包钢百米75 kg/m U75V在线热处理钢轨研发*

王嘉伟,薛虎东,赵桂英,董 捷

(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: 文章介绍了包钢采用280 mm×380 mm铸坯断面生产百米75 kg/m U75V在线热处理钢轨的生产工艺概况,通过炼钢厂连铸出坯设备改进和轨梁厂余热淬火生产线调试,成功完成百米75 kg/m U75V在线热处理钢轨的工业生产,钢轨各项性能检验满足TB/T 2344—2012标准要求。

关键词: 百米75 kg/m;U75V;在线热处理钢轨

中图分类号: TG162.8+2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2020)02-0059-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.02.018

Research and Development of 100-metre 75 kg/m U75V Online Heat Treated Rail of Baotou Steel

Wang Jia-wei, Xue Hu-dong, Zhao Gui-ying, Dong Jie

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

Abstract: In the article, it is introduced the general situations for production process of 100-meter 75 kg/m U75V online heat treated rail with the 280 mm×380 mm slab section adopted by Baotou Steel. Its industrial production is successfully completed through improving the ejection equipment of continuous casting in Steel-making Plant and commissioning the remaining heat quenching production line of Rail and Beam Plant. Its performance examinations could meet the requirements of TB/T 2344-2012 standard.

Key words: 100-meter 75 kg/m; U75V; online heat treated rail

随着我国社会经济的高速发展,大运量、高轴重、高密度的重载铁路运输模式造成了钢轨及焊接接头的严重伤损,并有日趋严重之势,特别是在钢轨焊接接头处,断轨风险加大。研发百米75 kg/m U75V在线热处理钢轨可适应重载铁路的发展需求,提升钢轨强度和减少焊接接头,保证重载铁路运输安全。并且生产百米75 kg/m钢轨可极大的提升钢轨焊接效率,焊接一支500 m长度钢轨的时间由3 h降低至1 h,焊接接头由6个减少至4个,对于钢轨焊接的发展意义重大。

2015年以前,由于受生产设备条件及铸坯断面等因素限制,包钢还不具备生产百米75 kg/m钢轨的条件。炼钢厂5#铸机在原有280 mm×380 mm铸坯断面不变的条件下,通过对吊装设备升级改进,生产出9.53 m长度的钢坯。经轨梁厂2#生产线轧制、在线热处理,能够生产出各项指标满足TB/T 2344—2012要求的75 kg/m百米热轧及热处理钢轨[1]。

* 收稿日期:2019-11-01

作者简介:王嘉伟(1988-),男,山西省阳高县人,工程师,现从事钢轨产品研发工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 生产工艺

1.1 工艺路线

在包钢60 kg/m U75V热处理钢轨产品开发的基础上，结合现有生产装备和工艺特点，采用5#铸机280 mm×380 mm铸坯和轨梁2#线轧制、在线热处理工艺流程进行生产，工艺路线为：转炉冶炼→LF精炼→VD真空脱气→连铸→钢坯加热→BD1开坯→BD2轧制→CCS终轧→在线热处理→矫直→探伤。

1.2 U75V钢轨材料特性研究

U75V热轧态和热处理态组织形貌比较，经在线热处理后得到的珠光体片间距要比热轧态钢轨小很多，原理见图1，提高冷速可增大过冷度，奥氏体转变珠光体所需时间相应减小，得到组织由粗到细逐渐变化。原因是过冷度的增大使转变温度降低，而珠光体转变为典型扩散相变，温度下降使钢中碳的迁移速度减慢，片间距得到细化；加上冷却速度增大会提高珠光体形核率，同样使珠光体片间距得到细化[2]。

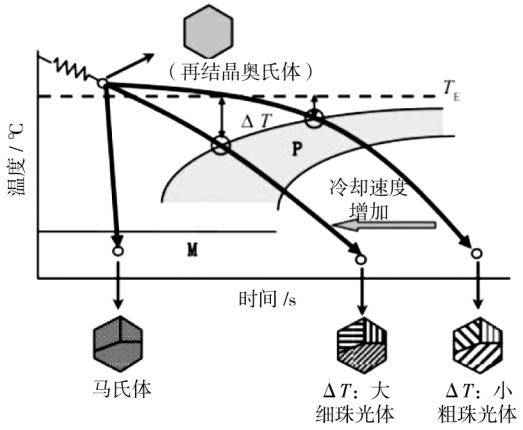


图1 过冷度对珠光体组织形成的影响示意图

实验室对U75V钢轨进行CCT和TTT曲线的测定，在Formastor－F相变仪上进行试验，测得：A_{c1}为686 ℃，A_{c3}为739 ℃，A_{r1}为650 ℃，A_{r3}为697 ℃。将试样加热至900 ℃，加热速度为10 ℃/s，保温10 min后，分别以不同的冷速冷至室温。冷却速度设定为：0.25 ℃/s、0.5 ℃/s、1 ℃/s、2 ℃/s、3 ℃/s、4 ℃/s、6 ℃/s、7 ℃/s、8 ℃/s、10 ℃/s、12 ℃/s、20 ℃/s。根据采集的膨胀量－温度曲线，采用切线法确定各个相变点，结合金相组织对相变点进行验证和修正，确定各相变的转变开始温度和结束温度，在温度－时间(对数)坐标下绘出U75V钢轨的CCT曲线，如图2所示。

