

# 在改革创新中不断发展的包钢钢轨

梁正伟

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 在包钢成立 70 周年之际, 文章以包钢钢轨的创新发展历程为主题, 总结了包钢钢轨在关键技术装备的转型升级, 利用稀土资源优势打造特色钢轨产品, 以及在开发钢轨新技术、新钢种, 满足国内外钢轨市场需求方面所做的工作。在 70 年的企业发展进程中, 包钢钢轨品牌建设伴随着企业发展不断走向成熟。包钢依托稀土资源和技术传承优势, 努力打造钢轨特色品牌, 支撑“稀土轨”品牌发展战略, 着力把钢轨产品建设成为国内外知名品牌, 并将品牌优势转化为企业发展的动力, 紧密结合用户需求, 持续提高钢轨产品的各项性能指标, 使包钢钢轨始终保持行业先进水平。

**关键词:** 钢轨; 稀土; 创新发展

中图分类号: F426.31

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)05-0067-06

## Continuously Developed Rail of Baotou Steel in Reform and Innovation

Liang Zheng - wei

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** On the occasion of the 70th anniversary of establishment of Baotou Steel, the works done for transformation and upgrading of key technologies and equipment of rail of Baotou Steel, creating characteristic rail products with advantages of rare earth resources as well as developing new technologies and steel grades of rail to satisfy the demands of rail market at home and abroad are summarized in this paper. In the 70-year process of enterprise development, brand building of rail of Baotou Steel becomes mature continuously with the enterprise development. Relying on advantages of rare earth resources and technological inheritance, Baotou Steel strives to create characteristic brand of rail to support the brand development strategy of “rare earth rail” and puts forth effort to building rail products as well known brands at home and abroad. Moreover, the brand advantages are transformed into driving forces of enterprise development, various property indexes of rail products are continuously improved by closely combining with the demands of user side so that rail of Baotou Steel could always maintain advanced level in the industry.

**Key words:** rail; rare earth; innovative development

包钢是我国“一五”时期建设的 156 个重点项目之一, 在包钢成立 70 周年之际, 包钢钢轨也走过了 55 年的发展历程。包钢从 1970 年生产第一支钢

轨开始, 创造了国内诸多第一, 第一支 60 kg/m 钢轨、第一支 75 kg/m 重型钢轨、第一支 60AT 道岔轨、第一支 BIV-500 拉森型钢板桩、第一支轻型薄

收稿日期: 2024-06-01

作者简介: 梁正伟(1970-), 男, 河南省洛阳市人, 硕士, 正高级工程师, 现从事钢轨、长型材材料设计、成型与控制工艺研究及生产、质量管理工作。

壁 63<sup>#</sup>大型工字钢、第一支铈稀土 60 kg/m 钢轨等。55 年来,包钢累计生产钢轨 2 400 多万 t,其中百米高速轨 300 多万 t,积淀了宝贵的钢轨生产经验。包钢钢轨不断满足日益发展的产品标准要求。国内钢轨技术标准经历了从 60 年代的国标 GB 183、80 年代的 GB 2585,到 90 年代的 TB/T 2344,直至目前的 TB/T 2344—2020,覆盖了热轧高速、普速、重载及热处理钢轨的技术标准。包钢通过装备升级,持续技术改造,引进世界一流装备,淘汰落后生产工艺,能够生产满足国际铁路联盟标准 UIC 860、欧标 EN 13674、美标 AREMA、英标 BS 11、俄标 ГОСТ、日标 JIS 等要求的钢轨。包钢已完全蜕变为一个全新的现代化钢轨生产基地,特别是在 2006 年完成百米钢轨万能轧制生产线技术装备改造后的第四年,即 2010 年钢轨产量达到 136 万 t,一跃成为世界第一。包钢钢轨的发展历程见证了中国铁路的六次大提速和中国高铁的大发展,包钢生产的高速钢轨助力京沪高铁枣庄至蚌埠间的先导段综合试验,跑出 486.1 km/h 的世界纪录,2016 年又助力中国标准动车组在郑徐高铁跑出 420 km/h 交汇时速的世界最新记录。包钢目前能生产的轨型达到 39 个,规格达到 100 余个,硬度(HB)级别覆盖 260~460,强度级别覆盖 780~1 450 MPa,长度 6~500 m。随着我国“一带一路”战略的实施,包钢具备得天独厚的地理优势,包钢钢轨正加速走向世界。

