

2011 钢铁共性技术协同创新中心  
工艺与装备研发平台顶层设计  
(十五)

2011 钢铁共性技术协同创新中心由北京科技大学与东北大学两所核心协同单位,以及国内主要钢铁行业科研院所、企业等共同组建。目前,该中心已正式通过国家认定。该中心由关键共性工艺与装备研发平台和重大工程高端产品开发平台组成。其中,关键共性工艺与装备研发平台由东北大学 RAL 为主体,协同东北大学材料与冶金学院、北京科技大学、中国钢研科技集团、上海大学、武汉科技大学、宝钢、鞍钢、首钢、武钢等单位组建而成。该平台的任务是研发冶、铸、轧等工序的新工艺、新技术、新装备,实现“钢铁绿色制造”。针对工艺与装备研发平台的顶层设计内容,本报特组织相关报道,以飨读者。

## 冷轧带钢热镀锌质量控制与装备技术

## 1 研究背景

冷轧镀锌带钢是锌与钢板相结合的复合材料,锌层覆着在钢板表面具有防腐性能,钢板又具有机械性能,可以大幅度提高冷轧钢板的使用寿命,被广泛用于汽车、建筑、电器、容器、交通、能源等行业。随着科学技术的进步,冷轧镀锌带钢生产正向高性能、高品质和低成本的方向发展。因此在冷轧镀锌带钢生产规模和产量日益扩大的同时,其镀层厚度、表面质量、可镀性以及镀锌带钢机械性能等综合性质量控制是镀锌带钢生产的核心技术。同时,降低有色金属消耗、减少环境影响等越来越受到人们的重视。本项目作为“2011 计划”钢铁共性技术协同创新中心“先进冷轧、热处理和涂镀工业技术与装备”研究重点,将进行 1) 带钢镀锌厚度均匀性控制; 2) 镀锌带钢表面清洗技术; 3) 带钢表面质量缺陷检测技术; 4) 镀锌带钢连续退火热处理工艺模型控制技术以及高强钢可镀性等方面进行技术研究和理论与实践工作。

## 2 国内外涂镀控制技术现状

提高冷轧带钢热镀锌质量特别是镀层厚度均匀性自动化控制水平,一直是世界各国在连续热镀锌生产线努力追求的目标。针对耐腐蚀性高强汽车板市场需求,蒂森克虏伯钢铁公司多特蒙德钢厂在 2001 年 12 月开发建成的热浸镀锌生产线,具有镀锌质量和锌层厚度均匀性控制功能,该生产线不仅满足当前汽车工艺的需求,而且还将满足未来高等级轿车对汽车用钢的需求。韩国浦项钢铁公司(POSCO)在 2006 年实现了镀层厚度的自

动控制。国内热镀锌生产线大多为引进国外热镀锌生产技术,自主研发建设具有锌层厚度控制功能的热镀锌生产线起步较晚。1979 年武钢建成国内第一条连续热镀锌生产线,1990 年宝钢建成第二条热镀锌线,其热镀锌机组大多采用常规 PID 技术进行锌层厚度控制,当速度发生变化时气刀会根据测厚仪的反馈值进行调节,由于锌层厚度实时控制能力的局限,锌板涂层控制精度亟待提高。由于锌层厚度控制影响因素的复杂性以及气刀参数对锌层厚度影响非线性,当产品规格切换以及速度和涂层厚度变化时,气刀参数如何实时快速切换,如何采用工艺数学模型对锌层厚度进行精确控制,是世界各国在锌层厚度控制技术研究的重点。

## 2.1 锌层厚度控制技术

在热镀锌生产过程中,气刀是控制锌层厚度和均匀性的关键设备。带钢从锌锅中拉出后,利用高速气流的冲击作用将粘附在其表面的多余锌液刮回锌锅,影响最终锌层厚度的因素是复杂、非线性和耦合的。国内外关于气刀吹锌过程的机理研究相对较少,而镀层厚度实现自动控制就要求对气刀流场和介质传输机理进行深入研究 and 解读。气体喷吹理论研究的目的是找到最佳镀层厚度控制方法与参数,保证带钢表面获得良好的均匀性镀层厚度,建立精确锌层厚度控制过程数学模型,最终获得高精度、高质量的镀锌板。主要控制方法: 1) 建立带钢表面镀层厚度与带钢速度、喷嘴压力、气刀与带钢距离、喷嘴开口度、锌液物性(黏度、密度)等因素关系的数学模型; 2) 使用有限元

