

编者按: 2020 年是“十三五”的收官之年,2021 年则是“十四五”的开局之年,我国将开启全面建设社会主义现代化国家新征程、向第二个百年奋斗目标进军。在历史交汇点上,编辑部特别邀请知名轧钢专家、《钢铁》杂志副主编——北京科技大学康永林教授,对“十三五”期间中国轧钢技术的发展进步情况和代表性科技成果进行介绍和总结,并对“十四五”及今后轧钢技术的发展趋势做展望。在立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局的“十四五”时期,钢铁行业也将面临新机遇、新挑战,推动高质量发展任重道远。望广大冶金工作者不忘初心、砥砺前行,迎难而上、接续奋斗,以“十三五”成果为基石,铸就新的辉煌!

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20210324

“十三五”中国轧钢技术进步及展望

康永林

(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在国家“十三五”规划推动下,中国轧钢技术得到快速发展进步、成就显著,呈现一大批高水平科技成果,大数据、互联网、数字化与智能化等现代科技为高质量、高性能钢材研发生产和科技创新提供了先进高效的手段,钢材产量从 2016 年 10.48 亿 t 增加到 2020 年 13.25 亿 t,高性能钢材自给率超过 98.5%,为国家经济发展建设提供了关键基础材料支撑。仅就“十三五”期间中国轧钢技术的发展进步情况和代表性科技成果作简要介绍分析,重点介绍了中国轧钢产品生产总体情况和轧钢技术取得的代表性科技成果,并从轧制工艺基础与组织调控,绿色化轧制,数字化与智能化轧制,高强度、高性能热轧产品开发及先进热轧技术,高性能、高强度、高精度冷轧产品及先进冷轧技术等方面对代表性科技成果的关键技术点及应用情况做了简要介绍,最后,对未来轧钢技术的发展做了展望。

关键词: “十三五”规划; 轧钢; 绿色化; 数字化与智能化; 高质量

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2021)10-0001-15

China steel rolling technology progress in the 13th five-year plan and prospection

KANG Yong-lin

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Under the promotion of the 13th five-year plan, the steel rolling technology of China has made rapid progress and remarkable achievements, presenting a large number of high-level achievements in science and technology. Modern technologies, such as big data, Internet, digitization and intellectualization, provide advanced and efficient means for research and development, production, scientific and technological innovation of high quality and performance steel. The steel output has increased from 1.048 billion tons in 2016 to 13.25 billion tons in 2020, with the self-sufficiency rate of high performance steel exceeding 98.5%, which provides the key basic material support for the national economic development and construction. The development and progress of China's steel rolling technology and the representative scientific and technological achievements during the 13th five-year plan period were briefly introduced and analyzed, focusing on the overall production situation of China's steel rolling products and the representative scientific and technological achievements of steel rolling technology. The key technologies and application of representative scientific and technological achievements are briefly introduced from the aspects of rolling process basis and microstructure controlling, greening rolling, digital and intelligent rolling, development of high strength and performance hot rolling products and advanced hot rolling technology, high performance, high strength, high precision cold rolling products and advanced cold rolling technology. Finally, the future development of steel rolling technology is prospected.

Key words: the 13th five-year plan; steel rolling; greening; digitalization and intellectualization; high quality

“十三五”是中国经济、科技发展的重要时期,在 交通运输、铁路与桥梁工程、能源工程、机械装备、建

筑工程等行业快速发展需求的强力推动下,以钢铁为代表的基础原材料工业得到迅速发展,信息通信、大数据、互联网、数字化与智能化等现代科技为高质量、高性能钢材研发生产和科技创新提供了重要技术基础和先进手段。与此同时,环境保护、节能减排、可循环、绿色化制造,以及降低成本、节约资源成为钢铁产品制造技术发展的必由之路。

“十三五”期间,中国轧制钢材无论从产量、品种到质量性能,从装备控制到工艺技术,从科技研发到技术创新,均取得了显著成就。2020 年,中国板、管、型、棒线材产品产量达到 13.25 亿 t,超过全球钢材产量 50%,高性能钢材自给率超过 98.5%,为国家经济发展建设提供了关键基础材料支撑^[1-6]。下面,仅就“十三五”期间中国轧钢技术的发展进步情况和代表性科技成果做概括性分析介绍,并对未来发展做一展望。

1 “十三五”期间中国轧钢产品生产总体情况

1.1 钢材总产量发展变化情况

图 1 所示为 2015—2020 年中国钢材总产量发展变化情况。2016 年各类钢材总产量 10.48 亿 t,比 2015 年增长 1.3%，“十三五”期间总体持续增长,2020 年钢材总产量达到 13.25 亿 t,比上一年增长 9.96%^[1-4]。

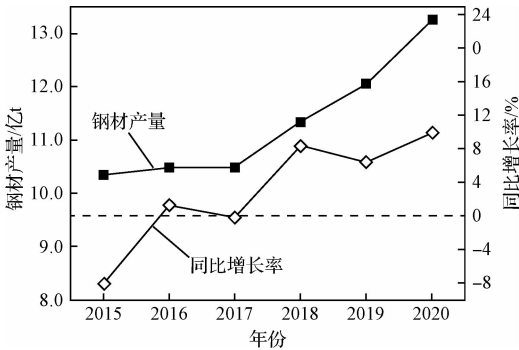


图 1 2015—2020 年中国钢材总产量变化情况
Fig. 1 Output of China steel products in 2015—2020

1.2 板带材产量发展变化情况

图 2 所示为 2015—2020 年中国板带材(中厚板+热轧+冷轧板)产量发展变化情况。2016 年各类板带材产量 5.02 亿 t,比 2015 年增长 2.76%,2017 年产量下降至 4.8 亿 t 后,2018—2020 年迅速增长,2019 年板带材产量达到 5.45 亿 t,比上一年增长 3.64%^[1-4],2020 年产量约为 5.68 亿 t。

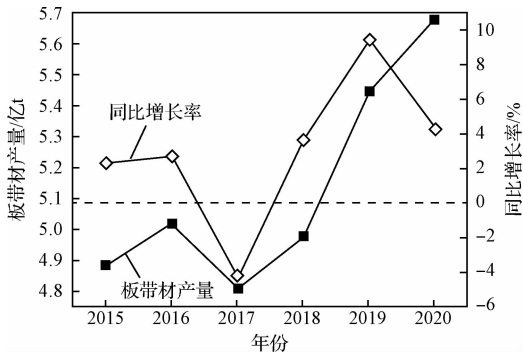


图 2 2015—2020 年中国板带材产量变化情况
Fig. 2 Output of China steel plate and strip products in 2015—2020

1.3 长材产量发展变化情况

图 3 所示为 2015—2020 年中国长材(型材+棒线材)产量发展变化情况。2016 年各类长材产量为 4.57 亿 t,比 2015 年下降 8.27%,2017 年产量下降至 4.19 亿 t 后,2018—2020 年期间迅速增长,2019 年产量达到 5.56 亿 t,比上一年增长 8.75%^[1-4]。2020 年产量约为 6.03 亿 t。

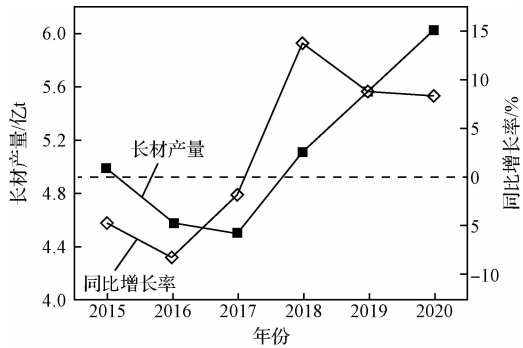


图 3 2015—2020 年中国长材产量变化情况
Fig. 3 Output of China steel long products in 2015—2020

1.4 无缝钢管产量发展变化情况

图 4 所示为 2015—2020 年中国无缝钢管产量发展变化情况。与 2015 年比较,2016—2017 年产量下降明显,从 2 858 万 t 下降至 2 107 万 t,2018—2020 年期间迅速增长,2019 年产量达到 2 798.4 万 t,比上一年增长 12.71%^[1-4]。2020 年产量约为 2 788 万 t。

2 “十三五”期间中国轧钢技术取得的代表性科技成果情况

“十三五”期间中国钢材产量持续增长。与此同时,产品结构不断优化,质量及性能不断提高,满足

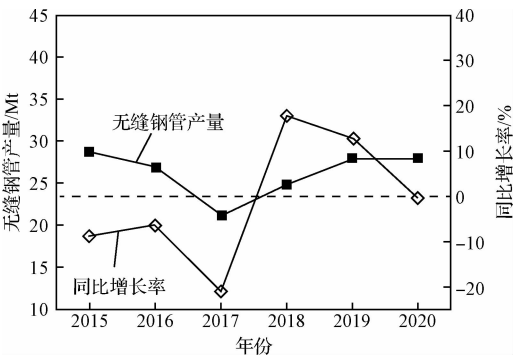


图 4 2015—2020 年中国无缝钢管产量变化情况

Fig. 4 Output of China seamless steel tube in 2015—2020

国家经济建设需求的高质量、高强度、高性能钢材新品种不断研发应用,这与轧钢技术的持续进步密不可分。“十三五”期间中国轧钢技术领域相关的国家科学技术奖及中国钢铁工业协会、中国金属学会冶金科学技术奖特等奖和一等奖的获奖项目情况,这些获奖项目基本可以代表“十三五”期间中国轧钢技术领域取得的科技进步情况详见表 1。

下面将从轧制工艺基础与组织调控技术、绿色化轧制生产工艺技术、数字化、智能化轧制技术、高强度、高性能钢材热轧及冷轧技术等方面分别对“十三五”期间中国轧钢技术的发展进步情况作简单

表 1 2016—2020 年中国轧钢技术相关的国家科技奖及冶金科技奖特等奖/一等奖项目

Table 1 Country and metallurgy science and technology award in relation to steel rolling in 2016—2020