## 1 先进装备技术为钢轨品质提高保驾护航

作为我国“一五”期间重点建设的钢轨和大型型钢生产基地,包钢钢轨生产线装备能力提高的脚步从未停歇,随着国民经济发展和铁路提速的要求,列车运行最高时速由 120 km/h 提高到 350 km/h,推动钢轨技术不断发展。早期的钢轨采用模铸坯生产,工艺流程为 500 t 平炉冶炼→钢锭模浇注→初轧开坯→轨梁轧制→缓冷→精整加工→检查入库→成品发车。随着 1997 年包钢大方坯连铸机投产,率先揭开了中国采用连铸坯生产钢轨的历史,1997 年 11 月 2 日,首次采用连铸坯轧制我国第一支 60 kg/m 重轨,标志着包钢成为中国第一个采用连铸坯生产重轨的生产厂家。采取连铸工艺生产钢轨铸坯,不仅提高了金属收得率和成材率,更提高了铸坯的质量。由于钢轨钢属于高纯净度的高碳钢,钢水凝固时收缩率大,对气体含量、夹杂物级别和残留元素含

量以及疏松、缩孔和偏析等缺陷的要求非常严格,为了进一步提高钢轨铸坯质量,2006 年第一台国产动态轻压下设备在包钢 5<sup>#</sup>连铸机上安装,之后大方坯连铸机开展了系列装备改进和工艺技术攻关,采用了液压振动、结晶器电磁搅拌、凝固末端动态轻压等多项国际先进技术,实现了全程保护浇注、恒拉速稳定浇注,有效地控制了铸坯的外形尺寸及中心偏析、疏松等内部质量,所生产出的铸坯成分稳定,组织均匀,表面无缺陷<sup>[1-3]</sup>。在炼钢装备及工艺技术提高的同时,钢轨轧制装备及工艺技术也有了质的飞跃,轨梁厂先后于 2006 年投产了 1<sup>#</sup>中型万能轧钢生产线,年生产能力为 90 万 t,2013 年投产了 2<sup>#</sup>大型万能轧钢生产线,年生产能力为 120 万 t,主体设备均从德国西马克梅尔(SMS Meer)公司引进,年总生产能力达到 210 万 t。这两条生产线也是包钢为提高轨梁材产品档次和加快产品升级换代而建设的精品线。通过消化吸收和不断创新,开展了百米高速轨产业化关键技术研究等工作,通过对步进式钢坯加热、百米钢轨万能张力连轧、在线廓形尺寸检测、轧制力预报、重轨轧制过程组织演变、钢轨冷却预弯、平立复合矫直、钢轨全尺寸内外部质量检测等技术攻关<sup>[4-6]</sup>,开发了五大关键技术、获得了十项专利技术等成果。经过产线升级改造,包钢已具备生产高纯净度、高表面质量、高尺寸精度、高平直度、低残余应力“四高一低”的 100 m 长尺钢轨的能力。2014 年又淘汰了落后的钢轨离线淬火生产线,建成钢轨在线余热淬火生产线,设计年生产能力为 40 万 t,使包钢具备了生产高强耐磨重载铁路用轨的能力。2009 年在国际上率先实现钢铁企业厂内生产 500 m 成品长钢轨技术自主集成,瞄准产业大型化、专业化,产业链集成化要求,将钢轨全流程的生产技术集成,有助于推动铁路建设跨越式发展。世界领先的硬件装备和不断创新的技术迭代,保证了过硬的产品质量和未来铁路发展的需求,也为培育钢轨品牌奠定了坚实的基础。

