

文章编号: 1005-0523(2026)02-0087-08



## 持续高温下CRTS III型板式轨道温度翘曲试验研究

邓诏辉<sup>1,2</sup>, 张鹏飞<sup>1,2</sup>, 余路<sup>1,2</sup>, 徐朗<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 江西南昌 330013;

2. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 江西南昌 330013)

**摘要:**为研究持续高温环境下CRTS III型板式无砟轨道温度翘曲效应,采用现场试验的方法,对轨道板温度、应变进行长期监测,基于监测数据研究了持续高温下轨道板温度分布规律,分析了轨道板温度翘曲效应。研究表明:在持续高温环境下,轨道板温度呈波浪式上升趋势。其中,底面温度均滞后于顶面温度,相位差约为1.5~4.0 h,且板中正温度梯度时间大于板边正温度梯度时间。正温度梯度荷载下,曲率为正,轨道板上拱;负温度梯度荷载下,曲率为负,轨道板向下翘曲。对轨道板翘曲曲率与竖向温度梯度进行一次函数关系拟合,拟合系数 $R^2$ 均在0.85以上,温度应变变化值与翘曲曲率值均随竖向温度梯度的增加而增加。研究成果可为持续高温环境下CRTS III型板式无砟轨道温度翘曲变形提供试验基础和数据支撑,为确保高速铁路的安全、稳定和高效运行提供重要保障。

**关键词:**持续高温; CRTS III型板式轨道; 温度翘曲; 试验研究

**中图分类号:** U213.2

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 邓诏辉, 张鹏飞, 余路, 等. 持续高温下CRTS III型板式轨道温度翘曲试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(2): 87-94.

## Experimental Study on Temperature Warping of CRTS III Slab Track Under Continuous High Temperature

Deng Zhaohui<sup>1,2</sup>, Zhang Pengfei<sup>1,2</sup>, Yu Lu<sup>1,2</sup>, Xu Lang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Engineering Research Center for Railway Environmental Vibration and Noise of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to study the temperature warping effect of CRTS III slab ballastless track under continuous high temperature environment, the field test method was used to monitor the temperature and strain of track slab for a long time. Based on the monitoring data, the temperature distribution law of the track slab under continuous high temperature was studied, and the temperature warping effect of the track slab was analyzed. The results show that the temperature of the track slab shows a wave-like upward trend in the continuous high temperature environment. Among them, the bottom surface temperature lags behind the top surface temperature, the phase

收稿日期: 2025-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52368063, 52178425); 2022年江西省科技专项(20223AEI91004); 江西省高层次高技能领军人才培养工程项目(1600223003)

difference is about 1.5~4 h, and the positive temperature gradient time in the plate is greater than the positive temperature gradient time at the edge of the plate. Under the positive temperature gradient load, the curvature is positive, and the track slab is arched; under the negative temperature gradient load, the curvature is negative, and the track slab warps downward. The linear function relationship between the warping curvature of the track slab and the vertical temperature gradient is fitted. The fitting coefficient  $R^2$  is above 0.85, and the temperature strain change value and the warping curvature value increase with the increase of the vertical temperature gradient. The research results can provide experimental basis and data support for the temperature warping deformation of CRTS III slab ballastless track under continuous high temperature environment, and provide important guarantee for ensuring the safe, stable and efficient operation of high-speed railway.

**Key words:** continuous high temperature; CRTS III slab track ; temperature warping; experimental study

**Citation format:** DENG Z H, ZHANG P F, YU L, et al. Experimental study on temperature warping of CRTS III slab track under continuous high temperature[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(2): 87-94.

当连续3日最高气温在35℃以上,且日温差小于10℃时<sup>[1]</sup>,无砟轨道处于持续高温环境下。由于混凝土的热传导性能较差,在持续高温环境下,轨道板内部温度无法有效放散导致热量积聚,无砟轨道结构内部温度分布不均,结构表面和内部产生较大温度伸缩变形,易造成轨道板上拱,轨道板、底座板开裂等病害。因此,研究持续高温荷载下无砟轨道温度分布规律及温度翘曲效应十分必要。

