面质量。(4) 带材的运行速度低于 200 m/min,制约了热镀锌生产线的生产能力。(5) 锌锅中的锌液总质量大,锌液成分难于调节。(6) 传统热镀锌所生产出的产品板型容易发生瓢曲变形和扭曲变形,板型质量难以控制。

为延长沉没辊的使用寿命,提高产品质量和机组作业率,国内外研究机构及成员开展了大量的研究工作,主要采用改变表面喷涂技术或者改变沉没辊材料来延长辊子的寿命。然而上述研究方法中的沉没辊和稳定辊仍然沉没在锌锅中,沉没辊和稳定辊的腐蚀问题仍然无法被完全解决^[29-30]。

针对传统热镀锌工艺生产过程中的问题,一些学者提出了一种锌液中无沉没辊和稳定辊的热浸镀技术——热镀锌电磁封流技术。热镀锌电磁封流装置是利用洛伦兹力驱动金属液体的设备,由于液态金属有良好的导电性,当通电的金属液体穿过磁场时产生电磁力,在无接触的情况下推动熔融金属液体流向指定的区域,其原理图如图 2 所示。

图 2 中,锌锅中容纳金属溶液,金属溶液中的涡流电为直接通入的直流电或者磁场感应产生的感应电,锌锅下端安装磁场发生装置,使锌液受到向上的洛伦兹力,以抵消锌液的重力,使锌液悬浮在空中。

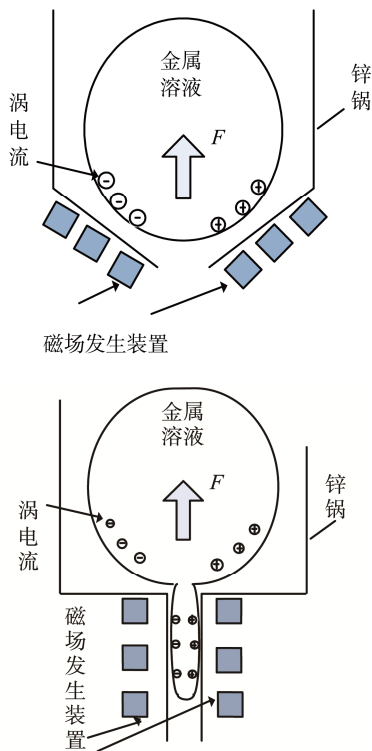


图 2 热镀锌电磁封流装置原理

Fig.2 Schematic diagram of hot galvanizing electromagnetic flow device

热镀锌电磁封流机构由气刀、感应器、锌锅、锌液、转向辊和稳定辊组成，其结构如图 3 所示。

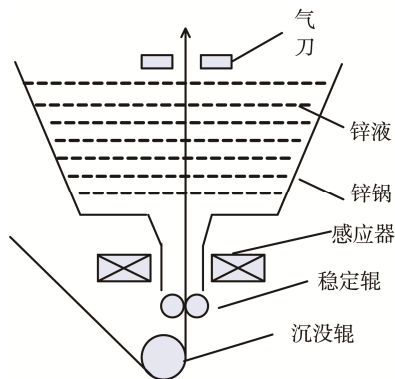


图 3 热镀锌电磁封流装置示意

Fig.3 The diagram galvanized electromagnetic device

热镀锌电磁封流装置工作时，带钢由锌锅底部的转向辊转向后进入锌锅，经过涂镀后出锌锅，再从两个气刀间穿过进入后处理部分。与传统锌锅相比，热镀锌电磁封流技术具有如下优势^[31]：(1) 由于是无接触热镀锌生产方式，避免了带钢与辊子的接触，消除了沉没辊产生的产品表面划痕等缺陷，提高了热镀锌产品的表面质量。(2) 将传统锌锅容量由 130~200 吨降低到大约 30~50 吨，锌液的总量大大减少。(3) 热镀锌电磁封流式锌锅由两个锌锅构成，分别为工作锅和预熔锅，容易调整镀层配方。(4) 取消了维修炉鼻，更换沉没辊和稳定辊的停产时间和维修时间短，

提高了生产效率。(5) 无须更换沉没辊和稳定辊，节省了稳定辊和沉没辊的费用，极大地降低了产品成本。(6) 采用热镀锌电磁封流装置式锌锅后，可以将退火炉内的热张力辊转移到转向辊室，由于带钢在转向辊室的温度低于还原退火炉内的温度，可提高生产过程中带钢的张力，有效改善产品的板型。

热镀锌电磁封流技术彻底解决了锌锅内部锌液腐蚀转向辊和稳定辊所带来的问题，对于提高生产效率及热镀锌质量具有划时代的意义，具有传统工艺无法比拟的优越性，因此开展热镀锌电磁封流技术的研究具有非常广阔的应用前景^[31-37]。

