

# 余热淬火热处理钢轨的质量控制

达木仁扎布<sup>1</sup>, 张勇军<sup>1</sup>, 梁正伟<sup>2</sup>, 郭利宏<sup>1</sup>, 李智丽<sup>2</sup>, 李亮军<sup>1</sup>

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司轨梁轧钢厂, 内蒙古 包头 014010;  
2. 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:** 热处理工艺改变钢轨的微观组织结构, 显著提升其力学性能、耐磨性和抗疲劳性能, 从而延长钢轨的使用寿命。在线余热淬火热处理工艺因其具有高效率 and 节能优势成为钢轨生产工序的重要环节。文章详细讨论了钢轨热处理过程中的关键控制因素, 包括化学成分稳定性、钢坯加热和均热工艺、在线冷却工艺、设备精度和工艺装配质量等, 对钢轨组织结构和各项性能的影响。通过对影响因素的精细化控制, 可以保证钢轨质量的稳定性, 满足现代化铁路建设的需求。

**关键词:** 钢轨; 热处理; 余热淬火; 过程质量

中图分类号: TG156.5

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2026)02-0022-04

## Quality Control of Heat-treated Rail with Remaining Heat Quenching

Da Murenzhabu<sup>1</sup>, Zhang Yongjun<sup>1</sup>, Liang Zhengwei<sup>2</sup>,  
Guo Lihong<sup>1</sup>, Li Zhili<sup>2</sup>, Li Liangjun<sup>1</sup>

- (1. Rail and Beam Rolling Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd.,  
Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;  
2. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The microstructure of rail could be changed as well as mechanical properties, wear resistance and fatigue resistance of rail are significantly improved with heat treatment process so that service life of rail is increased. The online heat treatment process of remaining heat quenching has become the important part in production process of rail due to its advantages such as high efficiency and energy conservation. In the paper, it is discussed the effects of such key control factors in heat treatment process of rail as the stability of chemical compositions, heating and soaking processes of billet, online cooling process, equipment accuracy and process assembly quality on microstructure and various properties of rail in detail. The quality stability of rail could be guaranteed through the fine control of influence factors, which could meet the demands of modern railway constructions.

**Key words:** rail; heat treatment; remaining heat quenching; process quality

现代化铁路建设对钢轨实物质量提出了更高要求, 高强耐磨钢轨成为高速、重载铁路的关键材料。

采用热处理工艺改变钢轨的微观组织结构,显著提升其力学性能、耐磨性和抗疲劳性能,从而延长钢轨的使用寿命<sup>[1]</sup>,热处理工艺的控制精度对余热淬火钢轨性能具有决定性影响,任何环节的工艺控制不当都可能导致性能波动或质量缺陷。因此,在工业规模化生产条件下,深入研究钢轨热处理工艺的控制方法,保证钢轨的生产顺行和质量稳定性,对于我国铁路建设具有重要意义。

## 1 钢轨热处理工艺的进步

钢轨热处理工艺的起源可追溯至 20 世纪中期。初期主要采用离线热处理工艺,即钢轨完成

轧制并冷却后,按工艺要求对冷态钢轨重新加热、保温及控制冷却处理,其缺点是钢轨二次加热增加能源消耗,产品生产周期延长。随着科技进步,特别是计算机与自动化控制技术的突破,在线余热淬火热处理工艺应运而生。在线热处理技术的引入使得钢轨轧制后利用余热即可完成热处理,称之为余热淬火工艺,极大地简化了生产工序并提高了生产效率<sup>[2]</sup>,彻底取代离线淬火工艺,成为唯一选择。如图 1 所示,其工艺过程是通过钢坯加热、保温及轧制成型后,充分利用钢轨本身的余热直接进入淬火线,通过不同调控手段实现快速冷却,使得钢轨获得更致密、均匀的组织结构和优异的综合性能。