对此国内外学者展开了大量研究。娄平等<sup>[2]</sup>根据现场温度监测数据,研究了无砟轨道温度场及温度梯度特性。闫斌等<sup>[3-4]</sup>基于气象参数提出了适用于我国典型地区的温度荷载模式。方若望等<sup>[5]</sup>运用频谱方法,研究了CRTS II型轨道板不同深度温度间的关系。董博等<sup>[6]</sup>通过有限元法模拟了多种环境因素下底座板的早期温度场。文献[7-10]基于现场试验及数值仿真研究分析了无砟轨道温度场特性及产生的热效应。周锐等<sup>[11]</sup>基于温度模拟试验,分析了不同温度速率下桥上无砟轨道热力学性能。赵磊等<sup>[12]</sup>基于现场试验分析了温度梯度与道床板翘曲变形之间的相关关系。刘钰等<sup>[13]</sup>建立了CRTS II型板式无砟轨道的三维瞬态温度场计算模型,研究分析了持续高温环境下温度场的时、空特征及其对无砟轨道结构的影响规律。温度荷载长期作用下,无砟轨道随即产生的病害也较多,Song等<sup>[14]</sup>研

究了不同温度荷载作用下轨道温度引起的翘曲变形。Yu等<sup>[15]</sup>基于长期监测数据研究了不同安全概率工况下无砟轨道结构的力学性能。文献[16-18]采用现场试验的方法研究了寒冷地区无砟轨道的温度场特性,基于试验数据并结合数值仿真对不均匀温度荷载下轨道板变形损伤进行了分析,同时采用GA-BP神经网络对轨道板温度展开了预测分析。综上所述,针对温度荷载下无砟轨道的影响规律及病害研究,尤其是CRTS I、CRTS II型板式无砟轨道,国内外学者已取得丰硕成果,但针对持续高温环境下CRTS III型板式无砟轨道温度翘曲变形的试验研究较少。轨道板温度翘曲变形会导致轨道不平顺,进而对列车运行的安全性和平稳性产生不利影响。因此,研究持续高温环境下轨道板的温度翘曲效应,有助于了解轨道板在持续高温下的变形规律和稳定性状况,从而采取相应的措施来确保轨道结构的稳定性和安全性。

以CRTS III型板式无砟轨道为研究对象,选择我国持续高温环境典型的南昌地区进行实时监测,基于长期监测数据对持续高温环境下轨道板温度分布演化规律和温度翘曲效应展开研究,可以更加深入地了解轨道板在持续高温条件下的变形特性。本研究可为持续高温环境下CRTS III型板式无砟轨道的结构受力变形及相关病害研究提供试验基

础和数据支撑。

## 1 试验方案

本试验依托某地轨道试验基地,选用CRTS III型板式无砟轨道进行长期监测,监测时间为6月—10月。其中,轨道线路为南北走向,轨道板长、宽、厚分别为5 600、2 500、200 mm,相邻轨道板之间板缝为70 mm;钢轨为60 kg/m;扣件为WJ-8型扣件,其间距为630 mm;自密实混凝土厚度为100 mm;底座板宽度为3 100 mm,厚度为300 mm。温度采集模块由直引式PT100温度传感器(温度测量范围为 $-50\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,测量精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )及SIN-R6000C温

度采集仪构成;应变采集模块由VWS-10型振弦式应变计传感器(应变测量范围为 $-1\ 500\mu\epsilon\sim 1\ 500\mu\epsilon$ ,测量精度为 $0.1\mu\epsilon$ )及GDA1602(16)型全功能采集仪构成,如图1所示。

为研究持续高温环境下III型板式轨道轨道板温度分布规律及温度翘曲效应,在无砟轨道中部断面上,东西两侧板边顶部和底部分别布设4个测点A1、A2、C1、C2,板中顶部和底部布设两个测点B1、B2,如图1所示。其中,每个测点均布设一个温度传感器和一个应变传感器,温度和应变传感器均沿钢轨方向(纵向)布设,板内温度、应变均10 min采集一次。

