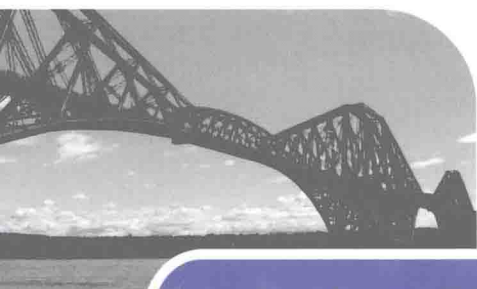


Fatigue and Maintenance of
Steel Bridge



吉伯海 傅中秋 著

钢桥疲劳 与维护



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

钢桥疲劳与维护

吉伯海 傅中秋 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书系统介绍了钢桥疲劳基本理论和维护技术,是作者近十年来关于钢桥疲劳与维护研究的阶段成果。其中,理论研究方面包括疲劳开裂特征、基于随机实测车流的钢桥振动响应、焊接疲劳性能和构造对疲劳性能的影响;技术研究方面包括疲劳的评定技术、检测技术、钻孔止裂技术、冲击闭合技术、开裂修复技术,并对疲劳预防性维护进行了探讨。

本书内容全面,考虑实桥养护工作需求,可供从事钢桥维护及管理的技术人员和科研人员参考,亦可作为桥梁工程专业研究生教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

钢桥疲劳与维护 / 吉伯海, 傅中秋著. — 北京 :
人民交通出版社股份有限公司, 2016. 8
ISBN 978-7-114-13300-8

I. ①钢… II. ①吉… ②傅… III. ①钢桥—疲劳—
研究 IV. ①U448.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 208117 号

书 名: 钢桥疲劳与维护
著 作 者: 吉伯海 傅中秋
责任编辑: 卢俊丽 闫吉维
出版发行: 人民交通出版社股份有限公司
地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号
网 址: <http://www.ccpress.com.cn>
销售电话: (010)59757973
总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 23
字 数: 563 千
版 次: 2016 年 8 月 第 1 版
印 次: 2016 年 8 月 第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-13300-8
定 价: 78.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

钢桥因其受力性能优越、跨越能力强以及经济合理等优点,在国内外得到了广泛应用,与此同时,钢桥的疲劳问题也一直是其设计及运营维护中受到重点关注的技术难题之一。尽管国内外针对钢桥疲劳与维护已开展了大量的研究和工程实践,但在桥梁实际运营维护中仍然有诸多问题有待解决。20 世纪 90 年代以来,我国相继建设了一大批大跨径钢桥,无论是数量还是规模,均居世界前列。由于我国钢桥疲劳研究和实践累积时间相对较短,相关理论和技术支撑有待进一步完善和加强。随着我国大跨径钢桥规模的不断扩大,完善钢桥疲劳理论和实桥维护技术,提升钢桥设计和运营维护水平,已成为当前钢桥建设和管养的迫切需求,也是真正实现我国由桥梁“大国”到“强国”转变过程中面临的重要课题之一。

自 2007 年以来,作者依托江苏省内多座大跨径钢桥的实际维护需求,在多项国家自然科学基金、江苏省交通科学研究计划以及国际合作项目等资助下,主要针对大跨径钢桥的正交异性钢桥面板开展了钢桥疲劳与维护方面的系列研究工作,针对钢桥疲劳损伤机理、日常检查技术、病害检测及评估技术、疲劳开裂预防和修复技术等进行了初步探讨。本书内容主要是以上工作的阶段性研究成果总结。

本书共分为 12 章,第 1 章为绪论,介绍了本书研究背景和现状;第 2 章为疲劳开裂基本理论与研究方法;第 3~6 章为钢桥疲劳与维护机理,侧重疲劳萌生机理和各因素的影响研究介绍,包括疲劳开裂特征、基于随机实测车流的钢箱梁振动响应、焊接疲劳性能及构造对疲劳性能的影响;第 7~12 章为钢桥疲劳与维护技术,侧重疲劳维护过程中所涉及的各种维护技术及其实施效果,包括疲劳的评定技术、检测技术、钻孔止裂技术、冲击闭合技术、开裂修复技术、预防性维护技术等。

本书的研究工作得到了江苏省交通运输厅、江苏交通控股有限公司、南京重大路桥建设指挥部以及其他多家单位和高校的支持,感谢江苏省交通运输厅工程质量监督局、江阴长江公路大桥、泰州长江大桥、南京长江四桥、南京长江三桥等提供的实桥研究平台和相关资助,以及研究过程中多位专家和同行给予的指导和

