

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(四)

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。

## 热轧—冷却—热处理一体化组织性能控制技术

## 1 研究背景

热轧钢材产品占我国钢材总量 90% 以上,是品种规格最多的轧制钢材产品,和钢铁工业其他生产工序一样,热轧工序同样面临高能耗、高资源消耗、低效益的困境。因此,在热轧工序采用资源节约型的成分设计,大力发展节约型高性能产品及可协助下游用户实现绿色制造的钢材品种,即节省资源用量和降低能源消耗、减少对合金元素的过度依赖和资源的过度消耗、节能减排、获得性能优良且环境友好的热轧钢铁产品,实现以“资源节约、节能减排”为特征的钢铁材料的绿色制造已成为钢铁行业关注的重点,也是实现钢铁工业可持续发展的关键要素之一,更是我国钢铁工业发展的必然趋势。

热轧—冷却—热处理一体化组织性能控制技术就是通过通过对加热、轧制、冷却以及对于某些钢材品种的热处理工序的全流程工艺参数的精确控制,利用新一代 TMCP 技术的工艺原理,实现生产过程各工序显微组织状态的精准调控。通过充分发挥细晶、析出、相变的强化效果,实现综合强化,在不添加或少添加合金元素的前提下,满足钢材不同使用性能的要求。这项技术的成功实施,将是以“资源节约、节能减排”为特征的热轧钢铁材料的绿色制造技术的新突破,对热轧钢铁材料的循环利用也具有重要意义。

## 2 研究现状及进展

2.1 新一代 TMCP 技术为实施绿色热轧生产提供了重要的手段

控制轧制与控制冷却(TMCP)技术作为调控热轧钢材组织性能、保证热轧钢材强韧性的核心技术,是 20 世纪钢铁行业最伟大的成就之一,其基本冶金学原理是,在再结晶温度以下进行高压下量变形促进微合金元素的应变诱导析出并实现奥氏体晶粒的细化和加工硬化;轧后采用加速冷却,实现对处于加工硬化状态奥氏体的相变过程进行控制,最终获得晶粒细小的显微组织。其基本要素是“低温高压下”和“微合金化”,即实现这

种工艺的前提是提高钢中微合金元素含量或进一步提高轧机能力。然而,前者会造成钢材成本的提升和资源的消耗,后者则因现代化轧机能力已接近极限而无法轻易实现。另外,采用低温高压下易导致热轧钢板表面形成过多的红色氧化铁皮,对表面质量造成破坏,影响后续加工过程。再者,传统 TMCP 技术在提高热轧钢板强韧性的同时,会因低温轧制产生残余应力而带来板形不良和剪裁瓢曲等问题。最后,传统 TMCP 技术生产高强度厚板时,除非提高钢中合金元素含量或进行轧后热处理,否则已无法突破强度和厚度规格的极限。因此,传统 TMCP 技术,需要建立新的发展思路和开发框架,以满足人们对钢铁材料综合性能不断提升的需求。

与传统 TMCP 技术采用“低温高压下”和“微合金化”不同,以超快速冷却技术为核心的新一代 TMCP 技术的中心思想是:1) 在奥氏体区间,通过轧制和轧制过程冷却的适度结合,在适于变形的温度区间完成连续大变形和应变积累,得到硬化的奥氏体;2) 轧后立即进行超快冷,使轧件迅速通过奥氏体相区,保持轧件奥氏体硬化状态;3) 在奥氏体的动态相变点附近终止冷却;4) 后续依照材料组织和性能的需要进行冷却路径的控制。即采用“适当控轧+超快速冷却+接近相变点温度停止冷却+后续冷却路径控制”,通过降低合金元素使用量、结合常规轧制或适当控轧,尽可能提高终轧温度,实现资源节约型、节能减排型的绿色钢铁产品制造过程。

2.2 轧后超快速冷却技术已在部分热轧产线得到技术示范,成效显著

依托于国家“十二五”科技支撑课题“热轧板带钢新一代 TMCP 装备及工艺技术开发与应用”及其他项目,“钢铁共性技术协同创新中心”与首钢、鞍钢、宝钢等数十家企业合作开展了新一代 TMCP 技术的核心技术——超快速冷却技术的研制和应用。已经开发成功的热轧带钢、中厚板、H 型钢、棒线材等生产线的大量实

践证明,基于超快速冷却技术为核心的新一代 TMCP 技术,可以明显提高钢材的性能、减少合金元素的用量、降低钢材的生产成本,在节省资源和能源、减少排放方面可以发挥重要作用,具有极为广阔的应用前景。