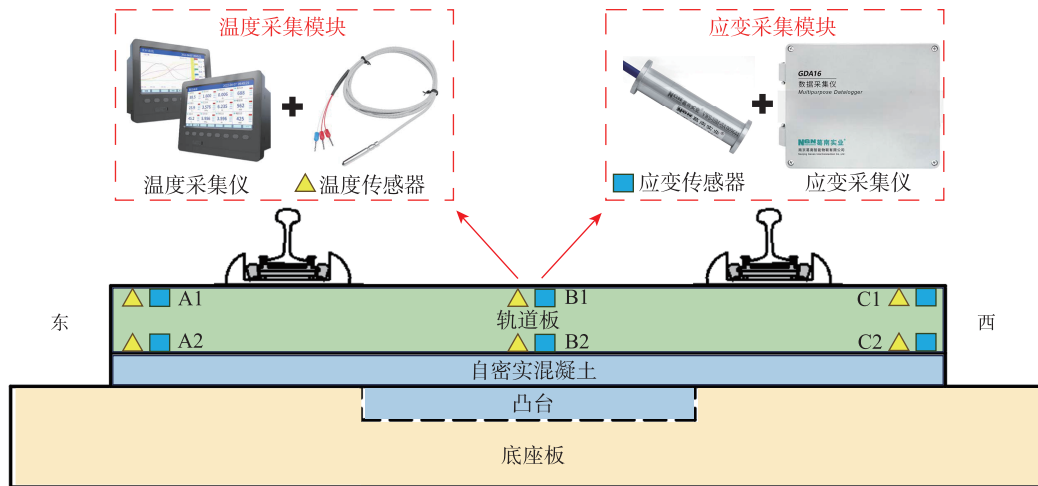


图1 温度、应变传感器布设示意图

Fig. 1 Layout diagram of temperature and strain sensors

## 2 持续高温下轨道板温度分布规律

### 2.1 温度分布规律

某地2024年7月29日—2024年8月10日为持续高温环境,故选择该时间段对各测点分析,绘制持续高温环境下轨道板各测点温度分布图,如图2所示。

由图2可知,在持续高温环境下,各测点温度总体均呈波浪式上升趋势,是由于气温较高且日温差较小,混凝土热传导性能较差,轨道板内部温度无法放散导致热量积聚,不能在当日完成热温差循环。其中,轨道板顶部最高温度可达 $51.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,底部最高温度可达 $45.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑持续高温环境下单日高温温度荷载下轨道板温度分布规律,以2024年8月1日为例,A1测点在14:20时达到温度峰值 $47.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,A2测点在15:50时达到温度峰值 $41.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相

位差为1.5 h;B1测点在14:30时达到温度峰值 $46.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,B2测点在18:10时达到温度峰值 $40.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相位差约为3.5 h;C1测点在14:40时达到温度峰值 $45.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,C2测点在18:50时刻达到温度峰值 $41.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相位差约为4 h。由于A1、B1、C1测点均位于轨道板表面,所受到的太阳热辐射是同时的,均在当日14:30左右达到温度峰值;从测点位置分析,A1测点率先达到温度峰值且较其他顶部测点温度最高,是由于A1位于东部较早受到太阳辐射且积聚热辐射较其他测点多、B1次之、C1最晚且温度峰值最低。A2、B2、C2测点处在轨道板底部,其温度峰值到达时间规律与表面测点规律一致,但C2测点温度峰值较其它底部测点较高,这是由于底部测点较顶部测点具有滞后性,且下午太阳辐射主要在西部,西部测点存在较多太阳辐射;B2测点位于轨道板内侧,在太阳热辐射传递过程中消耗的热量较其它测

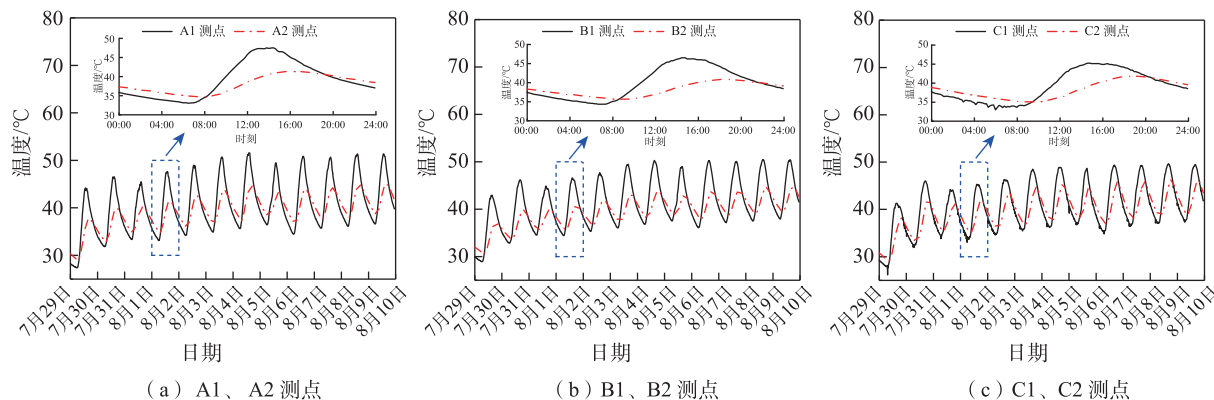


图2 持续高温下各测点温度分布规律

Fig. 2 The temperature distribution law of each measuring point under continuous high temperature