年份	项目名称	主要完成人	主要完成单位	奖励名称	等级
2017	超细贝氏体钢制造关键技术及应用	张福成,杨志南,吕博,等	燕山大学,中铁山桥集团有限公司,等	国家技术发明奖	二等
2017	热轧板带钢新一代控轧控冷技术及应用	王昭东,刘振宇,袁国,等	东北大学,鞍钢股份有限公司,等	国家科技进步奖	二等
2018	基于 M ³ 组织调控的钢铁材料基础理论与高性能钢技术	董瀚,翁宇庆,曹文全,等	钢铁研究总院,北京科技大学	国家技术发明奖	二等
2018	超大型水电站用金属结构关键材料成套技术开发应用	周德光,张熹,邹扬,等	首钢集团公司,秦皇岛首秦金属材料有限公司,等	国家科技进步奖	二等
2020	宽幅超薄不锈钢精密带钢关键工艺技术及系列产品开发	王天翔,高祥明,李建民,等	太原钢铁(集团)有限公司,太原理工大学,等	国家科技进步奖	一等
2020	特高压高效输电变电装备用超低损耗取向硅钢开发与应用	储双杰,李国保,沙玉辉,等	宝山钢铁股份有限公司,东北大学,等	国家科技进步奖	二等
2020	钢材热轧过程氧化行为控制技术开发及应用	刘振宇,曹光明,齐建军,等	东北大学,鞍钢股份有限公司,等	国家科技进步奖	二等
2016	薄带连铸连轧工艺、装备与控制工程化技术集成及产品开发	方圆,于艳,张健,等	宝钢集团有限公司	冶金科学技术奖	特等
2016	冷轧硅钢边部减薄控制核心技术开发与工业应用	刘军,王义东,金文旭,等	鞍钢股份有限公司,一重集团大连设计研究院,等	冶金科学技术奖	一等
2016	高质量钢轨及复杂断面型钢轧制数字化技术开发及应用	康永林,陶功明,朱国明,等	北京科技大学,攀钢集团攀枝花钢铁有限公司,等	冶金科学技术奖	一等
2017	基于 M ³ 组织调控的钢铁材料基础理论与高性能钢技术	董瀚,翁宇庆,曹文全,等	钢铁研究总院,北京科技大学,等	冶金科学技术奖	一等
2017	超纯净高稳定性轴承钢关键技术创新与智能平台建设	钱刚,董瀚,阮小江,等	江阴兴澄特种钢铁有限公司,钢铁研究总院	冶金科学技术奖	一等
2017	高寒地区结构用热轧 H 型钢关键制造技术研究与应用	张建,吴保桥,张卫彬,等	马钢(集团)控股有限公司,马鞍山钢铁股份有限公司,等	冶金科学技术奖	一等
2017	薄板坯连铸连轧生产电工钢(取向及无取向)技术开发及应用	骆中汉,仇圣桃,陈圣林,等	武汉钢铁有限公司,钢铁研究总院	冶金科学技术奖	一等
2017	高品质系列低合金耐磨钢板研制开发与工业化应用	王昭东,陈林恒,邓想涛,等	南京钢铁股份有限公司,东北大学	冶金科学技术奖	一等
2018	汽车轻量化用吉帕级钢板稳定制造技术与应用	王利,朱晓东,褚双杰,等	宝山钢铁股份有限公司	冶金科学技术奖	特等
2018	不锈钢冷轧带钢全连续生产线技术集成与创新	高建兵,武志平,李旭初,等	太原钢铁(集团)有限公司,山西太钢不锈钢股份有限公司,等	冶金科学技术奖	一等
2018	高品质双相不锈钢系列板材关键制备技术开发及应用	李国平,宋志刚,李花兵,等	山西太钢不锈钢股份有限公司,钢铁研究总院,等	冶金科学技术奖	一等
2018	马钢高速车轮制造技术创新	苏世怀,江波,李翔,等	马钢(集团)控股有限公司,中国铁道科学研究院,等	冶金科学技术奖	一等

续表 1

年份	项目名称	主要完成人	主要完成单位	奖励名称	等级
2018	冷轧机颤振智能监控与抑制提速技术及应用	王康健,李山青, 闫晓强,等	宝山钢铁股份有限公司,北京科技大学,等	冶金科学技术奖	一等
2018	极薄一次冷轧高硅硅钢制造技术及装备开发与应用	宿德军,朱华群, 刘宝军,等	宝山钢铁股份有限公司	冶金科学技术奖	一等
2018	大口径高性能不锈钢无缝管冷轧生产技术与成套装备的研发及应用	沈卫强,石钢,杨力,等	江苏武进不锈钢股份有限公司, 太原重工股份有限公司,等	冶金科学技术奖	一等
2019	宽幅超薄精密不锈钢带钢工艺技术及系列产品开发	王天翔,李俊,廖席,等	太原钢铁(集团)有限公司,山西太钢不锈钢精密带钢有限公司,等	冶金科学技术奖	特等
2019	热轧板带材表面氧化机理研究与新一代控制技术开发及应用	刘振宇,齐建军, 曹光明,等	东北大学,河钢集团有限公司,等	冶金科学技术奖	一等
2019	高效环保变压器用高性能取向硅钢制备技术	龚坚,马家骥,司良英,等	北京首钢股份有限公司,钢铁研究总院,等	冶金科学技术奖	一等
2020	热连轧超高强钢产业化关键技术研究与应用	李自刚,黄夏兰, 孟文旺,等	宝山钢铁股份有限公司	冶金科学技术奖	一等
2020	长型材绿色化制备关键技术开发及应用	冯光宏,张兴中, 张宏亮,等	钢铁研究总院,中冶华天工程技术有限公司,等	冶金科学技术奖	一等
2020	高鲜映性免中涂汽车外板制造关键技术及装备	朱国森,蒋光锐, 马家骥,等	首钢集团有限公司,北京首钢股份有限公司,等	冶金科学技术奖	一等
2020	最高强度与特厚规格热冲压钢研制及其系列化开发	刘宏亮,易红亮,黄健,等	本钢集团有限公司,东北大学	冶金科学技术奖	一等
2020	超薄宽幅高品质冷轧板带工业化生产关键技术开发	白振华,李秀军, 李建中,等	燕山大学,宝山钢铁股份有限公司,等	冶金科学技术奖	一等
2020	基于深度学习的热轧带钢表面在线检测与质量评级	徐科,张建恒,周鹏,等	北京科技大学,山西太钢不锈钢股份有限公司,等	冶金科学技术奖	一等
2020	高端装备用双相不锈钢无缝钢管系列关键工艺技术开发及工程应用	宋志刚,高虹,李国平,等	钢铁研究总院,江苏武进不锈钢股份有限公司,等	冶金科学技术奖	一等
2020	高品质抗湿硫化氢腐蚀压力容器用钢板制造技术及应用	刘海宽,许晓红,白云,等	江阴兴澄特种钢铁有限公司,兰州兰石重型装备股份有限公司	冶金科学技术奖	一等
2020	面向多品规高精度轧制的 CSP 过程控制系统关键技术	何安瑞,丁毅,荆丰伟,等	北京科技大学,马钢(集团)控股有限公司,等	冶金科学技术奖	一等
2020	柔性化 45 m/s 高速棒材关键技术与装备的开发及应用	王京瑶,王任全, 李新林,等	中冶京诚工程技术有限公司,北京京诚瑞信长材工程技术有限公司,等	冶金科学技术奖	一等

介绍。

3 轧制工艺基础与组织调控技术

3.1 轧制塑性变形理论与数值模拟分析

3.1.1 全轧程三维热力耦合数值模拟分析优化,多场、多尺度模拟计算分析

在轧制过程三维变形分析和组织性能分析理论及模型方面,包括板带轧制、型钢轧制、钢管穿孔及轧制变形分析,形成了对全轧程进行三维热力耦合数值模拟分析优化和多场、多尺度模拟计算分析,对轧制工艺及产品组织性能、尺寸形状控制发挥了重要作用。

3.1.2 高强钢轧材中的残余应力预测分析

在全轧程热力耦合计算的基础上,对大型 H 型钢冷却后的残余应力场进行数字化预测分析,得到

轧后 H 型钢内部残余应力分布,为 H 型钢控制轧制与控制冷却提供理论基础;利用三维热力耦合有限元方法模拟钢轨冷却的全过程,得到不同冷却时间的温度和残余应力分布,预测钢轨的弯曲变形,为钢轨的预弯提供了可靠的依据;建立了中厚板在矫直过程中横向残余应力计算的解析模型并进行了数值求解。

3.1.3 热轧、冷轧板形分析与控制理论

国内学者建立的板形解析理论,可以实现计算机动态设定轧制规程;建立了轧件和轧辊一体化仿真模型,通过现场实际验证了模型的准确性,为在线计算出口辊缝提供了依据;在退火平整板形分析上,建立了 VC 辊系静力学仿真模型,研究了弯辊力、VC 辊油压、辊径和辊套厚度对连续退火平整机板形控制能力的影响;采用自适应的模糊神经网络控制、专家系统最优控制等取得了良好的控制效果;将

影响冷轧板形的轧制工艺、轧机设备和轧件材料 3 方面因素有机联系起来,以准确地进行冷连轧机板形预报与板形在线预设定及控制^[7-10]。

3.2 基于 M^3 组织调控的钢铁材料基础理论与高性能钢技术

针对汽车、建筑、管线、桥梁、船舶等领域用钢的高安全性要求,钢研总院等开展高性能钢组织调控理论和技术基础研究。提出“多相(Multiphase)、亚稳(Metastable)和多尺度(Multiscale)”相结合的 M^3 组织调控理论,系统研究了生产流程中的相关现象、规律和机理,形成第三代汽车钢和第三代低合金钢的原型钢技术^[11]。提出中锰钢通过逆相变获得超细晶铁素体+奥氏体的目标组织、利用马氏体相变不均匀性控制残留奥氏体量、TWIP+TRIP 叠加效应提升强塑积等多个创新理论与技术,开发了第三代汽车钢。在抗拉强度为 600~1 500 MPa 级别时,强塑积不小于 30 GPa·%,不仅提高了高强度钢的冲压成形性能,还提高了车辆的碰撞安全性。通过奥氏体状态调控,获得多相基体组织及析出相状态。通过在线回火多相组织调控与析出相的协同析出开发了低屈强比、高均匀延伸的屈服强度 700 MPa 级及以上的第三代低合金钢板卷,断后伸长率不小于 25%,屈强比不大于 0.8,为低屈强比高塑性钢生产提供了理论与技术基础。工业规模生产中板的屈服强度在 900 MPa 级时,-40℃ V 型缺口冲击值不小于 200 J。