分析软件 FLUENT 对气刀喷吹过程进行数值模拟,主要分析带钢表面产生的压力和剪力峰值与气刀入口压力之间的关系; 3) 将模型预测的锌层厚度与实际检测以及实验结果进行比较,使用有效模型进行细致分析,提供锌层厚度控制方法和最佳工艺窗口。

## 2.2 表面质量检测技术

冷轧带钢涂镀板在线质量检测与控制技术,是确保各种涂镀钢板质量的研究重点。70 年代,在以新日铁为代表的日本冷轧涂镀板及电工钢板生产线上采用了“激光扫描表面缺陷检测系统”。80 年代,国外镀锌线已经由表面检测缺陷过渡到对内部缺陷包括夹杂物的检测。90 年代,日本川崎公司水岛厂采用了数字分析系统,使缺陷的鉴别达到量化阶段。英国 European Electronic System 公司(EES)则将研究工作的重心确定为提高系统的实用性和可靠性,进而使带钢涂镀质量明显提高。美国 Honeywell 公司 1983 年开发出采用线阵 CCD 器件的连铸板坯表面在线检测装置。美国 Cognex 公司 1996 年先后研制成功了 iS-2000 自动检测系统和 iLearn 自学习分类器软件系统,有效地改善了传统自学习分类方法在算法执行速度、数据实时吞吐量、样本训练集规模及模式特征自动选择等方面的不足之处。与西方发达国家相比,国内带钢表面缺陷检测的研究起步较晚,整体研究水平较低。90 年代初华中理工大学采用激光扫描方法测量冷轧钢板宽度和检测孔洞缺陷,开展了线阵和面阵 CCD 成像

检测技术的研究工作。哈尔滨工业大学机器人研究所进行了带钢表面缺陷静态检测和识别方法的研究。上海宝钢研究院与原航天部二院联合研制出用于冷轧带钢表面缺陷的在线检测系统。2002 年北京科技大学研制出多面阵 CCD 摄像机钢板表面图像采集系统。近年来,东北大学在中厚板热轧板坯表面质量图像识别与表面质量控制等领域研究也取得重大进展,但国内各研究院所和企业的研究成果向实际生产线提供全套高端镀锌带钢表面缺陷检测系统的在线实际应用还有一定距离。镀锌层厚度控制的影响因素如图 1 所示。

## 2.3 带钢表面清洗机械消泡技术

清洗技术是冷轧带钢生产过程中必不可少的工序之一,用于去除带钢表面的残留铁粉、油脂和其他附着物,以提高带钢表面的清洁度,增加后续镀层工序的粘附力,避免涂镀后的带钢表面出现漏铁的质量缺陷。清洗以氢氧化钠或硅碳酸钠的碱液为脱脂剂,采用喷淋电解清洗。但是,轧制油与碱产生皂化反应,皂化成分超过一定的浓度就容易产生泡沫现象,其结果是清洗设备和碱液储存泵的周围发生泄漏,导致作业环境恶化和碱液损失。为规避这些问题,以往都采用化学抑泡手段。在碱液中加入酒精,使皂化成分溶解,从而抑制发泡;也有通过添加硅油降低界面张力,使得泡沫破灭。无论采用哪种方法都需要很高的费用,并且硅油会破坏钢板和涂层的紧密性。因此开发研制一种既环保、又经济、

