U76CrRE 钢轨在线热处理工艺研究*

陈 琳[1],达木仁扎布[1],王永明[2],陈永超[1],李智丽[2]

(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: 在U76CrRE稀土二代在线热处理轨工业试制研发过程中,通过对钢坯熔炼成分及钢轨在线热处理工艺的优化,热处理后钢轨通长组织、性能稳定。检验结果表明,U76CrRE稀土二代钢轨热处理后的抗拉强度达到1 280 MPa,延伸率大于10%,踏面硬度(HBW)达到370~420,无异常组织。

关键词: 钢轨; 热处理; 组织; 性能
中图分类号: U213.4; TG162.82 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)02-0001-05
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.02.001

Study on On-line Heat Treatment Technology of U76CrRE Rail

Chen Lin[1], *Da mu ren zha-bu*[1], *Wang Yong-ming*[2], *Chen Yong-chao*[1], *Li Zhi-li*[2]

(1. *Rail and Beam Steel 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 and properties of second generation on-line heat-treated U76CrRE rail with rare earth are stable through optimizing the smelting composition of billet and on-line heat treatment technology of rail during the process of its industrial trial production and research and development. The test results showed that its tensile strength could reach 1 280 MPa, elongation was greater than 10%, tread hardness(HBW) could reach 370~420 and there was no abnormal structure.

Key words: rail; heat treatment; microstructure; properties

随着我国铁路向高速、重载发展,铁路现行标准的880 MPa级U71Mn系列和980 MPa级U75V系列热轧钢轨已经很难满足用户线路服役需求。因此,国内掀起了高强、耐磨钢轨研发热潮,促进了钢轨生产工艺技术和产品结构的更新换代,以满足线路对钢轨高强度、耐磨使用性能的要求。

国内外一致认为提高钢轨强度的主要方法是合金化和热处理或者微合金化+热处理,其中热处理属于最经济有效的方法,在国内外广泛采用。

钢轨的热处理工艺,可分为离线热处理和在线热处理两种。其中,离线热处理工艺需要对钢轨重新加热到奥氏体化温度,有能耗高、小时产量低、轨头硬度层较浅等局限性。炼钢技术和钢轨轧制技术的进步,促进了钢轨在线热处理工艺技术在工业上

* 收稿日期:2021-01-25
作者简介:陈 琳(1971-),男,内蒙古乌兰察布市人,高级工程师,现从事钢轨生产管理工作。

的应用。钢轨在线热处理技术有效利用热轧钢轨轧后的余热，能够在线控制钢轨的冷却速度，从而实现钢轨在线热处理，具有生产效率高、成本低、钢轨通长组织和性能稳定性好、钢轨综合质量好等优势，逐步取代了离线热处理工艺，成为国内外生产高强度钢轨的主要技术[1]。

目前国内研制的热处理钢轨是以1 180 MPa强度级别的U75V钢轨为基础，主要适用于曲线半径不小于600 m的客运线路或者客货混运线路曲线段，应用比较广泛。而煤炭、矿石运输繁忙的铁路干线和大运量重载铁路线路需要的1 280 MPa及以上强度级别的高强度耐磨钢轨处于紧缺状态。因此，包钢开展了铁标1 280 MPa强度级别在线热处理钢轨研发工作。

1 技术要求

包钢1 280 MPa强度级别在线热处理钢轨选用了TB/T 2344—2012标准[2] U76CrRE稀土二代轨钢种。该钢种热轧轨经过热处理后的金相组织为珠光体，允许有少量的铁素体，不能有马氏体、贝氏体及晶界渗碳体，表1为U76CrRE热处理钢轨性能要求。图1为钢轨横断面硬度测点位置示意图。

表1 U76CrRE热处理组织性能要求

抗拉强度/MPa	延伸率/%	踏面硬度(HBW)	轨头横断面硬化层硬度(HRC)	
			A_1、B_1、C_1、D_1、E_1	A_4、B_5、C_5、D_3、E_3
≥1 280	≥10	370～420	37.0～44.0	≥36.0