1 热镀锌电磁封流技术进展

鉴于热镀锌电磁封流技术的重要研究价值，国内外学者开展了大量的研究工作。本文根据热浸镀电磁封流装置的励磁方式不同，将热浸镀电磁封流技术分为电磁泵热镀锌电磁封流技术、CVGL 热镀锌电磁封流技术、直流磁场热镀锌电磁封流技术和永磁感应热镀锌电磁封流技术四种，并分别对四种类型的热镀锌电磁封流技术的研究现状进行介绍。

1.1 电磁泵热镀锌电磁封流技术

新日铁在 1988 年利用移动磁场（行波磁场）封闭从容器底部镀槽流出的铝、锌等熔融金属液，该电磁泵封流技术的原理如图 4 所示^[38-40]。

电磁泵热镀锌电磁封流装置由镀槽、电磁泵、带钢等构成。电磁泵封流装置在工作过程中，锌液从熔解槽流出后经入口进入镀槽，在电磁泵 A、a 驱动下，锌液沿带钢前进方向流动，锌液涂镀在带钢表面后从

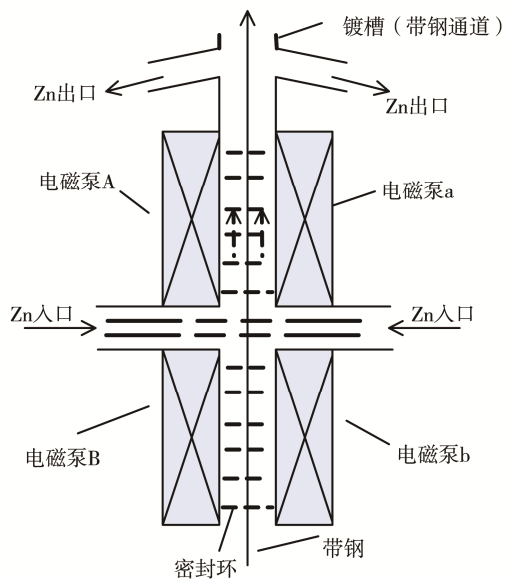


图 4 电磁泵封流热浸镀装置

Fig.4 Hot dip equipment sketch of electromagnetic pump flow

出口流入熔解槽,经过滤、补充、调温,再由入口进入镀槽,完成一次循环。电磁泵 B、b 在镀槽设置密封环,驱动锌液向上流动。电磁泵封流技术实现了液体金属在完全封闭的情况下,流速与流量的可控性传输,这种驱动方式结构简单,没有机械运动,可长期稳定运行,避免了金属氧化与设备维护的烦恼。

电磁泵封流技术所使用的电磁泵分为感应电磁泵和传导式电磁泵两种形式。感应电磁泵结构简单,无需直流电源转换装置,可免除传导型电磁泵在电极清理中存在的问题,但工作效率低。传导式电磁泵工作时需要的电压较低,且具有较高的工作效率,缓解了绕组导线在高温下工作时的绝缘需求^[41—45]。

电磁泵的磁极极对数、初级铁心排布方式和电磁泵的体积尺寸等相关参数,对电磁封流效果有较大影响,因此电磁泵的结构参数对电磁泵封流的效果具有重要影响。但电磁泵封流技术具有控制过程简单、锌液流动稳定性差、带钢运行稳定性低的缺点。

1.2 CVGL 热镀锌电磁封流技术

SMS DEMAG 基于电磁封流原理开发了热镀锌电磁封流装置,并开发了连续热镀锌电磁封流工业生产线,且于 2002 年 8 月 14 日首次在奥地利 Wupperman 镀锌线进行试运行,并取得试车初步成功。该技术处于开发阶段,尚未投入实际热镀锌工业生产中^[33,37],其结构原理如图 5 所示。

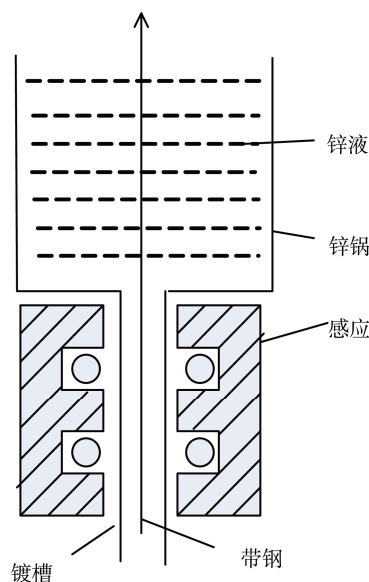


图 5 CVGL 热镀锌电磁封流原理

Fig.5 Flow diagram of CVGL galvanizing electromagnetic

图 5 中的热镀锌电磁封流装置由镀槽、感应器和锌锅等装置构成。该装置工作过程中,带钢经转向辊转向垂直方向运动,垂直进入封流镀槽。带钢穿过陶瓷镀槽进入盛有液态锌和锌铝合金的工作锌锅中,完成热浸镀过程。底部由电磁力进行密封,该电磁力由

