

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.084



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



温度与列车荷载作用下高速铁路无砟轨道力学性能研究进展

宋安祥^{a,b}, 姚国文^{a,b}, 刘佳伟^b, 王月瑞^b

(重庆交通大学 a. 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室; b. 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要:为深入了解温度及高频列车荷载作用下无砟轨道结构损伤研究进展,概述无砟轨道的主要结构型式及其优缺点,梳理无砟轨道温度场与温度效应的研究现状,重点分析不同温度荷载形式下层间界面损伤发生、发展过程与变化规律;介绍静力作用下路基、桥上无砟轨道的静力特性及疲劳荷载作用下的疲劳损伤演化机制;探讨温度-列车荷载耦合作用下无砟轨道结构力学响应研究现状及其重难点;总结目前研究的局限并进一步展望未来发展趋势。结果表明:具有太阳辐射地域性差异的无砟轨道温度作用模式和取值鲜有研究,设计规范也没有针对性说明,后续应结合历史气象数据准确计算无砟轨道温度作用,绘制不同地域的无砟轨道温度作用取值等温线地图,提高结构温度作用取值和温度计算理论的精度;对温度及列车荷载对无砟轨道结构损伤的研究多集中于整体结构,细部结构损伤演化未深入研究,应对标工程实际,结合轨道细部构件与整体结构、室内加速试验与现场试验、数值分析与试验研究,量化无砟轨道各参数与结构的映射关系;因试验条件限制,现有温度-荷载及力学试验均分段进行,仅从数值模拟角度对无砟轨道开展温度-列车荷载耦合作用下的性能研究,数值结果缺少模型试验的验证,应在单一荷载研究背景下进一步突破温度-列车荷载耦合作用下的多尺度模型试验方法、多场耦合精细化数值分析方法,揭示温度-列车荷载耦合动力学行为和轨道结构失稳机理;循环温度、持续高低温等复杂温度和列车荷载耦合效应鲜有研究,应探明复杂温度-列车荷载耦合作用下无砟轨道损伤演化机制,优化无砟轨道体系设计,完善耦合作用下的轨道结构性能服役评估标准。

关键词:高速铁路;无砟轨道;温度场;温度荷载;列车荷载

中图分类号:U213.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)05-0125-22

Research progress on mechanical properties of high-speed railway ballastless track under temperature and vehicle load

SONG Anxiang^{a,b}, YAO Guowen^{a,b}, LIU Jiawei^b, WANG Yueru^b

(a. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering; b. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: In order to deeply understand the progress of research on structural damage of ballastless track under

收稿日期:2022-02-10

基金项目:国家自然科学基金(52178273);重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX1159);重庆市研究生联合培养基地建设
项目(JDLHPYJD2020004);重庆市研究生科研创新项目(CYB22230)

作者简介:宋安祥(1995-),男,博士生,主要从事无砟轨道结构研究,E-mail:1225763598@qq.com。

姚国文(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:yaoguowen@sina.com。

Received: 2022-02-10

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52178273); Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2021jcyj-msxmX1159); Chongqing Graduate Joint Training Base Construction Project (No. JDLHPYJD2020004); Chongqing Postgraduate Research and Innovation Project (No. CYB22230)

Author brief: SONG Anxiang (1995-), PhD candidate, main research interest: ballastless track structure, E-mail: 1225763598@qq.com.

YAO Guowen (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yaoguowen@sina.com.

temperature and high-frequency train load, the primary structural forms of ballastless track and its advantages and disadvantages were summarized, the current status of research on the temperature field and temperature effect of ballastless track was reviewed, and the process of occurrence, development and change the law of interlayer interface damage under different forms of temperature load was focused on. The static properties of roadbeds and ballastless tracks on bridges under static forces and the mechanism of fatigue damage evolution under fatigue loading were presented. The current state of research on the mechanical response of ballastless track structures under coupled temperature-train loads and the major difficulties were discussed. Summarized the current research limitations and further looked forward to future development trends. Research results show that the regional difference of solar radiation has little research on the temperature action mode and value of ballastless track, and the design specification has no specific description. In the future, the temperature action of ballastless track should be accurately calculated in combination with historical meteorological data, and the isotherm maps of the temperature effect of ballastless tracks in different regions should be drawn to improve the accuracy of structural temperature action value and temperature calculation theory. The damage research of temperature and train dynamic load on ballastless track structure is mostly concentrated on the overall structure, and the damage evolution of detailed structure is not studied in depth. To quantify the mapping relationship between each parameter of ballastless track and structure by combining track details, components and overall structure, indoor accelerated test and field test, numerical analysis and experimental research in response to the actual standard project. Due to the limitation of test conditions, the existing temperature load and mechanical test are all carried out in sections, and the performance study under the coupling effect of temperature and train load is only carried out on the ballastless track from the perspective of numerical simulation. Under the background of single-load research, further breakthroughs are made in the multi-scale model test method and the multi-field coupling refined numerical analysis method under the coupled effect of temperature-train load, revealing the coupled dynamic behavior of temperature-train load and the instability mechanism of the track structure. The complex temperature and vehicle load coupling effects based on cyclic temperature, continuous high and low temperature, etc. have rarely been published. Probing the damage evolution mechanism of ballastless track under complex temperature-train load coupling. Optimize the design of ballastless track system, and improve service evaluation criteria for track structure performance under coupling action, to provide a reference for the actual project.

Keywords: high-speed railway; ballastless track; temperature field; temperature load; vehicle load

无砟轨道具有使用寿命长、维修工作量少、可靠性高等优异性能,已成为应用较为广泛的高速铁路轨道结构型式,引领了轨道结构发展新方向^[1-3]。“交通强国”国家重大战略决策的全面开展,进一步推进了无砟轨道在高速铁路轨道的中建设,加快了高速铁路网的建成。

20世纪70年代,世界首条无砟轨道高速铁路建于日本新干线,随后德、韩等国家逐渐开始将无砟轨道应用于铁路建设工程中,中国于2004年建立无砟轨道高速铁路线路的试验段,通过消化吸收再创新形成了CRTS系列无砟轨道^[4]。相比其他国家,中国无砟轨道高速铁路应用时间较短且服役环境更为复杂,对其进行设计、施工及后期运营维护方面的经验存在一定欠缺。在实地调研中发现,在长期服役过程中,轨道出现结构性破坏与损伤,表现出不同的病害特征,如图1所示。可见,在保障安全的前提下,使高速铁路无砟轨道能够在复杂的服役

环境中长期稳定运营已成为当前亟待解决的难题。一方面,在服役过程中,无砟轨道长时间受到周期性太阳辐射及气温变化作用,由此产生的温度效应十分显著,严重影响轨道结构稳定性;另一方面,轨道结构承受列车周期动荷载,荷载的冲击加速了轨道结构劣化。可以看出,在服役期内无砟轨道结构损伤及失稳机理较为复杂。因此,为了更科学地对轨道结构进行设计、施工及后期运营维护,有必要深入探究环境温度、列车荷载及温度-列车荷载耦合作用下对高速铁路无砟轨道结构性能的影响,保障无砟轨道在复杂服役环境中长期稳定运营。

近年来,学者们针对上述问题开展了系统的试验研究与理论分析,并建立了相应的数值模型对轨道结构性能进行探究。笔者首先概述无砟轨道结构形式及其优缺点,并从试验研究、理论分析及数值仿真的角度出发,梳理无砟轨道温度作用与温度效应的研究现状,总结归纳现有研究的不足;对静载及疲



图1 无砟轨道典型损伤模式
Fig. 1 Typical damage mode of ballastless track

劳荷载作用下无砟轨道力学响应进行分析,并进一步探究温度-荷载耦合作用下无砟轨道损伤行为及其演化特征,指出存在的问题,对其中的重难点进行探讨;最后,展望未来无砟轨道的研究发展趋势。

1 CRTS系列无砟轨道系统

目前,无砟轨道因其优异特性已得到广泛认同,学者们研发出了不同结构形式的无砟轨道。应

用较广泛的结构形式有日本的新干线、德国的Rheda、Züblin与Bögl及法国的Stedef等无砟轨道系统^[5]。中国通过引进消化吸收,形成了CRTS系列无砟轨道系统,主要包括CRTS I型、CRTS II型、CRTS III型板式无砟轨道及双块式无砟轨道。其中,CRTS III型板式无砟轨道是结合中国国情自主研发的新型高速铁路无砟轨道结构形式^[3]。CRTS系列无砟轨道结构信息见表1。

表1 CRTS系列无砟轨道结构信息
Table 1 CRTS ballastless track structure information

结构类别	预制板式			现浇道床式	
	单元结构		纵连结构	路隧纵连	桥上单元
	CRTS I型板式	CRTS III型板式	CRTS II型板式	CRTS I型双块式	CRTS II型双块式
原型	日本板式无砟轨道	自主研发	德国Bögl系统	德国Rheda2000系统	德国Züblin系统
结构组成	预制轨道板、CA砂浆层、底座及凸性挡台等	预制轨道板、自密实混凝土及底座等	预制轨道板、CA砂浆层、底座、滑动层及端刺等	预制双块式轨枕、道床板及底板	
结构示意图					
实景图					
优点	受力较为明确,施工工序也较为简单,后期运营受外界温度等影响较小且病害易处理	调整层采用自密实混凝土,结构耐久性较优,工程造价有所降低,现场钢轨精调工作量较小	结构整体性较好,现场钢轨精调工作量适中	经济性较好,施工灵活	经济性较好,施工灵活,可维修性较好
缺点	现场钢轨精调工作量较大	性能及耐久性受原材料与施工质量的影响较大	施工工序较为复杂,后期运营受温度影响较大,可维修性较差,施工装备投入较大	工程量较大,施工进度缓慢,质量难以控制,可维修性较差,精调工作量较大	工程量较大,质量难以控制,施工装备投入较大
经济性	CRTS II型双块式>CRTS I型双块式>CRTS III型板式>CRTS I型板式>CRTS II型板式				
其他	CRTS I型双块式与CRTS II型双块式区别主要在于施工方法不同,其结构相似				

结合高速铁路无砟轨道运营情况可知,CRTS系列无砟轨道均能满足当前运营要求,但各结构形

式的技术特点有所差异。CRTS系列无砟轨道结构可分为预制板式与现浇道床式、纵连与单元结构以

及水泥乳化沥青砂浆与自密实混凝土调整层。预制板式优势在于厂制,效率高且质量易于把控,但成本较高;现浇道床式经济性较好,施工灵活,但施工进度缓慢且质量控制难度较大。纵连结构整体性较优,施工工艺与温度质量要求较高,后期病害整修较为复杂;反之,单元结构易施工、受力明确、可维修性较强。砂浆调整层性能指标较低且受外界因素影响较大,易劣化;自密实混凝土调整层结构耐久性优异,造价也相对较低^[6]。不同结构型式无砟轨道其他优缺点在表1中说明。因CRTS I型、CRTS II型及双块式无砟轨道均是在引进国外无砟轨道的基础上结合中国实际情况再创新而形成的结构形式,结构形式与国外相似,存在共性优缺点。为打破国外技术垄断,中国研究人员充分利用探索成果,开发了拥有自主知识产权的CRTS III型板式无砟轨道,运营实践证明,相比其他结构形式,该结构形式经济性较好、病害少、易维修等综合性能较优,当前俄罗斯莫斯科—喀山高铁初步设计已采用该结构形式。值得注意的是,中国现已成功开发350 km/h的高速列车及轨道形式,建成了现代化高标准铁路网,中国高铁已在全球高铁中快速崛起^[7]。

2 无砟轨道温度作用与效应

2.1 无砟轨道温度场

因长期暴露于外界环境中,在太阳辐射及日、年温变化等影响因素下,无砟轨道结构内部将形成不均匀温度分布,由此所产生的温度内力与变形在轨道结构设计荷载中所占比重较大,且在极端温度地区的温度效应更为明显。因此,准确获得轨道结构的温度场尤为重要。

2.1.1 试验研究

现有学者利用日趋成熟的传感器技术及数据处理方式对无砟轨道结构竖向及横向温度进行短期或长期的多点位测定,并对监测数据进行统计分析,深入了解无砟轨道结构温度场的时程变化及分布特性。

其他国家在规范中针对无砟轨道温度变化作了明确规定,欧洲规范中给出的温度总体变化范围为 $\pm 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,垂直方向的正、负温度梯度分别为 $9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$;德国规范中假定了轨道板温度梯度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ^[4]。相较于其他国家,中国的气候条件有极寒、寒区和温带,更为复杂。近年来,中国学者针对不同气候条件下无砟轨道温度分布形式开展了大量的试验研究,建立了竖向温度预估分析模型。图2为部分试验结果,其中横坐标为测试点距轨道板上表面的高度,纵坐标为测试点温度与轨道板顶面温度的差值。可以看出,随垂直深度的不断增加,温差不断降低。因地区气候及路基、桥上轨道结构