注：横断面硬度测点：第1点距表面5 mm，其余点间距均为5 mm；D、E线与下颚距离为5 mm；B、C线为A、D和A、E线的角平分线。

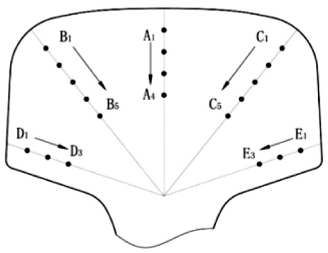


图1 横断面硬度测点位置示意图

2 实验室研究

通过实验室测定U76CrRE钢种过冷奥氏体连续冷却CCT曲线(图2)及等温冷却TTT曲线(图3)确认了珠光体组织转变的临界冷速和获得细珠光体组织转变的C曲线“鼻子”温度。并根据相变特点制定热处理工艺方案，进行热模拟试验，确定能够获得良好组织、性能的工艺“窗口”范围，为现场工业试制提供依据。

通过实验室研究，U76CrRE钢种的细珠光体转变临界冷速为3.0 ℃/s，细珠光体转变C曲线“鼻子”温度在520～550 ℃之间，超出临界冷速或转变温度控制过低，就会产生贝氏体或马氏体或贝马混合组织。

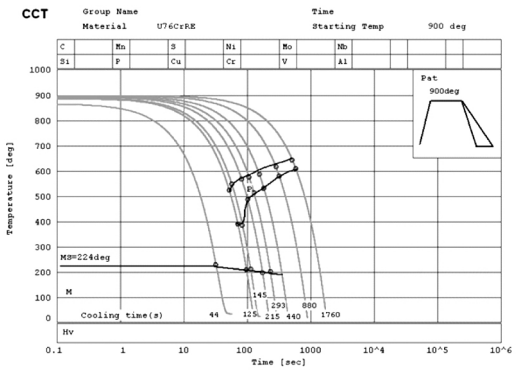


图2 U76CrRE CCT曲线

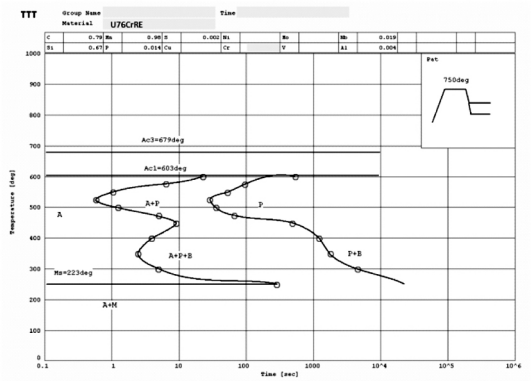


图3 U76CrRE TTT曲线

3 工业试制

3.1 成分控制

铁标TB/T 2344—2012标准U76CrRE钢种成分与其它同级别钢种相比，设计成分偏低一些，具体化学成分及含量如表2所示。

表 2　TB/T 2344—2012 U76CrRE 化学成分(质量分数)　　%

C	Si	Mn	Cr	P	S	V	Al
0.71 ~ 0.81	0.50 ~ 0.80	0.80 ~ 1.10	0.25 ~ 0.35	≤0.025	≤0.025	0.04 ~ 0.08	≤0.010

注: RE 加入量不低于 0.02%。

实践证明,高碳优质碳素钢虽然研发成本低廉,但是仅靠钢中的 C、Si、Mn 元素,通过热处理提高钢轨强度并获得稳定的组织、性能难度较大。因此,国内外高强度耐磨钢轨普遍采用优质高碳钢 + 合金化 + 热处理的强化工艺[1]。钢中 C 是提高钢轨强度的最直接有效的元素,并考虑到 Cr 元素对铁素体的固溶强化作用和渗碳体的合金强化作用,在工业试制初期,兼顾研发成本,只对钢坯的 C 和 Cr 含量按标准中上限控制。到了工业试制中、后期,针对提高强度需要较强冷却工艺和热处理后的组织、性能稳定性之间存在的矛盾,同时考虑 V 元素的析出和固溶两种方式细化晶粒的作用和钢坯的加热过程中提高晶粒粗化温度、抑制高温状态下晶粒长大的作用,根据热处理工艺特点和需要,在标准允许范围内适当提高钢中 V 元素的含量,降低喷雾冷却工艺冷却强度,有效避免产生异常组织的风险。在此成分基础上进一步优化在线冷却工艺参数,有效改善了钢轨经过热处理后的组织、性能的稳定性。V 含量不同的钢轨在同一种在线热处理工艺条件下,其热处理后组织、性能对比如表 3 所示。