## 2 发挥资源优势打造包钢钢轨特色品牌

包钢始终积极践行可持续发展的理念,依托白云鄂博铁和稀土共生的资源优势,研发自主知识产权的稀土钢轨<sup>[7-14]</sup>。20 世纪 90 年代包钢开始对“稀土在钢中应用”进行探索。1992 年 7 月,试制成功我国第一支稀土高强度 60 kg/m 钢轨;1999 年 5 月,

首次采用连铸坯成功轧制我国最大断面的重载铁路用 75 kg/m 铈稀土钢轨。从 2010 年开始,包钢进入了稀土钢品牌建设的重要时期,着力在板、管、轨、线“四大精品线”中打造稀土钢精品,产品的高深冲性能、抗腐蚀性、耐磨性、拉拔性等获得认可。2018 年包钢股份联合内蒙古科技大学和中国铁道科学研究院金属及化学研究所,开展重载铁路用新型钢轨研发工作。科研人员对钢轨成分、冶炼、加热、轧制、热处理、矫直等工艺技术进行深入研究,开展中试研究、工业试制、第三方检验评价等。经过不懈努力,成功开发出 380HB 和 400HB 两个高硬度等级稀土钢轨产品,各项性能通过相关检测,产品抗拉强度达到 1 300 MPa 以上,断后延伸率及断裂韧性指标均未降低,耐磨性较 U75VH 钢轨提高 20% 以上。随着列车的轴重和运量逐年增加,需要开发新型高强度钢轨以满足使用要求,延长钢轨使用寿命和减少线路维护。包钢通过对稀土钢轨的成分优化与热处理工艺研究,成功开发出第三代稀土热处理钢轨,钢轨的抗拉强度  $R_m \geq 1\ 300\ \text{MPa}$ ,断后延伸率  $A \geq 10\%$ ,踏面硬度(HB)为 380~430。试验研究表明,稀土可以变性夹杂物、减小珠光体片层间距和细化奥氏体晶粒,从而改善高碳重轨钢的韧性。新型热处理稀土钢轨可显著改善钢轨耐磨性和抗接触疲劳性能,适用于重载铁路和小曲线路段。2023 年内蒙自治区重大科技项目“新一代高强耐磨重载铁路用稀土热处理钢轨系列研究与开发”验收评审会在包钢股份召开,项目通过验收。同年包钢成功批量生产出口 H400 级过共析高强耐磨钢轨,标志着包钢钢轨在国际高端重载铁路市场推广应用中取得历史性重大突破,也标志着包钢股份钢轨研发生产能力进入世界一流水平。包钢股份还成立了以西部路网为主的科技服务组,先后奔赴兰新线、青藏铁路、唐包线、朔黄铁路等现场,定期对包钢稀土轨产品线服役情况进行跟踪调研。

随着“两个稀土基地”建设工作的推进,稀土在钢中的应用研究再次掀起高潮。科研人员在实验室开展了不同稀土含量的热轧态 U75V 钢轨冶炼及轧制研究,重点针对轧后钢轨低温冲击性能、低温断裂韧性进行对比分析。试验结果表明,热轧态 U75V 钢轨加入 0.005% 稀土 Ce 后,钢轨常温冲击韧性可提高 30% 左右, -60 °C 低温冲击韧性可提高 60% 左右;钢轨 -20 °C  $K_{IC}$  平均值提高 14% 左右,钢轨 -60 °C  $K_{IC}$  平均值提高 15% 左右,稀土的加入进一

步提高了热轧态 U75V 钢轨低温韧性<sup>[15]</sup>。在工业生产条件下研究了钢中加入稀土对钢轨低温冲击性能的影响。结果表明,稀土处理的钢轨具有良好的低温韧性,其 -40 °C 冲击功比不加稀土的试验钢高出 1 倍<sup>[16]</sup>。针对用户需求开发的耐腐蚀稀土钢轨的耐腐蚀性能相比 U75V 钢轨提高 40% 以上,主要用于沿海、隧道、潮湿等环境下铁路线路,利用稀土微合金化提高钢材耐腐蚀性能,同时钢轨强度、硬度也可满足线路要求,产品具有良好的耐腐蚀性能<sup>[17]</sup>。针对高寒地区铁路运营环境和钢轨服役性能要求,开发的耐低温稀土钢轨 -40 °C 轨头冲击功平均达到 14 J,用于寒冷地区铁路线路及其他对韧性要求高的线路,该钢种利用稀土提高钢的耐低温作用,提高产品的低温冲击性能<sup>[18]</sup>。