同时还能提高带钢表面清洗质量的机械消泡装置,对提高冷轧带钢表面清洗质量,以及节能和环保都具有重要的意义。

通过国内外相关文献检索,日本在机械消泡领域处于领先地位,且对产品已封闭保护,主要研究热点在吸泡装置及消泡装置的设计开发上。机械消泡的研发在国内尚属空白,因此自主研发适于冷轧清洗工序的机械消泡装置是完全可行的,在国内具有广泛的应用市场。

## 2.4 镀锌板连退工艺模型控制技术

退火热处理是调控冷轧带钢组织性能的重要手段,涂镀是提高带钢耐腐蚀性的主要方法,先进的退火和涂镀技术是生产高品质冷轧产品的核心和关键。国外一些知名的工业炉公司(比如 DREVER、STEIN 等)经过多年的技术积累及实际应用,在立式炉过程控制领域取得了领先优势。特别是连续退火热处理工艺数学模型的应用,已成为这些公司的核心技术,并带来了可观的经济效益。我国大型连续热镀锌退火炉的设计制造基本依靠进口。

快速冷却技术是冷轧带钢连续退火工艺的关键。为了提高连续退火带钢的冷却速率,解决冷却均匀性、表面氧化等问题,国内外开展了大量的研究工作。总体来说,常规的连续退火生产线喷气冷却速率大多在 20~35℃/s,这一指标不能满足厚规格、超高强度钢的生产。冷水淬的冷却速率可达 1000℃/s 以上,冷却能力强但却不能实现带材的冷却路径控制与终冷温度控制,存在冷却均匀性和板形等问题,且需要后续酸洗。近年来,根据先进高强钢(AHSS)市场需求,东北大学 RAL 重点实验室研发成功了高冷却速率的在线喷氢冷却技术,这种高速喷氢冷却技术的冷却速率可达 150℃/s(1mm 厚带钢),通过高强带钢中试实验验证并且效果良好,解决喷气冷却生产高强钢冷却能力不足以及水淬冷却存在的问题。目前,东北大学正