锌液中感应器周围的磁场和涡流共同作用而产生,其大小为锌液中感应出的磁场矢量和涡电流的叉乘积,当锌液静压与电磁力达到平衡时,锌锅底部的锌液可以稳定悬浮而不下漏。

CVGL 装置在运行过程中,铁心与线圈产生的交变磁场在锌液中产生感应电磁力,锌液受到的电磁力克服锌液的重力,进而悬浮在空中。锌液受到的电磁力与铁心的几何参数(材料、几何尺寸、铁芯与锌液的距离)、线圈匝数、线圈缠绕方式、线圈内电流的类型(交流、直流)、线圈内通过的电压、线圈内通过的电流等参数有关。合理的 CVGL 电磁封流结构参数可使锌液在较小的电流情况下,获得较大的电磁力。

运行过程中, CVGL 装置中的锌液在洛伦兹力的作用下会发生湍流,并悬浮在空中。锌液的流动造成流体的不稳定,并且带钢在运行过程中会产生感应电流,带钢受洛伦兹力和流固耦合的作用会发生振动,因此 CVGL 装置存在锌液流动不稳定和带钢振动剧烈的问题。

1.3 直流磁场热镀锌电磁封流技术

宝钢研究院的周月明、潘胜波等人进行了多电极和单电极的直流磁场对液态金属镓的封流试验,当电压为 5 V 左右,磁感应强度为 4 T 时,液态金属流体被稳定保持。当增大电流磁场而强度不变时,在直流磁场封流试验过程中会出现液态金属非稳定振动,而多电极直流磁场封流技术可降低液态金属不稳定的可能性^[34,46—48]。

潘胜波、佐佐健介等人采用实验方法研究了直流电流和静磁场同时作用下液态金属封闭试验,指出了直流磁场封流的可能性^[49]。直流磁场封流技术是根据左手法则,实现电磁封流的目的。在直流磁场中的导体通入垂直相交方向的直流电流时,锌液会受到电磁力(洛伦兹力)的作用,产生和锌液重力方向相反的电磁力,当锌液受到的电磁力与锌液的重力相等时,锌液悬浮在空中。

在直流电磁封流过程中,锌液受重力影响,所需的感应电流密度较大。当流体中的电流密度值超过临界值时,锌液会因为电磁收缩效应导致流体力学不稳定。在实验过程中,当励磁电流较大时,电极和溶液末端接触处会出现电火花或电流时断时续的现象,最后,在表面张力和重力的作用下,溶液末端的形状具有一定的曲率。溶液凸起的部分由于洛伦兹力和电流密度较小,不能消除重力的影响,导致液面曲率越来越大甚至滴落。

直流电流封流装置工作时存在流体力学不稳定的特点,而其采用倾斜流路、优化封流槽尺寸等方法可提高电流和磁场的利用率,因此研究倾斜流路和优化封流槽尺寸,可以提高直流电磁封流过程中锌液流动的稳定性的。

1.4 永磁感应热镀锌电磁封流技术

李静基于永磁铁感应原理,提出永磁感应热镀锌电磁封流技术^[35-36, 50-54]。永磁感应热镀锌电磁封流技术利用永磁转子在永磁密封感应通道中产生的感应电流,将锌液悬浮在空中。永磁转子为表面装有极性相反、交错排列的永磁磁极圆柱体,用于产生交变磁场。永磁转子的传动及控制装置用于拖动成对永磁转子旋转,产生磁场密封锌液,并在永磁密封感应通道中使钢带自动对中,可提高锌液密封的可靠性和钢带走的稳定性。

永磁感应热镀锌电磁封流装置由锌液、垂直镀槽和永磁转子等构成,见图6。永磁感应热镀锌电磁封流装置使永磁转子在不同转速下工作,以调整锌液受到的电磁力。然而永磁转子在转动时,转子处于不同位置会使锌液受到的电磁力发生波动。因此选择合理的转速,使热镀锌电磁封流过程中电磁力平稳变化是永磁感应热镀锌电磁封流装置的一个关键技术问题。

