

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(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。

极限规格热轧板带钢产品热处理工艺与装备

1 研究背景

我国是世界第一产钢大国,中厚板年产量已达 7000 余万吨,中低档次普通中厚板产品过剩严重,但与此同时,我国部分高端高附加值中厚板产品仍主要依赖进口,其中绝大多数是热处理产品。国家已将海洋、交通运输、能源和重大装备等领域作为我国发展战略重点,这些领域对于高端热处理中厚板产品在产品性能和规格方面提出了更高的要求。

目前国内中厚板生产线普遍配备了包含辊底式热处理炉、周期式炉和淬火机等较为完备的热处理装备,这些装备最初主要从 LOI、DREVER 等公司引进,绝大多数具备了生产 10~80mm 厚热处理钢板的能力,部分企业通过改进和利用自主开发的设备具备了生产最薄 3~5mm 淬火钢板,最厚 200mm 淬火钢板的能力,但最大宽度仅限于 1800mm,不能满足工程机械大型化需求;对于厚度大于 120mm 的特厚板国内普遍采用浸入式淬火方式,因表面换热效率低、冷速可控性差以及厚向截面效应无法满足高品质特厚板热处理需要。

针对上述现状,围绕高等级热处理关键装备和核心技术,开发钢铁行业急需的特厚、超薄极限规格淬火和极限低温回火等高端板带钢热处理工艺及装备技术,对于提高我国中厚板热处理生产水平具有重要意义。

2 研究现状及进展

2.1 特厚板传统浸入式淬火在冷却强度等方面存在不足,需开发新的淬火装备和技术

目前,特厚板(钢板厚度大于 120mm)淬火生产主要采用浸入式淬火方式,通过池内冷却水搅拌加速钢板表面对流,实现较快速冷却。由于搅拌水流速度受淬火池或淬火槽容积及装置限制,相对于壁面射流换热,浸入式淬火冷却强度偏低,且因搅拌产生的水流速度在池内各处不一致,钢板板面各处冷却强度分布不均,导致钢板冷后淬硬层深度及组织分布不均。

目前,厚度 120mm 以下

中厚板普遍采用连续辊式淬火,钢板由辊道承载在冷却区运动淬火。因具有冷却强度大、冷却均匀、控制精度高、板形好等优点,这种淬火装备(淬火钢板厚度范围 10~100mm)被德国 LOI、美国 DREVER、日本 IHI 三家公司垄断,并对我国实施技术封锁。东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室在王国栋院士带领下,经过多年研究,自主开发成功国内首套辊式淬火装备,并推广至太钢、宝钢、南钢等企业,淬火钢板厚度拓展至 4~120mm。

尽管常规连续辊式淬火与浸入式淬火相比优势明显,但因高压段太短,低压段冷却能力不足,随着钢板厚度增加(>120mm),心部冷速和厚向截面效应成为两个不可逾越的技术瓶颈,因无法调和表面换热与内部导热的平衡关系,常规连续辊式淬火无法满足特厚板对心部冷速和厚向组织均匀性的需求,进一步限制了其在特厚板热处理领域的应用。

综上所述,传统浸入式淬火已不能满足高品质特厚板热处理生产及研发需要,需要开发新的特厚板淬火工艺技术及装备,实现国内特厚板生产企业特厚钢板高效能、低成本、减量化热处理生产。

2.2 薄规格钢板淬火技术需在稳定性、减少内部应力等方面进一步开展研究

高强度极薄调质钢板是大型装备制造的基础材料。这类钢板淬火敏感性高,宽厚比大,淬火后易瓢曲,且强度高难以矫正,板形问题是制约其应用的瓶颈,也是公认的国际性难题。

相对于常规中厚板来说,薄规格板带钢淬火过程中高冷却强度较易实现,但在冷却均匀性方面要求极为苛刻。目前极薄钢板淬火均采用气雾冷却、风冷及小流量水冷等“较低冷速”淬火策略。但在薄板淬火实际工业生产过程,钢板表面水流/气流呈现出无序性及不可控性,淬火条件的微小变化极易对冷却介质的流动特性及换热特性带来扰动,难以实现全板面温降、相变的协同作用,极易造成薄板淬火板形缺陷。为此,东北大学通过采用极限

冷速对高温钢板进行“瞬间冻结”,实现了 5(4)~10mm 板材淬火良好板形,取得了技术突破,并已经在南钢、涟钢、新余、湘钢(改造原设备)、酒钢等 10 余家企业得到了应用。

