

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.208



# 钢结构桥梁疲劳 2020 年度研究进展

张清华, 劳武略, 崔闯, 卜一之, 夏嵩

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:** 钢结构桥梁具有轻质高强、跨越能力大、易工厂化制造和便于装配化施工等突出优点, 是桥梁工程的重要发展方向。但工程实践表明, 疲劳与断裂是导致结构服役性能降低甚至引发灾难性事故的关键因素, 严重制约了钢结构桥梁发展应用。学者们从不同的角度对于钢结构桥梁疲劳问题进行了深入系统的研究, 现聚焦于疲劳失效机理与抗力评估方法、抗疲劳设计与建造技术、环境因素及其疲劳抗力效应机制、疲劳裂纹识别与监测检测、疲劳开裂处置与性能强化等主要方面。对 2020 年度在相关领域所取得的最新研究进展进行总结, 梳理亟待解决的关键问题以及下阶段的研究重点。结果表明, 钢结构桥梁疲劳问题是学术界和工程界的研究热点, 在对疲劳性能分析评估理论方法、抗疲劳设计和长寿命结构、抗疲劳建造技术、疲劳损伤监测与疲劳微裂纹检测识别、剩余疲劳寿命预测与疲劳性能强化进行研究的基础上, 构建钢结构桥梁全寿命周期抗疲劳技术, 是未来的研究重点和重要发展方向。

**关键词:** 钢结构桥梁; 研究进展; 疲劳性能评估; 裂纹检测与监测; 加固

**中图分类号:** U446      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0079-12

## State-of-the-art review of fatigue of steel bridge in 2020

ZHANG Qinghua, LAO Wulue, CUI Chuang, BU Yizhi, XIA Song

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

**Abstract:** Steel bridge has outstanding advantages, such as high ratio of strength to weight, large span capacity, easy to factory manufacturing and assembly construction, where bridge engineering is going in the further. However, the engineering practice shows that fatigue and fracture are the decisive factors to reduce the service performance of steel structure and cause catastrophic accidents, which seriously restrict the development and application of steel bridges. The in-depth and systematic researches on this practical engineering problem from different perspectives have been conducted. To clarify the urgent problems and determine the research focuses and development directions in the next stage, the latest research progress in fatigue of steel bridge are summarized, including fatigue failure mechanism and fatigue resistance assessment method, anti-fatigue design and construction technology, environmental factors and their effect mechanism to fatigue resistance, fatigue crack identification, monitoring and detection, fatigue crack treatments and fatigue performance enhancement. The results demonstrate that the fatigue issue is a hot topic to researchers and engineers, the researches on fatigue critical problems in steel bridge has made adequate progress. Based on the studies including anti-fatigue design method, structures with high fatigue resistance, fatigue resistance assessment method, construction technology, fatigue damage monitoring and fatigue micro-crack identification, remaining fatigue life prediction and fatigue performance enhancement, it is the research emphasis and future directions to establish the fatigue resistance technology of steel bridges in life cycle.

**Keywords:** steel bridge; research progress; fatigue performance assessment; crack detection and monitoring; enhancement

**收稿日期:** 2021-08-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(51878561、51978579、51758533、51578455); 广东省重点领域研发计划(2019B111106002);

桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题重点项目(BHSKL18-01-KF); 四川省科技计划(2021YJ0037)

**作者简介:** 张清华(1975-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高性能钢与组合结构桥梁研究, E-mail: swjtuzqh@126.com。

2020 年是不平凡的一年,中国桥梁工程界克服新冠疫情的不利影响,在钢结构桥梁的设计、建造、运维等方面取得了重要的创新性成果。中国钢结构桥梁在 2020 年度保持迅猛发展态势:世界上首座跨度超千米的公铁两用斜拉桥——沪苏通大桥(钢桁梁)、世界上首座运行荷载量最大的高速公铁两用悬索桥——五峰山长江大桥(钢桁梁)、中国首座公路铁路两用跨海大桥——京台线平潭海峡公铁大桥(主桥采用钢桁梁)、南京江心洲长江大桥(三塔斜拉桥,主梁采用钢-UHPC 组合加劲梁体系)等大跨度桥梁相继正式投入运营;以常泰长江大桥、深中通道等为代表的一大批超级桥梁工程正在紧锣密鼓施工中,多座超大跨度桥梁进入勘察设计阶段。大跨度桥梁的涡激振动等引起了桥梁工程界对于在役桥梁运维运营状态监测和评估的高度重视;新型结构体系和构造细节设计、高性能新材料新结构、自动化建造技术和工艺、智能化检测检测技术等不断提出,并在实际工程中得到成功应用。总体而言,在交通强国、海洋强国、一带一路、川藏铁路等驱动下,对于钢结构桥梁实际性能的需求不断提高,疲劳问题仍是制约钢结构桥梁可持续发展的关键技术难题。

当前中国桥梁工程正处于从“建设为主”向“建养并重”的关键转型期,新建桥梁迅猛发展并向近海和艰险山区拓展,极端环境气候条件和事件下钢结构桥梁的安全与性能研究亟待开展。同时,在役钢结构桥梁的老化、病害和性能劣化问题日益突出。2020 年学者们围绕新建和在役钢结构桥梁疲劳失效机理与抗力评估方法、抗疲劳设计与建造技术、环境因素及其疲劳抗力效应机制、疲劳裂纹识别与监测检测、疲劳开裂处置与性能强化等相关关键问题进行了卓有成效的研究,取得了丰硕的研究成果。笔者对 2020 年度在钢结构桥梁疲劳领域的新理念、新理论、新方法和新技术等方面的最新研究进展和最新科研成果进行总结,梳理亟待解决的关键问题以及下阶段的研究重点和重要发展方向,为钢结构桥梁的技术发展提供参考。

## 1 疲劳损伤机理与疲劳性能评估方法

学者们结合模型试验、数值模拟及理论分析等多种方法,针对焊接初始缺陷、焊接残余应力、制造误差等对钢结构桥梁疲劳抗力的劣化机理等热点问题进行了卓有成效的研究。

### 1.1 疲劳损伤机理

钢结构桥梁在加工制造过程不可避免地存在制造安装误差、焊接残余应力和初始制造缺陷,上述因素对钢结构桥梁疲劳抗力的影响是本年度研究的热点问题之一。Yao 等<sup>[1]</sup>针对由制造误差所导致的横隔板不对称开孔进行了应力监测,结果表明,开孔制造误差将导致开孔半径偏小侧的应力集中区域由弧形切口处迁移至纵肋腹板与横隔板焊缝端部。Huang 等<sup>[2]</sup>的研究表明,纵肋对接焊缝处的装配误差将导致焊趾应力幅值显著增大,疲劳性能大幅度降低。何志刚等<sup>[3]</sup>模拟了顶板-纵肋焊缝的焊接过程,分析结果表明,该

焊缝存在较高的焊接残余应力,且残余应力梯度存在显著变化。Gadallah 等<sup>[4]</sup>利用轮廓法研究了顶板-纵肋构造细节的焊接残余应力分布的量测问题。Zhang 等<sup>[5]</sup>利用超声波无损检测的方法研究了钢桥面板中新型纵肋与顶板双面焊构造细节的焊接残余应力分布,就关键结构设计参数和焊接工艺参数与残余应力的相关关系进行了深入研究。结果表明,超声波无损检测方法适用于焊接残余应力测试,焊缝熔透率、焊接板件厚度、板件装配间距、焊接速度等参数是焊接残余应力的关键影响因素,典型结果如图 1 所示。

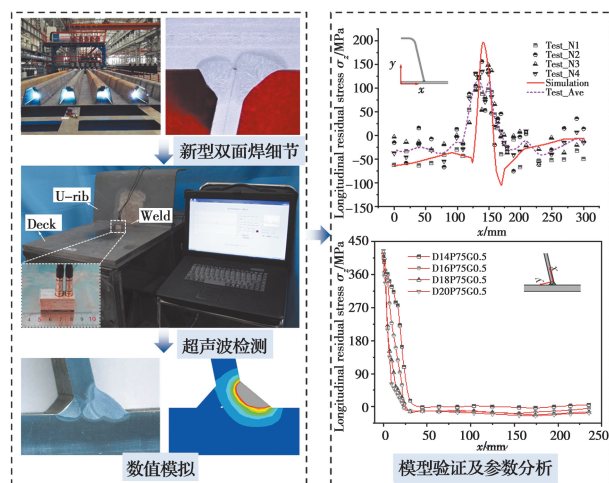


图 1 钢桥面板纵肋与顶板双面焊构造细节的焊接残余应力分布

初始焊接缺陷导致的疲劳抗力劣化效应是决定钢桥面板焊接细节疲劳抗力的关键要素<sup>[6]</sup>,对笔者团队已完成的 300 多个焊接节点疲劳试验结果进行的深化研究表明:初始缺陷所导致的疲劳抗力劣化是钢结构桥梁焊接节点过早发生疲劳开裂的根本原因之一。当前自动化、智能化制造技术迅猛发展,并在钢结构桥梁工程实践中得到了广泛应用。研究表明,全自动化焊接工艺下,钢桥焊接节点初始缺陷尺度的主要范围由肉眼可见的毫米或亚毫米级尺度,逐步减小至肉眼不可见的微米或超微米级的细微观尺度。理论分析、试验研究和工程实践均表明:减小初始缺陷尺度是显著提高钢桥疲劳性能的有效途径;细微尺度的初始缺陷与微观晶粒的尺度基本一致,其疲劳致损过程属于典型的跨尺度过程,如图 2 所示。此时材料均匀性、各向同性以及小范围屈服等假设不成立,传统宏观断裂理论不再适用,以传统宏观断裂力学为基础的方法难以揭示细微观初始缺陷对于焊接节点疲劳性能的劣化机理,无法为其疲劳抗力评估提供理论和方法支撑。阐明细微尺度初始缺陷所致的钢桥焊接节点疲劳抗力劣化机制、在此基础上量化其效应并提出相应的疲劳抗力评估方法,是当前亟需解决的关键科学问题。

