

自主创新结硕果 助推钢铁行业技术进步

热烈祝贺轧制技术及连轧自动化国家重点实验室立项建设二十周年

编者按：东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(The State Key Laboratory of Rolling and Automation, 简称 RAL)，其前身是建于1954年的东北工学院轧钢实验室，1989年得到世界银行的支持，1991年获批立项建设国家重点实验室，1995年通过国家验收正式开放运行，成为我国轧制技术及其自动化领域唯一的国家重点实验室。今年是轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学)获批立项建设二十周年。二十年来，轧制技术及连轧自动化国家重点实验室秉承“开放、流动、联合、竞争”的运行机制，以国民经济需求为导向，面向钢铁材料及有色金属材料轧制技术领域，置身前沿，躬身实践；面向国民经济主战场，一步一个脚印，扎实，取得了一系列具有自主知识产权的科研创新成果，走出了一条具有鲜明特色的国家重点实验室建设发展之路。本篇报道记录了轧制技术及连轧自动化国家重点实验室二十年来的创新和发展之路。为庆祝 RAL 建设二十周年，本报将在后续报纸相关版面连载 RAL 二十周年创新成果，以飨读者。

国家重点实验室作为国家科技创新体系的重要组成部分，是组织高水平理论基础研究和应用基础研究、聚集和培养优秀科技人才、开展高水平学术交流的重要基地。其主要任务是针对学科发展前沿和国民经济、社会发展及国家安全的重要科技领域和方向，开展创新性研究。东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(以下简称 RAL)作为工程类国家重点实验室，科研工作偏重应用基础研究，提供成果的主要方式体现于“在解决国家经济建设、社会发展和国家安全的重大科技问题中具有创新思想与方法，实现相关重要基础原理的创新、关键技术突破或集成，拥有核心专利等自主知识产权，提供科学基础和技术储备；或在实验技术方法、专用设备研制改进方面取得突破性进展。”

RAL 获批立项建设二十年来，在科技部、教育部等主管单位及省、市各级领导的大力支持下，按照国家重点实验室建设发展要求，坚持有所为有所不为，把握行业发展脉搏，找准轧制技术领域科研创新工作切入点，经过 RAL 科技工作者的不懈努力，取得了长足稳步发展。实验室历经起步建设、消化吸收再创新、快速发展阶段，目前已全面迈向自主创新的新阶段。RAL 科研工作紧密围绕国家钢铁行业发展战略目标，面向行业共性关键技术问题，贯彻以企业为主体、以市场为导向、产学研用相结合的方针，通过承担国家、地方和行业的重大项目，培养国家紧缺的高层次人才，广泛开展国内外学术交流，积极开展轧制及其自动化领域的集成创新、消化引进再创新和原始性技术创新。RAL 高度重视科研成果产业化，取得的一项项丰硕的创新成果直接面向国民经济主战场，助推钢铁行业轧制技术的创新发展，走出了一条具有鲜明特色的国家重点实验室建设发展之路。

继承老一辈科学家扎实严谨的科学精神，敢于实践、善于实践，注重学科交叉，注重装备开发，奠定 RAL 重点实验室优良学术传统。

轧制技术及连轧自动化国

家重点实验室从建立起即继承了东北工学院老一辈轧钢专业工作者的宝贵科研精神财富和优良的学术传统。老一辈科学家严谨、务实、创新、探索的科学精神，敢于实践、善于实践，理论联系实际的工作作风为实验室科研工作和人才培养奠定了坚实基础，同时良好的学科和装备基础，也为实验室的快速发展提供了良好技术支撑。实验室成立之初，依托老一辈轧钢科研工作者自主研发和引进的系列成套高水平实验研究设备。如朱泉教授团队开发研制的板带三连轧机、白光润教授团队开发研制的型钢三连轧机，王廷溥教授团队开发的薄带铸轧机以及王占学教授团队引进的热力模拟实验设备等。实验室科研人员相继开展了轧制技术领域的诸多研究工作，也为当前轧制技术的开发和发展奠定了一定的研究基础。

建设起步阶段(1991—1995年)：跟踪国际先进技术，攀登巨人的肩膀，消化吸收再创新，实现实验室科研工作快速发展。

实验室获批立项后，实验室准确把握行业发展需要，及时跟踪国际先进技术，结合钢铁轧制技术领域发展与科研工作需求，大跨步地推动重点项目科研与建设工作。受当时实验室自身力

量和行业发展所限，科研工作开展主要是在轧制技术领域引进设备、在软件方面消化吸收再创新工作为主，偏重轧制领域的软件开发工作，并逐步涉及行业部分小型装备的开发工作，为实验室的科研工作腾飞夯实了基础。在这一过程中，围绕轧制过程有限元模拟、板形控制、板带轧制先进控制系统技术开发等方向，开展了系列研究工作。同时，围绕行业企业发展需求，开发了部分小型轧机装备。如无锡新大窄带、江西新余窄带装备及自动控制系统、3连轧机、UC 轧机、鞍钢实验热轧机等实验装备，实现了实验室科研工作的快速起步。其中有标志性的研究成果为“板带钢轧制过程的智能优化与数模调优”，在消化引进国外板带热轧过程控制系统的基

础上，通过不断地进行理论探索和工程实践，取得创新性的研究

开发成果，荣获国家科技进步二等奖。

快速发展阶段(1996—2005年)：依托重大基础研究和工程项目，RAL 科研工作开始进入国民经济主战场，成果创新、转化、工程化取得突破。

一份耕耘一份收获，机遇总是青睐有准备的人。1998年，依托首钢 3340mm 中厚板轧机改造项目，RAL 在轧制技术领域开始承担国内大型主力轧机的建设工作，承担轧机及控制冷却设备的自动控制系统开发项目；同年年底，国家 973 一期项目启动，RAL 承担 200MPa 级升级 400MPa 级的普碳钢超级钢开发课题，以控轧控冷(TMCP)为核心的钢铁材料开发工作全面铺开。这也标志着 RAL 的科研开发工作进入新的领域，研发内容由偏重材料成形转向钢铁材料开发的物理冶金领域，这也为 RAL 承担以钢铁材料工艺开发为先导，涵盖机械装备、自动化、计算机等为一体的大型综合性技术开发项目奠定了基础。2001 年，国家自然基金重大项目启动，RAL 承担薄带连铸基础研究课题，进行薄带铸轧项目的模拟分析和实验研究工作。这项工作为 RAL 当前开展的薄带铸轧创新技术研究奠定了重要基础。

上述三项重大基础理论研

究及工程开发项目的实施，取得了丰硕的科研成果。依托首钢 3340mm 中厚板轧机改造项目，RAL 开发的中厚板轧机自动控制系统推广应用超过二十多条生产线，成为国内中厚板轧线主流的自动化控制系统。400MPa 级超级钢开发课题取得突破性成果，在热轧板带钢、中厚板、棒线材等领域推广应用取得显著效益。薄带铸轧基础研究工作获得课题结题专家组的高度评价(考核结果为 A)。RAL 的科研工作能力和实绩得到了业界和同行的高度认可，标志着 RAL 的科研工作成果开始进入国民经济主战场。

快速发展阶段(2005—2009年)：提供产品的系统解决方案，承担行业大型工业化成套装备建设、钢铁材料产品研究与开发以及大规模中试基地建设等综合性科研开发项目，全面进入国民经济主战场。

在承担行业大型工业化成套装备建设方面，以 2006 年承担的临汾 3000mm 中厚板热处理生产线国产首套自主知识产权的辊式淬火机项目为标志，RAL 突破以往以自动化为主体的科研项目工作模式，实现以工艺为先导，涵盖材料、机械、自动化、计算机等多个学科专业的成套重大装备项目集成开发模式。2007 年，承担企业超快冷成套装备(含自动化)开发课题，进一步强化“硬件”开发步伐，新一代 TMCP(控轧控冷)技术工开发进入研究阶段。2008 年，国家自然科学基金重点项目硅钢薄带连铸工业化技术研究项目启动，围绕超纯铁素体不锈钢开展基础研究，深入研究和探讨薄带铸轧工艺的产品定位以及工业化应用问题。

在钢铁材料产品研究与开发领域，围绕“氧化铁皮控制技术与新钢材品种开发”、“双相不锈钢、铁素体不锈钢研究与开发”、“9Ni 钢生产工艺与技术”、“海洋平台用钢”、“含钛高强汽车用钢研究”、“薄规格高强工程机械用钢、耐磨钢”、“低成本 DP 生产工艺”、“X100-X120 高强、耐腐蚀管线钢实验室研究”等研究方向开展系列研究工作。以低成本高性能钢铁材料开发为主线，以满足国民经济重大需求为目标，迅速将科研成果成功推广应用于鞍钢、宝钢、太钢、首钢、包钢等国内大型钢铁企业。

随着国内钢铁企业产品研发的需要和对自身研发能力的日渐重视，由 RAL 率先启动的一

项具有重大应用价值和意义的轧制技术实验研究装备开发工作——现代轧制过程中试研究创新平台得到行业和企业广泛认同。围绕钢铁材料开发所需的热轧实验轧机、冷轧实验轧机、热力模拟实验机、冷轧连续退火模拟实验机等实验研究设备，RAL 潜心开发研究，工艺技术理念先进。相继承担太钢、鞍钢、宝钢、首钢、马钢、包钢、沙钢等国内钢铁企业中试基地和实验研究装备建设项目。业界曾有人士评价该项研究成果“为企业的技术创新插上了腾飞的翅膀，装上了永不停歇的发动机”。

技术创新的新阶段(2009年—现在)：瞄准世界轧制技术前沿，厚积薄发，自主创新结硕果，科研工作助力行业发展和技术进步，以成为行业技术发展的引领者为己任，开创“绿色钢铁轧制技术”的新时代。

基于 RAL 多年来在轧制技术领域的耕耘实践，在轧制技术领域实现自主创新已经具备较好的实施条件。凭借领先的技术创新理念，依托完备的工程实施手段和精益求精的科研开发团队，RAL 开发的系列自主创新技术和成果在行业得到全面认可。2011 年，RAL 新一代 TMCP 装备与工艺技术、板带轧制自动控制系统、辊式淬火机装备及工艺技术、轧制过程中试研究平台等系列自主创新技术推广应用在国内钢铁行业捷报频传，全面进入行业竞争的主渠道，进入国民经济建设主战场。

2011 年 6 月 17 日，RAL 成功中标承担河北钢铁研究院建设项目，这是继 RAL 承担鞍钢、首钢、宝钢、马钢、太钢、包钢等国内大中型钢铁集团公司研究院或技术中心中试场基地建设项目后，又一具有标志性意义的中试实验平台开发建设项目。河北钢铁公司基于对 RAL 先进工艺理念、技术及工程业绩的深入了解，决定将这一具有国际先进水平的中试基地建设项目交由 RAL 承担，充分表明了企业对 RAL 实验室模拟研究平台技术及开发理念的高度认可，也进一步巩固了实验室在轧制技术实验研究设备开发方面的引领地位和主导地位，对实验室进一步拓展实验设备研究开发领域和参与国际竞争具有重要意义。

2011 年 6 月 28 日，RAL 与迁安沪久管业有限公司签订 1450mm 酸轧联合机组三电系统开发合同。该 (下转第 13 版)



东北大学
Northeastern University



RAL

(上接第12版) 酸轧联合机组采用六辊UCM五机架冷连轧机, 轧线采用世界最先进的交直交传动, 配备有完善的厚度检测与控制、板形检测与控制等复杂工艺控制系统, 是国内第一条完全自主开发全线计算机控制应用软件的酸轧联机系统。

2011年7月28日, 宝钢股份公司4200mm中厚板热处理生产线关键装备——4200mm辊式淬火机设备进行国际招标。在与国外著名热处理装备公司同台竞争的舞台上, RAL一举中标这一国际最高水平的热处理设备项目。该项目的竞标成功, 标志着RAL实验室开发的辊式淬火机装备及工艺技术已得到国内要求最高、最为苛刻的钢铁企业的充分认可, 具备了在国际舞台上进行高水平竞争的实力。

尤其需要指出的是, RAL提出了以超快速冷却为核心的热轧钢铁材料新一代TMCP(控轧控冷)技术。该项技术是由王国栋院士为代表的RAL科研团队首倡, 基于多年来在钢铁材料轧制工艺技术领域的研究与实践, 通过工艺原理上的理论创新带动装备创新, 涉及量大面广的热轧钢铁材料领域。其技术目标在于通过研究热轧钢铁材料超快速冷却条件下的材料强化机制、工艺技术以及产品全生命周期评价技术, 采用以超快冷为核心的可控无级调节钢材冷却技术, 综合利用固溶、细晶、析出、相变等钢铁材料综合强化手段。实现在保持或提高材料塑韧性和平使用性能的前提下, 80%以上的热轧板带钢(含热带、中厚板、棒线材、H型钢、钢管等)产品强度指标提高100~200MPa以上, 或节省钢材主要合金元素用量30%以上, 实现钢铁材料性能的全面提升, 大幅度提高冲击韧性。节约钢材使用量5%~10%, 提高生产效率35%以上, 节能贡献率10%~15%左右, 实现国内热轧钢铁材料的“资源节约型、节能减排型”等绿色制造工艺过程, 从而推动我国钢铁行业轧制工艺的全面技术进步。

2011年7月1日, 国家工业和信息化部印发《产业关键共性技术发展指南(2011年)》通知, 新一代TMCP(控轧控冷)技术被国家工信部明确列为原材料工业钢铁产业关键共性技术。2011年8月27日, 南京钢铁股份公司4700mm中厚板生产线项目进行国际招标, 参与这次投标的均为具有极强竞争力的国际知名轧钢设备公司和自动化公司。RAL实验室成功中标该项目轧后控制冷却段的工艺、装备和自动化系统。除RAL承担该项目冷却系统外, 该轧线的机械装备、自动化系统、传动系统等均由国外知名公司中标。此次竞标成功, RAL进一步将使用以超快冷为核心的新一代TMCP技术的中厚板轧机推向最宽级。表明新一代TMCP技术得到了业界高度认可, 进一步证明RAL倡导和开发的以超快冷为核心的新一代TMCP技术、装备和自动化系统已走在了国际轧钢技术领域竞争的前列, 体现了自主创新技术的生命力。2011年10月25日, 国家工业和信息化部印发《钢铁工业“十二五”发展规划》, 进一步明确将RAL倡导并实践的以超快冷为核心的新一代TMCP(控轧控冷)技术

列入《规划》重点领域和任务以及钢铁产业新工艺、新装备、新技术创新和工艺技术改造的重点内容。标志着该项技术得到政府、行业及企业的全面广泛认同, 也标志着RAL科研工作迈向了自主创新的崭新阶段。

工作定位决定研究水平、特色成就发展, 二十年发展谱华章, 二十年发展成就RAL轧制技术领域技术创新的“国家队”。

RAL二十年的发展与积累, 对轧制技术领域科研工作的理解与认识更为深刻。在科研工作定位、工作特色上形成了自己的风格和学术研究特色, 具体体现在:

RAL实验室科研工作定位:

- ◆ 以国民经济需求为导向的应用基础研究

突出对产业竞争力整体提升具有全局性影响、带动性强的关键共性技术, 以降低成本、减量化、可持续发展为中心, 开展应用基础研究, 进行工艺、装备、产品方面的系统创新, 解决国民经济中迫切需要解决的重大问题。

- ◆ 以可持续发展为导向的前沿性、探索性、战略性基础研究

RAL作为轧制技术领域科研开发的“国家队”, 在应用基础理论研究方面已走在国际前沿。根据国内外金属材料领域的发展趋势, 把握和选择具有前沿性、基础性、战略性的课题开展基础研究, 为金属材料工业的持续发展提供科学支撑。

RAL科研工作特色:

- ◆ 关键共性

针对量大面广的金属材料普遍存在的关键和共性问题, 开展应用基础研究→迅速大面积推广应用, 课题具有紧迫性、全局性、示范性、引领性。

- ◆ 系统创新

由创新的思想指导, 以工艺创新为龙头, 以装备创新和工程创新为手段, 以低成本、减量化的产品为目标, 进行工艺、装备、产品的系统创新, 为企业和行业发展提供系统“一揽子”的解决方案。

- ◆ 求真务实

一切从实际出发, 强调理论紧密联系实际, 树立良好学风, 研究结果必须接受实践(工厂)的检验, 促进成果转化。

RAL用人机制及人才评价标准:

- ◆ 具有团队精神、敬业精神

在学科交叉基础上, 将个人力量融入到团队工作中去, 充分发挥每个人的优势, 做大做强科研工作, 推进重大科研专项工作实施;

- ◆ 重视开展深层次理论研究, 鼓励发表高水平有价值的学术研究论文, 重视科研成果转化和产业化

科研工作及成果评价以“有没有在行业技术进步上起到作用”为标准, “真正的论文要写在轧钢生产创新实践上”, 发挥工程类国家重点实验室科研成果在行业技术进步上的支撑和促进作用。

- ◆ 支持自由探索, 鼓励科研学术创新

在符合实验室科研发展方向的前提下, RAL提供相应科研配套经费支持个人自由学术探索, 鼓励学术创新, 不断培育新的科研工作增长点。

RAL研究方向:

◆ 金属高质量低成本轧制过程

主要研究内容包括:低成本、高效能轧制工艺、理论与技术;轧制过程数学模拟、物理模拟与过程优化;高精度数学模型建模方法与在线应用;轧制过程模拟实验研究设备研制;低成本、高质量轧制产品开发。

◆ 产品组织性能预测与控制

主要研究内容包括:加工过程对材料组织、性能的影响规律;成形过程中材料组织与结构演变的定量描述、建模与模拟;金属材料成分、组织结构与性能的关系;成形过程中材料组织性能预测与在线优化控制;控轧控冷机理研究与工艺开发。

◆ 先进制备技术及高性能材料

主要研究内容包括:高强度、长寿命、耐腐蚀的新一代钢铁材料设计与开发;复合材料、难加工材料、特殊性能材料的制备理论与方法;短流程、近终成形新理论、新工艺、新设备及其关键技术;节能、环保、减量化新成形工艺与新产品开发。

◆ 材料成形过程综合自动化

主要研究内容包括:现代控制理论与智能控制方法在材料成形中的应用, 多变量、快响应、深度非线性控制系统的辨识与建模, 材料成形过程监测、故障诊断与质量控制, 材料成形过程管理与控制综合自动化系统。

“搞科研, 不能靠说, 不能靠写, 必须靠干!”这是实验室科研人员中广为流传的一句口头禅。也正是经过生产实践的严格检验, RAL的科研成果长期以来得到了企业的广泛接受和认可。目前在RAL实验室, 95%以上的科研成果都能实现转化, 大学象牙塔内普遍存在的转化瓶颈在这里早已不再成为问题。RAL经过二十年的发展建设和对轧制技术领域技术创新的执着追求, 正逐步由国际先进轧制技术的追随者致力于转变成为先进轧制技术的引领者、领跑者。

发展目标和未来愿景:建设国际领先的轧制技术协同创新基地, 开发节能减排的绿色轧制工艺、技术和产品, 致力于成为新一代轧制技术的全球领跑者。

我国作为一个拥有13亿人口、经济迅速崛起的发展中国家, 持续稳定地生产低成本、高质量钢铁产品与掌握石油、粮食等战略资源具有同等重要的地位。我国钢铁行业发展到目前, 成本压力巨大、资源消耗过多、环境友好性不好、产品竞争力不强、行业企业大而不强的现状已成为制约国内钢铁行业发展的主要瓶颈。我国钢铁工业发展面临新的挑战和新的机遇。开发节省资源和能源、环境友好、低成本、高性能的绿色钢铁产品及生产技术, 已成为钢铁工业发展的必然, 也是当前全球钢铁工业发展的趋势。

轧制技术直接决定钢铁材料产品形状和性能, 钢材规格、品种复杂, 型、板、管、棒、线等可达上千品种、上万规格, 且设备千差万别, 自动化水平高, 轧制过程对钢材生产的绿色化举足轻重; 同时, 轧制产品直接面向市场, 应对各行业应用需求, 直接影响钢材全生命周期的绿色化表现。根据欧洲相关资料统计, 轧制过程

中的节能、减排在欧洲钢铁工业节能减排贡献率可达40%, 轧制过程节能、减排潜力巨大。截至目前, 轧制过程中仍有大量涉及绿色制造的问题尚需要解决, 也是当前技术创新最具活力的领域。因此, 开发绿色轧制工艺、技术和产品, 将是轧制技术发展的最重要方向, 同时也是RAL当前及至未来长期一段时间的科研开发方向。

展望未来, RAL将按照《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》确定的战略目标, 面向国际竞争, 为增强科技储备和原始创新能力, 开展基础研究、应用基础研究和基础性工作。

围绕行业发展, 以轧制技术创新研究为核心, 开展研究平台建设。建设国际领先的轧制技术创新基地, 实施有组织的创新, 探索高校体系下技术创新的体制和机制, 大幅度提升RAL的技术创新能力和核心竞争力, 将RAL培育成为我国钢铁工业轧制工艺、技术、装备、产品创新的协同创新基地, 源源不断地为钢铁工业提供关键、共性问题的工艺—技术—装备(含自动化)—产品的整体解决方案, 将是RAL新的历史时期的发展目标, 同时也是行业、国家赋予RAL的历史重任。工艺流程创新实现带动装备、产品生产技术创新, 实现减量化、节约型新流程的实用前。

问题是创新的原点, 不断的发现问题、解决问题是RAL不变的旋律和不竭的创新动力之源。RAL始终把创新能力看做实验室生存与发展的高超“杀手”, 而且打造了一艘敢破和善破坚冰的科研攻关“航母”。创新, 特别是产学研用联合创新, 已使实验室逐步成长为我国轧制技术领域杰出的国家队; 创新使实验室瞄准世界钢铁工业科技发展的最前沿, 屡屡打破钢铁轧制领域的国外核心技术垄断, 有力地推动了行业技术进步!

“舞台有限, 精彩无限”, 怀揣着再次飞跃的豪情, 轧制技术及连轧自动化重点实验室再一次站在了崭新的起跑点上。我们期待着一个崭新的全球领先的轧制技术创新基地在不远的将来呈现在业界科技工作者的面前。

实验室简介

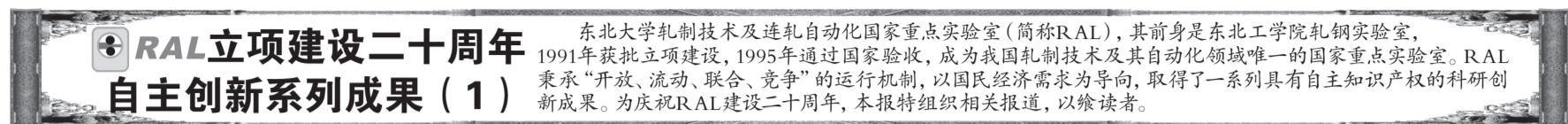
可转换的品种开发冷轧机、工艺研究冷轧机、无缝钢管穿孔实验机、双辊铸轧机等特色轧制研究设备12套, 扫描电镜、透射电镜、纳米压痕仪、场发射电子探针、X射线衍射仪、全自动相变仪、多功能热力模拟试验机、拉伸试验机、疲劳试验机等配套实验与检测设备齐全, 能够满足高水平工艺研究、品种开发和控制系统研究的需求。

RAL实行“开放、流动、联合、竞争”的运行机制, 通过设立开放课题、建立访问学者制度、与国内外知名公司及研究单位成立联合研究室。积极开展学术交流活动, 每年邀请多名国内外专家来实验室交

流讲学, 派出人员出国访问、考察、出席国际会议, 主持召开专题国际研讨会。在广泛开展国际技术交流的基础上, 与韩国浦项制铁集团、日本三菱公司、日本住友金属公司等国际知名企业建立了长期战略合作伙伴关系。

RAL积极组织、承担各类国家重大、重点研究开发项目, 近年来承担多项863计划项目、973计划项目、国家自然科学基金项目、国家攻关计划项目等。近年获国家科技进步奖5项, 国家技术发明奖1项, 省部级科学技术奖47项, 发表研究论文2300多篇, 出版论著34部。授予发明专利60余项。东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室将立足中国面向世界, 准确把握轧制技术发展脉搏, 占领轧制技术领域的制高点, 打造出一支我国轧制技术领域高水平的国家级科研开发团队, 助推钢铁行业的创新发展。

RAL现有科研、办公、实验用房7000多m², 建有功能完善的成形工艺过程模拟、材料组织性能检测与分析、过程控制与调试三个研究平台。现有板带钢强力热轧机、2/4辊



热轧钢铁材料新一代TMCP技术

TMCP(Thermo-Mechanical Controlled Processing),即控制轧制和控制冷却技术,是20世纪钢铁业最伟大的成就之一,也是目前钢铁材料轧制及产品工艺开发领域应用最为普遍的技术之一。正是因为有了TMCP技术,钢铁工业才能源源不断地向社会提供越来越有用的钢铁材料,支撑着人类社会的发展和进步。

1 TMCP 工艺技术的发展及基本原理

TMCP工艺的两个重要组成部分之一,控制轧制,在热轧钢铁材料领域很早就已根据经验予

Line Accelerated Cooling)系统。此后基于对提高厚板性能及钢种开发的需要,重点发展了厚板的快速在线冷却技术,并相继开发出一系列快速冷却装置,投入厚板的开发生产及应用中。控制冷却设备的普遍应用有力地推动了高强度板带材的开发和在提高材质性能方面技术的进步。后来,人们将结合控制轧制和控制冷却的技术称为控轧控冷技术 TMCP (Thermo-Mechanical Controlled Processing)。

因此,热轧钢铁材料 TMCP 的基本冶金学原理是,在再结晶温度以下进行大压下量变形促进微合金元素的应变诱导析出并实

通过冷却参数的控制与优化实现对热轧后钢板相变过程的控制,配合控制轧制工艺过程得到所需的组织和性能。

TMCP 工艺实施所依托的装备条件除轧机外,主要是层流冷却系统,如图 1 为中厚板生产线后层流冷却设备。国外钢铁技术发达国家如日本等,自控制冷却技术(含工艺及装备)工业化大批量应用开始为标志至今, TMCP 工艺技术已历经 30 余年。我国约从 2000 年开始,在国内相关科研单位如东北大学、北京科技大学等努力下,依托相关钢铁企业中厚板轧线建设及技术改造,自主研发出具有当时国际