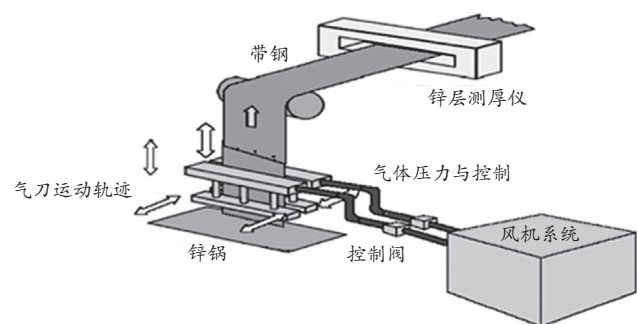


图1 镀锌层厚度控制的影响因素

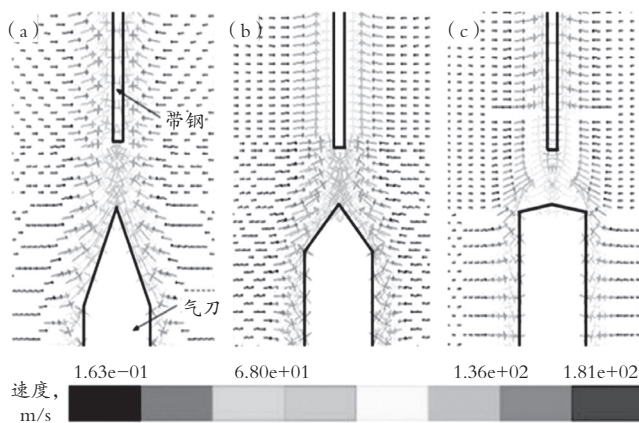


图2 挡板边角控制带钢边部气体流场



## 上接 B04 版

在研发用于生产 AHSS、高强不锈钢等冷轧带钢材料先进的连续退火热处理工艺过程数学模型控制系统(其中包括炉温控制数学模型、快速提温和快速冷却数学模型、张力设定数学模型以及涂镀厚度均匀化控制模型等)软件技术,已经开发出具有现场实际应用功能的快速喷氢冷却和气雾冷却装置,气雾冷却又称气液双相介质冷却,是一种有前途的先进快速冷却技术。冷却的均匀性受冷却速率影响很大,冷却速率低时,水雾与带钢接触不均匀,冷却速率高时,液滴尺寸大,均匀性不好。为了进一步提高气雾冷却的速率,生产更高强度级别的高强钢,法国法孚公司开发了一种湿式闪冷气雾冷却技术(Wet Flash Cooling)。该技术采用氮气和水作为冷却介质,利用氮气使水变成水雾,通过调整水(气)压或水(气)流量来控制冷却速率,最高冷却速率可达 1200℃/s,并且终冷温度可以控制,横向和纵向的板形均匀。总的来说,先进的带钢连续退火生产新工艺、新产品,特别是工艺与控制模型的研发过程,必须经过材料设计、数值模拟、科学试验、中试验证和工程应用一体化的发展过程。

## 3 关键共性技术

## 3.1 热镀锌工艺过程气刀流场模型控制技术

冷轧带钢在热镀锌工艺过程中,气刀气流对带钢表面压力、气刀与带钢距离和喷射角度等因素对镀锌质量产生影响,特别是气刀流场对镀层厚度均匀性影响尤为突出。通过建立气刀动态模拟装置进行有限元分析,研究气刀流场对带钢表面的喷气压力分布规律,确定气流压力、喷射角度以及相对位置等因素对锌层厚度的综合影响,同时,还要充分考虑带钢材料在连退热处理制度与热镀锌工艺条件下的材料温降等参数的递变过程。利用有限元模拟镀层厚度非线性最小二乘拟合、指数平滑数据优化,对目标镀层厚度与海量实测数据比较分析,建立典型带钢产品热镀锌工艺过程气刀流场优化数学模型,找到最佳镀层厚度控制方法,提高镀层厚度自适应模型控制的动态品质,为典型产品规格和生产工艺条件下热镀锌质量控制建立自适应数学模型开发的基础条件。结合 Smith 预估控制,应用鲁棒区间的自适应控制方法,对具有非线性特征的镀层厚度控制系统进行预估与模型计算,研发气刀流场同步预测控制技术,完成带钢两表面镀层厚差的稳定控制。

## 3.2 热镀锌带钢表面缺陷识别与镀锌质量控制技术

要实现镀锌带钢表面质量控制,镀锌缺陷识别技术显得尤为重要。镀锌带钢基板(如:镀锌、镀铝锌、有锌花、无锌花)背景特点以及对应表面缺陷在不同光照、明暗场条件下,所折射出的金属表面区别很大,所以,要根据不同金属材料性能和表面质量特征,进行镀锌带钢表面缺陷特征分析与多金属材料种类分类器的设计。鞍钢研究院的科技人员开发的基于 DSP 嵌入式图像处理技术,可有效提高在线机器视觉图像数据处理分析能力,通过工业以太网数据通讯,实现在线、数字图像处理分析、数据存储等稳定的数据传输。为了对冷轧镀锌带钢表面缺陷进行分类,将各种类型表面缺陷的图像特征用准确有效的方法将其从图像当中提取出来,优化截取带钢表面缺陷特征,通过建立缺陷分类工艺模型,对实际的缺陷图像特征进行综合分析计算,集中选取和定位缺陷类别,最终完成缺陷分类。由此可见,研发多金属材料种类疑似缺陷区域捕捉模型,有效过滤伪缺陷模型直至建立一套完整的镀锌带钢表面质量控制在线镀锌缺陷识别技术,对于热镀锌带钢质量控制具有重要意义。

近年来,东北大学与鞍钢研究院针对热镀锌质量控制进行联合攻关,在镀锌带钢表面质量检测、锌层厚度均匀性控制以及在线镀锌缺陷识别等技术领域取得了突破性进展,研发出多项具有自主知识产权热镀锌质量控制技术。鞍钢研究院新近开发的机械吸泡与消泡技术及生产设备,在鞍钢冷轧热镀锌生产线应用并取得良好效果。带钢在镀锌前清洗过程中,清洗液不均匀地附着在带钢表面而影响镀锌质量。机械吸泡及消泡过程,就是应用气体与液态动力学理论与生产制备技术相结合,通过对气液分离装置、消泡管道、消泡环流场、速度场、压力场的理论与实践,通过打碎和吸取带钢清洗过程产生的多余泡沫,将打碎的泡沫进行快速气液分离,气体排出,液体回流,大大降低了清洗液在带钢表面的不均匀附着程度,清洗效果明显提升,使镀锌带钢质量显著改善。