### 1.2 疲劳性能评估方法

针对钢结构桥梁疲劳性能评估方法,学者们主要围绕多场、多因素耦合条件下的疲劳损伤过程、疲劳抗力评估新方法、疲劳强度分级标准和疲劳可靠度等方面开展研究。面向疲劳性能评估的多尺度方法是研究热点之一,Li 等<sup>[7]</sup>基于三

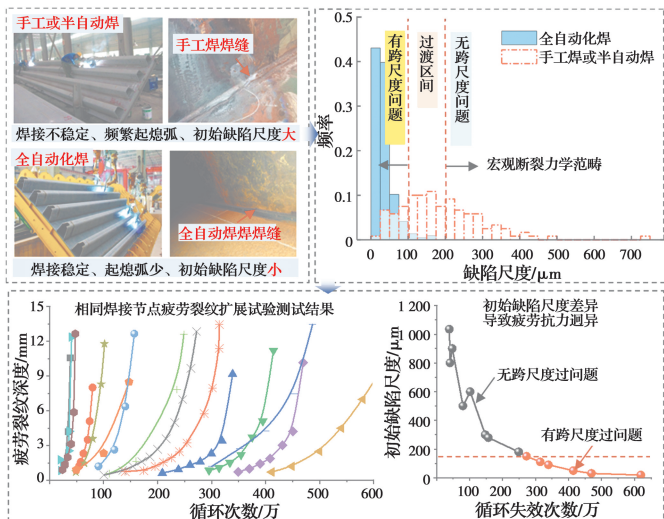


图 2 初始制造缺陷的疲劳抗力劣化及其尺度效应问题

维车辆模型、多尺度有限元模型和轮轨相互作用模型,提出了可考虑列车动力效应的钢桥关键构造细节疲劳性能评价方法;Ma 等<sup>[8]</sup>考虑桥梁基础冲刷对上部结构的影响,对正交异性钢桥面板焊接接头进行了疲劳损伤评估,并根据疲劳累积损伤理论研究了结构的可靠性评估问题;Mashayekhi 等<sup>[9]</sup>基于热点应力法与多尺度有限元模型,提出了钢桥复杂关键构件的疲劳损伤评估方法,在此基础上结合某实桥的荷载试验验证了多尺度模型的有效性。

基于应力幅与疲劳寿命相关关系的疲劳性能评估是当前广泛采用的方法。祝志文等<sup>[10]</sup>现场监测了钢桥面板不同弧形切口构造细节的轮载应力响应,并基于 AASHTO LRFD 规范条文评估了相关构造细节的疲劳寿命。吉伯海等<sup>[11]</sup>验证了 IIW 所建议的不同外推公式在热点应力分析中的适用性,并结合 IIW 提供的 S-N 曲线得到了较为可靠的疲劳性能评估结果。Yokozeki 等<sup>[12]</sup>分别对 U 肋、V 肋和板肋与横隔板交叉构造细节的疲劳抗力进行了对比研究,确定了不同加劲肋交叉细节的热点应力提取参考点。王春生等<sup>[13]</sup>对钢桥面板的典型疲劳试验成果进行了梳理分析,指出在进行钢桥面板疲劳性能评估及抗疲劳设计时,应在综合考虑细节构造、制造质量及服役条件的基础上,确定合理的疲劳强度等级。郭健等<sup>[14]</sup>基于马尔可夫链理论,结合 Miner 线性累积损伤准则对西堠门大桥钢桥面板顶板-纵肋关键部位的长期应变实测数据进行了统计分析,对相关关键细节的疲劳性能进行了评估和预测。Yang 等<sup>[15]</sup>基于结构应力法研究了钢桥面板关键焊接细节在多轴应力状态下的疲劳性能,并将评估结果与名义应力法、热点应力法、缺口应力法等国际规范和标准推荐的评价方法进行了对比分析,在此基础上进一步研究了载荷模式、特征参数对钢桥面板疲劳性能和破坏模式的影响问题。张清华等<sup>[16-19]</sup>基于等效结构应力法和应变能密度理论对纵肋与顶板焊接细节的疲劳抗力评估问题进行了深入研究。结果表明,等效结构应力法适用于纵肋与顶板焊接细节多个疲劳模式的疲劳抗力评估,便于工程应用,相对于传统方法具有突出优势,如图 3 所示。基于应变能密度

局部应力场所确定的疲劳破坏模式和裂纹萌生角与试验结果吻合较好。

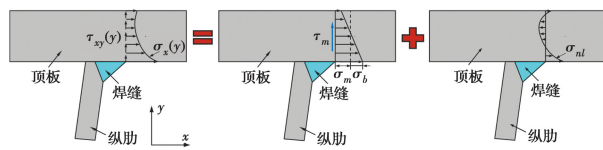


图 3 结构应力分解图示

另一方面,断裂力学主要用于解决含有裂纹缺陷结构的疲劳问题,基于断裂力学研究钢桥面板疲劳裂纹扩展规律是评估疲劳易损细节最为直接有效的手段。廖小伟等<sup>[20]</sup>对于典型的钢桥十字形角焊缝开展了高周常幅疲劳试验与疲劳裂纹扩展数值模拟,结果表明,将初始缺陷等代半椭圆裂纹能够得到较为准确的疲劳寿命评估结果。李游等<sup>[21]</sup>基于实桥实测数据,运用线弹性断裂力学对钢桥面板纵肋对接焊缝的疲劳可靠度评估问题进行了研究,探究了交通量及轴重增长对疲劳可靠度的影响规律。汪珍等<sup>[22]</sup>与 Van Den Berg 等<sup>[23]</sup>基于扩展有限元分别分析了纵肋与横隔板交叉构造细节和顶板与纵肋焊接细节不同开裂模式的裂纹扩展规律,结果表明,考虑焊接残余应力时裂纹扩展规律与实际情况更为吻合。Wang 等<sup>[24]</sup>在上述研究的基础上,就焊接残余应力、车辆荷载、结构几何形状等多因素共同作用对于裂纹扩展规律的影响问题进行了研究,结果表明:焊接残余拉应力会增大裂纹扩展速率;增加顶板厚度可达到显著降低裂纹扩展速率的效果。考虑到残余应力在板厚方向的分布梯度较大,Qiang 等<sup>[25]</sup>利用权函数法计算了顶板-纵肋焊缝表面半椭圆裂纹尖端的应力强度因子,结果表明,不同应力场下权函数法计算结果与有限元模拟结果具有较好的一致性。在此基础上,针对细微观初始缺陷的疲劳抗力劣化问题,Cui 等<sup>[26]</sup>提出了一种从细微观短裂纹扩展到宏观长裂纹,直至疲劳失效的跨尺度评估方法,为研究含细微观初始缺陷的钢结构桥梁焊接节点疲劳劣化机制问题提供了新途径,如图 4 所示。

## 2 长寿命结构与抗疲劳设计方法

钢桥作为国家交通干线的重要组成部分,大部分扼守公路和铁路运输的咽喉,保证其畅通和高质量服役至关重要。近年来中国经济持续高速发展,桥上交通荷载具有“重载、高速、大流量”的重要特征,经济发达地区的钢结构桥梁更是长期处于超饱和和交通流量状态,交通荷载流量和轴重远超欧美发达国家,对钢桥面板的抗疲劳性能提出了更高的要求。为提高钢结构桥梁疲劳抗力和疲劳寿命,学者们从优化细节构造参数匹配、改善局部结构受力形式、改进施工工艺、引入高性能混凝土结构层、使用高性能材料等多个角度对长寿命结构的研发与抗疲劳设计优化方法开展了系统研究。

在提高钢结构桥梁疲劳抗力方面,针对钢桥面板两类最易发生疲劳损伤的构造细节,学者们进行了大量研究。其中,针对钢桥面板顶板-纵肋连接构造细节,蒋斐等<sup>[27]</sup>对比分析了传统顶板-纵肋构造、新型铆边顶板-纵肋焊接构造及新