倍,并具有良好的塑性和韧性。在研究过程中,与当时国际上流行的最大限度细化晶粒的技术路线不同, RAL 科技工作者创新性的提出采用晶粒适度细化的概念,开发出在现有工业条件下能够实现的超级钢生产工艺技术。2005 年我国生产超级钢热轧带钢、超级钢棒线材、超级钢中厚板等品种超级钢逾 400 万 t。RAL 在热轧钢铁材料 TMCP 工艺技术开发领域取得的成就令人瞩目。

面对不断增长的超级钢工业化批量生产数据,超级钢的开发实践成绩令人鼓舞,超级钢开发课题在国内钢铁行业作出了令人瞩目的贡献。但对于 RAL 科研学术团队来说,静心思考之余,总隐隐地感觉到传统 TMCP 这一技术理念存在一定的不足和缺憾:在热轧板带、中厚板生产应用过程中,低温大压下,轧制温度很低,导致轧机负荷都很大;同时,为满足组织转变要求,终冷温度通常较低,通常都低于 500°C,有的钢种温度已低至 350~450°C 左右。而由此造成的轧制过程不稳定、冷却过程的板形不良等问题时刻考验着企业的操作及生产工艺过程,从企业接受程度来说,总是存在一定的难度。对此,王国栋院士曾用“如鲠在喉”来形容企业对于该工艺生产技术的感受。

对于当时超级钢开发过程的另一个收获在于棒线材方面的开发工作。棒线材生产过程由于轧速很高,低温轧制常导致堆钢等生产事故。因此,采用在热轧板材推广应用过程中惯用的“低温大压下”路线在当时棒线材尤其是在线材超级钢工艺的开发过程中屡屡碰壁,推广应用难以展开。“低温路线走不通,必须高温轧制,有没有新的工艺技术路线可以实现?”,当时这个问题时常萦绕在 RAL 轧钢工作者的心头。最终 RAL 轧钢工作者创新性的提出采用高温终轧路线,通过大应变连续累积变形 + 水雾超快速冷却工艺,在适当的温度点停止冷却。通过超快速冷却抑制奥氏体再结晶,保持硬化状态,并控制随后的相变过程,实现了强度从 Q235 级别升级到 400MPa 级别的棒线材稳定工业化批量生产,突破了常规低温控制轧制的观念。

问题是创新的源泉。善于发现问题,是技术创新不竭的动力。具体反思和认识 TMCP 技术本身,通过采用低温大压下和微合金化的技术路线,铌等微合金元素的加入虽然可以显著提高钢材的再结晶温度,扩大未再结晶区,大大强化轧制奥氏体的硬化状态,且以碳氮化物形式析出,实现沉淀强化,从而对提高材料强度作出贡献。但是,微合金和合金元素加入,会提高材料的碳当量,这会恶化材料的焊接性能,

同时还会造成钢材成本上升和合金资源的消耗。至于进一步提高轧机能力,则因现代化轧机能力已接近极限而无法轻易实现。另外,采用低温大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,会增加后续加工过程中的加工成本,甚至损伤钢板的表面。再者,传统 TMCP 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 技术生产高强钢厚板时,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极限。因此,传统 TMCP 技术本身已有了其难以克服的局限性。同时,随着社会的高速发展,使人类面临越来越严重的资源、能源短缺问题,承受着越来越大的环境压力。人类必须解决这些问题,才能与自然和谐发展,保持人类社会的长治久安和子孙后代的幸福安康。针对这样的问题,在制造业领域,提出了 4R 原则,即减量化、再循环、再利用、再制造。具体到 TMCP 技术本身,传统 TMCP 工艺过程实现的两个要素“低温大压下”和“微合金化”,一方面导致轧制生产工艺过程与人们长久以来形成的“趁热打铁”的观念相违背,必然受到设备能力等方面限制,轧制生产过程操作方面的问题不容回避;另一方面导致钢铁材料产品生产过程中大量的资源和能源消耗。长期以来,钢铁企业为此而大幅提升轧制设备能力,投入了大量资金、人力,同时消耗了大量的能源和资源。如何克服传统 TMCP 工艺过程的缺点,即采用节约型的成分设计和减量化生产工艺方法,获得高性能、高附加值、可循环的钢铁产品。这一问题实实在在地摆在了轧钢工作者的面前,作为钢铁材料物理冶金重要手段的 TMCP 技术,需要建立新的发展思路和开发框架。

而与此同时,为弥补传统控制冷却技术的不足,在欧洲和日本相继开发出了热轧板带轧后超快速冷却技术。传统的层流冷却和新一代超快速冷却的共同特点,是它们都需要使用水,利用水来调节热轧钢材的冷却过程,即调节材料的相变过程。但是,与传统层流冷却相比,超快速冷却可有效打破汽膜,实现对热轧钢板进行高效率、高均匀性的冷却(对于 3mm 厚钢板冷却速度可达 400K/s 以上),冷却速率可达到传统层流冷却速率的 2~5 倍左右。但当时人们对该技术的认识和应用更多的是实现热轧钢材的快速降温或用于后段强冷实现双相钢的开发生产等补充或辅助手段。

基于 RAL 在超级钢工艺上的开发实践和对钢铁材料



图 1 中厚板传统控制冷却技术的主要设备

以实施,其核心思想是对奥氏体硬化状态的控制,即通过变形在奥氏体中积累大量的能量,力图在轧制过程中获得处于硬化状态的奥氏体,为后续的相变过程实现晶粒细化做准备。在 20 世纪 60 年代至 70 年代,随着能源不断开发,对高性能管线钢的需求大幅增加。为满足管线钢板的生产,控制轧制技术得到快速发展,并在当时的厚板轧制、船板生产等方面得到广泛应用。

为了突破控制轧制的限制,同时也是为了进一步强化钢材的性能,在控制轧制的基础上,又开发了控制冷却技术。控制冷却的核心思想是对处于硬化状态的奥氏体相变过程进行控制,以进一步细化铁素体晶粒,甚至通过相变强化得到贝氏体等强化相。相变组织比单纯控制轧制更加细微化,促使钢材获得更高的强度,同时又不降低其韧性,从而进一步改善材料的性能。1980 年,日本 NKK 福山制铁所首次为厚板生产线配置并使用了 OLAC (On-

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的奥氏体相变过程的控制,获得晶粒细小的最终组织。为了提高再结晶温度和保持奥氏体的硬化状态,同时也为了对硬化状态下奥氏体的相变过程进行控制,控制轧制和控制冷却始终紧密联系在一起。控制轧制的基本手段是“低温大压下”和添加微合金元素。所谓“低温”是在接近相变点的温度进行变形,由于变形温度低,可以抑制奥氏体的再结晶,保持其硬化状态。“大压下”是指施加超出常规的大压下量,这样可以增加奥氏体内部储存的变形能,提高硬化奥氏体程度。微合金化是增加微合金元素,例如铌等微合金元素的加入,是为了提高奥氏体的再结晶温度,使奥氏体在比较高的温度即处于未再结晶区,因而可以增大奥氏体在未再结晶区的变形量,实现奥氏体的硬化。控制冷却的理念可以归纳为“水是最廉价的合金元素”这样一句话。

先进水平的自主知识产权的系列控冷设备。此后,国内中厚板企业轧线设备或采用国产或通过成套引进,中厚板轧线相继都配备了冷却机理一致、但设备形式及功能有所差异的层流冷却设备,并在此设备基础上,开发出相关控制冷却工艺技术,在各类品种及工艺开发过程中发挥了巨大作用。

2 TMCP 的创新发展:新一代 TMCP 技术的起源与基本原理

20 世纪 90 年代,国内外钢铁行业掀起了超级钢的工艺技术开发潮流。1998 年底,我国国家重点基础研究发展计划(973 计划)“新一代钢铁材料的重大基础研究”项目启动,东北大学 RAL 承担“轧制过程中实现晶粒细化的基础研究”子课题,其任务是通过细化晶粒,使现有 200MPa 级别的普碳钢在成分基本不变的条件下屈服强度提高一

上接第B04版

TMCP 工艺技术领域的研究与体会,以及对传统控制冷却(层流冷却)技术重新认识,王国栋院士敏锐地认识到,将超快速冷却技术应用于热轧钢铁材料轧制技术领域,与控制轧制相结合,必将成为已发展30余年的 TMCP 技术带来革命性的变化,引领新的发展。

随后在 RAL 开展的系列实验室研究结果表明,超快速冷却使热轧钢板的性能指标与以往相比有了质的飞跃,而材料成本和生产过程中的各类消耗则大幅度降低。这种技术在生产中的初步应用使人们认识到,使用水的冷却过程不仅仅可以丰富轧后冷却路径控制手段,而且会衍生出很多新的钢材强韧化机理。在此基础上,2007年,以王国栋院士为代表的 RAL 轧钢科技工作者系统提出了以超快速冷却技术为核心的新一代 TMCP 技术。

目前,轧后超快速冷却技术已经成为热轧板带材生产线改造的重要方向。中试结果和部分生产应用都表明,这种技术可以推广应用到包括中厚板、热连轧、棒线材、H型钢、钢管等90%以上的热轧钢材。与常规冷却方式相比,不仅可以提高冷却速度,且与常规 ACC 相配合可实现与性能要求相适应的多种冷却路径优化控制。

与传统 TMCP 技术采用“低温大压下”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,趁热打铁,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 在奥氏体向铁素体相变的动态相变点终止冷却;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,通过采用适当控轧+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、采用常规轧制或适当控轧,尽可能提高终轧温度,来实现资源节约型、节能减排型的绿色钢铁产品制造过程。新一代 TMCP 技术与传统 TMCP 的区别如图 2 所示。

3 新一代 TMCP 核心装备技术—超快速冷却系统

钢铁材料在冷却过程中会发

生复杂的相变。如果依据钢铁材料相变过程的特点,与其连续冷却,不如实行冷却路径控制,则可以控制冷却后的相变组织,从而得到需要的材料性能。因此,我们将冷却过程分为彼此连接在一起的几个冷却阶段,各个阶段的冷却速率和冷却起讫点按需要设定,并进行精确控制。

冷却装置应当能够实现从空冷到超快速冷却的不同的冷却速率。通常快速冷却(或超快速冷却)可以实现3种抑制功能。

其一,在奥氏体区采用超快速冷却,可以抑制变形奥氏体再结晶,防止奥氏体发生软化及晶粒粗化,从而在后续的相变过程中细化铁素体晶粒,低成本地实现材料的细晶强化。

其二,如果在奥氏体中可能发生C、N 化物析出,利用超快冷可以抑制这种奥氏体中的析出,使析出在较低温度下在铁素体相变中或铁素体区发生,从而细化析出粒子,增加析出粒子数量,在同样的合金含量下,低成本地提高析出强化效果。

其三,通过超快速冷却,可以抑制较高温度下发生的相变,促进较低温度下发生的中温或低温相变,低成本地实现材料的相变强化。

当然在冷却过程中有时也需要低速冷却,例如空冷,这一过程可近似于保温,有利于相变和析出过程在接近恒温的条件下进行。

根据上述组织控制要求,冷却系统应当具有下述功能:

1) 大范围冷却速率控制

根据需要,将冷却区划分为

几个区段。各区段冷却系统集管的冷速可在空冷与超快速冷却之间无级调整。这样可以依据需要,对各个冷却区段选定一定的冷却速率,对材料相变过程进行控制,从而实现对材料组织和性能的控制。

2) 精确控制冷却起讫点温度

根据需要,将冷却区划分为几个区段。每个区段起讫点依据需要进行精确的温度控制。

3) 冷却路径控制

钢铁材料有别于其他材料的重要特点,即钢铁材料有复杂的相变过程。为了控制钢材的组织和性能,需要进行精确的冷却路径控制。在上述各段冷却速率和冷却起讫点温度得到精确控制之后,可以实现钢铁材料精细的冷却路径控制。这就为获得多样化的相变组织和材料性能提供了广阔的空间。利用这样一个特点,我们有可能利用简单的成分设计获得不同性能的材料,实现减量化、集约化的轧制生产。

因此,与传统 TMCP 相比,新一代 TMCP 工艺依托的装备条件是轧后超快速冷却系统。与普通层流冷却技术相比,超快速冷却技术通过有效打破钢板与冷却水之间的汽膜,实现高效射流冲击换热和核态沸腾换热,对3~4mm 厚板带材冷却速度可达300~400°C/s,为控制钢材轧后的组织和性能提供了强有力的手段。

自新一代 TMCP 工艺技术理念提出以来,在东北大学 RAL、鞍钢、首钢、华菱涟钢、马钢等国内钢铁研究院所及钢铁

企业的共同努力下,目前已在中厚板、热连轧、H型钢等热轧钢铁材料新一代 TMCP(控轧控冷)装备及工艺开发技术领域取得了系列创新性的科研成果,开发出应用于中厚板轧机的 ADCOS-PM 系统、热连轧机的

ADCOS-HSM、棒线材轧机的 ADCOS-BM 系统、H型钢轧机的 ADCOS-HBM 系统。2009年,依托河北敬业 3000mm 中板生产线,国内首套超快速冷却装备开发成功;2010年,首秦 4300mm 和鞍钢 4300mm 宽厚板生产线超快速冷却装备(ADCOS-PM)投产运行;2010年,华菱涟钢 2250mm 热连轧线、CSP 热轧线超快速冷却装备(ADCOS-HSM)投产运行;2009年,马钢 H型钢轧后超快速冷却装备(ADCOS-HBM)投产运行。经

过近五年的开发及实践探索,围绕新一代 TMCP(控轧控冷)技术,RAL 作为国内该项技术的倡导者、实践者,已在超快速冷却技术机理、超快速冷却成套装备技术、材料强化机制、产品工艺开发等关键技术领域获得成功突破,并在普碳钢(减量化 Q345)、高强(Q600MPa/700MPa)、管线(X70/80)等产品品种上实现工业化生产线大批量规模化生产,在低成本高性能热轧钢铁材料开发方面取得显著成效。RAL 根据对热轧钢铁材料新一代 TMCP 技术材料组织控制机理的研究及探索,提出了基于新一代 TMCP 的如下组织调控方法:

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) 厚板与超厚板高质量、高效率轧制技术。

关于上述相关装备技术及各种组织控制技术的具体研究成果,将在后续报道中予以介绍。

4 新一代 TMCP 技术进展及目标: 实现低成本高性能热轧钢铁材料工业化大批量生产

新一代 TMCP 技术目标是通过研究热轧钢铁材料超快速冷却条件下的材料强化机制、工艺技术以及产品全生命周期评价技术,采用以超快冷为核心的可控无级调节钢材冷却技术,综合利用固溶、细晶、析出、相变等钢铁材料综合强化手段,实现在保持或提高材料塑韧性和使用性能的前提下,80%以上的热轧板带钢(含热带、中厚板、棒线材、H型钢、钢管等)产品强度指标提高100~200MPa以上,或节省钢材主要合金元素用量30%以上,实现钢铁材料性能的全面提升,大幅度提高冲击韧性,节约钢材使用量5%~10%;提高生产效率35%以上;节能贡献率10%~15%左右。

2011年,新一代 TMCP 技术相继被列为工信部《产业关键共性技术发展指南(2011年)》中钢铁产业五项关键共性技术之一,《钢铁工业“十二五”发展规划》重点领域和任务以及新工艺、新装备、新技术创新和工艺技术改造的重点内容,国家发改委《产业结构调整指导目录(2011年本)》中钢铁部分的鼓励类政策之一,新一代 TMCP 技术获得国家政府部门的高度重视,凸显了其在钢铁行业发展中的重要作用。

新一代 TMCP 通过工艺创新,依托装备及产品工艺创新,将有助于实现我国热轧钢铁材料的“资源节约型、节能减排型”等绿色制造工艺过程,从而推动我国钢铁行业轧制工艺的全面技术进步。

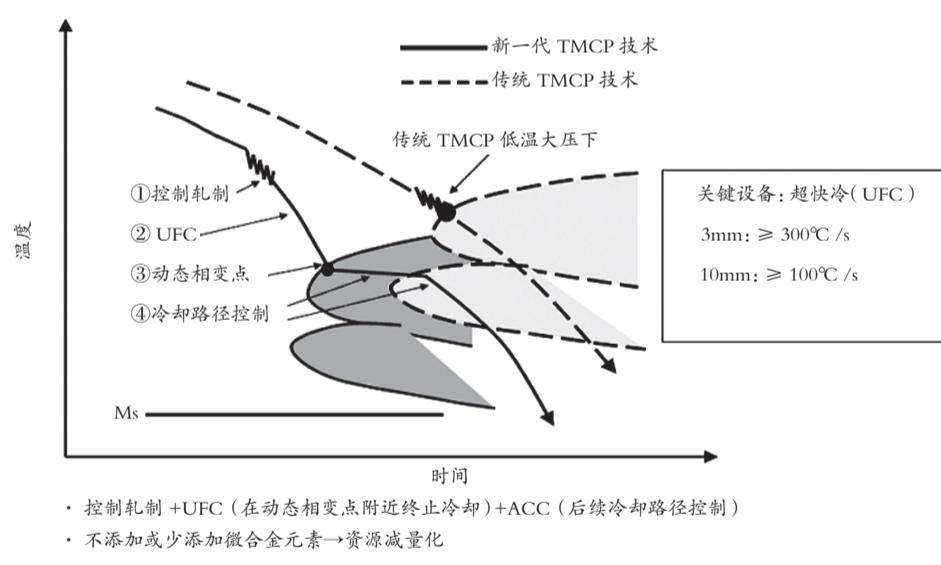
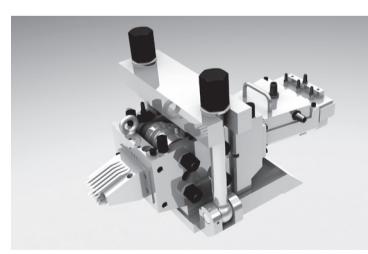


图 2 新一代 TMCP 与传统 TMCP 的比较

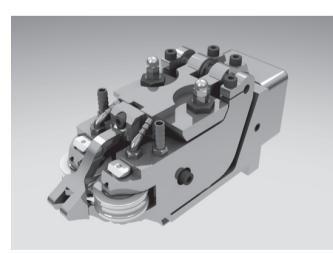


合肥东方节能科技股份有限公司

我公司生产的轧钢导卫,品种规格齐全。公司研制的“DF”系列产品已遍布国内100多家钢厂,并出口到美国、德国、意大利、马来西亚、土耳其等十几个国家。主要产品有:



◆ 大、小棒材连轧的全套导卫装置(包括二、三、四、五切分)其中四、五切分导卫装置填补了国内空白,达到国际先进水平。



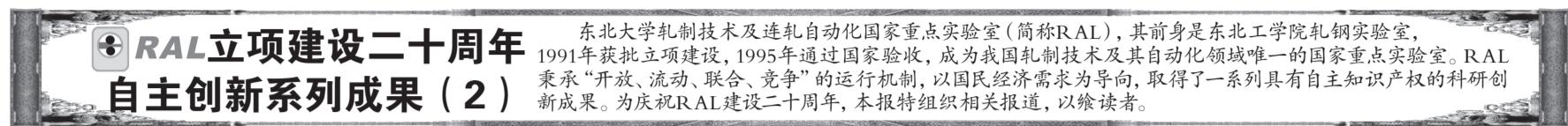
◆ 大、小棒材连轧的全套导卫装置(包括二、三、四、五切分)其中四、五切分导卫装置填补了国内空白,达到国际先进水平。
(此数据由公司提供)

地址: 安徽省合肥市经济技术开发区紫云路239号 邮编: 230601 网址: www.dfjnkj.com
电话: 0551-3821145 传真: 0551-3821146 邮箱: hfdfyjsb@163.com

什么是导卫装置? 导卫装置在轧制过程中有什么作用?

答: 在型材或线材轧机上,安装在轧辊孔型入口和出口处,引导扶持轧件顺利进入轧机轧制和导出轧机的装置称为导卫装置。

导卫装置是在型钢轧制中必不可少的诱导和护卫装置,在轧制过程中起着不可替代的作用,主要是正确地将轧件导入轧辊孔型,保证轧件在孔型中稳定地变形,并得到要求的几何形状和尺寸;顺利、正确地将轧件从孔型中导出,防止缠辊、旁窜;控制或强制轧件扭转或防止其弯曲变形,特殊情况下使金属变形、翻钢或切分,并按一定方向运动。导卫装置的设计是否合理,直接影响所轧产品的质量和轧机生产能力。尽管孔型设计合理,如果导卫装置的设计或使用不当,也不能轧出合格的产品。导卫装置设计和调整得好,还能弥补孔型设计的不足。



中厚板新一代TMCP装备及工艺技术

根据新一代 TMCP(控轧控冷)工艺技术理念,充分利用细晶强化、相变强化、析出强化、固溶强化等综合强化手段,进一步挖掘钢铁材料潜能,进一步认识和理解“水是最廉价的合金元素”,采用节约型的成分设计和减量化生产方法,较低成本实现高性能钢铁材料的开发与大批量生产,获得高附加值、可循环的钢铁产品,不仅是新一代 TMCP 工艺的技术目标,同时也是当前我国钢铁行业众多中厚板企业的强烈诉求。

实施新一代 TMCP 工艺技术的关键是要开发出中厚板超快速冷却装备及相应的工艺技术,从而为热轧中厚板生产过程实施新一代 TMCP 工艺提供装备支撑。传统中厚板控制冷却设备自 1980 年日本 NKK 开发成功并实现大规模工业化应用至今已历经三十余年。尤其是近十年来,国内中厚板轧线控制冷却技术得到普遍应用,企业工艺技术人员对控制冷却技术所涵盖的设备和工艺的认识及理解也得到进一步深化提高。实际上,在中厚板企业

冶炼和轧制装备及技术水平的日益提高、生产工艺组织及管理水平渐趋成熟的前提下,决定中厚钢板组织和性能等级以及平直度质量的轧后控制冷却技术及工艺,已成为国内外中厚板生产厂家提高产品档次和竞争力的关键核心技术。

1 传统层流冷却技术的开发、实践及再认识

1.1 中厚板轧后冷却技术的发展现状

中厚钢板轧后冷却技术的研究起源于 20 世纪 70 年代中期管线原板的开发与生产需要。NKK(现已与川崎钢铁合并为 JFE)通过控制冷却设备的开发,历经中试,于 1980 年开发出首套中厚板在线控冷设备—OLAC(On-line Accelerated Cooling)系统,并在其福山制铁所的厚板生产线上投入使用。我国约从 2000 年开始,在国内相关科研单位如东北大学、北科大等努力下,依托相关钢铁企业中厚板轧线建设及技术改造,自主

研发出具有当时国际先进水平的自主知识产权的系列控冷设备。此后,国内中厚板企业或采用国产或通过轧线设备成套引进,中厚板轧线相继都配备了冷却机理一致、但设备形式及功能有所差异的层流冷却设备,并在此设备基础上,开发出相关控制冷却工艺技术,在各类中厚板品种及工艺开发过程中发挥了巨大作用。

纵观中厚板轧后冷却技术近三十余年的发展历程,截至目前,大体可分为两个阶段,第一阶段是 20 世纪 80 年代开发并发展成熟的以层流冷却为代表的的传统层流冷却技术;第二阶段是 1998 年后由日本 JFE 钢铁公司开发的新一代轧后冷却技术。具体详见图 1 所示。

对于 20 世纪 80 年代开发并推广应用的传统层流冷却技术,实现方式有带压力喷射冷却、层流冷却、喷淋冷却、板湍流冷却、水幕冷却、水—气喷雾冷却等多种冷却方式。国外典型的控制冷却设备如表 1 所示。

但根据目前国内在轧后冷却技术领域的多年研发及应用实践

过程来看,上述系列控制冷却设备所实现的应该仅仅是一般冷却强度的冷却过程,其所表述具备的直接淬火功能,通过其现在的技术改造趋势或现阶段我们对它的回顾理解认识来看,应该说效果有限,或者理解为其高强度冷却功能效果不尽满意。原因具体应该体现在两个方面:一方面在于冷却能力上,可能不足以满足实现在线淬火的工艺冷速要求;另一方面在于冷却后的钢板板形难以控制。对于这一问题的理解还可以从 1998 年 JFE 依托其 Super-OLAC 开发成功后的在线热处理(HOP)工艺应用及品种开发情况作为佐证。因此,在中厚板轧后冷却技术领域,此前发展重点是中厚板控制冷却技术的研究和应用。

同比我国由于钢铁轧制技术发展起步较晚,冷却技术实际上长期处于跟踪发展阶段。与日本第一阶段控制冷却技术可类比的传统主流层流冷却设备,在国内从设备型式及冷却机理上,可主要归纳为两类,一类是直集管型层流冷却设备,一类是 U 型管型层流冷却设备。在此基础上,国内不同研制单位通过采用加密或稀疏配置集管数量、改进集管出水口管径大小以及采用不同类型的均流装置优化设计集管宽向流量分布等技术方案或手段进行一定程度的改良和完善,如适当提高

合理性甚至设备美观度上达到极致。而与此同时,国内围绕层流冷却设备开展的系列完善与改良工作基本结束,以高密管层流型式为核心的层冷设备型式确立。

第二阶段,即以日本 JFE 钢铁公司开发的以超快速冷却技术为核心的新一代轧后冷却系统 Super-OLAC 为代表。基于对 OLAC 等传统控制冷却技术使用过程中存在的冷却过程不稳定、冷却过程温度偏差较大导致中厚板性能不稳定、钢板内部残余应力较大以及板形恶化等问题。JFE 公司在原有 OLAC 技术的基础上通过大量的研究开发了具有全新概念的新型快速冷却技术—Super-OLAC,如图 2 所示。Super-OLAC 系统全面突破现有层冷设备冷却机理和设备模式。在冷却机理上,主要以射流冲击换热和核态沸腾换热为主要热交换方式,冷却强度可达到传统层流冷却的 2~5 倍以上,可以以近似理论极限冷却速度对钢板实现高强度冷却。在设备模式上,摒弃原有层流冷却设备的集管模式,采用可升降结构设计,设备模式更为庞大。冷却系统以有压水、喷嘴可升降、近距离喷射钢板冷却为特点。在冷却效果上,可实现中(宽)厚板全面均匀的高强度冷却,解决了现有层流冷却设备存在的冷却速度不高、冷却均匀性不好等问题。