点多,故其温度峰值最低。

## 2.2 竖向温度梯度分布规律

为研究持续高温下CRTS III型板式轨道轨道板竖向温度梯度分布规律,计算各测点竖向温度梯度并进行分析,如图3所示。

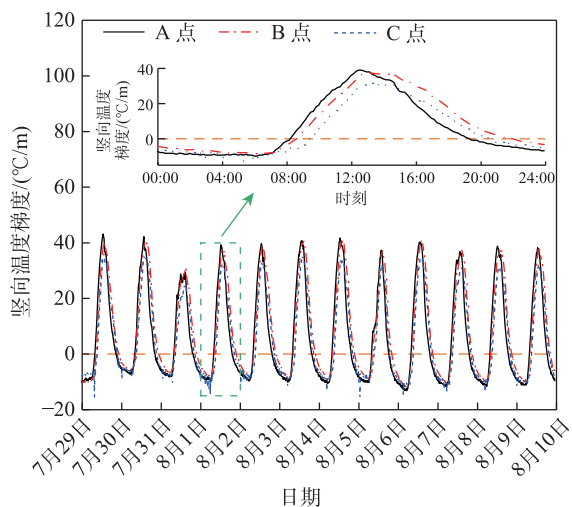


图3 持续高温下各测点竖向温度梯度分布规律

Fig. 3 Vertical temperature gradient distribution law of each measuring point under continuous high temperature

由图3可知,在持续高温环境下,各测点温度梯度总体趋势变化不大,正温度梯度远大于负温度梯度,这主要是由热量传递的自然规律(热量从高温区流向低温区)所决定的。为研究持续高温环境中单日高温温度荷载下轨道板竖向温度梯度分布规律,以8月1日为例,A点断面正温度梯度时间为8:20—19:20,B点断面正温度梯度时间为8:40—21:40,C点断面正温度梯度时间为9:30—20:40,其余时刻均为负温度梯度;板中B测点单日正温度梯度时间最长,板边A、C两点正温度梯度时间较短且相差不

大。这是由于白天太阳辐射较强、气温较高,轨道板温度迅速升高,易产生正温度梯度且持续时间较长;夜晚太阳辐射较弱、气温较低,但轨道板内部热量积聚和热传导存在滞后性,故负温度梯度持续的时间相对较短。A点12:30时达到正温度梯度峰值 $39\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,6:00时达到负温度梯度峰值 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ;B点13:00时达到正温度梯度峰值 $37.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,6:20时达到负温度梯度峰值 $-9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ;C点13:10时达到正温度梯度峰值 $32\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,6:00时达到负温度梯度峰值 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。这是由于在南北走向的轨道线路上,太阳方位角变化会导致东西两侧受到太阳辐射强度不同。特别是在夏季,太阳从东方升起,逐渐向西移动,因此东侧轨道在早晨和上午会较早地受到强烈的太阳辐射。由于太阳辐射是轨道温度梯度形成的主要因素之一,东侧轨道在持续高温环境下更容易形成较大的温度梯度,故A点率先达到正温度梯度峰值且峰值最大、B点次之、C点最晚且最小;下午太阳辐射主要针对西部,故A点较快向负温度梯度方向衰减、B点次之、C点最晚;但由于B点位于轨道板中部,混凝土热循环能力较差,所聚集的热量消散较慢,故B点较晚到达负温度梯度。在持续高温环境下,由于太阳热辐射角及混凝土热量积聚,正温度梯度峰值A点最大、B点次之、C点最小;负温度梯度峰值C点最大、A点次之、B点最小,其规律与温度梯度变化速率基本一致。