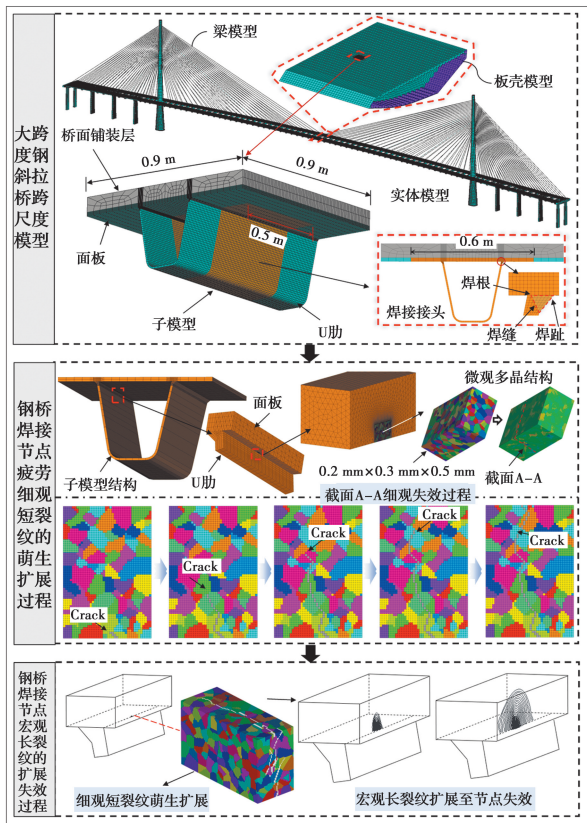


图 4 钢桥疲劳损伤跨尺度演化模型

型顶板-纵肋双面焊接构造的局部应力特征与等效应力幅。结果表明:新型嵌边顶板-纵肋焊接构造可有效提高顶板-纵肋焊接细节焊趾处的疲劳抗力;而新型双面焊构造可有效改善焊趾与焊根处的疲劳性能。Fang 等<sup>[28]</sup>讨论了适用于顶板-纵肋双面焊构造切口应力的有限元建模方法,分析了顶板厚度和焊缝尺寸对其疲劳抗力的影响问题,并对该构造细节进行了优化。蒲黔辉等<sup>[29]</sup>以大跨铁路桥梁钢桥面板为研究对象,设计含两个 U 肋和两个 V 肋的足尺节段模型并进行了疲劳试验研究。结果表明,铁路荷载作用下 V 肋顶板-纵肋构造处的抗疲劳性能优于 U 肋。对于纵肋与横隔板交叉构造细节而言,优化横隔板开孔形式、降低开孔处局部应力集中程度是提高其弧形开孔处疲劳抗力的有效途径。郭健博<sup>[30]</sup>、向泽等<sup>[31]</sup>分别针对多种常用的横隔板切口形式建立了精细化节段模型并进行了受力分析,结果表明,较大的切口半径有利于降低应力水平,且“双曲率圆弧+直线”的开口形式受力最优。王伟等<sup>[32]</sup>在纵肋与横肋连接处增加纵肋内隔板和支撑板,并开展了疲劳试验研究。结果表明,增加纵肋内隔板和支撑板后,纵肋焊趾与弧形开口处的疲劳抗力显著提升,但纵肋刚度增加会导致横隔板焊趾处应力显著提高,其疲劳抗力反而会降低。

张清华等<sup>[16-18]</sup>对纵肋与顶板、纵肋与横隔板两类连接构造的疲劳性能进行了系统的理论分析和试验研究,对比了多种长寿命构造细节和钢桥面板结构的疲劳性能,如图 5 所示。结果表明:纵肋与顶板新型双面焊构造细节的引入,使得纵肋与顶板构造细节的主导疲劳开裂模式由传统单面焊

细节的焊根开裂迁移到新型双面焊细节的顶板焊趾开裂,构造细节的疲劳累积损伤度大幅度降低,疲劳寿命显著提升。对于新型纵肋与横隔板交叉构造细节的疲劳问题进行的系统研究表明:相对于传统构造细节,在外部荷载相同的条件下,方案一至方案三的疲劳损伤降幅分别为 38.0%、40.9% 和 74.0%;3 类长寿命钢桥面板方案的疲劳性能均显著优于传统钢桥面板,其中方案三与双面焊构造细节组合所得的钢桥面板结构体系疲劳性能最优。

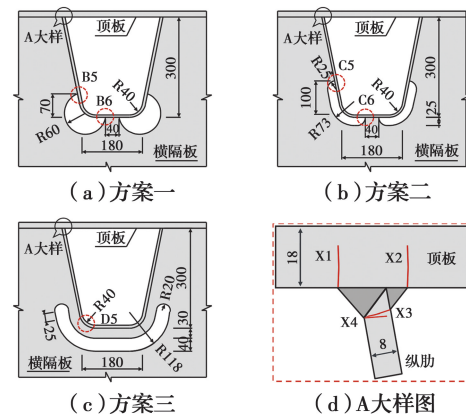


图 5 长寿命钢桥面板设计方案(单位:mm)

新型耐候钢和高性能钢在钢结构桥梁中的应用研究值得关注。郑凯锋等<sup>[33]</sup>完成了多组耐候钢和高性能钢疲劳试验,结果表明,耐候钢与高性能钢均具有较好的疲劳性能。王春生等<sup>[34]</sup>系统地归纳与剖析了耐候钢桥的研究新进展及工程应用情况,结果表明,现代耐候钢桥具有高性能和长寿命的技术特征,应加大研发投入,建立完善的耐腐蚀、抗疲劳准则,推动长寿命耐候钢结构桥梁的发展和应用。

引入高性能混凝土结构层能够显著提高钢桥面板局部刚度、减小面外变形、降低疲劳易损细节应力幅值,是显著改善钢桥面板疲劳性能的有效途径<sup>[35-36]</sup>。罗如登<sup>[37]</sup>提出了一种新型大纵肋正交异性-PBL 剪力键组合桥面板,大幅提高了桥面板局部刚度并显著增强了其疲劳性能。王石磊等<sup>[38]</sup>、周昌栋等<sup>[39]</sup>完成的试验研究表明:环氧沥青铺装与 ERS 铺装均对钢桥面板疲劳性能有增益效果,且长期服役过程中新换铺装对部分疲劳细节疲劳寿命有改善效果。贺欣怡等<sup>[40]</sup>对于环氧胶在钢-混组合板粘层中的适用性进行了研究,结果表明,采用环氧胶粘结可提高刚性铺装桥面板的局部刚度,并改善其疲劳性能。Ye 等<sup>[41]</sup>的试验研究表明:SFRC 结构铺装层开裂是钢-SFRC 铺装组合结构的主导疲劳破坏模式,SFRC 结构层厚度和抗弯强度是其疲劳性能的关键影响参数。Liu<sup>[36]</sup>等、卜一之等<sup>[42]</sup>通过模型试验和理论分析完成了正交异性钢-高性能混凝土组合桥面板结构参数优化设计、抗弯极限承载力、疲劳性能和疲劳失效机理等系列研究,提出了大纵肋正交异性钢-高性能混凝土组合桥面板结构。当前张清华等正针对新型组合桥面板的疲劳性能和结构设计问题进行深化研究,预期研究成果可为钢桥面板与铺装层结构合理匹配方案及一体化设计方法提供理论基础。

### 3 钢结构桥梁疲劳损伤检测与监测评估

钢结构桥梁疲劳损伤通常发生在局部隐蔽位置,在裂纹较小时检测困难,但一旦扩展为长大裂纹,结构安全风险和维护成本均显著增加。当前传统人工巡检和接触式检测仍是钢结构桥梁损伤的主要检测监测手段,检测效率低、成本高、隐蔽性裂纹易漏检且难以检测微小裂纹。为解决这一问题,亟需根据钢结构桥梁疲劳问题的属性及其检测监测的实际需求,集成无损检测的最新研究成果,建立钢结构桥梁疲劳损伤的实时监测评估系统,为钢结构桥梁的安全评估与运维决策提供科学依据。

#### 3.1 钢结构桥梁疲劳损伤检测

学者们对于超声波、声发射、红外热成像、图像识别等多种检测方法在钢结构桥梁的疲劳损伤检测中的应用进行了系列研究。利用超声波和声发射检测内部缺陷及裂纹等本质上是利用内部缺陷及裂纹等对波传导的遮挡、反射效应<sup>[43-44]</sup>。陈刚等<sup>[43]</sup>利用超声波相控阵检测识别方法实现了钢桥面板纵肋对接全熔透角焊缝内部缺陷的准确识别。孙孝婷等<sup>[45]</sup>针对顶板-纵肋焊缝处的纵向裂纹提出了一种超声波双探头穿透检测法,并采用预制裂纹试件对该检测方法进行了试验验证。李强等<sup>[46]</sup>在钢-UHPC 组合结构内部埋入压电陶瓷(PZT)并对其施加激励产生超声波,通过超声波信号实现了组合结构局部损伤的识别。王琛<sup>[47]</sup>就非线性超声波在焊缝检测中的关键问题进行了研究,结合傅里叶变换和 Hilbert-Huang 变换准确提取了声波信号中的焊缝疲劳损伤特征。段兰等<sup>[48]</sup>综合采用美国物理声学(PAC)声发射(AE)传感器和 PZT 传感器对钢桥面板裂纹的扩展过程进行了监测,结果表明该技术可实时捕获丰富的疲劳裂纹动态信息。导波技术作为超声检测家族的一种新技术,具有一次扫描即可检测扫描范围内所有缺陷的优点,同时能够实现缺陷定量与定位<sup>[49]</sup>。Wang 等<sup>[50]</sup>基于奇异值分解(SVD)的阵列信号处理方法提取了导波中的损伤分散信号,钢桥面板的实测分析表明,所提出的方法能够成功地从低信噪比、弱强度的实测信号中提取裂纹信息。但导波的多模态特征和钢桥面板结构的复杂性将导致导波信号较为杂乱,因此导波的激励与接收方式及信号处理方法的合理选用是实现缺陷准确识别的关键。