JFE 公司通过采用 Super-OLAC 系统成功开发出系列低成本高性能的中厚板产品,包括高强度厚规格船板,低屈强比、高韧性和良好焊接性能的建筑用钢板(抗拉强度 490~590MPa),强度和韧性最佳匹配的超低碳贝氏体桥梁用中厚板(BHS500W 和 700W),低碳当量的高强度工程机械用中厚板(JFE-HITEN780LE)、压力容器钢板、X100 管线钢等,成为引领日本厚板轧制技术新潮流的关键技术。

1.2 传统层流冷却技术的问题及再认识

从 20 世纪 80 年代开发并推广应用的传统层流冷却技术,是中厚板轧后冷却技术发展过程中具有重要意义和影响的冷却技术方式。与控制轧制组成的 TMCP 技术,是 20 世纪最伟大的钢铁技术成果之一。该技术在中厚板产品的开发及生产过程中发挥了巨大作用,支撑了钢铁材料的发展,对人类文明和社会发展作出了巨大贡献,至今在国内外大多数钢铁企业仍发挥着重要的作用。

随着中厚板产品品种工艺开发进一步深入以及低成本减量化工艺实现高性能钢铁材料的开发需求进一步迫切,目前以层流冷却机理为特征的传统层流设备愈发暴露出其冷却机理上的不足,直观表现在其冷却能力偏低(即

表 1 国外部分典型的板材控制冷却设备							
公司	新日铁(NSC)	福山厚板(NKK)	川崎制铁(KSC)	住友金属(SMI)	神户制铁(KSL)	法国敦刻尔克厚板厂	法国 Clecim 公司
设备名称	CLC	OLAC	MACS	DAC I	DAC II	KCL	RAC
冷却方式	窄缝喷水或扁平喷淋	层流	喷嘴	窄缝层流	喷淋	管层流	层流冷却
用途	轧后快冷或直接淬火	轧后快冷或直接淬火	快速冷却	直接淬火	轧后快冷或直接淬火	轧后快冷或直接淬火	加速冷却或直接淬火

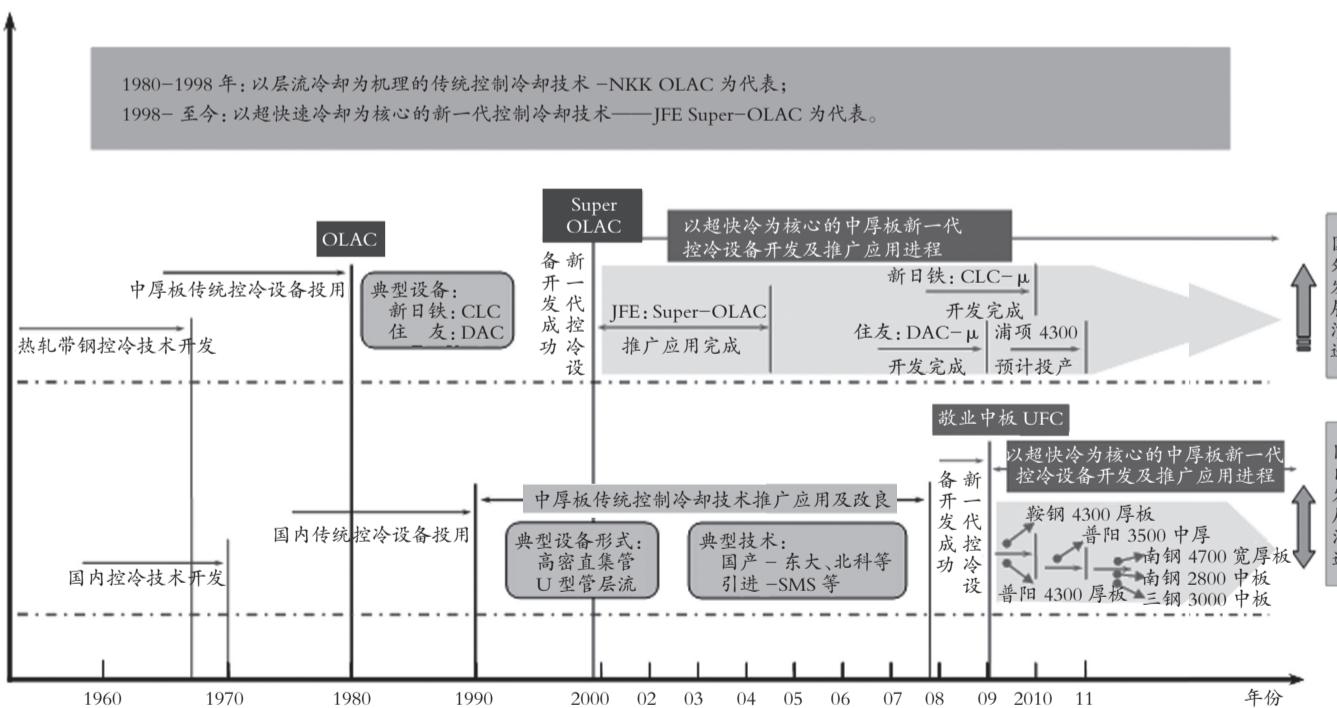


图 1 中厚板轧后冷却技术发展及技术演进

上接第B04版

冷却速率低)、冷却均匀性差(外在表现为冷却后钢板板形较差)两个方面。根据东北大学在轧后冷却技术以及控轧控冷工艺技术领域多年来的研发及应用实践,结合其应用需求,简要分析如下:

1) 冷却强度偏低,难以满足先进高强度钢铁材料开发所需的大冷却速率范围可调的需求

层流冷却强度偏低的原因主要在于其冷却机理主要采用换热强度较低的膜态沸腾换热。传统层流冷却设备采用高位水箱与层流冷却集管配置形势,冷却水在高位水箱产生的压力作用下自然流出,形成连续水流。冷却水在重力作用下垂直流落在钢板表面,在水流下方和几倍水流宽度的扩展区域内,形成具有层流流

动特性的单相强制对流区域(区域I),也称为射流冲击区域。该区域内由于流体直接冲击换热表面,从而大大提高热/质传递效率,因此换热强度很高。随着冷却水的径向流动,流体逐渐由层流到湍流过渡,流动边界层和热边界层厚度增加。同时接近平板的冷却水由于被加热开始出现沸腾,形成范围较窄的核状沸腾和过渡沸腾区域(区域II)。随着加热面上稳定蒸汽膜层的形成,带钢表面出现薄膜沸腾强制对流区(区域III)。该区域内由于热量传递必须穿过热阻较大的汽膜导热,而不是液膜,因此其换热强度远小于水与钢板之间的换热强度。随着流体沸腾汽化,在膜状沸腾区之外,冷却水在表面聚集形成不连续的小液态聚集区(区域IV)。小液态聚集区的水最终

或者被汽化,或者从钢板的边缘处流下。如图3所示。

实际冷却过程中,由于普通层流冷却设备纵向集管间距较大,冷却水落到热钢板表面上以后。在实际冷却过程中,造成膜状沸腾换热区域(区域III)远大于射流冲击换热区域(区域I),由于汽膜阻热,导致冷却强度较低。此即为基于层流冷却机理的传统控冷设备冷却强度偏低的根本原因。

对于通过加密集管排布提高管层流设备冷却强度的技术手段,可以说在一定程度上提高了钢板冷却强度。但实际过程中,由于管层流冷却设备采用无压冷却水自然流向钢板表面,加密集管布置提高钢板表面水流密度必然造成钢板上表面残留积水过多,导致集管流出的冷却水很

难穿透残留积水的水层厚度,即新水无法与钢板表面实现直接接触,其结果即为更多的冷却水也不能提高冷却效果,并往往起到反作用,恶化钢板冷却过程板形。

2) 冷却均匀性差,冷却后钢板板形控制难度大

传统层流冷却均匀性差的原因是由于其冷却过程中钢板表面残留水的无序流动以及由此形成的冷却水的过渡沸腾换热造成的。钢板冷却后的板形实际上是钢板冷却过程中冷却均匀性与否的外在表现。

集管冷却水在自重作用下流落至钢板表面后,受钢板运动惯性作用在较短时间内沿落点径向及钢板运行方向存在一定的有序流动,但随后即表现在残留水的无序流动。随着钢板沿轧线运行,更多的集管冷却水落至钢板表

除上述两个主要问题外,对于高密管层流直接淬火问题,下面简要予以分析。直接淬火工艺具有良好的经济性和有利于板材性能提高的优点,早已成为国内外钢铁企业开发高强度中厚板产品广为关注的重要技术领域。但以层流冷却机理为核心的中厚板直接淬火设备,淬火后板材性能均匀性及平直度控制难题是直接淬火工艺应用的重要制约因素。因此,这也是在中厚板轧后冷却技术领域,此前发展重点是中厚板控制冷却技术的研究和应用的重要原因。实际上,中厚板在线直接淬火技术的核心也是高强度均匀化冷却技术。结合上述冷却机理分析,结合多年来的开发及应用实践从冷却机理看,层流冷却设备的冷却能力和冷却均匀性并不能满足中厚板的淬火冷却工艺要求。实践也表明,以层流冷

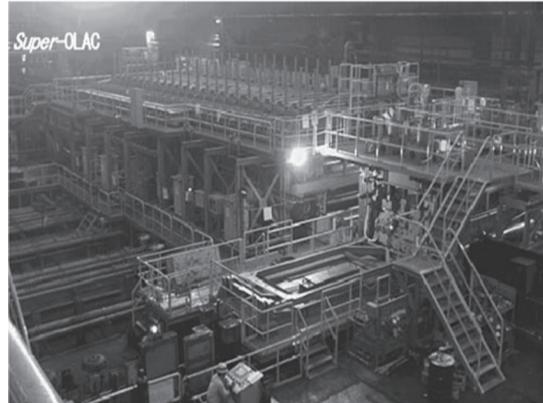


图2 JFE公司Super-OLAC设备与传统层冷设备冷却速度比较

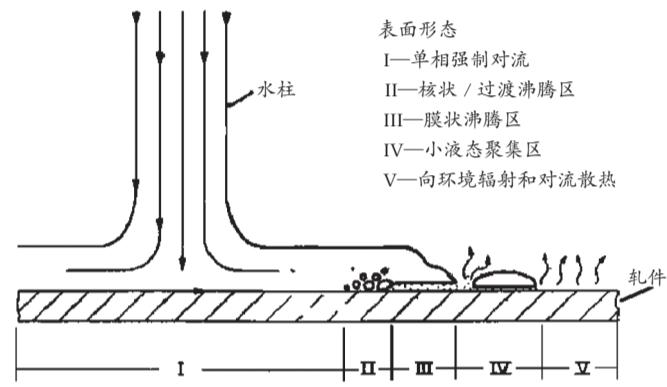
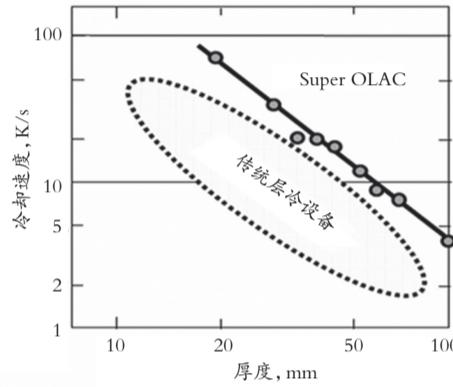


图3 钢板层流冷却过程的表面局部换热区描述

小型万能轧机立辊芯轴改进

1 改进前状况

山东钢铁集团莱钢型钢厂小型线是一条年产30万t的生产线,主要生产H型钢、工字钢、门架槽钢、履带钢等小型型材。所用的3架万能轧机是20世纪90年代制造的设备,其固定轧机立辊轴承的芯轴技术落后,是螺栓-螺母式结构。

这种螺栓-螺母式芯轴主要由带外螺纹的芯轴体、螺母压盖、心轴档键和防松卡块4部分组成。这种螺栓-螺母式芯轴主要存在以下4个方面的不足:①螺纹部分裸露没有保护措施,在装配和搬运过程中极易损伤螺纹。②这种芯轴的压盖为外圆带缺口的螺母,拆装时全靠人工用手锤敲击扁铲完成,装配极不好操作,人员劳动强度大,装配效率低,且很难压紧立辊轴承使轴承产生轴向窜动,轴承使用寿命低。③这种芯轴轴承的润滑油脂只能在安装轴承时一次性加入,当芯轴轴承刚开始工作时润滑脂多,对轴承阻力大,产生的热致润滑脂流失;工作时间长了轴承就缺油磨损,润滑效果差导致轴承消耗量大,使轧钢成本升高。④这种芯轴结构复杂,需要防松卡块止挡防松,当芯轴螺母压不紧轴承时,就会引起轴承轴向窜动,使防松卡块失效。

2 改进方法

2.1 螺栓式芯轴体的改进

为了克服螺栓-螺母式芯轴的上述不足,将圆螺母锁紧结构改为压盖配螺栓锁紧结构,从而将整体外螺纹受力,改为六个螺栓承受分力。即将原来芯轴体的外螺纹部分切去,使芯轴体总长缩短21mm。

2.2 螺母式芯轴压盖的改进

用厚35mm、直径为Φ209mm的钢板,制作成芯轴压盖。压盖上与芯轴体六个孔相对应的位置,钻6个Φ26mm的通孔。再在孔的外侧扩Φ40mm,深25.5mm的沉孔用以沉没内六方螺栓头部,使芯轴运转时更加安全可靠。然后用M24×60mm的内六方螺栓将轴体和压盖紧固在一起。

2.3 芯轴润滑油路的改进

原芯轴轴承只能在离线解

体状态下一次性加油脂,不能在线加油,改为在线随时可控加油。即在芯轴大头端离轴心45mm处,且与键平行的位置,沿芯轴体轴向钻Φ8.5mm、深150mm的孔,在芯轴外表面原储油槽处沿径向钻Φ18mm、深8mm的孔,与原储油槽贯通。再在芯轴大头端部沿轴向攻M10,深20mm的螺纹,通过螺纹接头接入干油泵加油系统管路就可实现在线随时可控加油,从而保证润滑脂的正常供给。

总之,改进后的万能轧机压盖式立辊芯轴装置,由芯轴压盖、芯轴体、固定芯轴档键、内六方压盖螺栓4部分组成。(石增云 逢晓男 吕智勇 程新军)

3 改进后的使用效果

通过以上的改进使万能轧机立辊轴承的芯轴结构简单、受力合理,压紧轴承可靠,操作容易、省时省力。原来全靠人工用手锤击打扁铲来紧固和拆卸,拆装难度大,容易伤螺纹,费时费力。改成使用内六方扳手,用6个M24×60mm的内六方螺栓将立辊轴承压紧在芯轴体上。由于芯轴体外螺纹全部切去,使芯轴体总长缩短21mm重量变轻,减轻了职工的劳动强度,大大提高了装配效率,降低了劳动成本。由于使用内六方扳手紧固,可用套筒加力,大大提高了轴承的压紧程度,杜绝了立辊轴承轴向窜动,从而提高了轴承使用寿命。

通过5年多的运行,立辊轴承轴基本没有出现轴向窜动。使轧钢成品质量得到了稳定提高,减少了轴承损坏,从而降低了轴承消耗。通过加油系统的改造,使立辊轴承供油顺畅,保证了轴承润滑,更加提高了轴承使用寿命。通过上述改进仅节约轴承一项,使吨钢消耗轴承成本由原来的3.5元降低到2.2元以下。直接经济效益为年节约轴承成本40万元以上,间接经济效益因减少万能轧机立辊轴承损坏而停机检修,带来的经济损失每年可达60万元以上。由此看来以上改进是非常必要的,也是非常成功的。(石增云 逢晓男 吕智勇 程新军)

面,而此时前段集管流落至钢板表面冷却水已受高温钢板影响水温升高。在后段集管新水与前段集管具有一定温升的残水交互作用影响下,钢板表面即会产生一定程度的冷却不均。随着冷却过程的进行,钢板表面冷却不均将进一步恶化,进而影响钢板内部组织性能,表现为钢板的板形瓢曲等。同时钢板内部残余应力较大。若钢板内部残余应力太大,钢板热矫后矫平的钢板,运至冷床以及后续工序时会存在板形再次瓢曲。为确保交货质量,很多中厚板企业往往依赖重载冷矫设备,造成工序压力及成本很高。

却为机理的直接淬火设备,对于薄规格钢板,通常不能保证淬火后的板形,钢板冷却后易瓢曲,大大增加了后续矫直工作的难度。对于厚板(厚度≥30mm),难以达到板材淬火所需的冷却速度及淬透层深度,导致板材性能不合格。

因此,随着技术进步和对中厚板产品质量要求的提高,发展已近三十多年的传统层流冷却技术已不能很好的满足控轧控冷工艺的要求。低成本高性能的中厚板产品及工艺开发需要新一代控制冷却装备。

(未完待续)

SIEMENS 西门子新闻传真

www.siemens.com/metals

西门子将为中国首钢通钢改造棒材和大盘卷轧机

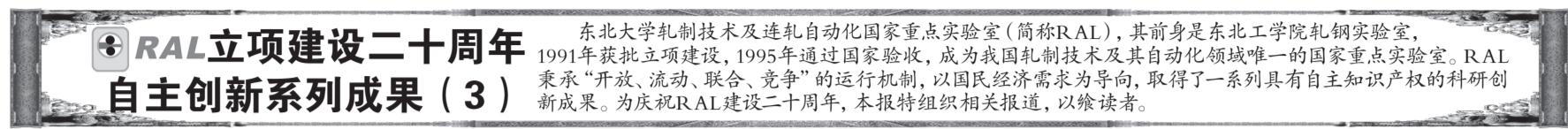
西门子奥钢联冶金技术部从首钢通化钢铁集团股份有限公司获得合同,将为通钢的棒材轧机现代化更新改造项目提供设备。项目内容也包括优化棒材生产的冷床入口区域和大盘卷生产用加勒特卷取机。该项目的目标是显著降低轧件的磨损,并且改善终端产品的质量。改造预计于2012年中期完成。

2006年由西门子在北京地区安装的棒材和大盘卷轧机,将搬迁至吉林省通化市。这套年产能为60万t的高质量直棒和盘卷的轧机能够生产直径从14mm到80mm的棒料以及直径从14mm到

50mm的盘条。

对于棒材轧机的冷床,西门子正在设计一套新的入口段,目的是最大限度减轻棒材表面在该段的磨损。棒材轧机也配备两台新锯,用以将棒材切割成需要的规格。盘卷在大盘卷轧机中用两台加勒特卷取机卷取而成。每台卷取机都将配备一个新的预弯装置,这不仅能够转换卷取方向,而且能够进一步降低卷取过程中棒材承受的机械负荷。西门子将为设备部分和锯切机电方案包提供配套的基础自动化,并将帮助首钢通钢进行安装和调试。

首钢通钢隶属于中国最大的钢铁企业之一的首钢集团。



中厚板新一代TMCP装备及工艺技术

(接第4期B05版)

2 新一代中厚板控制冷却装备应具备的特征和功能

为了提高再结晶温度,利于保持奥氏体的硬化状态,同时也为了对硬化状态下奥氏体的相变过程进行控制,控制轧制和控制冷却始终与微合金化紧密联系在一起。同时,为弥补传统层流冷却存在的冷却不均而导致的中厚钢板板形问题,通常需要具有强大矫正能力的高刚度重载热矫直装备甚至冷矫直装备反复矫直来满足钢板交货的平直度要求,这一点在国内中厚板企业高强工程机械用钢、高级别管线钢等高品质钢产品品种的生产中表现尤为突出。

在现有成分设计体系基础上,实现中厚板产品微合金元素的减量化应是新一代控制冷却装备的基本特征和功能。层流冷却条件下,由于冷却过程中冷却速率较低,在较低的可控冷却条件下,为实现相变强化,抑制铁素体相变,必须通过添加足量微合金元素实现铁素体转变曲线的鼻尖向右移,才能获得相应的贝

氏体或马氏体相变组织,从而获得所需的性能。不添加或少添加合金元素,钢铁材料相变曲线鼻尖靠左。采用超快速冷却的条件下,由于冷却速度大幅度提高,就可以通过高冷却来获得相应的组织,即通过水代替昂贵的合金元素,可以得到同样的性能。因此,对于成分、厚度规格、强度级别上均有很大区别的热轧钢铁产品,从减量化角度,提高冷却速度对实现资源节约型、成分或工艺减量化的产品开发技术路线来说,具有普适性的效果。对于热轧钢铁材料TMCP技术本身,这也是新一代TMCP的创新发展之处。

解决中厚钢板冷却后的板形不良问题、实现高强度冷却(或极限冷却)条件下的板形平直度控制应是新一代控制冷却装备的又一重要特征。冷却后板形的好坏是冷却过程中钢板冷却均匀与否的直接体现,也是冷却过程中钢板内应力综合作用的宏观表现。对于冷却后的板形不良问题,若冷却后板形较差,依赖矫直装备通过反复矫直过程实现板形矫正。一是对后续工序造成很大压力,增加工序成本,直接影响产品生产节奏及工序顺序;二是由于

矫直设备矫直盲区的存在,对于板头板尾,很难实现高强钢板头尾位置的完全矫正,从而导致过大的切头切尾量,直接影响成材率;再者,大部分情况下矫直设备并不能完全消除钢板存在的残余应力,矫直后的钢板裁切(如纵向切条等)后易于发生翘曲,影响板材后续使用。而实际上对于某些产品,采用矫直装备反复的塑性变形对钢板内部组织的拉伸变形作用有时是不允许的。因此,解决热轧钢板冷却后的板形问题,其根本途径在于有效解决轧后冷却过程的冷却不均,从而在根源上解决和改善板形不良问题。

综合上述分析,要改进和完善中厚板层流冷却技术存在的不足,满足高性能钢铁材料的低成本减量化生产要求。热轧中厚钢板新一代轧后控制冷却技术及装备应具有如下特点:

1) 具备高的冷却强度,满足高温钢板的超快速冷却要求,为控制钢材热轧后的组织和性能提供强有力手段,具备工艺拓宽、实现产品性能升级(或产品合金成分减量化)、扩大品种及规格范围等多种功能。

冷却装备可实现轧后钢板大范围冷却速率的控制(具备常规层流冷却最大冷却能力2~5倍乃至以上超快速冷却能力和可调节冷速),满足品种、规格等多样中厚板产品的多种冷却工艺需要,如常规冷却强度、超快速冷却(2~5倍于层流冷却强度)以及直接淬火工艺等。

2) 具有良好的冷却均匀性,有效避免生产过程中出现的板形问题,满足中厚板产品尤其是高强中厚板产品冷却后的板形控制要求。

冷却装备不仅要实现常规层流冷却强度下的冷却均匀,还应实现极限冷却强度如超快速冷却、直接淬火条件下的钢板均匀

化冷却,确保钢板内部组织均匀、应力小、板形良好,减轻后续矫直工序压力,满足板形要求。

3) 可充分利用细晶强化、析出强化、相变强化及固溶强化等多种强化机制,实现多种强韧化机制的优化组合,满足低成本高性能钢铁材料开发需要。

热轧钢铁材料具有复杂多样化的相变组织和材料性能,结合控制轧制,通过采用多种冷却工艺,包括常规冷却、超快速冷却(2~5倍于层流冷却强度)、直接淬火冷却等,充分挖掘工艺潜力,实现基于材料使用要求“量身打造”钢铁材料,开发低成本高性能中厚板产品及工艺。

4) 冷却设备控制系统具备冷却速度、终冷温度、冷却过程弛豫控制等多元调节控制功能,具有高的控制精度。

传统层流冷却设备由于冷却强度较低,依赖集管水量在一定范围内的调节并不能实现层冷设备在“硬件”能力上的大范围冷却能力可调的功能,即实现钢板冷却速率的有效控制。充分利用热轧钢铁材料多种强化机制,实现减量化的合金成分设计,就要实现热轧钢板轧后精确的冷却路径控制,满足产品开发所要求的冷却速度、终冷温度、冷却路径等参数控制需要,实现高精度的冷却过程控制。

因此,中厚钢板新一代轧后控制冷却技术及装备是以超快速冷却为特征的控制冷却系统。

3 基于超快速冷却的中厚板新一代TMCP装备及工艺技术开发的难点与关键技术

3.1 高强度均匀化冷却技术的开发与实现

超快速冷却装备开发的技术核心及关键技术难点是热轧钢板的高强度均匀化冷却技术。高温

换热是伴随有相态变化的对流换热方式,主要有核态沸腾、过渡沸腾和膜态沸腾三种形态,热量主要靠液体变汽体时的汽化潜热方式来传递,如图5所示。

从换热强度来看,射流冲击换热和核态沸腾换热均具有很高的换热强度,是满足高温钢板高强度冷却的热交换方式。因此,实现热轧钢板的高强度冷却,在冷却机理上,必须摒弃传统层冷设备以膜态沸腾为主的层流冷却机理及换热方式。

从冷却均匀性来看,高温钢板冷却过程中的板形和冷却均匀性的控制要求,体现为冷却过程中热交换方式的换热均匀性,取决于对板材水冷过程中微观换热方式的有效控制。

因此,实现高温钢板的高强度均匀化冷却,从两种换热方式的微观换热特性的物理机制、影响因素等方面出发,考虑到高温钢板水冷过程中射流冲击换热与沸腾换热的相互关联性,结合钢板运动过程,提出采用一定压力的冷却水倾斜喷射的超快速冷却技术方案。通过合理的喷嘴设计、喷嘴布置方式以及在整个冷却区内的水流量分配,使带有一定压力的冷却水以一定角度冲击到钢板表面。通过消除残存钢板表面汽膜,实现新水直接接触钢板表面,钢板表面残水形成有序壁面射流,从而获得高的冷却强度。同时,倾斜喷射的有压水通过有效减少膜态/过渡沸腾状态,实现钢板表面残留水的有序流动,扩大高温钢板冷却过程中的射流冲击换热区。尽量减小膜态沸腾、过渡换热过程的热交换区域及作用时间,从而实现钢板高强度冷却过程中微观换热过程的稳定性和均匀性,并实现高温钢板的高强度均匀化冷却。如图6为RAL开发的超快速冷却核心技术即高强度均匀化冷却技术与传统层流冷却技术的分析比较。

