

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(七)

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。

薄带连铸制备高性能硅钢工艺与装备

1 研究背景

钢铁工业作为我国国民经济的支柱产业近年来得到迅猛发展,我国早已成为全世界最大的钢铁生产国和消费国。但是,我国只是世界钢铁大国而非钢铁强国,日益突出的高能耗、高污染、低效益、资源匮乏和环境负荷重等严峻问题正威胁着钢铁工业产业链的安全。然而摆脱当前困境的唯一出路就是加快实现由“高消耗高品质”生产方式(如过度依赖添加贵重金属元素、生产流程冗长等)向“低消耗高品质”(即资源能源节约型、环境友好型、低成本、高性能)ECO 生产方式的转变。只有大力开发节省能源资源、减少环境污染、增加循环利用、实现环境友好的新一代钢铁生产工艺流程,才能保障我国钢铁工业的可持续发展。其中,发展先进短流程、紧凑化生产工艺和技术是这一转变的重要组成部分,将发挥重要作用。

近终形薄带连铸技术正是适应这种形势的一种短流程、低能耗、投资省、成本低的绿色环保新工艺技术。薄带连铸技术作为当今世界上薄带钢生产的前沿技术,不经厚板坯连铸、加热和热轧等生产工序,由液态钢水直接生产出厚度为 1~5mm 的薄带坯。同传统的薄带生产流程相比,可节约设备投资约 80%,降低生产成本 30%~40%,能源消耗仅为传统热连轧生产流程的 1/8。更重要的是,其独有的亚快速凝固过程在获得钢材某些特殊性能方面具有独特优势,是实现高性能钢材的短流程生产的重要途径。正因如此,国外钢铁企业如纽柯、浦项、新日铁住金等纷纷投入巨资开发薄带钢连铸技术。但是,其研发重点放在了普碳钢、不锈钢等品种上,并且已取得了突破,实现了产业化生产;而针对硅钢薄带连铸的研究才刚刚起步,研究工作还不深入,研究数据严重缺乏,这为我国开展薄带连铸硅钢研究和引领世界硅钢生产技术带来了重要的历史机遇。东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(RAL)一直把双辊薄带连铸技术作为一个前瞻性、储备性和战略性课题进行研究。针对双辊薄带连铸过程

中存在的冶金学基础问题,重点研究了如何发挥薄带连铸亚快速凝固特性和近终形成形过程特点生产一些常规流程无法生产或者生产难度较大的产品,并赋予产品以常规流程无法得到的特殊性能,从而为实现高性能钢铁材料的减量化生产提供重要支撑。前期的研究工作表明,采用薄带连铸生产硅钢这种高投入、高技术、高难度、高消耗、高成本的钢铁“艺术品”具有无可比拟的优势。

硅钢(包括取向硅钢(GO)、无取向硅钢(NGO)及 4.5%~6.5%Si 高硅钢)作为电力、电子和军事工业领域不可缺少的重要软磁材料,主要用于电动机、发电机、变压器的铁芯和各种电讯器材。硅钢生产工艺复杂,制造技术严格,具有高度的保密性和垄断性,同时其制造技术和产品质量是衡量一个国家特殊钢生产和科技发展水平的重要标志之一。我国冷轧硅钢在产能、质量、规格牌号等方面,还远不能满足相关工业领域发展的需求。所面临的主要问题是,低端产品产能过剩、产品利润较低;高端产品如高磁取向硅钢(HiB)的生产难度大,产品合格率低于 75%。我国在硅钢制造领域缺乏自主知识产权的硅钢制造技术、工艺装备及研发能力。近年来,国外又凭借其积累的技术优势和严密的专利覆盖,对我国硅钢发展实施了严格的技术封锁,已经达到无条件拒绝转让硅钢制造新技术的程度。因此,大力加强自主知识产权的高品质硅钢制造技术研究,对于我国钢铁工业的持续发展和国家安全具有重大意义。