## 3.3 连续退火热处理工艺模型开发平台技术

建立快速加热、快速冷却和涂镀连退热处理工艺模型库,以连退炉的加热段、均热段和辐射换热带钢表面的换热技术为研究重点,研发具有辐射换热黑度控制的高密辐射管结构设计和带钢表面最佳热处理过程的立式连续退火加热炉制备技术,包括加热段辐射黑度和辐射换热模型、冷却段对流

换热系数模型等各工艺段炉温控制自学习模型。建立连续退火热处理工艺数学模型开发平台,针对冷轧带钢产品性能、尺寸精度和表面涂镀质量,重点开展先进高强钢等典型钢种和热处理生产技术研发,通过研发喷气、喷氢和气雾多种快速冷却工艺与制备技术,解决先进高强钢生产过程中冷却能力不足的问题。

冷轧带钢再结晶退火过程中,在获得力学性能的同时,还原性气氛也清除了带钢表面的氧化物。然而,对先进高强钢中含量较高的 Si、Mn 等合金元素却是热力学可氧化的,这些合金元素在钢板表面发生选择性氧化而形成无法被还原的氧化物,尤其是无定形的  $x\text{-MnOSiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$ ,严重影响锌液对钢板的浸润性,易发生表面漏镀点,这是热镀锌和合金化镀锌高强钢板生产过程中的技术难点,因此,如何解决先进高强钢表面选择性氧化技术问题,对高强钢板的生产工艺与产品应用非常重要。

## 4 研究方案与实施计划

◆针对典型带钢新材料进行有限元模拟实验:采用有限元分析方法,确定气刀压力、气刀距离、带钢从锌锅离开的速度、气刀角度、刀唇开度、气刀高度、锌液温度等因素对锌层厚度的综合影响,通过对带钢边部气刀流场的分析,重新设计气刀挡板厚度和挡板边角形状以及角度尺寸,减少带钢边部流场的涡流现象,提高对带钢边部增厚的控制效果,挡板边角控制带钢边部气体流场如图 2 所示。

◆开发一套气刀流场动态模拟实验装置,建立模拟气刀流场对镀层影响的动态模拟方法,通过气刀流场动态模拟现场工艺环境,应用高精度气压检测探头和高速图像处理系统,模拟出气体压力对热镀锌涂层厚度实际影响曲线;由压力传感器实测出气刀在带钢表面沿宽度方向上的压力分布,得出横向喷气压力分布规律。研发具有平均镀层厚度和上下表面偏差厚度联合控制的同步镀层厚度控制系统。

◆机械消泡装置动力学分析与生产用制备技术开发:采用机械机构清除镀锌带钢清洗过程中产生的泡沫,取代化学消泡剂;减少生产成本,减少带钢表面漏镀事故,减少环境污染。完成机械消泡装置总体方案设计,吸泡动力装置设计,

消泡管道设计,消泡环设计,气液分离装置设计和气液反冲洗系统设计。

◆针对缺陷识别的图形图像处理学算法开发,通过镀锌带钢基板及缺陷图像特点的分析,建立带钢表面图像缺陷识别检测、图像分割和伪缺陷检验图像区域划分方法,开发冷轧镀锌板、镀铝锌板等多品种的表面质量在线检测系统,可实现长期、稳定、在线识别带钢表面缺陷信息,整体提高镀锌带钢表面缺陷识别率与控制算法的执行效果。