3.2 基于超快速冷却的新一代控制冷却成套装备及过程控制技术开发

在高温钢板高强度均匀化冷却机理的基础上,开发以超快速冷却为特征的新一代控制冷却成套装备,涉及关键喷嘴结构开发设计、装备开发与集成(含机械设备、电气、自动化、控制模型),过程控制技术开发,以及配套水系统的技术开发与设备集成等。在设备结构上与传统层流冷却技术存在根本性区别,必须摒弃现有的层流冷却设备模式,实际上是我国冶金成套技术装备开发领域的一项原始性技术创新。

1) 超快速冷却系统喷嘴结构开发

采用有限元流体数值分析方法,基于对喷嘴进水结构、均流装置等对喷嘴出口流量分布影响的模拟分析,进一步结合实验室中

下转第B05版

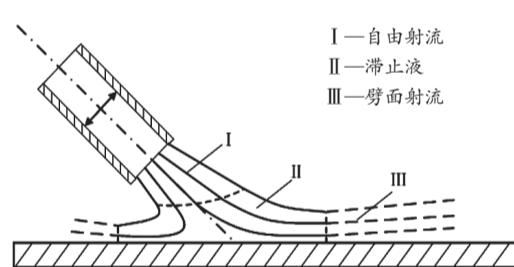


图4 喷嘴射流冲击钢板的流动结构示意图

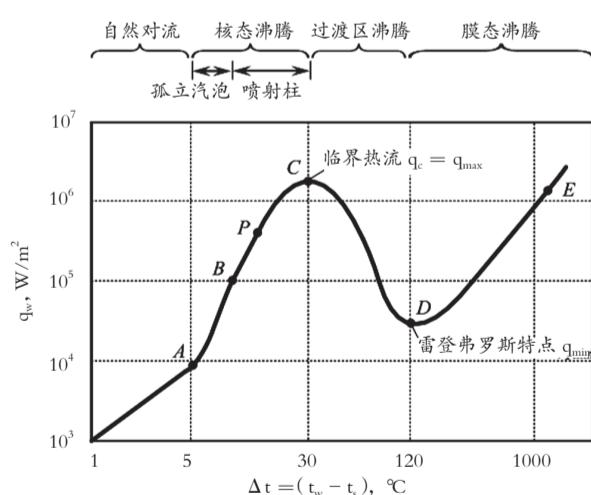


图5 标准大气压下水的沸腾曲线

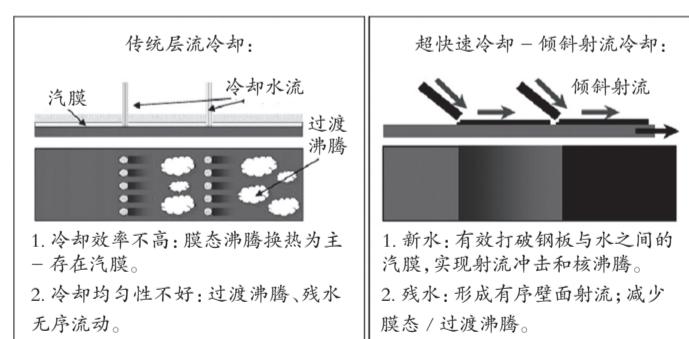


图6 开发的超快速冷却技术与传统层流冷却机理比较示意图

上接第B04版

试、制造厂试制,开发出流量分布合理、具有自主知识产权的大型超宽整体狭缝式喷嘴和高密快冷喷嘴结构。图7为中厚板超快冷系统缝隙喷嘴的有限元实体模型及实际喷嘴出口流量分布情况。从图中可以看出,开发的缝隙喷嘴结构具有良好的流量分布均匀性。

需要指出的是,开发的狭缝式喷嘴在水流流动形态、冷却机理上与传统层流冷却设备的水幕喷嘴存在本质区别。在水流流动形态上,传统层冷设备水幕喷嘴基于层流流动形态,出流形成的幕状水流的成幕条件不仅受自身流体收缩和表面张力作用影响,同时受水中气体、杂质和喷嘴振动以及导流槽光滑程度等喷嘴结

构影响。成幕条件不易控制,易于破断,稳定性差,可控性低,已被实际应用所淘汰。而开发的超快冷狭缝式喷嘴在水流流动形态上,是基于紊流流动形态,一定的水压通过合理的喷嘴结构实现沿喷嘴宽度方向的流量均匀分布,可有效避免前述层流形态水流流量分布可控性低的问题。在冷却机理上,水幕冷却并未脱离开依靠水流自重形成幕状层流实现钢板冷却的层流冷却机理。而狭缝式喷嘴通过一定压力的射流冲击到钢板表面,基于射流冲击和核态沸腾换热实现高强度冷却。在辊式淬火机及超快冷装备中取得的实际良好使用效果也已充分证明了其机理和结构开发的合理性以及设备维护的简易可行。合理的喷嘴关键结构为超快速冷却系统的开发成功奠定了坚实基础。



图7a 缝隙喷嘴的有限元实体建模



图7b 缝隙喷嘴出口流量分布



图8a 鞍钢4300厚板超快冷装备

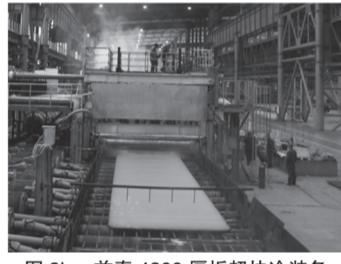


图8b 首秦4300厚板超快冷装备

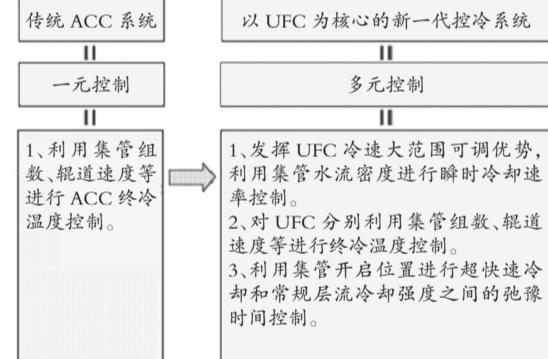


图9 超快速冷却系统的冷却路径控制特点

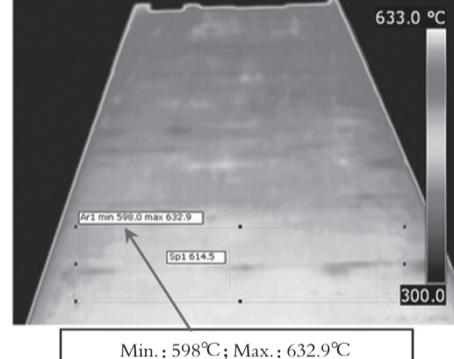


图10 超快速冷却系统的温度控制精度

等工作。

西门子赢得本合同的主要原因是西门子在以往项目合作中的表现令客户非常满意。在2010年,西门子为Novelis在巴西Pindamonhangaba的一套几乎完全相同的连轧式冷轧机提供了电气设备。西门子最近还受托为韩国蔚山铝热轧机进行扩建。Novelis韩国有限公司是美国亚特兰大Novelis有限公司的子公司,是铝和铝制品的领先生产商。Novelis有限公司在世界各地建有大约30家生产厂,是轧制铝产品和废铝回收市场的领先企业。

SIEMENS

www.siemens.com/metals

西门子新闻传真

西门子为Novelis韩国新建冷轧机提供设备

Novelis韩国有限公司与西门子奥钢联冶金技术部签定合同,西门子将为Novelis新建的铝冷轧机提供自动化和传动系统。这套冷连轧机将建在韩国永州,生产面向饮料罐体制造行业的优质板形铝带。合同额超过千万欧元,轧机计划于2013年投产。

Novelis计划在韩国永州新建一套冷连轧机,以扩大该铝厂的产能。西门子将提供所有的电气设计和设备,包括基础自动化、人机接口设备和相关传感器系统。集厚度、张力和板形自动控制于一体的工艺控

2) 基于超快冷特征的中厚板先进轧后冷却装备(ADCOS-PM)技术开发与集成

超快速冷却设备作为一个全新的冷却装备,在设备结构上,在考虑冷却工艺要求和设备功能的基础上,自主创新,开发出喷嘴集管优化配置技术、软水封控制技术、上喷嘴提升同步控制技术、防钢板翘曲设备保护技术、液压系统、电气自动化系统等冷却装备成套系列关键技术。开发出全新的中厚板冷却设备结构,实现了工艺、机械、液压、润滑以及电气自动化系统的集成创新,成功开发出以超快冷为特征的中厚板新一代控制冷却装备。图8为开发成功并应用于实际生产的系列中厚板超快速冷却装备。

3) 超快速冷却系统的工艺过程控制技术开发与实现

满足中厚板低成本减量化的需求,实现超快速冷却系统的连续稳定大批量工业化应用,有赖于开发出合理的超快速冷却工艺过程控制技术。针对中厚板的冷却工艺需求,开发出水量参数的高精度快速调节控制技术、对称冷却控制控制技术、钢板头尾低温区速度遮蔽控制技术、钢板分段优化处理及微跟踪控制技术、多元冷却路径及策略控制技术、冷却过程温度均

匀性控制技术、高平直度板形控制技术、超快速冷却过程的温度及工艺控制模型等一整套完整的关键工艺控制技术、手段以及工艺调试方法,为超快速冷却系统及工艺的稳定应用提供了关键技术支撑。图9所示为超快冷系统在冷却路径控制上的技术特点,图10为钢板采用超快速冷却工艺后的终冷温度控制及温度分布。

4) 辅助供水系统的配套技术与设备集成

与核心冷却装备的技术更新换代同步,超快冷的供水系统同样需要实现技术的配套创新。为满足超快速冷却系统不同冷却强度及工艺的供水需求,供水系统需要实现水量参数如水压、流量的高精度控制,为此,开发出供水泵组的流量变频控制技术。这里需要指出的是,超快速冷却装备对供水系统的水质要求并不苛刻,实际只需满足层流冷却条件下的水质要求即可。表2为超快冷条件下的主要水质参数要求。

从表中可以看出,与传统层流冷却系统的水质要求是一致的。实际上,随着国内钢铁企业对控制冷却技术及装备认识的提高,做好冷却设备水质的日常运行维护已成为企业工艺及设备技术人员的共识,已不再是所谓的维护与实现难题。

3.3 新一代TMCP工艺技术开发与应用——“成分节约型、工艺减量化”的全新低成本高性能热轧中厚板产品及工艺体系开发

中厚板新一代TMCP装备及工艺技术开发的目的在于实现

具有的冷却速率大范围可调的优势,就为实现中厚钢板灵活多样的轧后冷却路径及工艺控制提供了技术手段。通过对冷却路径进行适当控制,则可以在更大范围内,按照需要对材料的组织和性能进行更有效的控制,甚至开发出全新的高性能产品。因此,在实施新一代TMCP技术的过程中,创新性地提出了柔性的中厚板在线热处理工艺理念,如图11所示。

采用超快速冷却,还可能利用简单的成分设计获得不同性能的材料,实现柔性的轧制生产,提高炼钢和连铸的生产效率。为了实现贝氏体相变,往往添加Mo或B,使CCT曲线的铁素体相变区右移,以利于在较慢的冷却速率下得到贝氏体组织。但是,添加合金元素会提高生产成本,消耗资源。如果采用超快速冷却,情况会完全不同。例如同样为了发生贝氏体相变,可以不添加合金或少添加合金元素。通过轧后超快速冷却,抑制铁素体相变的发生,而使相变在更低的温度下进行。如果超快速冷却的终止温度位于贝氏体相变温度范围,则可以得到贝氏体组织。如果这一终止温度位于马氏体相变点以下,则得到马氏体组织,所以这是一种减量化和柔性的相变强化方法。

在轧制阶段,依据钢种,可选择高温轧制或低温轧制等不同的控制轧制方式。终轧后,采用超快速冷却将热轧钢板冷却至不同的动态相变点附近,通过实现精确的冷却起讫点温度控制及后续的冷却工艺过程控制,实现

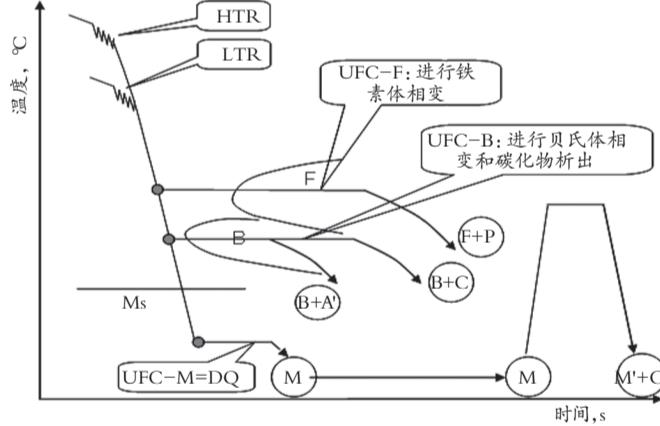


图11 柔性化在线热处理工艺技术

中厚板“成分节约型、工艺减量化”产品及工艺开发体系,这也是新一代TMCP工艺的技术目标和直接效益(包括经济效益和社会效益)体现。结合装备及工艺的创新,以“资源节约型、节能减排型”的热轧钢铁产品绿色制造为目标,再造一个成分节约型、工艺减量化的全新的热轧中厚板产品成分—工艺体系,形成品种、规格系列完整,工艺完善的热轧中厚板新一代TMCP工艺技术体系,实现钢材成分、工艺、产品的全面升级换代。

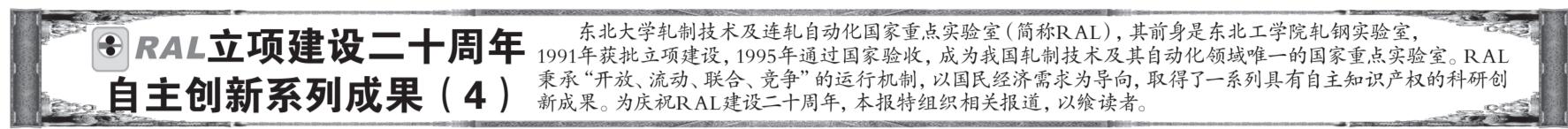
回顾传统TMCP技术的发展历程及技术进展来看,作为我国钢铁工业轧制技术领域的原始性技术创新,新一代TMCP工艺理念和技术在钢材产品及工艺上的完全实现,任务宏大,这是一个需要延伸几年、甚至十几年的艰巨任务。因此,这既是中厚板新一代TMCP装备及工艺技术开发与应用的终极目标所在,也是其技术难点所在。

在中厚板产品及工艺开发过程中,如果能够发挥超快速冷却

不同的工艺及相变组织控制。如果超快速冷却的终止温度位于贝氏体相变温度范围,则可以得到贝氏体组织,称为UFC-B;如果这一终止温度位于马氏体相变点以下,则得到马氏体组织,称为UFC-M,或者称为DQ。此外,通过与后续不同的冷却工艺、加热工艺如回火相配合,会使得轧后的热处理过程变得丰富多彩,也为获得多样化的相变组织和材料性能提供了广阔的空间。

因此,结合超快速冷却装备及工艺,针对中厚板生产工艺,采用提出的新一代TMCP的组织调控方法,如晶粒细化控制技术、相间析出与铁素体晶内析出控制技术、含Nb钢析出控制技术、贝氏体相变控制技术、在线热处理取代(或部分取代)离线热处理技术、集约化轧制技术、高强钢冷却过程中相变与板形控制技术、厚板与超厚板高质量、高效率轧制技术等,在低成本、高性能的中厚板产品及工艺开发中具有广阔的技术创新和开发应用前景。

(未完待续)



中厚板新一代TMCP装备及工艺技术

(接第6期B05版)

4 基于超快速冷却的新一代TMCP装备及工艺技术开发实践

新一代TMCP工艺技术是一项由理论创新带动装备创新,进而实现产品及工艺开发与创新的大型科研创新项目,实际上是以工艺为先导,集材料、机械、液压、电气、自动化、计算机控制、产品开发等多个学科专业为一体的综合性技术开发项目。

4.1 装备开发历程及推广应用

RAL开发成功国产首套自主知识产权的中厚板辊式淬火机装备及淬火工艺技术,RAL科技工作者在辊式淬火机开发研制过程中所掌握的高温钢板高强度均匀化冷却技术为中厚板在线超快速冷却装备的开发奠定了坚实基础。针对中厚板所需的超快速冷却系统,借鉴辊式淬火机淬火过程中高温钢板高强度均匀化冷却基本原理,RAL基于提出的倾斜喷射的超快速冷却系统设计理念,采用斜喷缝隙式喷嘴+高密管式喷嘴的混合布置,经过多年潜心研发和技术积累,在认真吸收现有冷却装备优点和分析中厚板新一代TMCP冷却工艺需

求的基础上,历经实验室实验、工业现场中试以及工业化装备开发等阶段,开发出具有自主知识产权的新一代轧后超快速冷却关键装备和技术。RAL将该系统命名为ADCOS-PM(Advanced Cooling System-Plate Mill)。开发的ADCOS-PM通过将板面残存水与钢板之间形成的汽膜清除,从而达到钢板和冷却水之间的完全接触,实现钢板和冷却水均匀接触的全面的核沸腾。在提高钢板和冷却水之间的热交换,达到高冷却速率的同时,实现了钢板的均匀冷却,大大抑制了钢板由于冷却不均引起的翘曲。当然,为了防止因轧制导致的钢板翘曲等板形问题影响热轧钢板的冷却过程,在超快冷系统的前面最好采用预矫直机对钢板进行预矫直。

这种新型的控制冷却系统首先于2007年在河北敬业公司3000mm中厚板轧机上装设了实验原型装备系统,确认了其冷却能力和冷却均匀性。随后在鞍钢4300mm中厚板轧线和首秦4300mm中厚板轧线上正式采用。2010年3月,鞍钢4300mm宽厚板轧后超快速冷却系统投入运行;2010年5月,首秦4300mm宽厚板轧线超快速冷却系统投入运行。近两年,RAL针对冷却装

置的极限冷却能力、冷却速度的调整范围、冷却均匀性保障措施以及柔性化冷却路径控制系统等超快速冷却系统装备及关键技术开展了卓有成效的开发与研究工作,并取得重大突破和成果,完成了工艺理论到工程实践的应用过程,最终形成了涵盖装备技术、自动控制、冷却工艺、减量化产品工艺等在内的完善的中厚板新一代TMCP装备及工艺成套技术。2011年5月,“鞍山钢铁公司新一代TMCP技术创新及产业化示范工程”列入国家发改委“钢铁、有色、石化行业低碳技术创新及产业化示范工程”,标志着中厚板新一代TMCP装备及工艺技术获得政府高度认可,自主创新及技术攻关和项目实施工作得到了国家层面的有力支持。

东北大学RAL在中厚板新一代TMCP装备及工艺技术领域的开发实践工作以及取得的丰硕成果得到了业界的高度认可。2011年8月27日,南京钢铁股份公司4700mm中厚板生产线项目进行国际招标。在与国际知名轧钢设备公司和自动化公司的激烈竞争中,RAL采用基于超快速冷却的中厚板新一代控制冷却装备技术成功中标该项目轧后控冷标段的工艺、装备和自动化系统。除RAL承担该项目冷却系

建三钢(集团)责任有限公司与东北大学RAL正式签约,三钢3000mm中板轧后冷却系统改造项目启动。RAL开发的以超快冷为特征的新一代中厚板控制冷却装备及工艺技术得到了业界高度认可,真正体现了自主创新的新一代TMCP技术的生命力。

2011年11月22日,由东北大学RAL与鞍钢合作完成的“鞍钢股份中厚板厂4300mm中厚板轧机后先进快速冷却系统的研制”项目通过了由辽宁省科技厅组织的省级科技成果鉴定。由国内钢铁行业知名专家组成的鉴定委员会鉴定认为,该项目开发成功的国内首套拥有自主知识产权的宽厚板在线超快速冷却系统,不但可以实现在线淬火工艺,而且可以实现比传统TMCP工艺更加灵活的新一代TMCP(UFC-TMCP)工艺,即实现了低成本高性能中厚板产品的批量稳定生产,取得了显著的经济效益、社会效益和环境效益。该成果总体上达到了国际领先水平。

4.2 装备及工艺技术特点

1) 系统冷却能力强、冷却速度调节范围广

ADCOS-PM系统的冷却能力可达到常规层流冷却强度的2~5倍以上,而且高温钢板冷却速率调节范围大,可实现水冷状态下热轧钢板的极限冷却能力,满足了热轧钢板轧后常规层流冷却强度、超快速冷却以及直接淬火等冷却工艺的需要。RAL开发的ADCOS-PM装备系统与JFE Super-OLAC系统的冷却能力对比如图12所示。从图中可以看出,ADCOS-PM装备系统在冷却能力上与日本JFE Super-OLAC系统基本一致。

同时,针对钢板冷却需要,可实现钢板瞬时冷却速率的无级调节,如对于20mm厚度钢板,可实现冷却速度在8~55°C/s范围内连续可调;对于30mm厚度钢板,可实现冷却速度在6~30°C/s范围内连续可调。

2) 系统冷却均匀性好,可实现不同水冷条件下热轧钢板轧后冷却过程的均匀性冷却

ADCOS-PM通过合理设计喷嘴形式和喷嘴布置方式,采用热轧钢板厚度方向、宽度方向以及纵向冷却均匀性控制技术,实现了热轧钢板常规层流冷却、超快速冷却以及直接淬火工艺过程中良好的温度均匀性控制和板形控制。图13为ADCOS-PM系统超快冷工艺条件下钢板的控温精度及板形情况。

3) 系统冷却工艺控制方式灵活,可实现多种冷却模式控制,满足多样化的冷却工艺需要

中厚板冷却路径的控制采用以超快速冷却设备为基础,可实现多级冷却路径控制及多种冷却模式。即根据材料组织及性能需要,设定每个冷却阶段的开冷温度、终冷温度、冷却速度,通过控

制各个阶段温度和冷却速度等工艺参数,实现轧后冷却过程中多样化的控制模式。图14为中厚板轧后多级冷却工艺控制示意图。

ADCOS-PM不仅可实现常规层流冷却前段冷却、后段冷却、两段冷却、稀疏冷却等冷却方式的需要,同时还可实现如下冷却工艺:

- ◆单独常规加速冷却(ACC);
- ◆单独超快速冷却(UFC);
- ◆多阶段的超快速冷却(UFC+);
- ◆多阶段的常规加速冷却(ACC+);
- ◆超快速冷却+常规加速冷却(UFC+ACC);
- ◆常规加速冷却+超快速冷却(ACC+UFC);
- ◆直接淬火(DQ)。

4.3 产品工艺开发与应用

在河北敬业、鞍钢、首钢等国内钢铁企业的大力支持和广大技术人员积极参与及努力下,基于超快速冷却的新一代TMCP工艺技术在“资源节约型、工艺减量化”的中厚板生产工艺及产品技术开发与批量化生产应用过程中成效显著。目前,基于超快速冷却装备,围绕新一代TMCP工艺,已在低合金钢系列、桥梁用钢、高强工程机械钢(Q550D、Q690D)、石油储罐用钢(08MnNiVR)、水电钢(07MnCrMoVR、AY610D)、管线钢(X65、X70、X80)、耐磨钢(NM360、NM400)等钢种方面开展了卓有成效的减量化工作,在低成本高性能钢铁材料开发方面效果显著。ADCOS-PM在提升产品性能、生产工艺及工序的减量化以及提高产品冷却均匀性等方面体现出良好的使用效果和工艺潜力,具体体现在:

- ◆可充分利用析出强化、细晶强化、固溶强化以及相变强化机制,提升产品综合力学性能;
- ◆减少化学元素添加量,提高生产效率,减少生产工序,实现产品的减量化生产;
- ◆良好的冷却均匀性控制,可用于生产低(或无)残余应力的优质中厚板产品。

下面分别以高等级水电钢(AY610D)、高级别管线钢(X70)生产工艺为例,简要说明基于超快速冷却的新一代TMCP装备及工艺技术实际应用情况。具体的各种组织控制技术及技术机理细节将在另文中予以介绍。

1) 高等级厚规格AY610D水电钢

对于厚规格水电钢生产,由于传统层流冷却强度较低,对于厚规格(40mm及以上规格)产品,国内中厚板厂通常采用传统TMCP工艺+离线淬火+回火工艺进行生产。同时,为保证淬

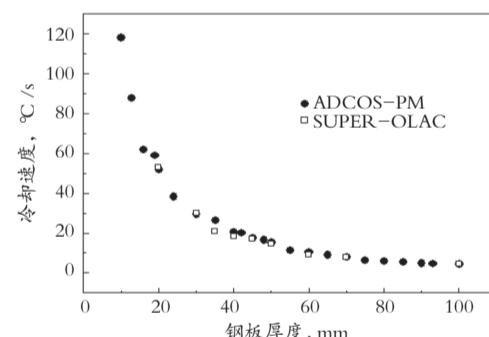


图12 RAL开发的超快速冷却装备ADCOS-PM与JFE Super-OLAC设备的冷却速率比较

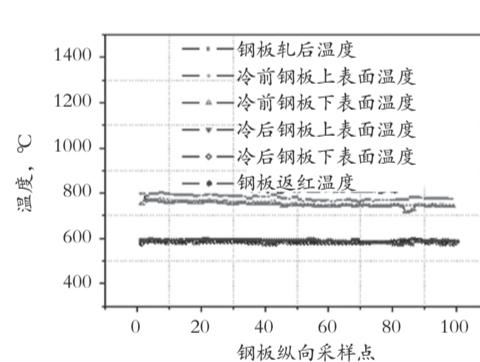


图13 20mm厚Q600CFD超快冷控温精度

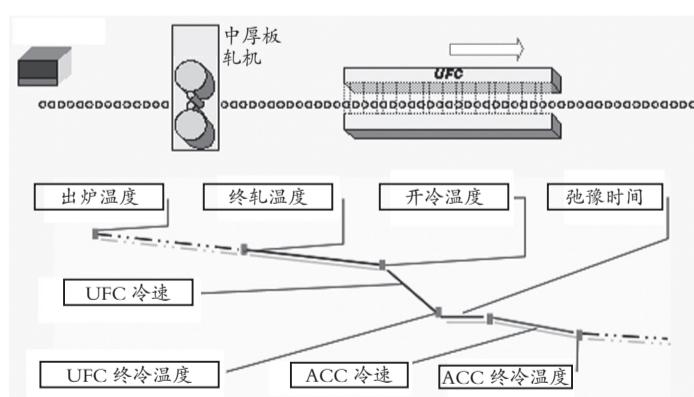


图14 冷却路径工艺控制图



RAL

下转第B05版

上接第B04版

透性，钢中需要添加大量的Mo、Ni等合金元素，且有时仍存在产品板形差、性能富余量小、产品合格率低等生产问题。

在中厚板产品竞争日趋激烈的市场形势下，为满足低成本高性能钢铁材料生产，依托ADCOS-PM装备系统，采用直接淬火工艺，通过控制轧制+直接淬火+回火工艺的技术路线取代原有生产工艺，在合金成分减量化和生产工序减量化两个方面取得了非常理想的应用效果。