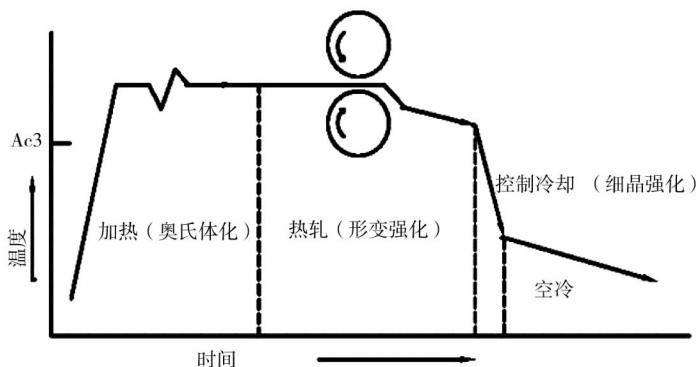


图 1 在线热处理钢轨强化过程示意图

在线余热淬火热处理工艺凭借与轧制节奏相匹配的高效的生产流程及显著的节能优势等,受到业界关注并获广泛应用。包钢百米钢轨全长余热淬火生产线融合喷风冷却与喷雾冷却两种新型冷却工艺,成功研发了不同钢种、不同断面的热处理钢轨,并实现批量生产。相比之下,离线热处理工艺虽能满足钢轨基本性能需求,但存在生产效率低、能耗高及组织性能均匀性难以得到保障等不足,限制了它在钢轨规模化工业生产中的应用。离线淬火工艺更适合用于对特殊性能要求较高的机械零部件的处理,通过精准调控加热温度、保温时间及冷却速度,可获得更均匀的微观组织与优异的综合性能。总体而言,钢轨热处理工艺的持续进步为铁路运输安全与效率提供了坚实的基础材料保障。

## 2 热处理工艺的主要影响因素与控制方法

### 2.1 化学成分

钢轨的化学成分需选择合适的控制范围,窄范围控制能够有利于保持热处理工艺的一致性。目前,对于比较常见的 U71MnH、HH 等碳素钢轨而言,简单地对 C 元素进行内控很难保证钢轨组织和性能的稳定,还需要严格控制 Si、Mn 元素含量,即综合控制化学成分才能有效;而 U75VH、U76CrREH、R370CrHT、LH 等低合金钢轨除了对 C、Si、Mn 等元素含量进行严控外,还需对其中含 Cr 元素的钢轨按标准成分下限控制 Cr 含量,降低其淬透性,保证钢轨珠光体组织稳定性。另外,工业规模化生产实践表明,含 V 元素的钢轨应按 V 标准成分的中上限控制,有效发挥其析出和固溶强化作用,以及在高温下抑制奥氏体晶粒长大,从而获得细小均匀的珠光体组织和良好的性能指标<sup>[3]</sup>,有助于改善钢轨内部组织和性能稳定性。

### 2.2 钢坯加热

钢坯的加热与保温是钢轨热处理工艺过程中的关键环节,规范执行钢坯的加热工艺规程对于保证

热处理钢轨的组织性能至关重要。在综合考虑钢种的化学成分、热处理特性、轧制工艺及设备能力的基础上,确定钢坯的加热温度和加热时长最佳控制范围,确保加热钢坯实现充分奥氏体化和组织均匀化。研究表明,过低的加热温度导致奥氏体化不完全,从而在后续冷却过程中形成非均匀的组织结构,影响钢轨的力学性能<sup>[4]</sup>。另外,过高的加热温度则可能引发晶粒粗化现象,进而削弱钢轨的强度和韧性;加热保温时间过长,可能引起晶粒过度生长,而加热保温时间不足则可能导致钢轨内部组织未能完全转变,从而对钢轨的力学性能产生不利影响<sup>[5]</sup>。不仅如此,还需要防止钢坯加热温度波动,如果钢坯温度波动范围太大,不仅影响轧制工序质量,还对在线淬火工艺实施效果产生不利影响。通常情况下,加热工序每批生产温度波动不超过 30 ℃,同时将每一支钢坯的通长温差控制在 30 ℃ 以内。通过控制轧制工序开轧温度稳定性,保证钢轨余热淬火线来料温度稳定性,即钢轨淬火开始冷却温度的稳定性。此外,还需结合不同环境条件和生产实际对加热工艺进行动态优化或差异化控制。例如,针对不同季节环境温度变化采取不同加热制度,比如在北方地区冬、春季等寒冷天气,钢坯轧制完成后到淬火线的过程中温度损失大,为确保热处理效果,开轧温度控制相比夏、秋季生产时高 20 ~ 30 ℃。生产中遇换辊或者中途检修时,加热炉均热段保留足够的空步距,以防止钢坯在炉门口停留时间过长造成低温。当恢复生产时,根据停轧时间合理处置低温钢,回炉或将其打再热坯。