在中厚板方面,该技术已在鞍钢 4300mm、首秦 4300mm、三钢 3000mm、南钢 2800mm、南钢 5000mm、新钢 3800m、宝钢韶钢 3450mm 等中厚板生产线上得到推广应用。截至目前,在中厚板生产过程中采用超快冷工艺,已在低合金钢、高强度、管线钢、高等级容器钢等产品节约型成分设计、减量化轧制工艺方面取得显著成效。

在热轧带钢方面,该技术已在涟钢 2250mm、涟钢 CSP、首钢 2160mm、首钢 2250mm、包钢 CSP、鞍钢 2150mm 等热轧带钢生产线上得到推广应用。并形成了节约型低合金钢 Q345、管线钢、热轧双相钢、高强度工程机械用钢及减酸洗钢等全新的生产技术。特别是管线钢,通过采用超快速冷却提高轧后冷却速度改善和提高冲击及落锤(DWTT)等综合力学性能,满足厚规格产品的开发生产,已成为业界的共识。

在棒线材方面,该技术已在萍钢、三钢、石横、黑龙江建龙、新抚钢、宝钢特钢、兴澄特钢、石钢等企业得到推广应用。利用该技术生产带肋钢筋,摒弃了低温轧制、余热淬火、合金化等钢铁材料强化工艺。此外,在新一代高铬轴承钢方面,采用超快速冷却工艺,控制碳化物的组织特征、数量、形状、大小和分布的均匀程度,对改善轴承钢的性能有重要意义。

在热轧无缝管方面,正在与烟台宝钢等企业开展合作,已显示出良好的工业应用前景。通过在无缝钢管进行控制冷却(在定径机后新增水冷系统),可以显著提高产品强度、改善产品综合力学性能,降低合金使用量。

在热轧 H 型钢方面,该技术已经在马钢、津西等企业推广应用。热轧 H 型钢超快速冷却技术,实现了节约型的成分设计和减量化的 H 型钢钢

材生产,取得了显著的经济效益,推动了 H 型钢企业的可持续发展。

2.3 新一代控轧轧制技术对提高产品质量和性能起到重要作用

新一代控轧轧制技术(“超级控轧技术”)是将轧机与冷却设备有机结合起来,实现了轧制过程和冷却过程的有效同步。其核心技术是利用依附在轧机架上的超快冷装置,可以在任何需要的轧制道次,在轧制钢材的同时,进行钢材的超快速冷却,并与轧制过程进行配合,即时调整轧件温度,实现轧制温度的高精度、高效率调整与控制,以及实现对轧制过程奥氏体晶粒尺寸、形貌、微合金元素的固溶和析出的调控,为随后的冷却相变过程奠定基础。

日本和韩国主要钢铁企业通过采用先进的“新一代控轧轧制”等技术,突破了热轧生产的系列关键技术,使产品质量、成材率、生产效率大幅提高。日本 JFE 钢铁公司率先提出“超级控轧”(Super-CR)技术理念并用以实际生产中。日本神户制钢采用了一种在控轧过程中通过多阶段温度调整而严格控制钢板内部温度的系统,以实现设置再结晶和未再结晶温度区间合理的压缩比,可以有效地细化晶粒。

国内沙钢在 5m 宽厚板生产线也安装了简易的轧机冷却,初步具备了“新一代控轧轧制”功能。宝钢 5m 宽厚板正在开展采用中间坯冷却实现“新一代控轧轧制”的研制工作。南钢 5m 宽厚板生产线计划在 2015 年 6 月之前投入中间冷却系统,实现中厚钢板冷却轧制一体化技术。

通过采用新一代控轧技术,可取得以下显著效果:对于(特)厚板轧制,通过采用差温轧制,提高厚板心部的变形量,使厚度方向组织均匀,可以实现采用 320mm 坯料生产最厚 150mm 的特厚板;使热轧板产品力学性能可以提高 30~50MPa 以上;钢板的温度均匀性提高,全板温度波动小于 15℃,性能波动小于 10MPa;对于轧制过程需要待温的钢板,可使轧机生产效率

在现有基础上提高 20%~30%。

## 3 关键共性技术内容

热轧—冷却—热处理一体化热轧组织性能控制技术的核心是新一代 TMCP 技术。“钢铁共性技术协同创新中心”在国家科技项目和企业重大课题的支持下,已初步建立了热轧钢铁材料新一代 TMCP 工艺技术理论体系,在热轧带钢、中厚板、棒线材先进快速冷却(超快速冷却)技术与装备、以低碳低合金钢和管线钢等节约型品种等相关技术开发方面取得了显著的成果。