因此,针对性开展极薄钢板极限冷速瞬间淬火过程高效均匀换热机理及温度、应力、相变耦合变化规律的研究,系统解决淬火过程板形高平直度控制的难点问题,对满足工程机械行业的需要生产最薄 3mm 高品质高强薄板,具有重要意义。

2.3 极限低温回火技术对提高超高强钢板的性能稳定性意义重大

钢板热处理过程中良好板形及性能的均匀性与炉温的控制精度有直接的关系,一般要求偏差小于 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,对于低合金耐磨钢、超高强工程机械用钢等高端产品的回火工艺过程,一般要求炉温在 300°C 以下,回火过程对温度的变化较为敏感,因此用于此类产品生产的回火炉低温温度均匀性和控制精度要求非常高。

目前国内钢厂的回火炉大部分采用脉冲加热方式,只能在 300°C 以上工作时达到 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 左右的温度精度。炉温在 300°C 以下时,温度均匀性和控制精度都无法保证,偏差达 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 以上,因此会经常造成低温回火板材的性能、质量波动,不利于稳定生产。常规回火炉的这种缺陷是由其设备结构本身所决定的,无法通过简单的设备改造和特殊控制技术的使用来解决。

因此,研制与开发新型高精度低温回火炉对提升国内热处理装备技术水平、稳定高品质特殊钢的生产意义重大。

3 关键共性技术内容

3.1 热处理装备研制

3.1.1 特厚板辊式淬火机

特厚钢板专用连续辊式淬火机,配备喷水系统、供水系统、输送辊道系统和框架提升系统,可实现 120~250mm 厚钢板高强度均匀化淬火。喷水系统分高压喷嘴和中压喷嘴,沿输送辊道在辊道间隙上下对称布置,上喷嘴和上辊道固定在移动框架上,下喷嘴和下辊道固定在固定框架上;供水

系统分高压供水系统和在中压供水系统,分别向高压喷嘴和中压喷嘴供水,供水系统管路上设置开闭阀、流量计、调节阀,用于控制供水管路通断和管路内水流量;输送辊道系统由上辊道、下辊道、万向接轴、传动电机、变频器和编码器组成,精确控制钢板行进速度;框架提升系统由高压段固定框架、中压段移动框架、中压段固定框架、中压段移动框架以及移动框架提升系统组成,固定框架固定在地面上,移动框架由提升系统带动,按一定速度上下移动,实现辊道间隙调节。

研制的特厚钢板连续辊式淬火机与现有特厚钢板淬火装备相比,具有如下优点。

1) 采用整体超宽狭缝式喷嘴(简称狭缝喷嘴)作为高压喷嘴,采用多排整体倾斜式高密喷嘴(简称高密 I 型喷嘴)和多角度倾斜射流喷嘴(简称高密 II 型喷嘴)作为中压喷嘴。高压喷嘴瞬时冷却强度大,钢板宽向冷却均匀,可以在较短时间内迅速降低特厚钢板近表面区域温度,形成较大的厚向温度梯度,便于心部热量向表面传递;中压喷嘴持续冷却能力强,能够在不过分降低钢板表面温度的前提下,保持较大的钢板厚向温度梯度,持续较快速降低钢板心部温度,提高心部冷速。

2) 淬火冷却系统高压淬火区内狭缝喷嘴和高密 I 型喷嘴交错布置,避免因钢板近表面始终维持在较低温度造成的钢板表面与冷却水之间的过冷度小,提高了换热效率。

3) 供水系统采用供水压力和流量双闭环控制,实现各种不同类型喷嘴喷水流量和喷水压力精确控制,缩短喷水流量和压力的调节时间,扩大冷却强度调节范围,提升了特厚钢板连续辊式淬火机自动控制水平,使操作更灵活、简便。

4) 输送辊道系统设计过渡辊、压辊、螺旋辊、小径辊、框架间过渡辊和大径辊 6 种辊道,采用不同材质、辊径、辊身结构和驱动方式,实现钢板快速出炉、挡水、快速排水、表面冷却残水流量分区、框架间过渡等功能,提升了钢板运动换热、残水清除、单向运动和摆动

等功能的控制精度。

5) 框架提升系统设计高压淬火区框架提升系统和在中压淬火区框架提升系统两套系统,实现各淬火区辊道间隙单独可调,在单独使用高压淬火区或中压淬火区时,其他不投入使用淬火区上框架提升至非工作位,避免因高温钢板烘烤而产生上喷嘴变形,延长喷嘴使用寿命。

