在线热处理钢轨残余应力的测试与分析[*1]

边 影,郑 瑞,康晓虹

(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: 文章介绍了包钢热处理钢轨标准残余应力的研究情况,通过贴片法、切口法、X衍射等方法对包钢热处理钢轨进行实验分析,与热轧钢轨进行对比分析了包钢在线热处理钢轨的残余应力状态。贴片法检验结果表明包钢生产的热处理钢轨轨头残余应力大于热轧钢轨,切口法检验表明钢轨整体残余拉应力大于热轧钢轨,X衍射法表明钢轨表面残余应力分布不平均。

关键词: 热处理钢轨; 残余应力; 测试方法

中图分类号: U213.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2018)02-0045-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.02.013

Test and Analysis of Residual Stress for On-line Heat Treatment Rail

BIAN Ying, ZHENG Rui, KANG Xiao-hong

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

Abstract: In the paper, it is introduced the research situation on standard residual stress of heat treatment rail in Baotou Steel, and analyzed the heat treatment rail of Baotou Steel by means of patch method, incision method and X-ray diffraction, and analyzed the residual stress date of on-line heat treatment rail in Baotou Steel by being compared with hot rolled rail. The patch method test results show that the residual stress of rail heads for heat treatment rail produced by Baotou Steel is larger than that of hot rolled rail; the incision method test results show that the overall residual tensile stress of rail is larger than that of hot rolled rail; the X-ray diffraction method shows that the residual stress distribution on rail surface is uneven.

Key words: heat treatment rail; residual stress; test method

金属残余应力测定有多种方法,主要有贴应变片法、锯切口法、穿孔法、X射线衍射法等,对于钢轨材料残余应力美国铁路工程和保养协会标准中的钢轨技术条件(AREMA—2009)[1]对钢轨中残余应力的评定方法采用轨腰锯切法,EN13674.1-2011标准[2]对热轧钢轨中残余应力的评定采用钢轨贴片法测量钢轨轨底中心的残余应力,我国铁标标准TB/T2344-2012《43~75 kg/m钢轨订货技术条件》[3]也采用了这种测试方法。应用最多的是具有破坏性的轨底贴片法和轨腰锯切法。随着对钢轨残余应力的不断认识和了解,国外在热轧钢轨的标准中增加了对钢轨中最大残余应力的限制,国内有关钢轨的标准以及客运专线钢轨技术条件中也增加了对残余应力的要求[4]。热轧钢轨的残余应力主要来自于轧制、钢轨预弯及矫直过程,一般认为轨底中心位置残余应力最大,规定采用轨底贴片法代表钢

* **收稿日期:** 2018-01-17

作者简介: 边 影(1989-),女,内蒙古包头市人,助理工程师,现从事钢轨新产品研发工作。

轨长度方向的残余应力。在线热处理钢轨的残余应力主要来自于生产过程中加速冷却过程造成材料产生组织应力和热应力，从而进一步影响材料的力学行为及使用质量。在线热处理钢轨残余应力的大小、分布对金属材质的力学性能具有显著影响，而残余应力的大小、分布又受在线热处理工艺的影响，合理的在线热处理工艺决定了残余应力的大小及分布，进而影响了钢轨的使用性能[5]。因而本文采用不同的测试方法对热处理钢轨的残余应力大小、分布进行研究。

1 贴片法残余应力试验

包钢钢轨热处理采用雾冷和空冷的冷却工艺，由此钢轨的相变应力和热应力将增大，铁标标准TB/T2344－2012中将轨底残余拉应力≤250 MPa规定为产品的验收依据，对于钢轨轨头和轨腰残余应力并没有规定，因此如何准确测定热处理钢轨的残余应力则显得至关重要。

1.1 试验方法

针对包钢在线热处理钢轨工艺进行残余应力检验设计，具体检验程序如下:

(1)在远离切头3 m位置进行取样，长度为1 m，用砂轮将待测钢轨纵向所测点处表面150 mm的区域打磨出一平整区域，然后再用细砂纸将此区域打磨光滑，并用酒精擦试干净。