◆主要合金成分减量化效果

采用新一代TMCP工艺，在综合力学性能保持不变的前提下，钢中主要合金元素如Mo元素由0.27%降低到0.12%，Ni元素由0.21%降低到0.09%，同比成分减量化达50%以上。

◆工序减量化效果

我们知道，采用直接淬火工艺可使同一合金成分的钢种具有更高的淬透性，从而使直接淬火工艺在开发高强度碳钢和低合金带钢方面得到广泛的应用。因此，采用直接淬火工艺，充分发挥ADCOS-PM冷却能力大、冷却均匀性好的特点，可省略再加热淬火工艺。图15为48mm厚度AY610D钢板采用直接淬火后的金相组织分布情况，从图中可以看出，淬火后钢板各个厚度层别的组织以马氏体和贝氏体为主。

采用在线直接淬火工艺生产的厚规格AY610D钢板各项性能均达到国标要求。表3为与离线调质处理得到的AY610D力学性能对比情况。

因此，综上所述，厚规格AY610D钢板采用在线直接淬火工艺，钢板金相组织分布及力学性能可很好地满足生产要求。在主要合金元素减量化方面，Mo元素节约使用量所占的比例为56%，吨钢效益586元；Ni元素节约使用量所占的比例为57%。

以在线淬火+离线回火工艺代替离线淬火+离线回火工艺，吨钢节约成本323元。从成分减量化和工序减量化两个方面，吨钢累计降低成本909元。

2) 高级别管线钢(X70/80)

管线钢是中厚板轧制生

产，经济效益十分显著，具休表现在：

- ◆提高成材率：提高两个百分点，由86%提高至88%；

- ◆小时轧制效率提高：由18块提高至最高27块；

- ◆产品性能合格率、板形合

格率大幅度提高；

- ◆合金成分减量化明显，平均吨钢合金成本节约300~400元/t。

考虑节省热矫道次、省略冷矫直等工序，吨钢成本节约900元左右。此外，超快速冷却工艺的使用，实现了该企业高级别管线钢产品的大批量接单生产，突破了传统层流冷却工艺的接单限制。

自2010年12月至今，该企业采用RAL开发的超快速冷却系统已实现X65/70/80的大批量生产，生产总量已达24万t左右。此外，其他高强钢的试轧也取得了良好的效果，可以说，制约国内管线钢、高强钢等品种生产的瓶颈已获得重要突破。下面结合该企业管线钢X70生产工艺，介绍一下超快速冷却装备的实际应用情况。

◆成分减量化及性能情况

采用超快速冷却工艺，在综合力学性能保持不变的前提下，在无Mo、Ni元素的情况下，V元素0.045%降为0，Cr元素由0.30%降低至0，减量化效果显著。

针对降成本过程中V、Cr合

金的逐步减少，通过调整超快冷的冷却速度和终冷温度，以弥补合金减少造成的影响，确保了产品性能稳定生产。

采用低成本后稳定生产X70管线钢的屈服强度、抗拉强度全部达到技术条件要求，且屈服强度波动范围较窄。屈强比完全满足要求，且屈强比较低，延伸率远超出技术条件要求。冷弯性能良好，硬度合格，-10℃夏比冲击性能完全达到技术要求。

批量试制钢板的系列低温夏比冲击韧性如图16所示，-60℃低温冲击功仍然高达150J以上，剪切面积SA高于75%，因此试制钢板的夏比冲击韧脆转变温度低于-60℃，满足X70的要求。

此外，超快速冷却工艺技术相继应用于X65、X80等高级别管线钢生产，在性能稳定性、性能均匀性和降低合金成本方面表现突出。

◆钢板全长方向的温度均匀性控制情况

采用ACC冷却的钢板长度方向(特别是头部)存在较大温差。而采用超快速冷却工艺，管线钢生产过程中的温度控制精度及温度均匀性得到极大改善，对于同一块钢板，长度方向上95%的温度点被控制在距离目标温度±25℃以内；对于同一品种规格的异板，96%的平均终冷温度被控制在距离目标温度±20℃以内，头部和尾部过冷位置均控制在250mm以内。

◆钢板全长方向的性能波动情况

采用超快速冷却工艺，基于开发的超快冷头尾遮蔽技术，成功解决了管线钢板长方向上性能波动大的难题，其典型的头中尾的拉伸性能如图17所示，可以看出，超快冷条件下的性能波动较小，很好地满足了X70的性能要求。

◆金相组织

为了检测钢板不同位置的组织均匀性，对钢板的不同位置进行金相检验，如图18所示。试制钢板的组织均匀，均为AF+F(少)，铁素体晶粒度达12.5~13级，同时钢质纯净，夹杂物含量低，满足X70要求。

◆板形改善情况

针对17.2mm的X70钢板，UFC投入使用之前，国内某4300mm生产线采用ACC进行冷却，热矫后(甚至3~5道次矫直)板形合格率非常低，基本在50%左右。且热矫送至冷床后钢板重新瓢曲，导致生产压力陡增。

采用超快速冷却工艺，大大提高板形合格率，热矫直一道次合格率提高到95%以上。图19为采用ACC工艺冷却后的板形情况。UFC投入使用后，该宽厚板生产线均采用轧后UFC冷却工艺，其板形合格率在95%以上。采用UFC冷却后的板形情况如图20所示。

◆生产效率提高

UFC投入使用前，热矫直机需要矫直3道次，且通常50%左右的热矫板形合格率(部分情况下合格率甚至低于10%)为后续的冷矫直工序带来极大压力。

UFC投入使用后，钢板板形良好(一检合格率在95%以上)，对于减轻冷矫直机的工作负担和保证精整区域物流顺畅起到重要作用。

UFC投入使用后，热矫直机的矫直道次由3道次(最高7道次)减少为矫直1道次，小时轧制块数由每小时18块提高至最高每小时27块，生产效率提高了50%。同时，一检95%以上的

表3 采用ADCOS-PM直接淬火工艺与原调质处理工艺后的产品性能对比表

工艺	钢号	规格，mm	屈服强度，MPa	抗拉强度，MPa	A，%	-20℃冲击功，J		
						180，d=3a	180，d=3a	330 340 350
DQ+T	AY610D	48	586	664	24	合格	330	340 350
调质	AY610D	48	559	656	25	合格	333	241 318

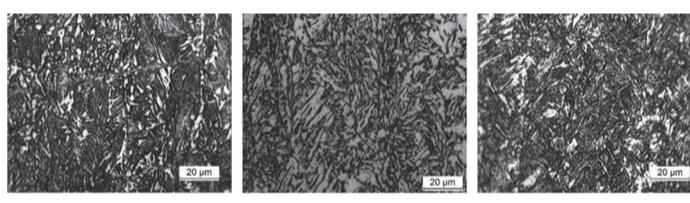


图15 48mm厚度AY610D钢板采用直接淬火后的金相组织

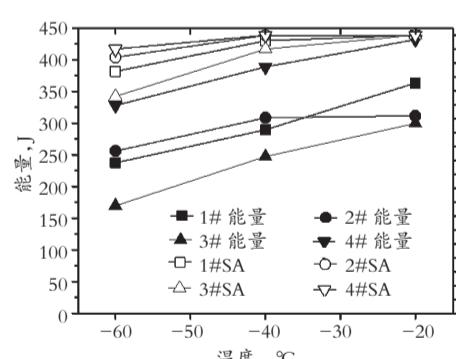


图16 低成本X70级超快冷工艺下的系列低温冲击韧性

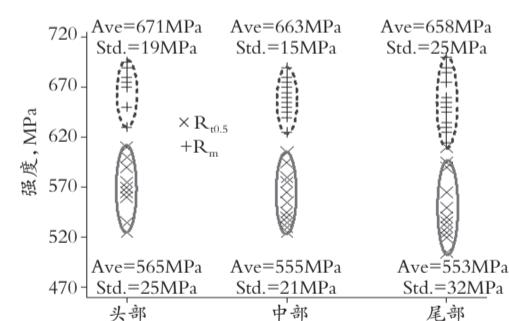


图17 采用超快速冷却工艺生产的X70管线钢头中尾性能分布

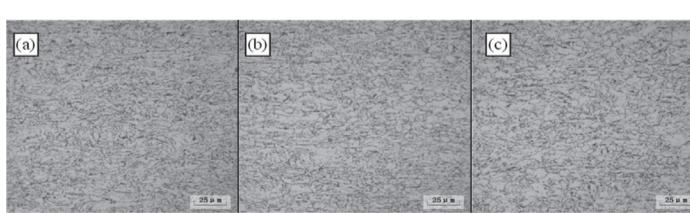


图18 不同位置的金相组织



图19 ACC冷却热矫后钢板至三冷床板形



图20 UFC冷却热矫后钢板至三冷床板形

板形合格率也大大减轻了冷矫直机等后续精整生产线的工作压力。

综上所述，采用以超快速冷却系统为核心的中厚板新一代TMCP工艺技术可以大大降低对微合金和合金元素的依赖，在材料设计上实现低成本、减量化。这对于节省资源和能源，以及钢铁材料的再循环利用，提高钢铁行业生产效益，实现社会可持续发展，具有重要意义。

(致谢：感谢河北敬业、鞍钢、首秦、河北普阳等钢铁企业各级领导及广大技术人员的辛勤付出与贡献，为中厚板新一代TMCP装备及工艺技术的顺利实施做出了重要贡献。)

SIEMENS
www.siemens.com/metals

西门子新闻传真

西门子从济钢获得4.3米中厚板轧机最终验收证书

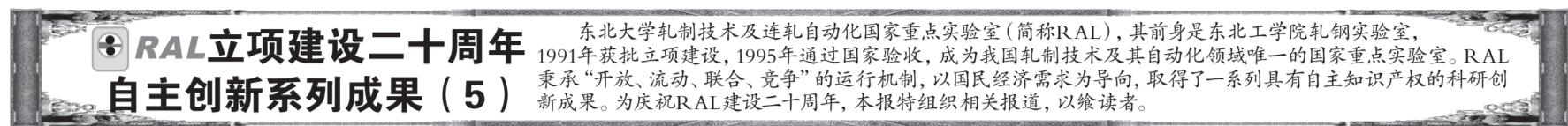
近日，西门子奥钢联冶金技术部从中国济南钢铁集团有限公司(济钢)获得了济南新建4.3m中厚板轧机的最终验收证书。该轧机的设计能力为年产180万t钢板。西门子负责该项目的设计，并且为新轧机提供了机械设备以及传动和自动化系统。

济钢于2008年初与西门子签订了新建中厚板轧机的合同，合同额为数千万欧元。该轧机建在山东省济南市，项目组成包括三台加热炉、一套双机架轧机、冷床、一条剪切线和一个精整车间。西门子为精轧机提供了机械设备、配置了SmartCrown技术、具有加速冷却/直接淬火功能的MULPIC强力冷却系统、一台钢板热矫直机、一台双边剪和一台钢板冷矫直机。其他机械设备由济

钢提供。

西门子还提供了加热炉和轧机的所有工艺模型、全线自动化和仪表以及从加热炉装料到“成品”钢板运至配送中心的材料跟踪系统。Sinamics SM150电压源型变频器为粗轧和精轧机架主传动的三相同步电机供电。两台功率均为9MW的电机提供了必需的轧制功率。整套设备以中厚板轧机集成方案Siroll PM为基础。

新建轧制线能够生产厚度为6~120mm、宽度为1500~4100mm的钢板，钢板的最大重量约为22t。这些钢板主要用于造船和石油天然气行业。济钢隶属于山东钢铁集团。新建轧机使济钢的厚板年产能增加到了大约500万t，使公司跻身于中国最大钢板生产企业之列。



热轧板带钢新一代TMCP装备及工艺技术

现代热轧板带钢轧制过程的特点为高速连续大变形轧制过程,连轧过程完成之后,即使在较高温度轧制,也可以得到硬化的充满缺陷的奥氏体。由于连轧中的连续大变形和应变积累,硬化奥氏体的获得不仅不需要低温大压下,甚至也不一定必须添加合金和微合金元素。对轧后充满缺陷的硬化奥氏体采用超快速冷却,可使材料在极短的时间内,迅速通过奥氏体相区,将硬化奥氏体冻结到动态相变点附近。这为保持奥氏体的硬化状态和进一步进行相变控制提供了重要基础条件,也就是可有效避免硬化奥氏体的软化,设法将奥氏体的硬化状态保持到动态相变点。

同时,轧后超快速冷却与常规轧后冷却系统相结合,可以实现轧后冷却路径的精确控制,从而精确控制钢铁材料的复杂相变过程,为获得多样化的相变组织和材料性能提供了更大的空间。利用这样一个特点,有可能利用不含合金或含合金含量少的简单成分体系获得高性能的材料,实

现减量化、集约化的轧制生产。因此,基于以超快速冷却为核心的高速连轧技术和控制冷却技术,也就是新一代 TMCP 工艺技术,可以采用更多、更有效的手段,充分发挥细晶强化、析出强化、相变强化等多种强化机制的联合作用,从而实现热轧板带钢轧制过程的高效化、减量化、集约化和产品的高级化。体现在合金成分减量化上,在保持或提高材料塑韧性和使用性能的前提下,可节省钢材主要合金元素用量 20%~30% 以上,节能减排,提高生产效益。而实际上,在当前热轧板带钢产品市场竞争日趋激烈的形势下,采用节约型成分设计,减少合金元素用量,实现高性能产品的开发生产,降本增效,已成为钢铁企业产品竞争的最关键要素之一。

1 热轧板带钢轧后超快速冷却技术发展与应用

1.1 国外超快速冷却技术的发展

早在 20 世纪 60 年代后半期,控制冷却就在热带钢输出辊道上用于材质控制过程中,随着人们对钢铁材料研究的不断深入,控制冷却已成为现代轧制生产中不可缺少的工艺技术。随着先进钢铁材料开发的需要,基于管层流的热轧带钢后控制冷却技术面临新的发展需求。

Hoogovens-UGB 厂最早应用超快冷技术,开发的超快速冷却实验设备使 1.5mm 厚热轧带钢在实现高冷却速率的同时,还具有良好的横向和纵向板形。该实验装置是在 1.4m 的冷却区上安装 3 组集管,水流量为 1000m³/h。但因冷却段太短,温降能力有限,仅 150~200℃,难以大幅度改善产品性能。随后又开发了 7 组集管的超快速冷却原型装置,冷却区长度扩大至 3m,对于厚度 2.0mm 的 C-Mn 钢和钒钢,相对于常规冷却可提高抗拉强度和屈服强度 100MPa 以上。

此后,比利时 CRM 厂对超快速冷却技术及其在提高材性

能和高附加值产品开发方面的研究得到广泛关注,其基于水枕冷却的超快速冷却装置结构紧凑,冷却区长度较短(7~12m)。在工业试验中,厚度为 4mm 带钢的最大冷却速率为 300℃/s,水流密度为 1000m²/h。

比利时 CRM 厂超快速冷却装置在轧制线上的位置分前置式(布置在精轧机和层冷之间)和后置式(布置在层冷和卷取机之间)两种方式。如图 1 所示。

工业化的对比性实验表明,前置式的技术优势在于可以生产高屈服强度的热轧带钢,后置式则用于双相或多相高强度钢生产。与常规层流冷却工艺相比,超快速冷却可显著提高钢的强度,明显改善其综合性能。此外,超快速冷却装置具有的超常快速冷却能力,在多相高强度钢、相变诱导塑性钢及双相钢等高附加值新产品开发生产过程中也具有很好的应用前景。

日本 JFE 钢铁公司福山厂开发的 Super-OLACH (Super On-Line Accelerated Cooling for Hot Strip Mill) 系统,可以对厚度为 3mm 的热轧带钢实现近 700℃/s 的超快速冷却。该公司开发的 NANOHITEN 热轧板带钢是超快速冷却技术应用的典型代表。该产品组织为单相铁素体上分布着大量 1~5nm 尺寸的 TiC 粒子,其强度高达 1180MPa,同时具有良好的塑性。

此外,韩国浦项钢铁公司在超快速冷却技术方面的开发与应用也取得了显著进展,根据 2010 年韩国浦项钢铁公司介绍,其已在热连轧生产线上开发应用具有自身特色的超快速冷却技术,并称之为 HDC (High Density Cooling),如图 2 所示。

1.2 我国超快速冷却技术的发展与应用

东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(以下简称 RAL)是国内热轧板带钢轧后超快速冷却技术以及基于超快速冷却为核心的新一代 TMCP 工艺技术的提出者、倡导者,同时也是科研实践的先行者。东北大学 RAL 作为国内钢铁行业热轧板带钢轧后超快速冷却技术最主要的研究开发单位,目前已历经实验、中试等超快速冷却技术开发过程,开发了相关的原型实验装置、工业化中试设备以及工业化推广应用成套技术装备,形成了涵盖机械装备、自动化控制系统、减量化产品工艺技术在内的系统完整的成套技术、专利和专有技术。

2004 年,RAL 已利用自主研发的实验研究平台,开发出实验室超快速冷却原型实验装置,如图 3 所示。同时,针对普通 C-Mn 钢、HSLA 钢等进行了系列热力模拟实验和热轧实验研究。为进一步的装备技术开发及工艺实验开展做好技术储备。2004 年底,

依托包钢短流程(CSP)热轧生产线,合作开发出超快速冷却技术的工业实验装置,安装于包钢 CSP 生产线层流冷却和卷取机之间,如图 4 所示。并结合原有层流冷却系统,以 C-Mn 钢为原料,开发生产出 540MPa、590MPa 级低成本双相钢。

2008 年,攀钢与东大合作,在其 1450mm 热轧线上安装前置式超快冷装置。2008 年,依托湖南华菱涟源钢铁有限公司产品质量提升技改工程轧钢项目轧后冷却系统工程,合作开发出国内首套 2250mm 热轧板带钢超快速冷却工业化装备。该设备采用前置式布置方式,即安装在精轧机和层流冷却设备之间。如图 5 为投入使用的涟钢 2250mm 热轧生产线超快冷系统。2009 年,涟钢 CSP 生产线新增超快速冷却系统,同样采用前置式布置方式。

2009 年建成投产的本钢 2300mm 生产线,采用西马克(SMS)提供的后置式超快速冷却技术方案,设备长度约 12m,布置在层流冷却和卷取机之间,并称之为密集型冷却系统(Compact Cooling System)。

在东大 RAL 科研工作者的大力倡导下,国内各钢铁公司及相关研究单位已意识到热轧钢材轧后超快速冷却技术的重要性,已开始重视并研究超快速冷却技术及相关工艺技术,并在技术理念、设备配置、产品应用等方面的认识得到进一步提高,并在实际生产应用方面取得显著成效。

1.3 热轧带钢超快速冷却技术开发与工艺应用的认识

作为热轧钢铁材料轧制技术研究最为活跃的热轧板带钢领域,围绕超快速冷却技术的发展应用,主要研究两个方面的内容。一是针对实现热轧带钢实现超快速冷却的技术途径和手段,二是超快速冷却技术在热轧带钢产品开发上的工艺应用理念。

对于热轧带钢实现超快速冷却的技术手段,当前主要有两种技术方案或实现途径,一是采用加密层冷集管方式,二是采用有压冷却水射流冷却方式。

对于热轧带钢产品,厚度规格相对中厚板较薄,但在冷却区域的输送速度较高。采用层冷冷却方式,实际上对于 3.0mm 甚至 5mm 左右厚度以下的薄规格钢板,通过常规层流冷却,也能获得较高的冷却速率(如冷速可达到 80℃/s 以上)。进一步通过加密层流冷却集管,还有可能获得更高的冷却速率。因此,在现有层流冷却集管布置密度基础上,进一步增加层流冷却集管,在集管数量上达到 1.5~2 倍于现有层流集管数量,冷却水流量随之也达到约 1.5~2 倍于现有层流集管流量,可在一定程度上提高热轧带

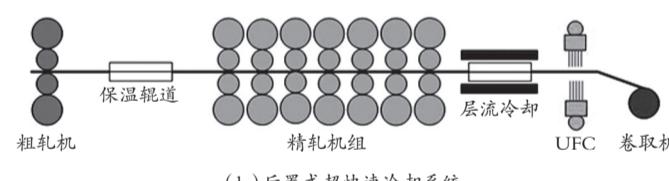
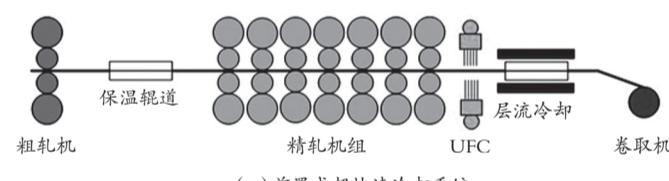


图 1 超快冷装置在热轧带钢生产线上工艺布置方式

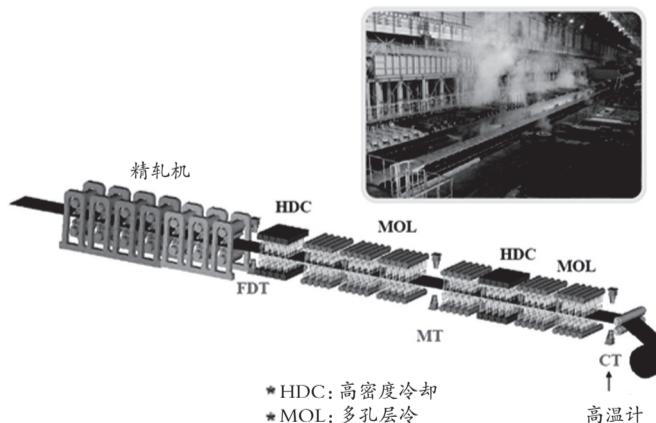


图 2 浦项超快冷装置在热轧带钢生产线上工艺布置方式



图 3 开发的实验室超快速冷却原型试验装置

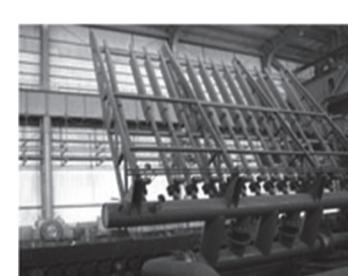


图 4 包钢 CSP 热连轧线超快速冷却中试装置

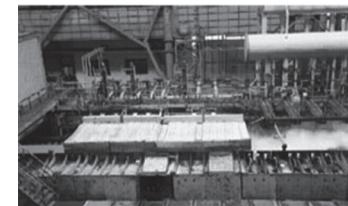


图 5 投入实际生产的涟钢 2250 热连轧线超快速冷却系统

轧机高效传动技术

设计一套轧机传动系统的主 要目标是实现在高生产率下所需的产品质量。传动必须能够在电机轴上提供符合轧制规程要求所需的扭矩和速度，它也应具有工作过载、动态性能、满足轧制精度要求并使轧机稳定运行的特点。轧机高生产率需要传动系统的高效性。而且电力稳定性正成为一个日益重要的主题，公共事业部门正制定执行一系列新标准。传动作业应对电力供应冲击最低，也应不影响其他负载的工作，并应符合所在国的动力法规。

1 轧机传动最大能效

除了通常对过载能力、控制质量、运行稳定性、高可靠性和高效性的需求外，对高能效的要求正逐渐得到相应的关注。如今，通过同步电机及电压变频器的使用，实现了高效传动，总传动效率达到96%。

西门子主传动系统的主要特点有：

- ◆ 使用定子电流比常用感应电机低的同步电机，减少额定功率，最终降低能耗；
- ◆ 同步电机惯性低，降低了在电机加速和减速过程中发生的动态损失，进一步提高能效；
- ◆ 专门设计的“生态模式”工作降低待机运行中的激励电流及重启时的瞬时扭矩；
- ◆ 具有主动在线反馈及智能半导体控制（带优化脉冲码型 ROTOS）的现代化中压源转换技术降低电机谐波，在整个运转速度范围内功率因素恒定，保持在1，电能转换效率达到99%；
- ◆ 对多电机作业（特别是对冷轧机），通过一个带能量交换的通用直流总线，可实现进一步节能。

2 SINAMICS 变频器系列

与在传动技术领域高灵活性和额定功率可升级的这一主流趋势一致，西门子开发出一个频率

转换产品系列，称作SINAMICS。开发这一传动产品的目标是实现从基本的小型单个电机传动、到协同传动、直至高功率传动等每一应用最优传动的可能性。所有SINAMICS传动产品都具有一个模块化可升级的结构、标准化的界面外观，使得它们如此独特、简单。工程标准化程度极高，这是关键。在各个功率等级和额定电压下低压传动，范围从0.12kW到4500kW。中压传动范围从0.8MW到120MW。

每一个SINAMICS产品都是基于一个共同的控制平合理念：使用相同的软件和硬件，实现相同功能。

2.1 2级低电压变频器

对于功率范围最大约2000kW的所有轧制和带钢输送方面的传动应用，都采用传动系统SINAMICS S120。SINAMICS S120是一个基于2级低电压变频器布局的系统，在电机侧的逆变器上安装IGBT-晶体管，在轧线侧的变频器上安装独立的整流器。

SINAMICS S120是模块化传动系统，带有矢量和伺服控制，是工厂和设备制造领域复杂传动任务的理想选择。采用模块化SINAMICS S120，可实现具有更高级别动作控制的多轴传动方案，与单轴传动一样简单。功率范围从0.12kW到4500kW，并采用保证实现各种功能的各种控制设备，使用模块化SINAMICS S120，针对几乎任何一个复杂的传动需求，可简化并快速生成一个精确定制的传动布置。

在SINAMICS S120内，传动智能结合控制设备内置的闭环控制功能。这些设备能够按矢量、伺服或V/f模式控制传动。这些设备对传动上的所有轴也实行速度和扭矩控制功能以及其他智能传动功能。使用现有的闭环控制技术，SINAMICS S120可以应用于同步电机及异步（感应）电机上。

