

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.217



桥梁温度作用与效应 2020 年度研究进展

肖林, 蔡俊宇, 杨妍秋, 卫星

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:温度作用是桥梁结构在建造、使用过程中需要考虑的重要荷载。随着交通网络的延伸,越来越多的桥梁结构受到严酷的环境温度作用,同时桥梁交通环境复杂化也使桥梁遭受火灾并发生损失的几率增大。深入研究桥梁环境与火灾温度场,识别其作用与效应,有利于从设计、建造与养护等方面保障桥梁结构安全。对 2020 年度桥梁环境温度作用、温致效应、桥梁火灾作用与效应方面最新研究进展进行梳理与总结,并基于最新研究进展,对未来桥梁温度作用与效应方面研究热点和方向作出展望。

关键词:环境温度作用;火灾作用;温度场;结构效应

中图分类号:U448.38 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0167-08

State-of-the-art review of bridge thermal action and effects in 2020

XIAO Lin, CAI Junyu, YANG Yanqiu, WEI Xing

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Temperature action is one of the important loads in bridge construction and operation stages. With the extension of traffic network, severe climate could be expected to cause larger temperature action than those recommended in the specifications. The complexity of traffic environment also increases the probability of bridge fire and related damage. In-depth study of bridge ambient and fire temperature field, and identification of its actions and effects can ensure the safety of bridge from the aspects of design, construction and maintenance. This study reviews the latest research on ambient temperature action, temperature effect and bridge fire action in 2020, and prospects the hotspots and directions of the future research of bridge thermal action and effects.

Keywords: ambient temperature action; fire action; thermal field; structural effect

组成桥梁结构的材料一般具有温度变形特性,使桥梁在设计、建造与使用过程中需要考虑温度变化所带来的影响。桥梁结构在建造、使用过程中温度状态发生变化,造成温度变化的外部环境因素包括太阳辐射、桥梁构件之间的热传导以及空气流动产生的对流换热等。此外,建造过程中混凝土水化热、钢结构焊接以及高温沥青铺装等都会在桥梁结构中产生温度场与温度效应。在使用过程中,车辆失火或爆炸等偶然极端情况也会使桥梁结构承受高温作用。

桥梁中的环境温度作用可产生较大的变形或应力,与其他荷载作用叠加可能危害结构安全;对于一些特殊桥梁,环境温度作用的影响甚至超过恒载和活载成为主导作用,增加桥梁建造难度,危害桥梁耐久性与运营安全。

近年来中国交通网络逐渐向高寒、高海拔地区延伸,桥

梁结构受到的温度作用日益复杂,桥梁温度场与温度效应日益受到研究者关注。笔者梳理了 2020 年度桥梁温度作用与效应的相关研究文献,主要集中在桥梁的环境温度作用与效应、火灾作用与效应方面,如图 1 所示。其中桥梁环境温致效应方面的研究最为集中,其次是环境温度作用。笔者回顾了 2020 年桥梁环境温度、火灾作用与效应的主要研究成果

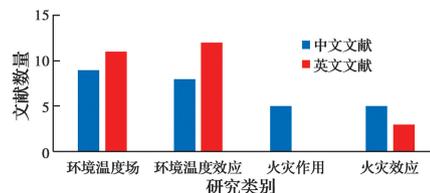


图 1 桥梁作用与效应研究文献分类

收稿日期:2021-09-17

基金项目:国家自然科学基金(52178170)

作者简介:肖林(1982-),男,博士,副教授,主要从事桥梁钢结构、钢-混组合结构桥梁的计算分析理论、耐久性研究, E-mail: xiaolin@swjtu.edu.cn.

(其中中文 27 篇、英文 26 篇),对研究内容、研究方法进行归纳,并从研究成果中梳理出本领域的热点问题与发展趋势。

1 桥梁环境作用研究进展与展望

1.1 环境温度场

环境温度作用是桥梁结构承受的最普遍、最主要的温度作用,准确获得桥梁环境温度场,是进一步研究温度荷载以及温致效应的基础。长期以来获得桥梁环境温度场的主要手段是现场测试以及基于热传导理论的数值仿真分析。

现有桥梁温度场现场测试多集中于桥梁断面上的温度分布、时变特征,桥址处气象参数变化规律以及其与温度场之间的关系。由热传导理论可知,影响结构温度变化的主要气象参数是太阳辐射、气温以及风速。这些气象参数的获得,为桥梁温度场数值仿真分析提供了较为符合实际情况的热力学边界条件。

Lei 等^[1]在一座五跨连续混凝土箱梁温度场实测中,对比发现了实测辐射强度与理论辐射强度之间存在较大差异,同时基于辐射强度与实测温度值之间的关系,拟合了箱梁横向最大温差与辐射强度之间的关系式。薛仪^[2]分析了现有桥梁温度场计算中晴空辐射模型的不足,提出了基于气象卫星数据和地面气象站数据预测地面太阳总辐射和散射辐射的方法;基于长期实测的大数据统计分析,建立了总辐射与散射辐射的预测模型,并采用场地监测数据对模型进行了评估和验证。黄全成等^[3]进行了磁浮箱梁日照温度场数值仿真分析,发现受日照辐射、风速、大气温度等差异的影响,箱梁竖向、横向最不利温差存在地域性差别但分布趋势一致;箱梁竖向、横向温差梯度非单方向减小,与规范存在差异;箱梁温度梯度受风速影响较大,随风速增大箱梁温度梯度有减小的趋势。