不尽相同,且相较于路基上无砟轨道,桥上无砟轨道与箱梁之间热交换更为复杂,进而导致温度场分布情况差异较大。

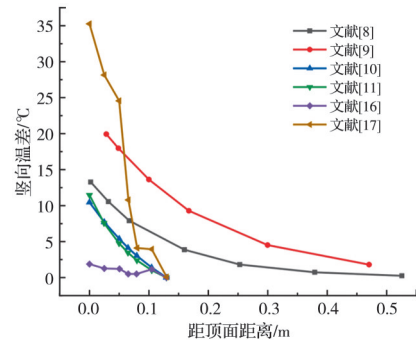


图2 无砟轨道结构竖向温度分布

Fig. 2 Vertical temperature distribution of ballastless track structure

戴公连等^[8-10]以纵连式无砟轨道为研究对象,对无砟轨道在不同季节(高温季节、秋季及寒冷季节)的横、竖向内部温度进行了现场长期连续观测,研究了各季节下无砟轨道温度场相应的时变规律,并基于数理统计分析方法建立了符合中国CRTS II型无砟轨道的横、竖向温度荷载分布模式。杨荣山等^[11]探寻了成都地区双块式无砟轨道的道床板垂向温度荷载模式,同样采用数理统计分析方法对CRTS I型双块式轨道结构冬季温度场现场监测数据进行了分析,归纳总结得到轨道结构温度场的变化规律。除此之外,相关学者针对中国不同经纬度下轨道结构的温度场影响规律,基于热力学理论拟合出了典型地区的轨道结构竖向温度荷载预估模型^[12]。由图2可以看出,上述研究者得到预估的竖向温度分布模型均为指数形式,与《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)^[13]中箱梁竖向温度分布相似。刘钰等^[14]、吴斌等^[15]通过分析大量室外轨道结构温度实测数据,对结构施工期、运营期的温度场分布特征规律进行了汇总,采用最小二乘法对轨道结构温度场进行了回归分析,建立了轨道板预估模型和表面温度荷载模型。此外,赵磊等^[16]、周凌宇等^[17]所研究的温度分布形式与上述研究结果有所差异,竖向温差分别呈“S”形、三段式阶梯形分布,横向温度呈抛物线形分布。其原因在于:1)室内试验环境温度温升范围、时间可控;2)现场试验竖向测点较少,未在砂浆层设置测点;3)室内试验为缩尺试验,竖向厚度小于实际厚度。其中,相较于混凝土,CA砂浆层具有保温隔热性能,造成层间温度传导困难,进而导致层间温差较大。此外,学者们基于网络的自动化测量系统得到轨道结构竖向温度分布规律,CA砂浆层受环境温度变化较小^[18]。因此,研究者在探究纵连式无砟轨道结构温度效应变

化规律的过程中应重点关注砂浆层的影响,针对砂浆层的研究在文献[19-20]中已有相关综述。

学者们除对气候条件较为温和的服役环境进行研究之外,对极端气候条件也进行了相应探究,孙泽江等^[21]通过实时不间断监测高温下轨道结构温度分布及参考气象资料,基于统计学原理,对该天气下无砟轨道的温度分布特性进行了分析,根据相应参数及数值,对轨道板外表面温度进行计算并提出了经验公式。欧祖敏等^[22-24]考虑温度荷载具有随机性,选取应用较为广泛的极值概率随机分布建立数学模型,以此对轨道板相应的温度荷载进行合理取值。可见,采用试验研究方法对不同轨道结构形式、服役环境下的结构温度场进行长期测试及统计分析,建立轨道结构温度荷载模型已成为目前的研究热点,在研究中也发现,影响轨道结构温度场外界的因素较多,所建温度荷载模型有所差异,缺乏通用轨道结构温度及温度荷载模型,对工程的普适性指导有所欠缺。其中,基于随机过程模拟温度场的研究已初步取得较好效果,与实测的温度特性具有良好的一致性,可为轨道结构温度场的预估提供新方法。

$$I(t) = \begin{cases} \frac{I_0}{\pi} + \frac{I_0}{2} \sin\left(\frac{\pi(t-6)}{12}\right) + \frac{2I_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{1-(2k)^2} \sin\left(\frac{k\pi(t-6)}{6} + \frac{\pi}{2}\right), m=1 \\ \frac{I_0}{m\pi} + \frac{2mI_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos\left(\frac{k\pi}{2m}\right)}{m^2-k^2} \sin\left(\frac{k\pi(t-6)}{12} + \frac{\pi}{2} - \frac{k\pi}{2}\right), m \neq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_0 为正午12点太阳辐射最大值; m 为日照时间比例系数; t 为时间。

在太阳辐射下,无砟轨道结构与周围介质之间的热交换如图3所示。热交换包括太阳总辐射、对流换热和辐射换热。值得注意的是,太阳辐射进入大气层后,辐射分为两部分:一部分直达结构表面,称为太阳直接辐射;另一部分被空气分子和灰尘向其他方向散射,其中部分也会到达结构表面。太阳直接辐射与到达轨道结构表面的散射辐射之和称为太阳总辐射。当这3种类型的传热转化为热流密度边界条件时,结构表面与外部之间的总热流密度表示为^[31]

$$q = q_s + q_c + q_1 \quad (2)$$

式中: q_s 为太阳总辐射折算后的热流密度; q_c 为对流热流密度; q_1 为有效辐射热流密度。

基于热传导理论分析,欧祖敏等^[24,32]将轨道板外表面的实际观测数值视为初始条件,通过理论解析计算了结构温度随时间变化的数值,并在该理论下将无砟轨道三维空间温度场的求解简化为一维热传导问题,以太阳辐射和环境温度为热力学边界条件,推导了无砟轨道垂直温度分布函数。康维新等^[33]通过对实际观测的气象材料整理分析,并依据

2.1.2 理论分析

通过综合研究气象学、热力学及基础数学等一系列复杂学科,基于实测初始条件并采用解析方法可得到轨道结构不同时刻的温度场。轨道结构温度场研究过程中涉及学科宽泛且复杂,需要对其进行模型简化,确定热量来源及影响因素,建立结构热传导方程。

无砟轨道结构作为层状组合结构,现有学者^[24-25]认为,热能在其内部传导实为三维或二维热传导问题,但轨道结构两侧与环境接触面积较小,且无砟轨道各层材料热工参数比较相近,因此,根据固体传热理论,将实际较为繁杂的多维热传导进行降维处理,可直接将其视为竖直方向的一维线性热传导问题^[26-28]。

研究发现,无砟轨道主要热量源头为太阳辐射,通过对白昼非阴雨天时太阳辐射强度的实测数据分析,得到辐射强度随时间的变化规律与正弦或余弦曲线规律大致相符^[29],为更好地表达太阳辐射日变化规律,Wang等^[30]采用傅里叶级数逼近正弦函数分布曲线并建立表达式,便于热传导方程的求解计算,如式(1)所示。

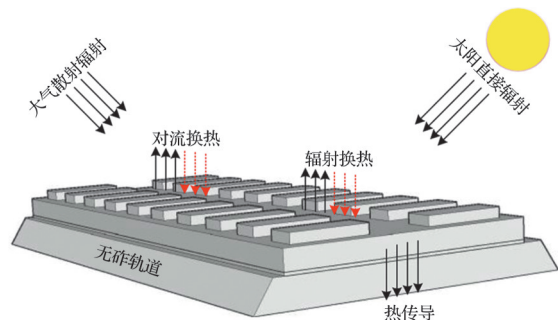


图3 太阳辐射下无砟轨道结构与周围介质热交换
Fig. 3 The ballastless track structure exchanges heat with the surrounding medium under solar radiation

气象学及传热学原理对无砟轨道与环境之间的换热机理展开研究,得到了高温气候下轨道结构的温度计算表达式。刘学毅等^[34]采用频谱分析方法,探究了气象因素与道床板温度的联系;同样以热力学为基础,在试验环境下对道床板材料的相关热工参数进行反演,提出了精度较好的道床板温度简易计算办法。Lou等^[35]针对高铁桥轨结构,基于观测数据与可靠性高矩理论,建立了桥上无砟轨道温度作

用模型,利用傅立叶级数拟合了均匀温度谱的分布规律,建立了结构与大气均匀温度之间的映射关系。通过理论解析方法对无砟轨道服役环境气温与轨道结构温度值之间映射关系的研究已取得较好成果,且基于映射关系所得到的轨道结构温度作用取值具有一定的参考价值。但目前的成果可供铁道工作人员设计使用中考虑无砟轨道设计基准期的温度作用取值参数还有所欠缺。

2.1.3 数值仿真

因温度具有较强的随机性,在无砟轨道内部的传导变化难以捕捉。目前,对轨道结构局部进行现场实测较为简单,而对整体结构的温度变化情况进行观测难度较大^[36]。针对上述问题,有限元数值模拟技术逐渐成为重要的分析方法,根据实测数据确定复杂的边界条件,能够较为准确地分析温度在无砟轨道内部的传递规律,该方法已成为现阶段的研究热点之一。

尤明熙等^[36]为系统地研究无砟轨道中温度传导变化,根据板式无砟轨道结构特征,运用ABAQUS构建了三维温度传导数值模型。同时,刘付山等^[37]、李健等^[38]根据无砟轨道的结构特征,使用ANSYS数值仿真软件建立了无砟轨道温度场模型,以此探究无砟轨道温度场的分布规律以及任意时刻下太阳辐射对轨道板温度场产生的作用,确立轨道结构与环境温度之间的对应关系,为后续温度所产生的应力计算提供基础参数。闫斌等^[12]基于上述软件,针对桥上无砟轨道构建了热力学分析有限元模型,对轨道结构垂直方向温度的分散情况进行了研究。为保证仿真模型的真实性和准确性,Wang等^[39]和Yang等^[40]以逐时气候资料为基础,通过理论推导确定了无砟轨道温度场的底边界条件。在此基础上,建立了考虑轨道结构方向和地理位置的轨道温度场三维计算模型,并通过现场试验验证了该方法的有效性,并分析了连续高温天气下无砟轨道的温度特性。

目前,学者们通过开展试验研究得到了轨道结构温度预估模型,利用理论公式建立了环境温度与结构温度的映射关系,采用数值仿真得到温度在结构内部的传递规律及结构整体温度分布情况,深化了对无砟轨道结构温度分布特性的认识,但尚存在以下不足:1)缺乏通用轨道结构温度荷载模型,对工程的普适性指导有所欠缺;2)目前的成果可供铁道工作人员设计使用中考虑无砟轨道设计基准期的温度作用取值参数还有待探究;3)针对太阳辐射的地域性差异对无砟轨道温度作用模式和取值的影响鲜有报道,设计规范亦未有针对性说明,结合历史气象数据准确计算无砟轨道温度作用,绘制更为真实、全面的无砟轨道温度作用地域差异性取值

的等温线图亟待开展。

2.2 无砟轨道温度效应

无砟轨道作为典型的多层异质结构,各层材料导热系数相差较大,内部将存在较大的温度梯度,进而在外界温度场及约束的作用下,无砟轨道结构内部将产生明显的温度效应(温度应力、变形、弯矩等)。值得注意的是,相较其他轨道结构形式,纵连式无砟轨道产生的轴向温度应力更大^[41],对轨道结构安全性产生较大影响,德国Rheda2000、Zublin及Bögl无砟轨道系统均高度重视温度效应^[42]。

2.2.1 理论分析

采用理论解析方法对无砟轨道的温度效应进行计算,从机理上探究温度变化对轨道结构的作用规律。为了简化解析方法的计算过程,目前研究者大都引入了假定条件,得到更为简洁明了的计算公式,以便指导无砟轨道设计。

无砟轨道平面尺寸较大且温度场变化主要集中在厚度方向,水平方向变化较小,因此,在既有研究中针对无砟轨道温度应力与变形采用Winkler弹性地基梁模型,具体力学模型公式为^[43]

$$\begin{cases} \sigma = \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{d\mu}{dx} - (1+\mu)\alpha T \right] \\ N = \frac{2Eh}{1-\mu^2} \left[\frac{d\mu}{dx} - (1+\mu)\alpha T_m \right] \\ M = \frac{2Eh^3}{3(1-\mu^2)} \left[\frac{d^2V}{dx^2} - (1+\mu)\alpha \frac{T_d}{2h} \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ 为温度应力; E 为弹性模量; M 为弯矩; α 为混凝土线膨胀系数; T 为梁内温度; T_m 为平均温度; T_d 为等效线性温差; h 为板厚度; N 为轴力; μ 为水平位移; V 为竖向位移。