3.1.2 高精度低温回火炉

新型高精度低温回火炉,实现 $100\sim 650^{\circ}\text{C}$ 高精度中低温回火,用于屈服强度大于 1GPa 超高强钢板的回火热处理。回火炉采用强制对流加热技术,加热过程中高速的炉气直接冲击金属进行加热,辅以特殊的炉型结构将与钢板热交换过的炉气回收加热,形成炉内气流的高速循环。与传统回火炉相比该炉型传热效率更高,加热温度更均匀,可达 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内,具备炉内壁温度低,可大幅降低燃料消耗等优势。此外,开发的热处理炉改善炉衬工作条件,炉子热惰性小,升、降温灵活,有利于实现自动控制。

1) 强制对流加热条件下传热机理研究

针对强制对流加热的技术特点,研究不同温度下炉内热交换过程和强制对流加热条件下板带的加热规律,确定新型热风循环加热低温回火炉的传热机理和数学计算方法。

2) 均匀化强制对流循环加热系统及其关键技术优化

利用有限元模拟仿真炉气导热、均流系统,分析装备结构参数、气流压力和流量等对均流的影响,实现炉内热空气均匀化分配,进而优化炉内热空气导热、均流装备结构,实现强制对流循环加热系统最优化加热。

3) 强制对流冲击加热控制

研究适用于强制对流冲击加热技术的控制模型,建立新型高精度低温回火炉全自动智能控制系统,以及实现温度精确控制,满足高性能钢材高品质、高效率、低能耗、低成本生产的需要。

新型高精度低温回火炉工

上接 B04 版

艺技术复杂,加热过程控制难度大。开发的关键在于热流引导结构的设计、炉气均流装置的设计及其沿炉长方向的合理布置。解决这些技术难点需要高水平的流体力学和传热学技术,国外相关厂家将其视为核心关键技术,对我国进行封锁。因此,如何设计开发出最优的大型强制对流循环加热系统,进而开发出具有自主知识产权和核心专利技术的工艺控制技术是本课题拟解决的关键技术难题。

3.2 高等级钢板热处理工艺及产品开发

3.2.1 极限薄钢板(3-10mm)高平直度淬火工艺开发

薄规格板材均匀化淬火工艺是钢板淬火领域内的核心技术,具有重要的实用价值,但因其对淬火过程的冷却均匀性要求极高,冷却过程影响因素众多,对淬火设备结构参数及工艺参数非常敏感,淬火过程的板形控制难度很大。

相对于常规中厚板来说,薄规格板材淬火过程中高冷却强度较易实现,但在冷却均匀性方面要求极为苛刻。这里主要在淬火系统对称性结构、流量分布、淬火运行速度及钢板自身条件等方面分析对冷却均匀性的影响。

薄规格板材淬火后残余应力达到一定值时,钢板即出现失稳屈曲,按照板材的弹性屈曲理论,在理想弹性状态下,板材的临界屈曲应力为:

$$\sigma_{cr} = \frac{KE\pi^2(t/b)^2}{12(1-\nu)^2}$$

式中, σ_{cr} —临界屈曲应力; K —临界屈曲应力系数; t —钢板厚度; b —钢板宽度; ν —材料泊松比。

从临界屈曲应力的计算公式可以看出,淬火钢板厚度越薄,宽度越宽,临界屈曲应力越小,越容易发生对冷却均匀性极为敏感的淬火变形。故薄规格宽幅钢板的辊式淬火板形控制过程是研究中厚板淬火变形问题的难点。

1) 关键设备结构参数对称性冷却技术

薄规格钢板对冷却系统的均匀性更为敏感,其中钢板上下表面的对称性冷却对板形有重要的影响。钢板淬火过程中

的对称性冷却可以理解为两个方面,首先在单侧的冷却区域内的均匀冷却,考虑到钢板是连续式通过淬火区域,在单个喷嘴参数调整方面主要考虑钢板宽向的冷却均匀性;其次,淬火过程中保证钢板上下表面冷却区域内冷却强度的对称性。

单个喷嘴的机械参数调节主要有射流角度、缝隙宽度和喷嘴距钢板表面的位置参数,如图1所示。

假设在理想的条件下,上下缝隙喷嘴水平度、狭缝开口度均匀一致、完全对称、上下缝隙到钢板上下表面的距离完全相等(辊缝完全等于钢板厚度)、上下水幕面与钢板表面形成的二面角完全相等。在喷射速度快、压力高的条件下,忽略重力对射流射线的影响,则上下缝隙喷嘴入射点应该是对称的,即钢板在同一个铅垂面上,由于钢板薄,缝隙喷嘴水量大,淬透性强,即仅缝隙喷嘴就将钢板温度降至马氏体相变温度点以下。当上下淬火系统结构出现不对称时,先喷射到钢板上的水幕会造成单面淬透现象,宏观表现形式为淬火后钢板始终呈现头尾上翘或下扣,因此,不管如何极端设定控制喷嘴水量、水量比和辊道速度参数,也无法改变超薄规格钢板淬火后板形的变化总趋势。

