

无缝线路钢轨实际锁定轨温超声法测量研究

岳国军

(中国铁路北京局集团有限公司 唐山工务段,河北 唐山 064000)

摘要:锁定轨温是无缝线路养护、管理和维修的重要参数,如何实现无缝线路实际锁定轨温的准确快速测量,是铁路工务部门迫切需要解决的问题。基于声弹性理论分析了钢轨纵向温度应力超声临界折射纵波检测方法,搭建多通道超声应力检测试验平台,对钢轨进行不同超声频率与测点位置的压载试验,开展超声与应变片测试温度应力的对比研究,利用温度应力、实时轨温和设计锁定轨温的关系计算实际锁定轨温。通过对新建线路的现场测试,验证超声法实际锁定轨温测量满足工程需要。

关键词:无缝线路;实际锁定轨温;钢轨应力;超声波

中图分类号:U213 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2021)02-0087-06

无缝线路在带来社会发展和出行便利的同时,仍然存在着许多隐患。这种隐患主要来源于钢轨的内部应力,钢轨内部拉应力过大或者压应力过大都会出现问题,比如断轨、胀轨、裂纹及疲劳等^[1-2],往往会导致交通事故的发生,造成极大损失。产生钢轨内应力的因素一般有3种,残余应力、温度应力和工作应力,其中温度应力的影响尤为重要^[3-4],在长时间温度积累的过程中,温度应力会对钢轨内部造成十分严重的影响。由此需要对钢轨的内部温度应力与线路的实际锁定轨温进行定时检测与排查,以维护钢轨安全,减少线路事故的发生。

目前铁路系统大多采用观测桩等传统方法对钢轨的锁定轨温进行测定^[5-7],但这些方法作业人员数量多,耗时长,受人为影响较大,费时费力。为能够实现无缝线路实际锁定轨温的准确快速测量,新的方法不断出现^[8-9]。基于超声无损检测声弹性原理,分析固定声程内声时差的变化,进而得到钢轨应力值,利用温度应力、实时轨温和设计锁定轨温的关系,计算实际锁定轨温。搭建多通道超声波钢轨应力检测系统,对钢轨实施压载试验,确定理想的检测频率与位置。在现场选定一段试验线进行温度应力超声法与应变片测试对比研究,获取了温度应力与超声测量值的对应关系。最后开展超声法在现场的测试与验证,结果表明测量值与实际情况相符,满足锁定轨温准确快速测量的工程需要。

1 实际锁定轨温超声测量原理

1.1 超声波钢轨应力检测理论

声弹性理论研究弹性波传播速度与应力之间的关系,是超声法应力检测的主要依据。钢轨材质满足声弹性效应的4个基本假设,因此可以利用声速的变化计算出钢轨应力的大小^[10]。通过纵波、横波、导波等不同模式超声波对不同应力状态钢轨的敏感度分析可得,选择一发一收斜入射方式在钢轨次表面产生临界折射纵波(Lcr波)最利于钢轨的应力检测^[11-12]。

在零应力条件下,超声Lcr波在零应力钢轨中的传播速度表示为

$$v = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0}} \quad (1)$$

式中, ρ_0 为钢轨密度; λ 和 μ 为钢轨二阶弹性常数。

收稿日期:2021-02-27 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20210031

作者简介:岳国军(1963—),男,高级工程师,研究方向为铁路线路维修。E-mail:944144252@qq.com

岳国军.无缝线路钢轨实际锁定轨温超声法测量研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(2):87-92.

沿着应力方向传播的 Lcr 波声速与应力之间的关系^[13]

$$\rho_0 v_l^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right] \quad (2)$$

式中, v_l 为钢轨受应力状态时 Lcr 波声速; l 和 m 为钢轨三阶弹性常数; σ 为应力值。

式(1)和式(2)结合,可得

$$v_l^2 = v^2 (1 + k\sigma) \quad (3)$$

式中, k 为声弹性系数^[14]。

$$k = \frac{\frac{4\lambda + 10\mu + 4m}{\mu} + \frac{2l - 3\lambda - 10\mu - 4m}{\lambda + 2\mu}}{3\lambda + 2\mu} \quad (4)$$

由此推出, Lcr 波传播速度的变化值与应力变化值的关系

$$\frac{v_l}{v^2} \frac{dv_l}{d\sigma} = \frac{k}{2} \quad (5)$$

式中, $d\sigma$ 为应力的改变量; dv_l 为 Lcr 波速度的改变量。

由式(5)可得, 超声 Lcr 波沿着应力方向传播的声速变化与应力变化量成对应关系, 在一定条件下标定出钢轨零应力声速, 通过测量服役钢轨的实际声速, 就可以计算出钢轨在声传播方向上的应力大小。