3.3 新一代控轧控冷理论与技术

新一代控轧控冷技术是通过采用适当控轧+超快速冷却+后续冷却路径控制来实现资源节约、节能减排的钢铁产品制造过程。东北大学等联合国内多家钢铁企业近年在新一代控轧控冷技术的工艺原理、装备与控制方面做了大量工作,通过工艺理论创新带动装备创新^[12-13]。在系统研究并阐明超快冷条件下热轧钢铁材料组织演变规律及强韧化机理的基础上,开发出热轧中厚板、带钢超快冷成套技术装备和高性能射流喷嘴、高密快冷喷嘴及喷嘴配置技术;开发出热轧板带钢材具备超快速冷却能力的可实现无极调速的多功能冷却装置(ADCOS-HM, PM)及自动控制系统;基于所配置的超快速冷却系统,开发出 UFC-F、UFC-B、UFC-M 等灵活的冷却路径控制工艺,实现节约型高钢级管线钢、低合金普碳钢、高强工程机械用钢、热轧双相钢及减碳洗钢等热轧产品的批量化生产,主要合金元素降低 20%~30%,成本大幅度降低。已推广应用于中国钢铁企

业 30 余条中厚板、热连轧及型钢生产线,在低成本高性能热轧钢铁材料开发方面取得显著成效。

3.4 薄板坯连铸连轧钢中纳米粒子析出强化与控制理论

针对薄板坯连铸连轧流程的微合金化技术问题,武钢、北京科技大学等研究了微合金化元素在流程各工序的固溶析出、组织演变规律和强化机理、生产技术,并在产品应用取得成果^[14-15]。研究表明,通过合理的微合金化设计和热轧工艺控制,在热轧带钢的晶内、晶界和相界等位置都可以生成大量的纳米尺寸析出粒子,尺寸多在数纳米到几十纳米,粒度小于 18 nm 粒子的累积频度可以达到 40%~60%,在钢中起沉淀强化作用的析出相主要为纳米 TiC、NbC 粒子和铁碳化物粒子。由纳米粒子析出强化产生的屈服强度提高可达 300 MPa 以上,并且钢板具有良好的综合力学性能和成形性能。薄板坯连铸连轧钛微合金钢通过合理的成分设计和严格的工艺控制,能够有效控制 TiC 的析出过程,在 CSP 线开发生产了钛微合金化薄规格高强度热轧集装箱板等;采用 Ti-Nb 微合金化技术开发出屈服强度为 600~700 MPa 级低碳高强结构用钢及 700 MPa 级低碳贝氏体高强工程机械用钢,钢板不仅具有高的强韧性,而且成形焊接性能良好;实现屈服强度 700 MPa 级厚度 1.2~1.4 mm 高强超薄规格板带批量生产及应用,产品用于汽车及物流等行业,在以热代冷、节能减排方面效果显著。

3.5 钢材组织性能精确预报、监测与控制理论技术

目前可通过高速计算机对热轧过程中显微组织的变化和奥氏体-铁素体的相变行为进行全程模拟,建立钢的性能和参数关系,使轧后钢材组织性能的预报和控制成为可能^[16]。东北大学等的工作主要包括:(1)形变与相变及组织调控理论:开发出了轧制过程的物理冶金模型;(2)组织性能预测模型、监测与控制技术:在组织演变模拟中,按研究的尺度不同,通常可分为宏观、介观和微观尺度。宏观尺度模拟通常研究材料加工过程显微组织演变的宏观特征,一般采用有限元法等方法;微观尺度模拟通常研究材料的晶体结构、电子结构、热力学性质等,其典型的建模方法包括第一性原理、分子动力学方法等;介观尺度模拟则介于宏观尺度模拟和微观尺度模拟之间,常用的方法包括元胞自动机、相场法、蒙特卡洛法等。计算机技术的发展,为从宏观、介观、微观以及纳观尺度上认识材料在制备与成形过程中显微组织的演化过程提供了有效的手段。跨(多)尺度计

计算机模拟(multi-scale simulation)可以直观清晰地反映出材料的制备和制造工艺、合金成分、显微组织及结构、性能等参数之间的关系,是实现合金成分与工艺优化的有效方法。

4 绿色化轧制生产工艺技术

4.1 热带无头轧制及超薄带钢生产技术

到 2020 年,中国有 7 条热带无头连铸连轧生产线投产,产能为 1 500 余万 t,其中 ESP 线 5 条(日照钢铁),MCCR 线(首钢京唐)及 DSCCR 线(唐山东华)各 1 条,还有几条线在建设或规划中。热带无头轧制是连续、稳定、大批量生产高质量薄和超薄规格宽带钢的前沿技术,也是短流程、绿色化钢材生产的典型代表技术。主要进展包括:(1)大批量生产热轧超薄规格板带(厚度不大于 1.2 mm),最薄厚度为 0.6 mm;(2)无头轧制超薄低碳/微碳钢工艺与组织性能、强化时效机理与工艺控制技术;(3)高精度板厚、板形控制;(4)组织性能一致性控制技术;(5)高成材率及低工序能耗生产技术;(6)系列热带高强钢品种开发技术;(7)无头轧制薄宽带钢产品应用技术。

无头轧制高精度控制技术主要包括:(1)辊形设计优化与板形控制;(2)轧辊材质选择;(3)温度履历设定;(4)负荷优化分配;(5)轧辊氧化膜控制;(6)轧辊冷却及策略;(7)轧制润滑技术等。日钢 ESP 线不大于 1.2 mm 薄规格例最高达到月产超过 40%;典型浇次规格分布达到厚度不大于 1.2 mm 占比 65.7%,不大于 1.5 mm 占比 80.2%;ESP 生产的 2.5 mm 规格 RE700MC 钢卷长度方向性能,屈服、抗拉强度波动不大于 20 MPa,伸长率波动不大于 2%;产品合格率超过 98%;与常规产线相比,节能 40%~50%;无头轧制产品广泛应用于汽车、交通运输、农机、建筑、五金等领域,尤其凭借热轧高强超薄规格厚度不大于 1.5 mm 的独有能力实现以薄代厚、“以热代冷”等绿色化制造^[17-19]。

4.2 热轧板带材表面氧化铁皮控制技术

东北大学等针对多因素耦合的热轧氧化理论、氧化皮厚度和结构演变进程精准控制等问题开展了系统研究。针对实际生产中典型缺陷,明确氧化缺陷产生-演变-遗传的规律和氧化皮结构调整方向,形成热轧全流程多工序的协调控制技术,根据用户对钢材表面状态需求对热轧工艺进行优化设计,构建多因素耦合的热轧理论并开发出具有完全自主知识产权的成套控制技术。技术应用于鞍钢、河钢等

多家钢铁企业,品种覆盖碳锰钢、低碳钢、低合金高强钢、高碳钢、无取向硅钢及低温用钢等,实现氧化行为动态跟踪与最优控制。开发出的“免酸洗”钢和“易酸洗”钢,吨钢酸用量减少 20~40 kg,加热温度降低近 50 ℃、加热时间缩短约 30 min,使烧损减少近 0.01%,吨钢生产减少粉尘排放约 0.6 kg、减少 SO₂ 排放约 0.6 kg。热轧板带材表面氧化铁皮控制技术所开发的系列产品在为下游用户实现清洁生产提供了原材料保障的同时,也为促进绿色制造向下游用户的延伸做出贡献^[20-21]。

4.3 长型材绿色化低能耗铸轧衔接技术

轧钢工序能耗约占钢铁工业总能耗的 10%,是整个生产流程绿色化制备过程需要突破的一个重要环节。钢铁研究总院等通过绿色化低能耗铸轧衔接技术优化了长型材连铸与轧钢两个工序之间的衔接生产方式,取消了传统加热炉,采用直接轧制、感应补热轧制、补热炉短时间均热等方式,实现长型材制备过程的流程创新,使能源消耗降低,并减少了气体排放,做到长型材的绿色化生产。关键技术:(1)开发出连铸方坯高温恒温恒量出坯技术,实现铸机布局、浇铸速度、铸坯切割协同设计的工程化,钢坯的头部和尾部温度差不超过 50 ℃、出坯温度大于 1 000 ℃;(2)建立了多流连铸机在不同工艺下的连铸坯排队模型,开发出长型材铸-轧界面钢坯排队控制技术,使典型生产线产量提高了 7.9%;(3)开发出长型材绿色化铸-轧衔接技术。针对连铸机与轧机不同布置,分别采用直接轧制、感应补热、高温钢坯均温等不同方式,实现多种现场工艺布置高效衔接,典型生产线的直轧率达到了 99%;(4)开发出直接轧制的长型材性能稳定性控制技术,实现同一浇次钢筋屈服强度的波动低于 12%。该成果大幅度降低了长型材轧钢工序的吨钢能源消耗,典型生产线能耗降低 30 kg/t,技术在中冶华天公司、粤北联合钢铁公司等企业应用,经济社会效益显著^[6]。

4.4 薄带铸轧技术

近年,中国宝武集团和沙钢集团在薄带铸轧技术实现了工程化。宝钢自主开发了薄带连铸连轧工艺、装备与控制工程化技术及系列产品生产技术。关键技术:(1)薄带连铸连轧工艺技术:无引带自动开浇、凝固终点控制、表面裂纹及夹杂物控制、在线变钢级及变规格控制技术;(2)薄带连铸连轧装备技术:直径为 800 mm 结晶辊系统、侧封布流系统、双辊铸机 AGC/AFC 控制、全线跑偏及张力控制等;(3)薄带铸轧系列产品制造技术:主要钢种为超薄规