建议。

在本书的撰写过程中,课题组袁周致远、陈祥、李坤坤、张呈奕、刘天笳、谢曙辉、叶枝、王秋东、孔祥明等研究生参与了书稿内容的整理和图表的绘制。课题组已毕业研究生吕磊、孙媛媛、沈丹雯、田圆、李迪、朱伟、赵端端、王建民、王满满、程苗等人在学期间的研究成果也是本书的重要组成部分。河海大学桥梁所谢发祥副教授也为本书的撰写和研究工作付出了辛勤劳动。在此,作者对参加本书撰写和研究工作的全体成员表示衷心感谢。

本书的出版得到江苏高校品牌专业建设工程一期项目(PPZY2015B142)资助。由于作者水平有限,且本书为阶段成果,难以避免地存在错误或不足,恳请读者批评指正。

吉伯海

2016 年 5 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 我国钢桥疲劳研究现状	3
1.3 缆索支承桥梁钢箱梁桥疲劳研究发展方向	7
1.4 结语	9
本章参考文献	9
第2章 疲劳开裂理论与研究方法	13
2.1 疲劳开裂机理	13
2.2 疲劳评估理论	23
2.3 疲劳研究方法	42
2.4 本章小结	61
本章参考文献	61
第3章 疲劳开裂特征	64
3.1 疲劳开裂主要截面位置	64
3.2 钢桥疲劳开裂细节	67
3.3 疲劳开裂扩展规律	77
3.4 疲劳开裂过程特征变化	86
3.5 本章小结	92
本章参考文献	92
第4章 随机车辆荷载下的钢桥动力响应	94
4.1 南京长江三桥随机车辆荷载模型	94
4.2 江阴长江大桥随机车辆荷载模型	99
4.3 斜拉桥动力响应分析——南京长江三桥	102
4.4 双塔悬索桥动力响应分析——江阴长江大桥	108
4.5 三塔悬索桥动力响应分析——泰州长江大桥	114
4.6 钢箱梁疲劳细节寿命评估	118
4.7 本章小结	121
本章参考文献	121
第5章 焊接接头疲劳性能	123
5.1 钢桥主要焊接接头	123
5.2 焊接工艺及材料特性	126
5.3 不同焊接方式的焊缝疲劳性能	129

5.4 焊接缺陷与金属疲劳	134
5.5 焊接热效应与接头疲劳	140
5.6 焊接接头性能改善	147
5.7 本章小结	150
本章参考文献.....	151
第6章 构造对疲劳的影响	154
6.1 钢桥面板板件厚度对疲劳的影响	154
6.2 钢桥面板构件参数对疲劳的影响	160
6.3 钢桥面板局部构造形式对疲劳的影响	164
6.4 铺装层对钢桥面板疲劳的影响	170
6.5 钢桥面板抗疲劳新型构造介绍	174
6.6 钢桁梁节点构造对疲劳的影响	181
6.7 本章小结	188
本章参考文献.....	188
第7章 典型病害检查与开裂评定技术	191
7.1 钢箱梁典型病害日常检查	191
7.2 钢箱梁腐蚀病害综合评分制评定	202
7.3 钢箱梁疲劳病害模糊综合法评定	214
7.4 本章小结	228
本章参考文献.....	229
第8章 疲劳开裂检测技术	231
8.1 现有钢箱梁疲劳裂纹检测技术及适用性分析	231
8.2 裂纹检测影响因素	242
8.3 钢箱梁疲劳裂纹综合检测方法	250
8.4 电阻法检测技术	252
8.5 疲劳裂纹几何特征超声波检测技术研究	257
8.6 本章小结	264
本章参考文献.....	264
第9章 钻孔止裂技术	267
9.1 钻孔止裂技术介绍	267
9.2 钻孔止裂效果影响因素	270
9.3 钢桥疲劳裂纹钻孔止裂试验	277
9.4 本章小结	284
本章参考文献.....	285
第10章 裂纹冲击闭合技术	287
10.1 技术特点及优势.....	287
10.2 局部特征改善效果.....	290
10.3 疲劳裂纹修复效果.....	298
10.4 本章小结.....	305

本章参考文献..... 306

第 11 章 疲劳开裂修复技术 308

11.1 钢桥疲劳开裂修复概况 308

11.2 钢桥面板疲劳开裂修复时机选取 310

11.3 裂纹焊合法修复技术及效果 319

11.4 碳纤维补强技术及效果 325

11.5 本章小结 329

本章参考文献..... 329

第 12 章 疲劳预防性养护技术探讨 331

12.1 焊接结构疲劳强度的主要影响因素 331

12.2 疲劳预防的主要途径与方法 334

12.3 钢箱梁的疲劳预防养护技术探究 340

12.4 焊缝磨削及其作用机理 341

12.5 锤击法及其作用机理 345

12.6 局部构造措施及其作用机理 351

12.7 预防措施对钢箱梁疲劳寿命的影响 353

12.8 本章小结 355

本章参考文献..... 356

第1章 绪 论

1.1 研究背景

相对于混凝土结构,钢结构轻质、高强,应用于桥梁结构,具有显著的受力及经济优势。国内外已建造了大量的钢桥,日本的公路桥梁中钢桥占 41%,美国占到 33%^[1]。在大跨径桥梁中,钢桥已成为主要的结构类型。