考虑到在温差较大时钢轨弹性常数也会发生变化, 导致对应力检测结果产生干扰, 可采取分温度段标定的办法, 在现场采集轨温并调取钢轨该温度下最接近的零应力波形库数据, 通过相应的误差修正和现场拟合, 最终计算得到钢轨应力。

1.2 锁定轨温的超声测量

根据测标法基本原理, t 时刻钢轨的实际锁定轨温^[15]

$$T_N = T_R + \frac{\sigma_L}{E\alpha} \quad (6)$$

式中, T_R 为 t 时刻钢轨温度; σ_L 为钢轨纵向应力; $E = 2.1 \times 10^5$ MPa (钢轨的弹性模量); $\alpha = 11.8 \mu\text{E}/^\circ\text{C}$ (钢轨的热膨胀系数)。

但在具体测量时, 一般需要对应变值清零, 并记录清零时刻 t_0 的轨温 T_0 。在 t 时刻实际锁定轨温发生的变化量

$$\Delta T = T_R - T_0 + \frac{\sigma_L}{E\alpha} \quad (7)$$

则 t 时刻实际锁定轨温

$$T_N = T_{N0} + \Delta T \quad (8)$$

式中, T_{N0} 为清零时刻 t_0 时的锁定轨温, 通常为线路的设计锁定轨温, 是记录存档的已知量。

2 检测系统的搭建与钢轨压载试验

2.1 多通道钢轨应力超声波检测系统

多通道钢轨应力超声波检测系统的组成如图 1 所示, 其核心包括: 工控主机、多路超声信号采集模块、钢轨应力检测探头、轨温传感器和采集模块、外围设备 (如定位块、信号传输线、耦合剂等) 以及应力解算与标定软件。

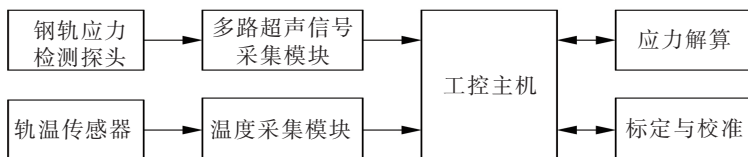


图 1 多通道钢轨应力超声波检测系统组成框图

多路超声信号采集模块的组成如图 2 所示, 其超声激励模块能产生 9 路信号, 用于同时检测钢轨不同

位置的应力状态。每路发射换能器以一定的入射角度将超声波入射到钢轨内,使得钢轨次表面激励出 Lcr 波并传播一定距离,之后每路接收换能器检测到 Lcr 波信号并将其传回超声信号采集模块,工控主机调取每路 Lcr 波接收信号,通过应力解算软件求解得到钢轨应力值。

2.2 检测探头频率及理想检测点确定

为研究不同频率探头检测钢轨应力的可行性,采用一截 600 mm 长、U75V 材质的 60 型钢轨分别对 5、4、2.5、1.5、1 MHz 共 5 种频率的探头进行试验,寻找最佳效果探头的频率及理想检测点。图 3 为超声探头与应变片测试位置图。图 4 为超声与应变片应力检测试验现场。

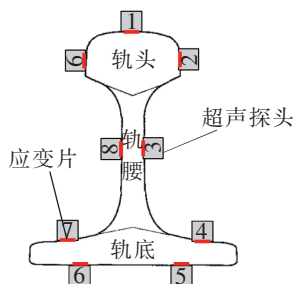


图 3 超声探头与应变片的布置



图 4 超声与应变片应力检测试验现场

根据华北平原的温差特性,以线路锁定轨温 27 °C 为零应力,夏天钢轨温度最高零上 80 °C、冬天钢轨温度最低零下 30 °C 计算,钢轨最大的温差载荷为 120 t。试验时给出一定余量,最大加载力选择 180 t。力加载方向为沿钢轨纵向,加载吨位以每 20 t 为一个步进,直至加载到最大吨位后卸载,以此模拟不同温差条件。钢轨 9 个点分别采用应变片、超声波及理论计算得出应力值。各点各载荷力的超声应变偏差率

$$\Delta = \frac{\sigma_u - \sigma_y}{\sigma_y} \times 100\% \quad (9)$$

式中, σ_u 为超声检测应力值; σ_y 为应变片测量应力值。

通过对比偏差率可得,超声探头频率 2.5 MHz 时,其检测结果与应变片测量值偏差最小,说明该频率段最适合钢轨纵向应力的检测。钢轨轨顶位置能反映钢轨的受力状态,试验效果较为理想,且工况条件下轨顶位置满足测试要求。图 5 为加载力 140 t 时,采用 2.5 MHz 超声探头检测 3 次平均后各测点测量的应力值分布网状图。图 6 为 0~180 t 加载过程中各点超声应力测量值。