## 3 持续高温下轨道板温度翘曲效应分析

在持续高温环境下,CRTS III型板式轨道轨道板暴露在空气中,由于大气温度不断变化,轨道板内部存在复杂的温度伸缩变化。同时,轨道板厚度

对温度传导有一定的延迟性和滞后性,温度从上表面传至下表面过程中会在道面内形成一定的温度梯度,导致下表面与上表面之间形成温度差,从而使轨道板出现温度翘曲效应。

### 3.1 轨道板温度效应分析

为研究持续高温环境下 CRTS III 型板式轨道温度翘曲效应,对轨道板板中、板边进行了应变监测。从上文轨道板温度分布规律可以看出,存在3日(2024年8月1日—2024年8月3日)轨道板温度及温度梯度持续升高,选择该时间段进行持续高温环境下温度翘曲效应分析,其应变变化规律如图4所示,单日各测点顶部与底部应变峰值见表1。

由图4可知,在持续高温环境下,轨道板各测点应变呈周期性变化。顶部应变变化值均大于底部应变变化值,主要是由于在持续高温环境下,轨道板顶部直接暴露于太阳辐射和高温大气中,而底部则相对较难受到直接影响。轨道板通常由混凝土等热膨胀系数较大的材料制成,在受热时,这些材料会沿着温度升高的方向膨胀。由于轨道板顶部温度高于底部,因此顶部材料会膨胀得更多,导致轨道板顶部应变大于底部应变。竖向正温度梯度增大时,板中顶部应变呈受压趋势、底部应变反之;而板边顶部、底部应变均呈受压趋势。其中,A点应变变化值最大、B点次之、C点最小,竖向正温度

梯度越大其应变变化值越大,在夏季高温时南北走向的线路应重点关注轨道东侧结构的损伤。

由表1可知,在持续高温且仅受温度荷载作用下,轨道板中拉应变峰值均大于板边拉应变峰值,主要是由于板中部的热膨胀受到周围材料的约束更大,因此会在板中产生较大的拉应变;相比之下,板边由于与外界环境的热交换更为直接,且受到的约束相对较小,因此拉应变峰值相对较低。轨道板为钢筋混凝土结构,温度荷载作用下更易受拉变形、产生裂缝,故在持续高温环境下应重点关注板中受拉变形。其中,板中底部拉应变峰值最大,这是因为轨道板内部由于温度变化产生的温度应变在此处较为集中。随着竖向温度梯度的升高,应变变化差值呈上升趋势,故竖向温度梯度的升高在一定程度上会降低轨道板的安全服役年限。

### 3.2 温度翘曲变形分析

由于轨道板内存在竖向温度梯度,导致顶部、底部的形变不一致,在一定假定条件下,可通过板顶及板底的应变计算出翘曲率<sup>[19]</sup>

$$\rho = \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_t}{(D_t - D_b)(1 + \varepsilon_t)} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为轨道板翘曲曲率,  $m^{-1}$ , 正值为向上翘曲, 负值为向下翘曲, 其绝对值越大表示翘曲程度越大;  $\varepsilon_t$ 、 $\varepsilon_b$ 、 $D_t$  和  $D_b$  分别为板顶应变、板底应变、顶

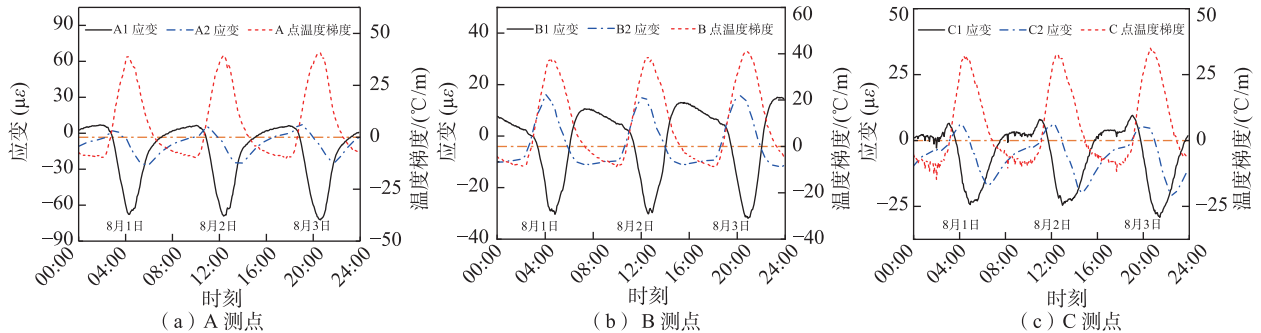


图4 持续高温下各测点应变分布规律

Fig. 4 The strain distribution law of each measuring point under continuous high temperature

