

## 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(八)

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。

# 高精度板形控制技术与装备

## 1 研究背景

冷轧带钢的组织性能、尺寸精度和表面质量对轧制技术、工艺装备和自动化控制提出了严格的要求。随着汽车、电力和家电行业对冷轧产品性能和质量的日益提高,给高端冷轧产品的研发与生产带来了挑战。目前,我国高端冷轧产品的产量占比不及发达国家的一半,先进高强钢(AHSS)、高质量硅钢、冷轧薄宽带等产品进口比率高,自给率低。这表明我国在冷轧产品质量和高端产品生产技术等方面与发达国家存在较大差距,急需开发先进的冷轧工艺、装备和产品,促进产品结构调整和技术升级。开发先进的冷轧工艺、装备和产品,促进产品结构调整和技术升级是冷轧金属材料生产领域的关键共性技术。东北大学钢铁共性技术协同创新中心“先进冷轧、热处理和涂镀工艺与装备技术”研究方向,围绕高精度冷轧板形和硅钢薄带边部减薄控制与装备技术,高硅钢薄带连铸+温轧工艺、装备和自动化控制生产技术领域开展工作,实现冷轧工艺过程关键共性技术的理论研究、工艺装备和高硅钢冷轧产品的研发与工业化推广应用。

## 2 国内外技术研究现状

2.1 平整(光整)机板形平直度控制技术  
在冷轧薄带平整过程中,带钢受到较大的张力作用,很多情况下,虽然轧制时显示的板形良好,但成品板形不好,因此需要测出带钢潜在板形缺陷。国内外绝大多数冷轧生产线采用ABB、BFI公司生产的接触式板形测量辊。国内燕山大学与鞍钢合作开发的板形辊采用了先进的数字信号处理技术DSP和无线通讯技术,也取得了良好的应用效果。在板形控制理论方面,国际上广泛使用的是基于正交分解板形控制原理,只有少数国外公司,例如SIEMENS、ABB等掌握了基于模型自适应与板形控制执行机构影响效率函数相结合的多变量板形闭环控制系统技术并实现了工业应用。

国内各钢铁研究单位也开展了板形平直度控制的相关研究,主要集中在板形检测系统

仪表和数据信号处理分析。其中东北大学、燕山大学与鞍钢等大型钢铁企业合作,在板形检测和高精度板形控制技术领域取得重大进展。北京科技大学等科研院所对板形控制方法也做了很多理论和应用研究。

### 2.2 边部减薄控制技术

日本、德国等先后开发出边部减薄控制技术,可大幅度降低冷轧特别是硅钢产品的边部减薄量,甚至特征点的边降值达到 $5\mu m$ 的水平。特别是日本日立公司的边部减薄控制方法,已经能够实现稳定工业应用。国内在边部减薄控制技术方面,相对发展较慢,基本没有形成工业应用级的边部减薄控制系统,所有在线应用的边部减薄控制技术,如首钢迁钢硅钢、武钢二硅钢等,都来自日本日立公司。在理论研究方面,国内也进行了一些有关边部减薄控制方法的研究,形成了一些专利技术。

### 3 关键共性技术研究内容

#### 3.1 高精度冷轧板形平直度控制技术

板形平直度是冷轧产品最重要的质量指标,冷轧机板形平直度控制系统是轧钢技术领域最复杂的控制技术。高精度冷轧机板形控制核心技术是轧制工艺、轧制理论、测量系统、控制系统、过程控制数学模型与工业应用的集成化技术,是冶金领域高科技控制技术的代表。轧辊倾斜控制、工作辊弯辊控制、中间辊弯辊控制和工作辊分段冷却控制是实现高精度板形控制关键技术,冷轧板形控制系统具有典型的多变量、多控制回路、非线性、强耦合、时变性强的特征,是最复杂的控制系统之一,是冷轧板形控制的核心技术。

鞍钢冷轧平整机所采用的板形检测系统和板形控制系统,是基于无线通讯方式的DSP信号处理系统,实现了冷轧平整板形信号处理计算与板形控制计算机系统无线数据连接,分布式计算机控制系统对冷轧带钢平直度进行实时在线控制。基于板形平直度优化控制模式识别技术,建立冷轧板形控制目标线性模型。针对执行器影响效率函数控制模型,开发出高平直度板形调控效率

自适应学习模型,实现轧辊倾斜、工作辊弯辊等板形控制多执行器的协同工作,提高平整板形高精度控制能力。为此,东北大学与鞍钢合作,开发高精度冷轧平直度板形控制系统核心技术并在冷连轧机生产线推广应用,对全面提高我国轧制产品质量,打破国外技术垄断,节约设备投资具有重要意义。