### 2.3 余热淬火工艺

余热淬火工艺是决定钢轨轧后组织演变与综合性能的核心工序。在热处理过程中,冷却速度的变化会直接影响钢中奥氏体的相变过程,从而决定最终的组织结构和性能表现。较高的冷却速度能够促进马氏体或贝氏体的形成,显著提升钢轨的强度和硬度;较低的冷却速度则倾向于生成珠光体组织,虽然硬度较低,但具有良好的韧性<sup>[2]</sup>。钢轨淬火工艺的确定及控制,主要取决于钢种的化学成分和热处理特性、钢轨的规格尺寸以及冷却机组的能力。工业试制前,需要通过实验室研究测定不同钢种的过冷奥氏体连续冷却转变曲线(CCT曲线)和过冷奥氏体等温转变曲线(TTT曲线),以确认珠光体组织

转变的临界冷速和获得细珠光体的“鼻子”温度,并结合工业试验进一步调试和优化热处理工艺方案,确定不同钢种、不同断面钢轨的适宜热处理生产工艺。钢轨在线冷却工艺控制要点除了化学成分、加热温度外,还包括冷却介质、介质压力及喷淋冷却时长等参数,这些因素共同决定了钢轨冷却均匀性和生产效率<sup>[6]</sup>。另外,环境因素对钢轨热处理工艺的影响不容忽视,如环境温度和湿度的变化会影响工艺参数的准确性,从而影响奥氏体相变行为和钢轨成品力学性能<sup>[7]</sup>。就风冷工艺而言,由于冬、春季生产车间环境温度低,与夏、秋季相比风冷介质温度低 20 ~ 35 ℃ 左右。在冬、春季生产的时候,或遇淬火线来料温度偏低,投入在线中频感应加热器对钢轨全长或局部进行在线温度补偿,以保证余热淬火工艺开冷温度控制要求。

### 3 热处理设备控制

钢轨在线冷却工艺过程的稳定性高度依赖余热淬火线设备系统的精度和可靠性。作为工艺实施的核心载体,余热淬火线设备和设施包括输送辊道、翻钢机组、冷却机组、横移装置等。余热淬火生产线设备是工艺执行的物理基础,应做好点检和定期维护,防止设备功能缺失或“带病”生产,保证设备处于良好运行状态。

设备系统按几个方向进行重点维护。输送辊道能正常转动,转速保持一致,消除“死辊”、自由辊。辊道高低一致,辊身平行。辊面保持光洁,无凸棱,无严重磨损;保证翻钢机组全部投入使用,高低平齐,伸出、托起、翻转、归位等动作保持同步,与钢轨接触部位工作面保持光洁,无凸棱,无严重磨损;冷却机组属于余热淬火线主体设备,其关键组件有喷嘴、导卫、夹送装置等。每批生产前,线下全面检查和维护冷却机组,及时恢复封堵糊死、断根刮掉的喷嘴,保证喷嘴完好无损气流畅通。另外,导卫和夹送装置滚动轮工作表面保持光洁,无凸棱,无严重磨损。滚动轮选用合适的润滑方式,确保旋转自如;横移装置高低平齐,动作同步,与钢轨接触部位工作面保持光洁,无凸棱,无严重磨损,如图 2 所示。