红外热成像检测技术是通过测点目标与背景温度之间的差异判定结构表面或近表面损伤的一种技术,该技术与超声检测方法相比具有测量速度快、测量结果直观、探测面积大等优点<sup>[51]</sup>。根据是否依赖于外部热源激励可将红外热成像无损检测技术分为被动式和主动式。Solovyov 等<sup>[52]</sup>研究了钢桥疲劳裂纹在自然环境条件下对于外界热传递的阻断效应,结果表明,被动式红外热成像技术可检测出钢结构的隐蔽型疲劳裂纹。

随着计算机视觉技术的发展进步,基于计算机视觉的表

观损伤识别方法成为当前钢结构桥梁损伤识别领域的研究热点<sup>[50,53]</sup>。Wang 等<sup>[54]</sup>开发了图像采集装置并分别利用 VGGNet-13 与 VGG-FCN 对图像进行裂纹目标子图块分类、裂纹像素语义定义,实现了实桥裂纹几何特征的提取;Vorobel 等<sup>[55]</sup>将钢结构锈蚀图像转换至 HSV 颜色空间并采取多种图像分割技术定位识别出了钢表面的锈蚀缺陷;Long 等<sup>[56]</sup>提出了基于深层卷积神经网络的裂纹尖端强度因子预测方法,其网络输入为附有散斑 CT 试件的平面灰度图像。Huynh 等<sup>[57]</sup>基于 Fast-RCNN 与透视变换等多种机器视觉技术提出了钢桥螺栓松动的识别方法。当前计算机视觉技术已经初具物体识别与跟踪、场景重建、图像恢复与测量等丰富的视觉信息处理功能,因此,除上述应用场景外,该技术还可用于位移测量、模态参数识别、车辆荷载识别等,具有广阔的工程应用前景<sup>[50]</sup>。

基于振动分析的局部或全局无损检测技术近年来受到了广泛关注。Tan 等<sup>[58]</sup>则将人工神经网络(ANN)作为结构损伤的智能定位与量化工具,通过振动加速度信息实现了结构损伤检测。齐宝欣等<sup>[59]</sup>在板件表面粘贴压电陶瓷片并对其振动激励,利用 SLDV 激光多普勒测振仪采集不同频率下所激发的振动数据,实现了损伤定位,但该方法环境局限性较大且成本较高,如何优化精简测试过程并将其应用于实桥场景将是下一阶段的研究内容。

作者团队结合智能检测技术的最新发展和钢结构桥梁疲劳问题的基本属性,初步探索了钢结构桥梁疲劳裂纹智能监测识别方法:1)对超声导波在钢结构疲劳裂纹检测中的应用进行了系统的数值模拟和试验研究,结果表明,超声导波在钢结构桥梁关键受力构件裂纹定位检测方面具有良好的适用性;2)研发了疲劳裂纹纳米涂层智能传感器,并对其进行了理论研究、数值模拟和试验研究,结果表明,该传感器对于微小裂纹具有较高的敏感度;3)对于基于计算机视觉的疲劳裂纹识别方法进行了研究,提取了实际裂纹图像中的形态特征,与实测值的对比结果表明计算机视觉技术在疲劳裂纹识别方面有较高的可靠性;4)将深度学习理论引入结构疲劳损伤状态的模式识别中,用于挖掘并识别时域信号和图像信号中的损伤信息,结果表明,以监测数据为基础、以损伤模式识别为目标的神经网络系统在实际工程中有广阔的应用前景。该团队当前在钢结构桥梁疲劳裂纹智能定位与识别方法方面的部分研究工作如图 6 所示。

#### 3.2 钢结构桥梁疲劳损伤监测与评估预后

当前结构健康监测和安全评估正向实时化、可视化、智能化方向发展。融合多项监测检测技术、构建完备的钢结构桥梁健康监测系统、实现对钢结构桥梁疲劳损伤的长期动态监测和智能评估,是保证桥梁结构服役安全的关键<sup>[60]</sup>。以原始的长期监测数据确定桥梁疲劳车荷载模型是疲劳性能评估的重要基础工作之一<sup>[61]</sup>。Ye 等<sup>[62]</sup>、赖毅等<sup>[63]</sup>分别利用 WIM 系统对在役桥梁进行了长期交通荷载监控,并对车重、轴数、轴距等车辆荷载参数进行了统计分析,确定了疲劳车辆荷载模型与等疲劳荷载谱。考虑到 WIM 系统成本较高,

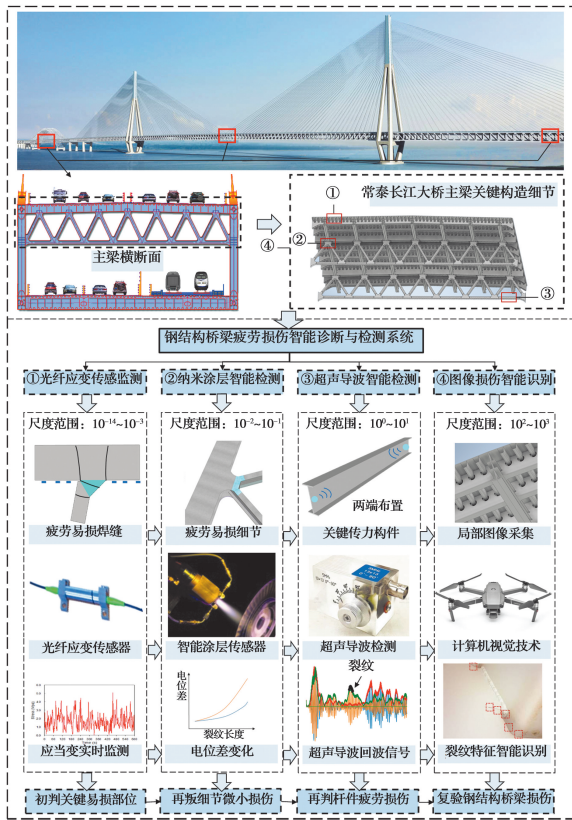


图 6 钢桥疲劳裂纹智能传感与识别系统

Zhou 等<sup>[64]</sup>综合利用加速度计和深度卷积网络技术构建了高精度车辆信息识别系统。

在既有钢结构桥梁疲劳损伤评估预后方面, Tochaei 等<sup>[65]</sup>采用光纤光栅传感器(FBG)建立了某大桥的结构健康监测监测系统,并对该桥三种典型疲劳易损细节的疲劳寿命及可靠度进行了评估预测。Di 等<sup>[66]</sup>对某中承式拱桥重车道局部轮载下的钢桥面板易损细节进行了为期两周的应变监测,并对其进行了疲劳寿命评估和预后,结果表明该桥不满足设计使用寿命要求。Cui 等<sup>[67]</sup>以某大跨度斜拉桥为研究对象,在已有 WIM 系统实测交通数据的基础上,结合季节自回归方法预测每小时的随机车流。在此基础上考虑桥面铺装的温度效应,基于等效结构应力法,构建了完整的疲劳损伤评估及预测系统,如图 7 所示。

桥梁结构的运维管理是多维因素耦合作用下的复杂决策问题,具有较高的难度和挑战性。Fabianowski 等<sup>[68]</sup>提出了基于人工神经网络的桥梁健康等级评估模型,尝试将其应用于某在役铁路桥梁并验证了该模型的准确性。由于近年来计算机视觉技术的飞速发展,将其纳入到桥梁运维管理系统中将能大大减少人力成本,且当基于计算机视觉的安全模式识别技术到达一定精度后,将有效避免因人为过失导致的决策失误问题,具有广阔的应用前景。