#### 3.2 板形缺陷产生机理与控制原理

在宽带钢的冷轧过程中,辊缝的宽度要比辊缝的长度大得多,在辊缝中带钢质点沿宽度方向的流动要比沿轧制方向的流动困难得多,因此可以认为带钢质点只沿轧机出口和入口两个方向流动。这就是带钢在冷轧过程中可以近似认为没有宽展,只有沿轧制方向延伸的原因。根据金属体积不可压缩的原理,压下量较大的纤维条,其在轧制方向上的延伸也较大。由于轧件是一连续体,各纤维条不同的延伸必然引起纤维条相互间的牵制效应,延伸较长的纤维条受到压应力,较短的受拉应力,形成内应力场。当压应力达到某一临界值时,受压应力作用的地方便发生屈曲失稳,产生浪形等板形缺陷。带钢板形控制就是通过各种调节方法使承载辊缝形貌与带钢形貌保持一致。板形闭环反馈控制是在稳定轧制条件下,使用实测的板形信号,通过反馈控制模型计算获得良好板形时所需的板形调控机构调节量,不断地调节轧机的板形调控机构,如液压弯辊、轧辊横移、轧辊倾斜、工作辊分段冷却控制等,使得轧机能对轧制过程中带钢板形进行连续的、动态和实时调节,从而保证带钢获得良好的板形质量。

#### 3.3 分布式板形控制计算机系统

板形控制系统是带钢冷轧板形控制的核心技术,本项目开发出分布式板形闭环控制系统,将整个板形控制系统的数据采集、信号处理、数据通讯、控制模型、执行器控制等各子功能由不同计算机完成,通过网络数据通讯方式将不同计算机联成一体。

板形控制系统的硬件组成

主要有:板形信号采集单元、PROFIBUS-DP 控制单元、板形控制器、HOST 计算机以及 PLC 系统等部分组成。板形控制计算机是一个模块化的嵌入式控制器,这里称为板形控制器。它是板形控制系统的核芯组成,承载着板形数据的处理、板形调节机构调节量计算以及大部分的通信工作。板形控制器是一块插板,通过 ISA 总线插槽与 HOST 计算机相连。板形控制系统所有的闭环控制程序都在板形控制器上面运行来实现板形控制功能。板形控制系统软件主要包括运行在板形控制器上的实时程序、运行在 HOST 计算机上的通信程序以及 HMI 系统程序和相关辅助程序。板形控制器上运行的实时程序使用 Borland C 开发,主要进行板形数据的处理、控制量计算和通信工作。

板形控制系统包含功能完备的在线板形控制处理模型系统。如:基于多功能补偿修正目标曲线设定模型、带钢边部修正计算模型、板形辊径向力计算模型以及测量辊包角变化计算模型基础,特别是轧辊分段冷却计算模型、带钢跑偏修正计算模型、中间辊窜辊轴向力计算模型等实时工艺控制模型,是保证冷轧薄带材板形检测和板形控制与在线应用的重要内容。

#### 3.4 多目标板形闭环控制

基于自主研究的影响效率函数理论,通过数值解析方法构造出轧辊倾斜、工作辊弯辊、中间辊弯辊、中间辊窜辊等各个板形控制执行器的影响效率函数。由板形控制执行器影响效率、板形实测值与目标值偏差、板形控制影响因子和板形控制各执行器调节量等构建板形控制评价函数,通过最优化方法计算出使该评价函数最小值条件下的各执行器调节量的最小值作为一次闭环控制的输出值,从而实现了多变量的最优化板形控制。该方法可以适应具有不同板形控制执行器的轧机控制要求,只需定义并计算出执行器的板形影响效率函数即可,具有通用性。

#### 3.5 板形调控功效系数在线优化

板形调控功效系数是板形

控制的基础,在板形控制中极为重要。为了获得精确的板形调控功效系数,制定了板形调控功效的自学习模型。在正常轧制模式下,通过测量轧制过程实际板形数据,以及板形调节机构的当前调节量就可以在线自动获取板形调节机构的调控功效系数。功效系数的自学习过程是:在对轧机进行调试时,根据板形调节机构的调节量和产生的板形变化量,计算几个轧制工作点处的板形调控功效系数,这些功效系数作为自学习模型的经验值,然后不断通过自学习过程来改进功效系数的经验值,进而获得较为精确的板形调控功效系数。

