

残余应力对钢轨焊接接头落锤试验性能的影响

朱志明¹, 范开果¹, 刘 晗¹, 王永东²

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 黑龙江科技大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150022)

摘 要: 对钢轨窄间隙电弧焊接头热处理前后的残余应力分布进行了测量和比较, 结合落锤试验结果和断口形貌, 分析了焊接残余应力对钢轨接头落锤试验性能的影响. 结果表明, 热处理前, 钢轨接头的轨腰和轨颞部位存在较大残余拉应力, 在落锤冲击载荷作用下容易形成裂纹源, 并沿轨腰向母材延伸、扩展、断裂; 热处理后, 钢轨接头的残余应力最大值下降 1/2 ~ 2/3, 抗冲击载荷能力显著提高, 落锤试验时的钢轨接头沿焊缝中心或热影响区垂直断裂. 钢轨接头存在较大残余应力时, 在落锤冲击载荷作用下, 容易在残余应力较大的部位产生裂纹, 并加速扩展和断裂.

关键词: 焊接残余应力; 火焰热处理; 落锤试验; 窄间隙电弧焊接

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2017)04-0055-04

0 序 言

在钢轨制造的轧制和矫直阶段、接头焊接及无缝线路服役过程中, 由于存在宽范围和不均匀的温度变化, 钢轨及其焊接接头内部将产生温度应力和残余应力. 目前, 国内对钢轨残余应力的分析, 大多集中在与钢轨制造和无缝线路服役过程相关的温度应力. 钢轨制造时, 矫直后的钢轨轨头和轨底存在残余拉应力, 轨腰存在压应力^[1,2], 铁道行业标准 TB/T 2344—2012《43 ~ 75 kg/m 钢轨订货技术条件》要求钢轨的轨底残余拉应力不大于 250 MPa^[3].

无缝线路钢轨焊接主要采用闪光焊、铝热焊和气压焊. 钢轨接头的焊接残余应力不仅会降低钢轨的力学性能, 增加变形, 影响钢轨表面的平顺度, 而且在钢轨内部存在缺陷时, 过大的残余应力和列车动载荷叠加, 将增加诱发裂纹、加速钢轨疲劳断裂的机率. 国外学者对钢轨闪光焊接头的残余应力分布情况进行了试验和仿真分析^[4-6]. 结果表明, 钢轨的轨腰和轨颞存在较大残余拉应力; 焊后热处理对减小接头残余应力有明显作用. 然而, 国内相关标准对接头的焊接残余应力无明确要求^[7], 因此, 对焊接引起的钢轨残余应力的分析也相对较少.

落锤、静弯和疲劳等试验是钢轨型式检验的重要项目, 若能通过落锤试验, 则静弯、疲劳等试验一

般没有问题^[8]. 文献[9]分析认为, 轨底残余拉应力越大, 落锤试验的第 1 锤造成的钢轨残余挠度越小, 钢轨发生断裂的落锤次数减少, 对疲劳性能也有较大影响; 轨底残余拉应力应不大于 200 MPa.

采用自保护药芯焊丝的窄间隙自动电弧焊是适用于钢轨现场原位焊的新方法^[10]. 为了科学制定焊接和接头热处理工艺规范, 进一步改善钢轨接头的力学性能, 加快和促进其在无缝线路钢轨现场原位焊中的推广应用, 对火焰热处理前后的钢轨窄间隙电弧焊接头的残余应力分布及其变化情况进行了测量和比较, 并结合落锤试验结果, 分析了焊接残余应力对钢轨接头抗冲击载荷性能的影响.

1 试验方法

采用直径 2.0 mm 的专用 JCTD-33 型自保护药芯焊丝和相同的工艺参数, 对 50, 60 kg/m 钢轨进行窄间隙电弧焊接, 坡口间隙为 16 mm. 图 1 为钢轨焊接接头的纵向剖面(沿钢轨长度方向的中心线)宏观形貌, 焊缝区、热影响区和母材区之间有明显的分界面. 由于焊接热输入和冷却条件不同, 在钢轨不同高度上, 接头的焊缝区和热影响区宽度有明显差异, 轨腰位置的焊缝区最宽.