格低碳钢、耐大气腐蚀钢、微合金钢等。形成了相对稳定的客户群,实现装备模块化、高效化、高精度控制。浇铸厚度规格为 1.6~2.6 mm,单机架最大压下率为 45%,轧后产品厚度为 0.9~2.0 mm,表面和边部质量良好。

沙钢集团薄带铸轧通过引进消化吸收及自主创新,实现产业化稳定生产,2020 年产量达到 43 万 t,2021 年将实现年产 50 万 t 薄带及超薄带钢的单条产线设计目标。沙钢开发出全新的双辊铸轧薄带钢生产关键技术:(1)实现超薄带钢连续稳定生产,开发出预警、控制模型及侧封板新型材料,连续稳定浇注时间提高到 7.7 h;(2)实现 0.8~1.0 mm 超薄带高比例生产;(3)开发出合金减量化高强钢、外观件用“以热代冷”产品及多种特殊钢产品,拓展了薄带铸轧产品品种及应用范围;(4)实现铸区后设备全部国产化,开发出适用于薄带铸轧的 CERI 四辊轧机、超强气雾冷却装置及双剪刀飞剪等成套设备。实现稳定生产最薄 0.8 mm、最大宽度为 1 590 mm 的超薄宽带钢。由于不需要铸坯火焰切割、加热炉及热连轧机组,能耗、水耗、电耗分别减少 95%、80%、90%,节能减排效果十分显著^[22]。

4.5 高鲜映性免中涂汽车外板制造技术

汽车涂装工序是整个制造流程最大的 VOCs 排放源,占比超过 60%。传统的涂装工艺包括 3 次涂漆和 2 次烘烤,被称为 3C2B 工艺。以免中涂为主要特征的新型涂装工艺取消了中涂段及之后的一次烘烤,称为 2C1B 工艺。首钢在机理研究上,明确了表面波纹理轮廓的测量方法,掌握了表面波纹理与涂装鲜映性的定量关系,找到成形零件表面波纹理的影响规律;在材料生产上,通过工艺和设备创新,解决了钢板表面波纹理控制和表面“零”缺陷控制。关键技术:(1)提出快速稳定评价波纹理形貌的 $Wa1-5$ 参数及其测量方法,解决了钢板表面粗糙度和波纹理协同控制的难题,实现难度最大的 IF 钢汽车外板免中涂工艺涂装下的鲜映性控制;(2)集成开发了热镀锌钢板表面细微点状缺陷控制关键装备,形成热镀锌汽车外板高鲜映性控制的成套技术;(3)开发出高鲜映性免中涂汽车外板的关键技术和装备,形成自主知识产权的 SmooSurf[®] 高鲜映性免中涂汽车外板系列产品。高鲜映性免中涂汽车外板制造关键技术和装备实现稳定批量供货,免中涂汽车外板在汽车用户免中涂涂装产线上获得广泛应用,零件表面 DOI 值稳定控制在 88 以上,在国内免中涂产线的占有率处于高水平,形成绿色化高质量

汽车外板先进制造技术。

4.6 铁素体轧制技术

铁素体轧制工艺可以显著降低加热炉能耗及精轧轧制力,减少氧化烧损及辊耗,提高热轧产线成材率并改善带钢成形性能和表面质量,一直受到钢铁企业的关注,但在如何提高生产效率及产品组织性能稳定性方面国内外一直没有很好解决,应用上遇到了瓶颈。近年,北京科技大学和首钢京唐公司合作,在铁素体轧制工艺控制关键技术上取得突破,实现铁素体轧制超低碳钢大批量稳定生产。关键技术:(1)连铸坯低温加热技术,将 Ti-IF 钢铸坯加热温度从 1 250 ℃降低到 1 100 ℃以下;(2)中间坯温度高效控制及生产稳定控制技术,保证铁素体轧制生产效率不低于奥氏体轧制,轧线温度命中率在 95%以上,卷取温度命中率稳定在 99.5%以上;(3)粗轧及精轧模型优化及高精度控制技术;(4)提高板材成形性能,尤其是显著提高面内各向异性性能(低制耳率)。

同常规奥氏体轧制比较,铁素体轧制铸坯加热温度降低 150 ℃多度,带钢氧化铁皮减少 50%以上,冷轧酸洗时间减少 30%,吨钢成材率提高 0.5%,显著降低了能耗,并批量生产出高 r 值($r \geq 2.7$)、超低 Δr 值(Δr 值稳定在 0.07~0.20)^[23-24]。

4.7 多线切分轧制技术

近年来,中国切分轧制技术发展较快,四线切分、五线切分和六切分轧制技术在多家棒线材生产线上成功应用,使中国切分轧制技术位于国际领先水平。切分轧制技术具有解决轧机与连铸机衔接、匹配问题,显著提高生产率和产品尺寸精度,降低能耗和成本,减少机架,节省投资等优点。多线切分轧制工艺与传统单线轧制相比,在钢料控制、导卫调整、速度控制、轧机准备等几个方面都有更大的难度。通过生产性研发,在四切分轧制和五切分轧制技术上已经成功克服这些困难,并且用于生产实践,已成功开发出螺纹钢六线切分轧制技术^[25]。

5 数字化、智能化轧制技术

“十三五”期间,中国钢铁智能制造相关技术成果呈现出逐年增长态势,说明中国钢铁企业越来越重视智能制造技术的研发和应用,投入比例也在不断增加,企业在数字化、网络化、智能化方面的需求旺盛,主要体现在工艺优化、产线无人化、轧制过程管控、能源管控、产品质量检验与管控、安全环保等方面。

5.1 大型复杂断面型钢数字化高质量轧制理论与技术

大型复杂断面异形型钢轧制孔型系统设计、优化、配辊加工及轧制过程产品尺寸形状高精度控制是一个复杂的工艺系统,采用传统的以经验试错方法为主的工艺技术难以满足高质量、高精度大型复杂断面型材的要求。北京科技大学联合攀钢、山钢等企业自主研发出一整套高质量高速重载钢轨及大型复杂断面型材数字化智能设计制造技术及关键软硬件,实现大规模产业化应用。关键技术:(1)独创的钢轨全流程孔型工艺数字化智能设计加工系统。解决了复杂型材孔型工艺全流程数字建模、智能设计及配辊加工关键软硬件难题,实现高质量钢轨及异型材孔型系统和工艺数字化智能设计、配辊加工,研发效率大幅度提高;(2)高速重载钢轨全流程性能稳定性预测控制成套技术。实现钢轨性能极稳定、组织超细均匀、超低残余应力;(3)创建钢轨轧制补偿模型及全长尺寸在线智能控制技术。研发出辊缝在线监测、补偿及智能控制整套软硬件技术,解决了钢轨局部“高点”难题;(4)研发出钢轨轧制局部润滑及表面质量控制设备技术。解决了钢轨轧疤、轧痕等表面质量控制难题,轧辊寿命延长 1 倍多。攀钢完成高质量高铁轨、重载轨、道岔轨 3 大系列 50 多个品种,大量用于国内外高铁、重载铁路,山钢开发出 J 形等多种复杂断面型钢,成功应用于大型机械装备制造等领域,使中国在轧制数字化技术开发与应用进入国际前列^[26]。

5.2 柔性化 45 m/s 高速棒材关键技术与装备

由中冶京诚等单位针对传统棒材轧制速度低、精度及灵活性不足等问题,研发出 45 m/s 高速棒材生产线核心技术与装备,实现精准的控轧控冷,提高了棒材尺寸精度与性能均匀稳定性和生产效率,降低了生产成本。关键技术:(1)开发出高速棒材生产线柔性轧制技术与装备,实现高速棒材全规格单一孔型轧制,产品质量(重量)偏差范围降至 0.7% 以下,生产线有效作业率提升至 90% 以上;(2)研发出控轧控冷组织性能预报模型及配套的智能控冷装置,实现精准控轧控冷,保证了低温精轧和轧后分级水冷工艺技术的稳定性,解决了新国标热轧钢筋合金减量化绿色生产难题;(3)开发了具有自主知识产权的模块化轧机、高速倍尺飞剪、智能夹尾器、转鼓机构等高速棒材关键装备,解决了高速棒材核心装备的系列难题,降低了生产线建设投资;(4)开发了高速模块轧机速度补偿控制系统、水冷温度闭环控

制系统、高速倍尺飞剪控制系统、高速上钢控制系统、自适应周期冷床控制系统等自动控制系统,实现温度控制波动在 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,倍尺精度 $\pm 60\text{ mm}$ 以内,成材率达到 98% 以上。

5.3 基于大数据全流程一体化管控的钢铁智能制造技术

中冶赛迪自主开发的“基于大数据一体化管控平台及大规模集控的铁区智能制造技术”展现了以智能化大数据推动产业转型升级的实力。在武钢总承包建设的铁区操控中心和热轧操控中心投用,实现铁、烧、焦、料、能源、转底炉、环保等 7 大工序的智慧集中控制与宽带钢热轧产线的远程轧钢,推动武钢向“智造”迈进。打造领先的轧钢集中操控中心和决策中心:武钢热轧操控中心利用中冶赛迪的 Cis-digital 工业互联网平台,成功打造热轧数字工厂,实现宽带钢热轧产线的远程轧钢。操控中心(一期)打通了 2250 热轧产线的 26 个子系统,采集多达 38 000 点数据(其中 7 000 点为周期 10 ms 的高频数据),从人机料法环 5 个维度实现热轧车间全面数字化,采用大数据分析技术实现质量、设备、效率、能耗、成本、安环、运营等主题的智慧应用,平台的数据分析自定义能力,实现全员参与、全面提效的目标。采用“轻推”平台的生产协同系统,高效完成人机协同。