### 3 面向市场需求开发钢轨新技术

轨道交通工程是《中国制造 2025》十大重点领域之一,为满足西部开发和国家重大项目需求,通过“产、学、研、用”深度合作,开展“包钢 500 米成品钢轨生产技术创新与产业化应用”项目研究。通过全工序准时化生产制(JIT)、高洁净度冶炼、高精度轧制、百米钢轨组织均匀性控制、焊接接头稳定性研究,建立了钢铁企业生产 500 m 成品钢轨技术体系和规模化、标准化、连续化、绿色化生产的新模式。在国际上率先获得钢轨产品全生命周期评价(LCA),主要创新成果是在国际上率先自主集成钢铁企业厂内生产 500 m 钢轨技术,显著提高了生产、供应效率和成品质量,缩短 500 m 钢轨生产制造流程,实现钢轨从生产到线路铺设“JIT”,解决了百米钢轨多次倒运中存在的容易损伤钢轨、供应效率低、运输成本高等问题。形成了 500 m 成品钢轨冶炼的精炼深脱硫技术,采用全新的高钙钡脱氧合金脱硫,钢轨  $\omega[S] \leq 0.005\%$ ;开发钢轨氢含量控制系列技术并应用,实现控温缓冷,成品钢轨  $\omega[H] \leq 0.0003\%$ ,硫含量、氢含量控制水平国内领先。率先采用电磁感应中间包生产钢轨坯,提高了连铸生产稳定性和钢轨坯内部质量,钢轨坯等轴晶率达到 42%,稳定控制钢轨 C 偏析指数  $\leq 1.06$ ,Mn 偏析指数  $\leq 1.03$ 。形成了满足无缝线路要求的钢轨尺寸精度、表面质量、残余应力等控制技术,采用全万能轧制提高钢轨全长尺寸精度和组织性能稳定性,百米钢轨头尾两端轨高尺寸偏差不大于 0.40 mm,端部高低点差不大于 0.20 mm,百米钢轨合格率  $\geq 95\%$ 。

揭示了500 m成品钢轨焊接过程中灰斑和微裂纹形成机理,阐明 Mn、S 对灰斑和推凸裂纹形成的重要影响,通过控制 Mn、S 含量和焊接工艺优化,首家采用钢轨端头打磨机器人系统,提高接头质量,确保落锤合格率达到 100%,实现接头合格率 $\geq 99.5\%$ 。标志性产品大规模铺设于青藏线、兰新二线、川藏铁路拉林线及大秦铁路等大批国家重大铁路工程,填补了钢铁企业不能直接生产500 m成品钢轨的空白。项目通过中国钢铁工业协会组织的成果评价,总体达到国际先进水平,形成授权专利 18 项,受理专利 9 项,发表文章 25 篇,参与 4 项标准制(修)订。从 2012 年到 2022 年,累计发运 500 m 成品钢轨 2.2 万 km,270 余万 t,完成 30 余条线路铺设,经济社会效益显著。

