

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(九)

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校、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。

先进退火和涂镀技术与装备

1 研究背景

近年来,随着汽车、家电、建筑等行业的快速发展,冷轧板带市场需求不断增加,这极大地促进了我国钢铁行业冷轧卷板产能的扩张以及生产技术和装备的进步。然而,据有关统计资料显示,在我国所有钢材品种中,冷轧薄宽钢带、涂 layers 板、冷轧薄板、电工钢等品种仍然是国内市场自给率和占有率最低的产品。虽然冷轧薄钢板带国内总产能已经过剩,但在一些高端品种上尚不能满足需求而需要进口。为了解决上述问题,开展高品质冷轧产品关键共性技术的研究和工业化应用是关键。

退火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,受到钢铁生产企业和材料、工艺和设备研发机构的高度重视。目前,退火和涂镀技术与装备的发展方向是高性能、高质量、高柔性、低成本、低消耗和环境友好。为了实现上述目标,需要开发先进的连续退火和涂镀工艺、技术和装备。本文主要针对先进高强钢(AHSS)、涂镀板等高端冷轧产品在连续退火热处理和热镀锌工艺装备开展关键共性技术的研究,重点突破冷轧板快速加热、连续退火快速冷却和涂镀层厚度均匀化控制等工艺装备技术,实现工业化应用。

2 国内外现有技术研究现状

2.1 感应加热快速退火技术

感应加热是超快速退火的核心技术,早在 20 世纪 40 年代该技术就开始用于带钢的加热。直到 20 世纪 80 年代末,感应加热技术终于在铝带和铝合金带材的生产中成功实现商业应用。目前主要有两种感应加热带钢的方式,即纵向磁通和横向磁通法。以金属板带材为被加热对象,在纵向磁通感应加热情况下,由于感应电流的趋肤效应,当带材厚度降低到 2.5 倍的趋肤深度以下时,由于作用在带材的磁通量的减少,导致纵向磁通加热效率降低,加热的经济性也变差。对

于铁磁性能金属材料,当被加热到居里温度点(770℃)以上时,相对磁导率为 1,电阻率增大,导致趋肤深度急剧增加,此时采用纵向磁通再加热,需要极高的频率和功率,电效率和经济性极低,因此,纵向磁通高效率感应加热的最高加热温度一般不超过居里温度。

横向磁通感应加热(Transverse Flux Induction Heating,TFIH)可以克服纵向磁通感应加热存在的一些问题。近年来,由 Celes、安赛乐米塔尔研发中心和法国电力集团(EDF)联合研制的新型感应器采用了一套先进的监控系统。该系统能根据带钢性质、尺寸以及其他工艺参数自动调整和控制感应器的所有参数以及包括磁屏、磁棒及磁垫等各种磁场调节器的位置,基本解决了“带钢边缘过热或欠热”的问题,带钢宽度方向温度均匀性良好。该中试生产线有如下特点:拥有比传统技术功率强 10 倍的技术,加热速率 800~1000℃/s;带钢用感应器的电效率 75%~80%;温度均匀性小于 ±3%;比利时冶金中心也开发了一台半工业化超短流程退火线,设备的加热方式为电感应加热,针对厚度为 0.9mm 带钢的加热速率可达 200~1000℃/s,最大(水淬)冷却能力 900℃/s。目前,上述快速感应加热技术的应用还主要局限在中试线或半工业化试用,主要问题是在保证带材温度均匀性和加热速率条件下的用电功率巨大。特别是对于厚度 0.1~0.75mm 的不锈钢、高硅钢等极薄规格的特殊材料,在既要保证加热温度均匀性又要具有较高线速度来保证生产效率的情况下,其综合性应用技术、用电功率以及经济效益等,需要根据具体生产环境 and 应用对象进行评估。为此,我们提出火焰快速加热的方法,可燃气体采用乙炔、天然气或氢气燃烧加热。火焰加热优点:加热速率快,温度均匀易控制,热源利用率高,功率损失小,特别适用于宽带钢极薄带材在线快速加热,目前,国外已经有该技术的应用先例。