从上世纪初期发明取向硅

钢以来,美国、日本等对硅钢进行了大量的研究,随着生产工艺不断改进,性能水平不断提高。但是,基本以传统的厚板坯生产流程为主。近年来,随着薄板坯连铸连轧技术的发展,又出现了薄板坯生产流程,但薄板坯流程本质上与厚板坯流程差别不大。传统硅钢生产流程分为热轧和冷轧—热处理两个大的阶段。其中,热轧阶段是对热轧后的晶粒尺寸、析出物尺寸、分布、数量以及织构分布和强度进行精细化控制,为后续冷轧—热处理做组织、织构方面的准备。热轧过程对硅钢生产的质量、产量、效率和稳定性具有决定性的影响,冷轧产品的质量、成材率均与热轧带钢质量密切相关。在传统的厚板坯连铸生产流程中,使用厚度 230~250mm 的板坯,经过 9~10 道次的热轧过程,轧制成 2~3mm 厚的热轧带,总压缩比高达 100,不仅流程冗长,能耗高,而且影响参数众多,生产稳定性差,组织控制难度很大,成材率很低。对于硅钢生产这种组织控制非常精细的材料而言,复杂、冗长的常规流程甚至会带来一些致命性的、无法补救的组织 and 织构缺陷,极大地损害硅钢的性能。

2 薄带连铸生产高性能硅钢的研究进展

在国家自然科学基金重点项目及 973 课题等的支持下,RAL 系统研究了硅钢、铁素体不锈钢、高 P/Cu 超耐候钢、高 N 不锈钢、TWIP 钢、高速钢、镁合金等薄带连铸的凝固组织特点及材料性能。通过这些研究发现,与传统厚板坯热轧流程相比,除了流程紧凑、工序缩短、节能降耗等短流程优势外,薄带连铸的亚快速冷却

过程在微观组织和织构控制上也具有独特优越性,将薄带连铸技术应用于硅钢生产具有无可比拟的优势:

1) 双辊薄带连铸凝固组织和织构的可控性。在研究体心立方结构的金属材料(铁素体不锈钢和硅钢均为此种结构)时发现,通过控制凝固的工艺条件可以获得不同的结晶组织,凝固组织具有极强的控制柔性。利用这一特点,可以依据 NGO 和 GO 的织构控制要求,控制浇铸工艺,得到想要的初始凝固组织和织构,有利于提高材料的磁性能。

2) 双辊薄带连铸直接由钢水凝固制备带坯,采用固有抑制剂法生产取向硅钢时无需高温加热,避免了常规流程高温加热的瓶颈问题,更不需要后期渗氮处理。

3) 薄带连铸为亚快速凝固过程,冷却速度高达 $10^3\text{ }^\circ\text{C/s}$ 以上,通过铸后冷却过程与后续的常化工艺配合,可以灵活控制材料的晶粒尺寸和析出物尺寸,对于增强硅钢有利织构、提高材料的磁性能具有重要意义。

4) 取消了传统流程大压缩比热轧过程,抑制了 NGO 硅钢有害的析出物和不利析出物的产生,避免了 GO 硅钢中 AlN 的过早析出粗化现象,可以在单道次热轧甚至无热轧条件下生成位向准确和数量足够的高斯晶核。

5) 薄带连铸提供了获得薄规格铸坯的可能性。通过减薄铸带厚度和优化组织织构控制,可以提高 NGO 硅钢中有利织构的比例,保证成品 GO 硅钢中抑制剂及高斯晶核数量、密度和均匀性,有望开发(超)薄规格硅钢,极大地降低

铁损,进一步提高磁性能。

综上所述,可以看出采用薄带连铸生产硅钢是一个极具潜力的发展方向。在认真分析目前国际上最先进硅钢生产技术的成分设计、组织与织构控制原理以及存在的工艺技术难题的基础上,结合薄带连铸亚快速凝固、短流程的特征优势,RAL 从 2008 年开始,以国家自然科学基金钢铁研究联合基金重点项目为依托,开展了基于双辊薄带连铸的硅钢制造理论研究和形成了系统的工艺和装备技术,旨在突破目前国际上现有硅钢生产流程的限制,彻底解决其存在的问题,开发出易控制、高效率、低成本、低消耗的绿色化短流程生产技术,提供高性能、绿色化的硅钢产品,为硅钢生产开辟一条由中国领跑的特色化、绿色化创新发展道路,为我国在硅钢制造领域跻身国际前沿作出贡献。围绕薄带连铸高品质硅钢成套制造工艺与装备技术的各类关键问题,本方向将深入而系统地开展研究及开发,尽快形成具有我国自主知识产权的新一代硅钢先进制造技术,既符合我国科技发展的“节能、高效、促进循环经济发展”的总体战略目标,又能在国际硅钢制造先进技术研发领域占领高点。

目前,RAL 正与我国钢铁企业密切合作开展薄带连铸 GO、NGO、高硅钢产业化技术研究。通过在实验室条件下系统开展薄带连铸硅钢“化学成分—工艺—组织性能”演变及控制技术研究,开发出薄带连铸关键单体设备和核心控制系统,形成了具有我国自主知识产权的薄带连铸高品质硅钢成套工艺与装备技术,为在国际上率先实现薄带连铸硅钢的工业化生产提供了重要支撑。已取得的主要研究成果包括:

1) 解决了制约薄带连铸产业化发展的一些瓶颈问题,如研发出新型低成本—长寿命—高换热效率铸辊、低成本—长寿命侧封板材料等。完成了关键装备的研制和控制系统开发,实现了自主集成创新,具备了提供薄带连铸工业化产线成套装备设计及系统技

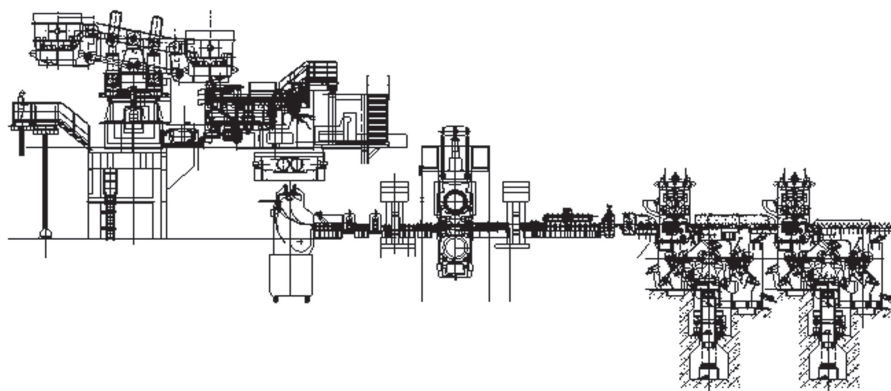


图 1 工业化薄带铸轧产线设计

上接 B04 版

术的能力。工业化薄带连铸生产线设计如图1所示。

2) 形成了薄带连铸高性能无取向硅钢的全流程系统工艺技术,成功制备出高磁感、高牌号无取向硅钢原型产品,磁感指标 B_{50} 优于国内外现有产品0.03T以上。提供了一条无需加热、无需常化处理、无需两步冷轧和中间退火的短流程、低难度、低成本制造高效无取向硅钢的全新工艺流程,为无取向硅钢薄带连铸产业化生产提供了技术原型。

3) 形成了薄带连铸高性能取向硅钢的全流程系统工艺技术,成功制备出0.27mm厚的普通取向硅钢,磁感指标 B_8 达到1.85T,与国内外现有普通取向硅钢(CGO)产品相当;成功制备出0.23mm厚的高磁感取向硅钢, B_8 达到1.94T,优于国内外现有HiB产品。提供了一条无需高温加热、无需渗氮处理的短流程、低难度、低成本制造取向硅钢的全新工艺流程,为取向硅钢薄带连铸产业化生产提供了技术原型。

4) 形成了基于超低碳成分设计制造取向硅钢的全流程系统工艺技术,成功制备出0.18~0.27mm厚的高磁感取向硅钢, B_8 达到1.94T,优于国内外现有HiB产品。提供了一条无需高温加热、无需脱碳、无需渗氮处理的短流程、低难度、低成本制造取向硅钢的全新工艺流程,为取向硅钢薄带连铸产业化生产提供了技术原型。

5) 形成了基于超低碳成分设计制造高硅取向硅钢的全流程系统工艺技术,成功制备出0.18~0.23mm厚的4.5%Si、6.5%Si取向硅钢, B_8 分别达到1.78T和1.74T,显著优于国外产品。提供了一条利用温轧、冷轧技术,无需高温加热、无需脱碳、无需渗氮处理的短流程、低难度、低成本制造4.5%Si、6.5%Si取向硅钢的全新工艺流程,为高硅取向硅钢薄带连铸产业化生产提供了技术原型。

3 拟开发的关键技术

1) 薄带连铸条件下硅钢的组织性能控制理论及全流程工艺技术

◆亚快速凝固条件下硅钢带坯初始凝固组织、织构控制理论及方法;

◆薄带连铸NGO钢的组织性能优化控制理论与全流程工艺技术;

◆薄带连铸GO钢的抑制剂控制理论与全流程工艺技术;

◆薄带连铸4.5%~6.5%Si高硅钢的晶体塑性控制理论与全流程工艺技术等。

2) 薄带连铸关键设备开发、产线设计与单体技术

◆铸轧机设计与装备开

发;

◆长寿命铸辊设计原理与制备技术;

◆长寿命侧封板材质开发与制备技术;

◆熔池液面控制原理与技术开发;