### 4 钢结构桥梁疲劳加固与维护

经过改革开放以来 40 多年的大规模基础设施建设,进

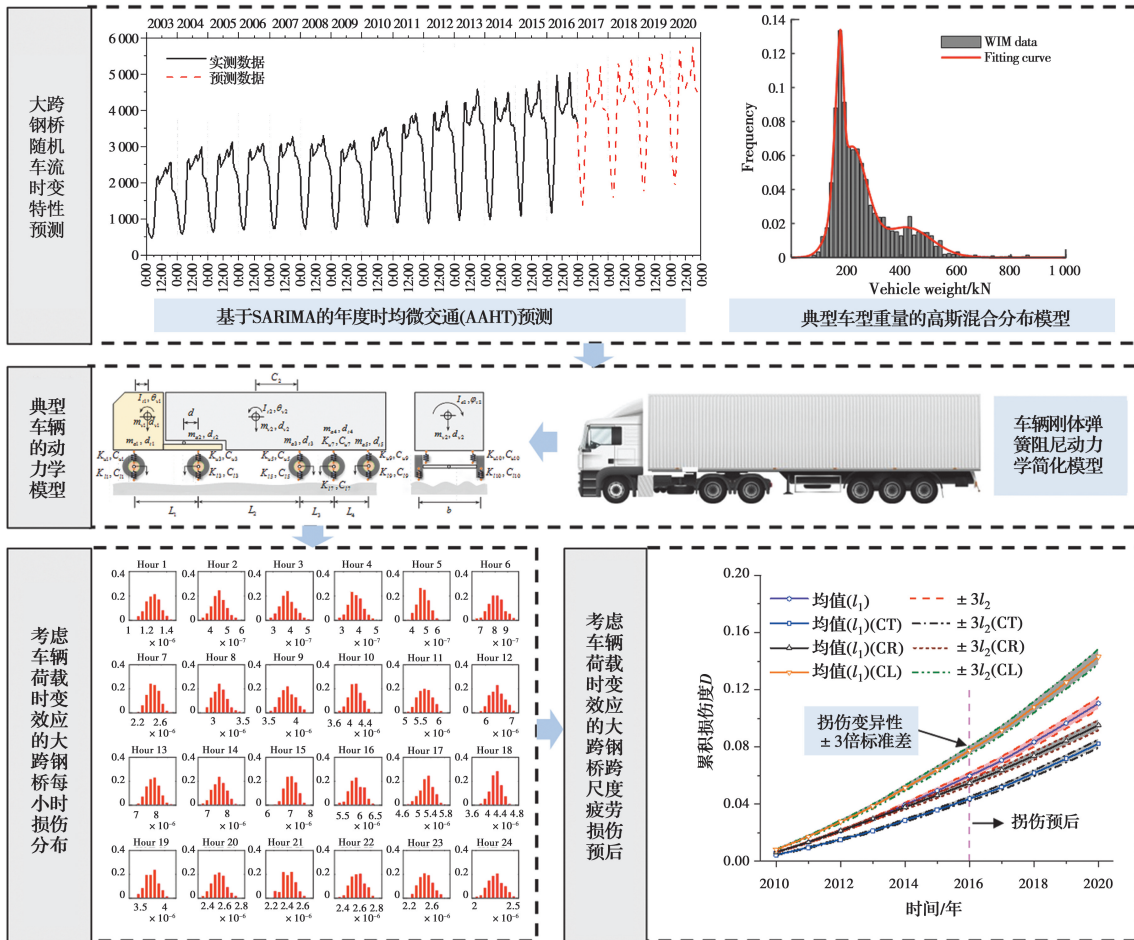


图 7 钢桥疲劳损伤演化特性及时变概率预测

入维修期的钢桥日益增多。发展对交通少干扰甚至零干扰的疲劳开裂快速加固方法,建立钢结构桥梁疲劳加固与维护成套体系,对提高钢结构桥梁服役质量并保障其运营安全具有重要意义。目前常用的钢结构桥梁疲劳开裂加固方法主要包括止裂孔法、TIG 重熔法和焊补法、裂缝冲击闭合技术(ICR)、纤维增强复合材料(CFRP)加固法、装配式加固等局部加固方法和引入高性能混凝土结构层等整体加固法。

刘嘉正等<sup>[69]</sup>采用 ICR 技术对实桥疲劳裂纹进行维修,相关测试分析表明气动冲击可有效改善裂纹尖端的受力条件。孙童等<sup>[70]</sup>对多种冲击因素组合下裂纹开口闭合形态以及闭合深度特征进行了研究,结果表明,采取 3 次冲击的方式可达到闭合裂纹的效果。Kinoshita 等<sup>[71]</sup>将喷丸技术应用与某既有钢桥焊接细节的加固中,结果表明,该技术可在焊趾处引入残余压应力并提高其疲劳强度。

粘接 CFRP 是一种亟待深入研究的裂纹处治技术。鉴于横隔板弧形切口处疲劳裂纹的扩展方向较为稳定,李传习等<sup>[72]</sup>对其外贴 CFRP 进行补强,试验结果表明,该方法可有效阻止含缺陷弧形切口处疲劳裂纹的进一步扩展。Chataigner 等<sup>[73]</sup>通过环氧沥青胶粘剂粘合 CFRP 板对某实桥对接焊缝进行了加固,车辆加载测试结果表明,CFRP 板有较好的传力效果,可显著降低焊缝处的应力幅值。Jie 等<sup>[74]</sup>在含有初始裂纹的十字焊接接头表面粘贴 CFRP,提高了其疲劳寿命。Mohabeddine 等<sup>[75]</sup>从多个 CFRP 加固裂纹的试验数据中归纳总结了可预测平面板件两侧胶接 CFRP 后中心裂纹扩展规律的解析模型。CFRP-钢界面处的胶结面承受较大的剪力,因此其界面特性对疲劳损伤的加固效果有显著影响。Mohajer 等<sup>[76]</sup>以含预制缺陷的钢板为研究对象分析了粘结滑移对加固效果的削减作用。Doroudi 等<sup>[77]</sup>对循环荷载作用下 CFRP-钢界面的粘结滑移关系进行了疲劳试验和理论分析,建立了描述界面粘结滑移关系的塑性损伤模型。Kasper 等<sup>[78]</sup>通过系列试验确定了增韧环氧胶粘剂在不同环境温度下的蠕变特性及增韧环氧胶粘剂接头的 S-N 曲线。Tong 等<sup>[79]</sup>设计了薄壁钢板对接焊 CFRP 加固的等幅拉伸疲劳试验,研究成果可为 CFRP 加固对接焊构造的疲劳设计提供依据。

引入高性能混凝土结构层加固钢桥面板,作为一种具有广阔应用前景的加固方法,已在多座实桥工程中得到了成功应用<sup>[80]</sup>。王洋等<sup>[81-82]</sup>针对武汉军山大桥的钢桥面板疲劳开裂加固问题,提出了一种在钢桥面板顶面上铺带横向钢板条的 UHPC 桥面板加固方案,对比试验结果表明,该加固方案可有效抑制钢桥面板原有裂纹扩展,且其承载力明显提高,该方案已成功应用于军山大桥下游侧钢桥面板的加固。周力兵等<sup>[83]</sup>对上述加固效果进行了进一步研究,结果表明:相对于上游侧所采用的钢桥面冷拌环氧树脂(ERE)桥面铺装及桥面板焊接施工的加固方式,王洋等<sup>[81-82]</sup>所提出的加固方案效果更好。Wang 等<sup>[84]</sup>利用 UHPC 铺装结构对天津海河大桥桥面板进行加固,工程实践表明:加固通车的两年内钢箱梁未出现新的裂纹,原有裂纹未继续扩展,取得了较好的

实际加固效果。当前的研究和工程实践均表明:通过引入 UHPC 结构层,可实现疲劳病害钢桥面板的有效加固,具有广阔的工程应用前景。作为钢桥面板疲劳病害的一种全新加固方法,环境条件影响下 UHPC 加固结构层的耐久性在实验室条件下较难模拟,既有工程实践已初步验证了结构层的耐久性问题,其长期耐久性问题仍有待进一步检验。

## 5 结论与展望

钢结构桥梁的发展应用和工程实践表明,疲劳与断裂是导致结构服役性能降低和引发灾难性事故的决定性影响因素,构建包含抗疲劳设计、疲劳性能分析评估理论方法、抗疲劳建造技术、疲劳损伤监测与疲劳微裂纹检测识别、疲劳开裂后、剩余疲劳寿命预测、疲劳开裂维护与疲劳性能强化、结构完整性评估、疲劳服役寿命运维管理的钢结构桥梁全寿命周期抗疲劳技术体系,才能为钢结构桥梁的高质量发展提供完备的技术支撑。该体系涵盖疲劳损伤演化与累积规律、疲劳裂纹萌生与扩展机制、初始制造缺陷与腐蚀的疲劳抗力劣化效应、疲劳失效判据、结构疲劳性能的经时演化机理、疲劳开裂致结构服役与安全性能的退化问题、极端作用和环境条件对于疲劳性能的影响问题、疲劳损伤的智能监测检测与识别等理论、方法和关键技术,贯穿钢结构桥梁从设计建造、服役运维到绿色消纳的全寿命过程。近年来,学者们克服了疲劳问题研究难度大、周期长、耗费高等困难,从不同的角度对于钢结构桥梁疲劳领域的相关关键问题进行了深入系统的研究,取得了丰硕的研究成果,但目前距建立完备的钢结构桥梁全寿命周期抗疲劳技术体系尚任重道远。同时,新材料、新技术、新工艺、新型结构体系和新型构造细节不断引入,新理论、新方法、新的测试技术不断提出,以人工智能和大数据为代表的数字化技术不断发展,给钢结构桥梁疲劳问题研究提出了新挑战,带来了新机遇。笔者从以下几方面对下阶段钢结构桥梁疲劳问题的研究重点进行展望。