贝氏体钢轨被誉为“21 世纪的钢轨”,一是具有优良强韧性,强度在 1 280 ~ 1 450 MPa 之间;冲击功可达 150 J,是珠光体钢轨的 10 倍左右;断裂韧性( $K_{IC}$ )可达 110 MPa $\cdot$ m<sup>1/2</sup>,是珠光体钢轨的 3 倍以上。二是具有较高安全性能,轨头探伤异常至发现裂纹需 10 天以上,且不会向轨腰、轨底扩展,即钢轨不会发生脆断。三是具有优良的服役质量,表现在具有优良的抗接触疲劳性能,钢轨服役后表面质量优良,不存在剥离掉块等伤损,贝氏体道岔钢轨使用寿命是珠光体钢轨的 3 ~ 4 倍以上。但这种新型钢轨在生产中存在强度和韧性难以兼得的技术瓶颈,包钢联合清华大学经过 10 多年的攻关,已研发出兼具高强韧性和高耐磨性的高等级贝氏体钢轨,形成了 1 280 MPa 和 1 380 MPa 贝/马复相贝氏体钢轨成分体系;形成了百米钢轨(包括 25 m)集成生产工艺,涵盖冶炼、轧制、在线热处理、回火及焊接等相关技术。基于多年的研究及应用,包钢制定了国际上首个关于贝氏体钢轨的技术标准 Q/CR 913—2022《U20Mn2SiCrNiMo 贝氏体钢轨技术条件》。从 2004 年至 2023 年,包钢贝氏体钢轨合计生产约 7.7 万余 t,断面包括 43 kg/m、50 kg/m、60 kg/m、75 kg/m、60N、75N、50AT、60AT、BT76 等 9 种规格。包钢贝氏体钢轨道岔产品,已在中国铁路上海局集团有限公司、中国铁路北京局集团有限公司、中国铁路济南局集团有限公司、中国铁路太原局集团有限公司、中国铁路郑州局集团有限公司、中国铁路武汉局集团有限公司、中国铁路成都局集团有限公司等 18 个铁路局集团有限公司,大秦铁路、朔黄铁路等重载线路,北京地铁等城市轨道交通线,港口、厂矿企业专

用线上应用,具备了全系列轨型的批量生产能力,为今后我国铁路向高等级发展提供了支撑。

包钢钢轨不仅着眼于国内铁路发展,同时也在走向世界迈出了更加坚实的步伐。国际钢轨市场普遍以欧标 EN 13674.1 和美标 AREMA 为钢轨采购标准,据统计采用这两种标准的国家和地区覆盖全球一半以上,钢轨需求量逐年增加,市场应用前景广阔。包钢按照出口钢轨的技术要求开发了系列钢轨新品种<sup>[19-21]</sup>,其中采用欧标中 R260、R350HT 生产的钢轨已通过欧盟 TSI 铁路协会的认证,为打开欧标钢轨国际市场奠定了良好的基础。北美铁路以货运为主,随着重载运输的发展,列车轴重在不断增大,钢轨的磨损速度也在不断增加,因此需要提高钢轨的强度和硬度,从而提高钢轨的耐磨性能和使用寿命。为此包钢相继开发出了欧标中 R320Cr、R350HT、R370Cr 等钢轨和美标中 SS、IH、LH 等钢轨,成功批量生产美标 IH 325HB 热轧钢轨和欧标 H400 级过共析在线热处理高强耐磨钢轨,各项性能完全满足标准要求和用户需求,通过了 SGS 国际检测认证,钢轨产品出口到美国、加拿大、墨西哥等国家。作为国内首发,填补了两个品种钢轨出口空白,标志着包钢钢轨在国际高端重载铁路市场推广应用中取得历史性突破,提高了包钢钢轨产品国际市场竞争力。

#### 4 包钢钢轨卓越的产品实物质量与广泛应用

包钢钢轨生产线是国内钢轨生产企业中率先实现钢轨全万能轧制的产线之一,钢轨产品的实物质量一直得到用户信赖。1986 年,50 kg/m 钢轨荣获原冶金部“优质产品”;1987 年,60 kg/m 钢轨荣获原冶金部“优质产品”。一直以来通过不断的产品升级换代、工艺优化和持续的技术攻关<sup>[22-25]</sup>,2005 年,包钢铁路用热轧钢轨荣获“中国名牌”;2009 年,包钢铁路用热轧钢轨荣获冶金行业“品质卓越产品”。2009 年 10 月 21 日,在 1<sup>#</sup>中型万能轧钢生产线轧制首批供京沪高铁客运专线用 350 km/h U71MnK 60 kg/m 钢轨。2012 年,高速铁路用钢轨首家荣获我国冶金产品实物质量“金杯优质产品”“金杯特优产品”。包钢生产的高速铁路用钢轨以其卓越的品质,多次被中国钢铁工业协会评为冶金产品实物质量“特优质量奖”;43 ~ 75 kg/m 铁路用热轧钢轨被中国质量协会冶金分会评为冶金行业