不断提升设备系统的自动化控制水平,优化控制程序时序,均衡控制过钢节奏,减少人为操作干扰,也是保证淬火线稳定顺行的关键所在。

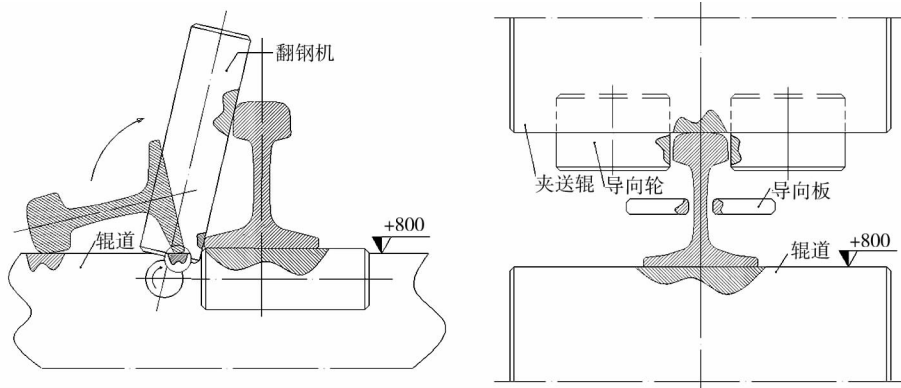


图2 钢轨与淬火线设备接触部位示意图

## 4 工艺装配质量

工艺装配质量决定工艺参数的传递效率,工艺装配质量的稳定性是准确执行热处理钢轨在线冷却工艺的重要保障。余热淬火线的工艺装配主要涉及导卫夹送装置、风箱喷嘴高度的装配精度。喷嘴作为冷却系统的核心部件,其与钢轨的间距在钢轨全长方向上应控制在要求范围内。研究表明,适当加大喷嘴管径和优化喷射长度可以增强冷却效果,提高钢轨金相组织的均匀性<sup>[7]</sup>。导卫在钢轨输送方向上密集分布,其定位精度直接影响钢轨在冷却过程中的运行稳定性。导卫通过上下夹送辊和侧导板的协同作用,有效约束钢轨在淬火机组内的上下跳动和左右偏移。导卫间隙大,可能导致钢轨定位不准确而产生偏移,轻则刮蹭喷嘴,重则撞坏设备;导卫间隙小,则可能与钢轨发生摩擦,导致钢轨失速或卡阻。每批生产前,导卫位置和间隙需结合钢轨规格及喷嘴高度进行精确计算,并使用样轨进行实际验证,一方面保证钢轨平顺输送,不发生偏移和卡阻;另一方面保证机组设备的安全。

## 5 监控技术

在工业规模化生产中,温度是判断钢轨热处理后组织性能的关键参数。采用自动化控制手段不仅能提高生产效率,而且能保证钢轨热处理工艺满足工艺规程要求。

通过先进的检测技术手段对冷却介质、钢轨移动速度、钢轨温度、制备精度等进行全程监测和实时反馈。

针对冷却介质,就风冷工艺而言,采用风压调节阀和压力传感器实时监测并反馈冷却介质的压力变

化,及时发现风压异常波动,确保气流输出的稳定性。

针对钢轨速度,采用高精度激光测速装置(精度0.01 m/s)实时监控每支钢轨的运行速度,防止钢轨失速或者偷停,以免造成钢轨冷却不均匀。

针对钢轨温度,根据钢轨淬火处理不同阶段分别选用高精度在线红外测温仪或者双波段测温仪,实时监测每支钢轨通过不同冷却段的温度变化,控制钢轨全长轨头温度波动在 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。

针对制备精度,高精度数控机床具备全自动检测和数据采集功能,检测制备精度高,准确反映产品质量和生产工艺的实际状况,消除了人为因素造成的检测误差或失真。

## 6 结束语

余热淬火线作为在线热处理钢轨的生产工艺装备,配合精细化控制钢轨的化学成分稳定性、设备精度、工艺装配质量、工艺制度以及工艺过程等方面,才能生产出高质量钢轨,以满足现代化铁路建设的发展要求。