### 1) 疲劳的跨尺度损伤机制与多尺度理论方法。

传统的钢结构桥梁疲劳抗力评估以构造细节为评估对象,评估方法主要包括两大类:其一,依据各类结构力学特性指标(S)与疲劳寿命(N)的相关关系(S-N 曲线)进行;其二,以断裂力学理论为基本理论依据,主要用于评估疲劳裂纹的扩展寿命。前者便于工程应用,是重要桥梁工程规范的主要方法,所采用的结构力学特性指标主要包括早期的名义应力,以及后来逐步发展的缺口应力、热点应力、结构应力、应变能密度等指标。该类方法主要依据模型试验结果建立相应的 S-N 曲线,试图通过模型试验结果的概率统计特性反映应力集中、残余应力和初始制造缺陷等多种因素所导致的疲劳抗力离散性,并通过选取较高的疲劳抗力分项系数来保障结构的抗疲劳安全性,基于 S-N 曲线的结构抗疲劳设计理念为安全寿命设计理念。第二类方法主要依据应力强度因子,通过 Paris 公式及其修正形式,确定特定初始宏观裂纹条件下扩展至临界疲劳裂纹时的裂纹扩展寿命,相关的结构设计理念属于基于破损安全的损伤容限理念。上述两类方法均

属于宏观唯象学方法,是在理论方法、分析工具、测试技术、计算能力等特定因素限制条件下,研究者通过应力、应变、应变能等宏观力学指标描述疲劳问题的成功尝试,相关研究成果直接支撑了钢结构桥梁的应用和发展。

尽管唯象学方法能够评估和预测与试验模型相近的同类型结构或构造细节的疲劳寿命,但疲劳寿命评估结果的准确性由试验结果的样本容量较大和试验结果具有较好的代表性这两个基本前提条件决定,这两个条件则以大量的疲劳破坏模型试验为代价,试验周期长、人力和物力成本高昂。同时,由于疲劳破坏过程本质上属于从微观到宏观的跨尺度过程,宏观唯象学方法无法描述这一过程并揭示破坏机制,无法准确量化初始制造缺陷、残余应力、腐蚀等关键因素对于疲劳抗力的实际效应。

微观晶体塑性本构理论、多尺度理论和数值分析方法、弹塑性断裂力学等理论方法的进步,高精度扫描电镜、透射电镜、同步辐射X射线原位三维成像技术、非接触式力学特性测试技术、高精度疲劳试验加载装置等试验测试技术的飞速发展,超级计算机和超算技术带来的计算能力飞跃,使得从材料出现损伤、微裂纹萌生、裂纹扩展直至破坏的全过程多尺度试验研究和理论分析得以实现,并在此基础上阐明疲劳破坏的跨尺度机制成为可能。当前,建立全尺度结构或构造细节的分析模型并实现全过程分析在计算能力等方面仍存在困难,可行的方法是微细观和宏观有机融合的多尺度混合分析:基于晶体塑性理论对疲劳热点进行微细观分析,裂纹扩展到一定尺度后采用弹塑性断裂力学进行研究,其他区域则采用宏观分析方法。多尺度分析方法能够阐明疲劳的跨尺度损伤机理,深化对于疲劳问题的理解,揭示初始制造缺陷、残余应力、腐蚀等因素对于疲劳致损过程的作用机制并准确量化其对疲劳寿命的实际效应。当前迫切需要开展的相关研究工作包括:细、微观初始制造缺陷的疲劳抗力跨尺度劣化机制与效应量化方法;超高周疲劳破坏机理与超高周疲劳极限问题;腐蚀与疲劳损伤的不同步跨尺度耦合机制等。

## 2) 先进材料、工艺、结构新体系与长寿命高性能钢结构桥梁

有效应对钢结构桥梁疲劳开裂这一痛难点问题的途径主要有二:一是从控制疲劳性能的内因入手并系统构思,发展先进材料/工艺/结构新体系综合驱动下的长寿命高性能钢结构桥梁,二是从疲劳寿命的决定性外因入手,构建涵盖监测检测与识别、开裂与性能强化、结构完整性评估、运维决策与剩余寿命管理等关键内容的钢结构桥梁疲劳损伤智能监测识别系统。前者是强先天之本,后者固养生之基,共同服务于钢结构桥梁的长寿命高质量服役。先进材料和工艺驱动下的高性能钢结构桥梁是结构工程未来的重要发展方向,当前已进行了卓有成效的研究,部分研究成果已实现产业化应用,推动了钢结构桥梁的技术进步。

下一阶段的研究重点是进一步革新工程建设投资和结构设计理念,从建设成本最优向全寿命周期成本和结构性能最

优转变,系统构思,综合引入先进材料和工艺,发展高性能结构新体系,形成先进材料和工艺支撑结构高性能、结构新体系促进先进材料和工艺研发的新格局。

当前亟待开展的研究包括:进一步推动先进材料在钢结构桥梁中的应用,高强度、高韧性钢、耐候钢、不锈钢在钢结构桥梁中的应用越来越广泛,形状记忆合金、铝合金、石墨铸铁、纤维复合材料等新材料在钢结构桥梁中的应用研究方兴未艾,先进材料的发展和应用,将驱动钢结构桥梁的新革命;钢结构桥梁具备工业化建造和智能建造的先天优势,在新工艺的有力支撑下,钢结构桥梁的工业化建造已基本实现,当前正处于工业化建造技术深化升级并向智慧建造发展的关键转型期,其中自动化焊接技术和工艺基本成熟,摩擦焊接技术、激光焊接技术、增材制造技术、关键疲劳易损部位的喷丸强化技术和孔挤压等新工艺正在飞速发展,面向疲劳性能研发先进建造工艺并确定其关键工艺参数,建立工艺参数与疲劳性能的相关关系,是当前的研究热点;以构造细节和结构传力路径与布局为切入点发展钢结构桥梁新体系,是提高结构疲劳性能的有效途径。当前的相关研究主要集中在研发长寿命新型构造细节方面,提出了钢桥面板结构体系的疲劳抗力评估方法并从结构体系主导疲劳失效模式的角度,研发了长寿命钢桥面板。总体而言,从结构体系疲劳性能角度进行的研究仍较少,先进材料、工艺和设计理念的联合驱动,为长寿命高性能钢结构桥梁新体系的发展奠定了坚实的基础,多失效模式损伤度相容的结构体系抗疲劳设计方法、高抗疲劳韧性长寿命结构新体系、疲劳易损构件可更换的装配式结构体系、多材性混合结构等将是下阶段的研究重点。

## 3) 在役钢结构桥梁的疲劳致损过程重构与剩余寿命预测

当前中国在役桥梁已超过百万座,有相当比例的桥梁存在不同程度的病害和性能劣化问题,随着桥上交通向高速、重载、大流量方向发展,以及对桥梁结构服役质量和服役安全要求的不断提高,在役桥梁结构的实际性能与服役安全和服役质量需求之间的突出矛盾日趋凸显。美国土木工程师协会(ASCE)的大样本统计分析表明,绝大多数钢结构桥梁破坏的主因是疲劳和断裂。随着服役时间的不断延长,钢结构桥梁的疲劳损伤不断累积,其剩余寿命持续降低。同时,结构在建造、服役和维护过程中不可避免地出现各类缺陷,包括初始制造缺陷、磕碰、刮擦、撞击、腐蚀、微动磨损等,均会导致局部应力集中、疲劳抗力进一步劣化和剩余寿命加速减少。

由于疲劳和断裂所导致的钢结构桥梁破坏均为脆性破坏,破坏前无延性变形过程和明显征兆,未能及时检测到关键部位的疲劳开裂并进行科学处置是钢结构桥梁严重病害和灾难性结构安全事故的直接原因,而疲劳损伤状态的准确评估和剩余寿命的科学预测是保障在役钢结构桥梁高质量服役并有效规避结构安全风险的基本前提。但中国大部分钢结构桥梁尤其是早期建造的钢结构桥梁,服役过程中的疲劳荷载信息和关键构造细节的实际疲劳损伤程度及疲劳抗



力信息缺失,因此,在役钢结构桥梁疲劳问题研究面临的主要挑战之一是信息缺失条件下如何重构关键构造细节的疲劳损伤状态。构造细节的疲劳致损过程、疲劳破坏过程属于从微观到宏观的跨尺度过程,信息缺失条件下的实际疲劳损伤状态重构过程则是典型的跨尺度逆过程,由于结构处于服役阶段,重构过程对原结构必须是无损或微损的,相关关键研究内容主要包括:疲劳损伤跨尺度演化全过程关键阶段损伤状态的多物理参数表征方法;关键构造细节疲劳抗力试验的尺度效应与毫微尺度结构试验技术;面向损伤状态特征化物理参数的在役结构无损和微损的试验检测新装备研发;基于多源特征信息的关键构造细节实际疲劳损伤状态逆过程重构方法;特定疲劳损伤条件下在役钢结构桥梁的疲劳破坏路径确定与剩余寿命预测方法等。