“品质卓越产品奖”。“500米成品钢轨生产技术创新与产业化应用”项目,荣获2022年度内蒙古自治区科学技术进步二等奖。

包钢钢轨凭借卓越的产品实物质量在国内市场有较高的占有率,其中350 km/h的百米轨占国内三分之一的市场份额。

包钢钢轨广泛应用于国内外众多重大铁路工程,为世界速度最高的京沪高铁提供了62%的钢轨,为世界运营里程最长的京广高铁提供了超过全线50%的钢轨,为全球海拔最高的青藏铁路提供了全线的钢轨,向连接内地与西部边境的兰新铁路提供了全线58.9万t的百米钢轨。独家为全球首条环沙漠铁路建设全程供轨,共2712 km,线路的建设填补了世界铁路建设史上的一项空白。为西藏首条电气化拉林铁路全线供轨,共435 km,大大推进“世界屋脊”的运力,为雪域高原高质量发展注入了新的动力。尤其是在供西部路网建设中,全部采用包钢直供的500 m成品钢轨,不仅提高了工程进度,关键是减少了线路钢轨的二次倒运,降低了碳排放,更是践行了绿色、低碳的新发展理念。

包钢生产的铁路用钢轨除了应用在京沪高铁、京广高铁、哈大高铁、郑西高铁、郑徐高铁、兰新高铁、青藏铁路、大秦铁路、朔黄铁路等国家重点铁路之外,还瞄准国际市场,从2000年首次出口钢轨至今,已生产出口钢轨约100余万t,出口至美国、印尼、墨西哥、巴西、西班牙、匈牙利、老挝等32个国家。作为内陆钢铁企业,包钢聚焦“一带一路”沿线国家和地区,积极践行“互联互通”。3.8万t包钢钢轨铺设在“中老铁路”,铸牢了两国友谊;2.3万t包钢钢轨铺设的“匈赛铁路”,将匈赛两国首都旅程由8 h缩短至3 h,提高了“匈赛效率”;蓬勃发展着的包钢钢轨,进一步拓展了“一带一路”向西新通道,日前正积极推动落实中吉乌铁路建设项目,中标了13万t大单,加快形成内外高效互通的新局面。

## 5 结束语

55年来,包钢钢轨始终做为公司的拳头产品,秉承和发扬了“团结、坚韧,求实、奋进”的钢轨精神,本着“生产一代、开发一代、储备一代”的战略规划,一贯致力于“技术研发、科学实践、品质提升、服务增值”的发展理念,技术上百家争鸣,优中选优;生产上求真务实,艰苦奋斗。正是凭借着这种不屈不挠的精神,包钢钢轨为国家铁路大建设、经济大发

展做出了巨大贡献。但辉煌的历史已经成为过去,我们要清醒地认识到,要成为国内钢轨生产行业的领军企业,打造成为全球最大最强的钢轨生产供应基地还有很大差距。在今后的发展进程中,包钢钢轨品牌建设伴随着企业发展不断走向成熟,紧紧依托稀土资源和技术传承优势“突围打样、做强包钢”,努力打造包钢钢轨特色品牌,支撑“稀土轨”品牌发展战略,并将品牌优势转化为企业发展的动力,紧密结合国内外用户需求,持续提高钢轨产品的各项性能,使包钢钢轨始终保持行业先进水平。