20 世纪 90 年代以来,我国国民经济高速发展,钢桥的发展也突飞猛进,材料、工艺、制造、架设等多项技术实现了历史性突破。尤其是缆索支承桥梁在中国大跨径桥梁领域崛起后,钢桥因其跨越能力强、施工周期短、工厂化程度高等优点,在公路、铁路及城市道路桥梁中被广泛应用,已成为缆索支承桥梁体系中最主要的结构类型。如图 1-1 所示为当代我国桥梁建设成就的里程碑。

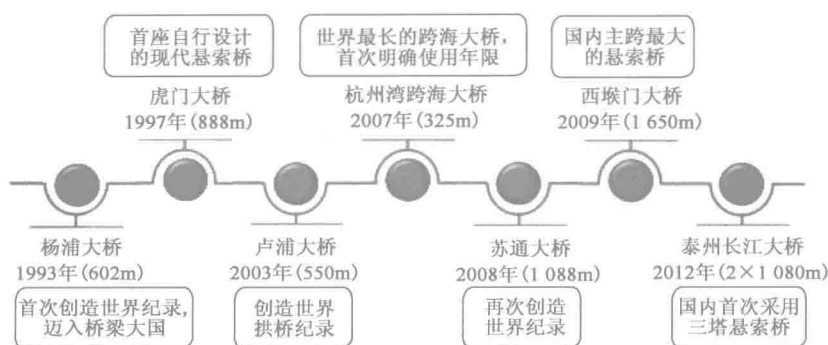


图 1-1 当代我国桥梁建设成就的里程碑

我国已建成近百座大跨径钢箱梁或钢桁梁桥,截至 2015 年,世界跨径排名前十的已建斜拉桥和悬索桥中,约有一半位于中国,其中还有的是世界知名的大跨径钢桥。我国大跨径钢桥建设规模和数量已处于世界前列,钢桥建设的成就已支撑我国成为桥梁大国。如图 1-2 所示为世界历次最大跨径斜拉桥。

随着综合国力的不断增强和钢材产量及质量的大幅提高,钢桥将得到进一步的发展和应用^[2,3]。但随着已建缆索支承桥梁服役年限的增长,其运营安全与维护问题亦日显突出。相关研究认为,钢桥病害主要有涂装劣化、腐蚀和疲劳三种类型。涂装劣化和腐蚀在维护过程中比较容易被发现,也可以及时采取相应的维护措施,而疲劳开裂产生机理复杂,初期不易被发现,具有检测及修复困难、修复成本高等特点,如英国 Severn Cross 悬索桥的疲劳损伤加固费用高达钢桥面板建设费用的 2.5 倍。且钢桥一旦发生疲劳裂纹,直接威胁到结构的受力安全,严重的可能会导致桥梁倒塌事故。国内对钢箱梁的疲劳问题研究理论滞后于实践,疲劳损伤是