#### 4) 钢结构桥梁疲劳损伤智能监测识别系统

在整个疲劳寿命中微裂纹萌生扩展寿命占50%以上,一旦疲劳微裂纹扩展至肉眼可见的宏观裂纹后,将迅速扩展至贯穿型长大裂纹。由此导致漏检预防和处置时机两方面的问题。由于宏观裂纹稳定扩展到失稳扩展时间较短,对部分结构而言,疲劳开裂漏检导致的节点或杆件断裂将直接引发结构发生无先兆脆性破坏的灾难性事故;对于高抗疲劳韧性结构而言,即使疲劳开裂仅降低结构的服役质量,加固维护的直接成本和因干扰交通所导致的间接成本也随裂纹长度的增加而呈指数级增长。

由上述特性所决定,在疲劳开裂的早期识别损伤并及时处置至关重要。但疲劳裂纹早期扩展阶段的识别,具有较高的难度和挑战性,主要原因在于:细小疲劳裂纹通常不会引起结构的静力和动力响应发生显著变化,传统的损伤识别方法难以准确识别;初始制造缺陷和腐蚀等显著劣化构造细节和受力构件疲劳抗力的影响因素,在结构上的分布具有强随机性,传统的人工巡检方式检测效率低、成本高、工作条件恶劣、隐蔽性裂纹易漏检,难以满足全桥全域检测的实际需求;钢结构桥梁的疲劳问题具有多构造细节和多模式特性,相当比例的疲劳开裂位于隐蔽部位,检测困难。基于对疲劳问题基本属性的认识,引入疲劳破坏机制、疲劳抗力评估方法、测试和检测技术、人工智能、大数据等领域的最新进展,构建钢结构桥梁疲劳损伤智能监测识别系统是极为必要的。当前该系统已在实验室和部分钢结构桥梁工程实践中进行了探索性研究和应用,相关研究将集成钢桥疲劳研究的核心研究成果,直接支撑钢结构桥梁的长寿命高质量服役目标,并有力推动钢桥疲劳问题创新性研究发展至新阶段。

这一领域是未来钢结构桥梁的重点发展方向,下阶段的主要研究内容包括:新型结构体系和构造细节的疲劳损伤表征、原位监测与识别方法;基于多源信息的疲劳损伤与开裂概率实时评估与预测系统;疲劳裂纹扩展过程的实时监测与测量技术;微小疲劳裂纹的高精度无损检测新技术;疲劳损伤智能传感技术和智能感知系统;钢结构桥梁结构完整性评估理论与方法等。

#### 参考文献:

- [1] YAO Y, JI B H, LI Y F, et al. Diaphragm splicing deviation in steel bridge deck: Effect on fatigue performance and its preventive measures [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2021, 35(3): 04021008.
- [2] HUANG Z W, LEI J Q, GUO S L, et al. Fatigue performance of U-rib butt welds in orthotropic steel decks [J]. *Engineering Structures*, 2020, 211: 110485.
- [3] 何志刚, 蔺鹏臻, 刘应龙. 考虑焊接残余应力的钢桥面板U肋焊接处局部应力分析[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(4): 132-140.
- [4] GADALLAH R, TSUTSUMI S, YONEZAWA T, et al. Residual stress measurement at the weld root of rib-to-deck welded joints in orthotropic steel bridge decks using the contour method [J]. *Engineering Structures*, 2020, 219: 110946.
- [5] ZHANG Q H, MA Y, CUI C, et al. Experimental investigation and numerical simulation on welding residual stress of innovative double-side welded rib-to-deck joints of orthotropic steel decks [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 179: 106544.
- [6] GAUR V, BRIFFOD F, ENOKI M. Micro-mechanical investigation of fatigue behavior of Al alloys containing surface/superficial defects [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 775: 138958.
- [7] LI H L, WU G. Fatigue evaluation of steel bridge details integrating multi-scale dynamic analysis of coupled train-track-bridge system and fracture mechanics [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(9): 3261.
- [8] MA X L, ZHANG W. Fatigue life of weldment details of existing orthotropic steel bridge considering the scour effects [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(10): 04020078.
- [9] MASHAYEKHI M, SANTINI-BELL E. Fatigue assessment of a complex welded steel bridge connection utilizing a three-dimensional multi-scale finite element model and hotspot stress method [J]. *Engineering Structures*, 2020, 214: 110624.
- [10] 祝志文, 李健朋, 黄炎, 等. 2种弧形切口对RF构造细节疲劳性能影响的现场监测[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(1): 87-99.
- [11] 吉伯海, 陈念念. 钢桥面板U肋与横隔板焊缝疲劳强度分析[J]. *北京交通大学学报*, 2020, 44(6): 110-117.
- [12] YOKOZEKI K, TOMINAGA T, MIKI C. The effects of rib shape and slit on fatigue properties of orthotropic

- steel decks [J]. *Welding in the World*, 2021, 65(4): 601-609.
- [13] 王春生, 翟慕赛, Houankpo T O N. 正交异性钢桥面板典型细节疲劳强度研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(8): 102-111.
- [14] 郭健, 杭达. 基于马尔可夫链的钢箱梁正交异性板疲劳状态分析[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(3): 60-66.
- [15] YANG H B, WANG P, QIAN H L. Fatigue behavior of typical details of orthotropic steel bridges in multiaxial stress states using traction structural stress [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 141: 105862.
- [16] 张清华, 李俊, 袁道云, 等. 深圳至中山跨江通道钢桥面板结构疲劳试验研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(11): 102-115.
- [17] 张清华, 李俊, 袁道云, 等. 高疲劳抗力钢桥面板的疲劳问题 I: 模型试验[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(3): 124-135.
- [18] 张清华, 袁道云, 王宝州, 等. 纵肋与顶板新型双面焊构造细节疲劳性能研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(5): 79-91.
- [19] LUO P J, ZHANG Q H, BAO Y. Rib loading effects on weld root fatigue failure modes at rib-to-deck welded joint [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2020, 43(7): 1399-1418.
- [20] 廖小伟, 王元清, 吴剑国, 等. 低温环境下十字形非传力角焊缝接头的疲劳性能[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(10): 2018-2026.
- [21] 李游, 李传习, 陈卓异, 等. 基于监测数据的钢箱梁 U 肋细节疲劳可靠性分析[J]. *工程力学*, 2020, 37(2): 111-123.
- [22] 汪珍, 王莹. 正交异性钢桥面板的疲劳裂纹扩展规律[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(7): 1873-1882.
- [23] VAN DEN BERG N, XIN H H, VELJKOVIC M. Effects of residual stresses on fatigue crack propagation of an orthotropic steel bridge deck [J]. *Materials & Design*, 2021, 198: 109294.
- [24] WANG Q D, JI B H, LI C X, et al. Fatigue evaluation of rib-deck welds: Crack-propagation-life predictive model and parametric analysis [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 173: 106248.
- [25] QIANG B, WANG X. Evaluating stress intensity factors for surface cracks in an orthotropic steel deck accounting for the welding residual stresses [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 110: 102827.
- [26] CUI C, XU Y L, ZHANG Q H. Multiscale fatigue damage evolution in orthotropic steel deck of cable-stayed bridges [J]. *Engineering Structures*, 2021, 237: 112144.
- [27] 蒋斐, 吉伯海, 王益逊, 等. 2 种新型顶板-U 肋构造细节的疲劳性能研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(10): 1391-1397, 1421.
- [28] FANG Z, DING Y L, WEI X C, et al. Fatigue failure and optimization of double-sided weld in orthotropic steel bridge decks [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 116: 104750.
- [29] 蒲黔辉, 陈良军, 施洲, 等. 铁路钢箱梁正交异性桥面加劲肋疲劳性能研究[J]. *铁道学报*, 2020, 42(1): 96-102.
- [30] 郭建博. 横隔板弧形切口疲劳性能及构造研究[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(5): 2265-2273, 2338.
- [31] 向泽, 祝志文. 切口型式对正交异性钢桥面板应力特性的影响[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(2): 399-407.
- [32] 王伟, 周尚猛, 王亚飞. U 肋设小隔板和支撑板的正交异性板疲劳性能试验研究[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(3): 58-63.
- [33] 郑凯锋, 张宇, 衡俊霖, 等. 高强度耐候钢及其在桥梁中的应用与前景[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(3): 1-10.
- [34] 王春生, 张静雯, 段兰, 等. 长寿命高性能耐候钢桥研究进展与工程应用[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(1): 1-26.
- [35] ABDELBASET H, CHENG B, TIAN L, et al. Reduce hot spot stresses in welded connections of orthotropic steel bridge decks by using UHPC layer: Experimental and numerical investigation [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 110988.
- [36] LIU Y M, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Fatigue behavior of orthotropic composite deck integrating steel and engineered cementitious composite [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 111017.
- [37] 罗如登, 屈植锋, 王正阳, 等. 大纵肋正交异性-PBL 剪力键桥面板疲劳性能分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(11): 2849-2856.
- [38] 王石磊, 齐法琳, 柯在田, 等. 环氧沥青铺装对钢桥面板受力影响试验研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(10): 145-154.
- [39] 周昌栋, 黄楚彬, 代明净, 等. ERS 铺装对钢桥面板疲劳性能的影响及参数分析[J]. *世界桥梁*, 2021, 49(1): 45-52.
- [40] 贺欣怡, 苏庆田, 姜旭, 等. 环氧胶粘结刚性铺装的正交异性桥面板力学性能[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(9): 25-31.