5.4 基于深度学习的热轧带钢表面在线检测与质量评级

北京科技大学、太钢等单位,突破了特殊光路设计、图像高速采集、海量数据实时处理、复杂背景图像识别等关键技术,采用深度学习算法,开发出基于深度学习的热轧带钢表面在线检测与质量评级技术,应用于韩国浦项、太钢、马钢等热轧带钢生产线,部分生产线的应用替代了国外表检系统,为深度学习方法在工业领域的应用提供重要案例。关键技术:(1)开发了基于分类优先网络与多尺度感受的热轧带钢表面缺陷检测算法,常见缺陷检出率达 98%,识别率达 92%,与现有检测系统相比,缺陷检出率和识别率分别提高了 3% 和 7%;(2)开发的基于对抗生成网络半监督样本学习方法,能够有效地利用大量无标签的钢板表面缺陷样本,大幅提升了深度学习网络的训练效率;(3)开发了基于长短时记忆网络的周期性缺陷识别算法,实现热轧带钢辊印、划伤等缺陷的追踪及预警,可有效避免上述缺陷导致的批量质量事故;(4)利用表面检测系统提供的缺陷信息,采用层次分析法对热轧带钢表面质量进行

综合评级,实现从人工经验到量化模型的自动评级。

5.5 轧机颤振智能监控与抑制提速技术

宝钢股份、北京科技大学等单位围绕关键共性问题,经过持续攻关研发,取得成果。关键技术:(1)研制了基于轧机颤振相关大数据的时空融合模型,开发了基于信息物理系统(CPS)的颤振在线监测预警系统,实现报警能量阈值的自适应学习以及振源智能识别;(2)建立和完善轧机机电液界多态耦合振动理论体系,提出和完善轧机机电液界多态耦合振动理论;(3)研制了连铸机振动、连铸坯硬度波动和形貌、轧机耦合振动在线监测系统,实现铸轧流程整体监测和振动基因遗传追溯功能,为确定诱发轧机振动的根源提供数据支撑;(4)研制轧机多态耦合振动解耦抑振器,获得多个频率抑振信号,分别送到压下和主传动控制系统中进行振动相位控制和幅值控制,达到消减轧机振动幅值和振动能量。先后在国内 23 个轧机组上推广应用,在宝钢股份内的 3 条冷轧机组应用后,月平均发生颤振次数降幅超 50%;颤振导致的月平均废钢切除量降幅近 90%;轧机平均提速 4% 以上,轧机牌坊垂振速度由原来 8 降低到 1 mm/s,抑振效果显著,为全国数百条生产线上的轧机振动问题提供了一整套实用的解决方案^[27]。

5.6 数字化、智能化轧制工厂建设

近年来,中国钢铁工业信息化、数字化、智能化步伐已走在工业企业的前列,2019 年生产设备数字化率达到 49.8%。轧钢工序主要是通过智能化关键技术实现轧制过程多工序协调优化、装备智能运行与监测,智能化决策、动态排程与生产管理,全流程产品质量在线监控、工艺优化、轧制过程组织性能一体化智能控制等。宝钢硅钢部实现生产组织网络化、产品全生命周期全过程管理及工厂全流程智慧化、以及现场无人化^[28]。宝钢 2050 产线的自动化升级和数据中心项目目前已上线。协同智慧平台聚焦数据感知、知识萃取、优化决策,挖掘数据的潜在价值,以生产、质量、设备、能源、成本等为基柱,打造物理车间的数字孪生体。宝武绿色发展与智慧制造将马钢第四钢轧厂作为重点项目,推出热轧智慧工厂“双线双智控”模式,通过新增 13 项智能装备技术、数百个视频传感,连接 40 余个外部系统,实现全域数据感知。通过研发 38 项关键技术将板坯库、加热炉、轧线、磨辊间、能介、远程运维六大单元进行集中操控,打造生产在线优化和管控精益求精的运行新模式。首钢京唐在 2250 及 1580 热轧线建设热轧

工厂级全量数据平台以及质量智能管控、设备智能运维、能源管理和成本、无人库区和智能物流、环保消防监控、机器人、智能视觉装备应用、数据报表分析等 1 个平台、7 个中心构建智能工厂、智能生产、物流及服务方面开展了大量工作。宝钢、首钢、鞍钢、河钢等一大批钢铁企业与中国移动、华为、中兴通讯等合作,推动 5G 技术与钢铁工业的结合,主要应用于远程操作、监控、运维等。

6 高强度、高性能热轧产品开发及先进热轧技术

6.1 超细贝氏体钢制造技术

贝氏体钢使用状态下基体的金相组织为贝氏体。其化学组成是低碳和低合金元素,广泛用于航空、船舶、锅炉、石油化工高压管道以及压力容器等方面。燕山大学等针对贝氏体钢存在的相变速率慢、性能不稳定等技术难题开展攻关,发明了快速相变超细贝氏体钢及制造关键共性技术。关键技术:(1)钢中高共格度纳米析出相可作为异质形核相显著加速贝氏体相变;(2)超细贝氏体钢强韧化新机制——贝氏体铁素体板条中过饱和碳和高密度位错引起强化;(3)铝可以显著降低贝氏体钢的氢脆敏感性,找到了解决高强钢普遍存在的顽症——氢致脆性的途径;(4)解决了铁路辙叉用中低碳超细贝氏体钢及其热处理关键技术,实现贝氏体钢辙叉稳定长寿。同时,发明了渗碳表层高碳超细贝氏体心部低碳温变马氏体轴承钢及制造关键技术。大幅度提高轴承的耐磨和抗疲劳、抗冲击性能,采用该项技术制造的高端重载轴承取得了很好的应用效果,实现高端超高强度耐磨钢板制造技术的自有化,并出口到“一带一路”沿线以及欧洲多个国家和地区。

6.2 热连轧超高强钢组织性能控制技术

长期以来,国内钢铁企业无法批量生产热轧薄规格超高强钢板,特别是 2~8 mm 的超高强钢。宝钢自主开发和优化了一系列关键装备,形成了一批核心工艺技术。通过解决超高强韧性匹配、高耐磨蚀性能、高防护性能、高疲劳性能、抗焊接热影响区软化等技术难题,同步开发了 800~2 000 MPa 超高强结构钢、耐磨钢和防护用钢等产品系列。开发选材、EVI 设计、焊接、加工、材料数据库和服役寿命评估等 6 类关键用户服务技术,为产品升级换代提供完整解决方案。关键技术:(1)自主集成一套薄规格超高强钢热处理线;(2)开发薄规格超高强钢全流程板形控制技术;(3)开发出 5 个系列超高强钢产

品,强度覆盖 800~2 000 MPa;(4)开发了 6 类关键用户服务技术,为多个行业提供轻量化整体解决方案;(5)热连轧 TP 钢应用于混凝土搅拌车整体解决方案——确定了采用铁素体、马氏体、残余奥氏体三相组织设计,并计算出各相的最优比例。在热连轧条件下开发了优异综合性能的 TP 型耐磨钢,抗拉强度不小于 1 000 MPa,屈强比不大于 0.70,同时具有优良成形性和焊接性。

6.3 薄板坯连铸连轧生产电工钢(取向及无取向)技术

与传统板坯流程不同,薄板坯连铸连轧流程生产硅钢在板形均匀性、节能降耗等方面具有显著优势,但也存在一系列技术难题,如无取向硅钢夹杂物控制难、连铸水口易堵塞、表面瓦楞缺陷、磁性能不稳定等,取向硅钢关键元素(Al、N)控制窗口窄、连铸黏结漏钢、铸坯表面裂纹、成品线状缺陷、磁性波动大等。

武钢及钢铁研究总院等以武钢 CSP 线为依托,开展相关理论与技术攻关,实现 CSP 高磁感无取向硅钢和 HiB 钢规模化生产,形成系列自主知识产权。关键技术:(1)完善了硅钢近终形凝固及直轧冶金学理论体系;(2)开发并集成了 CSP 和 HiB 钢生产工艺,连铸拉速达到 4 m/min,连浇炉数可达 10 炉,HiB 率在 95%以上;(3)设计了适应 CSP 工艺特点的无取向硅钢低硅无铝成分体系;(4)开发了 CSP 生产硅钢的表面质量控制技术。无取向硅钢表面缺陷率不超过 1.5%,HiB 钢表面缺陷率不超过 5%。武钢 CSP 线已成为全球规格最全(高磁感取向硅钢、无取向硅钢)产量最大、效率最高的硅钢生产线,产品大量应用于电力变压器、各类电机等产品^[29]。

6.4 高寒地区结构用热轧 H 型钢工艺技术

马钢针对高寒地区结构用热轧 H 型钢开展工艺技术研究,实现工程应用。关键技术:(1)设计了一 60℃条件下低温韧性和焊接性能优异的大 H 型钢钒微合金化与中小 H 型钢 Nb-V 复合微合金化经济型合金体系,实现工业化应用;(2)开发了 V 和 Nb-V 微合金化异型坯表面裂纹控制技术,解决了含铌、钒、铝的亚包晶钢异型坯表面裂纹问题,形成高效稳定的异型坯连铸技术;(3)开发了大 H 型钢低温轧制+弛豫-析出控制相变与小 H 型钢的高温轧制及超厚规格的变形渗透控制技术;(4)开发了满足一 60℃低温韧性要求的 V 和 Nb-V 微合金化热轧 H 型钢焊接技术。应用该技术,马钢在国内率先

开发出一 60℃条件下低温韧性和焊接性能优异的高强度系列热轧 H 型钢,实现批量供货。已开发 52 个规格的 H 型钢,翼缘厚度覆盖 4.5~50.0 mm,实现国内最厚规格 50 mm 高低温韧性 H 型钢的突破。为全球最大的油气结构工程 Yamal 项目供货近 5 万 t,成为中石油和中海油海洋工程首选供应商^[30]。