随着横向磁通感应加热、火焰加热等方法关键技术的突

破,快速热处理技术对生产高强薄带钢产品显示出广阔的应用前景。不仅是工艺流程缩短、节能降耗、提高产品质量和生产效率等,更重要的是为开发具有优异组织性能的新材料提供了途径。因此,建立超快速退火工艺与材料物理冶金学及其综合力学性能的关系变得非常必要和迫切。

2.2 连续退火快速冷却技术

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,目前先进的高速喷氢冷却技术的冷却速率可达 150℃/s(1mm 厚带钢),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,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。

为了解决高速喷氢冷却生产高强钢冷却能力不足的问题,以及水淬冷却存在的问题,需要开发更先进的冷却技术。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。传统的气雾冷却技术,对 1mm 厚的带钢,冷却速率只能达到 150℃/s,与目前的高速喷氢冷却的速率相当。另外,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。

2.3 镀层厚度自动控制技术

目前,国外先进连续热镀锌线上大多配有镀层厚度自动控制系统和装置,比如全球规模最大的钢铁制造集团安赛乐米塔尔公司在法国的 Florange

钢厂镀锌线在 2008 年开发了镀层厚度自动控制系统。韩国浦项钢铁公司在 2006 年也实现了镀层厚度的自动控制。国外热镀锌生产线在总结生产经验基础上,以调节气刀离开带钢的间距与气刀喷嘴吹扫空气的压力参数为主,形成了有效的控制模型。国内热镀锌线的建设起步比较晚,1979 年武钢建成国内第一条连续热镀锌生产线,直到 1990 年宝钢才建成第二条热镀锌线,宝钢热镀锌机组的锌层厚度控制方式采用传统 PID 控制实现反馈控制。武钢热镀锌其锌层厚度控制方法采用最优预测控制方法。采用闭环控制后,当速度发生变化时气刀会自动根据测厚仪的反馈值进行调节,可以实现均匀的镀层厚度控制。同时由于控制对象存在严重的非线性、时变、大滞后的现象,采用传统 PID 控制包括扩展 PID 控制都达不到要求的控制效果,必须采用先进的控制方法。同时镀锌过程存在大滞后、非线性和强耦合等的控制难点,国内未能实现自主开发应用,所以一直采用手动干预的方式生产。

2.4 镀锌退火工艺控制技术

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。虽然部分企业、院校及设计院通过不断的改造和引进走在镀锌连续退火技术的前沿,但从目前国内对连续退火技术的总体使用情况来看,各大钢铁企业、科研院所并没有完全掌握所引进的过程控制及数学模型系统(其中包括炉温控制数学模型、张力设定数学模型、炉辊凸度选择控制模型等)软件技术。考虑到热镀锌连续退火炉具有非线性、大滞后、多干扰、难于协调控制的特点,以及现代带钢热镀锌连续退火机组大型化、产品多样化、高质量和低成本的发展趋势,连续退火炉的过程控制及数学模型系统成为目前亟待解决的重要难题

之一。

目前,国内对于镀锌退火炉的过程控制模型系统过分依赖于进口。在深入分析带钢的热处理机理时,存在着两个问题:只能简单地使用国外的带钢温度生产控制模型,而不了解模型的来源;缺乏对带钢温度变化机理的理论研究数学模型。因此,目前的研究趋势是,要达到自主集成连续热处理炉的目的,必须要对带钢热处理过程进行系统科学地研究,建立完整的理论计算数学模型,再由其得到带钢温度生产控制模型。

3 研究内容及拟解决的关键技术问题

3.1 关键共性技术内容

1) 横向磁通感应加热技术与工业化应用。采用有限元分析方法,开展横向磁通感应加热的磁、热和运动耦合计算分析,优化感应线圈的设计,获得加热功率、频率等感应加热系统技术参数与带钢材质、尺寸、加热速率、出口温度和运动速度等工艺参数的关系,为感应器的设计和工业应用奠定基础。根据有限元分析结果,设计最优化磁轭和感应线圈的结构,开发适应不同带钢宽度、横向加热均匀的感应器。解决横向磁通感应加热实际应用中磁力引起的带钢振动、表面划伤、带钢加热区和未加热区温度差引起的带钢变形、大功率加热电源引起的电网平衡等工业化应用技术问题。