除热力学边界条件外,桥梁结构温度场数值仿真分析还需要考虑桥梁方位、表面涂装、地形及遮蔽效应等复杂因素的影响,大大增加了分析难度。Sheng 等^[4]针对小曲线半径混凝土箱梁桥的时变温度场进行了分析,基于光线追踪算法考虑了梁段走向、遮蔽效应的影响。

由于各种原因,以往对混凝土桥梁温度场研究较多。近年来随着钢桥、钢-混组合桥梁在中国应用推广,其温度场相关研究也日益增多。Zhang 等^[5]在青海高寒高海拔地区开展了 15 个月的钢-混组合梁模型环境温度场测试(如图 2 所示),提出了综合考虑辐射量、遮蔽效应的二维温度场计算模型,并对比验证了计算模型的有效性。Shi 等^[6]在西藏开展了一段 75 m 长钢管混凝土拱节段环境温度场的现场实测(如图 3 所示),发现钢管-混凝土内温差符合对数正态分布,50 年重现期的正温差模式中 $T_1=16\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_2=10\text{ }^\circ\text{C}$,负温差模式中 $T_1=T_2=-8\text{ }^\circ\text{C}$,与中国规范存在显著差异。杨阳等^[7]在人工气候模拟试验箱和室外环境下,对直径 630 mm 圆钢管混凝土试件和素混凝土对照试件进行了截面温度场测试。发现钢管混凝土试件和素混凝土对照试件截面温度分布与变化规律基本一致,变化幅度明显滞后且小于气温,日照作用下截面温度场呈非均匀分布;钢管混凝土试件和素

混凝土试件截面最大温差主要取决于太阳辐射和气温变化幅度。

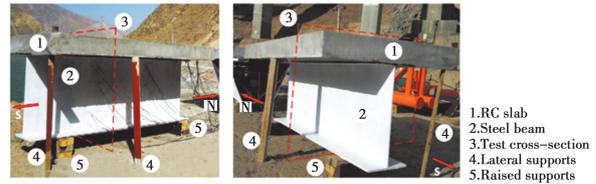


图 2 钢-混组合梁温度场现场测试



图 3 拱节段环境温度场现场测试

近年对钢-混组合桥梁温度场的研究越来越多。其主要原因是组合桥梁中钢、混凝土的材料特性、导热系数存在较大差异,温度场会在桥梁中产生较大的次应力、自应力,并对钢-混界面协同受力性能产生较大影响,而现行规范对钢-混组合桥梁温度场的规定还需要进一步完善。此外,随着交通网络的延伸,桥梁结构所面临的环境日益恶劣。比如,中国正在建设的川藏铁路平均海拔 4 000 m,面临强紫外线、大温差、强风等环境作用,桥梁结构温度场时空变异性强、温度作用剧烈,而目前对恶劣环境下桥梁温度场的作用机理研究并不充分。Lawson 等^[8]针对美国西南沙漠地区强太阳辐射、极端日温差气候条件下桥梁温度梯度可能超出规范的情况,根据气象站长期测试数据,基于热传导分析计算了混凝土箱梁以及组合梁的温度梯度,计算得到的桥梁上表面与内部温差较规范取值大 $10\text{ }^\circ\text{C}$;对于混凝土桥梁,使用五阶多项式较目前的多线性温差模式更具有代表性;对于钢-混组合桥梁上部结构,钢梁中的温度显著高于规范设计值(如图 4 所示)。

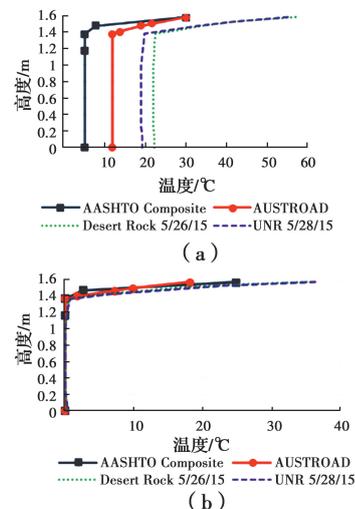


图 4 计算温度梯度与规范比较

为克服基于传热学理论研究桥梁温度场研究中影响因

素多、边界条件复杂等问题,部分研究者基于概率统计理论开展温度场的研究。Tao 等^[9]基于苏通长江大桥钢箱梁的温度场监测数据,将温度变化视为峰度、偏度都相当大的非高斯过程,此将温度场模拟转化为多元非高斯随机过程的模拟,基于 Hermite 变换的谱表示法对苏通长江大桥钢箱梁的温度场进行了为期两年的模拟,模拟结果与实测的温度特性特别是时间历程、PSD、PDF 以及相干函数具有良好的一致性。

从近年来桥梁环境温度场研究的对象上看,钢-混组合桥梁温度场相关研究的比重越来越大,一方面是既有相关研究、规范条款并不完备,另一方面是因为钢-混组合桥梁的温致效应比单一材料桥梁更为突出。近年来,桥梁温度场的研究手段主要采用现场实测和基于传热学的数值仿真分析。对典型结构、典型环境特征桥梁环境温度场的长期测试,以及考虑精确热力学边界条件的环境温度场模拟是现阶段研究的热点。由于影响桥梁温度场的内、外部影响因素较多,且大部分外部影响因素的时空变异性、相关性较强,给数值仿真分析带来了较大困难。基于随机过程模拟的桥梁温度场研究已经起步,为桥梁结构温度场的预测提供了新思路。