为建立完善的新一代 TMCP 技术理论体系,需要在热轧钢材综合强化机制、控轧与冷却耦合技术装备、复杂断面热轧钢材冷却技术、组织调控等关键共性技术实现突破。

3.1 基于细晶、析出和相变的新一代 TMCP 的钢材综合强化机理

新一代 TMCP 条件下,钢材的强化是细晶强化、析出强化、相变强化等强化效果的综合作用。

1) 对于细晶强化,新一代 TMCP 条件下,尽管材料是在较高的温度区间完成热变形过程,但是变形后的短时间内,材料还来不及发生再结晶,仍然处于含有大量“缺陷”的高能状态。如果此时实施超快速冷却,就可以抑制晶粒再结晶的发生,从而将材料的硬化状态保持下来,直至终止冷却温度点(动态相变点附近)。在随后的相变过程中,保存下来的大量“缺陷”成为形核的核心,因而可以得到与低温轧制相似的细晶强化效果。

2) 对于析出强化,超快冷通过抑制微合金元素碳氮化物在奥氏体中的析出,通过迅速穿越常规形变诱导析出的温度范围,使动态的铁素体相变的温度区间和碳氮化物析出温度区间重叠,此时碳氮化物由于具备较大的析出驱动力而发生相间析出,或使更多的微合金元素保持固溶状态进入到铁素体区发生微细弥散析出,其尺寸在 2~10nm,使铁素体基体得到强化,大幅度提高材料的强度水平。



## 上接 B04 版

3)对于相变强化,新一代TMCP工艺下,超快速冷却具有的快速高效控温能力,可以进行更有效的相变强化控制,将热轧钢材控温至相应的组织区间,通过对钢中组成相及其形态、尺度的控制,达到提高钢材力学性能的目的,实现理想的灵活多样的相变强化。

### 3.2 新一代控轧轧制条件下轧制与冷却耦合关键技术及装备

轧制与冷却耦合控制技术的核心是利用依附在轧机机架上的超快冷装置,对道次间轧制温度进行调控,并与轧制过程进行配合,实现轧制温度的高精度、高效率调整与控制,对轧制过程奥氏体晶粒尺寸、形貌、微合金元素的固溶和析出进行调控,为随后的冷却相变过程奠定基础。需要开展以下研究工作。

1)确定轧制与冷却耦合技术关键工艺参数及其对变形深透影响的基本规律;开发高精度温度、压下量、轧制力的耦合数学模型。

2)开发冷却强度足够大,高可靠性的可靠装置,满足轧机机架上设备繁多、环境恶劣且空间狭窄的工况要求。必须进行冷却集管的整体结构、喷嘴角度、冷却水压力、流量的设计和优化。

3)与现有轧线控制系统无缝衔接,一级和二级高精度自动化控制系统,以发挥轧制与冷却耦合控制技术的优势。

4)开发提高厚板厚度方向组织均匀的特厚板轧制技术。采用机架旁超快冷装置,可在高温轧制阶段利用道次冷却产生轧件厚度方向的温度梯度,与之对应带来从轧件表面到心部变形抗力的差异,从而提高厚板心部的变形量,使厚度方向组织均匀。

### 3.3 热轧板带钢新一代控制冷却技术与装备的拓展应用

目前,热轧板带钢轧后超快速冷却技术已经在国内得到了大量推广应用,新一代控制冷却技术与装备作为标准配置已成为热轧板带钢生产企业的共识,不仅新建生产线采用这项技术,越来越多的生产线也正在采用该技术进行改造。

为适应这种标准化的需求,板带钢新一代控制冷却技术需要在喷嘴设计、可靠性、数学模型,与外部系统接口方面进一步开展工作。并在此基础上,针对各条生产线的实际,进行个性化配置,满足不同企业对市场、产品定位的需求,实现热轧板带钢新一代控制冷却技术与装备的应用普及。

### 3.4 复杂断面的热轧钢材高强度均匀化冷却技术

对于复杂断面钢材,冷却

均匀性问题是限制超快速冷却技术应用的重要瓶颈。例如,H型钢由于断面形状的复杂性,其在线控冷很容易出现腰部残留水和腹板、翼缘等不同厚度部分的冷却不均现象,这些都将影响轧件的断面形状和性能均匀性,产品易产生内并外扩变形及腹板浪、裂纹等缺陷。通过对上述问题的分析,开发成功H型钢高强度均匀化冷却技术与装备,并取得了显著的效果。