对钢轨接头进行火焰热处理(主要是为了改善接头金相组织)时, 加热器的初期摆幅为 120 mm; 加热温度达到 600 ℃后, 摆幅减小至 60 mm, 主要给焊缝区和热影响区加热; 加热温度升至 800 ℃后, 摆幅再次减小至 20 mm 左右, 主要给焊缝区加热, 在焊缝

收稿日期: 2015-03-25
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075231); 铁道部科技研究开发计划重大资助项目(2008G001-C); 国家科技重大专项资助项目(2012ZX04012011)

区温度达到 900 ~ 950 ℃ 时,停止加热,然后自然冷却. 上述加热方式可在焊缝区和热影响区与母材之间产生一定的温度差,以减小钢轨焊接接头表面的硬度变化.



图 1 钢轨焊接接头的纵向剖面宏观形貌
Fig. 1 Macro profile of longitudinal cross-section of rail welded joint

采用小孔法和 ASTM 标准 E837-81《用钻孔应变仪法测定残余应力的标准试验方法》^[11] 进行残余应力测量,应力应变仪采用济南西格玛公司生产的 ASMB2-8 型,应变片粘贴位置如图 2 所示. 由于焊缝表面凹凸不平,从而需要将测量点处的焊缝表面打磨平整(最大打磨量达 5 mm). 为了减小焊缝打磨对测量结果的影响,打磨后至少放置 12 h,然后再进行应变片粘贴和残余应力测量.

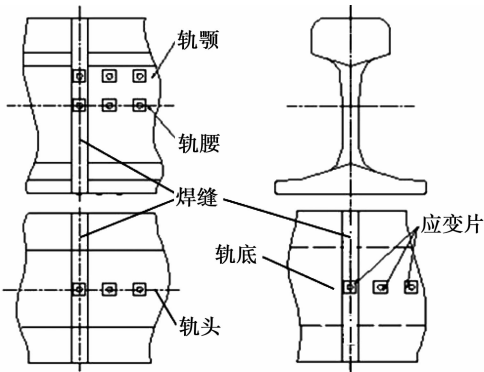


图 2 残余应力测量点及应变片粘贴位置
Fig. 2 Measuring points of residual stress and paste positions of strain gauges

钢轨落锤试验根据焊接接头检验标准进行,锤

头质量为 1 t,50 kg/m 钢轨落锤高度为 2.8 m,60 kg/m 钢轨落锤高度为 3.1 m.

2 残余应力测量与落锤试验结果

2.1 残余应力测量结果

表 1 是热处理前后钢轨不同位置的残余应力测量值. 沿钢轨长度方向,轨腰的残余应力最大值(热处理前 775.1 MPa,热处理后 370.9 MPa)位于接头热影响区(离焊缝中心 30 mm 处);而轨底(热处理前 396.2 MPa,热处理后 257.4 MPa)、轨颞(热处理前 615.5 MPa,热处理后 417.3 MPa)和轨头(热处理前 200.4 MPa,热处理后 62.2 MPa)的残余应力最大值均在焊缝中心位置.

表 1 钢轨焊接接头热处理前后的最大/最小残余应力
Table 1 Maximum and minimum residual stresses before and after heat treatment of rail welded joints

垂直位置	离焊缝中心距离 L/mm	最大应力 $\sigma_{\max}$ /MPa		最小应力 $\sigma_{\min}$ /MPa	
		热处理前	热处理后	热处理前	热处理后
轨底	0	396.2	257.4	157.8	119.6
	20	371.2	—	323.0	—
	30	—	123.9	—	27.2
	40	218.4	—	67.7	—
	60	—	-36.5	—	-100.9
轨腰	0	681.4	324.4	428.1	151.5
	30	775.1	370.9	283.9	250.8
	60	89.6	155.9	-45.9	-54.0
轨颞	0	615.5	417.3	297.4	262.0
	30	458.6	284.5	138.0	175.9
	60	65.8	163.2	-45.3	-84.4
轨头	0	200.4	62.2	136.0	-130.6
	30	73.8	-54.9	-107.2	-238.0
	60	60.9	93.1	-87.9	-78.9