1.2 环境温度作用

桥梁结构温度场一般是时变、非均匀连续场,为便于计算温度场在桥梁上产生的结构效应,一般需要将温度场进行分解,以便通过数学模型描述其时间、空间上的分布特征。根据桥梁结构的受力特征,现有规范以及研究中一般基于温度场沿桥梁 3 个方向的分布特征,将其分解为沿桥梁轴向的均匀温度,沿桥梁断面的纵、横向温度梯度,其中的温度梯度模型以及温差是描述温度作用的关键参数。

越来越多的研究成果表明,现有规范中温度作用存在不足之处,比如部分桥梁的温度作用模式与规范存在差异、温差值超出规范限值。Hagedorn 等^[10]开展了 3 个不同构造的 AASHTO I 型混凝土梁在自然环境下的温度场测试,以确定该类梁的竖向与横向温度梯度,发现 AASHTO 设计标准预测梁的温度梯度形状和数值方面并不准确,且没有考虑横向温度梯度。Wang 等^[11]对大跨度预应力混凝土梁斜拉桥的结构温度和温度效应进行了监测,发现温度沿梁高呈 3 段式分布,其中顶面和底面的温度分别比腹板高 15.4 °C 和 10.3 °C,监测到的温度分布与中国现行设计规范中的温度分布存在较大差异。王力等^[12]通过 2 个波形钢腹板箱梁节段的现场实测,发现实测温度场与现行规范存在明显差异:在竖桥向,顶板梯度呈线性分布,腹板呈 3 次抛物线分布;在横桥向,顶、底板均呈 3 次抛物线分布。

部分学者基于实测结果提出了新的桥梁温度梯度模型。Gu 等^[13]根据苏通大桥实测数据提出了与规范不同、考虑桥梁纵向变化的简化温度梯度模型(如图 5 所示)。周浩等^[14]以望东长江公路大桥为背景,基于结构健康监测系统 1 年的温度监测数据,提出结合梁、桥塔竖向温度梯度以及斜拉索与桥塔、主梁温差的计算模式。Liu 等^[15-16]基于测试数据建立了预测任意倾角 CFST 构件最大温差的经验公式。刘永

健等^[17]系统总结了现有规范、研究中关于钢-混组合梁桥温度作用(均匀温度作用、竖向温度梯度)的成果与不足,提出钢-混组合梁桥温度问题研究的发展方向应集中在开展基于效应分类的组合梁温度作用模式研究。基于效应分类有利于结构计算分析,但作用取值是现阶段研究的难点。

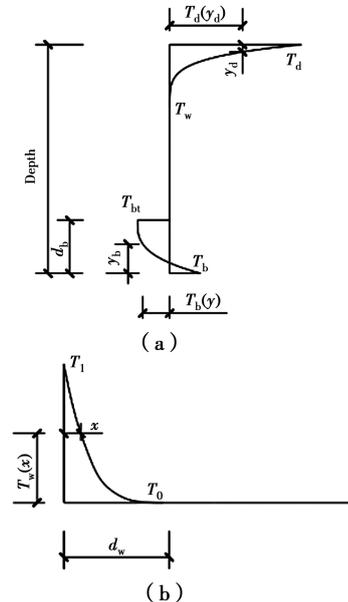


图 5 提出的大跨度混凝土箱梁温度荷载模式

既有规范中环境温度作用的规定多基于桥梁结构的历史温度测试数据,一般会根据测试结果将各地区划分为综合考虑气象、结构因素的温度带。由于测试样本的有限性,这种划分很难考虑局部气候以及复杂环境的影响。以中国桥梁设计规范为例,对于温度作用分级较为简化,对复杂环境中桥梁结构温度作用考虑不够充分,且缺乏与通用规范相对应的具有统计学意义上的桥梁温度作用。樊建生等^[18]讨论了不同规范中温度荷载计算方法的特点,认为中国现有规范对全国分区的分辨率不足、对日照辐射考虑不够完善;提出基于可靠度理论的钢-混组合梁桥设计温度荷载模型。该模型将二维瞬态温度场问题转化为一维瞬态温度场问题,提高了求解效率,并进一步利用极值模型获得桥梁设计的温度荷载代表值。

获得桥梁全生命周期温度作用代表值以及温度作用分区图,有助于更加合理、有效地进行桥梁设计,目前这方面的研究逐渐成为热点。孙增寿等^[19]基于一座沥青铺装的预应力混凝土在役曲线梁桥的 1 年期温度数据实时监测,采用了聚类分析、参数估计和假设检验等方法对曲线梁桥温差代表值进行分析计算。发现该桥竖向、横向日最大正温差服从两参数的 Weibull 分布,并得到了竖向、横向最大正温差的标准值、频遇值、准永久值。刘江等^[20]基于一座混凝土箱梁的温度场长期测试数据,提出了混凝土箱梁的竖向温度梯度模型,基于极值分布理论得到了温差代表值;基于数值模拟建立了以纬度、海拔和日温差为参数的混凝土箱梁顶-底板温差代表值的经验公式,基于中国 361 座城市的分析结果,提出了混凝土箱梁顶-底板温差分区图以及代表值。