#### 3.6 工业应用

东北大学与鞍钢、燕山大学合作开发的冷轧机板形控制技术,在鞍钢 1250mm 六辊冷轧机、迁安思文科德酸轧机组等生产线上得到成功应用。基于板形调控功效系数的多变量优化反馈控制模型,形成矩阵动态优化和自适应智能控制策略,建立多执行机构板形闭环控制系统的解耦控制算法,自主开发冷轧板形核心应用软件,成品带钢板形平直度综合精度保证值小于 7I,实现冷轧薄带材高精度板形控制和板形技术的推广应用。

## 4 冷轧硅钢边部减薄控制技术与装备

冷轧硅钢产品用于电机或变压器制造时,同板厚差导致叠片系数减小、磁通密度小、空隙增大、磁感应强度降低、激励电流大,电气设备的电磁转换效能低。为了提高冷轧产品的同板差,减小切边量,提高产品的成材率,国外发达国家开发了边部减薄控制技术,这是冷轧带钢生产中继厚度控制和板形控制之后的又一重要的技术进步,是冷轧硅钢生产不可或缺的核心技术。日本三菱日立公司在冷轧带钢边部减薄控制领域具有垄断地位,国内的宝钢、武钢、首钢、太钢等的硅钢冷连轧机均引进日本三菱日立全套边部减薄控制技术。

#### 4.1 冷轧板边部减薄控制机理

边部减薄是带钢轧制过程

下转 B05 版

上接 B04 版

轧辊弹性变形与带钢金属发生三维塑性变形共同作用的结果,产生原因:轧制过程中工作辊发生弹性压扁,边部金属有较大的延伸趋势,引起轧件边部厚度发生较大的变化,带钢边部支撑辊对工作辊产生一个有害的弯矩,带钢边部金属和内部金属在变形过程中的流动规律产生差异,从而造成带钢边部厚度相对中部减薄。

#### 4.2 工作辊窜辊工艺与辊形设计

轧机工作辊窜辊系统简称 WRS,是控制边部减薄的重要方法,其原理就是通过改变轧机工作辊的机械结构,增加工作辊窜辊液压缸,使得工作辊能够沿着自身轴向自由移动。同时通过优化工作辊的辊形曲线(如 CVC、T-WRS),降低带钢的边部减薄,提高轧后带钢的横向厚度精度。辊形设计即在工作辊边部磨出一段锥形辊形,辊形段包括直线段与曲线段,曲线段的一部分宽度为实际工作段。在单锥度辊形的作用下,必然会形成边部局部增厚。在不同机架,带钢的厚度、宽度、压下率、变形抗力、摩擦系数各不相同,则在带钢边部形成边降区的幅值、宽度范围不相同,而同时锥度辊形对边降区产生边部局部增厚以及对出口带钢边部应力分布的影响关系也不相同。因此,需要在各个机架进行合理的工作辊边部辊形设计,辊形锥度弧长与辊形重合范围均应从上游机架由大到小设置,这样可以从理论上完全消除边降区。锥度辊形抵消宽幅边降的有效性:在上游机架产生的宽幅边部增厚(约为 70~120mm),不但抵消了该机架发生的宽幅边降而且能够弥补下游机架将要产生的边降。工作辊辊形锥度越大,边部增厚也越大,从而边降控制效果越好。但是当锥度超过一定限度时,下游机架边降控制改善将不明显,即辊形抵消宽幅边降的有效性存在临界值。

#### 4.3 单锥度工作辊窜辊边部减薄核心控制技术

针对冷轧带钢生产,开发二级计算机系统控制模型。该模型包括边降预设定控制模型、边降设定控制模型、边降再设定控制模型、串辊量自学习控制模型、串辊边降调控功效系数自学习控制模型、凸度动态设定控制模型、楔形动态设

定控制模型。一级系统控制模型包括边降闭环控制模型、工作辊窜辊的弯辊补偿控制模型。为获得最佳的边部减薄控制效果,边部减薄控制的基本策略:1)将来料热轧带钢的凸度情况用于工作辊的前馈设定计算中;2)将出口的成品边缘降情况反馈实现闭环反馈控制;3)根据工作辊窜动位置的变化给予工作辊弯辊的补偿控制。其数学模型主要包括 3 个部分:前馈预设定控制模型、闭环反馈控制模型和弯辊补偿模型。

边部减薄反馈控制程序是边缘降控制系统的核程序,其控制模式分为 1#~3# 机架的控制模式和 1# 机架单独控制模式。两种控制模式都是由边缘降实际值检测、边缘降状况评价、边缘降修正量计算、工作辊轴向位移反馈修正量计算和工作辊轴向位置校核与 5 个基本修正模块组成。单锥度工作辊窜辊与边部辊形示意图见图 1。