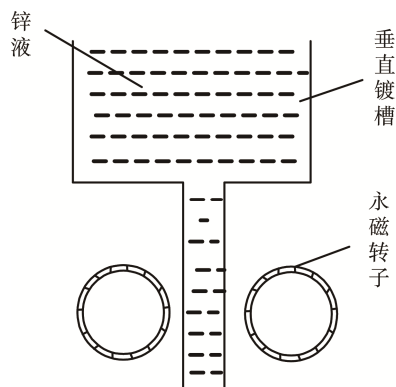


图6 永磁感应热镀锌电磁封流装置

Fig.6 Permanent magnetic sealing device of hot galvanizing electromagnetic

永磁感应密封热镀锌电磁封流技术是利用永磁体产生的磁场使导电性液体(锌液)产生悬浮,使用永磁密封技术使锌液悬浮在热镀锌电磁封流槽内,能缓解封流不稳定、走带不稳定和钢带不对中等问题。此外,永久磁铁的磁场比较恒定,可缓解磁场和流体电流密度不稳定的问题。

2 热镀锌电磁封流技术工作过程中的物理特点及关键技术问题

2.1 热镀锌电磁封流技术的物理特点

在热镀锌电磁封流过程中,锌液处于磁场中,并且锌液中流过直流电流或感应电流,因此锌液受到向上的洛伦兹力作用,悬浮在空中。

热镀锌电磁封流工作过程会存在如下物理过程:

(1)在锌液中通过直流电流或感应电流,锌液会产生感应热,导致温度升高,工作过程中的锌液存在感应加热的过程;(2)如果锌液处于交变的磁场中,锌液在交变的磁场下会产生感应电流,存在磁场和电场耦合过程;(3)锌液受到洛伦兹力的作用,会发生湍流,存在湍流流动过程;(4)锌液的湍流会带动带钢振动,其工作过程存在流固耦合的过程;(5)交变的磁场会在带钢中产生感应电流,导致带钢温度的升高,存在带钢被感应加热的过程;(6)带钢受到磁场的作用会产生振动,存在磁致振动过程。因此热镀锌电磁封流过程属于复杂的磁场、电场、流场、温度场与固体相互耦合的过程,其物理现象比较复杂。

2.2 关键技术难点

2.2.1 带钢振动的抑振技术

热镀锌电磁封流过程中,带钢由下而上穿过镀锌槽,在轴向运动惯性力、电磁力和湍流的作用下发生振动。带钢振动的抑制技术有如下几种方法:

1)电磁线圈矫正。为抑制带钢的振动,利用位置传感器检测带钢的位置,当检测到带钢偏离中心位置的距离后,反馈电磁线圈产生相应的感应电流,使带钢受到指向中心线方向的电磁力,从而抑制带钢的振动。该方法控制过程复杂,和两侧的励磁装置容易产生干扰,使锌液流动不稳定。因此,需要采用先进的控制策略,在保证锌液稳定流动的情况下,利用反馈电磁线圈抑制带钢的振动。

2)电源波动及谐波干扰的抑制技术。底部若干个励磁装置的电源强度和相位差应被精确地控制在工艺要求范围内。在热镀锌电磁封流工作过程中,不同的励磁装置会产生变化的磁场,因此会在其他励磁装置的线圈中产生感应涡流,影响其他励磁装置的工作状态。另外,热镀锌电磁封流工作过程中的电磁强度大,励磁电流中很容易叠加低次谐波,导致工作电流波动。因此,在励磁装置的供电模块中,增加整流模块、逆变模块、滤波模块和电压自调节模块,以减小励磁电流波动而导致的带钢振动,是减小带钢振动的重要方法。

3)增强张力。在工业现场中,采用提高带钢张力的方法,抑制带钢在镀锌槽内的振动幅度是抑制带钢振动的有效方法。

2.2.2 锌液不稳定流动抑制技术

锌液受洛伦兹力的作用在镀锌槽内湍流流动,如果湍流强度过大,会导致锌液飞溅。为抑制锌液的不稳定流动,可以采用改变镀锌槽形状,改变镀锌槽与励磁装置之间的间距、励磁线圈的形状、励磁线圈的电流强度等方式来保证锌液流动的稳定性。

2.2.3 温度稳定性控制技术

锌液通过熔解槽进行加热,然而锌液中的感应涡流会使锌液温度上升,因此在镀槽内设置温度传感器,参考熔解槽内锌液的温度调整熔解槽的加热功率,使锌液温度保持稳定是一个关键技术问题。

2.2.4 张力控制技术

热镀锌过程中,张力的稳定性依靠热镀锌上部和下部的张力辊进行调节,利用张力检测仪检测带钢运行过程中受到的张力,然后调整张力辊,使带钢的张力稳定在期望的工艺值上。

3 展望

3.1 电磁装置结构参数优化

电磁泵热镀锌电磁封流技术、CVGL 热镀锌电磁封流技术、直流热镀锌电磁封流技术和永磁热镀锌电磁封流技术的结构参数对封流效果影响较大,而智能优化算法具有全局寻优能力,因此借助智能优化算法确定热镀锌电磁封流装置的结构参数,是获得热镀锌电磁封流装置良好结构参数的一个有效解决方法。