德国研究者将整体温度和温度梯度变化所产生的应力均考虑在轨道板温度应力计算中,在此基础上,德国设计规范^[44]在结合统计资料后认为横向不产生约束应力,以道床板支承不连续计算模型计算自重与温度荷载作用下的翘曲应力。

$$\sigma_c = \frac{1}{1-\mu} \times \frac{\Delta T}{2} \times \alpha \times E \times \left[\frac{3B-2A}{2.7R} \right] \quad (4)$$

式中: ΔT 为道床板上下表面温差; B 为道床板宽度; A 为道床板伸出钢轨外的宽度; R 为基础板的弹性长度。

赵磊等^[45]针对无砟轨道的多层结构形式,基于地基梁温度应力计算模型并考虑内部温度梯度非线性分布引起的层间约束,通过建立力学计算模型对层间约束应力进行计算,提出无砟轨道温度翘曲应力计算新方法,其中混凝土轨道层间约束应力 σ_s 为

$$\sigma_s = \frac{E}{1 - \mu^2} \left(\frac{N}{F} - \frac{hM}{D} \right) \quad (5)$$

式中: D 为抗弯刚度系数; F 为抗压刚度系数。

针对层间临界伸缩温度,朱永见等^[46]考虑温度荷载下轨道板伸缩的影响,推导了轨道板在砂浆层或砂浆层与纵连张拉钢筋约束下的解析解,得到层间离缝发生时的轨道板临界伸缩温度,并指出临界伸缩温度主要与砂浆层对轨道板约束达到最大时的临界位移有关。Chen等^[47]在平衡微分方程的基础上,根据温度、板和钢轨重力作用下混凝土结构局部变形的协调条件,推导出轨道板翘曲的解析表达式,通过计算式得到轨道结构变形过程中的位移场分布。针对纵连式无砟轨道轴向温度应力所造成的上拱失稳工况,基于欧拉梁挠曲微分方程求解了高温环境下轨道结构弹性稳定性问题,得到上拱矢度与波长的关系,并通过势能驻值原理给出了精确解析解,相较于闫斌等^[48]、徐玉坡等^[49]的研究方法,求解更为简单、精确,该团队将动力法与有限元法结合,研究了纵连式无砟轨道结构温度压力与系统振动特性的关系,探讨了该结构的高温稳定性问题^[43],得到了垂向失稳的初始上拱限值。通过上述研究可大致看出无砟轨道温度效应理论解析的发展变化,其中假定条件由多到少,结构由简单到复杂理论解析结果精度由低到高。随着高速铁路网的不断完善、无砟轨道服役环境的复杂化,影响因素也随之增加,如依旧使用现有的温度效应理论解析结果,准确性可能下降,因此,复杂环境下无砟轨道温度效应理论解析解的建立还有待进一步研究。

2.2.2 试验研究

无砟轨道温度作用下应力、位移变化规律已开展一系列的试验研究,目前主要采用缩尺模型试验与现场试验两种试验方法。

针对缩尺模型试验,周凌宇等^[50]通过建立桥上纵连式无砟轨道1/4缩尺模型,模拟日照温度荷载,基于实测位移数据分析了轨道结构层间位移分布规律,随着温度的升高,轨道结构整体位移呈非线性增大趋势,各层的竖向相对位移也逐渐增大,梁体沿纵向出现上拱。除此之外,Zhou等^[51]还对循环温度荷载下无砟轨道结构层间离缝的产生及发展规律进行了探究,见图4(a)。对损伤过后的轨道结构进一步开展静力试验,发现层间损伤对结构刚度影响较大,刚度下降幅度与离缝的延伸长度同步。此外,刘伟斌等^[52]基于现场试验开展了CRTS III型板式无砟轨道的复合轨道板温度翘曲应力研究,见图4(b)。对复合轨道板温度翘曲应力、温度梯度数据进行修正,获得了正温度梯度作用下板底温度翘曲应力的实用计算式,可对不同温度梯度作用下的

翘曲应力进行推算。学者们针对温度变化对连续钢筋混凝土轨道段裂缝宽度的影响,基于裂纹宽度综合试验研究的结果,提出了改善CRCT性能的多种方法,为将温度裂缝控制在容许范围内,板中配筋率需达到0.8%~0.9%^[53-54],并通过现场试验及数值分析得到了裂缝宽度随温度变化的扩展规律^[55]。此外,因单元结构的技术特点受温度变化影响较小,日本设计规范中未考虑温度效应,然而轨道板在试验中仍存在翘曲位移,为此,日本学者针对轨道板受温度影响的性能变化问题开展了一系列试验研究^[56],韩国学者同样通过现场试验对单元结构轨道板温度变形规律进行了探索,指出轨道板设计中有必要考虑外部温度变化引起的温度变形^[57]。



(a) 室内缩尺试验^[51]



(b) 室外足尺试验^[52]

图4 温度荷载模型试验

Fig. 4 Temperature load model test

从上述研究可看出,部分研究者开展的无砟轨道室内、室外温度效应试验对桥上、路基上无砟轨道应力及变形有借鉴意义。目前开展的模型试验主要针对部分板式无砟轨道,并未对其他结构形式的无砟轨道开展类似试验,是否具有普适性还需要进一步探明;其次,缩尺模型及现场试验中接缝处温度的效应还有待明确。基于此,开展多结构形式、多工况下的无砟轨道温度效应模型试验,明确细部结构及整体结构温度效应尤其重要。

2.2.3 数值仿真

目前,研究者主要通过现场温度实测与数值模拟相结合,以实际测量最不利温度工况作为有限元软件温度荷载进行加载或直接对其施加极端温度荷载,以探究温度荷载作用下无砟轨道温度应力及变形。

杨静静等^[58]、刘钰等^[59]、王森荣等^[60]均通过建立有限元模型对实测温度梯度的翘曲变形进行了计

算,得到不同时间下温度梯度所引起的轨道板翘曲应力或位移,并指出气温与辐射是影响温度梯度的主要因素,板面温度对温度梯度起控制作用;温度梯度值大小及轨道板面温度与初温对翘曲变形影响较大。胡松林等^[61]通过模型计算得到了全年温度梯度时程曲线,并探究了服役期温度梯度及极端循环温度梯度对层间损伤的影响,结果表明,板角、板端为最不利位置,在该位置处易发生损伤且逐渐向界面内部延伸。赵春发等^[62]采用内聚力模型对界面损伤行为进行了模拟,结果表明:极端温度梯度荷载作用下界面损伤将出现在轨道板边缘并形成应力集中带;循环温度梯度下的界面损伤与界面黏结

性能有关;黏结性能较差的情形下,损伤区域及离缝面积随温度作用次数增加而加速发展。陈龙等^[63]指出,界面黏结强度小于 0.025 MPa 时,正温度梯度荷载下轨道板易上拱。Kim 等^[64]、Bae 等^[65]为研究温度变化下连续无砟轨道结构的行为特性,建立了 CRCT 三维数值仿真模型,敏感性分析表明,结构热膨胀系数影响程度较为显著,并预测了温度梯度作用下轨道结构的裂缝形态。Yusupov 等^[66]基于耦合动力学理论建立了三维有限元耦合模型,指出随着温度的升高,结构加速度逐渐增大,初步探明了温度对轨道结构的动力响应,为完善轨道结构动力学提供了参考。

表 2 无砟轨道温度作用及效应相关研究

Table 2 Study on temperature effect of ballastless track

无砟轨道类型	研究对象	文献来源	温度荷载类型	主要研究内容
路基上无砟轨道	CRTS I 型双块式室外足尺模型	[11]	大气环境温度	温度场变化规律
	CRTS II 型板式室外足尺模型	[14-15]	大气环境温度	轨道板预估模型和表面温度荷载模型
	CRTS II 型板式室外足尺模型	[21]	极端高温	温度分布特性
	CRTS II 型板式室外足尺模型	[32]	大气环境温度	结构垂直温度分布函数
	CRTS 系列无砟轨道	[24]、[33]	大气环境温度	轨道结构温度简易计算办法
	CRTS I 型双块式室外足尺模型	[34]	大气环境温度	气象因素与道床板温度间的关系
	CRTS II 型板式无砟轨道	[36-37]	大气环境温度	构建轨道结构温度场有限元模型
	CRTS I 型双块式室外足尺模型	[38]	大气环境温度	温度场分布规律
	CRTS II 型板式无砟轨道	[47-49]	高温环境	结构高温稳定性
	CRTS III 型板式无砟轨道	[52]	正温度梯度	轨道板温度翘曲应力
	CRCT 无砟轨道	[53-55] [64-65]	大气环境温度、温度梯度	温度变化对轨道段裂缝宽度的影响,预测轨道结构的裂缝形态
	孝感北站 CRTS II 型板式无砟轨道	[58]	整体温度升降、温度梯度	温度变形,钢轨垂向变形
	京沪高速铁路 CRTS II 型板式无砟轨道	[59]	温度梯度	温度翘曲应力、变形
	遂渝线(单元板式、纵连板式)	[60]	温度梯度	温度翘曲应力、位移
桥上无砟轨道	CRTS II 型板式无砟轨道	[61-63]	服役温度梯度、极端温度梯度、循环温度梯度	层间损伤(界面损伤因子、界面应力)
	CRTS II 型板式无砟轨道	[8-10]	大气环境温度	横、竖向温度荷载分布模式
	CRTS II 型板式无砟轨道	[12]	大气环境温度	不同经纬度轨道结构温度变化规律
	CRTS II 型板式缩尺模型	[16-17]	高温、升降温	温度分布规律
	CRTS 系列无砟轨道	[35]	大气环境温度	结构与大气均匀温度之间的映射关系
	CRTS II 型板式无砟轨道	[50-51]	日照温度、循环温度	层间位移分布规律
	双向简支梁 CRTS II 型板式无砟轨道	[67]	整体升温、温度梯度	板端部位上拱变形及砂浆离缝
	连续梁及简支梁 CRTS II 型板式无砟轨道	[68-69]	整体升温	轨道及桥梁结构力学特性;无砟轨道结构各结构层受力与变形影响因素
	简支梁 CRTS III 型、CRTS II 型无砟轨道	[70-71]	梁体降温;竖、横向温度梯度	钢轨、轨道板、底座板及桥梁墩台纵向受力与变形

针对桥上无砟轨道,周敏等^[67]指出整体升温对 CA 砂浆层及轨道板界面纵向剪应力较大,温度梯度引起界面竖向拉裂破坏;张志超等^[68]、DAI 等^[69]指出,滑动层摩擦因数越大引起轨道-桥梁结构体系受力增加,轨道板宽接缝开裂将导致部件纵向受力及与轨道板位移增加。张鹏飞等^[70-71]指出梁体温差和温度跨度与桥梁-轨道结构的伸缩力、位移呈正相

关关系;双向温度梯度与竖向温度梯度荷载作用下导致轨道板出现翘曲应力,阴阳两侧纵向位移差、相对位移差和应力差随横向温度梯度荷载的增加而逐渐增大。

相关学者采用数值仿真开展了无砟轨道温度效应研究,主要的温度荷载类型及研究内容列于表 2。结合表 2 和前述内容可知,对实际温度荷载或极

端温度荷载模式下无砟轨道结构界面损伤、结构受力与变形进行仿真分析,分析结果对实际无砟轨道性能演化规律具有一定的参考价值。相比于路基上无砟轨道,桥上无砟轨道温度效应研究偏少,主要集中于简支梁桥上无砟轨道应力、变形及影响因素的研究。路基上无砟轨道温度效应研究主要依靠现场实测温度为基础,建立有限元模型进行仿真分析,桥上无砟轨道虽有共性问题存在,但其受力与路基上无砟轨道差异较大,影响因素、受力变形更为复杂;除此之外,研究者采用多种有限元软件进行仿真分析,设置参数复杂,普适性还有待提高。

上述研究主要是将轨道板看作整体,通过有限元软件探究其在温度荷载下的变形和动力性能,忽略界面等薄弱区的影响。Li等^[72]、Liu等^[73]基于混凝土损伤塑性模型(CDP)和粘聚区模型(CZM)探究了环境温度升高对宽窄接缝力学性能变化的影响规律,研究了宽窄接缝处混凝土强度、宽度、界面强度和温度梯度4个因素对接缝损伤的影响以及接缝缺陷与界面损伤的变化规律,阐明了宽窄接缝损伤机理和发展过程。窄缝和宽缝中部出现损伤,进而导致轨道板偏心受压,轨道板出现上拱加剧,理论研究虽对垂向稳定性有深入研究,但简化的因素较多,与实际受力存在差异。针对此问题,Cai等^[74]结合现场轨道结构施工,采用有限元方法建立了CRTS II板式轨道三维精细化数值分析模型,考虑纵向连续板轨道的屈曲准则,探明了不同损伤情况的宽窄接缝上拱失稳规律,结合现场试验结果深入分析了起拱机理。因此,应对标无砟轨道工程实际,考虑多参数耦合作用,建立精细化有限元模型,并进一步研究轨道结构温度作用下轨道不平顺对车线系统动力性能的影响。