(2) 如图1所示进行轨头、轨腰、轨底的贴片，4号点为中轴线，所用的电阻应变片应为封闭型，长3 mm，灵敏度因子优于±1%。

(3)采用切割机在钢轨如图2所示方向进行切割，长度60 mm。切割过程采用计算机控制，注意加工速度，切割过程不得损害应变片。

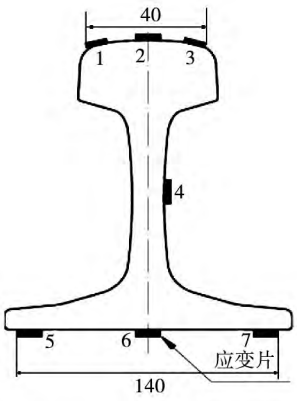


图1 实验残余应力贴片位置

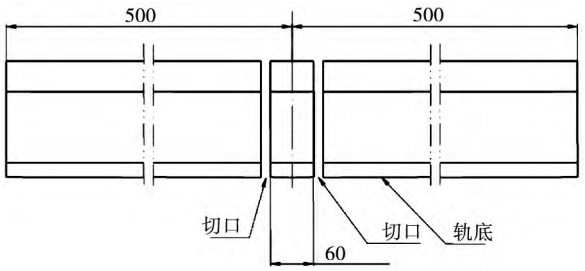


图2 实验残余应力切口位置

(4)测量锯切前后释放的应变值，残余应力值由切割前后的应变再乘以2.07×10^5 MPa计算而得。

1.2 试验结果分析

贴片法残余应力测试结果如表1所示(钢轨轨头1点和3点在轨头圆角处)，热处理钢轨轨头拉应力、轨腰压应力明显大于热轧钢轨，轨底残余应力与热轧钢轨相当。

表1 贴片法残余应力结果

钢轨编号	热处理状态	轨头/MPa			轨腰/MPa	轨底/MPa		
		1	2	3	4	5	6	7
1	热轧	57.9	78.2	67.2	－32.6	136.4	185.3	148.9
2		63.7	73.8	63.4	－86.3	122.3	175.2	138.8
3		91.2	120.4	101.1	－50.8	118.6	183.6	133.6
4	热处理	148.9	164.2	153.4	－126.4	148.9	185.1	148.9
5		168.8	180.3	178.0	－132.2	168.8	178.1	168.8
6		163.6	174.3	146.3	－167.3	163.6	180.9	163.6

(注:符号“－”表示压应力)

2　切口法残余应力

采用的美国铁路工程和保养协会标准中的钢轨技术条件(AREMA—2009) 进行测试。

2.1　轨腰切口实验方法

实验对包钢生产的 U75V 热轧及热处理钢轨进行切口法残余应力的测量，轨型为 60 kg/m。在距离成品轨端头 3 m 处取 610 mm 长的钢轨，在钢轨中轴线的轨头、底各做标记，使用游标卡尺测量切口前后轨端面所标识的各点间距，利用切割机在钢轨中和轴切割，切口位置沿轨腰的中和轴进行，如图 3 所示，切割距离 L 为 400 mm，d 为残余应力开口长度，用游标卡尺进行测量。

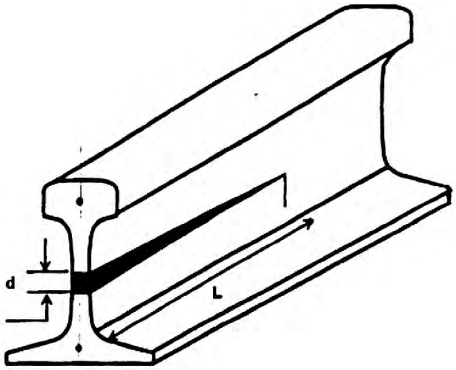


图 3　切口法残余应力测试图

2.2　实验结果分析

轨腰锯切法考虑了轨腰应力的综合影响，轨腰锯切时应力场发生变化，需要对切割后的残余应力分布进行研究 ，检验结果如表 2 所示。热处理钢轨相比热轧钢轨残余应力值更大，从垂直位移来看，包钢钢轨残余应力都为拉应力。根据之前的研究认为钢轨拉应力会加快切口位移张开，是有害的。

表 2　U75V 钢轨的残余应力测试结果

样品编号	热处理状态	张开位移/mm
1	热轧	+2.54
2	热轧	+2.74
3	热处理	+3.10
4	热处理	+3.26

(注: 符号“ + ”表示拉应力)

3　X 射线衍射法

X 射线测定残余应力的基本原理是平行相干的 X 射线射到金属表面时，会发生衍射，而内应力引起的晶格应变和宏观应变是一致的，晶格应变可通过测量衍射角的变化来确定，从 X 射线法测定的晶格应变可推知宏观应力。X 射线测定残余应力原理如图 4 所示。