表1 持续高温下各测点单日顶部和底部应变峰值

Tab.1 The peak stress of the top and bottom surface of each measuring point in a single day under continuous high temperature

日期	A1 测点		A2 测点		B1 测点		B2 测点		C1 测点		C2 测点	
	顶部	底部	顶部	底部	顶部	底部	顶部	底部	顶部	底部	顶部	底部
2024年8月1日	6.7	-68.3	2.9	-27.0	10.6	-30.6	16.3	-11.5	6.4	-24.6	6.0	-17.2
2024年8月2日	6.2	-69.6	4.8	-25.8	13.0	-30.4	15.7	-11.4	7.9	-24.8	6.0	-20.0
2024年8月3日	6.1	-72.9	7.4	-24.6	15.0	-32.2	15.7	-12.2	9.4	-29.4	5.3	-21.0

部应变计高度、底部应变计高度。

按式(1)计算轨道板各测点翘曲曲率,如图5所示。由图5可知,轨道板曲率变化与竖向温度梯度变化趋势相近。曲率白天为正,夜晚为负,是由于白天各测点均为正温度梯度,导致轨道板上拱,夜晚为负温度梯度,轨道板向下翘曲。翘曲曲率越大,越易形成脱空、层间离缝等病害。其中,A测点翘曲曲率最大、B点次之、C点最小,主要是由于轨道板表面与内部温度差异越大导致轨道板在受热时产生更大的不均匀热膨胀,从而引发更大的翘曲变形。翘曲曲率越大,表示轨道板的翘曲变形越严重,故在持续高温环境下南北走向线路应重点关注东侧轨道结构翘曲变形病害。

为研究翘曲曲率与竖向温度梯度的关系,绘制曲率-温度梯度的滞回特征图,如图6所示。由图6可知,各曲率随着温度梯度变化存在一定的滞回特征,但曲率与温度梯度的相位差较小,滞回特征不明显,因此分析轨道板翘曲曲率-竖向温度梯度间关系能较好的反映轨道板的温度翘曲效应<sup>[20]</sup>。

使用一次方程  $y=ax+b$  的形式对持续高温下轨道板翘曲曲率与竖向温度梯度的关系进行拟合,其关系见表2。

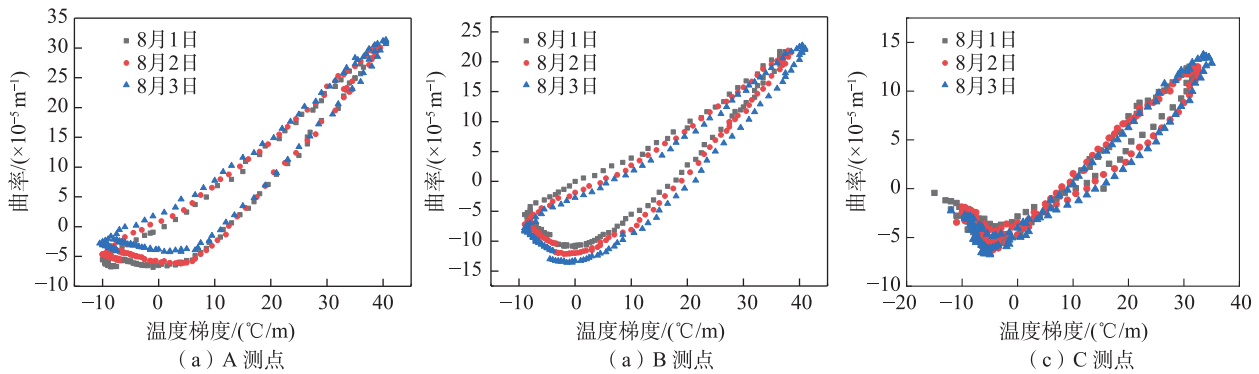


图6 持续高温下各测点曲率-温度梯度滞回特征

Fig. 6 Curvature-temperature gradient hysteresis characteristics of each measuring point under continuous high temperature