3 列车荷载作用下无砟轨道的力学性能

近年来,针对高速铁路无砟轨道服役过程中受力性能已开展较多的试验研究,通过对不同结构形式的无砟轨道施加静载、疲劳荷载或移动列车荷载,探究了荷载作用下路基与桥上轨道结构的受力特性、刚度变化及疲劳损伤等性能演化规律。

3.1 无砟轨道静力性能

在荷载作用下,无砟轨道易发生破坏,对轨道结构的安全性造成影响,因此,开展无砟轨道静力性能研究至关重要。程前^[75]通过对CRTS II型轨道板单元开展静载试验,对轨道板单元的静态特性进行了较为系统的研究,揭示了静载破坏机理、裂缝形态和挠度发展规律。此外,为探究轨道板及砂浆层的界面粘结-滑移能力及抗剪性能,Dai等^[76]对

现场CRTS II型全尺寸试件开展了现场横、纵向剪切荷载试验,结果表明,轨道板与CA砂浆层界面的粘结强度远小于CA砂浆层与底板界面的粘结强度,其断裂破坏模式均为延性断裂,并以此提出了界面粘结-滑移定律,所得试验研究成果亦可为后续数值仿真的模型验证提供参考。与此同时,刘晓春等^[77]以CRTS III板式无砟轨道为研究对象,对其界面粘结性能开展了进一步研究,对疲劳后的复合板开展了横向三点弯曲静载试验,主要探明界面滑移前后受力破坏特征(整体协同受力、叠合受力),且所提出的层间界面粘结性能提升方法在改善轨道结构工作性能方面有较为显著的效果。由此可见,轨道结构作为多维结构形式,上述研究虽对轨道结构部分的静力性能进行了系统研究,但未能完全满足实际服役状态。基于此,吴斌等^[78]以室内试验为基础,建立了CRTS II板式无砟轨道足尺模型,辅以梁板理论所构建的有限元模型对各结构层在竖向静荷载作用下的变形状态能较好模拟,对探究无砟轨道整个结构体系的应力及变形提供了新的建模思路。值得注意的是,张鲁顺等^[79]在无砟轨道设计中将列车荷载传递规律作为取值基准,建立了列车荷载分析模型,并与室内实尺模型进行了模型验证(图5),提出了无砟轨道荷载传递范围和量值与动力系数的关系。此外,为保障轨道运行安全,Vu等^[80]对轨道结构的荷载传递效率同样进行了评估^[80]。针对荷载由钢轨向轨道板的传递规律及其荷载分布,Sadeghi等^[81]开展了大量室内与现场测试,并对测试结果进行了分析计算,最终得出了轨枕荷载的数学表达式和轨道板的加载模式,由于现有方法的局限性,所提出的数学表达式对于无砟轨道的钢轨和轨道板设计具有重要的参考价值,可较好地改善目前高速铁路设计的准确性及合理性。

另外,针对桥上无砟轨道结构体系的变形特性以及轨道结构对结构体系刚度的影响规律,张广潮



图5 双块式轨道列车荷载试验^[79]

Fig. 5 Load test of double block rail train^[79]

等^[82]采用缩尺模型开展了单梁和梁轨协同作用下的静载试验,推导出适用于弹性状态的无砟轨道-简支梁桥结构体系在竖向静力荷载作用下的挠度与滑移理论解。为进一步探究列车荷载作用下多跨简支梁桥和大跨连续梁桥上CRTS II型板式无砟轨道稳定性问题,基于现有研究基础,张鹏飞等^[83]建立了精细化空间耦合模型进行计算,分析了不同参数下纵向力与位移影响规律,指出相比于多跨简支梁桥上轨道,大跨连续梁桥上轨道纵向力与位移更为明显。

3.2 无砟轨道疲劳、经时力学性能

为保障无砟轨道结构在高频列车荷载下的受力及运营安全,现有研究对其疲劳、经时力学性能及寿命预测开展了一系列研究并取得丰富成果。杨静静等^[58]探究了等幅疲劳荷载作用下轨道板裂缝的扩展形态及规律,并基于黏结滑移理论建立了裂缝宽度扩展规律的计算公式,以期作为疲劳荷载作用下轨道板裂缝宽度的计算提供理论参考。刘晓春等^[84]采用足尺模型试验模拟了路基上CRTS III板式无砟轨道横向弯曲疲劳试验,疲劳荷载500万次后层间不协调变形较为显著,可通过改变轨道板底部粗糙度、门形筋数量改善界面黏结性能。Feng等^[85]开展了高速铁路CRTS II板式无砟轨道剪力钢筋低周往复荷载试验,得到其破坏形式为“断裂”,并提出增加受剪钢筋的数量和直径可有效改善试件的延性、减缓刚度退化速度、增强耗能能力,显著提高无砟轨道抗震性能。此外,学者们^[86-87]采用循环荷载和移动列车荷载对室内足尺模型进行加载,证明了轨道动力响应应具有时程效应,提出了一种经济且适用于无砟轨道实验室试验的方法,即足尺预制轨道板三点弯曲疲劳试验,通过分析破坏临界位移和位移率与疲劳寿命之间的关系,可预测轨道板疲劳寿命。Čebašek等^[88]开展了室内全尺寸模型试验,对比分析了无砟轨道与有砟轨道在循环荷载作用下的累计沉降与峰值位移,发现无砟轨道更优。Chapeleau等^[89]基于光纤应变传感技术探究了疲劳荷载作用下无砟轨道早期裂纹发展规律。Sung等^[90]、Xavier等^[91]针对无砟轨道无缝钢轨疲劳寿命以及不同轨型对轨道板疲劳性能的影响进行了初步探究,得到最优轨型与钢轨疲劳寿命的影响因素。上述研究虽对无砟轨道结构开展了部分疲劳试验,但对于1 000万次及以上长期疲劳荷载鲜有研究。基于此,Zeng等^[92]采用轨道-路基动力加载系统并建立足尺模型,将王启云等^[93]得出的加载时程曲线作为荷载谱,对轨道结构进行了3 000万次循环疲劳加载,揭示了轨道系统扣件刚度、隔震层

刚度和加速度的演化规律,指出隔震层刚度增大时,轨道板与支撑层的耦合程度增大,轨道板的振动受到抑制,而支撑层的振动增大。在试验的基础上,数值仿真方法的应用为疲劳寿命分析提供了新的思路。杨俊斌等^[94]建立了CRTS I型板式无砟轨道弹性地基梁-体有限元模型,计算了列车疲劳荷载作用下轨道板及CA砂浆应力值,并以此为基础对CRTS I型板式无砟轨道进行了疲劳寿命计算,结果表明,在列车疲劳荷载作用下在服役期内轨道结构未发生疲劳损伤。Feng等^[95]在Forman模型的基础上提出了长期列车动荷载作用下混凝土疲劳裂纹扩展的迭代估计方法,讨论了支撑层不同初始裂纹深度下的疲劳裂纹扩展过程和剩余寿命。任娟娟等^[96]基于现场测试及理论计算建立了有限元模型,探究了客、货车的运营对CRTS I型轨道板疲劳寿命的影响规律,指出在货车作用时轨道结构疲劳寿命缩短。Yu等^[97]通过全尺寸CRTS III板式无砟轨道结构的全尺寸疲劳试验验证了仿真结果。此外,通过CRTS III型板式无砟轨道结构在疲劳荷载作用下的有限元分析,探索并总结出CRTS III型板式无砟轨道结构在高速列车荷载作用下的损伤演化规律。Poveda等^[98]建立了数值仿真模型,该模型能够提取轨道系统的主要振动模式,并通过板上的全尺度试验验证了时间相关载荷下的瞬态分析,应用应力幅疲劳准则对轨道结构疲劳损伤进行了评估。此外,Zhu等^[99]考虑了路基沉降及列车随机荷载对轨道结构疲劳寿命的影响,建立了车辆-轨道-路基耦合模型,采用S-N经验曲线预测了轨道板的疲劳寿命。Thölken等^[100]开展了全尺寸动态试验并进行了参数分析,开发了高可靠性计算模型,评估了列车的动态行为,并对轨道结构的长期性能进行了预测。

以桥代路作为中国高速铁路建设常用形式^[101],其中简支梁桥作为主要支承结构,桥上无砟轨道已服役多年,探究列车动荷载作用下桥-轨力学性能对高速铁路桥-轨结构体系维护养护具有重要意义。周凌宇等^[102]采用材料的损伤本构模型及界面内聚力模型建立了桥上CRTS II型板式无砟轨道精细化空间有限元模型,得到双线列车荷载作用下结构体系各层材料的共同疲劳损伤,相较于各层单独劣化对整体刚度的影响更为显著。除此之外,Zhao等^[103-104]通过制作1:4的轨道-桥梁结构缩尺模型展开了多级变幅长期列车荷载试验,列车荷载循环次数与荷载幅值对结构变形与刚度退化影响较为显著,并指出在长期列车荷载作用下,轨道-桥梁结构体系在服役年限内不会发生疲劳损伤破坏,与文献^[85]的结论一

致。然而,Sheng等^[105]针对大跨度斜拉桥上无砟轨道开展了足尺模型疲劳试验,结果表明,在疲劳载荷作用下,无砟轨道的刚度退化不明显。徐庆元等^[106]开展了静载试验,并分析了各力学参数,结合规范对宋玉普与Tepfers的混凝土S-N曲线进行了修正,得到适用于服役期间组合荷载下桥上CRTS II型板式无砟轨道混凝土疲劳寿命预测模型。

可见,研究者从试验、理论分析及数值仿真的角度针对不同轨道结构形式并围绕其疲劳特性进行了深入探究,提出了相应的疲劳寿命预测模型。由于无

砟轨道所处服役环境复杂且结构形式较多,当前所得预测轨道结构寿命离散型较大,普适性较弱;考虑环境因素并基于试验结果进行理论分析,建立可行的数学模型以预测轨道结构的疲劳性能研究还鲜有报道,亟待学者针对这一领域开展进一步研究。

为保障无砟轨道服役运营安全,近年来,关于无砟轨道静力性能及疲劳、经时力学性能研究成为相关学者的研究焦点,特别是中国学者对此开展了系统的研究。相关试验及研究内容列于表3,结合表3和前述相应的研究总结可得:

表3 列车荷载作用下无砟轨道相关研究
Table 3 Study on ballastless track under vehicle load

无砟轨道力学性能	无砟轨道类型	文献	研究对象	主要研究内容
静力性能	路基本上无砟轨道	[75]	CRTS II 轨道板单元	静载破坏机理
		[76]	CRTS II 板式无砟轨道全尺寸现场试件	通过现场测试并结合数值仿真探究界面抗剪能力和界面粘结-滑移特性
		[77]	CRTS III 板式无砟轨道足尺模型	静载作用下轨道结构应力分布、变形规律
		[78]	CRTS II 板式无砟轨道足尺模型	轨道结构受力特性,结合数值仿真进行理论分析
桥上无砟轨道	[79]	双块式无砟轨道实尺模型	建立精细化分析模型,探究列车荷载传递规律	
	[82]	CRTS II 无砟轨道缩尺模型	推导竖向静力荷载作用下的挠度与滑移理论解	
	[83]	多跨简支梁桥和大跨连续梁桥 CRTS II 型板式无砟轨道	建立精细化空间耦合模型,分析荷载作用下各轨道及桥梁结构的挠曲力与位移	
	[84]	CRTS III 板式无砟轨道足尺模型	疲劳荷载作用下轨道结构横向受力性能	
疲劳、经时力学性能	路基本上无砟轨道	[74]	CRTS II 轨道板单元	疲劳荷载轨道板离缝扩展规律
		[85]	CRTS II 板式无砟轨道	通过室内试验探究地震作用下剪力钢筋的能量耗散机制和损伤演化规律
		[86-87]	沥青无砟轨道足尺模型	探究荷载作用下轨道动力响应及临界破坏位移和位移率与疲劳寿命之间的关系
		[90-91]	Bögl 板式无砟轨道	无缝钢轨疲劳寿命以及不同轨型对轨道板疲劳性能的影响
		[92],[97]	CRTS III 板式无砟轨道足尺模型	扣件刚度、隔振层刚度和加速度变化及轨道结构损伤演化规律
		[94],[96]	CRTS I 型板式无砟轨道	轨道板及 CA 砂浆层在荷载作用下的疲劳损伤,客货共线铁路荷载作用特性
		[95]	CRTS II 板式无砟轨道	不同初始裂纹深度下的疲劳裂纹扩展过程和剩余寿命
		[98]	日本板式无砟轨道	采用应力幅疲劳准则对轨道结构疲劳损伤进行评估
		[99]	CRTS I 型板式无砟轨道	考虑路基沉降及列车随机荷载对轨道结构疲劳寿命的影响
		[100]	板式轨道全尺寸模型	列车的动态行为,预测轨道结构的长期性能
桥上无砟轨道	[101]	桥上 CRTS II 型板式无砟轨道	结合精细化有限元模型进行各层材料单独和共同疲劳损伤分析	
	[103-104]	桥上 CRTS II 无砟轨道缩尺模型	预测结构的挠度与刚度演化规律	
	[105]	大跨度桥上 CRTS III 无砟轨道足尺模型	探究刚度退化规律	
	[106]	CRTS II 轨道板单元	组合荷载下疲劳寿命预测模型	