3.2 带钢振动抑制技术的研究

在热镀锌电磁封流过程中,带钢是磁性材料,受磁场的影响较大,容易产生振动,而带钢振动会导致流体不稳定,进而产生漏锌,因此带钢的抑振技术是热镀锌电磁封流研究的关键技术。

目前电磁线圈矫正方法虽然能够抑制带钢的振动,但是其容易给励磁装置产生干扰,并且控制过程比较复杂。电源波动及谐波干扰的抑制技术和增强张力抑制带钢振动方法,可以减小带钢的振动幅度,然而其抑制振动的范围有限,不能在较大的工艺条件下调节带钢的振动幅度。因此开发一种控制范围宽泛且控制方式简单的抑制带钢振动的装置是未来的一个研究方向。

3.3 基于大数据的过程控制技术

热镀锌电磁封流过程存在温度场、流场、固体结构力学场和电磁场之间的耦合,其过程控制的变量较多,过程模型难以建立,且控制过程较复杂,不易实现。而基于大数据的控制技术,可基于大量的过程数据挖掘工业过程中潜在的一些规律,因此采用大数据技术来控制热镀锌电磁封流过程,是保证热镀锌电磁封流正常工作的一种重要手段。

4 结语

热镀锌电磁封流技术具有结构简单、生产效率高

和维修成本低的特点,因此受到了众多学者和研发机构的关注。本文按照热镀锌电磁封流的励磁方式对热镀锌电磁封流技术进行分类,并分别介绍了不同热镀锌电磁封流技术的特点,总结了热镀锌电磁封流过程中的技术难点和未来的技术趋势。

目前,热镀锌电磁封流技术的带钢振动和锌液流动不稳定的抑制技术需要进一步改进,鉴于热镀锌电磁封流技术能极大提高热镀锌的工作效率,减少维修成本和维修时间,因此其具有较大的技术应用前景。

参考文献:

- [1] VINTER S, MONTANES M T, BEDNARIK V, et al. Stabilization/Solidification of Hot Dip Galvanizing Ash Using Different Binders[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 320: 105—113.
- [2] RUS V, HEGYI A, VERMESAN H, et al. Kinetics of the Corrosion Process of Hot Dip Galvanized Steel Reinforcement in Fresh Concrete[J]. Studia Universitatis Babes-Bolyai Chimia, 2015, 60(2): 409—419.
- [3] 肖莹莹. 浅谈热浸镀工艺[J]. 科技信息, 2010(15): 237.
- [4] XIAO Y Y. Introduction to Hot Dip Plating Process[J]. Science & Technology Information, 2010(15): 237.
- [5] ROMERO G, PALACIOS A, RIVERA J, et al. Robust Control Techniques Applied to the Hot-dip Galvanizing Process[J]. Applied Mechanics and Mechanical Engineering IV, 2014, 459: 212—221.
- [6] QASIM T, FAOURL M, ARAIDAH O. The Impact of Preheating and Postcooling on Critical-to-Quality Characteristics in Hot-Dip Galvanizing[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(6): 793—797.
- [7] POKORNY P, KOLISKO J, BALIK L, et al. Description of Structure of Fe-Zn Intermetallic Compounds Present in Hot-Dip Galvanized Coatings on Steel[J]. Metalurgija, 2015, 54(4): 707—710.
- [8] EQUIHUA GUILLEN F, GARCIA LARA M, MUNIZ VALDES C, et al. Simple Heat Treatment for Production of Hot-Dip Galvanized Dual Phase Steel Using Si-Al Steels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(1): 268—274.
- [9] DICOCO V, IACOVIELLO F, NATALI S. Damaging Micromechanisms in Hot-Dip Galvanizing Zn Based Coatings[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2014, 70: 91—98.
- [10] CAI X F, HUANG Y Z, LI Y G, et al. Production Process and Technology Development of Hot-Dip Galvanizing[J]. Materials Science, 2014, 488/489: 61—65.
- [11] BOZORGIAN B, BEYER J, OECHSNER M. A Method for Determining the Crack Development During the Hot-Dip Galvanizing[J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2016, 47(1): 5—11.