从图2中CCT曲线看出，U75V钢轨随着冷速从0.25 ℃/s增大到20 ℃/s，珠光体转变开始温度和结束温度都逐渐降低。当冷速小于6 ℃/s时，珠光体转变开始温度与结束温度温差较小，保持在48～81℃范围内；当冷速增大到7 ℃/s时，珠光体转变开始温度与结束温度温差迅速增加，最大达到150 ℃，此时的连续冷却曲线穿过珠光体转变区域后便与马氏体相变开始温度Ms相交，未转变的过冷奥氏体此刻开始发生马氏体相变。由此可知，6 ℃/s是U75V钢轨珠光体转变的临界冷速。另外，从图中只能看到两个相变区域，即珠光体相变区和马氏体相变区，并无其它相变。

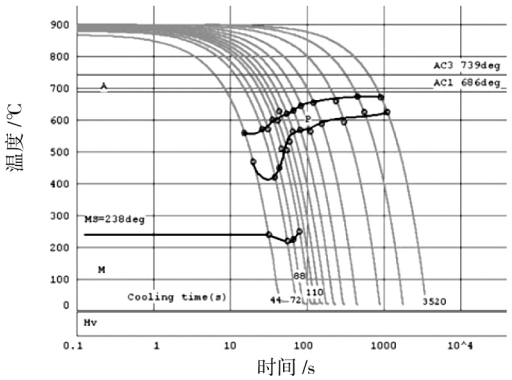


图2 U75V钢轨CCT曲线

TTT曲线在Formastor－F全自动相变仪上进行试验，将试样以10 ℃/s的速度加热到850 ℃，保温10 min，然后以200 ℃/s的冷速冷却至指定温度并保温。温度设定为：650 ℃、625 ℃、600 ℃、550 ℃、525 ℃、500 ℃、475 ℃、450 ℃、425 ℃、400 ℃、375 ℃、350 ℃、300 ℃、250 ℃。测定转变开始时间、结束时间和组织组成，绘制出U75V钢轨的TTT曲线，如图3所示。

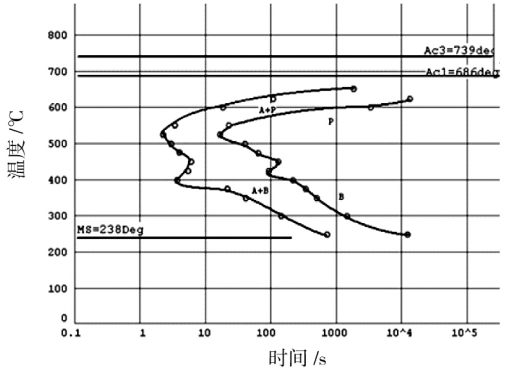


图3 U75V钢轨TTT曲线

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 3 可以看出，U75V 钢轨的等温转变曲线包含高温区域的珠光体转变、中温区域的贝氏体相变和低温区域的马氏体相变三部分，珠光体转变 C－曲线与贝氏体相变重叠。在珠光体转变区间，525 ℃时的孕育期和转变所需时间最短，此时的温度称为“鼻温”，鼻温处所获组织为屈氏体，所以 525 ℃是 U75V 钢轨发生珠光体转变的最佳温度。

通过上述实验室研究，确定了 U75V 钢轨奥氏体向珠光体转变的临界冷却速度≤6 ℃/s。当温度为 525 ℃时，U75V 钢轨发生珠光体转变的孕育期和转变时间都最短，所以 525 ℃是 U75V 钢轨发生珠光体转变的最佳温度；结合珠光体转变时间，允许珠光体转变的温度范围为 525 ~ 600 ℃。实验室研究结果为后续 U75V 钢轨在线热处理工艺调试试验提供参数依据[3]。