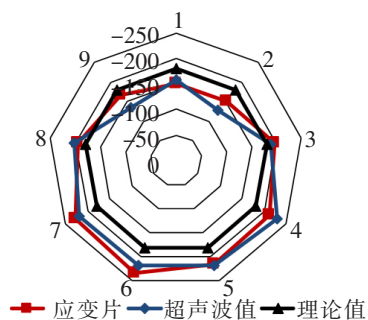


图 5 140 t 时各点应力值(单位:MPa)

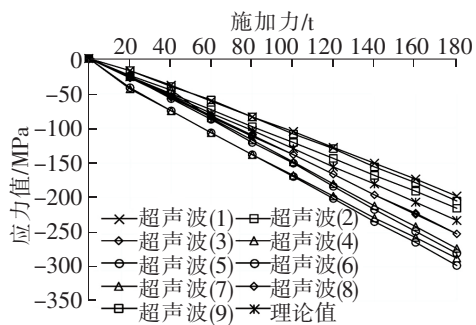


图 6 超声波各点测量数据(超声频率为 2.5 MHz)

试验中还发现,对称布置点的测量值不一定相同,如图 5 中 2、9 及 5、6 对称测点的应力值存在较为明显差异,其主要原因是钢轨压载面并不是绝对的平面,可能在截断后由于残余应力的释放造成微小翘曲,导致压载偏心,产生一定的应力梯度,而应变片法和超声法测量的是钢轨表面和次表面应力,由此造成了对称点测量数据的不同。

3 温度应力超声与应变片测试对比分析

依据工务段提供的可供测试线路,选取一段 500 m 无缝线路直线段(设计锁定轨温为 27 °C)开展温度应力超声法与应变片测试对比研究,以验证无缝线路钢轨温度应力超声检测的可行性并取得相关测试参数,为实际应用提供数据支持。

在试验段内,选取 9 个截面,每个截面分别在轨顶、轨顶侧面、轨腰及轨底选取 7 个测试位置,如图 7 所示。采用温度自补偿应变片和补偿块法测量钢轨受约束未能产生的应变。应变片测试为连续不间断自动采集方法,每秒采集一次。利用多通道钢轨应力超声波检测系统检测各截面轨顶温度应力。根据轨温计显示的轨道温度变化,完整测试每天从低温到高温,再到低温完整的温度变化过程。轨温每变化 1 °C 超声检测一次。

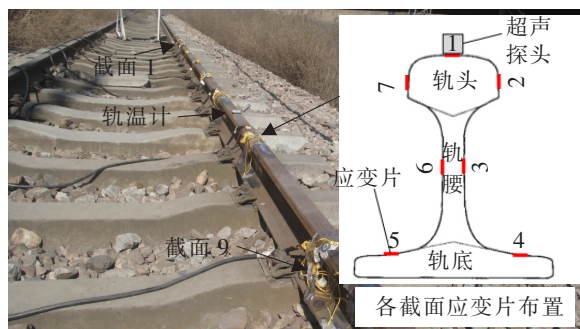


图 7 试验线路截面的选取及各截面应变片布置

从应变片随时间变化特征看,各截面的各测点应变每天的变化遵循相同规律,即在早上 5 点到 8 点之间应变值达到受拉最大值,表示钢轨温度应力受拉达到最大;而下午 2 点到 5 点之间,应变值达到受压最大值,表示钢轨温度应力受压达到最大。图 8 为截面 2 的应变片应变随时间变化情况。