在钢轨高度方向,残余应力最大值出现在轨腰位置(热处理前 775.1 MPa,热处理后 370.9 MPa),其次为轨颞位置(热处理前 615.5 MPa,热处理后 417.3 MPa). 远离焊缝的母材区,受焊接热输入的影响较小,残余应力值显著降低. 由于焊接时的钢轨轨底刚性固定,无法自由伸缩,在轨头、轨腰、轨颞离焊缝中心 60 mm 的位置出现了剪切应力.

从表 1 可以看出,热处理(主要为改善接头金相组织,降低表面硬度变化)对降低残余应力效果也很明显. 热处理后的轨头、轨腰、轨颞最大残余应力降低为原来的 1/3 ~ 1/2,热处理前的最大残余应力值高达 775.1 MPa,而热处理后的最大残余应力值则降至 417.3 MPa,降幅达到 45%,且轨头热影响区的最大残余应力由拉应力变为压应力.

2.2 落锤试验结果

表 2 是热处理前后钢轨接头的落锤试验结果. 未进行热处理时,二根 50 kg/m 钢轨均 1 锤未断,三根 60 kg/m 钢轨只有一根 1 锤未断;热处理后,二根 50 kg/m 钢轨均 2 锤未断,四根 60 kg/m 钢轨中有三根 1 锤未断,一根 2 锤未断. 可见,热处理后,钢轨接头的抗瞬间冲击载荷能力明显提高.

表 2 钢轨焊接接头落锤试验结果

Table 2 Drop-weight test results of rail welded joints

接头编号	钢轨型号	是否热处理	一锤结果	两锤结果
08-05-01	60 kg/m	否	未断	断
08-05-02	60 kg/m	否	断	-
08-07-03	60 kg/m	否	断	-
08-07-01	50 kg/m	否	未断	断
08-07-02	50 kg/m	否	未断	断
08-10-01	60 kg/m	是	未断	未断
08-10-02	60 kg/m	是	未断	断
08-12-01	60 kg/m	是	未断	断
08-12-03	60 kg/m	是	未断	断
08-09-01	50 kg/m	是	未断	未断
08-09-02	50 kg/m	是	未断	未断

图 3 是钢轨焊接接头的落锤断口形貌. 火焰热处理前的钢轨断口裂纹沿不同方向扩展,起始裂纹在轨腰、轨颞及轨底三角区位置,然后向钢轨母材区扩展,引起钢轨断裂,如图 3a 所示. 热处理后的钢轨断口形貌比较规则,主要在焊缝中心和钢轨热影响区断裂,裂纹方向与钢轨落锤冲击载荷方向一致,如图 3b 所示.

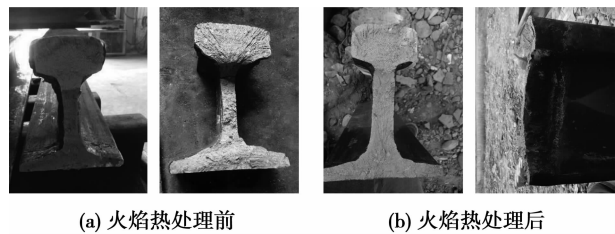


图 3 钢轨焊接接头热处理前后的典型落锤试验断口
Fig. 3 Typical fractures of drop-weight test before and after heat treatment of rail welded joints

3 分析与讨论

钢轨窄间隙电弧焊接过程的焊枪运动轨迹如图 4 所示^[10]. 轨底和轨头采用多层多道焊,焊接热输入相对较小,且冷却条件较好,因此冷却速度较快. 轨腰为气电立焊,为了保证侧壁熔合,采用了较

大的焊接电流和电弧电压,热输入相对较大,从而造成轨腰、轨颞存在较大残余应力. 热处理时,钢轨接头整体加热,冷却过程中的接头各部分温度梯度比焊接过程要小得多,这使接头残余应力有较大下降;同时轨底和轨头冷却较快,轨腰冷却时的温度梯度最大,故热处理后轨腰仍存在较大残余应力.