表 3　不同成分 U76CrRE 在线热处理钢轨性能对比

项目	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	踏面硬度(HBW)			组织
			最大	最小	波动	
原成分	1 285 ~ 1 307	7.5 ~ 10.0	376	367	9	P + F(少)
提高 V 含量	1 300 ~ 1 329	10.0 ~ 12.0	379	373	6	P + F(少)

3.2　工业试验

采用 TB/T 2344—2012 标准研制 U76CrRE 60 kg/m(60、60 N)断面在线热处理钢轨,钢轨的终轧长度是 105 m 左右,进行全长在线热处理。工业试验流程如图 4 所示。

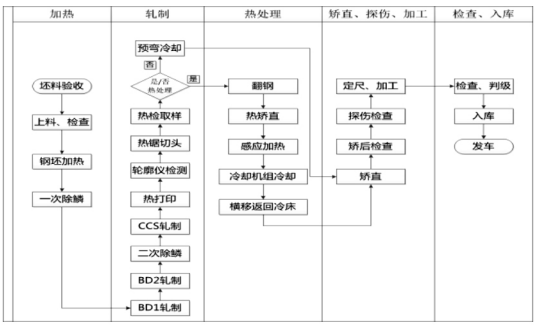


图 4　工业试验流程图

从钢轨的整个生产工艺来看,在线热处理钢轨生产过程是金属塑性变形与热处理强化相结合的高温形变热处理过程[3],如图 5 所示。就钢轨的在线热处理工艺而言,钢轨的开始冷却温度(冷却机组入口温度)的高低及其稳定性取决于热轧轨的开轧温度的高低及其稳定性。为了不影响热轧轨轧制工艺的稳定性,U76CrRE 钢轨在线热处理工艺中钢坯开轧温度延续了其热轧轨规程温度范围,严格控制在 1 080 ~ 1 150 ℃之间,从而保证冷却机组出口温度稳定控制在目标温度范围。

在不断优化成分的基础上,稳定控制钢轨开轧温度,保证钢轨轧后的冷却机组入口温度稳定,并有效利用钢轨轧后的余热,采用不同冷却介质,合理搭配轨头、轨底冷却参数,控制钢轨在线冷却过程中的冷却变形,保证钢轨平稳通过冷却机组的同时稳定控制钢轨终冷温度(冷却机组出口温度),保证钢轨细珠光体和极细珠光体转变温度,从而获得了稳定的热处理钢轨组织和性能。

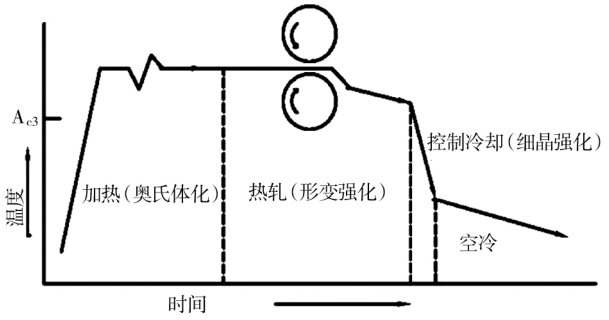


图 5　在线热处理钢轨强化过程示意图

在工业试验和规模化生产中，工艺分析经常采用等温转变曲线，但是由于钢轨本身的断面尺寸和金属量比实验室试样大得多，不同冷却介质和工艺条件，通过在线冷却很难实现等温转变。工业生产中冷却过程属于连续的冷却过程，而且钢轨在冷却过程中其内部热交换非常复杂，降温和返温共存，精确测定比较困难，想要稳定控制钢轨终冷温度，需要经过多次调试，不断摸索温度变化与钢轨组织、性能的对应关系，确定钢轨表层的温度控制范围，从而保证钢轨内部温度能够保持在细珠光体组织转变温度区间内。