从近年来桥梁温度作用研究情况可以看出,完善既有设计规范中的温度梯度模式是研究的热点问题。其对象包括混凝土梁、钢梁、钢-混组合梁及桥梁构件;需要考虑的地理参数包括纬度、海拔(这两者对太阳辐射和日温差都有影响),需要考虑的气象参数包括风速及其修正系数(主要影响热对流)等;研究的目的是得到更符合实际特点的、具有统计学意义的各类典型桥梁构件在其横向、竖向以及长度方向上温度梯度模式;而建立全国桥梁温差分区图对于促进中国中西部桥梁建设是必要且紧迫的。

2 桥梁环境温致效应进展与展望

桥梁的环境温致效应主要包括结构在温度场作用下受约束次应力、温度自应力以及相应的变形,影响结构安全性与适用性。由于温度场的周期性特征,长期温度作用也有可能与其他荷载联合作用,对桥梁适用性、安全性产生影响。

2.1 温致结构响应

由于混凝土材料强度较低,对应力变化更为敏感,对混凝土桥的温致应力研究长盛不衰。Hossain 等^[21]研究了美国路易斯安那州一座预应力混凝土 T 梁桥温度致损机理,根据温度测试结果计算了各主梁中支点约束弯矩以及一阶、二阶温度应力,发现温度梯度并不会造成主梁截面应力超限,但与其他长期效应组合可能使混凝土拉应力超限而开裂。杨敏等^[22]基于强日照地区实际日辐射参数和热学边界条件,建立了混凝土连续 T 梁桥热-固耦合数值分析模型研究其日照横向温度效应,发现横向温度基本只影响多主梁桥的外侧第一片梁,在日照 5 h 后其横向温度效应导致的梁底拉应力峰值可达到 2.5 MPa。由于变形与应力的相关性,不少学者对温致变形、应力开展同步研究。顾斌等^[23]建立了一座倒 Y 形混凝土桥塔的热-固耦合有限元模型,研究桥梁不同走向时塔顶的温致变形与应力,发现无论桥梁走向是东西还是南北,桥塔纵、横向温度应力均超过材料的抗拉强度设计值,与其他荷载组合时可能会使桥塔开裂。Niu 等^[24]探讨了一座深谷区混凝土桁梁组合拱桥的温致变形特征以及对桥梁局部损伤的影响。Taeb 等^[25]基于一座整体式梁桥的温致效应有限元分析与实测数据,提出了一种以实测应变模拟上部结构温致响应的简化分析方法。Honarvar 等^[26]基于蒙特卡洛模拟对预制预应力混凝土梁的温致效应进行建模分析,发现了考虑温度效应可大幅提高上拱度预测的准确性,夏季梁端最大压应力可能会超过规范限值。从以上研究可以看出,混凝土桥的温致应力较为可观。虽然按照规范设计可以考虑一部分温度效应,但既有案例以及分析都表明仍存在温度效应与其他荷载效应联合作用造成桥梁损伤的可能。

在大跨度桥梁温致变形方面,周浩等^[14]结合健康监测系统与有限元分析研究了望东长江大桥温度变形效应,发现温度效应对主梁挠度起决定作用。曹成杰^[27]研究了温度作用对一座铁路预应力混凝土连续刚构施工、运营阶段结构线形与应力的影响,发现日照对施工阶段主梁挠度影响较大。Zhou 等^[28]研究了温度导致的悬索桥跨中竖向位移与塔顶水

平位移,发现主缆温度在跨中竖向位移、桥塔水平位移中起主导作用,提出了温度等效长度以及统一的温致效应计算公式,并结合青马大桥进行验证。上述研究表明,桥梁温致变形不容忽视,处理不当可能影响桥梁使用,而对大跨度桥梁的温致变形尚需要进一步研究。

钢桥由于材料导热系数大、温度变化迅速,构件之间温差可能给桥梁施工带来较大困难。Wang 等^[29]根据钢箱梁截面的实测温度数据,通过有限元分析研究了整孔安装的连续钢箱梁露天存放、环缝焊接和设置支座预偏量等环节中温致应力与变形,归纳了考虑温度作用的支座预偏量处理方法。Zhu 等^[30]基于一座跨径 108 m 钢桁梁桥 2 年的监测数据,发现箱形截面具有更明显的竖向温度梯度和更大的温致应变响应,研究提出了温度分布与温致应变的简单公式并进行验证。以往研究也发现,对于长度、宽度均较大的钢箱梁,在日照辐射下各板件温度并非如通常假定的完全一致,而是存在较大温差,考虑到各板件是相互约束的高次超静定体系,实际上的温致应力较大且分布复杂,可能对结构安全造成较为严重的影响。

钢-混组合桥梁的温度作用与效应比较显著,近年来成为研究热点。王力等^[31]研究了波形钢腹板组合箱梁桥的温致效应,发现在竖、横向实测二维温度梯度模式下混凝土顶板上缘横向拉应力最大达 1.02 MPa。翼缘板上缘、顶板-腹板交界面和各箱室中轴线处出现的最大横向拉应力分别为 2.42、1.83、1.26 MPa。Algoji 等^[32]测试了环境温度场作用下两座钢-混组合梁中性轴的波动规律,并回归了中性轴与桥梁腹板温度测试之间的关系,发现高温时段钢-混组合梁的组合效应弱于低温时段。