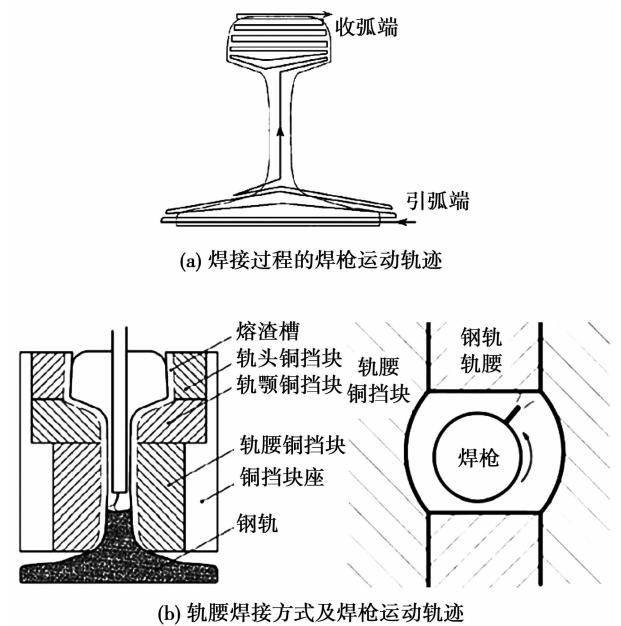


图 4 钢轨窄间隙电弧焊接过程的焊枪运动轨迹
Fig. 4 Welding torch trajectory during narrow-gap arc welding process of rail

热处理前后,钢轨焊接接头高度方向上的最大残余应力分布如图 5 所示(BH 表示热处理前,AH 表示热处理后). 热处理前,接头最大残余应力出现在轨腰位置,其次在轨颞位置;热处理后,残余应力大幅下降,轨腰、轨颞的残余应力约为热处理前的 40% ~ 50% .

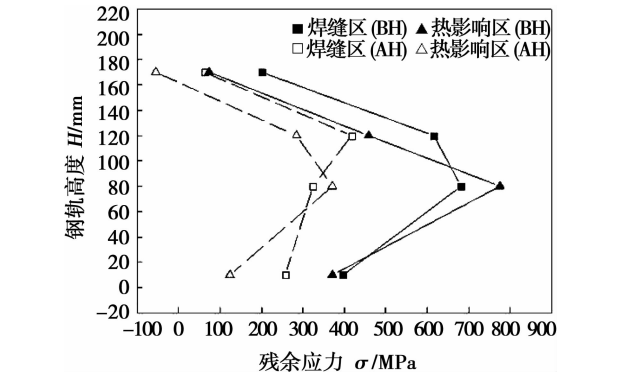


图 5 热处理前后钢轨高度方向的残余应力分布
Fig. 5 Residual stress distribution in height direction of rail welded joint before and after heat treatment

除进行残余应力测量外,还对热处理前后接头纵剖面焊缝各区域的金相组织进行了对比分析. 火焰热处理仅对轨头、轨底和轨腰的热影响区表面的粗大组织有一定细化作用,对焊缝区的组织改善效果不明显,原因可能主要是受到火焰加热时间短及加热方式的限制,接头各部分受热不均匀,钢轨内部和焊缝区的热处理温度不足所致.

火焰热处理前的钢轨焊接接头,轨腰、轨颞的残余应力最大值超过 600 MPa,而钢轨最低抗拉强度为 980 MPa. 以 3.1 m 落锤试验为例,钢轨接头受到的瞬间最大冲击力为 12 200 MPa^[8],是钢轨母材抗拉强度的 12.4 倍. 钢轨内部最大残余应力和落锤冲击载荷共同作用的位置,容易最先形成裂纹源,并沿着承载能力最低的方向扩展. 钢轨轨腰部分承载能力较低,加之存在较大的残余应力,因此,在外部冲击载荷的作用下,裂纹容易在轨腰和轨颞位置形成,然后向母材区扩展,最终导致接头断裂,形成如图 3a 所示的落锤断口.