SINAMICS S120控制柜模

块是一个专门用在工厂建造中使用的柜式系统，这些模块可组合起来形成传动柜，功率总和达到4500kW。标准化接口确保模块快速地被连接起来，为多轴传动生成一个已连接好的传动方案。

对大多数应用，电机侧的逆变器与一个通用直流总线相连，后者接入通用输入整流器。

SINAMICS S120传动系统的突出优势包括：工作量最低的过程优化；高的可靠性和效用性；运转过程中节能；运行、维护和维修过程中成本低；节约空间结构；环境友好性作业。

2.2 3级电压变频器

SINAMICS SM150是一种适用于轧机高速传动的高端大功率传动变频器。推荐在需要高动态性能与四象限运算的传动应用使用这些变频器。这些变频器通常与专门的电机配合使用，适合于功率范围在4~26MW。这些带有已经工业应用证实的IGCT功率半导体器件的水冷式中压变频器可以单电机或多电机传动配置交付使用。

IGCT是一种门控开关，它就像一个半导体一样的开关，但像一个可控硅一样传输，传导损失最低。SINAMICS SM150变频器系列使用两种不同类型的非对称型集成门极换流晶闸管，峰值额定电流在4000~5000A。

配合最优的IGCT起始脉冲码型，单个变频器就可以传送峰值功率1400kVA。

SINAMICS SM150传动配有扩展的矢量变频控制，采用ROTOR，控制IGCT设备。ROTOR的主要特点包括：最优脉冲码型；低开关频率；可预报的电流谐波；较少的电机电流谐波和较少的电机损失；优异的扭矩传递；较少的执行元件开关损耗；更好的电机和变频器利用效率；更高的整体效率。

2.3 周波变换器传动

周波变换器作为交流轧机主传动的重载荷设备已经使用了近20年。甚至在当今的高能效时代，环保型传动方案，如采用新型SINAMICS控制平台的多阶电压源变频器SINAMICS SL150周波变换器传动可应用到轧机传动领域。

对具有大扭矩与低速特点的大功率感应与同步电机进行速度的连续控制时，采用可控硅的周波变换器是最佳选择。它们可以实现可控硅整流桥以6或12脉冲形式执行动作。由于结构简单，利用相对较少数量的功率半导体器件实现极高功率，因此在空间有限时，它们可以分开堆放。在不增加任何成本的情况下，周波变换器适合于四象限运算。这使得周波变换器仍然是所有必须

提供低扭矩谐波的传动形式的良好选择。最大输出频率通常在输入电源频率的40%~44%。利用由SINAMICS系统控制的元件实现对整体传动的开环和闭环控制与可控硅监控。利用光缆对可控硅进行光电控制与监控。

3 现代化改造方案

随着设备老化，备件和技术服务的可利用性也随之下降，使问题变得更糟。因此，需要对传动控制进行升级改造。

通过对现有传动系统进行现代化改造，采用周波变换器、负载整流逆变器（LCI）或基于GTO可控硅的多阶电压源变频器，可保证工厂性能、效用性和生产率并延长其生命周期。西门子开发出带SINAMICS平台的各种升级包，代替老式控制系统。

这种改造方式均适用于周波变换器和LCI的传动。除了采用更新的SINAMICS控制系统进行现代化改造外，也可改造老式多阶电压源变频器的功率器件（用IGCT替换GTO）。未改造的SIMADYN D基础自动化系统与新SINAMICS控制系统的通信措施包含在为老式传动系统改造而设计的采用SINAMICS的升级包内。

（杨雄飞）

但对于厚规格（10mm以上）带钢则很难满足超快速冷却需要。因此，对于热连轧机生产线，采用加密层冷集管配置将很难满足由薄到厚全系列规格的产品开发需要。同时，由于层流冷却固有的冷却均匀性差、冷却过程板形控制差等缺点，因此，采用层冷集管加密的技术方案将很难满足全系列热轧带钢产品的超快速冷却需要。

采用有压冷却水喷射冷却，其难度在于带有一定压力的冷却水如何能够实现钢板的高强度均匀化冷却，这实际上也是热轧带钢超快速冷却技术的核心关键技术所在。基于有压冷却水射流冲击钢板表面，水流冲击能力大幅提高，可有效实现新水直接接触高温钢板表面冷却，从而冷却强度可大大提高。但由于带材厚度较薄，在生产过程中对于板形的要求相对苛刻。因此，保证超快速冷却过程的板形控制也将是该技术方案下的关键技术。根据东大RAL在热连轧超快速冷却装备及工艺开发中的现场实践，采用有压冷却水喷射冷却，可很好地实现热轧带钢从薄到厚规格系列产品的超快速冷却，且板形控制良好，达到了类似SuperOLACH系统的效果，满足了产品工艺生产需求。具体该部分内容将在后续热轧带钢超快速冷却技术装备开发部分予以说明。

对于超快速冷却技术在热轧带钢产品开发上的工艺应用，实际上，在超快速冷却装置出现后，人们对超快速冷却的认识和应用更多的是作为一种补充或

辅助冷却手段，在较长一段时间内，在工艺应用上主要用于实现热轧钢材的快速降温或用于后段强冷实现双相钢的开发生产，这一点可以从2004年后国内很多新建热轧生产线预留后置式超快冷系统的工艺布置方案中可以看出。自2007年，以王国栋院士为代表的东北大学RAL科技工作者，根据多年来对热轧钢铁材料TMCP工艺技术领域的研究体会和开发实践，将超快速冷却工艺与控制轧制过程结合起来，系统提出基于超快速冷却的新一代TMCP工艺技术理念并阐明其技术内涵后，超快速冷却技术才得到了实质性的应用和发展。此后，国内钢铁行业对超快速冷却技术及工艺应用理念方面的认识逐步深入，并量大面广的应用到绝大部分热轧钢铁材料新工艺开发方面，而不仅仅是此前用于后置式强冷以单纯的满足开发双相钢所用。随后，国内大型钢铁企业新建的多条常规热轧线也逐步采用或预留前置式超快冷工艺布置方案，以更好地满足企业自身后续的生产及全面新品种工艺开发和升级需要。而现场实践也证明，东北大学RAL科技工作者提出和倡导的基于超快速冷却的新一代TMCP工艺技术理念，在开发成分节约型的低成本高性能热轧板带钢新产品新工艺方面成效显著；而基于超快速冷却为核心的新一代TMCP工艺理念开发低成本高性能钢铁材料，也已成为国内热轧板带钢企业的广泛共识。

（未完待续）

SIEMENS
www.siemens.com/metals

西门子新闻传真

西门子为泰企改造长材轧机

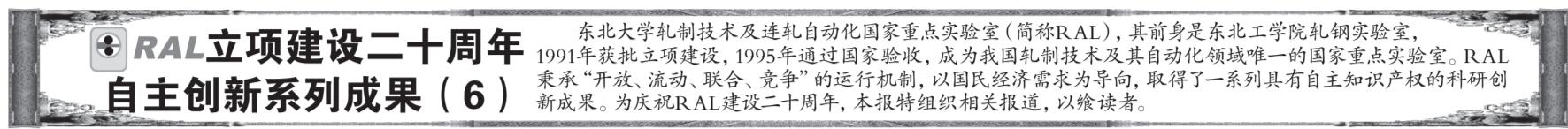
西门子奥钢联冶金技术部从曼谷的泰国型钢有限公司获得合同，为其罗勇厂的线材轧机进行现代化改造。改造的目标是扩大产品范围以生产小型材，同时进一步提高产能。改造后的长材轧机将于2013年中投入生产。

改造完成后，泰国型钢有限公司罗勇厂轧机的长材生产能力将达到每年40万t左右。除了高强钢筋，该轧机还将有能力生产众多品种的圆钢、方钢、扁钢以及角钢和槽钢。

为了进一步改善产品质量和提升自动化水平，西门子正

着手改造轧机机组以及直棒和大盘卷生产线。轧机机组将装备新型红圈轧机。有些现有机架将采用新的电机、齿轮箱和联轴器，精轧段则将增加活套。

在直棒生产线中，西门子正在安装一套在线回火系统以及新的冷却和精整区，包括一套冷床、一台冷剪、一台多股矫直机和一台全自动磁力堆垛机。西门子将为堆垛机的操作提供全部机电解决方案。大盘卷生产线则将配备2台加勒特卷取机以及新的盘卷装卸、运输和打捆设备。西门子还负责指导安装和调试工作。



热轧板带钢新一代TMCP装备及工艺技术

(上接第10期B05)

2 热轧板带钢新一代TMCP装备及工艺技术开发难点与关键技术

开发热轧带钢超快速冷却系统,涉及关键喷嘴结构开发设计、装备开发与集成、过程控制技术开发,以及配套水系统的技术开发与设备集成等。在设备结构上与传统层流冷却技术存在根本性区别。

相对于中厚板轧制生产线,热轧带钢生产线具有轧制速度快、自动化程度高、产品工艺上要求实现灵活的冷却路径控制等特点,加之热轧带钢生产线轧制节奏高、设备布置紧凑,因此,对超快速冷却装备开发及工艺过程控制提出了新的要求。

2.1 热轧带钢超快速冷却技术装备的开发需求

1) 高的冷却速率

对于热轧带钢超快速冷却装备,为使轧后带钢在极短的时间内,迅速通过奥氏体相区,将硬化奥氏体冻结到动态相变点附近,首要一点就是要满足全系列厚度范围热轧带钢超快速冷却的要求,即可实现2~5倍于层冷速率的高冷却强度,为大范围的热轧带钢冷却速度控制提供设备基础。

2) 良好的冷却均匀性

在满足热轧带钢高冷却速率的同时,还要满足冷却过程中良

好的板形控制要求。而实际上,对热轧板带材而言,确保高速冷却条件下的平直度始终是一个关键性、瓶颈性的问题。这就要求冷却设备具有良好的冷却均匀性,尤其是设备喷水系统结构沿钢板宽度方向要实现合理的水量分布。

3) 满足实现良好的工艺过程控制所需的设备条件和功能

在工艺上,基于超快速冷却的热轧带钢新一代TMCP工艺要求精确控制超快速冷却的终止点温度,即在到达动态相变点时及时终止超快速冷却。因此,超快速冷却设备须满足流量的高精度控制以及相关检测仪表如红外测温仪、热金属检测器等检测要求,以实现工艺过程的自动化控制,满足工艺需求。

4) 实现超快速冷却与层流冷却模型控制系统的有机结合

热轧带钢生产线因超快速冷却系统长度通常较短,为开发和实现更为灵活的冷却路径控制,必须与层流冷却系统实现有机结合。为满足现代化热连轧线生产过程的工艺自动化控制要求,必须开发出涵盖超快速冷却系统、层流冷却在内的新型数学模型,以满足热轧带钢生产过程的高精度控制需要。

2.2 装备技术开发难点及关键技术

开发出适合热连轧生产线的超快速冷却系统,主要包含两个主要技术难点:一是开发出流量分布合理、无限寿命的喷嘴结构及喷水系统;二是实现合理的喷嘴布置,开发出合理的设备结构,满足超快速冷却装备的使用要求。

1) 高性能喷嘴的开发与研制

高强度均匀性冷却喷嘴是实现热轧钢板超快速冷却过程的关键。大型热轧带钢生产线厚度规格相对中厚板较薄(最薄至

1.2mm,最厚25.4mm),对冷却均匀的敏感性大幅提高,为此必须开发出流量分布合理的喷嘴结构及喷水系统。

而实际上,由于热轧带钢冷却作用时间较短、生产线辊道间距较小,开发结构合理、能够很好地满足带钢上下表面对称性冷却需求的喷嘴结构是实际装备开发过程中一个突出的技术难题。东北大学RAL在相关流体理论研究、模拟及实验研究的基础上,开发出两类适用于热连轧带钢生产线的超快速冷却喷嘴结构:多重阻尼系统的整体狭缝式高性能射流喷嘴和多重阻尼系统长寿命周期的高密快冷喷嘴。开发的狭缝式喷嘴及出口流量分布情况如图6所示。

两类喷嘴因结构不同,形成合理的冷却强度搭配,通过沿轧线方向的合理布置,为保证高温板带钢冷却过程中横向、纵向的冷却均匀性奠定了基础。

2) 结构合理的超快速冷却设备开发

热轧带钢在轧后输送辊道上运行速度快,且带钢厚度较薄,精轧出口板形不好时易于出现板头翘曲问题,严重时甚至在轧后冷却区域产生堆钢等现象。满足带钢尤其是薄规格带钢超快速冷却过程的连续稳定生产是超快冷装

备设计过程中必须考虑的实际需求。

超快速冷却区与常规层流冷却相比,水流密度较大。因此,实现超快速冷却过程中冷却水的有效排出和满足热轧带钢超快速冷却区后检测仪表的测量要求,是超快冷设备开发及实际应用过程中需要考虑的工程技术难题。

针对上述技术难题,根据射流冷却机理,在合理利用冷却过程的累积效应的基础上,通过对喷嘴的优化配置,开发出合理的冷却喷嘴布置形式及设备结构。

同时,通过软水封技术,配合侧喷等手段,有效解决了超快速冷却过程中残留水的排出,避免了采用挡水辊等接触式手段可能引起的带钢堆钢、热头热尾长度控制精度差等问题。同时很好地满足了热轧带钢超快速冷却后表面温度的准确测量需要。

2.3 过程控制技术难点及关键技术

轧线新增超快速冷却系统后,由于超快速冷却系统冷却机理与传统层流冷却机理不同,基于层流冷却机理的原有板带钢冷却模型及控制系统已不能满足新型控制冷却系统的需要。在过程控制上,主要有如下技术难题:

1) 超快冷控制系统与轧线原有控制系统的无缝衔接

换。新增超快冷过程机在与轧机通讯接口的设计上,充分利用原有系统接口数据,在冷却策略上和冷却工艺上与原层流冷却控制系统保持高度一致。以上措施很好地解决了新增超快冷系统与原有系统的衔接及调试期间可能存在的工艺适应性问题,避免了生产过程的工艺波动。

2) 轧后冷却多目标高精度控制

轧后增设超快冷设备后,轧后冷却控制系统的控制目标已经不仅仅是卷取温度,还包括超快冷出口温度及冷却速度等目标,控制目标增加,控制难度加大。超快速冷却采用射流冷却和核态沸腾冷却机理。与层流冷却相比,冷却强度很大,因此不仅超快冷本身温度控制难度大,而且势必对卷取温度控制精度产生很大的影响。

对于超快冷却,水压在一定范围内可调,区别于常规层流冷却,除需考虑带钢速度、带钢厚度、冷却水流量、水温等对带钢表面换热过程的影响外,还充分考虑了水压变化对换热过程的影响,建立了高精度的超快冷换热系数模型,从而有效保证了超快冷出口温度控制精度。同时控制系统增加卷取温度前馈控制功能,可根据前置式超快冷出口温度偏差,自动调节层流冷却组态,从而保证了超快冷条件下的卷取温度控制精度。

3) 带钢升速轧制过程中的温度高精度控制

为提高轧制生产效率,大型热连轧线通常采用升速轧制工艺。为此,必须开发出基于超快冷原理的冷却工艺,且面向升速轧制的新一代轧后控制冷却系统。此外,对于热轧带钢实际生产过程,厚规格带钢的卷取温度控制、低温卷取控温精度在一定程度上也时常制约相关产品及规格的生产。

为满足升速轧制条件下的高精度温度控制需要,控制系统在预算算时可根据精轧过程机数据,预测出带钢TVD(时间-速度-距离)曲线,而在动态计算时还可以根据现场实际状态,对TVD曲线进行实时修正。TVD曲线的计算与速度前馈控制相结合的方法,有效提高了升速轧制条件下的温度控制精度。带钢升速轧制过程的TVD曲线示意图如图8所示。

4) 满足多种产品需要的冷却策略

超快速冷却具有的大冷却强度为实现丰富多彩的轧后冷却路径控制提供有利条件。在原有层流冷却策略的基础上,具备了实现前段主冷、后段主冷两段冷却等多种策略的装备条件。这就要求在控制系统上满足多种冷却策略工艺需要。如图9为基于超快



图6 开发的热连轧线超快速冷却狭缝式喷嘴及出口流量情况

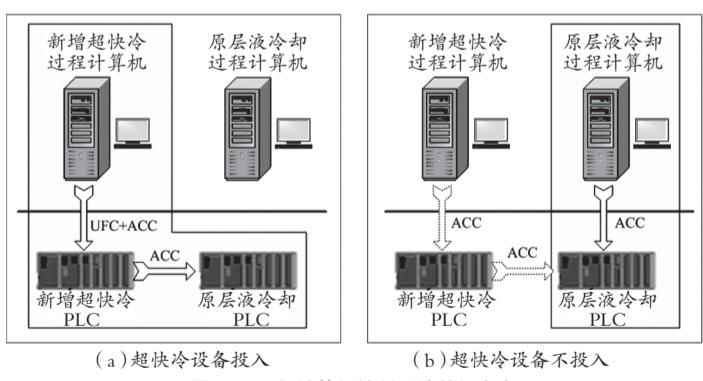


图7 L2级计算机控制系统并行方案

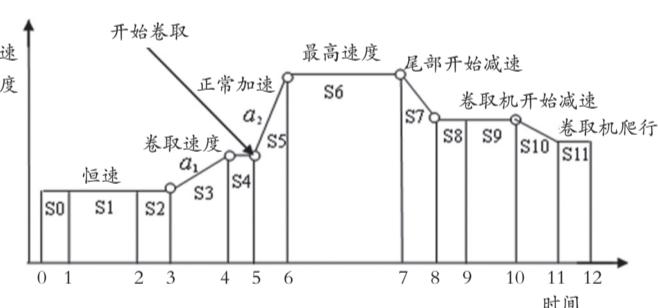


图8 热连轧线升速轧制过程的TVD曲线示意图

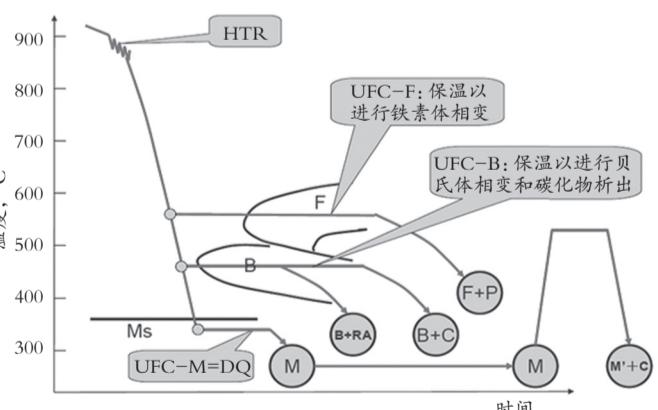


图9 基于超快速冷却的冷却路径控制示意图

热连轧线尤其是2250mm宽度级别的热轧带钢生产线,轧线控制系统很多均为国外引进,为此,必须实现超快冷控制系统与轧线原有控制系统的无缝衔接。

根据轧线系统配置情况,开发出合理的轧后冷却控制系统并行方案,新增超快冷过程机和原层流冷却过程机之间可灵活切

SCL39D 重型矿用汽车大梁钢的开发

汽车大梁钢主要用于汽车底盘，汽车底盘上纵梁、横梁、悬置梁、前后桥等零件一般都采用大梁钢来制造，是汽车最重要的结构部件用钢。随着我国汽车行业的发展，对产品要求也越来越高。除要求具有较高的强、韧性配合外，对大梁钢的整体折弯成型和焊接工艺性能均提出较高的要求。2011年2月，针对国内某大型矿用汽车制造企业使用Q460C、510L等钢种用做汽车大梁存在折弯开裂、整车寿命低等问题，三钢自主研发了SCL39D汽车大梁钢。产品具有焊接裂纹敏感指数Pcm低、高强度低屈强比、良好的低温冲击韧性和冲压性能，目前已实现多批量稳定化生产。产品主要用于载重30~40t的自卸型矿山用车，经用户使用，反映整体折弯成型、焊接等性能优良。三钢SCL39D汽车大梁钢的成功开发，为大型重

汽用大梁钢板的整体冷弯成型工艺和焊接工艺提供了保障。

1 技术要求及成分设计

1.1 技术要求

根据用户提出的技术要求，综合了YB/T 4137-2005《低焊接裂纹敏感性高强度钢板》、GB/T 3273-2005《汽车大梁用热轧钢板和钢带》、GB/T 1591-2008《低合金高强度结构用钢》等相关标准，制定出SCL39D重型矿用汽车大梁钢的性能要求，见表1。

1.2 成分设计

通过对用户整体折弯成型和大线能量焊接加工工艺的深入研究，综合考虑了经济性和生产过程中工艺控制的稳定性，选择了低碳加铌钛复合微合金化工艺。一是设计碳含量控制在0.09%以下，力求避开包晶钢的成分范围；二是Nb+Ti复合微合金化是较

为经济的强化策略，有利于促进连铸坯质量稳定，避免裂纹产生。同时因Ti的固氮作用，更有利于NbC的析出，使Nb的细晶强化和析出强化作用发挥的更加充分。化学成分设计见表2。

2 生产实践

2.1 SCL39D 重型矿用汽车大梁钢生产工艺路线

铁水预处理→120t顶底复吹转炉冶炼→LF精炼→R10m连铸→加热→除鳞→3000mm四辊可逆粗轧→中间水冷→3000mm四辊可逆精轧→ACC层流冷却→矫直→精整→检验→标识→入库。

2.2 冶炼工艺

2.2.1 铁水预处理

铁水炉外脱硫热力学条件最好，成本最低，可减轻转炉和钢水精炼的冶金任务。利用单吹颗粒镁铁水炉外脱硫法可实现深脱硫。铁水炉外脱硫后要扒净渣，以减少回流量。

2.2.2 转炉冶炼

转炉冶炼的工艺控制重点在于把握脱磷最佳时机、减少出钢下渣量及充分脱氧。采用双渣脱磷、国内首创的挡渣出钢专利技术、出钢渣洗等，严格控制了下渣量，以提高钢水纯净度，为精炼造还原渣提供良好的条件。

2.2.3 LF炉精炼

精炼工序是钢水纯净

度的控制性环节，而精炼渣系又是控制钢水纯净度的关键，因此要控制好脱氧产物的组成并调整出钢包合适的顶渣成分。另一方面，为防止连铸中包口堵塞及对钢中夹杂物进行变性处理，喂线后对钢水进行软吹，确保夹杂物充分上浮，提高钢水的纯净度和钢水的可浇性。

2.2.4 连铸控制

连铸采用全过程保护浇注、专用保护渣、低过热度浇注(10~20℃)、二冷弱水工艺和轻压下技术等先进工艺，实现恒拉速、中间包液面稳定控制，避免钢水二次氧化和卷渣，有效提高钢水的纯净度，防止铸坯产生表面横裂和纵裂纹。生产出的SCL39D汽车大梁钢铸坯表面质量良好，低倍偏析组织达C类的占95%以上。

2.3 轧钢工艺

2.3.1 加热工艺

合理的加热工艺，能使微合金元素充分固溶，提高沉淀析出强化效果。加热温度控制在1230~1250℃，采取较长加热时间，以促进在大梁钢中Nb、Ti等微合金元素的碳化物、氮化物及碳氮化物在高温加热时溶入奥氏体中，阻碍原始奥氏体晶粒长大，达到细化奥氏体晶粒的目的。

2.3.2 两阶段控轧工艺

第一阶段为粗轧，即奥氏体再结晶区轧制，开轧温度在1050℃以上，高温轧制后快速再结晶。此阶段将充分利用轧机能力，增大道次压下量，保证有连续2~3道次压下率在20%左右。促使因加热而粗化的奥氏体晶粒经反复轧制，再结晶晶粒得到细化。第二阶段为奥氏体未再结晶区轧制，低碳钢的微合金化是充分利于Nb对再结晶的抑制作用，将钢种的再结晶停止温度提高到一定的温度，以保证轧机的能力参数满足要求。开轧温度控制在920℃以下，终轧温度≤850℃，通过应变积累以及形成的扁平奥氏体晶粒和高密度晶界，使铁素体形核位置增多，进而充分细化铁素体晶粒。

2.3.3 控冷工艺

Nb微合金化钢种的冷却控制策略，是轧后要用较快的冷速进入铁素体形核温度区间，使未相变的γ晶粒形成微细的多边形晶粒或者相变转变成其他形态的组织，从而得到更加细小的组织和弥散析出物。

3 产品性能

3.1 力学性能

对轧制后的钢板进行力学性能检测，按照沿垂直于钢板轧制方向切取冲击试样，平行于轧制方向切取拉伸试样。其中，冲击实验按照《GB/T 229-2007金属材料夏比摆锤冲击实验方法》在冲击实验机上进行。拉伸实验依据《GB/T 228-2002金属材料室温拉伸实验方法》在拉伸实验机上进行。此外，还对钢板进行了GB/T2970-2004超声波探伤分析，检测结果如表3所示。从表3中看出SCL39D汽车大梁钢各项力学性能指标优良。

3.2 金相组织

试样经机械研磨抛光用4%硝酸酒精进行腐蚀后，将试样放到光学显微镜下进行显微组织观察。结果表明，从钢板表面、1/4处、心部组织均为F+P，晶粒度9.5~10.5级，带状组织不明显，约在0~0.5级。

3.3 焊接工艺评定

参照用户生产实际，采用Ø1.2mm的ER50-6焊丝半自动80%Ar+20%CO₂保护焊方法，对钢板进行对接接头组装、T型接头组装、立位焊接，焊接试样坡口形状如图1所示。按焊前不需预热，焊后不需回火，层间温度不需要控制，焊接热输入量40~50kJ/cm，焊后进行拉伸试验，并分别对焊缝、热影响区进行夏比V型缺口冲击试验。结果见表4。

结果表明，焊后屈服强度基本上没有下降，断裂部位都在母材，说明焊接后没有出现明显的软化现象，这与C-Mn超细晶钢的焊接试验结果是一致的。焊缝处与热影响区的冲击韧性指标差别不大，热影响区的冲击韧性与母材相近。

4 实际应用

用户自2011年2月将三钢研发的SCL39D重型矿用汽车大梁钢用于制作变截面纵梁等结构件，板形和表面质量优良，8m长钢板整体折弯成型好，未见皱折和裂纹，焊接性能良好，振动时效后材料综合性能优良。用于投放内蒙、东北等地的30t、40t矿用自卸车未见不良反映。