2) 火焰快速加热技术与工业化应用。可燃气体采用乙炔、天然气或氢气燃烧加热,前两者由特殊设计的烧嘴由氧气助燃完成加热,而后者氢气属于还原性气体,在确保安全控制的条件下可直接通过喷嘴进行带材加热。火焰加热优点:加热速率快,温度均匀易控制,热源利用率高,功率损失小,更适用于宽带钢极薄带材在线快速加热。

3) 先进气雾冷却技术。针对气雾冷却的换热机理,膜沸腾和核沸腾换热机制,冷却介质的热物性、液滴尺寸、气液比例、流量压力等参数对换热系数的影响开展基础性研究工作。探讨新型液态冷却介质,

上接 B04 版

如碳氢化合物等用于气雾冷却的可行性,研究它们的冷却效率以及表面氧化问题,获得新型冷却介质,既能提高冷却速率,也可减少带钢表面氧化。针对高速冷却带钢变形问题,用有限元模拟结合中试实验研究带钢在不同温度梯度场条件下的瓢曲机理,建立带钢板形与温度梯度、带钢张力以及带钢尺寸和强度之间的关系模型,获得减小带钢变形的冷却工艺。

4) 开发新型气雾冷却喷嘴,采用流体力学有限元分析和实验方法研究喷嘴结构对冷却介质冷却效率、速度场、压力场的影响,得到效率和均匀性最佳的喷嘴结构设计。在液态介质雾化和喷射角方面,保证喷嘴在各种流量比及压力条件下液滴尺寸和喷射角度基本不变。为了开展相关研究,建立一套气雾冷却实验系统。该系统可以模拟实际生产过程,为气雾冷却研究提供有效手段。

5) 热镀锌锌层厚度控制技术。研究气刀压力、距离等因素对锌层厚度综合影响,进行气刀流场对镀层影响分析,研究气刀在带钢表面喷气压力分布规律。建立气刀流场优化工艺参数模型,开发镀层厚度自适应模型,实现多规格带钢镀层厚度的精确预设定。开发气刀预测控制器,以及平均镀层厚度控制技术,研究镀层差厚控制策略,开发出上下表面镀层差厚控制技术,开发出在带钢品种变规格时气刀控制参数调整同步技术。

6) 镀锌退火炉热处理工艺机理和模型计算技术。建立热处理过程核心模型库,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、各段带温动态控制模型以及短期和长期自学习模型。建立加热段、冷却段及其他炉段的设定计算模型;建立热凸度控制模型;建立加热段、冷却段及其他炉段的能力计算与能力优化计算模型;建立包括加热段过渡控制、机组速度动态控制以及过渡卷管理功能在内的炉区动态控制模型。

7) 现有生产线改造。我国早期建设的带钢连续退火和镀锌生产线,大多都采用喷水冷却或辊冷,冷却速率低,不能完全满足高强钢生产需要。新建高强钢生产线,投资巨大。如果能改造冷速低的旧有生产线,使其具有生产高强钢的能力,其经济效益将十分可观。因此,改造旧生产线生产先进高强钢的技术路线是可行的。针对旧有喷水或辊冷连续退火生产线的改造,有两条技术路线,一是改造成高速喷氢冷却生产线,二是改为气雾

冷却或水淬冷却生产线。前者改造工作量小,难度小,投资少,周期短。其缺点是不能生产 980MPa 以上以及厚规格高强钢。气雾冷却则技术复杂,需要增加后续酸洗和感应加热提温系统,投资大,周期长,但改造后生产线的生产能力将大幅提高。