- [11] PRADHAN D, MANNA M, DUTTA M. Al-Mg-Mn Alloy Coating on Steel with Superior Corrosion Behavior[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 258: 405—414.
- [12] MIN T, GAO Y, CHEN L, et al. Mesoscale Investigation of Reaction-Diffusion and Structure Evolution During Fe-Al Inhibition Layer Formation in Hot-Dip Galvanizing[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 92: 370—380.
- [13] MANHABOSCO S M, BATISTA R J, NEVES Da, et al. Determination of Current Maps by Svet of Hot-Dip Galvanized Steel under Simultaneous Straining[J]. Electrochimica Acta, 2015, 168: 89—96.
- [14] LIU G, LYU P, JIANG X, et al. Identification and Preliminary Evaluation of Polychlorinated Naphthalene Emissions from Hot Dip Galvanizing Plants[J]. Chemosphere, 2015, 118: 112—116.
- [15] DING W, HEDSTROM P, LI Y. Heat Treatment, Microstructure and Mechanical Properties of a C-Mn-Al-P Hot Dip Galvanizing Trip Steel[J]. Materials Science, 2016, 674: 151—157.
- [16] GAO L, LI Z, KUANG X, et al. Formation of Periodic Layered Structure During Hot-Dip Galvanizing in Al-Zn-Mg Bath[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 304: 306—315.
- [17] CARRILLO A J, GARCIS G M, PEREZ H V, et al. Treatment of Spent Pickling Baths Coming from Hot Dip Galvanizing by Means of an Electrochemical Membrane Reactor[J]. Desalination, 2014, 343: 38—47.
- [18] 凌全伟, 刘建秋. 热镀锌技术的现状及发展[J]. 鞍钢技术, 2004(2): 9—13.
LING Quan-wei, LIU Jian-qiu. Situation of Hot Galvanizing Technique and Its Development[J]. Angang Technology, 2004(2): 9—13.
- [19] 陈冬, 金向雷. 中国热镀锌技术及发展动向[J]. 河北冶金, 2004(1): 3—7.
CHEN Dong, JIN Xiang-lei. Chinese Hot Zinc Plating and Its Development[J]. Hebei Metallurgy, 2004(1): 3—7.
- [20] DULCY C, GALDON F. 连续热镀锌线工艺技术的最新发展[J]. 鞍钢技术, 2008(4): 60—62.
DULCY C, GALDON F. The Latest Development in Continuous Hot Galvanizing Line Technology[J]. Angang Technology, 2008(4): 60—62.
- [21] HANG H, LI H, FU Y, et al. Simulation Analysis of Different Thickness Control in the Continuous Hot-Dip Galvanizing Process[J]. Manufacturing Science and Engineering, 2016, 32: 1290—1293.
- [22] XU Z, LIU S, GAN G, et al. The Film Forming Mechanism of Chromium-free Passivation Process in the Tannic Acid System for Hot Dip Galvanizing Coating[J]. Optoelectronics and Advanced Materials—Rapid Communications, 2015, 9(11/12): 1487—1490.
- [23] XU Z, LIU S, GAN G, et al. Study Chromium-free Passivation Coating on Hot-dip Galvanized Steel Sheet[J]. Optoelectronics and Advanced Materials—Rapid Communications, 2015, 9(1/2): 260—265.
- [24] SUN H, ZHI D D, DONG A P. Numerical Analysis of Two-phase Flow and Heat Transfer in External Cyclic Purification Hot-dip Galvanizing Bath[J]. Advanced Material Engineering, 2016, 85: 1251—1257.
- [25] 张颖异, 李运刚. 热镀锌合金技术的研究进展[J]. 湿法冶金, 2011, 6(1): 10—13.
ZHANG Ying-yi, LI Yun-gang. The Research Progress of Hot Galvanizing Alloy Technology[J]. Hydrometallurgy of China, 2011, 6(1): 10—13.
- [26] 匡立春. 简述我国热镀锌合金技术使用现状及发展趋势[C]//第10届中国热浸镀学术技术交流会暨节能减排新技术推介会. 天津: 出版者不详, 2014.
KUANG Li-chun. Present Situation and Development Trend of Hot Galvanizing Alloy Technologies in China[C]//10th Academic Technology Seminar of New Energy Saving and Emission Reduction of Sinomania Hot-dip Technical. Tianjin:[s. n.], 2014.
- [27] 黄小晓, 公茂进, 周晓姗. 热镀锌铝系列合金镀层的技术现状[C]//第10届中国热浸镀学术技术交流会暨节能减排新技术推介会. 天津: 出版者不详, 2014.
HUAN Xiao-xiao, GONG Mao-jin, ZHOU Xiao-shan, et al. Hot Dip Galvanized Series Aluminum Alloy Coating Technology Status[C]//10th Academic Technology Seminar of new Energy Saving and Emission Reduction of Sinomania Hot-dip Technical. Tianjin:[s. n.], 2014.
- [28] 蒋大强, 徐曼华, 高仲龙. 热镀锌技术的发展[J]. 工业炉, 1995(1): 47—50.
JIANG Da-qiang, XU Man-hua, GAO Zhong-long. The Development of Hot Galvanizing Technology[J]. Industrial Furnace, 1995(1): 47—50.
- [29] 张召恩, 刘利, 李学涛. 热镀锌板表面控制技术[J]. 表面技术, 2009, 38(5): 90—92.
ZHANG Zhao-en, LIU Li, LI Xue-tao, et al. Hot Galvanized Sheet Surface Control Technology[J]. Surface Technology, 2009, 38(5): 90—92.
- [30] 田凯. 热镀锌沉没辊系统长寿化研究[J]. 包钢科技, 2008, 34(增刊): 34—39.
TIAN Kai. Longevity Research about Immersed Roll System in Galvanization[J]. Science & Technology of Baotou Steel (Group) Corporation, 2008, 34(Suppl): 34—39.
- [31] 贺文丽. 连续热浸镀锌钢低频电磁场封流实验研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2011.
HE Wen-li. The Experimental Study of Continuous Hot Dip Galvanized Pot Sealed by Low-frequency Electromagnetic Field[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2011.
- [32] 张永杰, 赫冀成. 材料电磁过程研究在宝钢[C]//2007中国钢铁年会. 成都: 出版者不详, 2007.