1.3　冶炼工艺

U75V 钢种的冶炼工艺已经非常成熟，包钢每年大批量工业生产此钢种，对于百米 U75V 75 kg/m 钢轨的冶炼工艺难点是需要长尺坯料，以保证轧制后钢轨长度能够达到 100 m 的长度要求。百米 75 kg/m U75V 在线热处理钢轨采用 280 mm × 380 mm铸坯断面生产，根据 75 kg/m 钢轨的截面面积、280 mm × 380 mm 铸坯断面面积和质量守恒定律计算出轧制百米 75 kg/m 钢轨需要 9.53 m 长度的钢坯。

包钢炼钢厂 5# 铸机设计坯料定尺最长为 8.5 m，9.53 m 钢坯超出冷床及移钢机宽度，当连铸坯头部到达出坯辊道末端时，尾部还在输送辊道上，与引锭存放架和辊道干涉，钢坯无法横移到冷床上。针对出坯台架进行改造需要花费大量的金钱和时间，并且耽误正常生产，因此，采用在出坯辊道上直接吊运钢坯的方法，不需要横移到冷床上。改进方案是在吊车主耙下方加装副耙，见图 4。



图 4　吊车设备改造图

1.4　轧制工艺

使用 280 mm × 380 mm 断面钢坯生产 75 kg/m 百米钢轨，通过合理的孔型设计以及合理的工艺制度来保证轧制的稳定性，保证产品质量。同时在生产过程中需要不断完善各项工艺参数，稳定轧制状态。

根据 75 kg/m 钢轨的断面以及该钢轨生产所要执行的标准，结合轨梁厂采用 280 mm × 380 mm 断面钢坯轧制 75 kg/m 钢轨的经验，确定 BD1、BD2、CCS 各轧机的轧辊孔型系统。使用 280 mm × 380 mm断面钢坯轧制 75 kg/m 钢轨，压缩比为 11.19。根据钢坯断面和成品断面尺寸，BD1 轧机设计轧制 7 道次，BD2 轧机设计轧制 3 道次，CCS 轧机往复轧制 3 道次。

BD1 轧机采用 1 个箱形孔、1 个梯形孔和 3 个帽形孔的设计，BD2 用 3 个轨型孔，CCS 采用万能孔型加轧边孔型的设计。这种设计可使钢轨全断面进行充分变形，改善钢轨内部致密度，提高钢轨性能，尤其是尺寸精度的精确控制，使生产的钢轨能够达到较高的尺寸精度要求。

1.5　在线热处理工艺

根据钢的过冷奥氏体等温转变和过冷奥氏体连

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

续冷却转变实验结果，进行U75V钢轨在线热处理调试，对其显微组织及力学性能进行了检测分析，以确定工业最佳热处理工艺参数，为百米钢轨的在线热处理提供更可靠、更稳定的“工艺窗口”[4]。

由于钢轨75 kg/m断面钢轨尺寸大的特点，所以热容也相对较大，使得钢轨热处理时会在轨头表面与心部之间出现较大温差。另外，百米钢轨在线热处理过程中组织转变和冷却能力与短尺也不同。所以，75 kg/m钢轨在相同的设备上进行热处理，热处理工艺参数比60 kg/m钢轨的冷却能力相应增强，以保持稳定的冷却速度。特别是后期的冷却，更为重要，直接影响热处理后性能的稳定，具体工艺如表1所示。

表1 钢轨在线热处理冷却工艺方案

生产速度/(m·s^{-1})	感应加热/℃	冷却工艺S0/℃	冷却工艺S4E/℃
0.9	740～750	730～760	530～550

2 钢轨性能检验

2.1 化学成分

采取铁水预处理→转炉→LF精炼→VD真空脱气→方坯连铸工艺生产路线，在生产过程中，炼钢厂按内控要求控制化学成分，对U75V成分检验结果进行了统计分析，如表2所示。

表2 U75V化学成分检验结果(质量分数) %

项目	C	Si	Mn	P	S	V	Al
标准要求	0.71～0.80	0.50～0.80	0.75～1.05	≤0.025	≤0.025	0.04～0.12	≤0.010
平均	0.796	0.664 6	0.956 7	0.016 5	0.004 6	0.067 9	0.003 3
最小值	0.780 0	0.620 0	0.940 0	0.011 0	0.002 0	0.062 0	0.002 0
最大值	0.800 0	0.700 0	0.980 0	0.021 0	0.010 0	0.076 7	0.005 0

从统计来看，C元素全部控制在0.78%～0.80%范围，为稳定控制钢轨热处理性能提供了条件。从成分分布图可以看出，Si、Mn成分范围窄，V含量稳定，w[Si]集中在0.65%～0.70%范围；w[Mn]主要集中在0.94%～0.96%范围；w[P]集中在0.015%～0.020%之间；w[S]集中在0.002%～0.004%范围，均符合TB/T 2344—2012标准要求。