1) 研究学者针对多工况、多结构形式、多加载方式、多角度开展了室内、现场与数值仿真试验,探究了无砟轨道静、动力性能,但对荷载和环境耦合作用下无砟轨道静动力性能的深入探讨稍显不足,有待后续进一步研究。

2) 相较于桥上无砟轨道,针对路基无砟轨道的

研究内容更为宽泛,近年来研究重点主要集中于 CRTS II、CRTS III 型板式无砟轨道,少有涉及其他轨道结构形式性能的研究。

3) 随着研究的逐渐深入,无砟轨道的缩尺模型、有限元模拟也愈发与实际工程相符,为研究无砟轨道部分、整体结构性能提供了强有力的支撑。

但目前研究中建立的仿真模型对部分位置进行了简化,模拟还缺乏准确性,后续还需从多尺度精细化无砟轨道建模方面开展研究。

4 温度-列车荷载耦合作用下无砟轨道的力学性能

目前,经过不断优化改进,无砟轨道结构性能方面虽得到明显提升,但在服役过程中,因受到多种外界因素的影响,导致过早的结构损伤,如温度变化引起的温度荷载及列车动荷载。在实际服役中,无砟轨道通常处于列车荷载与温度变化共同作用下,考虑单一荷载难以真实反映无砟轨道的力学响应及界面损伤演化,温度-列车荷载耦合作用下无砟轨道力学性能研究更加符合实际情况。因温度-荷载与列车荷载作用的时间尺度不同,按照实际作用情况将二者精确耦合的难度较大。基于上述问题,中国高校及其他科研院所开展了相关研究,主要采用数值仿真对温度-荷载耦合作用下无砟轨道力学性能进行探究,得到了较为丰富的研究成果。

相关学者通过建立变温作用分析模型得到无砟轨道界面最大损伤状态,并基于车辆-轨道耦合动力学理论^[107],引入整车多刚体模型和弹簧阻尼振动模型,建立了车辆-无砟轨道耦合振动模型(如图 6 所示)。

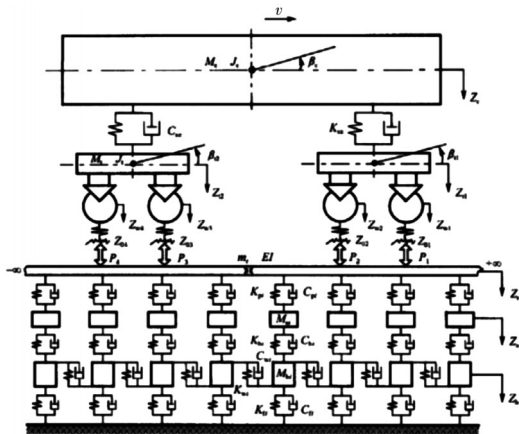


图 6 车辆-无砟轨道耦合振动模型^[107]

Fig. 6 Vehicle-Ballastless Track Coupling Vibration Model^[107]

采用 Hertz 非线性弹性接触理论^[108]、kalker 线性蠕滑理论对轮轨垂向力和蠕滑力进行计算^[109],计算模型为

$$p(t) = \left[\frac{1}{G} \Delta Z(t) \right]^{1.5} \quad (6)$$

式中: $p(t)$ 为轮轨垂向力; G 为轮轨接触常数; $\Delta Z(t)$ 为轮轨相对压缩量; t 为时刻。

$$\begin{cases} F_x = -f_{11} \xi_x \\ F_y = -f_{22} \xi_y - f_{33} \xi_{SP} \\ M_z = f_{23} \xi_y - f_{33} \xi_{SP} \end{cases} \quad (7)$$

式中: F_x 、 F_y 为纵、横向蠕滑力; M_z 为旋转蠕滑力矩; f_{11} 、 f_{22} 、 f_{33} 分别为纵向、横向、旋转蠕滑系数; f_{23} 为旋转-横向蠕滑系数; ξ_x 、 ξ_y 、 ξ_{SP} 分别为纵向、横向、旋转蠕滑率。

朱胜阳等^[110-111]采用上述计算模型建立了车辆-CRTS 双块式/板式无砟轨道耦合振动模型,探究了变温和列车动荷载共同作用下无砟轨道界面损伤规律及其对轨道动力响应的影响,指出界面损伤对轨道结构的动力响应影响较大;相较于单一温度荷载,耦合作用下道床板位移、加速度及表面动应力幅值均有明显增加。李全鹏^[112]、李岩等^[113]以 CRTS III 型板式无砟轨道为研究对象,将扣件支点反力作为变温作用下轨道板处于最大损伤状态时的输入荷载,并根据车辆-轨道耦合动力学理论得出的车辆动荷载,模拟分析了该类型轨道结构同时承受变温作用和车辆动荷载作用时的损伤力学行为,指出变温作用是产生损伤的主要根源,其损伤显著增大了轨道板的振动效应且抗变形能力有所减弱。李培刚^[114]基于轮轨系统垂向耦合振动模型,建立了桥上车辆与含损伤无砟轨道垂向动力相互作用模型,探究了温度-荷载耦合作用下层间损伤的扩展演化,指出仅考虑列车荷载,层间不易产生损伤及扩展;在温度作用下,层间拉应力数值较大,加之列车荷载作用,层间损伤将进一步演化为完全脱黏。另外,李龙祥等^[115]建立桥上无砟轨道结构空间有限元模型,探究了整体降温-列车荷载耦合作用下的结构应力变化,通过对比分析得到单线列车荷载对结构应力变化的贡献程度较低。张广义等^[116]以分离、未分离模型为基础,建立了三维有限元模型,探究了温度-列车移动荷载耦合作用下砂浆层的力学性能,研究表明,列车荷载作用下砂浆充填层的最大动力响应远小于耦合作用的计算结果,并指出负温度梯度下的列车速度将对结构损伤位置处轨道板的加速度产生较为显著的影响。曲村^[117]通过建立空间耦合精细化静力分析模型,对不同荷载组合展开了研究,指出相对于单独考虑温度变化,同时考虑温度变化及列车荷载的钢轨力和钢轨位移的最大值变化较小,在此基础上加上列车制动作用,位移最大值有较明显的增加,因此,后续进行钢轨强度验算需同时考虑上述 3 个因素。另外,文献^[118]同样考虑了列车制动作用,将拉力和压力荷载分别模拟为轨道板温度降低和温度升高时的剪切荷载,得到温度效应和列车制动共同作用下界面应力变化规

律,指出板端的界面剪应力首先达到界面粘结力,层间裂缝开始萌生并向内扩展,其剪切破坏过程如图7所示。

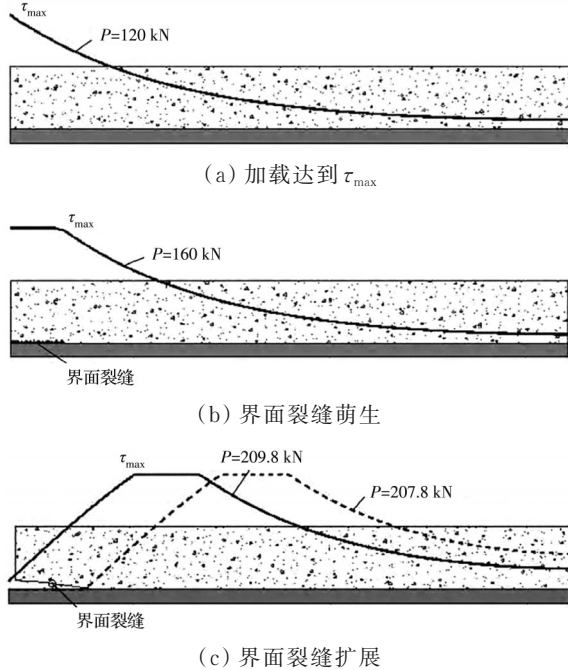
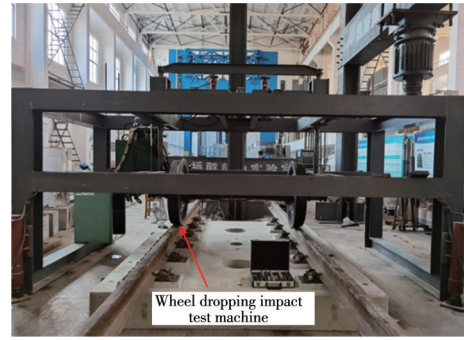


图7 温度效应和列车制动作用下界面剪切破坏过程^[118]

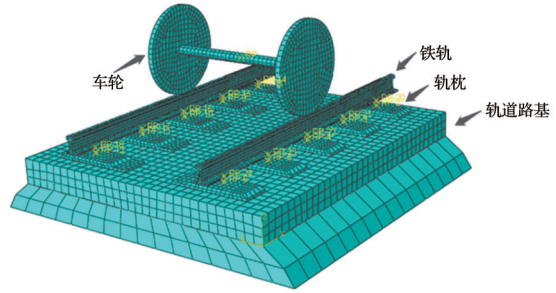
Fig. 7 Interfacial shear failure process under the effect of temperature and train braking^[118]

Zeng等^[119]基于现场监测数据及室内落轴冲击试验建立了温度-落轴三维有限元模型(图8)。在落轮冲击激励下,针对不同工况的振动响应开展了研究,结果表明,温度对落轴的影响不容忽视,为大温差下CRTSI型双块无砟轨道结构的设计、施工、运行和维护提供了参考。同时,学者们通过现场试验及数值仿真,探究了温差和列车荷载共同作用下无砟轨道的变形及应力分布,预测了轨道结构薄弱损伤位置及破坏模式,并指出路基与桥上无砟轨道刚度不同,轨道结构应力分布状态有所差异,桥上轨道结构应力较小^[120]。

上述对温度和列车荷载共同作用下轨道结构的层间界面损伤、结构动力响应等研究指出,温度与列车耦合作用下轨道结构层间易产生损伤,且变温作用是轨道结构产生损伤的根源。然而,针对无砟轨道的疲劳问题未做进一步探讨。基于此,为更准确地判断服役环境下无砟轨道的疲劳特性,采用组合荷载下无砟轨道疲劳应力谱的计算理论,并根据多种工况下的计算结果和无砟轨道的实际温度荷载,采用内插运算方式得到列车经过时无砟轨道在温度荷载与其他纵向荷载共同作用下的疲劳寿命预测模型^[121]。此外,王青等^[122]采用等效静力法对



(a) 落轴装置



(b) 有限元模型

图8 室内落轴冲击试验及数值仿真^[119]

Fig. 8 Laboratory off-axis impact test and numerical simulation^[119]

轨道结构疲劳力学性能及损伤发展进行了三维仿真分析,结果表明,在恒载、温度和列车往复荷载作用下,路基上CRTS II型无砟轨道结构体系各层材料竖向位移、最大应力分别与时间呈正、负相关的关系,探明了轨道结构服役过程中的长期性能演变规律。为应对未来无砟轨道发展新极限并适应极端天气情况,Matias等^[123]设计了一种创新的列车-轨道-土壤系统模型(HI-Track),能够准确地模拟列车和大气作用下轨道的短期和长期响应,以预测混凝土板损伤的演变。

针对无砟轨道的细部结构,李威等^[124]研究了温升与列车荷载耦合作用下列车荷载作用位置、轴重大小及制动力对宽、窄接缝损伤发展趋势的影响规律,指出在耦合作用下接缝连结处极易产生压缩损伤,对转角位置破损应着重关注。阮庆伍^[125]、蔡小培等^[126]、Li等^[127]基于混凝土塑性损伤本构理论和CA砂浆劈裂抗拉试验研究了温度与列车荷载作用下无砟轨道的损伤特性,对比分析了塑性损伤模型与线弹性模型对计算结果的影响,指出在耦合作用下轨道结构宽窄接缝及砂浆层出现劣化,探明温度荷载是导致劣化的主要因素;结构受力在线弹性阶段,材料非线性特征未有明显体现;考虑配筋情况下的塑形损伤模型更符合实际情况。温度-列车荷载耦合作用下无砟轨道相关研究列于表4。