针对钢-混组合结构温致效应较为突出的特点,有学者研究了 UHPC-混凝土组合结构的温致响应。张清华等^[33]提出适应于高原环境下波形钢板-混凝土和预制 UHPC 板-混凝土组合桥塔结构体系,通过有限元分析对比研究发现了预制 UHPC 板-混凝土组合桥塔能够显著降低混凝土应力集中程度及表面应力幅。Sawicki 等^[34]针对一座桥面板采用 UHPC 加固的后张法预应力混凝土箱梁开展为期 28 个月的温度、应力测试,研究发现桥面板中钢筋的温致应力幅与交通荷载应力幅相当,并给出了交通荷载与温致效应联合作用下的应力建议值。

温度作用可能改变桥梁结构的约束条件、影响桥梁材料特性,进而对桥梁动力特性与行为产生影响。Teng 等^[35]通过相关分析、数值仿真以及神经网络技术研究了温度效应对桥梁自振频率的影响机理。研究表明,主梁模态自振频率与温度导致的弹性模量、边界条件变化相关,主拱模态自振频率只与弹性模量相关(如图 6 所示)。

近年来桥梁结构温致响应受到广泛关注,研究对象、研究内容较多。研究对象包括梁桥(混凝土、钢及钢-混组合)、拱桥、悬索桥、斜拉桥以及一些特殊桥梁结构,研究内容包括温度作用导致的结构应力、变形、损伤发展、性能演化及动力性能,研究手段以现场测试、数值仿真分析为主,部分研究者

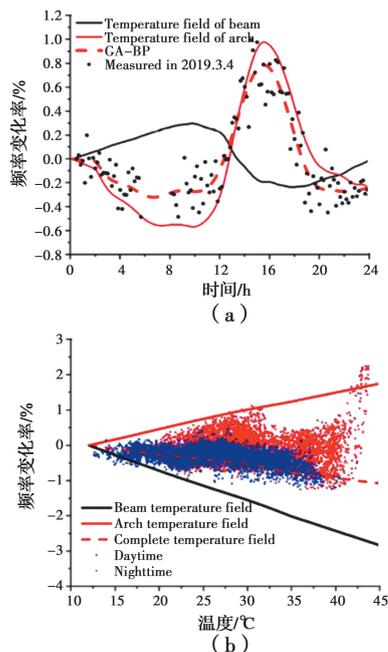


图 6 拱梁温度场及其与自振频率间的关系

开展了模型试验研究。研究成果进一步证实了温度作用给桥梁结构带来损伤的可能性,也指出了未来研究需要关注温度作用与其他荷载作用组合的影响、时变温度作用导致的结构性能演化以及极端温度作用对结构安全的影响。一方面,基于温致应力、变形研究,可以加深对桥梁温致损伤机理、性能演化规律以及失效模式的认识,从而在结构设计阶段可以加以规避,或在桥梁养护、维修时采用针对性措施;另一方面,温度效应可能导致桥梁的挠度增大、刚度降低,从而影响桥梁服役性能,尤其是对一些刚度要求较高的铁路桥梁,温度作用对列车行车安全的影响更值得关注。

2.2 桥梁健康监测中的温致效应问题

随着对交通基础设施尤其是大型桥梁等“咽喉”工程长期服役要求的提高,越来越多的桥梁中布设了健康监测系统。

健康监测系统可以为桥梁环境温度作用、效应研究提供丰富的测试数据。Hu 等^[36]基于矮寨大桥健康监测数据,研究了温度、车辆和环境激励共同作用下大跨度悬索桥伸缩缝纵向变形特性,发现温度变化导致伸缩缝的纵向位移波动大但频率低,高频位移成分主要由车辆荷载与环境激励导致。上述研究进一步表明,温度作用引起的结构状态改变不容忽视。

同时,环境温度作用增加了健康监测系统中结构响应数据分析与状态评估复杂性。越来越多的学者关注在桥梁健康监测数据中分离温度作用的方法以提高健康状态评估的有效性、可靠性。黄侨等^[37]采用小波分析方法研究了南京长江三桥长期挠度监测信号的时间多尺度特性,将挠度信号在日周期和年周期上进行重构,实现温度效应的分离,以长期监测数据为基础,研究了太阳辐射作用下日温度效应特点;在此基础上考虑季节、大气温度以及太阳辐射的影响,提出了预测误差低于 2 cm 的温致桥梁挠度计算模型。吴海军

等^[38]以江津长江大桥为工程背景,分析健康监测数据发现箱梁内部温度变化与跨中挠度变化存在显著的线性关系,以温度监测值为自变量、挠度监测值作为响应变量建立线性回归模型,拟合回归直线方程以达到分离温度效应的目的,并将实测挠度值中扣除拟合温度效应值所得残差作为桥梁日常运营的监测指标。谭冬梅等^[39]利用传统的集合经验模态分解法将单通道的桥梁挠度信号分解为一系列线性平稳的本征模函数(IMF),采用基于能量熵增量的判别法识别并剔除虚假的 IMF 分量,将能量熵增量较大的 IMF 分量组成盲源分离模型的输入信号,采用矩阵联合近似对角化算法对输入信号进行盲源分离,并通过有限元分析数据与监测数据分离后的相关性对比,验证了该算法的适用性。

也有学者根据受力特点直接将温度作为桥涵健康状态指标。Obrien 等^[40]以斯洛文尼亚一座涵洞为研究对象进行了为期 2 年的应变与温度场测试,定义适用于计算桥梁应变的损伤指标并采用温度测试数据进行验证,最后提出将桥梁健康监测系统获得的温度信息与定义的损伤指标联合使用的方法。