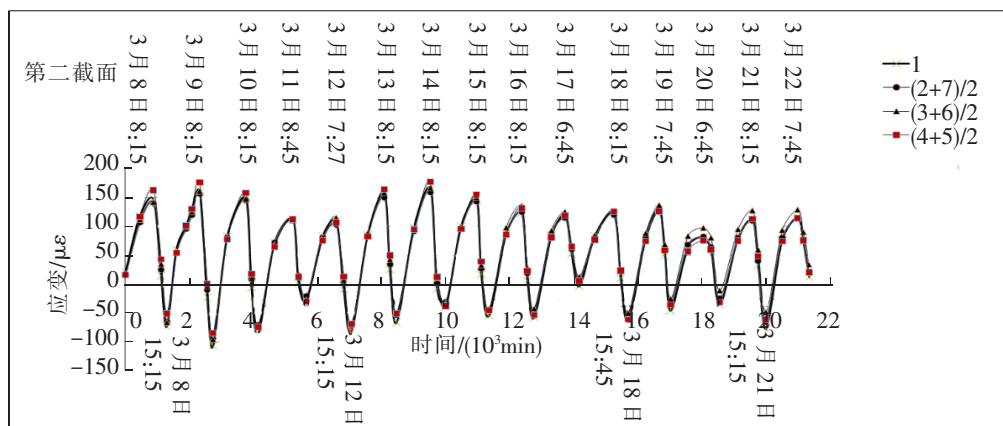


图 8 截面 2 应变片应变随时间变化图(对各对称测点取均值)

以 27 °C 的锁定轨温为零应力点,横坐标为温度增量(轨温高于 27 °C 为正,低于 27 °C 为负),纵坐标为温度应力,绘出因温度增减所引起的温度应力变化曲线。图 9 分别为截面 2 应变片与超声测的温度应力变化散点图及拟合曲线。通过对比分析可得,2 种方法均表现出较强的线性关系,可通过超声测量值反映出钢轨实际温度应力状态。

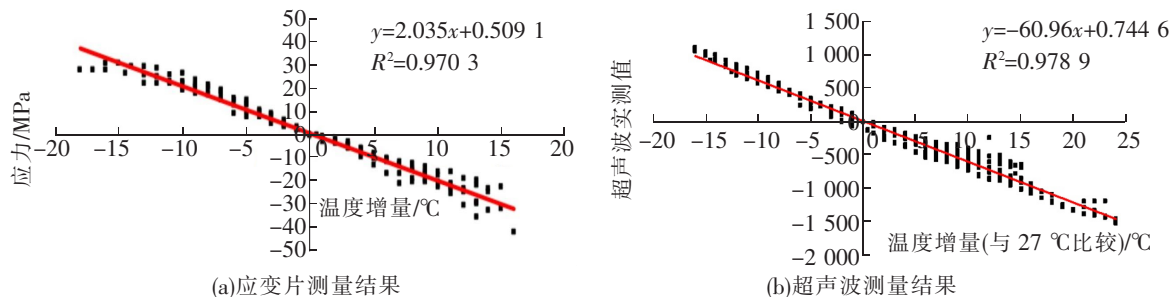


图 9 截面 2 温度应力随温度变化散点图及拟合曲线

4 实际锁定轨温超声法测量的现场验证

选取新建的石家庄到济南客运专线石家庄东站作为测试现场,石济线设计锁定轨温 28°C 。在车站开通前,采用超声法实测站内锁轨温度,图 10 为现场测试图片。测量采用 2 种方法:方法一是测点分布在一定区域,选取不同位置进行测试;方法二是测点固定在某一位置,进行不同温度下测试。第一种方法测量位置为 $\text{K19 km}+100\text{ m}$ 到 $\text{K19 km}+180\text{ m}$,每隔 10 m 选取上行左、右股和下行左、右股 4 个位置,图 11(a)为其测量结果。第二种方法测试位置为 $\text{K19 km}+190\text{ m}$ 处下行右股道,图 11(b)为其测量结果。



图 10 东站锁定轨温超声法现场测量

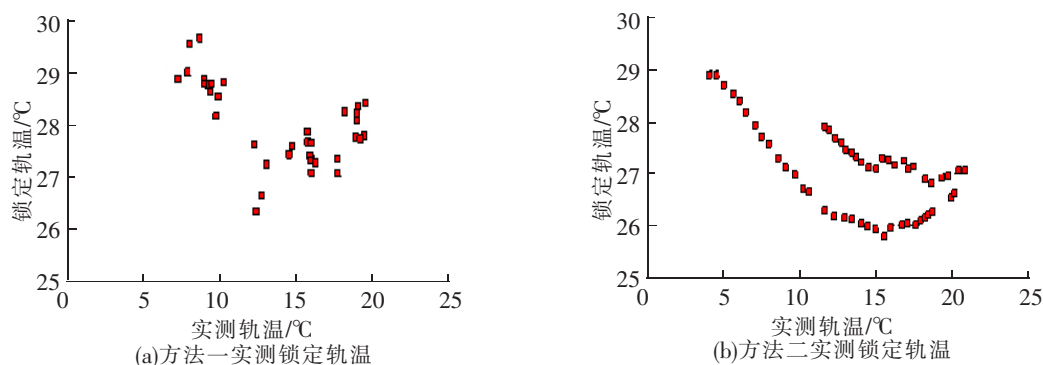


图 11 东站锁定轨温超声法现场测量数据

从数据结果来看,方法一测量的平均值为 27.6°C ,方法二为 27.2°C 。2 种方法实测的锁定轨温变化范围均在 28°C 附近,误差不超过 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$,验证了超声法实际锁定轨温测量的准确性可以满足工程需要。