在钢轨接头的焊缝横截面方向,热影响区存在两种组织相,是整个接头最薄弱的区域;由表 1 可知,虽然热处理后的接头残余应力大幅下降,但是残余应力最大值仍然在焊缝中心位置. 因此,在落锤冲击载荷作用下,热处理后的钢轨接头裂纹源仍然容易在比较薄弱的热影响区或残余应力较大的焊缝中心形成;同时,因为残余应力值相对较小,裂纹将会沿着冲击载荷的作用方向扩展、断裂,形成如图 3b 所示的落锤断口.

4 结 论

(1) 采用窄间隙电弧焊接的钢轨接头存在幅值较大的残余应力,火焰热处理可以有效降低接头残余应力,最大降幅可达 1/2 ~ 2/3.

(2) 钢轨接头残余应力的大小和分布与焊接热输入及冷却条件有关,在钢轨垂直方向,最大残余应力出现在轨腰、轨颞位置;在钢轨水平方向,最大残余应力通常为焊缝中心位置.

(3) 热处理前,钢轨焊接接头的轨腰、轨颞部位存在很大残余拉应力,在落锤冲击载荷和残余拉应力的共同作用下,断裂源容易在轨腰、轨颞部位形成,并沿钢轨比较薄弱的轨腰母材方向断裂;热处理后,钢轨接头的最大残余应力下降,在落锤冲击载荷

的作用下,断裂源容易在接头比较薄弱的热影响区和残余应力最大的焊缝中心位置形成,并沿冲击载荷的方向延伸断裂.

参考文献:

- [1] 潘建华. 钢轨内残余应力的危害及评价方法[J]. 铁道物资科学管理, 1997, 90(5): 33-34.
Pan Jianhua. Harms of the residual stress in the rail and its evaluation methods[J]. Railway Materials Management, 1997, 90(5): 33-34.
- [2] 李 国, 杨贵全. 钢轨残余应力测试方法: 中国, CN103234666A[P]. 2013-08-07.
- [3] TB/T 2344-2012. 中华人民共和国铁道行业标准[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2012.
- [4] Tawfik D. Verification of residual stresses in flash-butt-weld rails using neutron diffraction[J]. Physica B, 2006, 385(11): 894-896.
- [5] Skyttebol A. Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(2): 271-285.
- [6] Tawfik D. Experimental and numerical investigations: alleviating tensile residual stresses in flash-butt welds by localized rapid post-weld heat treatment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 196(1): 279-291.
- [7] TB/T 1632.2-4-2005. 中华人民共和国铁道行业标准[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2005.
- [8] 董平禹, 杨来顺. 钢轨焊接中落锤试验的探讨[J]. 铁道建筑, 2005, (8): 67-68.
Dong Pingyu, Yang Laishun. Discussion on drop hammer test used for inspection of rail welding quality[J]. Railway Engineering, 2005(8): 67-68.
- [9] 詹新伟, 周清跃. 钢轨轨底残余应力限定值的研究[J]. 铁道技术监督, 2000, 28(12): 9-11.
Zhan Xinwei, Zhou Qingyue. Research of rail base residual stress limit value[J]. Railway Quality Control, 2000, 28(12): 9-11.
- [10] 刘正文. 高速无缝线路钢轨窄间隙自动化电弧焊接关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [11] 顾唯明. 用钻孔应变测量决定残余应力的标准方法—ASTM 标准: E837—81[J]. 机械强度, 1986, 8(1): 40-43+81.
Gu Weiming. The standard method of residual stress measurement by borehole—ASTM Standard: E837—81[J]. Journal of Mechanical Strength, 1986, 8(1): 40-43+81.

作者简介: 朱志明,男,1964 年出生,博士,教授,博士生导师. 主要从事焊接过程控制及自动化方面的研究和开发工作. 发表论文 90 余篇. Email: zzmdme@mail.tsinghua.edu.cn