3 桥梁火灾作用与效应

火灾是威胁桥梁安全的突发灾害,其产生的高温作用使混凝土保护层碳化、爆裂甚至钢筋失效导致承载力大幅度降低,更有可能使钢结构桥梁在短时间内屈曲、失稳甚至垮塌。经调查,桥梁火灾多由油罐车、重载货车及其他燃油车辆事故造成,最为典型的是油罐车事故导致的油池火灾。油池火灾热释放速率高、蔓延快、扑救困难。近几年发生了多起油罐车爆燃致使桥梁倒塌或严重损毁事故,因此,桥梁的火灾高温问题受到越来越多的关注。

3.1 火灾作用

火灾温度场研究一般针对特定火灾场景,通过分析获得燃烧过程中结构外部的升温曲线以及结构内部的温度场。其中关键因素是确定火灾升温曲线,最常用的火灾升温曲线是 ISO 834 标准升温曲线。屈凯^[41]、杜咏等^[42]选取 ISO 834 标准火灾升温曲线分别研究了钢筋混凝土板以及预应力钢结构锚固系统的火灾温度场。孟邠恒等^[43]在燃烧炉中按照 ISO 834 标准升温曲线对钢-混组合梁和冷弯薄壁钢-陶粒混凝土组合板开展火灾试验,获得了组合梁的钢腹板截面、混凝土翼缘板、混凝土板内钢筋的温度-时间变化曲线。

由于标准升温曲线均在封闭燃烧空间获得,与桥梁半开放空间液体油池燃烧升温过程并不相同,难以反映桥梁火灾的温度时程,以及桥梁复杂的几何边界对温度分布的影响。刘晓光等^[44]根据铁路桥梁火灾案例调研结果,将铁路桥梁火灾场景设定为桥面列车火灾、开敞式桥下火灾、半开敞式桥下火灾,确定了 3 种火灾场景的参数取值和火焰尺寸;采用 FDS 火灾场模拟软件分析了温度场和升温曲线,研究发现在桥面列车火灾场景下,铁路桥梁温度场的升温曲线与 RABT 升温曲线类似。

开展燃烧试验成本与危险性较高,现有主流软件 SES、Fluent、CFX 和 FDS 等均可预测设定火灾场景下火灾烟气运

行、温度变化规律,被广泛应用于火灾研究领域。尹云飞等^[45]提出了基于趋势特征向量的火灾烟气流动与温度分布 CFAST 预测模型并将深度神经网络 RNN、LSTM 等用于对火灾发生时的烟气时间序列数据、温度时间序列数据的训练和预测,探讨了趋势特征、深度神经网络参数对时间序列数据预测准确性的影响。

3.2 火灾作用下的桥梁响应

火灾高温作用下的桥梁响应主要分为 2 个方面:1)在火灾作用下的桥梁耐火性能,主要考察火灾作用下桥梁结构、构件的失效时间(耐火时间);2)火灾过程中或过火后桥梁结构、构件的行为与性能退化。研究方法主要是火灾试验与数值模拟。火灾试验一般在燃烧炉中进行,受试验空间限制一般采用缩尺模型,且无法模拟敞开空间中桥梁与外部的热交换,试验难度大、精度不理想,多用于桥梁构件的火灾响应研究。朱美春等^[46]对大跨径桥梁结构中的预应力拉索锚头进行了火灾高温试验,研究了锚固系统的温度分布和滑移规律,获取了拉索预应力水平与耐火性能之间的关系。郭震^[47]设计了受拉应力影响的混凝土梁试件和试验方法,对比分析了长期服役混凝土梁和新浇筑混凝土梁在应力-火灾耦合作用下的破坏行为。

采用数值模拟可避免试验条件限制。Bilotta 等^[48]通过有限元参数分析研究了 GFRP 混凝土板在 ISO 834 升温曲线下的性能;Al-Thairy^[49]考虑高温作用下混凝土、钢筋和 FRP 的力学劣化,研究了混凝土梁的抗弯承载力以及混凝土保护层、配筋率等参数对钢纤维混凝土梁在高温下的响应、破坏机理的影响。郭梓栋等^[50]采用通过强度折减模拟材料温致性能退化,研究了不同火灾工况下混凝土 T 梁的抗弯承载力随受火时间的变化规律。康俊涛等^[51]以主跨 240 m 的某下承式钢桁架拱桥为研究对象进行受火分析计算,通过数值模拟研究了汽车火灾对大跨度钢桁架拱桥结构受力性能的影响。Kucukler 等^[52]通过有限元分析,考虑到钢材等级、截面几何形状、长细比和不同升温曲线的影响,研究了不锈钢工字形截面柱在高温下的弯曲屈曲性能,评估了欧洲标准 EN 1993-1-2 中关于型钢柱火灾设计规则的安全性和准确性。从上文可以看出,现有桥梁火灾响应数值模拟主要是基于初始环境温度条件和传热学原理开展热传导分析获得结构温度场,后续通过热-固耦合分析,并基于简化的温度-力学性能模型获得结构在火灾作用下的响应。由于火灾作用下结构响应的超高次非线性特性,现有研究中采取了较多的简化处理,如简化的升温曲线、材料性能退化模型,忽略火场气流环境的影响^[53];同时数值分析结果对单元网格、边界条件、迭代步长等敏感度较高,因此需要更深入的研究才能实现更为精确的桥梁火灾数值模拟。