在工业试验过程中，U76CrRE 在线热处理钢轨对冷却介质稳定性和冷却均匀性要求比较苛刻。在初期调试阶段采用了在线喷雾间歇式脉冲冷却工艺，该工艺热处理后钢轨组织和性能稳定性控制难度较大，钢轨踏面易产生贝氏体异常组织或轨腰偏析带上易产生马氏体组织，其中钢轨踏面贝氏体异常组织呈半月牙状，大部分靠近踏面中心，通长局部、断续分布，其宏观形貌如图 6 所示；而轨腰处马氏体组织在显微镜下呈条带状，零星分布。在保证钢轨热处理后组织合格的状态下，其性能偏低，踏面硬度(HBW)通常在 355～375 之间，抗拉强度通常在 1 260～1 300 MPa 之间。

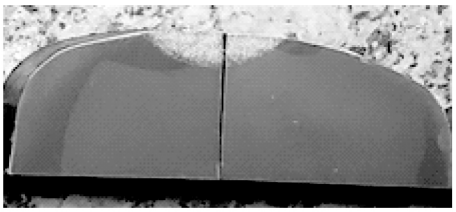


图 6 喷雾冷工艺异常组织宏观形貌

在调试中期，对在线喷雾冷却工艺进行优化，采用在线喷雾 + 辅助风冷工艺。该工艺进一步降低喷雾冷却强度，减少喷雾冷却对轨腰温度的影响，消除钢轨轨腰偏析带上零星马氏体异常组织，通过增加喷风辅助冷却也能够抑制喷雾冷却过程中的间歇返温现象，保证冷却过程的连续性和稳定性，从而改善了钢轨热处理后性能。该工艺条件下，踏面硬度(HBW)达到 370～385 之间，抗拉强度达到 1 280～1 330 MPa 之间。如果钢轨受到较强冷却的时候，钢轨踏面也会产生类似图 6 所示的贝氏体异常组织。

到了调试后期，在线喷雾 + 辅助风冷工艺基础上，通过工艺升级实现了纯风冷冷却工艺，并通过调试，确定了 U76CrRE 在线热处理钢轨最终的生产工艺。该工艺能够大幅度提高钢轨热处理后组织、性能的稳定性，其中踏面硬度(HBW)达到 375～395 之间，抗拉强度达到 1 330～1 400 MPa 之间。在该工艺条件下，对钢轨进行强冷，钢轨踏面和轨头侧面也会产生贝氏体异常组织，呈帽形通长连续均匀分布，由此可以判断，在线风冷工艺的冷却均匀性好。异常组织宏观形貌如图 7 所示。

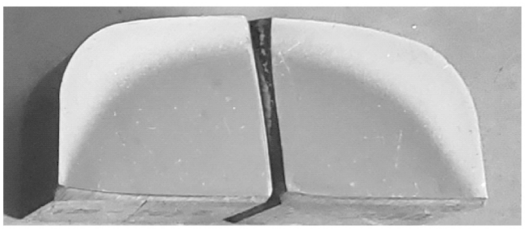


图 7 风冷工艺异常组织宏观形貌

在喷雾冷却工艺、喷雾 + 辅助风冷工艺和风冷工艺条件下，保证钢轨金相组织为珠光体和少量铁素体时，成分相近的 U76CrRE 在线热处理钢轨性能对比如表 4 所示。

表 4 U76CrRE－60N 在线热处理钢轨不同工艺性能对比

工艺	抗拉强度/MPa	延伸率/%	踏面硬度(HBW)			组织
			最大	最小	波动	
雾	1 300	10.0	376	368	8	P + F(少)
雾 + 风	1 334	11.5	380	375	5	P + F(少)
风	1 360	11.0	388	383	5	P + F(少)