#### 4.4 工业应用

上述边部减薄技术,在鞍钢 1500mm 无取向硅钢连轧生产线上得到应用。采用单锥度工作辊横移技术对于减低硅钢薄带边部减薄具有显著作用,锥度工作辊横移放置在不同机架,其改善带钢边部较薄的效果不同,放置在 1# 轧机可以改善 40%,2# 轧机可以改善 30%,其余轧机总体改善效果不超过 30%。参照国内外冷轧硅钢生产线的经验和理论分析的结果,将 1500mm 硅钢 UCM 连轧机 1#~3# 机架改造为具有工作辊窜辊功能的 UCMW 轧机。由改造前带钢的边降精度  $\leq 20 \mu\text{m}$ ,横向同板差超差严重,无法生产高质量的硅钢产品,到改造后带钢的边降精度  $\leq 3\text{--}5 \mu\text{m}$ ,最佳稳态控制的边降精度  $\leq 2\text{--}3 \mu\text{m}$ 。有效提高了硅钢薄带轧制横向同板差尺寸精度。

#### 5 难变形材料温轧技术与装备

温轧是针对常温下难变形金属或脆性材料,在冷轧设备基础上,采用特殊手段对带钢材料进行加热,在特定温度范围内进行微张力轧制的一种先进制备技术。目前,温轧轧制工艺在钢铁生产过程中受到普遍关注。温轧过程中,带钢加热温度通常低于材料的再结晶温度。由于温轧时材料的塑性变形能力得到明显的提高,与冷轧相比,材料容易变形,边裂

或龟裂问题减少,同时又没有热轧的缺点,特别是在降低轧制道次,提高生产效率应用方面具有显著作用。在实际生产过程中,将温轧与冷轧工艺相结合具有独特功能,在难变形金属以及脆性较大的超高强度钢、高硅电工钢以及镁合金等金属材料的轧制过程中具有重要的作用。

#### 5.1 金属薄带在线快速加热技术

难变形金属薄带材料快速加热是一项非常复杂的提温技术,由于薄带材蓄温能力差,导致薄带材的温度范围很大,因此,考虑生产条件下的在线加热,加热系统必须要有足够的加热速率。目前,温轧在线加热手段主要有超高频感应加热和快速火焰加热两种方法。前者由于温轧带材的最终产品厚度很薄,采用纵向磁通感应加热的电热效率低,带材加热均匀性差,电功率损耗巨大,难以满足高速连续温轧工艺要求;采用横向磁通感应加热电热效率相对较高,但横向磁通感应装置和感应器设计复杂且匹配性差,特别是在高速温轧过程中电功率消耗巨大,目前,该技术还处在中试阶段。而后的快速火焰加热技术对薄带材快速提温工艺过程实用性较强。火焰加热是采用乙炔或天然气通过氧气助燃的方法实现对金属薄带材火焰直接喷射快速提温(也可采用全氢气快速加热),由特殊设计火焰喷射在线加热装置,其喷嘴采用耐热陶瓷材料制造,乙炔与氧气的气量配比由自动配气系统供给,根据薄带材物理尺寸和加热速率需求,自动调整喷嘴组数和气体流量,实现快速加热。如果有条件采用氢气燃烧加热,在提高加热效率的同时实现对金属表面的还原作用,可显著提高带材表面质量。试验证明,针对薄带金属材料的火焰加热技术,其效率、均匀性和热能利用率远超感应加热。

#### 5.2 轧辊辊面恒温控制与炉卷箱保温技术

温轧过程中,轧辊的吸热对零件变形区的温度有很大影响,因此,必须严格控制轧辊的温度,才能获得理想的温轧以及零件板形效果。轧辊温度控制采用轧辊加热方法,目前所采用的各种加热方法的加热效率、温度均匀性、轧制过程中轧辊温度的变化规律各有其特点,但均能满足轧辊加热及恒温控制要求。

为了实现温轧工业化生产,除了轧材需要在线加热,轧辊(工作辊)加热并恒温控制也是非常重要的。工作辊加热通常采用油加热、中频感应加热以及火焰加热等手段,一般采用中频感应加热,通过辊面温度检测与控制来实现辊面温度恒定。由于零件薄蓄热能力小,出加热区降温很快,为此,将轧机左右两个卷取机均设计成炉卷箱结构,通过炉卷箱内的电加热器件将薄带材加热到一定温度,带材在出炉卷箱后通过二次提温后进入轧机进行温轧,从而达到温轧工艺要求的温度。