6.5 高品质系列低合金耐磨钢板工艺技术

南钢成功开发出低成本、高韧性、超级耐磨和耐高温磨损系列耐磨钢核心生产技术及产品,形成 4 大类、8 个牌号产品应用技术体系。关键技术:(1)提出耐磨钢减量化合金设计,开发出 NM360~NM600 全系列低成本耐磨钢板,解决了传统耐磨钢因添加大量稀缺合金导致成形、焊接性能恶化的难题;(2)开发出系列高韧性型、耐高温磨损型特种耐磨钢板,成形性和耐高温性能为传统耐磨钢 20 倍以上,实现 NM360~NM450 钢板 180°冷弯成形和 500℃高温极端条件应用;(3)开发出基于超硬碳化物粒子增强耐磨性的新型超级耐磨钢板,实现在焊接、成形性能不降低条件下,耐磨性能达到传统马氏体耐磨钢板的 1.3~2.0 倍;(4)实现国内最宽 4 m、最薄 4 mm、级别最高(NM600)系列耐磨钢板批量、稳定生产,解决了大宽厚比钢板板形、性能均匀性等控制难题,实现批量出口。产品成功应用于美国 Caterpillar(全球最大工程机械制造公司)、瑞士 CV ACEROSAG(全球最大特殊钢材采购商)、力拓、北方重工等国际著名公司中大型刮板运输机、盾构机、自卸矿车、掘进机等装备制造^[31]。

6.6 高速车轮制造技术

马钢等单位针对中国铁路的实际运营特点,以满足和改善服役性能为目标设计车轮材料,完成了高速车轮产品的开发和应用。关键技术:(1)开发了 350 km/h“复兴号”高速动车组车轮、重载车轮和大功率机车车轮,实物性能优于进口车轮;(2)开发了氧化物夹杂塑性化处理新技术,解决了脆性氧化物夹杂的稳定控制技术难题, $w(T[O])$ 小于 0.001 0%,夹杂物弥散、塑性化率超过 96%,高速车轮断裂韧性提高 20%以上;(3)开发了梯度热处理技术,实现轮辋组织均匀,强、韧性合理匹配,高速车轮韧性提高 15%以上,耐磨性提高 30%以上;(4)建立了全流程工艺、质量参数在线监测和控制技术体系,实现产品制造工序间零缺陷转移,产品质量稳定、可靠。高速车轮已在 5 列 350 km/h“复兴号”高速列车上完成 130 万 km 试验考核运行,并批量出口德国、韩

国、澳大利亚和印度市场,重载车轮国内市场占有率为 30%、机车轮国内市场占有率为 40%、北美市场占有率为 50%,成为世界上全产业链技术装备先进、规模最大并具有国际竞争力的车轮制造企业。

6.7 高端装备用双相不锈钢无缝钢管系列工艺技术

钢铁研究总院、江苏武进不锈等单位,针对高端装备用双相不锈钢无缝管更高耐点腐蚀性能、低温冲击韧性要求及高性能大口径双相不锈钢冷轧管材国内无法生产的“瓶颈”问题,突破了高端装备用双相不锈钢“两相平衡设计—高洁净度冶炼及浇注—热穿孔—冷轧—均温快冷热处理”全流程组织控制技术,集成了大规格管坯、大口径荒管和成品管制造核心装备,实现高品质双相不锈钢系列无缝钢管的规模化生产及应用。关键技术:(1)开发了 S32205 等典型钢种的管坯制备技术,实现 $\phi 200 \sim \phi 432$ mm 规格双相不锈钢管坯无中心缩孔浇铸;(2)开发了变形温度-转速协同控制技术,能生产最大规格为 $\phi 720$ mm 双相不锈钢荒管,一次穿孔的 $\phi 610$ mm 双相不锈钢荒管实现批量稳定生产及 $\phi 610$ mm 世界最大规格双相不锈钢荒管制备;(3)开发了“保温—均匀加热—快速冷却”双相不锈钢窄窗口冷轧工艺技术,生产了 $\phi 610$ mm 双相不锈钢冷轧管材;(4)开发了大口径双相不锈钢无缝管冷变形调控关键工艺。开发的产品应用于国内外油气输送、海洋工程及船舶、石油炼化、环保工程等领域的多个项目,带动了中国高精尖、高附加值不锈钢无缝管整体技术水平和制造能力的提升。

7 高性能、高强度、高精度冷轧产品及先进冷轧技术

7.1 宽幅超薄精密不锈钢带钢工艺技术及产品

宽幅超薄精密不锈钢带钢被形象地称作“手撕钢”,广泛应用于航空航天、石油化工、军工核电、新能源、高端电子、汽车等支柱行业和关键领域,世界上只有极少数国家能生产。太钢开展联合攻关,实现一系列关键工艺和生产制造技术的突破,成功生产出厚度为 0.02 mm、宽度为 640 mm 的不锈钢精密带材,成为全球唯一可批量生产宽幅超薄不锈钢精密带钢的企业,关键技术:(1)开发出以复合性多曲线锥度辊系配置、高强韧钛合金轧辊设计和多轧程板形动态控制为核心的成套轧制技术,实现宽幅超薄不锈钢精密带钢的高精度轧制;(2)开发出多点转矩平衡补偿、螺旋芯轴型展平辊设计、非线性卷取张

力动态调整的热处理线张力精准控制 3 大关键技术,解决了宽幅超薄不锈钢精密带钢长线退火过程中断带、折印及塌卷等难题,实现大卷重(超过 2 t)超薄带高效连续稳定生产;(3)开发出超薄带钢高表面系列控制技术;(4)开发出软态、高硬高弹、去应力等性能调控技术,形成 20 余种特殊功能系列产品。对国家战略安全行业的材料需求提供了有力的材料保障。“十三五”期间,太钢还研究开发出“高品质双相不锈钢系列板材技术”、“不锈钢冷轧带钢全连续生产技术”等先进不锈钢板带冷轧技术及产品。

7.2 汽车轻量化吉帕级钢板稳定制造技术

宝钢将抗拉强度在 1 000 MPa 以上的汽车高强度钢命名为吉帕钢,包括 DP 钢、MS 钢、CP/CH 钢、QP 钢、电镀锌 UHSS、铝硅热成形材料等。不同产品特性不一,可满足用户个性化需求。关键技术:(1)开发了吉帕级高伸长率淬火配分钢(QP)产品成套技术,实现 QP 钢系列产品产业化,建立了国际用户使用标准;(2)国际同步开发了吉帕级冷冲压和热冲压包含 23 种全系列产品成套技术,解决了吉帕级钢成形技术难题;(3)开发了吉帕钢稳定制造关键工艺与装备技术,解决了吉帕钢铸坯、表面质量、板形及性能稳定性控制难题,实现累计超百万吨级的稳定生产;(4)开发了吉帕钢使用关键技术,建设了热冲压成形应用示范工厂和应用技术评估体系。吉帕钢产品已广泛应用于国内欧系、美系、日系和自主品牌汽车制造,并批量出口欧美,国内市场占有量 60% 以上,使宝钢成为国际上首家具备批量供应三代汽车用吉帕钢的钢铁企业。全钢制概念白车身(BCB)可减重 10%~20%,标志着中国汽车钢板技术进入国际领先行列,推动了钢铁行业产业升级和汽车轻量化水平提升。

7.3 冷轧硅钢边部减薄控制技术

边部减薄控制技术是冷轧硅钢生产的关键技术之一,鞍钢、中国一重等对 1500 冷连轧机组进行了边部减薄控制技术联合研发,开发出国内第一套短行程工作辊窜辊式六辊冷轧机和高精度冷轧硅钢边部减薄控制系统。关键技术:(1)确定了边部减薄控制策略,设计出锥形工作辊窜辊所需的辊形曲线,形成带钢边部减薄高效控制工艺技术;(2)研发出冷轧硅钢边部减薄所需的短行程工作辊窜辊机电设备系统,提高了轧机轴承使用寿命,实现带钢跑偏精确控制;(3)研发出基于功效系数与模型自学习相结合的工作辊窜辊动态设定模型及基于特征点优化的冷轧带钢边部减薄闭环控制系统;(4)边部减薄控制技术

在鞍钢 1500 五机架 6 辊硅钢冷连轧生产线工业应用,带钢边部减薄控制实际值优于 $5\ \mu\text{m}$ 质量保证值。形成冷轧带钢边部减薄控制工艺装备核心技术体系,完成了国内第一套工业应用级的拥有自主知识产权的全套冷轧带钢边部减薄控制系统^[32]。

宝钢股份近年研究开发出高技术难度的“极薄一次冷轧高硅硅钢制造技术及装备”实现批量生产及应用。

7.4 高效环保变压器用高性能取向硅钢制备技术

高磁感取向硅钢是变压器的核心软磁材料,首钢与钢铁研究总院等单位突破了高磁感取向硅钢技术瓶颈,关键技术:(1)开发了超低损耗成套控制技术,解决了表面效应导致二次再结晶发生不稳定的难题,开发的 18SQGD060 等 3 个超低铁损牌号填补了国际空白,产品宽度方向性能均匀;(2)研发出细密均质优附着底层综合控制技术,解决了底层生成过程因镁铝尖晶石形成不均造成的“钉扎”不足难题,产品附着性 A、B 级不小于 95%;(3)开发了取向硅钢低噪声综合控制技术,采用脱碳退火两段式快速加热等控制,减少磁化过程中磁畴转动不同步造成的高频成分,产品噪声 A_{WV} 典型值不大于 52 dB,研发出 2 个全新的低噪声牌号。首钢实现高磁感取向硅钢从无到有快速发展,具备了 15 万 t/a 供应能力,成为全球少数几家 100% 高磁感取向硅钢供应企业之一,产品广泛应用于 ABB、特变电工等国内外 100 多家知名变压器企业。0.20、0.18 mm 极薄产品市场占有率第一;0.18 mm 产品应用于全球首台“超 1 级”能效卷铁心配电变压器;产品批量稳定应用于 S13、S14 及以上高能效配电变压器、国网特高压“双百万”变压器、全球在建装机容量最大的白鹤滩水电站、北京新机场等重大工程^[33]。