## 参 考 文 献

- [1] 郭利宏,刘阳,薛虎东.国内重轨生产工艺现状[J].包钢科技,2023,49(3):67-71.
- [2] 白国君,白春英,王莹.高速重轨连铸坯质量控制技术研究[J].包钢科技,2015,41(2):20-23.
- [3] 史凤武,李峰,樊精彪.动态轻压下工艺在重轨钢生产中的应用效果分析[J].包钢科技,2009,35(S2):41-43.
- [4] 郭利宏,梁正伟,乌云达来.新一代钢轨制造装备及特点[J].包钢科技,2017,43(4):53-56.
- [5] 梁正伟,姚杰.自动辊缝控制与微张力控制在重轨万能轧机的应用[J].铁道技术监督,2019,47(6):49-52,58.
- [6] 苏航,陈林,魏軼彬.矫直工艺对热处理钢轨残余应力的影响[J].包钢科技,2023,49(4):63-67.
- [7] 张智,洪海峰,智建国,等.U76CrRE钢轨的热处理[J].金属热处理,2010,35(3):119-121.
- [8] 王业双,刘馨宇,苏航,等.U76CrRE重轨钢热处理工艺优化及力学性能分析[J].金属热处理,2022,47(11):64-69.
- [9] 薛虎东,李智丽,王嘉伟,等.相变温度对U76CrRE钢轨组织和性能的影响[J].包钢科技,2018,44(1):35-37.
- [10] 王嘉伟,赵桂英,涛雅,等.包钢新型重载铁路用稀土钢轨研发[J].包钢科技,2022,48(4):46-50.
- [11] 王慧军,涛雅,陈林,等.U76CrRE钢轨热处理过程组织控制及性能[J].金属热处理,

- 2022,47(5):161-165.
- [12] 陈琳,达木仁扎布,王永明,等. U76CrRE 钢轨在线热处理工艺研究[J]. 包钢科技, 2021,47(2):1-5.
- [13] 谌智勇,翁举,杨乐. 包钢重轨钢稀土加入工艺实践[J]. 包钢科技,2019,45(6):18-20.
- [14] 曹晓明,班华,高明星. 包钢 U76CrRE 钢轨生命周期评价[J]. 包钢科技,2019,45(2):30-32,49.
- [15] 张凤明,梁正伟,薛虎东,等. 稀土 Ce 对热轧 U75V 钢轨低温韧性的影响[J]. 包钢科技, 2022,48(4):51-54.
- [16] 董捷,赵桂英,薛虎东,等. 稀土对钢轨低温韧性的影响研究[J]. 包钢科技,2020,46(5):64-67.
- [17] 郑瑞,边影,苏航,等. Ce 微合金化钢轨组织及耐腐蚀性能研究[J]. 包钢科技,2019,45(6):59-61.
- [18] 薛虎东,边影,彭泽清. 高寒地区铁路用新型珠光体钢轨研发[J]. 包钢科技,2024,50(1):60-64.
- [19] 李平,智建国,李德虹,等. 出口 R350HT 热处理钢轨试制[J]. 热加工工艺,2012,41(24):208-210.
- [20] 李平,周乐育,梁正伟,等. 美标 SS310HB 钢轨的试制[J]. 轧钢,2018,35(1):42-45.
- [21] 王嘉伟,赵桂英,谌智勇,等. 包钢出口孟加拉 R320Cr 钢轨生产技术研究[J]. 包钢科技,2021,47(4):59-62.
- [22] 王嘉伟,梁正伟,王永明,等. 美标 380HBW 级别 LH 高强热处理钢轨关键技术研究[J]. 包钢科技,2024,50(2):69-73.
- [23] 蒋宏,唐建平,赵明泉. 包钢 350 km/h 钢轨用连铸坯的生产工艺优化[J]. 包钢科技, 2011,37(5):31-33.
- [24] 梁正伟,李智丽,田荣斌,等. U71MnG 高速轨固定闪光焊接接头分析[J]. 包钢科技, 2020,46(3):1-5.
- [25] 董捷,梁正伟,王永明,等. 包钢 U71Mn 钢轨 Mn 含量优化研究[J]. 包钢科技,2022,48(5):65-69.

(上接第 40 页)

### 参 考 文 献

- [1] 付薇,岳军,刘雅政. 罩式退火工艺对 Nb + Ti - IF 钢性能的影响[J]. 鞍钢技术,2010(1):44-46.
- [2] 于守巍. IF 钢碳、氮含量控制研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学,2011.
- [3] 马多. 细晶高强 IF 钢退火工艺下再结晶组织形成机理的研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2011.
- [4] 高鹏飞. 退火温度对超深冲 IF 钢性能及组织的影响[J]. 热加工工艺,2022,12(2):22-24.