表 4 温度-列车荷载耦合作用下无砟轨道相关研究

Table 4 Study on ballastless track under the coupling effect of temperature and vehicle load

无砟轨道类型	研究对象	文献	主要研究内容
路基上无砟轨道	CRTS 双块式/板式无砟轨道	[110-111]	无砟轨道界面损伤规律及其对轨道动力响应的影响
	CRTS III 型板式无砟轨道	[112-113]	轨道板的损伤演变规律及损伤行为
	CRTS II 型板式无砟轨道	[114, 116]	轮轨动态相互作用基本特征、砂浆充填层力学特性
	板式无砟轨道	[118]	界面黏结破坏机理
	CRTS I 型双块式无砟轨道	[119]	轨道结构振动响应
	Bögl 板式无砟轨道	[120]	无砟轨道的变形及应力分布
	CRTS II 型板式无砟轨道	[122]	结构长期性能演化规律
桥上无砟轨道	CRTS II 型板式无砟轨道	[124-125, 126-127]	细部结构(砂浆层、宽窄接缝)损伤演化规律
	CRTS II 型板式无砟轨道	[115]	有载侧与无载侧的力学响应
	长大桥梁 CRTS I 型板式无砟轨道	[117]	钢轨附加应力检算
	CRTS II 型板式无砟轨道	[121]	结构疲劳寿命预测模型

综上所述,目前国外学者针对无砟轨道温度-列车荷载耦合鲜有研究,中国学者则侧重于将现场监测温度变化、整体升降温及温度梯度与列车荷载进行耦合,采用数值仿真对无砟轨道结构性能开展研究,并取得了有益成效,但尚存在以下不足:

1)无砟轨道作为多层异质复合结构,在环境和列车荷载的共同作用下,其结构材料具有不同的性能退化规律,构件的损伤将影响整个结构的耐久性,缺少系统的方法对无砟轨道耐久性进行研究。

2)受环境与荷载耦合加载试验装备的限制,目前鲜有环境与荷载耦合加载试验研究,仅从理论分析和数值仿真角度开展温度-荷载耦合作用效应方面的研究,相关数值模型难以真实反映轨道结构在耦合作用下的长期力学性能,数值结果缺少模型试验的有效验证。

3)针对持续高低温、极端高低温和循环温度等复杂温度场与列车荷载耦合效应的研究较少,对于不同温度场和列车荷载的耦合作用机制尚不清楚。

在接下来的工作研究中应针对性、系统地开展无砟轨道温度荷载与列车荷载的耦合作用机制研究,搭建温度-列车荷载耦合室内试验平台,打破现有温度荷载及力学试验分段进行的研究现状;并以此为基础,将无砟轨道结构累积损伤演化过程及其破坏形式作为重点研究内容,开展耦合作用下的试验与理论研究,确定轨道结构开裂损伤、疲劳裂纹扩展等结构安全服役限值;完善高速铁路无砟轨道技术指标体系及结构损伤评价方法,指导无砟轨道结构安全运营与维护。

5 总结与展望

目前,高速铁路无砟轨道建设得到快速发展,为保障无砟轨道在复杂的服役环境中长期稳定运营,温度、列车荷载单独或耦合作用下无砟轨道结

构失效及性能演变已逐步成为研究焦点,并积累了较为丰硕的研究成果。首先,介绍了无砟轨道结构型式及优缺点,并系统地从事试验分析、理论计算及数值模拟梳理了无砟轨道温度场与温度效应的研究现状;其次,概述了静载及疲劳荷载作用下无砟轨道力学响应研究;进一步分析了温度-荷载耦合作用下无砟轨道损伤行为及其演化特征,指出现有研究的不足。基于调研与分析,对当前高速铁路无砟轨道力学性能研究现状,尤其是针对目前的局限及未来研究发展趋势作以下探讨:

1)无砟轨道温度作用与效应研究。目前研究者针对太阳辐射的地域差异对无砟轨道温度作用模式和取值的影响鲜有研究,高速铁路设计规范亦未对不同地域温度梯度的取值有具体和针对性的说明。后续应加强对不同地域轨道结构温度的长期测试,并结合历史气象数据对无砟轨道温度作用取值开展研究,准确计算无砟轨道温度作用,得到不同地域中无砟轨道温度作用取值的等温线地图,提高结构温度作用取值和温度计算理论的精确度,弥补设计规范的不足。此外,因无砟轨道温度场影响因素较为繁杂且影响因素的时空变异性、关联性较强,后期应深入探究随机过程模拟方法,开展无砟轨道温度场的预测研究,为铁道工作者对无砟轨道安全运营的评估提供有效参考。

2)单一荷载(温度、列车动荷载)力学性能深入分析研究。为了更好地探究温度-荷载耦合作用下无砟轨道的力学响应,需继续针对单一因素下轨道结构损伤机理开展更深层次的研究,基于轨道材料、构件的基本力学性能的充分研究,拓展研究无砟轨道整体结构在单一荷载下的力学响应,掌握其破坏形式、内力分布及损伤演化规律;通过室内试验与现场试验、数值分析与试验研究的对比研究,重点探讨无砟轨道各参数影响规律,揭示单一荷载

下轨道结构动态演化行为及损伤机理。

3) 无砟轨道温度-荷载耦合作用效应研究。受限于试验条件,现有研究仅从数值模拟方面对无砟轨道开展了温度-荷载耦合作用下相关性能分析,数值结果缺少模型试验的验证。后续应在单一因素研究背景下搭建温度-列车荷载耦合室内试验平台,改进数值仿真手段,突破温度-列车荷载耦合作用下材料-构件-结构多尺度模型试验方法、多场耦合精细化数值分析方法,揭示温度-列车荷载耦合动力学行为及轨道结构失稳机理;此外,应进一步探究持续高低温、极端高低温和循环温度等复杂温度场和列车移动荷载耦合效应,阐明极端温度-荷载耦合作用下轨道板上拱变形规律和力学特性,优化无砟轨道体系设计,完善多场耦合作用下轨道结构性能的服役评估标准。

参考文献

- [1] ESVELD C. Recent developments in slab track [J]. *European Railway Review*, 2003, 9(2): 81-85.
- [2] MATIAS S R, FERREIRA P A. Railway slab track systems: Review and research potentials [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(12): 1635-1653.
- [3] 杨荣山. 轨道工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
YANG R S. *Railway track* [M]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese)
- [4] GAUTIER P E. Slab track: Review of existing systems and optimization potentials including very high speed [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 92: 9-15.
- [5] TAYABJI S D, BILOW D. Concrete slab track state of the practice [J]. *Transportation Research Record*, 2001, 1742(1): 87-96.
- [6] 赵志辉. 高速铁路无砟轨道综合技术经济分析[J]. *铁道标准设计*, 2017, 61(5): 32-35.
ZHAO Z H. Comprehensive technical and economic analysis of high-speed railway slab track [J]. *Railway Standard Design*, 2017, 61(5): 32-35. (in Chinese)
- [7] 熊嘉阳, 沈志云. 中国高速铁路的崛起和今后的发展[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(5): 6-29.
XIONG J Y, SHEN Z Y. Rise and future development of Chinese high-speed railway [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(5): 6-29. (in Chinese)
- [8] 戴公连, 温学桢, 苏海霆. 寒冷季节桥上无砟轨道横竖向温度梯度研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(7): 1-5.
DAI G L, WEN X H, SU H T. Study on horizontal and vertical temperature gradient of ballastless track on bridge in cold season [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 43(7): 1-5. (in Chinese)
- [9] 戴公连, 苏海霆, 闫斌. 秋季桥上纵连板式无砟轨道竖向温差试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(3): 94-99.
DAI G L, SU H T, YAN B. Experimental study on the vertical temperature gradient of longitudinally connected slab ballastless track on bridge in autumn [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(3): 94-99. (in Chinese)
- [10] 戴公连, 苏海霆, 刘文硕, 等. 高温季节桥上纵连板式无砟轨道的温度分布[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(4): 1073-1080.
DAI G L, SU H T, LIU W S, et al. Temperature distribution of longitudinally connected ballastless track on bridge in summer [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(4): 1073-1080. (in Chinese)
- [11] 杨荣山, 万章博, 刘学毅, 等. CRTS I型双块式无砟轨道冬季温度场试验[J]. *西南交通大学学报*, 2015, 50(3): 454-460.
YANG R S, WAN Z B, LIU X Y, et al. Temperature field test of CRTS I twin-block ballastless track in winter [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(3): 454-460. (in Chinese)
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] 铁路桥涵设计规范: TB 10002—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Code for design on railway bridge and culvert: TB 10002—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [14] 刘钰, 陈攀, 赵国堂. CRTS II型板式无砟轨道结构早期温度场特征研究[J]. *中国铁道科学*, 2014, 35(1): 1-6.
LIU Y, CHEN P, ZHAO G T. Study on the characteristics of early temperature field of CRTS II Slab ballastless track structure [J]. *China Railway Science*, 2014, 35(1): 1-6. (in Chinese)
- [15] 吴斌, 刘参, 曾志平, 等. CRTS II型板式无砟轨道温度场特征研究[J]. *铁道工程学报*, 2016, 33(3): 29-33.
WU B, LIU C, ZENG Z P, et al. Research on the temperature field characteristic of CRTS II slab ballastless track [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2016, 33(3): 29-33. (in Chinese)
- [16] 赵磊, 周凌云, 张营营, 等. 高温季节桥上CRTS II型

- 板式无砟轨道温度分布试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(2): 287-296.
- ZHAO L, ZHOU L Y, ZHANG Y Y, et al. Experimental study on temperature distribution of CRTS II ballastless track on high-speed railway bridge in summer [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(2): 287-296. (in Chinese)
- [17] 周凌云, 赵磊, 张广潮, 等. 高速铁路桥上 CRTS II 型无砟轨道快速升降温模型试验研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(4): 90-98.
- ZHOU L Y, ZHAO L, ZHANG G C, et al. Model test study on CRTS II ballastless track under rapid temperature rise and fall on high-speed railway bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(4): 90-98. (in Chinese)
- [18] LEE S H, PARK D W, VO H V, et al. Analysis of asphalt concrete track based on service line test results [J]. Construction and Building Materials, 2019, 203: 558-566.
- [19] ATALAN M, PRENDERGAST L J, GRIZI A, et al. A review of numerical models for slab-asphalt track railways [J]. Infrastructures, 2022, 7(4): 59.
- [20] JADIDI K, ESMAEILI M, KALANTARI M, et al. A review of different aspects of applying asphalt and bituminous mixes under a railway track [J]. Materials, 2020, 14(1): E169.
- [21] 孙泽江, 王泽萍, 汪杰, 等. 极端高温天气下 CRTS II 型板式无砟轨道温度分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 64-68.
- SUN Z J, WANG Z P, WANG J, et al. Temperature analysis of CRTS II slab ballastless track in extremely hot weather [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(11): 64-68. (in Chinese)
- [22] 欧祖敏, 孙璐, 周杰, 等. 基于概率需求的高速铁路无砟轨道板温度荷载取值研究 I: 轴向均匀温度作用[J]. 铁道学报, 2016, 38(2): 96-104.
- OU Z M, SUN L, ZHOU J, et al. Probability value of temperature loads for ballastless track slab of high speed railway: Axial uniform thermal actions [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(2): 96-104. (in Chinese)
- [23] 欧祖敏, 孙璐. 基于概率需求的高速铁路无砟轨道板温度荷载取值研究 II: 温度梯度作用[J]. 铁道学报, 2018, 40(1): 80-86.
- OU Z M, SUN L. Value of temperature loads on probability demand for ballastless track slab II: Thermal gradient actions [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(1): 80-86. (in Chinese)
- [24] 欧祖敏, 孙璐, 程群群. 基于气象资料的无砟轨道温度场计算与分析[J]. 铁道学报, 2014, 36(11): 106-112.
- OU Z M, SUN L, CHENG Q Q. Analysis on temperature field of ballastless track structure based on meteorological data [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(11): 106-112. (in Chinese)
- [25] DURA C. Probabilistic performance based durability design of concrete structure: Models for environmental actions on concrete structures [R]. The European Union Brite Eu Ram III, 1999.
- [26] 胡汉平. 热传导理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- HU H P. Theory of heat conduction [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010. (in Chinese)
- [27] JPG Mijnsbergen. DuraCrete probabilistic performance based durability design of concrete structures (BE95-1347) [C]//2nd Int. PhD. Symposium in Civil Engineering, 1996.
- [28] WANG D, ROESLER J R. One-dimensional temperature profile prediction in multi-layered rigid pavement systems using a separation of variables method [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 15(5): 373-382.
- [29] GUL M S, MUNEEER T, KAMBEZIDIS H D. Models for obtaining solar radiation from other meteorological data [J]. Solar Energy, 1998, 64(1/2/3): 99-108.
- [30] WANG D, ROESLER J R, GUO D Z. Analytical approach to predicting temperature fields in multilayered pavement systems [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(4): 334-344.
- [31] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG S M, TAO W Q. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [32] OU Z M, LI F J. Analysis and prediction of the temperature field based on in situ measured temperature for CRTS-II ballastless track [J]. Energy Procedia, 2014, 61: 1290-1293.
- [33] 康维新, 陈帅, 魏春城, 等. 无砟轨道温度场计算及持续高温天气影响分析[J]. 铁道学报, 2019, 41(7): 127-134.
- KANG W X, CHEN S, WEI C C, et al. Temperatures of ballastless track and effect of continuous hot weather [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(7): 127-134. (in Chinese)
- [34] 刘学毅, 李佳莉, 康维新, 等. 无砟轨道温度简便计算及极端天气影响分析[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(6): 1037-1045, 1060.
- LIU X Y, LI J L, KANG W X, et al. Simplified calculation of temperature in concrete slabs of ballastless track and influence of extreme weather [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(6): 1037-1045, 1060. (in Chinese)