表2 持续高温下轨道板翘曲曲率与竖向温度梯度拟合关系

Tab.2 The fitting relationship between warping curvature and vertical temperature gradient of track slab under continuous high temperature

日期	A测点			B测点			C测点		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
2024年8月1日	0.681	-0.298	0.911	0.615	-4.918	0.854	0.374	-1.619	0.863
2024年8月2日	0.688	-0.487	0.914	0.640	-6.287	0.869	0.384	-1.908	0.895
2024年8月3日	0.700	-0.611	0.923	0.650	-7.205	0.873	0.403	-2.436	0.905

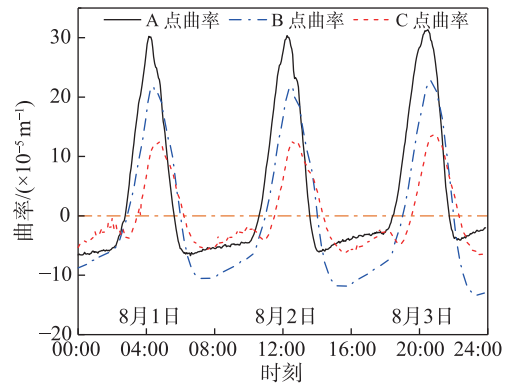


图5 持续高温下各测点曲率分布规律

Fig. 5 The curvature distribution law of each measuring point under continuous high temperature

由表2可知,各曲线拟合系数  $R^2$  均大于0.85,故轨道板翘曲曲率85%以上由竖向温度梯度导致。在持续高温环境下,各测点曲率均与温度梯度呈一次函数关系。其中,  $R^2$  越大,表示曲率随温度梯度变化速率越快,由表2可知,A点速率最快、B点次之、C点最慢;随着竖向温度梯度的增加,曲率增长速率加快,与竖向温度梯度大小规律一致。

#### 4 结论

针对持续高温环境下CRTS III型板式轨道轨

道板温度分布及温度翘曲效应,采用了现场实测的方法,分析了南昌地区持续高温条件下轨道板内温度分布规律,研究了持续高温荷载对轨道板的翘曲效应影响规律,得到以下结论。

1) 试验结果表明,轨道板各测点温度总体呈波动上升趋势,竖向正温度梯度峰值远大于负温度梯度峰值,正温度梯度时长大于负温度梯度时长。其中,板中正温度梯度时长比板边正温度梯度时长更长。针对南北走向线路,受太阳辐射的影响,东侧较早达到正温度梯度峰值且峰值最大,正温度梯度峰值沿东至西方向呈递减趋势。

2) 轨道板各测点应变呈周期性变化,竖向温度梯度越大,应变变化值越大,顶部应变变化值均大于底部应变变化值,轨道板板中拉应变峰值均大于板边拉应变峰值,故在持续高温环境下应重点关注轨道板板中顶部受拉变形。

3) 轨道板翘曲曲率与竖向温度梯度的关系曲线拟合系数  $R^2$  均大于0.85,轨道板翘曲曲率85%以上由竖向温度梯度决定。其中,竖向温度梯度越高,翘曲曲率越大,表示轨道板的翘曲变形越严重,轨道板安全服役时间越短。