3.2 拟解决关键技术问题

1) 横向磁通感应加热的温度均匀性问题。横向磁通感应加热存在边缘效应,即带钢边缘与中间区域的温度存在一定的温度差。目前,国内外提出了多种边缘效应抑制或补偿方法,但还不能满足工程应用的要求,特别是高温加热极薄带材情况下,横向温度均匀性问题一直没有很好地解决。另外,为适应不同的带材宽度生产,变宽度带材横向磁通加热以及横向温度均匀性控制技术,也是一直以来国内外研究的热点。由于加热温度不均匀也导致了带材板形和材料力学性能差别问题。因此,如何设计新型感应器,解决上述问题,是横向磁通感应加热技术实现工业化的关键性技术问题。

2) 火焰快速加热工业化技术开发。火焰加热系统由气体混合系统、矩阵烧嘴、燃气与氧气流控制、输送管路以及电控系统组成。可燃气体采用乙炔、天然气或氢气燃烧加热,前两者由特殊设计的烧嘴由氧气助燃完成加热,研发两种气氛的内混合或表面混合技术与方法,通过控制气体流量和烧嘴数量来实现薄带材的纵、横向温度均匀化加热。而后者氢气属于还原性气体,在确保安全的条件下可直接通过喷嘴进行带材加热。据此,根据极薄带材生产工艺需求,研发多规格火焰加热装置,快速实现工业化应用是关键性技术问题。

3) 减少表面氧化技术。现有气雾冷却的方法,不可避免会造成带钢表面的氧化,需要后续酸洗等处理,这样会增加生产成本和设备投资。在气雾冷却中采用碳氢化合物、有机物等特殊的冷却介质可减少或避免带钢表面氧化。研究减少或避免带钢氧化技术与防氧化介质的机理、冷却效率以及对产品质量影响,是带钢快速冷却工艺过程中需要解决的关键问题。

4) 热镀锌线气刀流场优化工艺参数模型。在镀锌过程中,气刀是控制锌层厚度均匀性的关键设备。带钢从锌锅中拉出后,气刀利用高速气流的冲击作用将黏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,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有基本认识和理

解,采用有限元分析方法,确定气刀压力等因素对锌层厚度综合影响,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镀锌层厚度和均匀性,为建立精确锌层厚度过程数学模型,最终实现自动控制提供依据和基础。

5) 镀层厚度自适应模型的开发。针对镀锌过程对象模型在实际应用中存在的问题:模型的精确性不一致,当过程参数变化比较大时(如目标厚度动态变规格),模型精度就会发生衰减;模型的精确性存在时效性,在最初系统优化后的模型参数,经过一段时间应用后,由于生产环境的改变会变得更加不再适用,采用针对不同目标镀层厚度数据分析,开发镀层厚度对数空间的非线性偏最小二乘拟合、长周期和短周期自适应模型来解决问题,提高对象模型的精确性和时效性。

6) 连退(热镀锌)加热和冷却段换热过程模型化技术。①冷却炉段对流换热系数准确模型化。对流换热系数直接影响带钢表面的换热热流强度,进而影响带温计算的准确性,因此对流换热系数的模型化是带温模型建立的一个关键技术环节。②加热炉段辐射黑度和辐射换热的准确模型化。在加热室内,尤其是加热段和均热段,辐射换热是带钢表面与炉内进行换热的主要方式,而辐射换热黑度受到辐射管布置结构、炉内特性和带钢表面状况的影响,因此需要合理考虑炉内特性和带钢表面状况。③连退炉加热与冷却段带温动态模型的建立。目前对于连退炉带温动态模型的研究集中在加热室炉区,而对于冷却段炉区基本没有涉及,这直接影响了冷却炉段的控制调节。

3.3 拟采取的研究方案及研究计划

1) 针对横向磁通感应快速加热技术和火焰快速加热技术的研发,采用分析计算、实验研究和中试研究相结合的技术研发路线。首先通过电磁学基本理论进行分析,获得横向磁

通感应加热的功率、频率等基础数据,再通过有限元计算进行感应器的优化和温度场的预测,再由实验研究检查感应器的实际验证,来获得最终感应器结构和尺寸。最后,在实验室建立小型带钢横向磁通感应加热实验装置。同时,针对不锈钢、高硅钢等特殊材料设计制造一台火焰快速加热装置。结合近工业生产条件下考察整个系统设计合理性与可行性,针对我国常规及高强冷轧带钢产品生产需求,研究和评估横向磁通感应加热与火焰快速加热技术的工业化应用效果,最终实现具有针对性、高效率的连退热处理快速加热技术工程应用。