◆全线自动化控制系统及模型开发等。

3) 全流程薄带钢的厚度、板形与表面质量等控制技术

◆薄带坯厚度控制原理与关键技术;

◆薄带坯板凸度控制原理与关键技术;

◆在线热轧板形控制原理与关键技术;

◆全流程薄带温度均匀性控制关键技术;

◆全流程薄带表面氧化铁皮控制技术。

4 拟解决的关键问题

1) 低成本、高效率、长寿命、高可靠度薄带连铸设备研制(结晶辊、布流包、侧封板、浇铸水口等);

2) 高精度、高可靠度控制系统开发(熔池液面检测及控制、铸轧力检测及控制、带坯厚度检测及控制系统等);

3) 双辊薄带连铸亚快速凝固条件下硅钢(包括GO、NGO、6.5%Si钢)带坯初始凝固组织与织构的形成、演变原理及调控方法;

4) 双辊薄带连铸全流程条件下NGO硅钢组织、织构演变特征、遗传行为及组织性能优化调控理论;

5) 双辊薄带连铸全流程条件下GO硅钢的抑制剂设计及其演变行为与调控原理,高斯织构的演变行为及调控原理及调控方法;

6) 双辊薄带连铸全流程条件下4.5%~6.5%Si钢的组织演变、有序一无序转变行为及调控方法,以及晶体塑性的系统控制原理及方法;

7) 双辊薄带连铸条件下各钢种的制造路线及全流程系统工艺技术。

5 拟采用的研究技术路线

坚持实验室装备研制与工艺开发为工业产线设计、中试/产业化生产服务的方针,贯彻“产学研”相结合的基本原则。在实验室条件下开展硅钢薄带连铸关键单体设备的设计、研制、制造以及共性技术开发,建设薄带连铸硅钢综合实验研究平台,实现单体装备与技术的系统集成和再开发。针对工业化薄带连铸硅钢生产流程,完成取向硅钢、无取向硅钢、4.5%~6.5%Si高硅钢组织性能控制为核心的制造流程和关键工艺的优化设计,形成新一代短流程、低难度、低成本、高效率、环境友好的硅钢创新制造理论及系统原型工艺技术。从而具备薄带连铸硅钢成套创新装备、技术和工艺研发能力,

引领世界薄带连铸技术和硅钢生产技术的发展。

6 实施方案

6.1 薄带连铸工艺原理与关键单体技术研发

1) 通过采取优化内部冷却路径、优化辊套厚度、选择适合的辊套材质及表面处理等措施,提高铸辊的冷却强度及冷却均匀性,降低铸辊工作温度,减轻铸辊的热疲劳,提高铸辊的耐磨性能,从而实现铸辊长寿命化。

2) 对铸轧过程中铸辊温度场和热凸度变化进行有限元模拟计算。通过模拟分析,得出不同冷却水路设计方案对铸辊温度场及热凸度的影响规律,为铸辊设计及优化提供数据支持。模拟分析各工艺参数如浇铸温度、铸轧速度等对铸辊温度场和热凸度的影响规律,为铸轧过程控制提供指导。

3) 优化侧封装置的结构设计,使侧封板的受力较小而且均匀;同时开发耐高温钢水的侵蚀、低的热损失和热膨胀系数、强度高的侧封板用材料或采用表面涂层等技术措施,提高侧封板使用性能。

4) 通过对铸辊熔池内液态钢水三维流热耦合数值模拟,研究不同水口结构参数情况下,熔池内钢水的流动和温度分布规律,选择最佳的水口设计结构参数,提高铸带组织和横向温度分布的均匀性,据此设计出适应不同品种薄带铸轧的水口,实现水口结构的优化设计。

5) 根据硅钢不同抑制剂析出行为确定温度控制方式,包括保温和气雾冷却控制。轧后冷却控制,根据硅钢性能要求,实现多阶段快速冷却,实现铸轧薄带坯的组织性能的柔性控制。

6) 薄带连铸过程的液面控制系统开发,建立熔池液位预测模型,配合CCD检测装置对液面进行检测,实现熔池内钢水液面的闭环控制。

7) 铸轧过程控制系统开发,建立数据采集与处理、铸辊及熔池的温度监控、设定值计算、生产数据存储等功能。在系统开发过程中,重点解决以下关键问题:开浇阶段及稳定浇铸阶段控制策略、铸轧辊温度场及热凸度在线计算模型、熔池凝固终点在线计算模型、铸轧分离力计算模型等。

6.2 薄带连铸高品质硅钢成套工艺开发

1) 在实验室条件下开展

GO硅钢、NGO硅钢、6.5%Si钢薄带连铸、轧制及热处理实验;