在实际过程中,要确保对称的距离参数及角度参数相等,而且要确保喷嘴沿钢板宽度方向的两侧均保持一致,即确保上下喷嘴喷射水线的三维对称精度。此外,淬火机辊道平直度控制和调节很重要,下部辊道应水平,钢板应沿中心线进行运动,上辊道的中心线应与下辊道的中心线在一条基准线上,不能发生偏移,特别要注意辊道正确找平,尤其是高压喷嘴区的辊道,否则钢板通过该区时极易发生变形不能保持平整。

2) 关键工艺参数高精度控制技术

水量参数是满足低合金高强度钢板淬后组织和性能的重要工艺参数,也是保证薄规格钢板均匀性冷却的决定性因素。冷却水量对淬火冷却过程钢板表面换热系数有一定的影响。随着冷却水量的增加,钢板表面换热系数逐渐增加。达到一定水量后,水量增加对换热能力的提高效果不明显。

淬火过程钢板上下表面的水量比是板形宏观翘曲变形的决定因素。射流冲击换热过程中,钢板上表面受残留水影响,而下表面冷却水由于重

力作用自然下落,故上下水量比小于1,一般在0.6-0.9左右。钢板在淬火过程中,若水量比设定小于实际需要的设定值时,钢板上表面冷却速度大于下表面,先行淬火的钢板头部略向下凹,产生向上的翘曲变形。变形量很大时,钢板头部的上翘将受到上排辊道的反作用力。随着淬火进程的继续,钢板出现向上的中凸翘曲变形,导致淬火后钢板上凸。

钢板在辊式淬火机内的运行速度快慢,直接影响了钢板在高压冷却区的淬火时间。同时,淬火运行速度对淬后钢板板形也有一定的影响。淬火过程钢板上下表面水量设置有一定的比例关系,下水量大于上水量,尤其高压冷却区的水量比对板形的影响最为明显,当设定比例不合适时,辊速的减慢会扩大水量比对其板形的影响。辊速的降低,高压段的冷却时间增长,相当于增加了下表面的冷却强度,因此在板形控制过程中,辊速在某种程度上相当于水量比的影响。当钢板速度增加,钢板在高压淬火区时间将减少。钢板高压区淬火时间减少将显著影响钢板上表面,导致钢板出现瓢曲变形。

3) 钢板自身条件对均匀冷却的影响

钢板自身条件是指板温、板形、表面质量等,它们对钢板冷却均匀程度有着重要影响。

如果钢板表面存在氧化铁皮,由于其与钢的导热系数不同,将降低水的冷却效果;氧化铁皮的不均匀分布,导致钢板不均匀冷却。钢板表面存在麻点或其他缺陷,也将对钢板的冷却均匀性带来不利影响。在某种特定的淬火工况条件下,随着氧化铁皮厚度的增加,钢板表面综合对流换热系数呈急剧下降趋势,当氧化铁皮厚度为0.2mm左右时,表征钢板淬火过程热交换速率的对流换热系数降为正常过程的1/3。所以,淬火钢板的氧化铁皮分布情况也就直接影响到冷却过程的均匀性。为了保证薄规格钢板淬火过程的表面均匀性及上下表面的高度对称性,严格控制氧化铁皮的含量是必要的。抛丸机的质量直接关系到抛丸后钢板的表面质量,若抛丸及清扫不彻底,将氧化铁皮带入炉内,很容易造成炉底辊结瘤,不仅划伤钢板表面,而且结瘤清理困难。因此抛丸质量的好坏是影响产品表面质量的关键因素之一。

淬火前板温的不均匀直接决定了淬火开始温度的差异,在整个淬火过程中由于不同的组织变化带来不同程度的钢板变形。这点对薄板淬火过程尤为重要,一般来说同板温差需小于5℃。如果淬火前钢板存在着浪形和翘曲,那将会严重地破坏钢板的均匀冷却,因为钢板不平必引起冷却水分布不均匀。无论采用什么样的厚度和板形控制技术,所轧制产品总是要存在同板差和板凸度的。同板差的存在会引起板长方向和板厚方向的不均匀冷却;板凸度的存在会引起板宽方向和板厚方向的不均匀冷却。一般来说,钢板两边部存在压应力,加上冷却不均匀引起的热应力和组织应力,就会诱发钢板变形。因此,尤其对薄规格钢板来说,要尽可能控制及消除轧制、抛丸等工艺过程板形的变化。