#### 参考文献:

- [1] 林超. 持续高温对CRTS II型板式无砟轨道温度场影响的试验研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(5): 15-18.  
LIN C. Experimental study on influence of sustained high temperature on temperature field of CRTS II slab-type ballastless track[J]. Railway Engineering, 2016, 56(5): 15-18.
- [2] 娄平, 黄新德, 李传书, 等. 基于GEV模型的西南高原无砟轨道温度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(3): 900-908.  
LOU P, HUANG X D, LI C S, et al. Experimental study on temperature of ballastless track in southwest plateau by GEV model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(3): 900-908.
- [3] 闫斌, 戴公连, 苏海霆. 基于气象参数的轨道板竖向温度梯度预测模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 9-13.  
YAN B, DAI G L, SU H T. A meteorological parameters-based prediction model of vertical temperature gradient of track plate[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(12): 9-13.
- [4] 闫斌, 刘施, 戴公连, 等. 我国典型地区无砟轨道非线性温度梯度及温度荷载模式[J]. 铁道学报, 2016, 38(8): 81-86.  
YAN B, LIU S, DAI G L, et al. Vertical nonlinear temperature distribution and temperature mode of unballasted track in typical areas of China[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(8): 81-86.
- [5] 方若望, 何越磊, 李再帏, 等. 高温季节轨道板温度模型的热流时延效应分析[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(3): 31-36.  
FANG R W, HE Y L, LI Z W, et al. Analysis on heat flux delay effect of track slab temperature model in high temperature season[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(3): 31-36.
- [6] 董博, 蔡小培, 陈泽林, 等. 环境因素影响下无砟轨道底座板早期温度场模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(6): 2236-2246.  
DONG B, CAI X P, CHEN Z L, et al. Temperature field simulation of early-age ballastless track base plate under influence of environmental factors[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(6): 2236-2246.
- [7] CAI X P, ZHANG Q, ZHANG L L, et al. Spatial temperature characteristics of CRTS III slab track of railways on plateaus[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 218: 104091.
- [8] ZHANG Q, CAI X P, ZHANG Y R, et al. Real-time temperature field and thermal deformation of slab track on cable-stayed bridge[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 51: 103582.
- [9] ZHANG Q, CAI X P, ZHONG Y L, et al. Temperature field and thermal effects of the longitudinal connected slab track based on the measurement data and thermal-fluid-structure coupling analysis[J]. Construction and Building Materials 2022, 343: 128121.
- [10] CAI X P, LUO B C, ZHONG Y L, et al. Arching mechanism of the slab joints in CRTS II slab track under high temperature conditions[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 98: 95-108.
- [11] 周锐, 陈登高, 朱烜, 等. 不同温度速率下桥上CRTS II型板式无砟轨道热力学性能研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(5): 100-109.  
ZHOU R, CHEN D G, ZHU X, et al. Study on thermody-

- dynamic performance of CRTS II slab ballastless track on bridge under different temperature change rates[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(5): 100-109.
- [12] 赵磊, 蒋典佑, 施成. 单元双块式无砟轨道翘曲变形特征的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(10): 4053-4064.  
ZHAO L, JIANG D Y, SHI C. Experimental study on warping deformation characteristics of unit bi-block ballastless track[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(10): 4053-4064.
- [13] 刘钰, 蒋典佑, 孙晓丹, 等. 单元无砟道床温度场时空分布非均匀特征[J]. 铁道学报, 2023, 45(8): 118-128.  
LIU Y, JIANG D Y, SUN X D, et al. Temporal and spatial non-uniformity of temperature field of unit ballastless track bed[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(8): 118-128.
- [14] SONG X L, ZHAO C F, ZHU X J. Temperature-induced deformation of CRTS II slab track and its effect on track dynamical properties[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(10): 1917-1924.
- [15] YU Z W, XIE Y, TIAN X Q. Research on mechanical performance of CRTS III plate-type ballastless track structure under temperature load based on probability statistics [J]. Advances in Civil Engineering, 2019: 2975274.
- [16] REN J J, QU C H, LIANG J, et al. Experimental study on temperature field characteristics of CRTS III prefabricated slab track in cold regions[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2024, 24(3): 152.
- [17] ZHANG K Y, REN J J, YE W L, et al. The influence of uneven frost heave and thermal conditions on the deformation and damage of slab track in seasonally frozen regions[J]. Engineering Failure Analysis 2024, 157: 107881.
- [18] LIU D, SU C G, YANG R S, et al. Temperature field test and prediction using a GA-BP neural network for CRTS II slab tracks[J]. Railway Engineering Science, 2023, 31(4): 381-395.
- [19] ALLAND K D, VANDENBOSSCHE J M, MELO DE SOUSA A. Daily cycles of temperature-independent curvature in jointed plain concrete pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2017, 143(8): 04017034.
- [20] 凌建明, 刘海伦, 石蓉, 等. 机场水泥道面日周期温度效应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 1171-1179.  
LING J M, LIU H L, SHI R, et al. Effect of diurnal temperature variations on airport cement pavement[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(8): 1171-1179.



第一作者: 邓诏辉(2000—), 男, 博士研究生, 研究方向为道路与铁道工程。E-mail: 2933128364@qq.com。



通信作者: 张鹏飞(1975—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为桥上无砟轨道无缝线路设计理论及关键技术。E-mail: zhangpf4236@163.com。

(责任编辑: 吴海燕)