- ZHANG Yong-jie, HE Ji-cheng. State of Arts of Electromagnetic Processing of Materials in Baosteel[C]// Proceedings of 2007 Annual Meeting of China's Iron and Steel. Chengdu: [s. n.], 2007.
- [33] 德希, 麻永林, 李慧琴, 等. 低频磁场固态金属悬浮的实验研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2011, 29(2): 182—185.
- DE Xi, MA Yong-lin, LI Hui-qin, et al. Experimental Study of Low-frequency Magnetic Field Suspending Solid Metal[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2011, 29(2): 182—185.
- [34] 邢淑清, 蔡森, 麻永林. 热镀锌低频电磁封流有限元数值模拟[J]. 轧钢, 2011, 28(1): 32—34.
- XING Shu-qing, CAI Miao, MA Yong-lin. The Numerical Simulation of Low Frequency Electromagnetic Sealing in Hot-dip Galvanizing Process[J]. Steel Rolling, 2011, 28(1): 32—34.
- [35] 李静, 李小占, 田野, 等. 热镀锌永磁封流技术的有限元数值模拟及应用研究[J]. 冶金自动化, 2015, 39(3): 50—55.
- LI Jing, LI Xiao-zhan, TIAN Ye, et al. Research and Application of Finite Element Numerical Simulation on Permanent Magnetic Sealing Technology in Hot-dip Galvanizing[J]. Metallurgical Industry Automation, 2015, 39(3): 50—55.
- [36] 李静, 李小占, 赵忠东, 等. 永磁密封技术在热镀锌中的应用研究[C]//第十届中国钢铁年会暨“第六届宝钢学术年会. 上海: 出版者不详, 2015.
- LI Jing, LI Xiao-zhan, ZHAO Zhong-dong, et al. Application and Research of Finite Element Numerical Simulation on Permanent Magnet Sealing in Hot-dip Galvanizing[C]//The 10th China Steel Conference "and" the Sixth Baosteel Academic Annual Meeting. Shanghai: [s. n.], 2015.
- [37] 蔡森. 热镀锌低频电磁封流的有限元数值模拟[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2011.
- CAI Miao. FEM Numerical Simulation of the Low frequency Electromagnetic Sealing in Hot Galvanizing Process[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2011.
- [38] 杨银平. 日本的热浸镀锌工艺[J]. 中小企业科技信息, 1997(4): 12—13.
- YANG Yin-ping. The Hot Dip Galvanizing Technology of Japan[J]. Science Technical on Middle-Small Business, 1997(4): 12—13.
- [39] 姜涛, 麻永林, 陈重毅, 等. 感应式圆柱电磁泵设计的影响因素[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(7): 730—734.
- JIANG Tao, MA Yong-lin, CHEN Zhong-yi, et al. Influencing Factors of Design in Electromagnetic Induction Type Cylindrical Pump[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(7): 730—734.
- [40] 姜涛, 麻永林, 邢淑清, 等. 小型直线型圆柱电磁泵模拟及设计研究[C]//第八届全国流体力学学术会议. 兰州: 出版者不详, 2014.
- JIANG Tao, MA Yong-lin, XING Shu-qing, et al. Small Straight Cylindrical Modeling and Design the Electromagnetic Pump[C]//The Eighth National Conference on Fluid Mechanics Modeling and Design the Small Linear Cylindrical Electromagnetic Pump. Lanzhou: [s. n.], 2014.
- [41] 郑丽丽, 卢艳青, 李培兴. 聚磁参数对直流电磁泵磁场分布影响的数值模拟[J]. 材料与冶金学报, 2014, 13(1): 74—78.
- ZHENG Li-li, LU Yan-qing, LI Pei-xing. Numerical Simulation for Influence of Magnetic Parameters Magnetic Field Distribution of Direct Current Electromagnetic Pump[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2014, 13(1): 74—78.
- [42] 余祖耀, 柯炯, 温江涛, 等. 高频电磁泵瞬态驱动特性研究[J]. 液压与气动, 2015(2): 53—56.
- YU Zu-yao, KE Jiong, WEN Jiang-tao, et al. Transient Driving Characteristics of the High-frequency Electromagnetic Pump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(2): 53—56.
- [43] 杨国来, 李世伟, 张俊峰. 一种新型永磁式电磁泵的设计[J]. 新技术新工艺, 2014(1): 41—43.
- YANG Guo-lai, LI Shi-wei, ZHANG Jun-feng. A New Kind of Design of the Solenoid Pump with Magnet[J]. New Technology & New Process, 2014(1): 41—43.
- [44] 肖玉宝, 麻永林, 邢淑清, 等. 平面交流感应电磁泵电磁驱动力影响因素研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2014, 33(1): 14—18.
- XIAO Yu-bao, MA Yong-lin, XING Shu-qing, et al. Research on the Influence Factors of the Electromagnetic Driving Force Generated by Flat Alternating Current Induction Electromagnetic Pump[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2014, 33(1): 14—18.
- [45] 陈雪霏, 邢淑清, 麻永林, 等. 波峰焊机用平面感应电磁泵的研究与设计[J]. 内蒙古科技大学学报, 2015, 34(2): 170—173.
- CHEN Xue-fei, XING Shu-qing, MA Yong-lin, et al. The Study and Design of the Planar Inductive Electromagnetic Pump for Wave Soldering[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015, 34(2): 170—173.
- [46] 马新建, 周月明. 无沉没辊热浸镀技术[J]. 宝钢技术, 2003(3): 1—5.
- MA Xin-jian, ZHOU Yue-ming. Hot Dip Galvanizing Technology without Sink Roll[J]. Baosteel Technology, 2003(3): 1—5.
- [47] 周月明, 潘胜波, 瞿雪元, 等. 电磁场下液态金属保持的实验研究[C]//2007 中国钢铁年会. 成都: 出版者不