5 结语

1)三钢自主研发的SCL39D重型矿用汽车大梁钢成分设计经济合理，制造工艺先进，产品性能满足用户特殊要求；

2)SCL39D重型矿用汽车大梁钢的成功开发，对要求整体折弯加焊接以提高冲击疲劳韧性成型的重型工程汽车提供了大梁用钢的优质材料。

(胡真明 王明媚)

表1 SCL39D汽车大梁钢的性能要求

牌号	钢板厚度, mm	拉伸试验				冲击试验		弯曲试验	
		抗拉强度 R _m , MPa	屈服强度 R _{el} , MPa	伸长率 A, %	屈强比 R _{el} /R _m	温度, ℃	V型冲功 KV2, J (b=35mm)	180°	KV2, J (b=1a)
SCL39D	14	490~650	≥ 390	≥ 20	≤ 0.85	-20	≥ 47	d=1a	

表2 SCL39D汽车大梁钢化学成分 %

牌号	C	Mn	S	P	Si	Als	Nb+Ti	Pcm
SCL39D	0.08~0.09	≤ 1.55	≤ 0.005	≤ 0.010	≤ 0.30	≥ 0.015	适量	≤ 0.19

表3 SCL39D汽车大梁钢力学性能

钢板规格及样批数	屈服强度 R _{el} , MPa	抗拉强度 R _m , MPa	断后伸长率 A, %	屈强比	宽冷弯 180° (b=35mm, d=1a)	-20°C V型冲功 KV2, J	超声波探伤
14mm (38批号)	420~480	520~600	≥ 28	≤ 0.84	合格	≥ 200	I级

上接第B04版

速冷却的热轧带钢冷却路径控制示意图。

为此，开发出面向用户定制的冷却策略控制手段，用户通过配置数据库文件，即可实现任何需要的冷却策略。

2.4 工艺技术难点

随着当前资源和环境压力日趋增加、生产成本大幅度提高，在满足钢铁塑韧性和使用性能的前提下，降低合金含量使用成为系列板带钢产品品种开发生产的必然。与以往钢铁产品生产工艺相比，新一代TMCP工艺不再以添加合金元素为调控其力学性能的主要手段，而是更加注重通过生产工艺手段来调整和控制产品最终显微组织结构，从而使其性能达到甚至超过以往同类产品的标准。由于降低了钢中合金元素添加量，在减少资源、能源消耗的同时，也使得钢铁产品的可回收和再利用性能显著增强，从而实现钢铁材料的绿色制造。

与原有常规生产方式相比，新一代TMCP技术更强调通过促进微合金元素的铁素体相间析出和控制碳元素的相间再分配(re-partition)来实现钢材的强韧性：

1) 超快速冷却条件下钢铁材料强化机制的研究

针对超快冷和新一代TMCP的技术特点，研究超快速冷却条件下热轧板带钢材料的强化机制，包括细晶强化、析出强化、相变强化等。研究不同工艺条件下，各种强化机制对提高材料强度等性能的影响规律。

2) 综合性能最优化的工艺

制度制定

制定合理的工艺路线和优化的工艺制度，充分发挥各种强化机制的强化效果，并获得最优的综合性能，以最大限度挖掘钢铁材料的潜力，实现热轧板带钢材料的高性能化和高强度化，满足各种不同使用条件对钢材性能的要求。

3) 新一代TMCP条件下系列产品开发

根据新一代TMCP的优势和特征，针对热轧板带钢产品的使用需求，开发性能优良、绿色安全、可循环、节省资源和能源的系列减量化热轧板带钢产品，满足社会需求，并引领社会可持续发展。

4) 新一代TMCP条件下的集约化轧制技术开发

基于新一代TMCP技术和已有的组织性能预测与优化平台，开发利用冷却作为手段的材料组织性能调控技术，进行钢材的逆向优化和精细调控，解决大规模生产和用户个性化需求之间的矛盾，实现集约化的钢材生产。

5) 产品全生命周期评价技术开发

对原料—生产—用户使用等系列生产过程，在材料的全生命周期范围内，对材料生产、使用过程中涉及的能耗、成本、资源消耗、排放等进行综合评价，以判定材料对社会和环境的影响，以及生产工艺过程的优劣，促进材料生产过程的科学化。(未完待续)

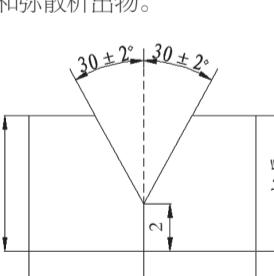
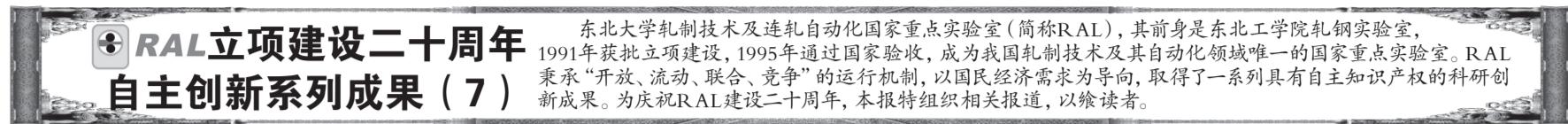


图1 焊接试样坡口形状

表4 焊前、焊后力学性能比较

试样号	屈服强度 R _{el} , MPa	抗拉强度 R _m , MPa	断后伸长率 A, %	断裂部位	-20°C V型冲击功平均值 KV2, J
焊前性能 1	475	560	31	—	226
焊前性能 2	470	565	28	—	217
焊后性能 1	480	560	27	母材	焊缝处 170; 热影响区 210
焊后性能 2	470	575	25	母材	焊缝处 167; 热影响区 207



热轧板带钢新一代TMCP装备及工艺技术

(接第12期B05版)

3 热轧板带钢新一代TMCP装备及工艺技术开发历程及工业实践

3.1 超快速冷却技术装备的开发历程及推广应用

2008年,东北大学RAL在包钢CSP、攀钢1450mm轧后超快速冷却实验或中试装置开发基础上,依托湖南华菱涟钢产品质量提升技改工程2250mm轧后冷却系统项目,合作开发国产首套基于超快速冷却技术的热轧带钢新一代控制冷却系统。技术方案制定过程中,一方面从产品定位和工艺需要出发,在吸取国内外已投产同类轧线经验基础上,自主创新配置高水平轧后冷却系统,以满足多品种开发需求;另一方面,RAL提出了一种倾斜喷射的超快速冷却系统设计理念,采用斜喷缝隙式喷嘴+高密管式喷嘴的混合布置。考虑到兼顾特殊品种如双相钢等后段强冷需求,后段层流冷却采用基于层冷机理的适度加密方案,提出热轧带钢新一代控制冷却技术方案:前置式超快冷+层冷粗冷段+加密冷却段+精冷段(已申报专利),如图10所示。

RAL提出的基于倾斜喷射的超快速冷却系统设计理念,通过有效去除带钢表面残留水与钢板之间形成的汽膜,使钢板与冷却水完全接触,实现对钢板的射流冲击冷却和全面的核心沸腾换热,从而大大提高钢板和冷却水之间的热交换。此外,通过喷嘴结构的优化设计实现喷嘴出口流量沿带钢宽度方向的合理分布,实现带钢高强度冷却条件下的均匀冷却,避免了钢板由于冷却不均引起的翘曲。RAL将该系统命名为ADCO-S-HSM(Advanced Cooling System-Hot Strip Mill)。

2009年9月6日,涟钢2250mm热轧线热负荷试车成功;2009年12月,超快速冷却系统全面进入工程调试阶段;2010

年3月,减量化Q345首批次系列规格产品试制成功,产品力学性能稳定,焊接及成形性能优于常规产品,系统应用进入试生产及批量化阶段。基于超快冷技术的新一代TMCP工艺在提高产品性能、降低生产成本方面显示出独特的技术优势。同时,调试过程全面转入工程技术完善和产品新工艺技术开发阶段。双方在低级别产品及规格上稳步推进工艺和批量化生产的基础上,进一步推进高级别高等级钢种的新工艺开发、试制及批量化生产工作。基于超快冷工艺,2011年4月,低成本高性能600MPa、700MPa热轧态高强钢完成产品试制及批量供货;2011年10月,低成本高性能管线钢X70顺利完成产品大批量生产供货。新一代TMCP工艺技术优势得到进一步充分体现。截至目前,基于新一代TMCP工艺,累计生产40万t以上,品种涵盖普碳钢、高强钢、管线钢、汽车结构钢等多个产品系列。当前,基于超快冷工艺进一步扩大产品工艺覆盖面,开发和生产低成本高性能热轧带钢产品,为企业创造更大的生产效益,已成为企业及至双方进一步扩大和深化产学研合作的广泛共识。

作为一项我国钢铁工业轧制技术领域的原始性技术创新,其技术开发和工程实施过程历经喷嘴结构设计及优化开发、超快速冷却喷水系统的优化配置、满足连续稳定生产要求的超快速冷却工程技术开发与实现、高精度模型控制系统的开发与应用、系列品种及规格产品基于超快冷的新一代TMCP减量化工艺开发与实现等过程。在项目依托企业—湖南华菱涟钢的大力支持下,双方合作开展了卓有成效的理论研究和工程技术开发与研究工作,并取得重大突破和成果,完成了工艺理论到工程实践的实现及工业化大批量应用过程,开发和形成了涵盖装备技术、自动控制、冷却工艺、减量化产品工艺等

在内的完善的热轧带钢新一代TMCP装备及工艺成套技术。

基于超快速冷却技术的新一代TMCP工艺在低成本高性能热轧带钢产品生产过程中体现出的技术优势和工艺潜力得到了钢铁企业、行业以及国家和政府部门的高度认可。2009年,涟钢与东大合作在其CSP热轧生产线新增轧后超快速冷却系统,2009年底该系统投入运行。双方基于涟钢CSP薄规格产品轧制工艺优势,合作开发高等级薄规格产品及工艺。2011年,在前期相关科研开发工作基础上,由东北大学联合国内钢铁企业、科研院所联合申报的“热轧板带钢新一代TMCP装备及工艺技术开发与应用”项目列入国家科技部“十二五”科技支撑计划项目“钢铁行业绿色制造关键技术集成应用示范”,标志着热轧带钢新一代TMCP装备及工艺技术获得政府高度认可,自主创新及技术攻关和项目实施工作得到了国家和政府部门的大力支持。2012年3月,首钢迁钢与东北大学正式签订超快冷系统项目合同,项目涵盖2160mm热轧线新增超快速冷却系统的装备、自动化、模型以及新产品工艺开发等工作,全面实施基于超快速冷却的新一代TMCP装备及工艺技术。这是首钢总公司以及首钢迁钢各级领导和技术人员在综合考察分析国内外相关技术厂家实际技术水平和应用情况的基础上做出的慎重选择,尤其是在当前钢铁行业严峻的形势下,充分体现了对东北大学RAL自主创新技术的高度认可和信任,也充分体现了东北大学RAL热轧带钢超快冷技术的先进性和可靠性。目前,RAL开发的以超快速冷却为特征的热轧带钢新一代TMCP装备及工艺技术已在业界得到高度认可,真正体现了自主创新的新一代TMCP技术的生命力。

3.2 装备及工艺技术特点

1) 冷却强度大,冷却均匀性良好,满足热轧带钢全系列规格

产品的冷却工艺需求。

ADCO-S-HSM系统的冷却能力在现场应用实践中表明,对于3mm带钢,冷却速率可达到300°C/s以上;与常规层流冷却相比,全系列厚度规格(1.2~25.4mm)带钢冷却速率可达到常规层流冷却速率的2~5倍及以上。同时,独特、先进的超快冷喷嘴集管结构设计具备水压和流量的大范围调节功能,可实现冷却能力的大范围无级调整,这就为特殊产品生产过程中超快速冷却系统实现层流冷却功能提供了应用条件。

在冷却均匀性上,实际应用过程中,开发的ADCO-S-HSM系统曾用于生产最薄至1.2mm厚度的带钢超快速冷却工艺,冷却后板形良好,体现了良好的冷却均匀性。同时也为生产低残余应力或无残余应力板带钢奠定了良好工艺条件。

必须指出的是,热轧带钢轧后冷却过程的板形问题实际与热轧工艺过程的温度均匀性密切相关,如精轧过程机架间冷却均匀性、轧制辊印等都会对卷取前的板形产生影响。尤其是对于宽幅达到1900mm甚至2000mm以上超宽幅面的带钢冷却,因热轧带钢轧后冷却通常需要超快冷系统与后面的层冷进行接力式冷却,由于后续层冷区域带钢因幅面过宽造成带钢边部与冷却区域侧挡板之间间距过小,往往造成带钢表面残留水存积不能快速排出,残留水与带钢表面的不均匀热交换极易造成板形不良。因此对于宽幅面的带钢冷却过程,必须考虑在后续层冷区域具备有效的残留水去除手段,以确保板形良好,否则宽幅面带钢实际生产过程中即使仅采用层流冷却工艺也往往会产生瓢曲、浪形等板形问题。

2) 工艺模型控制精度高,实现了超快速冷却条件下的温度多目标精确控制,满足新产品工艺的开发需求,采用的与现有控冷系统的并行控制系统方案确保了新增超快冷系统实施过程中的工艺及产品生产过渡稳定性。

热轧钢铁材料新一代TMCP工艺要求超快速冷却能够在工艺所需的动态相变点附近停止冷却,这就要求控制系统具备对带钢超快速冷却后的温度具备良好的控制精度。因此,考虑卷取温度、冷却速率等控制要求,实际上基于超快速冷却的新一代TMCP工艺是多温度目标的控制过程。开发的工艺模型通过采用TVD曲线计算与前馈控制相结合,有效提高了温度控制精度,满足了大型热连轧机生产线升速轧制的工艺要求。实际应用过程中,典型的热轧带钢温度控制情况如图11所示。

实际对比应用表明,在卷取温度控制上,东北大学RAL开发的热轧带钢控冷模型达到或优于国外引进的先进控冷模型,尤其在厚规格低温卷取工艺上,控温

精度明显优于引进的国外先进系统实际控制水平,为厚规格产品的连续稳定生产和产品性能批次稳定性做出了重要贡献。

前述提及,热轧钢铁材料新一代TMCP工艺实际上从成分设计开始,及至冶炼、轧钢工序都要系统开展相关的工艺技术开发工作,涉及整个流程工艺过程的再造。因此,在现有轧线基础上新增超快速冷却系统,必须确保产品工艺及生产过渡过程稳定性,消除对产品现有工艺及生产过程的影响,在此基础上稳步实现和扩大低成本高性能钢铁材料的新工艺开发与推广应用。东大RAL采用的与现有控冷系统的并行控制系统方案,确保了新增超快冷系统实施过程中的产品工艺及生产过渡稳定性,得到了企业的高度认可,为项目实施和产品生产的稳顺过渡提供了有效手段。

3) 系统冷却工艺控制方式

灵活,为热轧带钢丰富多彩的冷却路径控制、热轧带钢产品组织调控以及低成本高性能带钢产品和新工艺的开发提供了有效手段。

热轧带钢生产工艺的重要突出特点在于注重冷却路径的控制。与传统层流冷却系统相比,前置式超快速冷却系统的存在,强化了对热轧后带钢晶粒度、析出物控制以及组织相变的控制能力。同时与后续层流冷却的联合使用,大大丰富了热轧带钢轧后的冷却路径控制策略,在热轧带钢材料强化机制和冷却过程控制等组织调控手段和途径方面有了重大创新与突破。

在晶粒度控制方面,在奥氏体未再结晶区的较高温度范围内完成热轧过程,钢铁材料不能发生再结晶,仍然处于含有大量“缺陷”的高能状态。通过轧后的立即超快速冷却可以抑制奥氏体晶粒的长大,并将材料的“硬化”状态保持到终冷温度,即相变点附近。在随后的相变过程中,保存下来的大量“缺陷”为新相的生成提供更多的形核位置,从而可以得到与低温轧制相似的强化效果,在不添加或少添加Nb元素的低成本条件下实现对组织的细晶强化。

在析出物控制方面,传统控轧控冷条件下,析出物在奥氏体中析出,随后析出粒子不断长大,最终析出粒子尺寸达数十纳米,强化效果不佳。采用轧后的超快冷可以抑制碳氮化物在奥氏体中析出,迅速穿过通常的形变诱导析出温度范围区间,使得碳氮化物在铁素体或贝氏体相变区间内析出。其中铁素体中的析出又可分为相间析出以及在铁素体晶内大量、微细、弥散的过饱和析出,进而起到强化铁素体基体的作用,可大幅度提高材料的强度水平,从而低成本地增强析出强化效果。

下转第B05版

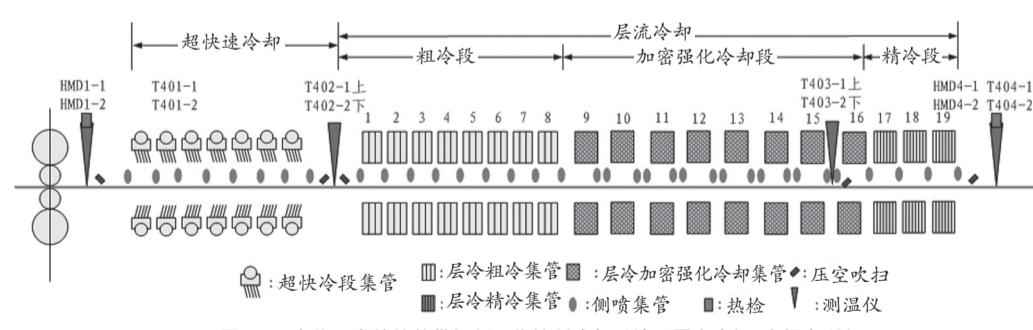


图10 合作开发的热轧带钢新一代控制冷却系统配置方案(已申报专利)



东北大学
Northeastern University



RAL

上接第B04版

在组织相变控制方面，其核心是冷却路径控制。将超快速冷却具有的冷却速率调整功能作为手段，可以更有效的进行相变强化控制，实现理想的相变强化。传统的控制相变强化的方法是添加合金元素，如为了实现贝氏体相变，往往添加Mo或B，使CCT曲线的铁素体相变区右移，以利于在传统层流冷却系统的较低冷却速率条件下得到贝氏体组织。但是，添加合金元素会提高生产成本，消耗资源。如果采用超快速冷却，情况会完全不同。如同样为了发生贝氏体相变，可以不添加合金元素，而是采用超快速冷却，抑制铁素体相变的发生，而使相变在更低的温度下进行。如果超快速冷却的终止温度位于贝氏体相变温度范围，则可以得到贝氏体组织。如果这一终止温度位于马氏体相变点以下，则得到马氏体组织，因此是一种减量化的相变强化方法。

在冷却路径控制方面，热轧带钢常规层流冷却系统的冷却策略主要有前段主冷策略、无反馈段优先开启的前段主冷策略、后段主冷策略以及稀疏冷却策略。采用超快速冷却，根据不同钢种、不同规格以及不同的性能要求，对超快冷出口温度、卷取温度和冷却速度提出要求，整个冷却系统有多种组合的冷却路径。在常规生产过程中常用的三种冷却路径控制策略为：UFC+LFC前段冷却、UFC+LFC后段冷却、UFC+LFC稀疏冷却模式，如图12所示。

作为调控组织结构并最终控制性能的主要手段，超快速冷却为实现热轧钢铁材料冷却路径和冷却速度的优化控制，使成分简单的钢铁材料能够具备满足多样化要求成为可能，为实现资源节约型高性能钢材的生产提供了工艺手段。

3.3 产品工艺开发及应用

在包钢、攀钢、连钢等国内钢铁企业积极参与及努力下，自主创新的超快速冷却技术及装备迅速应用到工业化大批量生产中。目前，基于超快速冷却，围绕新一代TMCP工艺，已在低合金钢、汽车用钢、高强钢(600MPa/700MPa)、管线钢(X70、X80)等系列钢种方面开展了卓有成效的减量化工作，吨钢主要合金元素可节约用量15%-30%，节约成本约100-150元及以上，低成本高性能钢铁材料开发工作效果显著。在当前钢铁行业严峻的市场形势下，基于超快速冷却的新一代TMCP工艺技术在“资源节约型、工艺减量化”的热轧带钢生产工艺及产品技术开发与批量化生产应用过程中突显出良好的使用效果和巨大的工艺潜力。

下面分别以低合金钢(Q345)、高级别管线钢(X70)为例，简要说明基于超快速冷却的新一代TMCP装备及工艺技术实际应用情况。

1) 低合金钢(Q345)

作为量大面广的钢铁材料产品，低合金钢在企业热轧板带钢生产中所占比例较大。以Q345B为例，在传统生产工艺条件下，为保证Q345热轧带钢的强韧性，通常需添加1.20%-1.60%Mn，部分厂家由于设备条件限制，甚至尚需添加适量的Nb、V、Ti等微合金元素。

此外传统Q345钢中的锰含量较高时在连铸、轧制过程中还易于形成拉长的MnS塑性夹杂，导致纵、横向力学性能差、带状组织严重，从而使其应用范围受到很大限制。在一定程度上，开发内在质量优良、焊接性能以及成形性能更优的低合金钢生产工艺及产品已成为钢铁生产企业和市场及用户的重要需求。

基于超快速冷却的新一代TMCP工艺，充分发挥超快速冷却的细晶强化作用，开发出低成本高性能的Q345生产工艺。与传统生产工艺相比，Mn含量降

低0.5%-0.8%左右，吨钢同比效益100元以上。金相组织检测表明，晶粒尺寸明显细化，由常规工艺生产下的10级提高至11.5级以上。典型厚度产品的力学性能如表1所示。

此外，降低Mn含量后生产的Q345产品，一方面可以减轻带状组织程度，改善C-Mn偏析，减小纵横向性能差异；另一方面，通过减少合金元素用量，降低碳当量，可提高钢材韧性和焊接性能。而用户实际使用也充分证明，减量化的Q345B产品，在产品焊接性能、成形性能等方面明显优于常规工艺产品，得到了市场和用户的充分认可和肯定。在通过系统的跟踪产品时效、焊接以及用户跟踪等系列使用性能评价工作的基础上，目前，低成本高性能的Q345B热轧带钢产品已得到大规模工业化生产，为企业创造了显著经济效益。

2) 管线钢(X70)

管线钢产品在国民经济发展中意义重大，同时也是热轧带钢生产企业重要的高等级产品品种。随着国内众多热轧带钢生产企业相继开发出高钢级管线钢生产工艺，市场竞争极为激烈，开发低成本高性能的管线钢生产工艺已成为钢铁企业的迫切需求。

管线钢生产过程中，为提高管线钢强度、韧性及焊接等综合性能，一般在未再结晶区控制轧制以细化奥氏体晶粒，得到以细小针状铁素体为主的显微组织。然而，这种生产工艺要求轧制变形主要发生在低温区域，造成轧机负荷问题，受轧机设备能力限制影响较大。此外，在成品厚度规格较大、级别高于X65时，还存在落锤冲击实验(DWTT)不合格的问题。传统生产工艺中通常添加0.1%-0.3%的Mo，我国稀有元素的资源现状是“缺Cr少Ni无Mo”，由于钼铁价格昂贵，造成管线钢成本大幅度提高。在当前市场竞争条件下，管线钢

生产中的合金元素如Mo、Nb等成本已明显影响到钢铁企业的实际生产效益。此外，热轧带钢生产线高钢级管线钢生产通常需要在比较低的卷取温度实现。如对于X70管线钢，热轧带钢生产线的卷取温度通常在430℃左右甚至更低。而实际上，低温卷取易于造成几个方面问题。一是卷取温度控制精度通常不高；二是卷取过程中对卷取机冲击很大，易于造成卷取设备耗损增大，故障率提高；再者，随着国内能源管道敷设对管线钢厚度规格需求进一步增加，解决偏厚规格管线生产过程的冷却能力不足问题已逐渐被企业所重视。因此，一方面如何更好地稳顺管线钢轧制生产过程，另一方面如何低成本生产高性能管线钢产品，已成为国内钢铁企业生产管线钢产品急需解决的重要问题。

本减量化合金成分设计的X70管线钢，力学性能及批次稳定性优异，制管性能良好，部分产品性能可达到X80相关综合性能要求。同时轧制生产过程中可在一定程度上提高卷取温度。吨钢成本同比降低200元左右，经济效益和社会效益十分显著。

当前，随着能源运输管线敷设范围的逐步扩大和要求的进一步提高，对于地震多发区、地质灾害区、滑坡、泥石流和冻土带的油气输送管线需要求钢管具有抗大变形的能力。如前所述，超快速冷却通过对轧后带钢晶粒度、析出物以及组织相变的有效控制，也为抗大变形管线钢的开发与生产提供了新的工艺路线和手段。

近3年来，以开发钢铁材料绿色制造技术为核心的热轧带钢新一代TMCP装备及工艺技术，在项目依托企业—湖南华菱涟钢有限公司各级领导和技术人员的鼎力支持下，产品级别由普碳钢系列到高等级管线钢系列，双方合作开展了卓有成效的开发工作，一方面为企业创造显著效益的同时，也为推动国内热轧带钢生产线工艺技术升级做出了突出贡献。

展望未来，以开发钢铁材料绿色制造技术为核心的热轧带钢新一代TMCP装备及工艺技术，大力发展节约型高性能产品并协助下游用户实现绿色制造的钢材品种，实现大幅度节约资源和能源，提高产品成材率，减少对合金元素的过度依赖和资源的过度消耗，是实现钢铁工业可持续发展的关键要素。同时，也将对突破制约我国钢铁产业升级的核心关键技术、推动钢铁产业从规模优势向技术优势转变起到持续支撑作用。而且对于在当前形式下提高钢铁行业生产效益，实现社会可持续发展，也具有非常重要的实际意义。

(致谢：感谢包钢、攀钢、连钢等钢铁企业对自主创新的热轧带钢超快速冷却技术的大力支持，特别感谢涟钢各级领导及广大技术人员为我国热轧带钢新一代TMCP装备及工艺技术开发与应用做出的突出贡献，特此表示真挚的谢意！)