#### 5.3 温轧工艺实验研究

为了开展温轧工艺研究,RAL 实验室对其自主开发的高精度液压张力冷轧机实验轧机进行了改造,在原有液压张力机构的基础上增加一套在线加热装置对单片试样进行在线电阻加热,在轧机两端安装测温仪,可实现从室温至 800°C 温度范围内的带张力恒温轧制工艺实验研究,其关键技术包括以下几个方面:试样在线

电阻加热、温度测量、变形区温度控制、微张力控制等。该实验轧机试样在线加热采用电阻加热方法直接加热轧制中的单片带钢试样,实现单片带材恒温轧制,这是温轧实验轧机所具有的独特功能。对单片试样加热工艺过程如下:将特殊设计的液压夹持装置通过设置在轧机两端的液压张力油缸及具有绝缘隔离作用的液压钳口分别夹持在单片试样两端,采用可控硅调压系统将低电压大电流直接作用在单片试样上,通过温度控制器设定对试样进行在线通电加热,通过设在轧机两端的温度测量仪对试样表面温度进行在线测量,PLC 温控系统将对带材加热目标温度进行温度闭环控制,从而获得较为稳定的试样在线工艺温度进行恒温轧制,通常对厚度在 3.5mm 的单片试样最高加热温度可以控制在 800°C 左右。

#### 5.4 变形区温度与温轧微张力控制

试样温度分为三个阶段:轧前温度、变形区温度和轧后温度。测温仪能够测量的只有轧前温度和轧后温度,变形区温度通常是无法测量的。变形区是薄板与轧辊接触的地方,轧辊会在瞬间将零件温度降低。

薄带材在温轧过程中需要进行微张力控制。这对张力缸

运行滑轨的摩擦系数和张力缸密封阻尼要求较高,需要精确的控制算法和快速的伺服响应系统。当张力液压缸工作在张力闭环时,通过伺服阀控制的进出油流量不仅用于张力液压缸张力调整,还要用于控制张力液压缸的运行速度,故张力控制器由速度为基准的前馈控制器和以张力为基准的反馈控制器两部分组成。

前馈控制器的输入信号为张力缸的线速度预设值,输出信号为伺服阀的前馈控制量。而张力缸的线速度预设值需要精确的前滑和后滑系数,对于无法安装测厚仪的温轧机来说,轧制厚度预算尤为重要。通过在左右张力液压缸内安装高精度的位移传感器测量零件在轧机入口和出口的位移,开发了秒流量厚度预估模型和前后滑预算模型,配合宽展预算模型,厚度预算精度可达微米级,同时获得了精度较高的前滑和后滑系数,实现了微张力控制。以 250 温轧机为例,张力控制范围在 0.2~1.5kN。

#### 5.5 温轧工艺工业化探索

温轧工艺对于常温下脆性材料和难变形材料轧制的组织性能和材料成形质量具有重要作用,是高端产品研发具有其他材料成形过程无法比拟的工艺技术优势。针对工业化温轧技术难题,东北大学 RAL 实验室自主创新,建成国内第一台具有零件在线加热、工作辊恒温控制的高精度液压张力温轧实验机,成功轧制出厚度在 0.01mm 的 6.5% Si 高硅钢极薄带材以及 AHSS、钛、镁合金等难变形金属材料,研发成功金属薄带材料连续成卷轧制温轧新工艺与制备技术。通过大量复杂多品种材料成形中试试验研究,提出了热卷箱 + 火焰(感应)快速提温温轧工艺技术,确定了难变形材料温轧工业化的解决方案。

目前,东北大学将上述温轧技术应用到高硅电工钢工业化生产应用领域,与武钢合作,建设国内第一套薄带连铸 + 温轧新工艺生产高硅钢薄带材中试生产示范线,在工艺、装备和自动化控制技术等高端冷轧产品生产工艺关键技术领域开展工作。本薄带连铸 + 温轧中试生产示范线投产运行后,重点针对 6.5%Si 硅电工钢薄带工艺与制备技术研究与开发,同时兼顾高硅电工钢的批量生产。

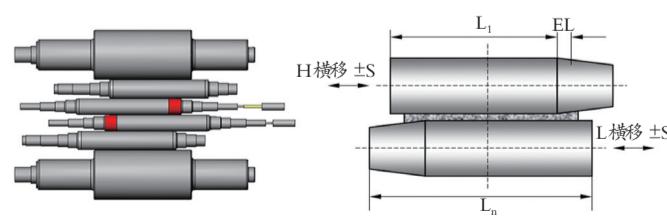


图 1 单锥度工作辊窜辊与边部辊形示意图



**RAL**