7.5 面向多品规高精度轧制的 CSP 过程控制系统及技术

北京科技大学、马钢等针对以 CSP 流程为代表的薄板坯连铸连轧产线存在的品规扩展精度低、系统老化故障多等共性难题,从辊底式隧道加热炉智能燃烧系统、高精度轧制过程控制模型、兼顾全幅宽和多目标的板形综合控制技术、新一代过程控制系统集成技术 4 个方面开展了系统的理论和应用研究,使隧道炉能耗降低 19% 以上,薄规格生产能力由 2.0 扩展至 1.2 mm,非计划过渡材显著减少,实现双流异钢种交叉混合轧制,重点计划执行率由 20% 提高到 95% 以上。该成果成功应用于马钢、涟钢、邯钢、包钢 CSP 产线,通过网关+双系统并行的

零停机时间的在线替换模式,保证 C40、C25 双凸度控制精度,实现隧道炉温度全自动烧钢,综合指标优于同期采用国外技术的同类产线,为企业提升产品质量、拓展品种规格、降低制造成本及实现智能化升级提供了更多选择和便利。相关成果推广应用于日钢 1580、柳钢 2032、印尼 1780 等常规热连轧生产线,实现 1.1 mm 超薄花纹板、高品质超宽幅板带、优质不锈钢等高附加值产品的稳定生产,推动了宽带钢热连轧关键共性技术的持续进步^[34]。

7.6 超薄宽幅高品质冷轧板带工业化生产技术

燕山大学、宝钢等单位研究开发了一套适合于超薄宽幅高品质冷轧板带的生产技术,实现高效稳定生产。关键技术:(1)提出超薄宽幅板带冷连轧综合控制方法,T5 类产品最薄可轧到 0.168 mm,板形封闭率与表面质量缺陷率均控制在 0.5% 以内;(2)研发出超薄宽幅冷轧板带连续退火过程关键工艺技术,解决了通板稳定性与成品质量控制的技术难题,瓢曲缺陷发生率在 0.03% 以内;(3)提出二次冷轧过程轧制与润滑工艺综合控制方法,DR9/DR10 类产品可轧薄至 0.1 mm;(4)提出六辊平整机七维板形控制方法、辊端压靠软测量与控制方法,实现超薄宽幅板带非对称板形、局部浪形的精细控制,板形质量控制在 $2\sim 4\ \text{I}$;(5)研发出高性能阳极及阳极泥高值化利用技术,使缺陷发生预判准确率达到 99% 以上。成果成功应用于宝钢股份、山东冠洲股份等企业的 32 条机组,生产出食品包装容器用钢、高等级电池钢等宽幅高品质薄带产品。

8 展望

综上所述,“十三五”期间,中国在轧制理论与技术、工艺与装备以及高性能新产品研发技术创新方面取得了显著进步,展望“十四五”及今后轧制技术的发展,值得关注的趋势及对策有如下方面。

(1)绿色化、数字化、智能化轧制技术成为必然趋势。钢材的轧制过程是集材料、工艺、设备、高精度检测及控制于一体的复杂过程,将这一复杂的多因素交织的过程形成系统的数学模型并进行数字化描述与快速数据传递,是进一步实现智能化的基础。钢材产品的全生命周期智能化设计、高效、减量化生产、生产过程中的低排放低消耗、由高强韧化带来的结构轻量化与低排放、可循环已成为钢材轧制生产绿色化的必然选择和发展趋势。

(2)基于大数据的钢材生产全流程工艺及质量管控成为轧制过程控制的基础。保证钢材质量性能

一致性的前提是钢材从冶炼到轧制生产全流程的工艺控制的稳定性。在生产全流程过程中将形成海量数据,利用好这些大数据对实现工艺与产品质量的稳定性、一致性控制至关重要。

(3)结构用超高强韧钢对轧制钢材的质量性能与工艺控制提出了新要求。随着新型建筑结构的发展,对高层、超高层建筑用高强韧钢、耐候耐火抗震钢、大型桥梁结构及缆索、强力螺栓用钢等的需求将不断增长。目前,桥梁钢的强度已超过 800 MPa,建筑结构用钢板的强度已达到 1 000 MPa,钢缆线强度超过 2 000 MPa、钢丝强度超过 4 000 MPa、抗震钢的屈强比上限在 0.8,今后这些指标将进一步提高。在控轧控冷过程中,通过优化碳及合金含量、冷却速度与路径,可获得各种不同的相变组织,从而赋予钢材多样的材料特性,据预测,钢材的理想强度可能达到 10 000 MPa 以上,据此可以说,钢铁材料是仍处于发展阶段的、其中隐藏着巨大潜力的“绿色新材料”和“重要基础材料”。

(4)第三代汽车用钢对板带材轧制技术提出了新要求。第三代汽车用钢的主要特点是其合金含量明显低于第二代汽车用钢,同时具有高强韧性和高的强塑积。国内的多家大型钢铁企业已经开发或正在开发 1 000~1 500 MPa 级中锰钢、QP 钢、纳米强化钢等第三代汽车用钢,以及 1 800~2 000 MPa 级超高强热成形钢,正在进行一定批量的应用,目前主要问题在于批量生产产品性能的稳定性、一致性、成本控制,以及成形应用控制技术上还需要进一步的研究开发。

(5)超高强度钢的未来发展对轧制技术提出了新挑战。今后,为了进一步适应环境与绿色化发展的要求,节能减排、结构轻量化、节约资源与能源,钢质结构件的强度和性能要求也将进一步提高。据国际先进研究开发计划,钢的理想抗拉强度为 10 400 MPa,但目前最高仅实现 40%,汽车用钢才达到 15%,抗拉强度还有很大的提升空间,仍需要在微观设计与控制上进行特性改进,在宏观工艺控制上推进优化,进而开发出性能优良的超高强钢铁材料。

(6)优质钢材品牌化是轧制技术发展的重要战略目标。近年来,国际上许多大型先进钢铁企业十分重视其钢材产品的品牌化发展战略,在提升产品品质品牌、企业品牌的同时,覆盖更多的产品品种,由此带动和提升企业的所有品种质量提升,产生更大的经济社会效益。

(7)多学科交叉融合的轧制创新体系将不断形

成和发展。钢铁产品的制造过程涉及到众多学科,多学科交叉融合已成为必然,包括:1)轧制塑性变形理论与冶金过程控制、连铸凝固理论技术的融合及一体化控制;2)轧制技术与现代材料科学、纳米技术、复合材料技术、表面技术、材料基因及材料多尺度设计、预测与控制等技术的融合;3)轧制技术与大数据、计算机技术、数值模拟、现代塑性力学、高精度检测与智能控制等技术的融合;4)超厚、超薄、超宽、复杂断面、特殊应用环境(超高温、超低温、高耐蚀等)高性能、高精度轧材成套系统制造技术;5)综合考虑成本、环境资源及可循环、全生命周期一体化的材料设计理论与制造技术等。

参考文献:

- [1] 石洪卫. 2017 中国钢铁工业年鉴[M]. 北京:中国钢铁工业年鉴编辑委员会,2017. (SHI Hong-wei. 2017 China Steel Yearbook[M]. Beijing: The Editorial Board of China Steel Yearbook,2017.)
- [2] 石洪卫. 2018 中国钢铁工业年鉴[M]. 北京:中国钢铁工业年鉴编辑委员会,2018. (SHI Hong-wei. 2018 China Steel Yearbook[M]. Beijing: The Editorial Board of China Steel Yearbook,2018.)
- [3] 石洪卫. 2019 中国钢铁工业年鉴[M]. 北京:中国钢铁工业年鉴编辑委员会,2019. (SHI Hong-wei. 2019 China Steel Yearbook[M]. Beijing: The Editorial Board of China Steel Yearbook,2019.)
- [4] 石洪卫. 2020 中国钢铁工业年鉴[M]. 北京:中国钢铁工业年鉴编辑委员会,2020. (SHI Hong-wei. 2020 China Steel Yearbook[M]. Beijing: The Editorial Board of China Steel Yearbook,2020.)
- [5] 王国栋. 工艺绿色化、装备智能化、产品高质量、供给服务化——建设世界领先的钢铁行业集群[C]//第二届河钢东大国际学术年会论文集. 石家庄:河钢集团有限公司,2018:12. (WANG Guo-dong. Process green equipment intelligent products high quality supply service—Building a word leading steel industry cluste[C]//Proceedings of the 2nd HBIS&NEU Annual International Academic Conference. Shijiazhuang: HBIS,2018:12.)
- [6] 康永林,唐荻. 轧钢过程节能减排先进技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2020. (KANG Yong-lin, TANG Di. Advanced Technology of Energy Saving and Emission Reduction for Steel Rolling [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2020.)
- [7] 康永林,朱国明,陶功明,等. 高精度型钢轧制数字化技术及应用[J]. 钢铁, 2017, 52(3): 49. (KANG Yong-lin, ZHU Guo-ming, TAO Gong-ming, et al. Digital technology and application of high precision section steel rolling[J]. Iron and Steel,2017,52(3):49.)
- [8] 张进之,吴增强. 板带轧制过程动态理论的建立及应用发展