- [35] LOU P, ZHU J P, DAI G L, et al. Experimental study on bridge-track system temperature actions for Chinese high-speed railway [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18(2): 451-464.
- [36] 尤明熙,蔡小培,高亮,等.基于监测的CRTS II型板式无砟轨道温度传递仿真分析[J].铁道建筑,2015,55(11):104-107.
YOU M X, CAI X P, GAO L, et al. Simulation analysis of temperature transfer of CRTS II slab-type ballastless track based on monitoring [J]. Railway Engineering, 2015, 55(11): 104-107. (in Chinese)
- [37] 刘付山,曾志平,吴斌,等.高速铁路连续式无砟轨道温度场分析[J].铁道学报,2016,38(12):86-93.
LIU F S, ZENG Z P, WU B, et al. Study on temperature field of continuous ballastless track for high-speed railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(12): 86-93. (in Chinese)
- [38] 李健,赵坪锐,万章博,等.双块式无砟轨道温度场试验研究和数值分析[J].中国科学:技术科学,2014,44(7):729-735.
LI J, ZHAO P R, WAN Z B, et al. Experimental research and numerical analysis of temperature field on bi-block ballastless track [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 729-735. (in Chinese)
- [39] WANG J F, ZHOU Y B, WU T M, et al. Performance of cement asphalt mortar in ballastless slab track over high-speed railway under extreme climate conditions [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(5): 04019037.1-04019037.11.
- [40] YANG R S, LI J L, KANG W X, et al. Temperature characteristics analysis of the ballastless track under continuous hot weather [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2017, 143(9): 04017048.1-04017048.10.
- [41] 刘笑凯,刘学毅,肖杰灵,等.温度作用下纵连式无砟轨道垂向稳定性研究[J].西南交通大学学报,2018,53(5):921-927,944.
LIU X K, LIU X Y, XIAO J L, et al. Vertical stability of longitudinal continuous ballastless track under temperature variation [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(5): 921-927, 944. (in Chinese)
- [42] LIU X Y, ZHAO P R, DAI F. Advances in design theories of high-speed railway ballastless tracks [J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(3): 154-162.
- [43] 朱伯芳.地基上混凝土梁的温度应力[J].土木工程学报,2006,39(8):96-101.
ZHU B F. Thermal stresses in concrete beams on elastic foundations [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(8): 96-101. (in Chinese)
- [44] 刘钰.CRTS II型板式轨道早期温度场特征及其影响研究[D].成都:西南交通大学,2013.
LIU Y. Study on characteristics and influences of CRTS II slab track early temperature field [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [45] 赵磊,高亮,辛涛,等.考虑层间效应的无砟轨道复合板温度荷载效应计算方法研究[J].铁道学报,2014,36(10):81-87.
ZHAO L, GAO L, XIN T, et al. Analysis on calculation of ballastless track composite slab temperature stresses in consideration of inter-layer adhesive effect [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(10): 81-87. (in Chinese)
- [46] 朱永见,赵国堂,郑建.CRTS II型板式无砟轨道层间离缝产生原因分析[J].铁道学报,2021,43(2):111-117.
ZHU Y J, ZHAO G T, ZHENG J. Analysis on causes of gap under CRTS II slab ballastless track [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(2): 111-117. (in Chinese)
- [47] CHEN Z, XIAO J L, LIU X Y, et al. Deformation behavior of slab warping for longitudinal continuous rigid slab under temperature effect [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(13): 2823-2836.
- [48] 闫斌,戴公连.高速铁路斜拉桥上无缝线路纵向力研究[J].铁道学报,2012,34(3):83-87.
YAN B, DAI G L. CWR longitudinal force of cable-stayed bridge of high-speed railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(3): 83-87. (in Chinese)
- [49] 徐玉坡,梁晨,卢耀荣.设计规范中统一无缝线路稳定性计算公式存在的问题分析[J].铁道建筑,2014,54(5):124-125,161.
XU Y P, LIANG C, LU Y R. Analysis of problems existing in uniform calculation formula of seamless line stability in design specification [J]. Railway Engineering, 2014, 54(5): 124-125, 161. (in Chinese)
- [50] 周凌宇,张营营,余志武,等.温度荷载下桥上CRTS II型无砟轨道结构层间位移试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(8):2093-2101.
ZHOU L Y, ZHANG Y Y, YU Z W, et al. Experimental study on interlaminar displacement of CRTS II ballastless track on bridge under temperature load [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(8): 2093-2101. (in Chinese)
- [51] ZHOU L Y, WEI T Y, ZHANG G C, et al. Experimental study of the influence of extremely repeated thermal loading on a ballastless slab track-bridge structure [J]. Applied Sciences, 2020, 10(2): 461.
- [52] 刘伟斌,王继军,江成,等.高速铁路CRTS III型板式

- 无砟轨道复合轨道板受力特性研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(1): 30-33, 75.
- LIU W B, WANG J J, JIANG C, et al. Study on mechanical characteristics of composite track slab for CRTS III slab ballastless track of high speed railway [J]. Railway Engineering, 2017, 57(1): 30-33, 75. (in Chinese)
- [53] CHO Y K, KIM S M. Experimental analysis of crack width movement of continuously reinforced concrete railway track [J]. Engineering Structures, 2019, 194: 262-273.
- [54] LIU X Y, ZHAO P R, DAI F. Advances in design theories of high-speed railway ballastless tracks [J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(3): 154-162.
- [55] CHO Y K, KIM S M, HAN J O, et al. Relationship between crack propagation depth and crack width movement in continuously reinforced concrete slab systems [J]. Journal of the Korean Society of Road Engineers, 2015, 17(1): 83-90.
- [56] ANDO S. Loading-deformation characteristics of slab track with temperature variation [J] Railway Summary Report, 1989, 10(3): 2-9.
- [57] LEE D H, KIM K H, JANG S Y, et al. Deformation and stress distribution of discontinuous precast concrete track slab: I. Initial and temperature deformation [J]. Journal of the Korean Society for Railway, 2017, 20(5): 625-636.
- [58] 杨静静, 张楠, 高芒芒, 等. CRTS II型无砟轨道温度翘曲变形及其对车线动力响应的影响[J]. 工程力学, 2016, 33(4): 210-217.
- YANG J J, ZHANG N, GAO M M, et al. Temperature warping and its impact on train-track dynamic response of CRTS II ballastless track [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 210-217. (in Chinese)
- [59] 刘钰, 赵国堂. CRTS II型板式无砟轨道结构层间早期离缝研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 1-7.
- LIU Y, ZHAO G T. Analysis of early gap between layers of CRTS II slab ballastless track structure [J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 1-7. (in Chinese)
- [60] 王森荣, 孙立, 李秋义, 等. 无砟轨道轨道板温度测量与温度应力分析[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(2): 52-55.
- WANG S R, SUN L, LI Q Y, et al. Temperature measurement and temperature stress analysis of ballastless track slab [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(2): 52-55. (in Chinese)
- [61] 胡松林, 周小林, 徐庆元, 等. 温度梯度荷载作用下 CRTS II型轨道板与CA砂浆界面损伤扩展研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(9): 2143-2149.
- HU S L, ZHOU X L, XU Q Y, et al. The study of interface damage extension between CRTS II slab and CA mortar under temperature gradient [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(9): 2143-2149. (in Chinese)
- [62] 赵春发, 刘建超, 毛海和, 等. 温度梯度荷载作用下 CRTS II型板式无砟轨道砂浆层界面损伤分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(1): 79-86.
- ZHAO C F, LIU J C, MAO H H, et al. Interface damage analysis of CA mortar layer of the CRTS II ballastless slab track under temperature gradient loads [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, 48(1): 79-86. (in Chinese)
- [63] 陈龙, 陈进杰, 王建西. CRTS II型板式无砟轨道层间传力规律及离缝破坏研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(8): 130-138.
- CHEN L, CHEN J J, WANG J X. Study on stress transfer and interface damage of CRTS II slab ballastless track [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(8): 130-138. (in Chinese)
- [64] KIM J I, CHO Y K, KIM J I, et al. Behavior of continuously reinforced concrete track subjected to temperature changes [J]. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 2012, 12(4): 39-44.
- [65] BAE S G, CHOI S, JANG S Y, et al. Prediction of crack pattern of continuously reinforced concrete track induced by temperature change and shrinkage of concrete [J]. Journal of the Korean Society for Railway, 2014, 17(4): 270-280.
- [66] YUSUPOV B, QIU Y J, SHARIPOV G, et al. Characterization of vertical response of asphalt trackbed concrete in railway substructure to external loads [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 3578281.
- [67] 周敏, 戴公连, 闫斌. 温度作用下桥上CRTS II型轨道离缝及变形分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(12): 2341-2346.
- ZHOU M, DAI G L, YAN B. Analysis of gap and deformation of CRTS II track on bridges under temperature [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(12): 2341-2346. (in Chinese)
- [68] 张志超, 曾志平, 元强, 等. 温度荷载作用下桥上 CRTS II型板式轨道纵向力学特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 982-989.
- ZHANG Z C, ZENG Z P, YUAN Q, et al. Study on longitudinal mechanical characteristics of CRTS II slab track on bridge under the temperature load [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(5): 982-