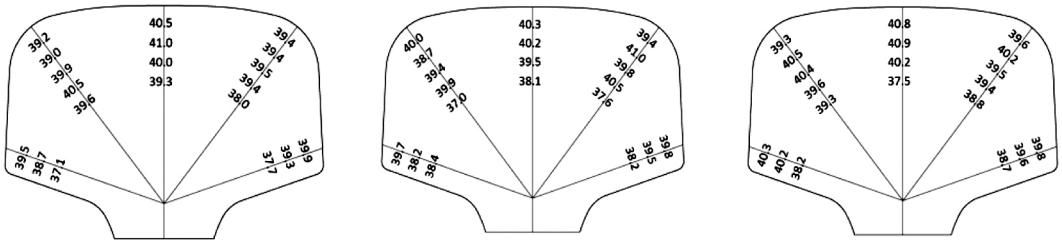
从 3 种在线冷却工艺对比来看，喷雾冷却工艺条件下，性能偏低或不合；喷雾 + 辅助风冷工艺条件下，性能趋于稳定，但还是紧靠标准下限；而风冷工艺条件下，性能大幅度改善，而且能够保证性能指标有一定的富余量。

3.3　钢轨通长稳定性检验

在风冷工艺条件下，在 100 m 长 U76CrRE 在线热处理钢轨 0 m、50 m、100 m 处取样，对钢轨通长方向进行热处理后组织、性能稳检验，检验结果满足标准要求。从检验结果来看，抗拉强度全长波动小于 30 MPa，轨头踏面硬度(HBW)全长波动小于 10，如表 5 所示。断面硬度分布两侧对称，全长均匀，如图 8所示；全长金相组织均为细珠光体和少量铁素体，如图 9 所示。

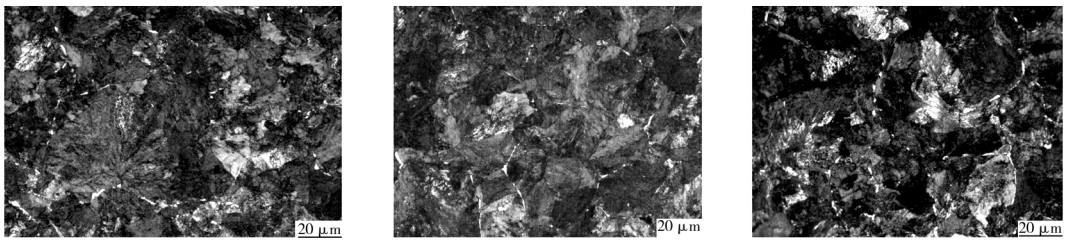
表 5　U76CrRE－60N 在线热处理钢轨通长组织、性能

检测点	抗拉强度/MPa	延伸率/%	踏面硬度(HBW)	金相组织
0 m	1 357	11.5	391	P + F(少)
50 m	1 364	11.5	388	P + F(少)
100 m	1 362	10.0	392	P + F(少)



(a) 0 m　　(b) 50 m　　(c) 100 m

图 8　U76CrRE－60N 在线热处理钢轨断面硬度分布图



(a) 0 m　　(b) 50 m　　(c) 100 m

图 9　U76CrRE－60N 在线热处理钢轨组织形貌图

4　结论

(1) U76CrRE 热轧钢轨经过在线热处理后组织、性能满足铁标 TB/T 2344—2012 标准 1 280 MPa 级别高强度热处理钢轨技术要求。

(2) U76CrRE 在线热处理钢轨冷却速度控制范围较窄(一般 1 ~ 3 ℃/s 之间)，从工业试验结果来看，更适合采用在线风冷工艺生产，热处理后钢轨组织、性能的稳定性好于喷雾冷却工艺。

参　考　文　献

[1] 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.

[2] TB/T 2344—2012，43 ~ 75 kg/m 钢轨订货技术条件[S].

[3] 赵云. 浅谈热处理和 C 曲线的学习[J]. 内江科技，2015，36(3)：136－137.