- 详, 2007.
- ZHOU Yue-ming, PAN Sheng-bo, ZHAI Xue-yuan, et al. The Experimental Study of Liquid Metal Kept under the Electromagnetic Field[C]//Proceedings of 2007 Annual Meeting of China's Iron and Steel. Chengdu: [s. n.], 2007.
- [48] 周月明, 马新建. 电磁封流热浸镀技术[J]. 钢铁, 2004, 39(2): 32—35.
- ZHOU Yue-ming, MA Xin-jian. Hot Dip Galvanizing Technology with Electromagnetic Enclosed Slot[J]. Iron Steel, 2004, 39(2): 32—35.
- [49] 潘胜波, 周月明. 静磁场和直流电流同时作用下熔融金属封流的研究[C]//2007 中国钢铁年会. 成都: 出版者不详, 2007.
- PAN Sheng-bo, ZHOU Yue-ming. Research on Confinement of Molten Metal by Simultaneously Imposing static Magnetic Field and DC Current[C]//Proceedings of 2007 Annual Meeting of China's Iron and Steel. Chengdu:[s. n.], 2007.
- [50] 李静, 赵红妍. 永磁封流技术在垂直热镀锌锅上的应用研究[C]//第九届中国钢铁年会. 北京: 出版者不详, 2013.
- LI Jing, ZHAO Hong-yan. Research of Permanent Magnet Sealing Technology in Vertical Hot Galvanized Pot[C]// The Ninth Annual Session of China's Iron and Steel. Beijing: [s. n.], 2013.
- [51] BERNHARD T. Method and Device for Hot-dip Coating a Metal Bar: US, US20060153992[P]. 2006-07-13.
- [52] 李静. 一种永磁感应密封垂直热镀锌装置: 中国, CN201210135077.0[P]. 2012-04-30.
- LI Jing. A Permanent Magnetic Induction Seal Vertical Hot Galvanizing Equipment: China, CN201210135077.0 [P]. 2012-04-30.
- [53] 邢淑清, 蔡森, 麻永林, 等. 一种适用于热浸镀电磁封流设备中的镀槽: 中国, CN201110153832.3[P]. 2011-11-02.
- XING Shu-qing, CAI Miao, MA Yong-lin, et al. A Kind of Suitable for Hot Dip Plating Tank of Electromagnetic Flow Sealing Equipment: China, CN201020291254.0 [P]. 2011- 11-02.
- [54] LI J, ZHAO H Y, LIU S. The Research of Permanent Magnet Sealing Technology in Vertical Hot Galvanized Pot[J]. Advanced Materials Research, 2013, 765: 222— 226.