4 结论与展望

近年来,桥梁温度作用与效应的研究越来越受到关注,研究对象、内容与研究手段更加多元化。

1)桥梁环境温度场方面:针对各类桥梁(混凝土桥、钢桥、钢-混组合桥等)环境温度场的研究更加丰富,考虑的环

境、气候、结构因素越来越充分,但对典型结构、典型环境特征桥梁环境温度场的研究尚需深入,如典型气候带(包括西北干寒地区、西南高海拔强辐射大温差地区等)典型梁、拱、柱、索构件的温度场长期测试,以厘清桥梁构件热力学边界条件以及温度场响应机理研究。

2)桥梁环境温度作用方面:越来越多的研究表明,现有规范难以覆盖桥梁(常规桥梁、大型桥梁、钢-混组合桥梁等)的实际温度作用,亟需开展考虑地域特性的桥梁全生命周期温度作用研究,如进一步研究桥梁温度场的地域特征,不同环境中桥梁构件的温度作用,并基于可靠度理论提出全生命周期环境温度作用模式,以完善相关设计规范。

3)桥梁环境温致效应方面:采用现场实测、数值分析方法对梁桥(混凝土、钢及钢-混组合)、拱桥、悬索桥、斜拉桥以及一些特殊桥梁结构、构件在温度作用下的应力、变形、损伤发展以及长期性能研究均有涉及;需要进一步关注温度作用与其他荷载作用组合的影响、时变温度作用导致的结构性能演化以及极端温度作用对结构安全的影响;同时合理、有效利用桥梁健康监测数据,完善桥梁温度作用、效应研究。

4)桥梁火灾作用与效应方面:通过火灾试验、数值仿真、机器学习等技术,对火灾温度场及火灾高温作用下桥梁构件行为、性能退化机理均开展了研究,其中数值仿真分析占主导地位。亟需开展更有针对性的桥梁结构火灾温度场测试,研发更精确、高效的桥梁火灾数值模拟技术,探明高温作用下桥梁结构力学性能演化机理。

参考文献:

- [1] LEI X, FAN X T, JIANG H W, et al. Temperature field boundary conditions and lateral temperature gradient effect on a PC box-girder bridge based on real-time solar radiation and spatial temperature monitoring [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20 (18): 5261.
- [2] 薛仪. 基于气象共享数据的混凝土箱型桥梁温度场分析方法[D]. 广州:华南理工大学, 2020.
- [3] 黄全成, 滕念管. 高速磁浮大型箱梁日照温度效应分析[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(9): 75-81.
- [4] SHENG X W, YANG Y, ZHENG W Q, et al. Study on the time-varying temperature field of small radius curved concrete box girder bridges [J]. *AIP Advances*, 2020, 10(10): 105013.
- [5] ZHANG C Y, LIU Y J, LIU J, et al. Validation of long-term temperature simulations in a steel-concrete composite girder [J]. *Structures*, 2020, 27: 1962-1976.
- [6] SHI T, DENG N C, CHEN Z, et al. Vertical gradient temperature difference of the main arch with single pipe section in Tibet based on statistical analysis [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 1-8.

- [7] 杨阳, 张戎令, 祁强, 等. 大直径圆钢管混凝土截面温度场分布的试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(17): 99-103.
- [8] LAWSON L, RYAN K L, BUCKLE I G. Bridge temperature profiles revisited: Thermal analyses based on recent meteorological data from Nevada [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(1): 04019124.
- [9] TAO T Y, WANG H, ZHU Q X, et al. Long-term temperature field of steel-box girder of a long-span bridge: Measurement and simulation [J]. Engineering Structures, 2021, 236: 111924.
- [10] HAGEDORN R, MARTÍ-VARGAS J R, DANG C N, et al. Temperature gradients in bridge concrete I-girders under heat wave [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(8): 04019077.
- [11] WANG J F, ZHANG J T, XU R Q, et al. Evaluation of thermal effects on cable forces of a long-span prestressed concrete cable-stayed bridge [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33(6): 04019072.
- [12] 王力, 牛思胜, 刘世忠, 等. 新型波形钢腹板组合箱梁桥温度效应研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 2021-2029.
- [13] GU B, ZHOU F Y, GAO W, et al. Temperature gradient and its effect on long-span prestressed concrete box girder bridge [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1-18.
- [14] 周浩, 易岳林, 叶仲韬, 等. 大跨度结合梁斜拉桥温度场及温度效应分析[J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 50-55.
- [15] LIU J, LIU Y J, ZHANG C Y, et al. Temperature action and effect of concrete-filled steel tubular bridges: A review [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2020, 7(2): 174-191.
- [16] LIU J, LIU Y J, ZHANG G J, et al. Prediction formula for temperature gradient of concrete-filled steel tubular member with an arbitrary inclination [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(10): 04020076.
- [17] 刘永健, 刘江. 钢-混凝土组合梁桥温度作用与效应综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 42-59.
- [18] 樊健生, 刘诚, 刘宇飞. 钢-混凝土组合梁桥温度场与温度效应研究综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 1-13.
- [19] 孙增寿, 夏云飞, 韩培琰. 基于实测数据的混凝土曲线梁桥温差代表值研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(7): 1751-1759.
- [20] 刘江, 刘永健, 白永新, 等. 混凝土箱梁温度梯度模式的地域差异性分区研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(3): 73-84.
- [21] HOSSAIN T, SEGURA S, OKEIL A M. Structural effects of temperature gradient on a continuous prestressed concrete girder bridge: Analysis and field measurements [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(11): 1539-1550.
- [22] 杨敏, 青宇, 王文飞, 等. 强日照地区混凝土多主梁 T 梁桥横向梯度温度效应分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2020, 45(3): 102-110.
- [23] 顾斌, 谢甫哲, 钱海, 等. 长江下游地区倒 Y 形混凝土桥塔的三维日照温场及其效应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(1): 248-260.
- [24] NIU Y W, WANG YONGE, TANG Y Y. Analysis of temperature-induced deformation and stress distribution of long-span concrete truss combination arch bridge based on bridge health monitoring data and finite element simulation [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2020, 16(10): 155014772094520.
- [25] TAEB A, OOI P S K. Comparison of field behavior with results from numerical analysis of a geosynthetic reinforced soil integrated bridge system subjected to thermal effects [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(1): 294-306.
- [26] HONARVAR E, SRITHARAN S, ROUSE J M, et al. Probabilistic approach to integrating thermal effects in camber and stress analyses of concrete beams [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(4): 04020010.
- [27] 曹成杰. 城际铁路连续梁桥施工控制及温度场效应研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- [28] ZHOU Y, XIA Y, CHEN B, et al. Analytical solution to temperature-induced deformation of suspension bridges [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 139: 106568.
- [29] WANG J F, ZHANG J T, YANG Z X, et al. Control measures for thermal effects during placement of span-scale girder segments on continuous steel box girder bridges [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2020, 21(4): 255-267.
- [30] ZHU Q X, WANG H, MAO J X, et al. Investigation of temperature effects on steel-truss bridge based on long-term monitoring data: Case study [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(9): 05020007.
- [31] 王力, 刘世忠, 丁万鹏, 等. 干寒地区新型波形钢腹板组合箱梁温度效应分析[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 60-66.
- [32] ALGOHI B, SVECOVA D, MUFTI A, et al. Long-term study on the effect of temperature on composite