## 参 考 文 献

- [1] 韩志杰,李钧正,武东东.高品质热处理钢轨开发[J].南方金属,2021(4):7-9.
- [2] 白国君,杨吉春,梁文京,等.稀土钢轨在线热处理冷却工艺研究[J].高速铁路新材料,2022,1(5):29-33.
- [3] 周清跃,王树青,张银花,等.热处理钢轨若干问题的探讨[J].中国铁道科学,2005,26(1):72-77.

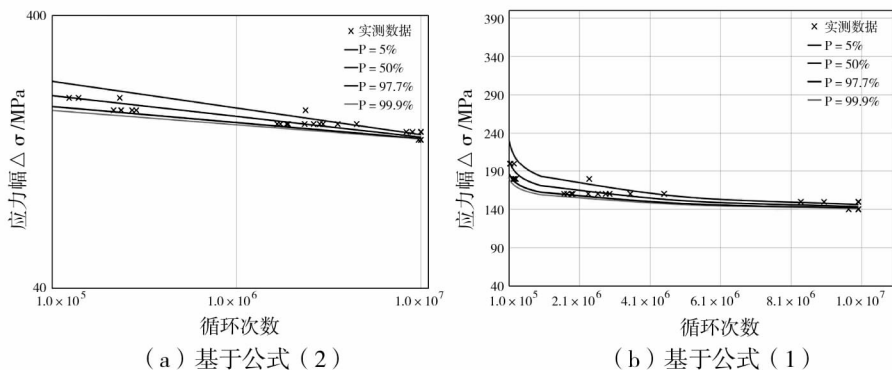


图 7 焊接接头在不同存活率下的疲劳极限曲线(应力幅表征)

### 3 结束语

通过一系列疲劳试验,拟合出 Q420NE 钢板焊接试板的焊接接头在最小加载应力与最大加载应力比值为 0.5 的疲劳极限曲线。当应力循环次数设定为  $10^7$  次时,焊接接头实测的最大疲劳应力约为 300 MPa,对应的应力幅为 150 MPa,其对应的存活率为 50%;当存活率为 97.7% 时,其最大疲劳应力约为 284 MPa,对应的应力幅为 142 MPa。

#### 参 考 文 献

[1] 张鹏林,李军,徐生东,等. 风电塔筒用 Q355E 钢焊接接头在模拟酸雨环境下的腐蚀特性研

究[J]. 机械研究与应用,2024,37(5):6-12.

[2] 张晨,张保成,张开升,等. 海上漂浮式风电机组塔筒优化方法研究[J]. 太阳能学报,2024,45(6):652-660.

[3] 王宇航,周绪红,杨琳,等. 风电机组支撑结构技术发展现状及趋势[J]. 钢结构(中英文),2024,39(10):1-13.

[4] 祝武杰,莫福涛,郑龙. 海上风电风机机舱及轮毂组合体吊装施工技术研究[J]. 水电与新能源,2024,38(12):69-71.

[5] 王晓理,李建科,杨凤志,等. 在役风电项目经济寿命分析[J]. 能源工程,2025,45(1):27-31.

(上接第 25 页)

[4] 董嘉兵,王慧军,陈林,等. 新型 H380 级别高强度钢轨热处理工艺的数值模拟[J]. 特殊钢,2020,41(4):1-5.

[5] 费俊杰,周剑华,董茂松,等. 全长在线热处理钢轨生产工艺研究及产品开发[J]. 铁路技术创新,2019(2):69-75.

[6] 陈科澎,汪洋,张惠泽英,等. 百米 U75V 钢轨在线热处理工艺优化[J]. 热处理技术与装备,2024,45(2):7-11.

[7] 李海涛. 关于在线热处理技术优化钢材理化性能的分析与应用[J]. 中国金属通报,2022(23):177-179.