2) 针对气雾冷却技术,在实验室建立一套近工业化的气雾冷却系统,采用与大生产形式相同的喷嘴结构和供气供水方式,喷嘴的布置、相对带钢的距离以及带钢运行速度等也模拟实际工况,开展相关技术研究。同时,利用实验室现有的带钢退火模拟实验机(见图 1、2),开展特殊冷却介质气雾冷却技术的研究,甄选出理想的冷却介质,获得最佳工艺窗口。

3) 实验室有限元模拟实验。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部形状,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。

4) 实验室气刀流场动态模拟实验及现场气刀喷气压力实验。建立模拟气刀流场对镀层影响的动态模拟方法及其装置,通过电机带动滚筒作圆周运动,并应用精确的气压检测探头和高速照相机,确定气体压力和涂层厚度实际值。利用精确的流体压力传感器,在现场实测出气刀在带钢表面沿宽度方向上的压力分布,在不同压力和距离条件下,得出带钢表面在宽度方向上的喷气压力

分布规律。

5) 分析镀锌退火工艺过程,建立退火过程的传热体系。基于该传热体系,建立退火过程温度场,形成退火过程温度场耦合体系;同时结合传热特点和现有研究结论,借鉴相关研究成果,对各炉段内的传热进行合理简化,建立立式炉退火过程数学模型。并结合 CFD 或其他热模拟软件进行各炉段内传热的模拟分析,以现场实验结果验证和修正建立的退火过程数学模型。

6) 结合连退炉钢种的退火工艺,基于所建立的退火过程数学模型,进行连退炉稳态状况设定值的优化预测技术开发,实现炉温和线速度稳定状态下的设定值计算;考虑加热段热惯性、冷却段安装能力进行镀锌退火炉过渡过程动态控制模型的推导和建立,并尽量结合现场测量数据进行带钢动态控制模型的验证和修正。实现炉温和线速度的在线动态优化设定。建立各种模型的自学习功能,使模型能在未来的应用中具备自动调整模型系数的功能。

4 预期效果

1) 开发出近工业化感应快速加热技术和实验装置以及工业化应用相关技术,针对 1mm 厚、200mm 宽带钢,加热速率达到 150~200℃/s,加热温度达到 950℃,带钢横向温度均匀性达到 $\pm 5\%$ 。

2) 开发出全套高速喷氢冷却和气雾冷却及相关气氛密封和酸洗技术,争取实现工业应用。针对 1mm 厚带钢,高速喷氢冷却速率达到 150℃/s,气雾冷却速率达到 400℃/s,并且保证冷却横向均匀性和板形良好。

3) 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,进而产生巨大的经济效益和社会效益。

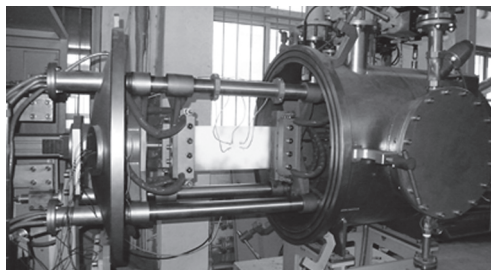


图 1 气氛保护带钢连续退火实验机

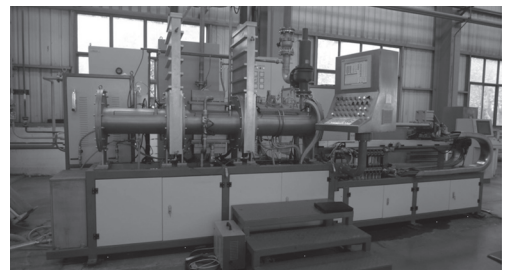


图 2 多炉室硅钢连续退火实验机



東北大學
Northeastern University



RAL