989. (in Chinese)
- [69] DAI G, GE H, LIU W S, et al. Interaction analysis of Continuous Slab Track (CST) on long-span continuous high-speed rail bridges [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2017, 63: 713-723.
- [70] 张鹏飞, 桂昊, 高亮, 等. 桥上CRTS III型板式无砟轨道无缝线路伸缩力影响因素分析[J]. *北京交通大学学报*, 2018, 42(6): 15-23.
- ZHANG P F, GUI H, GAO L, et al. Analysis on influencing factors of expansion-contraction force of CRTS III slab track CWR on bridge [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2018, 42(6): 15-23. (in Chinese)
- [71] 张鹏飞, 姚典, 涂建, 等. 双向温梯荷载下简支梁桥上CRTS II型板受力变形[J]. *北京交通大学学报*, 2021, 45(1): 32-38.
- ZHANG P F, YAO D, TU J, et al. Stress and deformation of CRTS II track slab on simply supported beam bridge under bidirectional temperature gradient load [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2021, 45(1): 32-38. (in Chinese)
- [72] LI Y, CHEN J J, WANG J X, et al. Study on the interface damage of CRTS II slab track under temperature load [J]. *Structures*, 2020, 26: 224-236.
- [73] LIU X K, ZHANG W H, XIAO J L, et al. Damage mechanism of broad-narrow joint of CRTS II slab track under temperature rise [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(5): 2126-2135.
- [74] 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.
- [75] 程前. 高速铁路CRTS II型无砟轨道板受力性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- CHENG Q. Mechanical behavior analysis of CRTS II slab ballastless track base plate [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011. (in Chinese)
- [76] DAI G L, SU M. Full-scale field experimental investigation on the interfacial shear capacity of continuous slab track structure [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2016, 16(3): 485-493.
- [77] 刘晓春, 余志武, 金城, 等. CRTS III型板式无砟轨道复合板横向弯曲试验研究[J]. *铁道学报*, 2018, 40(12): 153-160.
- LIU X C, YU Z W, JIN C, et al. Experimental study on composite plate of CRTS III slab track under transverse bending moment [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(12): 153-160. (in Chinese)
- [78] 吴斌, 陈文荣, 刘参, 等. 列车竖向荷载下CRTS II型板式无砟轨道结构受力特性试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, 11(3): 37-42.
- WU B, CHEN W R, LIU C, et al. Experimental study on mechanical characteristics of CRTS II slab track under the vertical load of train [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014, 11(3): 37-42. (in Chinese)
- [79] 张鲁顺, 禹雷, 赵磊, 等. 列车荷载在双块式无砟轨道中静态传递特征研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(8): 1951-1959.
- ZHANG L S, YU L, ZHAO L, et al. On the characteristics of static transfer of train load in double-block ballastless track of high-speed railway [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(8): 1951-1959. (in Chinese)
- [80] VU L, JANG D D, KANG Y S. Assessment of structural dynamic response and vehicle-track interaction of precast slab track systems [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3558.
- [81] SADEGHI J, LIRAVI H, ESMAEILI M H. Experimental investigation on loading pattern of railway concrete slabs [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 153: 481-495.
- [82] 张广潮, 周凌云, 魏天宇, 等. 静力荷载下CRTS II型无砟轨道-桥梁结构体系的力学性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(5): 1712-1723.
- ZHANG G C, ZHOU L Y, WEI T Y, et al. Mechanical performance of CRTS II ballastless track-bridge structural system under static load [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(5): 1712-1723. (in Chinese)
- [83] 张鹏飞, 桂昊, 高亮, 等. 桥上CRTS II型板式无砟轨道挠曲力影响因素分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(1): 25-33.
- ZHANG P F, GUI H, GAO L, et al. Analysis on influencing factors of deflection force of CRTS II slab ballastless track on bridge [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(1): 25-33. (in Chinese)
- [84] 刘晓春, 金城, 余志武, 等. CRTS III型板式无砟轨道横向弯曲疲劳试验[J]. *西南交通大学学报*, 2018, 53(1): 23-30.
- LIU X C, JIN C, YU Z W, et al. Fatigue testing of CRTS III ballastless slab track structures under transverse bending [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018, 53(1): 23-30. (in Chinese)
- [85] FENG Y L, JIANG L Z, ZHOU W B, et al. Experimental investigation on shear steel bars in CRTS II slab ballastless track under low-cyclic reciprocating load [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 255: 119425.
- [86] BOSE T, ZANIA V, LEVENBERG E. Experimental investigation of a ballastless asphalt track mockup under vertical loads [J]. *Construction and Building Materials*,

- 2020, 261: 119711.
- [87] TARIFA M, ZHANG X X, RUIZ G, et al. Full-scale fatigue tests of precast reinforced concrete slabs for railway tracks [J]. *Engineering Structures*, 2015, 100: 610-621.
- [88] ĆEBAŠEK T M, ESEN A F, WOODWARD P K, et al. Full scale laboratory testing of ballast and concrete slab tracks under phased cyclic loading [J]. *Transportation Geotechnics*, 2018, 17: 33-40.
- [89] CHAPELEAU X, SEDRAN T, COTTINEAU L M, et al. Study of ballastless track structure monitoring by distributed optical fiber sensors on a real-scale mockup in laboratory [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56: 1751-1757.
- [90] SUNG D Y, HAN S C. Fatigue life evaluation of continuous welded rails on concrete slab track in Korea high-speed railway [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(13): 1990-2004.
- [91] XAVIER N M, ABRAHAM G M. Study on effect of varying rail profiles on fatigue behaviour of track slabs [J]. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2016, V5(7): 596-598
- [92] ZENG Z P, WANG J D, SHEN S W, et al. Experimental study on evolution of mechanical properties of CRTS III ballastless slab track under fatigue load [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 210: 639-649.
- [93] 王启云, 张家生, 孟飞, 等. 高速铁路轨道路基模型及动力加载研究[J]. *铁道学报*, 2012, 34(12): 90-95.
WANG Q Y, ZHANG J S, MENG F, et al. Study on track-subgrade model of high-speed railway and dynamical loading [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(12): 90-95. (in Chinese)
- [94] 杨俊斌, 赵坪锐, 刘永孝, 等. 列车荷载对 CRTS I 型板式轨道疲劳损伤的影响研究[J]. *铁道标准设计*, 2013, 57(10): 19-23.
YANG J B, ZHAO P R, LIU Y X, et al. Influence of train load on fatigue damage to CRTS-I slab track [J]. *Railway Standard Design*, 2013, 57(10): 19-23. (in Chinese)
- [95] FENG Q S, SUN K, CHEN H P, et al. Long-term prediction of fatigue crack growth in ballastless track of high-speed railway due to cyclic train load [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 292: 123375.
- [96] 任娟娟, 田根源, 徐家铎, 等. 客货共线单元板式无砟轨道荷载作用特性与疲劳寿命预测[J]. *铁道学报*, 2019, 41(3): 110-116.
REN J J, TIAN G Y, XU J D, et al. Load effect and fatigue life prediction of prefabricated slab track for mixed passenger and freight railway [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(3): 110-116. (in Chinese)
- [97] YU Z W, XIE Y, SHAN Z, et al. Fatigue performance of CRTS III slab ballastless track structure under high-speed train load based on concrete fatigue damage constitutive law [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2018, 16(5): 233-249.
- [98] POVEDA E, YU R C, LANCHA J C, et al. A numerical study on the fatigue life design of concrete slabs for railway tracks [J]. *Engineering Structures*, 2015, 100: 455-467.
- [99] ZHU S Y, CAI C B. Fatigue life prediction of CRTS I ballastless slab track [C]//Third International Conference on Transportation Engineering (ICTE). July 23-25, 2011, Chengdu, China. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2011: 1714-1719.
- [100] THÖLKEN D, ABDALLA FILHO J E, POMBO J, et al. Three-dimensional modelling of slab-track systems based on dynamic experimental tests [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 31: 100663.
- [101] 翟婉明, 夏禾. 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
ZHAI W M, XIA H. Train-track-bridge dynamic interaction: theory and engineering application [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [102] 周凌宇, 彭秀生, 杨林旗, 等. 列车荷载下简支梁桥上 CRTS II 型板式无砟轨道经时力学性能研究[J]. *铁道学报*, 2021, 43(3): 120-129.
ZHOU L Y, PENG X S, YANG L Q, et al. Time-dependent mechanical properties of CRTS II slab track on simply supported beam bridge under train load [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(3): 120-129. (in Chinese)
- [103] 赵磊, 周凌宇, MAHUNON A D G, 等. 长期列车荷载下无砟轨道-桥梁结构刚度退化试验研究[J]. *铁道学报*, 2021, 43(5): 136-143.
ZHAO L, ZHOU L Y, MAHUNON A D G, et al. Experimental study on stiffness degradation of ballastless track-bridge structure under long-term train load [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(5): 136-143. (in Chinese)
- [104] ZHAO L, ZHOU L Y, YU Z W, et al. Experimental study on CRTS II ballastless track-bridge structural system mechanical fatigue performance [J]. *Engineering Structures*, 2021, 244: 112784.
- [105] SHENG X W, ZHENG W Q, ZHU Z H, et al. Full-scale fatigue test of unit-plate ballastless track laid on

- long-span cable-stayed bridge [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 118601.
- [106] 徐庆元, 张泽, 陈效平, 等. 桥上CRTS II型板式无砟轨道混凝土疲劳寿命预测模型试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(8): 1565-1570.
- XU Q Y, ZHANG Z, CHEN X P, et al. Experimental study on fatigue life prediction model of concrete of CRTS II slab track on bridge [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(8): 1565-1570. (in Chinese)
- [107] SADEGHI J, KHAJEHDEZFULY A, ESMAEILI M, et al. Dynamic interaction of vehicle and discontinuous slab track considering nonlinear hertz contact model [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2016, 142(4): 04016011.
- [108] KALKER J J. Transient phenomena in two elastic cylinders rolling over each other with dry friction [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1970, 37(3): 677-688.
- [109] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2007.
- ZHAI W M. *Vehicle-track coupling dynamics* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [110] 朱胜阳, 蔡成标. 温度和列车动荷载作用下双块式无砟轨道道床板损伤特性研究[J]. *中国铁道科学*, 2012, 33(1): 6-12.
- ZHU S Y, CAI C B. Research on the damage characteristics of double-block ballastless track bed slab under temperature and vehicle dynamic loads [J]. *China Railway Science*, 2012, 33(1): 6-12. (in Chinese)
- [111] ZHU S Y, CAI C B. Interface damage and its effect on vibrations of slab track under temperature and vehicle dynamic loads [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2014, 58: 222-232.
- [112] 李全鹏. 温度和车辆荷载作用下CRTS III型无砟轨道板损伤数值模拟分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- LI Q P. Numerical analysis on track slab damage of the CRTS III ballastless track under temperature loads and vehicle loads [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [113] 李岩, 赵春发, 朱胜阳. 温度荷载和车辆荷载作用下CRTS III无砟轨道板损伤分析[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2018, 42(6): 956-961.
- LI Y, ZHAO C F, ZHU S Y. Damage analysis of the CRTS III ballastless track slab under temperature load and vehicle load [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2018, 42(6): 956-961. (in Chinese)
- [114] 李培刚. CRTS II型板式轨道层间损伤及其影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- LI P G. Analysis of the interface damage of CRTS II slab track and its influences [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [115] 李龙祥, 周凌宇, 黄戡, 等. 循环荷载下无砟轨道-桥梁结构体系刚度退化性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(10): 2481-2490.
- LI L X, ZHOU L Y, HUANG K, et al. Performance of stiffness degradation of structure system in ballastless track-bridge under cyclic load [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(10): 2481-2490. (in Chinese)
- [116] 张广义. 砂浆充填层劣化对CRTS II型板式无砟轨道力学特性影响的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- ZHANG G Y. Study of the effect of cement asphalt mortar disease on mechanical properties of CRTS II slab ballastless track [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [117] 曲村. 高速铁路长大桥梁无砟轨道无缝线路设计理论及方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- QU C. Study on the design theory and method of ballastless continuous welded rail on long-span bridge in high-speed railway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [118] 戴公连, 粟森. 剪切荷载下板式无砟轨道界面黏结破坏机理[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(1): 16-21.
- DAI G L, SU M. Mechanism of interfacial bond failure for slab ballastless track under shear loading [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(1): 16-21. (in Chinese)
- [119] ZENG Z P, YE M X, LIU F S, et al. Dynamic response of CRTS I double-block ballastless track under three-dimensional temperature and falling-shaft impact loadings [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, 13(3): 168781402110043.
- [120] LEE D H, KIM K H, JANG S Y, et al. Deformation and stress distribution of discontinuous precast concrete track slab: II. Stress distribution [J]. *Journal of the Korean Society for Railway*, 2017, 20(5): 637-648.
- [121] 徐庆元, 林青腾, 方子匀, 等. 组合荷载下桥上纵连板式无砟轨道疲劳特性[J]. *中国铁道科学*, 2017, 38(6): 37-46.
- XU Q Y, LIN Q T, FANG Z Y, et al. Fatigue characteristics of longitudinally connected slab ballastless track on bridge under combined load [J]. *China Railway Science*, 2017, 38(6): 37-46. (in Chinese)
- [122] 王青, 卫军, 董荣珍, 等. CRTS II型板式无砟轨道结

- 构的疲劳力学性能分析[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(5): 41-47.
- WANG Q, WEI J, DONG R Z, et al. Fatigue behavior analysis of CRTS II slab ballastless track structure [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(5): 41-47. (in Chinese)
- [123] MATIAS S R, FERREIRA P A. The role of railway traffic and extreme weather on slab track long-term performance [J]. Construction and Building Materials, 2022, 322: 126445.
- [124] 李威, 刘学毅, 肖杰灵, 等. 高温环境下列车荷载对 CRTS II 型板式轨道宽窄接缝损伤行为的影响[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(7): 32-36.
- LI W, LIU X Y, XIAO J L, et al. Effect of train load on damage behavior of wide and narrow joints of CRTS II slab track in high temperature environment [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(7): 32-36. (in Chinese)
- [125] 阮庆伍. 温度与列车作用下 CRTS II 型板式轨道损伤特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- RUAN Q W. Research on the damage characteristics of CRTS II slab ballastless track under temperature and vehicle loads [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [126] 蔡小培, 钟阳龙, 阮庆伍, 等. 混凝土塑性损伤模型在无砟轨道非线性分析中的应用[J]. 铁道学报, 2019, 41(5): 109-118.
- CAI X P, ZHONG Y L, RUAN Q W, et al. Application of concrete damaged plasticity model to nonlinear analysis of ballastless track [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(5): 109-118. (in Chinese)
- [127] LI Y, CHEN J J, WANG J X, et al. Analysis of damage of joints in CRTS II slab track under temperature and vehicle loads [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(4): 1209-1218.

(编辑 胡玲)