基于H型钢技术的开发,重轨、复杂断面大型型钢、无缝钢管等产品高强度均匀化冷却技术的研制工作将是今后的工作重点。

### 3.5 一体化组织性能调控技术

根据对热轧钢铁材料新一代TMCP技术材料组织控制机理,开发基于新一代TMCP的热轧钢铁材料“十大”组织调控技术,具体为:1)晶粒细化控制技术;2)相间析出与铁素体晶内析出控制技术;3)铁素体晶内析出的热轧+冷轧全程控制技术;4)含Nb钢析出控制技术;5)贝氏体相变控制技术;6)在线热处理取代(或部分取代)离线热处理技术;7)双相钢、复相钢冷却路径控制技术;8)集约化轧制技术;9)高强钢冷却过程中相变与板形控制技术;10)厚板与特厚板高质量、高效率轧制技术等。

### 4 研究技术路线与实施方案

基于前期实验室研究及工业化产线初步应用实践,研制出具有我国自主知识产权的中厚板、热轧带钢、棒线材、无缝钢管、H型钢等新一代TMCP工业化装备和自动控制系统,研发出多样化在线控制冷却工艺和组织性能调控技术,进而开发系列低成本、减量化、绿色化钢材产品,研究技术路线如图1所示。

结合实验室工艺模拟平台,通过系统研究中厚板、热轧带钢、棒线材、无缝钢管、H型钢等钢材产品超快速冷却条件下的轧制、冷却等工艺制度,为工业化产线的大规模推广应用奠定研究基础。在生产线上工业化推广过程中,本着小批量调试—系统检验—批量试制—系统检验评价—大批量工业化生产的技术路线,解决推广应用中存在的关键工艺等问题,开展基于超快速冷却工艺的钢材新一代TMCP技术开发及推广应用,制定实施方案如下。

1)离线模拟:通过深入研究高温钢板高强度冷却换热机理,开发出可实现热轧钢铁材料超快速冷却的高强度均匀化冷却技术,研制出具有高性能射流能力的喷嘴结构;采用有限元方法分析研究超快速

冷却过程流场的分布、冷却喷嘴结构形式对冷却能力和均匀性影响规律的研究;采用湍流分析标准模型和流体分析模拟手段,研究钢材表面流场分布情况及其对全表面温度场的影响;设计实现最佳冷却方式的超快速冷却系统的结构形式。以上工作可为冷却装置的开发和工艺设计提供技术支撑和储备。

2)钢板冷却规律的研究:超快速冷却条件下,典型的不同类型、不同规格钢材的内部温度场的分布及表面换热条件的确定;在实验室条件下对超快速冷却进行模拟实验研究,验证冷却系统结构的合理性。

3)实验装置开发:在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室热轧钢材中试线上开发出超快速冷却设备和轧制—冷却“一体化”装置,包括新型加速冷却系统和轧制—冷却同步化系统的原理开发和设计,可完成钢材的超快速冷却和超快冷条件下的超级控制轧制工艺。

4)组织—性能对应关系及定量化模型研究:针对典型钢种完成超快冷条件下高强钢组织—性能对应关系的系统研究,得出建立新一代TMCP工艺的必要的实验数据,为实施产业化做准备。总结出组织性能对应关系的定量化模型,开发出基于组织演变的优化理论和方法。

5)新一代控制冷却设备的开发:以中试线的结果为依据,根据现场实际情况和生产线的布置,通过对理论数值模拟、温度场的模拟以及温度控制模型的深入研究,构建了以射流冲击为主的超快冷热交换模型、控制冷却模型以及工艺控制模型,开发基于超快冷冷却工艺的新一代轧后冷却控制系

统,适用于中厚板、热轧带钢、棒线材、无缝钢管、H型钢等钢材产品。

6)轧制—冷却“一体化”装备的开发:通过数值模拟研究超快速冷却条件下钢材内部温度场变化规律以及大梯度差温条件下钢材内部变形理论,建立轧制—冷却同步化工艺理论,对轧制—冷却装置进行一体化设计,开发新一代控轧关键技术、装备、自动化系统。