2) 以NGO硅钢为研究对象,研究薄带坯初始组织、织构的形成演变规律及调控原理和方法;

3) 以NGO钢为研究对象,研究薄带坯的初始组织、织构类型对后续组织、织构演变及磁性能的遗传影响规律及机理;

4) 以NGO钢为研究对象,系统研究工艺技术路线及关键工艺对组织、织构演变以及磁性能的影响,并研究组织性能的优化调控原理及方法;

5) 以6.5%Si高硅钢为研究对象,对组织、织构演变行为、有序一无序转变行为进行深入研究,研究晶体塑性和组织性能的优化控制原理和方法;

6) 对薄带连铸条件下普通取向硅钢(CGO)的组织、织构及抑制剂演变行为进行深入研究,并研究系统的调控原理和方法;

7) 对薄带连铸条件下HiB硅钢的组织、织构及抑制剂演变行为进行系统研究,并研究相应的调控原理和方法;

8) 采用超低碳成分设计,对薄带连铸条件下CGO硅钢、HiB硅钢的组织、织构及抑制剂演变行为进行系统研究,并形成相应的调控原理和方法。

7 研究计划

◆2014年:薄带连铸关键设备研制及关键单体技术开发,包括:低成本、高导热效率、长寿命、铸轧辊设计开发;长寿命侧封板技术研究;布流水口结构优化设计;铸轧过程保护浇铸设计;在线热轧机设计等。

◆2015年:薄带连铸全线控制系统设计开发,具体包括:熔池内钢水液面检测及控制系统;铸轧力检测与控制系统;薄带铸轧过程计算机控制系统、厚度控制及板形控制系统等、带坯表面质量控制系统等。

◆2016年:适合薄带铸轧流程的高性能硅钢(包括无取向硅钢、普通取向硅钢、高磁感取向硅钢、6.5%Si高硅钢)化学成分体系、工艺路线设计及优化,包括:典型低、中、高牌号无取向硅钢(NGO)主要成分设计及工艺路线设计;CGO硅钢抑制剂设计及工艺路线;HiB硅钢抑制剂设计及工艺路线设计;6.5%Si高硅钢的合金

化设计及工艺路线设计等。

◆2017年:在实验室条件下开展各硅钢品种的薄带连铸、轧制、热处理等实验研究,阐明双辊薄带连铸亚快速凝固条件下硅钢(包括CGO硅钢、NGO硅钢、6.5%Si钢)带坯初始凝固组织与织构的形成、演变原理及调控方法;揭示双辊薄带连铸全流程条件下NGO硅钢组织、织构演变特征、遗传行为及组织性能优化调控理论并提出调控方法;揭示双辊薄带连铸全流程条件下CGO硅钢的抑制剂设计及其演变行为与调控原理,高斯织构的演变行为及调控理论及方法;揭示双辊薄带连铸全流程条件下4.5%~6.5%Si钢的组织演变、有序一无序转变行为及调控方法,以及晶体塑性的系统控制原理。

◆2018年:实现薄带连铸关键单体设备或技术的集成和再创新,形成工业化产线的全线装备和控制系统原型;建立完善的基于薄带连铸的高品质硅钢制造理论,形成薄带连铸高品质硅钢全流程原型工艺技术,制备出系列高性能原型钢。

8 预期效果

1) 彻底解决诸如低成本—长寿命—高换热效率铸辊的材料研发及结构优化设计、浇铸水口的材料设计与结构优化设计、低成本—长寿命侧封板材料开发、浇铸保护系统设计等长期困扰薄带连铸产业化的瓶颈,实现硅钢薄带连铸关键装备的研制和控制系统的开发,全面实现自主集成创新,替代甚至超越国外进口装备及技术,具备硅钢薄带连铸创新装备和技术的研发能力,具备提供薄带连铸硅钢工业化产线成套装备设计及系统技术的能力。

2) 建成完备的薄带连铸硅钢全流程工艺技术综合实验研究平台,不但满足开展薄带连铸硅钢研究的苛刻要求和迫切需求,而且提供完备的柔性化实验平台,为硅钢的工业化产线建设及装备研制提供设计原型和试验平台。

3) 形成新一代高品质硅钢短流程、低难度、低成本、高效率、环境友好的创新制造理论及具有我国自主知识产权的系统原型工艺技术,具备硅钢薄带连铸创新技术、工艺研发能力,具备引领世界薄带连铸技术和硅钢生产技术的发展的能力。



東北大學
Northeastern University



RAL