5 结语

伴随我国铁路的高速发展,铁路无缝线路里程日益增加,以锁定轨温为重要参数的线路维护与维修任务日益繁重,人力、物力、财力的投入日益加大,如何打破传统检测锁定轨温的方法,实现无缝线路实际锁定轨温准确快速测量,减少成本支出成为铁路工务部门迫切需要解决的问题。基于此,将超声 Lcr 波应用到无缝线路实际锁定轨温的检测中,通过理论分析、试验数据拟合与参数提取,最终实现了钢轨锁定轨温的快速无损检测。每测点检测时间 $1\sim 2\text{ min}$,不需拆除扣件或者埋设观测桩,现场 $1\sim 2$ 人即可完成检测任务,检测误差小,应用效果良好,为解决实际锁定轨温测量的问题提供了新方案。

参 考 文 献

- [1]尹成斐. 75 kg/m 钢轨接头预留轨缝与接头热应力场分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017, 30(2): 89-95.
- [2]赵振航,李成辉,耿浩,等. 温度力对无缝线路钢轨振动及传递特性的影响分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 200-205.
- [3]张铭,蒋金洲. 无缝线路钢轨纵向力及锁定轨温检测系统(NTS)的试用[J]. 铁道建筑, 2010(8): 110-114.
- [4]Wegner A, GmbH E T, KG Co. Stress-free temperature monitoring using different measuring technologies -experiences and assessment[C]// Proceedings of 10th International Heavy Haul Association Conference. New Delhi: IHHA Press, 2013.

- [5]刘永前,王建文,邹振祝. 无缝线路钢轨温度力测试的位移法[J]. 铁道学报, 2005, 27(4): 125-128.
- [6]邱锦玉. 基于超声应力检测的钢轨锁定轨温测定[J]. 铁道建筑, 2018(9): 106-108.
- [7]Petr Vnenk, Bohumil Culek. Measurement methods of internal stress in continuous welded rail[J]. Acta Polytechnica CTU Proceedings, 2017, 11: 91-96.
- [8]郭磊, 雷鸣, 祁欣. 基于 DSTFT 的无缝线路稳定性分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017, 30(1): 46-51.
- [9]Nirmal K Mandal, Mitchell Lees. Effectiveness of measuring stress-free temperature in continuously welded rails by Rail Creep Method and Rail Stress Modules[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104: 189-202.
- [10]徐春广, 李卫彬. 无损检测超声波理论[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [11]黄祖光, 宋文涛. 超声法钢轨温度力及锁定轨温测定技术研究[J]. 铁道工务, 2019(2): 100-103.
- [12]Song Wentao, Xu Chunguang, Pan Qinxue, et al. Nondestructive testing and characterization of residual stress field using an ultrasonic method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 365-371.
- [13]Rose J L. Ultrasonic Guided Waves in Solid Media[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [14]宋文涛. 残余应力超声无损检测与调控技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [15]韦佳宏. 高铁钢轨温度应力及扣件松脱在线监测与识别研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

Research on Ultrasonic Measurement of Actual Stress-free Temperature of Continuously Welded Rail

Yue Guojun

(Tangshan Railway Maintenance Section, China Railway Beijing Bureau Group Co. Ltd., Tangshan 064000, China)

Abstract: Stress-free temperature is an important parameter for the maintenance, management and repair of continuously welded rail, how to achieve the accurate and rapid measurement of the stress-free temperature of continuously welded rail has become an urgent problem for the railway engineering department. Based on the principle of acoustic elasticity, this paper analyzed the ultrasonic critical refraction longitudinal wave detection method for the longitudinal temperature stress of rail, built a multi-channel ultrasonic stress testing experimental platform to conduct ballast tests with different ultrasonic frequencies and measuring point positions on rail, carried out the comparative study of temperature stress between ultrasonic and strain gage testing, and calculated stress-free temperature by using the relationship between temperature stress, real-time rail temperature and design stress-free temperature. Through the field test of the newly-built line, it was verified that the ultrasonic method of stress-free temperature rail temperature measurement meet the engineering needs.

Key words: continuously welded rail; actual stress-free temperature; rail stress; ultrasonic