2.2 气体含量

按标准对每炉钢中w[H]、w[O]、w[N]气体含量进行检验，检验结果如表3所示。

表3 气体含量检验结果(质量分数) %

项目	w[H]	w[O]	w[N]
标准要求	≤0.000 250	≤0.003	≤0.009
平均	0.000 126	0.001 24	0.004 513
最小值	0.000 071	0.000 90	0.003 800
最大值	0.000 150	0.001 80	0.005 500

由表3分析，钢轨气体含量均符合TB/T 2344—2012标准要求，

2.3 钢轨力学性能检验结果

百米75 kg/m U75V在线热处理钢轨拉伸性能检验结果如表4所示。

表4 U75V拉伸性能检验结果

项目	抗拉强度R_m/MPa	延伸率A/%
标准要求	≥1 180	≥10.0
最小值	1 231	10.0
最大值	1 290	12.0
平均值	1 252	10.7

由表4可以看出，抗拉强度均大于1 180 MPa，范围是1 231～1 290 MPa，平均值1 252 MPa，延伸率全部大于10%，平均10.7%，分布在10%～12%范围，拉伸性能符合TB/T 2344—2012标准要求。

百米75 kg/m U75V在线热处理钢轨踏面硬度检验结果如表5所示。

表5 U75V踏面硬度检验结果(HBW)

项目	检验结果
标准要求	340～400
最小值	340
最大值	365
平均值	351

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

按照标准要求每炉试样钢轨踏面硬度满足大于等于 340HBW 要求，最小值 340HBW，最大值 365HBW，符合 TB/T 2344—2012 标准要求。

针对热处理钢轨进行踏面硬度通长波动性能检验，共检验三支钢轨，检验结果见表 6。

表 6　钢轨踏面硬度通长波动范围检验结果

熔炼号	编号	R_m/MPa	A/%	踏面硬度(HBW)					平均值	波动范围
19900667	303A	1 246	10.0	351	354	355	361	361	356.4	16
	303B	1 276	10.0	366	363	355	363	360	361.4	
	303C	1 283	10.0	355	363	363	363	361	361.0	
	303D	1 278	10.5	360	361	363	363	364	362.2	
	303E	1 255	11.0	359	360	358	361	367	361.0	
19900675	402A	1 234	10.5	356	350	355	359	361	356.2	14
	402B	1 264	11.5	360	360	360	361	363	360.8	
	402C	1 255	11.0	353	356	355	353	356	354.6	
	402D	1 253	10.0	363	359	356	352	355	357.0	
	402E	1 253	11.0	364	363	364	361	362	362.8	
19900679	504A	1 244	11.0	353	352	351	352	352	352.0	13
	504B	1 262	10.5	360	360	360	361	363	360.8	
	504C	1 261	10.5	353	356	355	353	356	354.6	
	504D	1 253	11.5	363	359	356	352	355	357.0	
	504E	1 231	10.5	364	363	364	361	362	362.8	

根据表 6 踏面硬度通长性检验结果分析，钢轨在线热处理工艺稳定，硬度通长波动范围在 13HBW ~ 16HBW，满足标准不大于 30HBW 的要求。钢轨通长不同位置抗拉强度均≥1 180 MPa，伸长率均≥10%。

百米 75 kg/m U75V 在线热处理钢轨断面硬度检验结果符合 TB/T 2344—2012 标准要求，A1、B1、C1、D1、E1 点和 A4、B5、C5、D3、E3 点检验结果如表 7 所示。

表 7　U75V 断面硬度检验结果(HRC)

项目	位置	硬度值	位置	硬度值
标准要求	A1、B1、C1、D1、E1	36.0 ~ 42.0	A4、B5、C5、D3、E3	≥34.0
检验结果	A1	36.8 ~ 39.4	A4	36.6 ~ 40.1
	B1	36.1 ~ 39.1	B5	35.8 ~ 39.1
	C1	36.7 ~ 39.3	C5	35.9 ~ 40.4
	D1	37.0 ~ 40.0	D3	35.9 ~ 40.1
	E1	36.4 ~ 40.4	E3	36.2 ~ 39.4

3　结论

(1)采用 280 mm × 380 mm 铸坯断面生产百米 75 kg/m U75V 在线热处理钢轨，通过对吊装设备改进，生产出的 9.53 m 铸坯能够轧制成百米 75 kg/m 钢轨。

(2)包钢规模化生产的百米 75 kg/m U75V 在线热处理钢轨完全符合 TB/T 2344—2012 标准要求。

参 考 文 献

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

[2] 康浩. U75V 重轨在线热处理工艺关键技术的实验研究[D]. 沈阳: 东北大学，2012.

[3] 余永宁. 金属学原理[M]. 北京: 冶金工业出版社，2000.

[4] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社，2000.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net