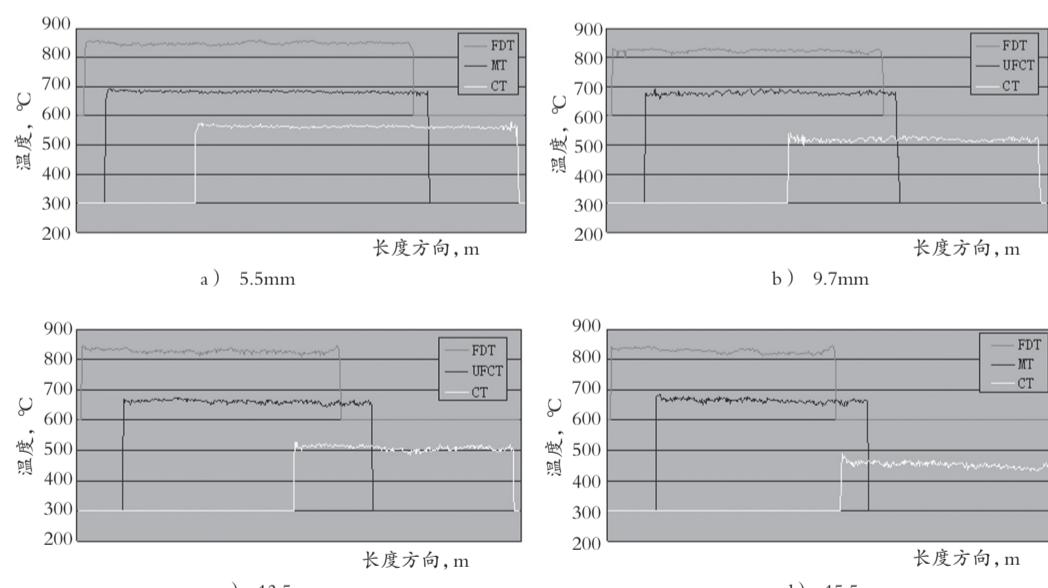


图11 不同带钢厚度温度控制曲线

表1 厚度为9.7mm低成本Q345B部分产品力学性能

批次	拉伸实验			冲击实验(-20℃)		
	屈服强度, MPa	抗拉强度, MPa	延伸率, %	冲击韧性, J/cm²		
0A03293500	390	510	30.0	84	78	64
0A03291800	390	510	29.0	66	72	80
0A03291900	395	515	29.5	66	72	80
0A03293600	390	510	30.0	84	78	64
0A03292400	395	510	30.0	68	76	82
0A03294500	395	505	32.0	67	84	70
0A03292500	395	510	30.0	68	76	82
0A03295500	380	500	35.5	80	64	66
0A03291700	390	510	29.0	66	72	80
0A03297600	385	510	32.0	80	78	66

SIEMENS 西门子新闻传真

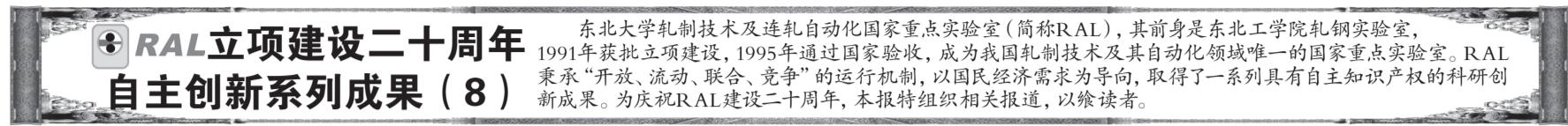
西门子为天冶集团新建高线轧机

西门子奥钢联与天津冶金集团轧三友发钢铁有限公司签订合同，为其提供一套新的线材轧机，这将使该公司有能力采用热机械轧制工艺生产高速线材产品。新线材轧机使用了先进的高速轧制技术，是西门子为该客户提供的第三条轧制生产线。2011年底调试。

西门子供货范围包括从第二架预精轧机到集卷站的所有线材轧机设备的设计以及关键设备供货，包括一套双机架

230V型预精轧机，一台切边剪及其控制系统，一套8机架摩根无扭轧机，一套4机架摩根减定径机设备，夹送辊及吐丝机。合同还包括了6套专有机电方案包以控制轧制线关键设备的运行。根据产品大纲，新建轧机生产能力可达到每年约70万t，轧制速度为112m/s。

2010年7月13日，天津冶金集团轧三友发钢铁有限公司同天津市的另外3家钢铁公司合并成立了渤海钢铁集团。



H型钢新一代TMCP装备及工艺技术

近年来,热轧H型钢作为一种经济断面型钢,以其独特的力学性能好、承载能力大、便于机械加工和安装、节约工时、造型美观、可回收再生等优点,在众多钢结构用钢中占据着主导地位,国内H型钢需求量正日益增加,市场前景十分广阔。

控制冷却技术在热轧板带材和棒线材等产品上已得到了成功应用。相比而言,H型钢的控制冷却技术发展则相对落后。目前,H型钢热轧生产线还没有形成系统、成熟的控制冷却理论和工艺技术,已成为H型钢工业生产的瓶颈环节。这主要是由于H型钢断面形状复杂,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,产品易产生内外扩变形及腹板浪、裂纹等缺陷。

近年来,H型钢控制冷却技术的开发已引起国内外企业和科研院所的重视,在日本、德国、意大利等一些国家都有研究报道。

1990年卢森堡阿贝德公司开发了QST技术,即H型钢轧后淬火加自回火控制冷却工艺。德国应用该工艺,在精轧机后设置一冷却段,H型钢出精轧后立即进行喷水冷却,表面发生淬火及随后的自回火过程。QST技术可以提高H型钢的屈服强度和韧性。但该技术还不成熟,存在冷却不均匀和轧件变形等问题。我国的用户不易接受采用轧后淬火加自回火工艺强化的钢材,普遍认为淬火+自回火后形成的回火层降低钢材的使用性能。主要问题是:钢材的屈强比高,焊接性能变差,钢材应变时效大。所以该技术在我国无法推广应用。

东北大学RAL开发了H型钢的新一代TMCP装备及工艺技术,其核心是超快速冷却技术。这是近年来发展的一种具有较高冷却速率的冷却方法,其特点是控制轧件在限定(通常极短)的

时间内,快速降温至目标温度。超快速冷却的设备特点是:体积小,流体换热效率高,但是设计结构复杂。这种技术主要应用于钢材热加工工艺过程中的轧后快速冷却及中间坯快速冷却,可提高钢材综合力学性能、使用性能以及生产效率。

因此,开发具有较高冷却速率而又不淬火,并具有较强温度均匀性控制能力的热轧H型钢超快速冷却技术,以实现节约型的钢材成分设计和减量化钢材生产,从而获得高附加值,实现H型钢企业的可持续发展。

1 超快速冷却系统的结构

2009年,东北大学RAL国家重点实验室与马钢第三钢轧总厂合作,在马钢三轧大H型钢生产线现有工艺条件下,开发出了H型钢轧后超快速冷却系统。该技术的成功应用为马钢开发H型钢新产品、降低生产成本提供了新的工艺手段。

根据生产现场的设备布置特点开发出的H超快速冷却设备如图1所示。该冷却装置安装在万能精轧机之后,沿轧制线方向分前后两段。供水系统通过主供水管向冷却装置供水,分水管依次连接装置的前段传动侧和操作侧供水管、后段传动侧和操作侧供水管及上部与下部供水管。

1.1 总体构成

大H型钢超快速冷却系统有以下几个部分组成:

1)供水系统:通过水泵将冷却水压力提升到要求的指标。

2)输水管路:将增压后的冷却水供给H型钢生产现场,并通过超快速冷却系统对H型钢进行超快速冷却。

3)主水管和分水管:在超快速冷却系统的操作侧,为冷却系统各个部分的冷却喷嘴供水,各分水管上安装有流量计、压力传感器等仪表系统。

4)冷却系统:冷却系统根据需要分为若干段,每段包括两侧喷嘴喷嘴及上、下喷嘴喷嘴,辊道两侧的侧挡板等。

5)横移系统:超快速冷却系统各冷却段对翼缘的冷却分为操作侧和传动侧两部分喷嘴,根据轧制H型钢的不同规格分别由液压油缸控制其横向位置,保证两侧集管对轧制中心线对称布置,以达到两侧均匀的冷却效果。

6)控制阀门:每一段冷却控制单元分别由气动开闭阀、手动球阀组成,用于对各冷却单元的控制,实现所要求的冷却温度。

7)基础自动化:实现控制仪表与计算机系统的连接和通讯,同时通过数据通讯对水泵和电机的启停进行控制。

8)过程自动化:控制冷却的组态、形式、界面显示及数据通讯和结果处理等。

9)数学模型开发:根据钢种开发及生产工艺的要求,对超快速冷却过程建立数学模型,实现温度控制过程的实施和分析。

1.2 设备的工艺要求

1)由于H型钢的结构特点,要求对超快速冷却系统的不同部位分别进行控制冷却,以保证H型钢断面不同位置上组织和性能的均匀性。

2)为了对不同规格H型钢进行冷却,两侧翼缘的冷却喷嘴通过液压缸驱动相对于轧制中心线对称横移,侧向冷却和横移系统沿辊道方向分为两段,每段每侧各采用两个液压缸实现横移。

3)在冷却系统的入口、中间和出口处的两侧分别设有导辊,用于H型钢在冷却过程中的导向,保证H型钢按要求正确进出冷却段。

4)超快速冷却系统的上部为封闭式,在侧挡板最上部和中部设有冷却喷嘴,用于H型钢上部的R角处和翼缘的冷却;下部冷却喷嘴固定在输出辊道的下方,用于H型钢下部的R角部

位和腹板下表面的冷却,每组下喷嘴可单独控制。图2为喷嘴布置及阀组系统控制原理图,图中显示了上、下水管及侧喷嘴的安装位置。

5)翼缘部分冷却时,两侧喷嘴相对应并成对控制。

6)所有侧喷嘴采用气动开闭阀由计算机通过轧制规格和数学模型成对单独控制;每对上喷嘴和下喷嘴的控制也单独完成,并根据实测结果建立数学模型实现。

7)分水管与横移系统之间采用金属软管连接。

8)在冷却系统的出口侧设置压缩空气吹扫系统,以清除H型钢上表面的冷却水。

9)主供水管置于传动侧,通过金属软管与分水管连接,所有阀门根据需要布置在轧制线两侧,并尽量减少水管在操作侧占用的空间。

1.3 工艺过程

H型钢超快速冷却系统在工作过程中,依次完成一系列的动作,实现H型钢的冷却。

1.4 冷却系统的其他要求

1)预设定控制:根据数学模型和实测温度值对冷却系统的喷嘴开启状态进行预设定控制,使H型钢的温度达到目标值。

2)横移系统:采用液压缸进行推动,每一侧的两个液压缸由一个阀台控制;横移系统置于移动辊道上,保证调整方便、灵活;在每个油缸内部安装有位移检测元件,对油缸的行程进行监测和控制,同时完成横移的时间要满足生产要求。

3)超快速冷却系统具有足够的强度和刚度,保证在卡钢或其他生产事故状态下不产生明显的变形,强度不低于现有辊道侧挡板。

4)两侧的挡板具有良好的封闭性,冷却水没有大量的外溢,尤其在操作侧;在超快速冷却系统的入口也设有空气吹扫装置,防止冷却水向精轧机方向的大量流动。

2 大H型钢超快速冷却控制系统

2.1 超快速冷却基础自动化系统

根据大H型钢生产线超快速冷却的功能要求,拟在UF成品轧机的出口传动侧设置远程I/O柜2台,在电气室设置交流进线柜1台、PLC控制柜1台;在操作室设有操作台1个、HMI计算机1个及过程控制计算机控制柜1个。整个系统的控制总图如图3所示。

2.2 超快冷过程控制系统

大H型钢的超快速冷却控制系统是保证冷却速率和均匀性的重要组成部分。超快冷控制系统原理如图4所示:包括原始数据条件,以及由超快速冷却过程控制计算机设定的冷却温度区间、冷却速度、过程机跟踪数据、设备操作条件、水温、H型钢温度数据,而且包括适宜水冷区长度的计算(依据冷却速度、水温、冷却温度区间、终轧速度进行计算),根据上述计算结果给出开启阀门数量和喷嘴排列方式。控制阀组冷却后计算机将H型钢的实际测量结果反馈到系统中去,进行自学习。超快冷控制系统主

定的数学模型,控制阀门按照控制时序依次开启,减少冷却水由于压力变化对水泵系统的冲击。

5)H型钢冷却:对大型H型钢要求冷却温度偏差在允许范围内,并且H型钢在冷却器中运行通畅、不卡钢,弯曲程度符合矫直要求。

6)温度检测:在超快速冷却系统的入口和出口指定

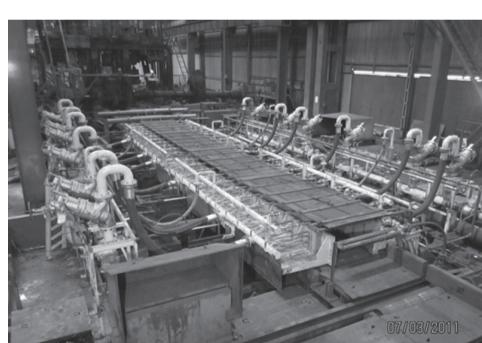


图1 大型H型钢超快速冷却设备布置

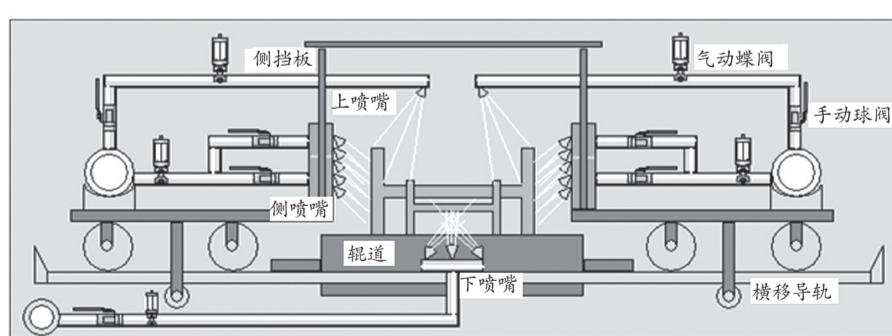


图2 阀组系统控制原理图

上接第B04版

要特点为：

1)控制系统主要由预设定模块、在线修正模块和自学习模块组成；

2)超快冷将根据具体的工艺条件，即H型钢规格、冷却速率、开冷温度、终冷目标值，进行各模块的设定与计算；

3)入口HMD(热金属检测器)功能是触发模型计算，并对H型钢样本进行位置跟踪，根据样本位置在线修正并编辑相应的开启阀门组态；

4)出口HMD功能是触发自学习计算。当检测到H型钢离开超快冷系统后关闭阀门；

5)模型对腹板和翼缘的温度控制是相互独立的，腹板模型是通过上下水阀门进行成组控制，翼缘模型是对沿轧制线两侧阀门成对控制。

2.3 超快冷过程控制模型

1)空冷温降模型

空冷模型是根据斯蒂芬-波茨曼定律，利用腹板或翼缘散失的热量应等于热焓值的变化这一热平衡关系推出。根据H型钢腹板或翼缘空冷前的温度，通过模型得到空冷后的温度，其基本关系为：

$$T_2 = \left[(T_1 + 273)^{-3} + At/h_F \right]^{-1/3} - 273 \quad (1)$$

$$A = 6 \varepsilon \sigma 100^{-4} / (C_p \rho) \quad (2)$$

式中：A为模型参数； ε 为轧件的热辐射系数(或称为黑度)， $\varepsilon < 1$ ，对于热轧件而言，要视其表面的氧化程度而取不同值，当表面氧化铁皮较多时一般取为0.8，而刚轧出的平滑表面一般取为0.55~0.65； h_F 为H型钢

腹板或翼缘厚度，m； σ 为斯蒂芬-波茨曼常数； C_p 为H型钢比热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$ ； ρ 为H型钢密度， kg/m^3 ； T_2 为空冷后的H型钢腹板或翼缘温度， $^{\circ}\text{C}$ ；t为空冷时间，s； T_1 为空冷前H型钢腹板或翼缘温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

2)水冷温降模型

水冷温降模型是控制模型的核心，其中确定热流密度系数又是水冷模型的核心。热流密度系数是从影响水冷温降的大量因数中选出主要因数建立起来的模型。热流密度系数的关系式可表示为：

$$K_0 = K_1 [c_0 + c_1 h_F + c_2 W_F + c_3 T_F + c_4 T_c + c_5 Q_w + c_6 (T_F - T_c) + c_7 v] \quad (2)$$

式中： K_0 为H型钢热流密度系数， $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ； K_1 为H型钢腹板或翼缘基本热流密度学习系数； c_0 ~ c_7 为常数； h_F 为H型钢腹板厚度或翼缘厚度，mm； W_F 为H型钢腹板宽度或翼缘高度，mm； T_F 为H型钢腹板或翼缘终轧温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_c 为H型钢腹板或翼缘终冷目标温度， $^{\circ}\text{C}$ ； Q_w 为冷却水量， m^3 ； v 为H型钢水冷时的速度， m/s 。

在研究过程中采用有限元技术对超快速冷却过程的温度场进行了模拟计算。计算结果发现，温度在较短的时间内降低后，内部返温现象使断面温度趋于均匀化。表面温度升高，在2.5~3s的时间内返温到最高点，腰部达到607 $^{\circ}\text{C}$ ，R角处和腰腿连接处的温度都达到了670 $^{\circ}\text{C}$ ，而翼缘部的平均温度在580 $^{\circ}\text{C}$ 左右。由于超快冷阶段冷却时间较长，造成返温过程温度梯度较大，需要较长时间的空冷过程才能使断面温

度均匀。

2.4 侧喷嘴横移控制

超快冷控制系统根据所生产的H型钢规格(腹板高度)来设定两侧冷却喷嘴的开口度。当更换轧制规格时，每段两侧的两个液压缸将根据开口度设定值协同作业实现侧面冷却装置横移。

通过PLC控制电磁阀和比例阀来调整两个液压缸开口度。PLC根据置于液压缸中的位移尺数值，实现比例阀对电磁阀的跟踪功能，计算出比例阀控制的液压缸的移动速度，使其与电磁阀控制的液压缸移动速度保持一致。

该系统可以将两个液压缸的位移差值精度控制在2mm内。具体控制过程包括：①由HMI(人机界面)将开口度设定值传至PLC；②PLC对开口度设定值和位移尺当前实际值进行比较后，向电磁阀发出方向“+/-”命令和速度值命令；③电磁阀根据命令来控制节流阀，从而使液压缸1前进或后退；④位移尺将液压缸1的具体位移值传至PLC；⑤PLC对两个位移尺的数值进行比较后，向比例阀发出方向“+/-”命令和速度值命令，而比例阀的速度值收敛于电磁阀速度值；⑥比例阀根据命令来控制节流阀，从而使液压缸2前进或后退；⑦位移尺将液压缸2的具体位移值传至PLC；⑧PLC把当前位移尺实际值传至HMI的同时，再次通过比较开口度设定值和位移尺当前实际值而决定是否循环执行步骤②~⑧。

3 超快速冷却系统的应用

3.1 设备运行情况

H型钢超快速冷却系统自投入运行以来，对该厂几乎所有的规格(H250~800mm, B250~410mm, 翼缘厚度t≤35mm)进行超快速冷却的实验研究和正式生产，产量达到了数十万吨。整个冷却系统运行稳定，经过超快速冷却后，产品冷却均匀，冷却后没有产生严重的、无法矫正的形变。

产品的冷却强度和冷却速度可依据工艺要求通过计算机控制系统进行设定及调整，具有比较完善的冷却自动检测和控制系统，实现了对冷却过程进行自动控制、检测、显示、记录、数据整理

和打印输出。型钢经过超快速冷却后，腹板和翼缘温度差值可以降至30 $^{\circ}\text{C}$ ，而且沿纵向温度趋于均匀，温度波动降低，进而使H型钢断面和纵向温度趋于均匀，产品的组织性能均匀性得到进一步提高。

4)降低翼缘与腹板的温差，减轻H型钢切割开裂问题

H型钢在切割使用时，易出现裂纹，甚至开裂，裂纹起始于腹板与翼缘的交界处。这是由于H型钢内部的轧制应力、热应力、相变应力等较大残余应力在切割部位集中释放导致。这属于滑开型(或称剪切型)裂纹，即：剪切应力平行于裂纹面，裂纹滑开扩展。轧后空冷H型钢残余热应力分布复杂，轧制后轧件断面上纵向残余应力分布不均。腹板部位整体表现为压应力状态，翼缘与腹板连接部位表现为拉应力状态。腹板及翼缘外侧易受残余应力作用，翼缘外侧易受残余应力作用，腹板压应力的存在有时导致腹板屈曲甚至产生波浪缺陷。

解决上述问题的主要方法是减小冷却过程中腹板和翼缘的温差，进而减小轧后纵向残余应力。采用超快速冷却技术合理设计断面不同部位的冷却强度，减小了腹板和翼缘冷却后的温差，从而较好的控制了开裂问题，开裂现象明显减轻。

4 结语

综上所述，在H型钢轧后冷却工艺实验室优化模拟研究的基础上，根据大型H型钢生产线的布置特点，在其万能轧机的出口设计了超快速冷却装置。在控轧后奥氏体向铁素体相变的温度区对H型钢进行大冷却速率的超快冷，使相变组织比单纯轧制更加微细化，最终使H型钢具有良好的组织状态，大幅提高了H型钢的力学性能；同时减少了钢材表面的氧化铁皮生成量。

采用以超快速冷却系统为核心的H型钢新一代TMCP工艺技术可以大大降低对微合金和合金元素的依赖，在材料设计上实现低成本、减量化。这对于节省资源和能源，以及钢铁材料的再循环利用，提高钢铁行业生产效益，实现社会可持续发展，具有重要意义，也推动了我国H型钢生产的发展。

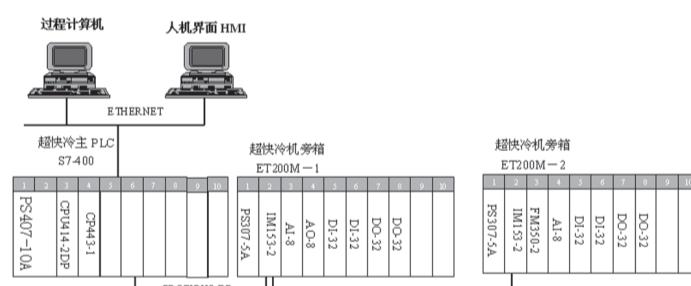


图3 控制系统总图

SIEMENS 西门子新闻传真

www.siemens.com/metals

西门子获得广汉天成不锈钢冷带退火酸洗线订单

西门子冶金技术部获得了来自不锈钢生产商广汉天成不锈钢制品有限公司(TCSS)的一份不锈钢冷带退火酸洗线订单。西门子将为其位于四川省广汉市的工厂提供一条冷带退火酸洗生产线，合同金额达千万欧元。该生产线设计产能为每年24万t不锈钢冷带退火酸洗板带，预计将于2013年年底投产。

作为项目的技术总负责方，西门子冶金技术部将负责整个项目的管理，并对设备的安装和调试进行监督指导。西门子的供货范围包括两辊在线平整机(含工作辊弯辊系统)、辊擦试器、开卷机和卷取机芯、AOD炉的总包合同。

轴等机械设备及清洗段相关部件。此外，整条生产线提供的全集成电气自动化系统还将以西门子专门针对处理线所开发的Siroll PL解决方案为基础进行建设。通过使用该退火酸洗生产线，该厂可生产宽度800~1300mm，厚度0.3~3mm的带钢，设计产能达24万t/a。

广汉天成不锈钢制品有限公司是中国金广集团的子公司之一。金广集团是一家集镍、铬、锰矿勘探和开发，以及高端不锈钢生产于一身的综合型企业。2010年底，西门子从金广集团的另一家子公司云南天高镍业有限公司获得了一份120t AOD炉的总包合同。

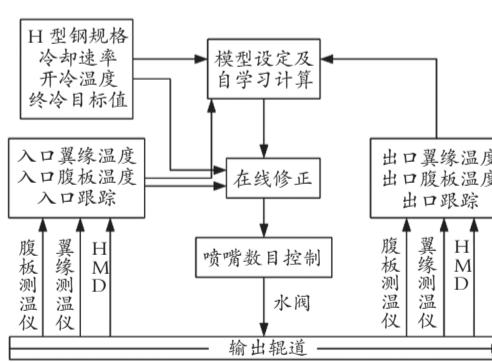


图4 超快速冷却原理图

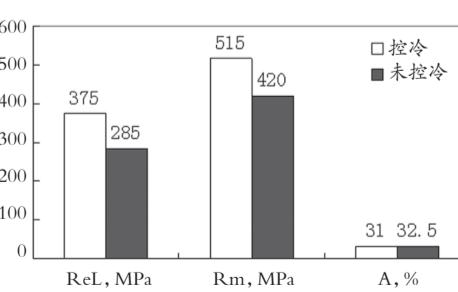


图5 Q235热轧H型钢控冷和未控冷性能比较

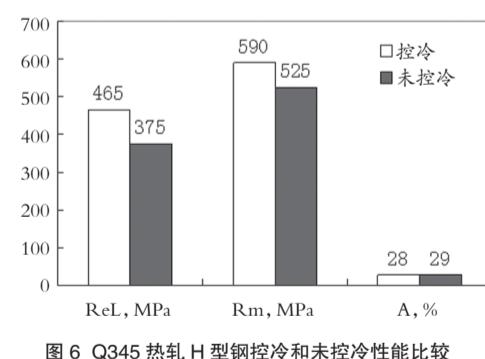


图6 Q345热轧H型钢控冷和未控冷性能比较

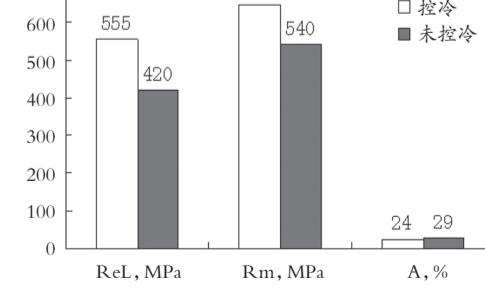


图7 Q345(VN微合金化)热轧H型钢控冷和未控冷性能比较