3.2.2 特厚钢板(120-250mm)极限快速淬火工艺开发

厚度小于120mm特厚板,高温区(900-600℃)表面冷速增大对心部冷速提升较明显,因此,高温区采用冷却能力较强的缝隙喷嘴,快速降低钢板表面至1/4处温度,强化心部导热,提升整体厚向平均冷速,进而提高厚向组织均匀性。由于缝隙喷嘴过后钢板表面温度迅速降低至终冷温度,在缝隙喷嘴之间设计冷却能力相对较小的高密喷嘴,维持心部温差,在不影响厚向温度梯度的前提下节约不必要的冷却能力。中温区冷速对厚度小于120mm特厚板心部冷速影响不大,采用相对较低压力、较小流量的高密喷嘴,仅维持钢板内部导热处于上限值,不过度增加表面冷速,长时间持续降低钢板心部温度。

在表面冷却强度达到一定值(例如150mm,80℃/s)后,厚度大于120mm特厚板心部导热已近上限值,表面冷速变化对心部冷速影响不明显,进一步加大表面冷速作用不大。而心部至表面的导热能力更多取决于材料本身热物性参数,表面冷速只要维持钢板厚向温度梯度,即表面温度维持到一定值(120℃左右)即可。因此,仅采用冷却能力相对较弱的高密快冷喷嘴,维持一定的冷却能力。为增加方案的可靠性,钢板快速进入到冷却区,先以较高水压、较大流量较快速降低钢板近表面至1/4处温度,再调整水压和流量,以相对较

低的冷却强度进一步维持心部导热上限值与表面换热的平衡,持续降低整体温度。

3.2.3 超高强结构用钢、耐磨钢的研制

超高强度结构用钢Q1300和耐磨钢NM600代表了目前调质钢板的最高水平。它们不但要求具有极高的强度,而且要求具有良好的韧塑性、焊接性和板形平直度,生产难度极大。该两种钢板主要被应用于超大型工程机械、矿山机械及水泥化工等装备的制造。目前世界上仅有瑞典钢铁公司(SSAB)可以生产。

两种钢板的主要力学性能指标要求为:

Q1300: $R_{p0.2} \geq 1300\text{MPa}$, $1400\text{MPa} \leq R_m \leq 1700\text{MPa}$, $A \geq 8\%$, $KV_2(-40^\circ\text{C}) \geq 27\text{J}$; $NM600: 570 \leq \text{HBW} \leq 640$, $KV_2(-20^\circ\text{C}) \geq 20\text{J}$ 。

其研究内容主要包括:1) 超高强度结构用钢Q1300和耐磨钢NM600的成分设计;2) 超高强度结构用钢Q1300和耐磨钢NM600的热轧—冷却—热处理一体化组织性能控制技术研究;3) 工业生产过程中铸坯的低/无缺陷控制技术,包括铸坯的低夹杂物控制技术、防开裂控制技术、防氧化控制技术等;4) 大宽幅高内应力薄规格钢板(4-10mm)轧制、热处理过程中的板形控制技术研究;5) 超高强度结构用钢Q1300和耐磨钢NM600的焊接技术研究;6) 超高强度结构用钢Q1300和耐磨钢NM600的抗延迟断裂性能研究;7) 超高强度结构用钢Q1300和耐磨钢NM600的切削加工技术研究。

这两种钢的研制,将带动调质钢从冶炼到热处理的整体技术发展,并形成一整套热轧—冷却—热处理一体化组织性能控制技术。

4 预期效果

围绕高等级热处理关键装备和核心技术,通过4年时间开发成功如下关键技术与装备并形成示范线:1) 淬火厚度为3-10mm极薄规格淬火关键技术和成套装备;2) 100-250mm特厚规格钢板淬火关键技术和成套装备;3) 大型板带钢低温高精度回火装备技术,最低回火温度为100℃;4) 超高强结构用钢(Max 1300MPa)、耐磨钢(Max HB600)高端热处理工艺技术及产品。从而实现极限规格热处理装备、工艺技术及产品的创新突破。

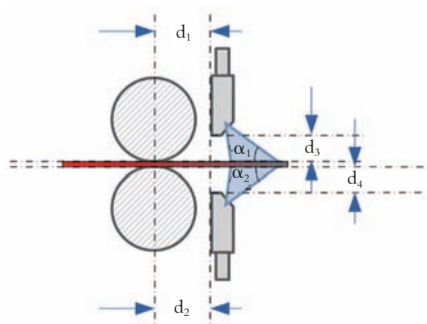


图1 缝隙喷嘴位置参数