- [41] YE H W, YANG Z, HAN B, et al. Failure mechanisms governing fatigue strength of steel-SFRC composite bridge deck with U-ribs [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(4): 04021014.
- [42] 卜一之, 刘欣益, 张清华. 基于截面应力法的钢-UHPC 组合板初裂荷载计算方法研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(10): 209-217.
- [43] 陈刚, 汪焮成. U 肋全熔透角焊缝超声波相控阵检测方法研究[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(6): 33-38.
- [44] 汪国华. 基于声发射技术的结构损伤定位方法综述[J]. *工程与建设*, 2020, 34(6): 1115-1118.
- [45] 孙孝婷, 汪锋, 袁周致远, 等. 钢桥面板顶板与 U 肋焊缝超声波穿透法检测技术研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2020, 44(5): 850-853.
- [46] 李强, 吴海平, 邹祺祺, 等. 基于波传播法的钢-UHPC 组合结构脱粘损伤识别研究[J]. *公路工程*, 2020, 45(2): 185-190.
- [47] 王琛. 薄壁异型焊接构件疲劳损伤检测方法研究[J]. *自动化与仪表*, 2020, 35(4): 53-57.
- [48] 段兰, 王春生, 翟慕赛, 等. 基于声发射技术的钢桥面板疲劳损伤监测与评估[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(1): 60-73.
- [49] 卫小龙, 杜国锋, 袁洪强, 等. 超声导波在焊缝缺陷检测中的发展与挑战[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(31): 12683-12690.
- [50] WANG P, ZHOU W S, LI H. A singular value decomposition-based guided wave array signal processing approach for weak signals with low signal-to-noise ratios [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 141: 106450.
- [51] 魏嘉呈, 刘俊岩, 何林, 等. 红外热成像无损检测技术研究发展现状[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2020, 25(2): 64-72.
- [52] SOLOVYOV L, SOLOVYOV A. Thermal method in the control of fatigue cracks in welded bridge superstructures [J]. *Transportation Research Procedia*, 2021, 54: 355-361.
- [53] SONY S, DUNPHY K, SADHU A, et al. A systematic review of convolutional neural network-based structural condition assessment techniques [J]. *Engineering Structures*, 2021, 226: 111347.
- [54] MOSTAFA K, HEGAZY T. Review of image-based analysis and applications in construction [J]. *Automation in Construction*, 2021, 122: 103516.
- [55] VOROBEL R, IVASENKO I, BEREHULYAK O, et al. Segmentation of rust defects on painted steel surfaces by intelligent image analysis [J]. *Automation in Construction*, 2021, 123: 103515.
- [56] LONG X Y, ZHAO S K, JIANG C, et al. Deep learning-based planar crack damage evaluation using convolutional neural networks [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 246: 107604.
- [57] HUYNH T C. Vision-based autonomous bolt-looseness detection method for splice connections: Design, lab-scale evaluation, and field application [J]. *Automation in Construction*, 2021, 124: 103591.
- [58] TAN Z X, THAMBIRATNAM D P, CHAN T H T, et al. Damage detection in steel-concrete composite bridge using vibration characteristics and artificial neural network [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(9): 1247-1261.
- [59] 齐宝欣, 李佳诺, 钱辉, 等. 基于 PZT-SLDV 测试系统的纤维复合板损伤识别研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(Sup2): 183-189.
- [60] NAGAMANI DEVI G, VIJAYALAKSHMI M M. Smart structural health monitoring in civil engineering: A survey [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 7143-7146.
- [61] DENG L, NIE L, ZHONG W J, et al. Developing fatigue vehicle models for bridge fatigue assessment under different traffic conditions [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(2): 04020122.
- [62] YE Z, JI B H, YUANZHOU Z Y, et al. Investigation of the fatigue vehicle load for a long-span steel bridge based on nine years of measured traffic data [J]. *Structural Engineering International*, 2020: 1-9.
- [63] 赖毅, 代力, 朱泽文, 等. 基于 WIM 数据的钢箱梁斜拉桥疲劳荷载谱分析及寿命预测研究[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(6): 654-660.
- [64] ZHOU Y, PEI Y L, ZHOU S, et al. Novel methodology for identifying the weight of moving vehicles on bridges using structural response pattern extraction and deep learning algorithms [J]. *Measurement*, 2021, 168: 108384.
- [65] TOCHAEI E N, FANG Z, TAYLOR T, et al. Structural monitoring and remaining fatigue life estimation of typical welded crack details in the Manhattan Bridge [J]. *Engineering Structures*, 2021, 231: 111760.
- [66] DI J, RUAN X Z, ZHOU X H, et al. Fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks based on strain monitoring data [J]. *Engineering Structures*, 2021, 228: 111437.
- [67] CUI C, XU Y L, ZHANG Q H, et al. Vehicle-induced fatigue damage prognosis of orthotropic steel decks of cable-stayed bridges [J]. *Engineering Structures*,

- 2020, 212: 110509.
- [67] FABIANOWSKI D, JAKIEL P, STEMPLEWSKI S. Development of artificial neural network for condition assessment of bridges based on hybrid decision making method-Feasibility study [J]. *Expert Systems With Applications*, 2021, 168: 114271.
- [69] 刘嘉正, 吉伯海, 袁周致远, 等. 钢箱梁疲劳裂纹气动冲击法维修效果评估[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(4): 511-516.
- [70] 孙童, 吉伯海, 袁周致远, 等. 气动冲击作用下钢桥疲劳裂纹闭合深度影响因素研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2020, 44(2): 337-341, 347.
- [71] KINOSHITA K, ONO Y, BANNO Y, et al. Application of shot peening for welded joints of existing steel bridges [J]. *Welding in the World*, 2020, 64(4): 647-660.
- [72] 李传习, 柯璐, 陈卓异, 等. 正交异性钢桥面板弧形切口及其 CFRP 补强的疲劳性能[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(5): 63-75.
- [73] CHATAIGNER S, WAHBEH M, GARCIA-SANCHEZ D, et al. Fatigue strengthening of steel bridges with adhesively bonded CFRP laminates: Case study [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2020, 24(3): 05020002.
- [74] JIE Z Y, WANG W J, CHEN C, et al. Local approaches and XFEM used to estimate life of CFRP repaired cracked welded joints under fatigue loading [J]. *Composite Structures*, 2021, 260: 113251.
- [75] MOHABEDDINE A, CORREIA J A F O, MONTENEGRO P A, et al. Fatigue crack growth modelling for cracked small-scale structural details repaired with CFRP [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 161: 107525.
- [76] MOHAJER M, BOCCIARELLI M, COLOMBI P, et al. Irreversible cyclic cohesive zone model for prediction of mode I fatigue crack growth in CFRP-strengthened steel plates [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 110: 102804.
- [77] DOROUDI Y, FERNANDO D, ZHOU H, et al. Fatigue behavior of FRP-to-steel bonded interface: An experimental study with a damage plasticity model [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 139: 105785.
- [78] KASPER Y, ALBIEZ M, UMMENHOFER T, et al. Application of toughened epoxy-adhesives for strengthening of fatigue-damaged steel structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 275: 121579.
- [79] TONG L W, YU Q T, ZHAO X L. Experimental study on fatigue behavior of butt-welded thin-walled steel plates strengthened using CFRP sheets [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 147: 106471.
- [80] 陈杰, 要荆荆. 某正交异性板钢箱梁斜拉桥 UHPC 组合桥面改造方案研究[J]. *世界桥梁*, 2020, 48(3): 80-85.
- [81] 王洋, 邵旭东, 陈杰, 等. 重度疲劳开裂钢桥桥面的 UHPC 加固技术[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(11): 92-101, 115.
- [82] WANG Y, SHAO X D, CHEN J, et al. UHPC-based strengthening technique for orthotropic steel decks with significant fatigue cracking issues [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 176: 106393.
- [83] 周立兵, 张刚, 王敏. 军山长江大桥钢-UHPC 组合桥面改造效果研究[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(2): 49-54.
- [84] WANG L, SU X C, MA Y F, et al. Strengthening of steel decks for cable-stayed bridge using ultra-high performance concrete: A case study [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(16): 3373-3384.

(编辑 颜永松)