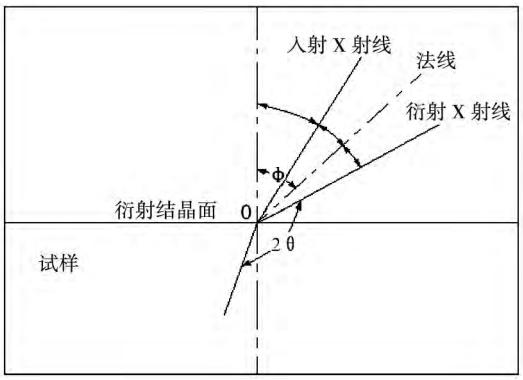


图 4　X 射线测定残余应力原理

对包钢生产的 60 kg/m 的 U75V 在线热处理钢轨进行残余应力测试，取其长度为 2.5 m 的钢轨对轨头踏面中心区域进行残余应力分布测试，应力测试时对钢轨表面进行处理，受 X 射线穿透能力及衍射原理的影响，试样的表面状态对残余应力的测试值影响较大，因此在测试过程中要保证试样表面与准直器相垂直; X 射线的穿透能力在 2 ~ 10 um 的厚度，对试样表面进行适当的处理，为了能准确的评价试样内部的残余应力值，对表面一般要进行电解抛光处理，对于现场测试或是不具备电解抛光的实验条件，可以用 30% 的硝酸溶液 + 10% 的硝酸酒精腐蚀后用细砂纸将表面腐蚀层去除，可以达到电解抛光的效果。实验测试过程中入射角数将在 ±45° 的角度范围平分为 4 个入射角度，以保证测试结果的准确性，接收块的衍射峰强度如图 5 所示。

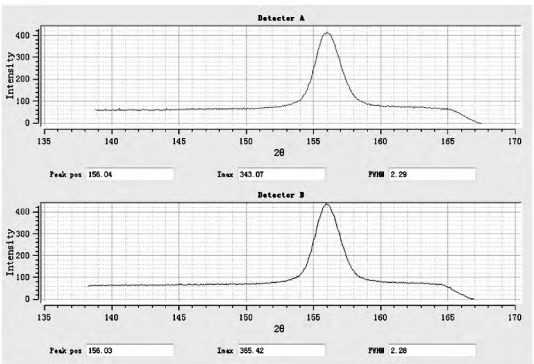


图 5　衍射峰强度

由图6的钢轨表面局部残余应力分布图测试结果可以看出，试样表面残余应力分布是不均匀的，在线热处理后的试样表面平均残余应力大于未热处理的残余应力，图(a)是热轧钢轨的残余应力，图(b)是在线热处理后的残余应力，分析其原因为在线热处理过程产生更多的残余应力，而这些残余应力都将影响疲劳性能。

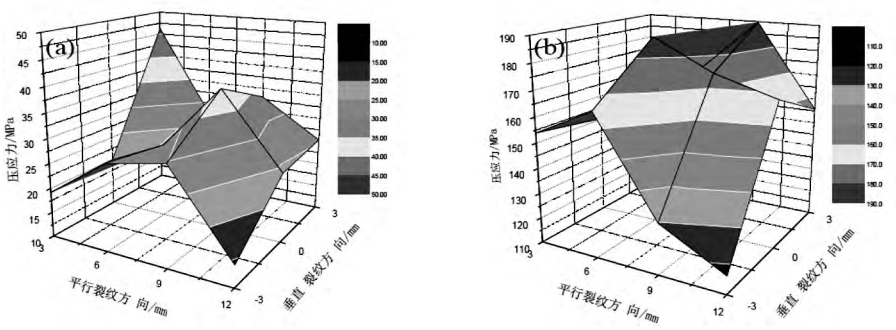


图6 轨头表面局部残余应力分布

4 结论

(1)文章使用不同测试方法对在线热处理钢轨残余应力进行了研究，贴片法检验结果表明包钢生产的钢轨在试验过程中全部满足的铁标标准TB/T2344－2012中的要求。

(2)通过对热处理钢轨进行锯切法的试验分析得出，包钢热轧、热处理钢轨残余应力均为拉应力，热处理钢轨残余应力大于热轧钢轨。并且满足美国铁路工程保养协会标准中的钢轨技术条件(AREMA—2009)中的要求。

(3)对X射线衍射法残余应力测试原理进行分析，并对热处理钢轨轨头踏面中心区域进行表面残余应力分布测试，在线热处理后的试样表面平均残余应力大于未热处理的残余应力，且分布不均匀。

参 考 文 献

[1] AREMA—2009，美国铁路工程和保养协会工程师手册[S].

[2] EN13674.1—2011，46 kg/m及以上T型钢轨[S].

[3] TB/T2344—2012，43～75 kg/m钢轨订货技术条件[S].

[4] 詹新伟，工树青. 基于技术标准的钢轨残余应力测试与分析[J]. 铁道技术监督，2015，43(10)：1－5.

[5] 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.