7)均匀化冷却装置的开发:针对钢板,研究粗轧机—精轧机之间和精轧机之后的均匀化冷却装置,开发针对钢板横向、纵向以及厚向,特别是边部、头尾等局部过冷区均匀化控制方法和温度分布模型,提高钢板轧制流程中各个方向上的温度均匀性,提高产品全板性能的稳定性和均匀性,减少切损,提高成材率。

8)新一代TMCP工艺条件下强化原理研究:通过热模拟实验、热轧实验研究轧制—冷却耦合工艺以及轧后超快速冷却条件下负荷分配策略对奥氏体组织演变、碳氮化物析出行为、冷却相变行为的影响规律,获得以超快冷为核心的新一代热轧钢铁材料组织性能控制原理。

9)基于超快冷技术的新一代TMCP工艺开发:在小尺寸实验、实验室模拟生产和现场工业实验的基础上,基于新一代TMCP工艺技术,研究典型产品的资源节约型生产工艺技术,开发出满足工业化大批量连续稳定生产的我国“资源节约型、工艺节能减排型”典型产品和相关轧制及冷却工艺技术。

### 5 研究计划

在上述原有相关技术研究及开发基础上,计划使用4

年时间完成热轧钢材新一代TMCP工艺技术及装备开发。

◆2014年:1)有限元方法分析超快速冷却过程流场的分布规律;2)冷却装置结构对冷却能力和均匀性影响规律的实验研究;3)设计实现最佳冷却方式的超快速冷却系统的结构形式;4)超快冷喷嘴结构的开发和设计。

◆2015年:1)超快速冷却的模拟实验装置的研制和开发;2)典型钢种超快速冷却后组织性能演变规律;3)超快速冷却装置的开发;4)轧制—冷却“一体化”装置的开发;5)均匀化冷却装置的开发。

◆2016年:1)超快速冷却过程控制模型关键技术研究;2)轧制—冷却耦合工艺数学模型的建立和控制模型的开发;3)新一代TMCP物理冶金学机理研究。

◆2017年:1)典型产品冷却路径的精细控制及对产品性能的关系;2)典型产品的轧制—冷却耦合工艺控制及对产品性能的关系;3)减量化品种开发;4)实现新一代TMCP技术在中厚板、热轧带钢、棒线材、钢管、H型钢生产中的稳定应用。

### 6 预期效果

通过钢铁企业实施先进热轧—冷却—热处理一体化组织性能控制技术,形成新一代控轧控冷工艺、装备体系,建立“资源节约型、节能减排型”的热轧钢材产品绿色制造体系。在中厚板、热连轧、H型钢、棒线材、管材等热轧领域的推广和应用,实现新一代TMCP工艺在热轧领域的全覆盖。60%~80%以上的热轧钢材强度指标提高100~200MPa以上,或钢中主要合金元素用量节省20%~30%,实现钢铁材料性能的全面提升。

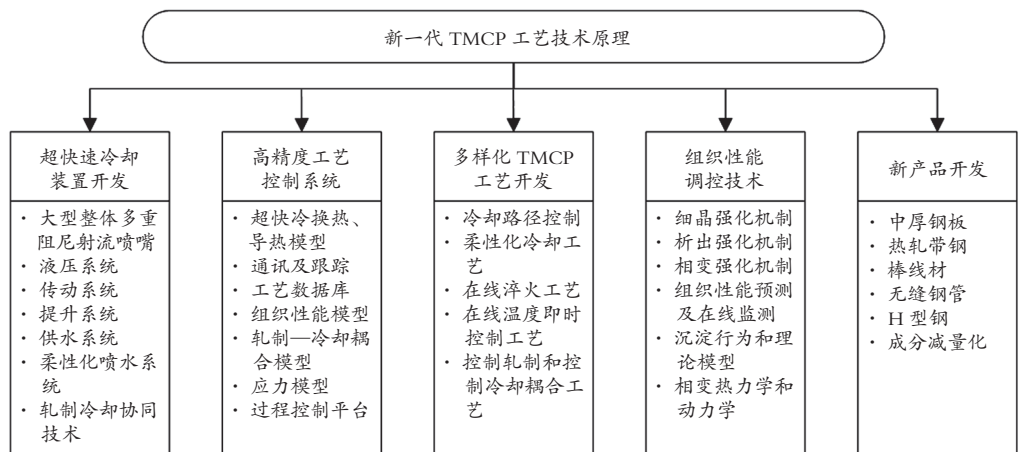


图1 新一代TMCP研究技术路线



東北大學  
Northeastern University



RAL