◆建立典型镀锌带钢多类形缺陷的有效特征与分类模型数据库:采用分布式图像处理分析流程,研发自适应产品背景特点的缺陷辨识方法,结合图像预处理、目标缺陷图像分割、可变尺度伪缺陷过滤模型,实现镀锌带钢生产过程动态缺陷识别。完成海量收集镀锌带钢不同缺陷类别的在线采集图像样本,形成缺陷图像样本库。

◆建立连续退火热处理过程的传热工艺制度。形成退火过程温度场耦合体系,结合传热特点和典型退火工艺制度,对各炉段内的传热过程进行合理优化,完成立式炉连续退火工艺过程数学模型设计,通过热模拟软件进行各炉段内传热的模拟与分析,研发具有工业化的连续退火热处理数学模型。

◆结合典型高强钢连退热处理工艺制度,进行工业化连续退火热处理预测模型开发,完成炉温、炉内气氛和退火速率的设定值计算;建立加热段热惯性、冷却段和热镀锌全过程的动态控制系统和生产应用模型。

◆为了防止热镀锌和合金化镀锌高强钢板产生漏镀缺陷,在连续镀锌线的退火炉中保持高氧势,将合金元素的选择性氧化由外氧化转为内氧化,通过预先氧化使 Mn、Si、Al 等元素的选择性氧化弥散分布在氧化铁层后再还原;也可以由 Al、P 等元素代替 Si 以减少钢基体中 Si 的含量,以减少带钢表面选择性氧化物的产生。目前,我国在控制合金元素选择性氧化、提高先进高强钢可镀性方面的研究还处于起步阶段。

## 5 预期效果

镀锌带钢质量控制核心技术的研发成功,将大幅提高冷轧镀锌带钢的综合质量,并对镀锌带钢表面质量信息实时监

控,消除多道工序中影响镀锌带钢表面质量的因素,同时有效控制镀锌带钢生产过程中多种工业原料的使用量,进而产生显著的经济效益和社会效益。

1) 采用数值模拟和实验研究相结合的方法,揭示气刀流场的重要影响因素机理,建立高精度镀层厚度工艺与控制模型,实现镀层厚度的精确预设。

2) 自主开发基于人工智能结合鲁棒控制算法的 PPA 预估控制系统,解决了镀层厚度控制过程中系统时变大滞后、非线性和多变量影响的控制难题。

3) 提出应用平均镀层厚度和偏差厚度联合控制策略,特别是相关控制手段的建立,实现了镀层差厚和横向镀层均匀度的精确控制。

4) 高质量的镀层厚度控制系统在鞍钢冷轧 5# 镀锌线上实现工业化应用,主要生产技术参数显示:镀层平均厚度偏差小于 3.2g/m<sup>2</sup>,比国际平均水平提高 1.13%;镀层均匀度  $2\sigma$  为 1.25g/m<sup>2</sup>,比国际平均水平提高 10.7%。在此基础上,经过不断创新完善工艺及控制系统设计与调优,尽快向冷轧 4# 镀锌线推广应用。

5) 开发典型退火工艺规程和生产技术,重点研发快速加热和高冷却速率的喷氢冷却系统,其冷却速率可达 100—250℃/s(2—1mm 厚带钢),通过高强带钢中试实验验证,解决喷气冷却生产高强钢冷却能力不足以及水淬冷却存在的问题。

6) 退火过程中合金元素扩散到基体表面的选择性氧化为外氧化,外氧化可以在基体表面形成更稳定的氧化物以防止基体腐蚀。内氧化是合金元素在基体次表面氧化,针对先进高强钢材料,将合金元素的选择性氧化控制为内氧化可以提高钢板的可镀性。

本项目的开发与实施,将形成完整的热镀锌质量控制技术和质量标准,促进钢铁行业连退热处理与热镀锌质量控制技术成果的推广与应用,对我国汽车、家电和建筑等相关行业技术与产品升级换代具有巨大的推动作用,而且可提高我国冶金行业在核心技术领域的创新能力与国际市场竞争能力,培养一批高素质的专业技术人才,为实现科技强国走出了坚实的一步。



東北大學  
Northeastern University



RAL