- action and variation of neutral axis in slab on girder bridges [J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19(5): 1577-1589.
- [33] 张清华, 马燕, 王宝州. 高原环境新型组合桥塔温度场与温度应力特性分析[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(5): 30-36.
- [34] SAWICKI B, BRÜHWILER E. Long-term strain measurements of traffic and temperature effects on an RC bridge deck slab strengthened with an R-UHPFRC layer [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2020, 10(2): 333-344.
- [35] TENG J, TANG D H, HU W H, et al. Mechanism of the effect of temperature on frequency based on long-term monitoring of an arch bridge [J]. *Structural Health Monitoring*, 2020: 147592172093137.
- [36] HU J H, WANG L H, SONG X P, et al. Field monitoring and response characteristics of longitudinal movements of expansion joints in long-span suspension bridges [J]. *Measurement*, 2020, 162: 107933.
- [37] 黄侨, 赵丹阳, 任远, 等. 温度作用下斜拉桥挠度的时间多尺度分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(3): 18-25, 32.
- [38] 吴海军, 何立, 韦跃. 预应力混凝土梁桥挠度监测的温度效应分离方法[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(8): 66-71, 83.
- [39] 谭冬梅, 刘晓飞, 姚欢, 等. 基于 EEMD-JADE 的桥梁挠度监测中温度效应的分离[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(3): 90-99.
- [40] OBRIEN E J, HEITNER B, ŽNIDARIČ A, et al. Validation of bridge health monitoring system using temperature as a proxy for damage [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, 27(9): e2588.
- [41] 屈凯. 真实火灾下钢筋混凝土板温度场有限元分析[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(6): 1815-1821.
- [42] 杜咏, 王爽, 朱钰, 等. 预应力钢结构锚固节点瞬态温度场分析[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3): 671-677.
- [43] 孟郅恒, 王新堂, 刘链波. 冷弯薄壁钢-陶粒混凝土组合楼板火灾响应试验研究[J]. *空间结构*, 2021, 27(1): 52-59, 36.
- [44] 刘晓光, 鞠晓臣. 危险火灾场景下铁路钢桥温度场和极限承载力研究[J]. *铁道建筑*, 2020, 60(2): 5-8.
- [45] 尹云飞, 林跃江, 黄发良, 等. 基于趋势特征向量的火灾烟气流动与温度分布预测[J]. *计算机科学*, 2021, 48(7): 299-307.
- [46] 朱美春, 孟凡钦, 张海良, 等. 预应力拉索锚头抗火性能试验[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(1): 111-119.
- [47] 郭震, 王萌, 宋隽, 等. 火灾作用下长期服役与新浇筑混凝土梁爆裂性能比较[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(8): 1102-1112.
- [48] BILOTTA A, COMPAGNONE A, ESPOSITO L, et al. Structural behaviour of FRP reinforced concrete slabs in fire [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111058.
- [49] AL-THAIRY H. A simplified method for steady state and transient state thermal analysis of hybrid steel and FRP RC beams at fire [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2020, 13: e00465.
- [50] 郭梓栋, 李红. 基于 HC 温升曲线的 T 梁抗弯承载能力分析[J]. *交通科技*, 2020(2): 10-14.
- [51] 康俊涛, 王伟. 火灾下大跨度钢桁架拱桥结构性能分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(9): 77-84.
- [52] KUCUKLER M, XING Z, GARDNER L. Behaviour and design of stainless steel I-section columns in fire [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 165: 105890.
- [53] 张岗, 贺拴海, 宋超杰, 等. 钢结构桥梁抗火研究综述[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(1): 1-11.

(编辑 袁虹)