- 过程[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2017;3. (ZHANG Jin-zhi,WU Zeng-qiang. Establishment and application development of dynamic theory in plate rolling process[C]//Proceedings of the 11th CSM Steel Congress, Beijing:The Chinese Society for Metals,2017;3.)
- [9] 任新意,王松涛,高敏慧,等. 冷连轧机 ESS 辊型板形控制性能分析[J]. 钢铁,2018,53(3):50. (REN Xin-yi,WANG Song-tao,GAO Min-hui,et al. Analysis on shape control performance of cold tandem mill with ESS roll profile[J]. Iron and Steel,2018,53(3):50.)
- [10] 凌启辉,闫晓强,张清东,等. 热连轧机液耦系统振动特性[J]. 钢铁,2017,52(2):51. (LING Qi-hui,YAN Xiao-qiang,ZHANG Qing-dong,et al. Hydraulic-mechanical coupling system dynamics modeling and vibration characteristics of hot trip tandem mill [J]. Iron and Steel,2017,52(2):51.)
- [11] 董瀚,翁宇庆,曹文全,等. 基于 M³ 组织调控的钢铁材料基础理论研究与高性能钢铁技术[J]. 中国冶金,2018,28(2):74. (DONG Han,WENG Yu-qing,CAO Wen-quan,et al. Research on basic theory of iron and steel materials and high performance steel technology based on M³ microstructure control[J]. China Metallurgy,2018,28(2):74.)
- [12] 王国栋. 钢铁行业技术创新和发展方向[J]. 钢铁,2015,50(9):1. (WANG Guo-dong. Technology innovation and development direction of iron and steel industry[J]. Iron and Steel,2015,50(9):1.)
- [13] 康永林,丁波,陈其安. 我国轧制学科发展现状与趋势分析及展望[J]. 轧钢,2017,34(6):1. (KANG Yong-lin,DING Bo,CHEN Qi-an. Analysis and prospect of developing status and trends of rolling discipline in China[J]. Steel Rolling,2017,34(6):1.)
- [14] 毛新平,孙新军,汪水泽. 薄板坯连铸连轧流程钛微合金化控制轧制技术[J]. 钢铁,2016,51(1):52. (MAO Xin-ping,SUN Xin-jun,WANG Shui-ze. Control rolling technology of Ti-microalloyed strip produced by TSCR[J]. Iron and Steel,2016,51(1):52)
- [15] 罗许,杨财水,康永林,等. 析出粒子对钛微合金化高强钢奥氏体晶粒长大的影响[J]. 工程科学学报,2016,38(2):230. (LUO Xu,YANG Cai-shui,KANG Yong-lin,et al. Effect of precipitates on the austenite grain growth of titanium microalloyed high performance steel[J]. Chinese Journal of Engineering,2016,38(2):230.)
- [16] 王国栋,刘振宇,张殿华. RAL 关于钢材热轧信息物理系统的研究进展[J]. 轧钢,2021,38(1):1. (WANG Guo-dong,LIU Zhen-yu,ZHANG Dian-hua. Research progress on the cyber-physical system of steel hot rolling in RAL[J]. Steel Rolling,2021,38(1):1.)
- [17] 康永林,田鹏,朱国明. 热宽带钢无头轧制技术进展及趋势[J]. 钢铁,2019,54(3):1. (KANG Yong-lin,TIAN Peng,ZHU Guo-ming. Progress and trend on hot wide strip endless rolling technology[J]. Iron and Steel,2019,54(3):1.)
- [18] QIN Zhe,YU Yao,ZHAO Wen,et al. Development and application of ESP products in Rizhao Steel[C]//Proceedings of 2018 International Symposium on Thin Slab Casting and Direct Rolling. Wuhan:The Chinese Society for Metals,BAOWU Steel Group,2018;49.
- [19] KANG Yong-lin,TIAN Peng,CHEN Liang,et al. Characteristics analysis of process,micro structure and properties of hot rolled low-carbon/extra low-carbon steels by ESP[C]//Proceedings of 2018 International Symposium on Thin Slab Casting and Direct Rolling. Wuhan:The Chinese Society for Metals,BAOWU Steel Group,2018;33.
- [20] CAO G M,LI Z F,LIU Z Y,et al. Oxidation kinetics and spallation model of oxide scale during cooling process of low carbon microalloyed steel[J]. High Temperature Materials and Processes,2017,36(9):927.
- [21] 刘鑫,冯光宏,张宏亮,等. 方坯直轧工艺对钢筋组织和性能差异性的影响[J]. 钢铁,2018,53(12):86. (LIU Xin,FENG Guang-hong,ZHANG Hong-liang,et al. Effect of billet direct rolling process on difference in microstructure and mechanical properties of rebar[J]. Iron and Steel,2018,53(12):86.)
- [22] 石洪卫. 2017 中国钢铁工业年鉴[M]. 北京:中国钢铁工业年鉴编辑委员会,2017. (SHI Hong-wei. 2017 China Steel Yearbook[M]. Beijing:The Editorial Board of China Steel Yearbook,2017.)
- [23] 石洪卫. 2018 中国钢铁工业年鉴[M]. 北京:中国钢铁工业年鉴编辑委员会,2018. (SHI Hong-wei. 2018 China Steel Yearbook[M]. Beijing:The Editorial Board of China Steel Yearbook,2018.)
- [24] WANG Fan,TIAN Peng,KANG Yong-lin,et al. Simulation experimental study on ferrite rolling process of low-carbon steels[J]. Materials Science Forum,2019,944,329.
- [25] 邸全康,王全礼,康永林,等. 四线切分控轧控冷装备设计及工艺[J]. 钢铁,2013,48(2):34. (DI Quan-kang,WANG Quan-li,KANG Yong-lin,et al. Design of controlled rolling and cooling equipment of four-strands splitting bar and research of production process[J]. Iron and Steel,2013,48(2):34.)
- [26] 康永林,朱国明,陶功明,等. 高精度型钢轧制数字化技术及应用[J]. 钢铁,2017,52(3):49. (KANG Yong-lin,ZHU Guo-ming,TAO Gong-ming,et al. Digital technology and application of high precision section steel rolling[J]. Iron and Steel,2017,52(3):49.)
- [27] YAN Xiao-qiang,QI Jie-bin,WANG Xin-xin. An active method suppressing rolling mill vibration disturbance estimation and compensation algorithm[J]. Journal of Iron and Steel Research,International,2019,26:697.
- [28] 石洪卫. 2020 中国钢铁工业年鉴[M]. 北京:中国钢铁工业年鉴编辑委员会,2020. (SHI Hong-wei. 2020 China Steel Yearbook[M]. Beijing:The Editorial Board of China Steel Yearbook,2020.)
- [29] 骆中汉,仇圣桃,陈胜林,等. 薄板坯连铸连轧生产电工钢(取向及无取向)技术开发及应用[J]. 连铸,2017,42(4):42. (LUO Zhong-han,QIU Sheng-tao,CHEN Sheng-lin,et al. Development and application of thin slab continuous casting

and rolling technology for electrical steel production (oriented and non-oriented)[J]. Continuous Casting,2017,42(4):42.)

[30] 佚名. 冶金科学技术奖获奖项目简介[J]. 中国冶金,2018,28(5):93. (Anonymity. Brief introduction to the projects winning Metallurgical Science and Technology Award[J]. China Metallurgy,2018,28(5):93.)

[31] 王昭东,陈林恒,邓想涛,等. 高品质系列低合金耐磨钢板研制开发与工业化应用[J]. 中国冶金,2018,28(8):88. (WANG Zhao-dong, CHEN Lin-heng, DENG Xiang-tao, et al. Development and industrial application of high quality series low alloy wear resistant steel plate[J]. China Metallurgy,2018,28(8):88.)

[32] 刘宝权,王军生,张岩,等. 带钢冷连轧液压与伺服控制[M]. 北京:科学出版社,2016. (LIU Bao-quan, WANG Jun-sheng, ZHANG Yan, et al. Hydraulic Servo Control of Cold Strip Mill[M]. Beijing: Science Press, 2016.)

[33] 龚坚,李军,黎先浩,等. 后期渗氮工艺制备取向硅钢的组织转变[J]. 钢铁研究学报,2016,28(8):71. (GONG Jian, LI Jun, LI Xian-hao, et al. Microstructure evolution in grain oriented silicon steel produced by nitriding technique[J]. Journal of Iron and Steel Research,2016,28(8):71.)

[34] 何安瑞,荆丰伟,刘超,等. 薄板坯连铸连轧过程控制技术的发展及应用[J]. 轧钢,2020,37(3):1. (HE An-rui, JING Feng-wei, LIU Chao, et al. Development and application of process control technologies of thin slab continuous casting and rolling[J]. Steel Rolling,2020,37(3):1.)



《钢铁》杂志征稿启事

《钢铁》杂志创刊于1954年,由中国科学技术协会主管,中国金属学会、钢铁研究总院和北京钢研柏苑出版有限责任公司主办,是中国冶金界历史较长的综合性科技期刊,也是反映钢铁工业科技成就的主要刊物之一。《钢铁》设有由79名国内知名学者、企业家等组成的编委会,编委会顾问徐匡迪、殷瑞钰、张寿荣、翁宇庆和编委会主任委员干勇、编委会委员王国栋、黄庆学、谢建新、毛新平等9位均为中国工程院院士。《钢铁》办刊宗旨是面向生产、结合实际;坚持为中国钢铁工业生产建设服务,报道钢铁工业的科技成就、生产工艺的技术进步、品种质量的改善提高、新技术新产品的开发应用、企业经营管理经验和专业理论应用研究等,以提高钢铁行业科技工作者和管理人员的科技水平,促进钢铁工业的发展。

2001年10月《钢铁》入选由国家新闻出版总署创建的中国《期刊方阵》;名列双百第74名。2009年以前为EI收录期刊,自1992年开始,《钢铁》连续7次入编北大图书馆核心期刊(中文核心期刊);为中信所“中国科技核心期刊”;被国际著名检索机构Scopus收录。

《钢铁》主要栏目有:综合论述、原料与炼铁、炼钢、压力加工、钢铁材料、环保与能源、装备技术、技术交流等。《钢

铁》现为月刊;大16开;页码为112页;期刊为自办发行。

1 征稿对象

从事钢铁冶金生产、管理、设计、科研、教学和钢材使用部门的科技人员、专家学者和管理人员等。

2 征稿范围

钢铁冶金领域具有创新性、高水平、有重要意义的原始性研究学术论文以及反映学科最新发展状况的文献综述和技术类文章。《钢铁》在继续报道和推广钢铁工业关键共性技术的基础上,特向作者征集涉及钢铁工业关键技术的原创文章和综合论述文章。

特别欢迎作者针对钢铁企业资源优化配置和节能减排、资源综合利用等方面撰写技术文章。

3 投稿和联系方式

请登录“钢铁期刊网”网站(<http://www.chinamet.cn>)。点击“钢铁”的图标或刊名导航条,进入期刊的首页了解详情。

联系人:尚海霞,党玉华,何 祺;

邮 箱:gangtiebianjibu@126.com;

电 话:010-62182345;

通讯地址:北京市海淀区学院南路76号;

邮 编:100081。