我国在役缆索承重桥梁安全运营面临的核心难题之一。

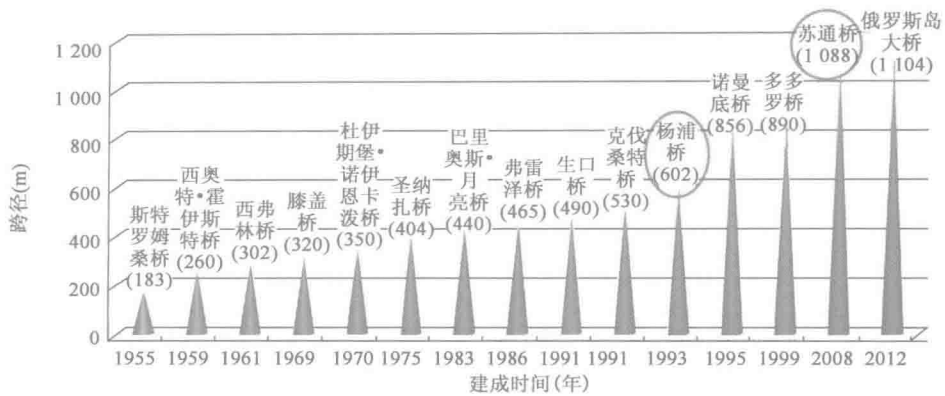


图 1-2 世界历次最大跨径斜拉桥

我国钢桥相关的理论和技术的研究尚不成熟,尤其是疲劳相关问题。随着我国大量钢桥的建成,保障其运营安全已成为当前的主要工作。疲劳开裂是钢桥运营阶段的主要病害之一,直接影响结构受力安全,还会导致渗漏等次生病害。由于疲劳产生机理复杂、影响因素众多,钢桥面板疲劳损伤难以避免。自 1966 年第一座扁平钢箱梁桥(英国 Severn 桥)发现开裂以来,国外各国已大量发现钢桥面板疲劳开裂^[4]。疲劳开裂初期较难发现,一旦发生裂纹数量和长度发展迅速,直接威胁结构受力安全。据美国土木工程学会(ASCE)统计,80%~90% 钢结构的破坏与疲劳损伤有关^[5]。一直以来疲劳都是钢桥乃至钢结构领域亟须解决的难点问题之一。日本钢结构委员会曾于 2007 年对日本阪神高速公路和首都高速公路钢桥面板钢桥的疲劳裂纹进行过统计,发现纵肋对接焊接头部位、纵肋与面板焊接连接部位、纵肋与横肋交叉部位、主梁腹板竖向加劲肋与面板焊接连接部位,出现疲劳裂纹的概率最大,分别占疲劳裂纹总数的 3.6%、9.7%、56.3%、20.9%^[6]。该四类疲劳裂纹均总计达到总裂纹数的 90.5%。

我国大跨径缆索支承桥梁由于建造时间较短,疲劳开裂尚未大范围存在。尽管如此,我国已发现多座钢桥疲劳损伤案例,如,2002 年、2007 年虎门大桥疲劳裂纹分别为 2 条和 103 条,2008 年就增长到 561 条;厦门海沧大桥在 U 肋嵌补段及纵隔板的端部发现了疲劳裂纹;位于江苏省内的某跨径悬索桥近年来的检查中发现了 200 多条疲劳裂纹;多座服役时间较短的钢桥也发现了少量的疲劳裂纹^[7-9]。随着服役年限的增长,我国的钢桥面板疲劳开裂将大范围发生,钢桥面板疲劳问题也将日益突出。钢桥面板的疲劳问题已成为我国钢桥维护领域面临的主要工作之一^[10-12]。

20 世纪,疲劳科学得到了快速发展。首先是显微镜的发明,使人们认清了疲劳的微观机理,疲劳不仅是一个工程问题,更是一种物理现象。人们对钢桥疲劳问题的认识始于 20 世纪初,当时欧美等地区的一些铆接钢桥细节就出现了因疲劳而产生的裂纹,但当时并未引起人们的重视。到了 20 世纪中叶,一方面高强钢材的使用和设计技术的提高,减小了钢桥构件的截面尺寸,增大了结构活载与恒载之比;另一方面焊接技术在桥梁中的应用,使焊缝内部不可避免地留有初始缺陷而导致局部应力集中,加之结构构造形式的多样化等因素,使得钢桥疲劳裂纹的出现变得频繁,给桥梁运营带来了严重的安全隐患。1967 年美国 PoiniPleasant 桥由于疲劳问题突然整体倒塌,造成 46 人死亡的重大事故,促使桥梁工程师开始对钢桥疲劳问题进行

系统研究^[13]。

由于疲劳产生机理复杂,早期关于钢桥疲劳性能的研究侧重开裂前局部应力分析和耐久性评估,后来在很多领域都发现了低应力下裂纹扩展导致结构脆断的现象,于是形成了基于断裂力学的疲劳损伤机理研究。基于断裂力学的疲劳裂纹扩展理论克服了 $S-N$ 曲线的不足,着眼于从机理上解释疲劳现象,研究在微观和宏观两方面同时展开。在微观方面,主要是研究疲劳裂纹扩展的微观机制和建立相关的微观力学模型。关于疲劳损伤萌生的微观机制,已经提出了多种疲劳裂纹萌生模型,如滑移带“挤出”和“侵入”模型、位错塞积模型、位错反应模型。对于疲劳裂纹扩展微观机制的研究,Forsyth、Laird 等人提出了一些唯象模型和定量模型,对于晶体学扩展阶段(第 I 阶段)以 Forsyth 的“Z 字形”纯滑移机制为代表;对于非晶体学扩展阶段(第 II 阶段)以 Laird 提出的塑性钝化理想模型为代表。Pearson 在 1975 年提出“短裂纹问题”:疲劳短裂纹的扩展速率明显高于长裂纹,这是不能用现有的断裂力学的理论所解释的^[14-16]。在宏观方面,主要是研究疲劳裂纹扩展的力学模型和疲劳裂纹扩展速率表达式,一般把裂纹扩展分为三个阶段:裂纹萌生阶段、稳定扩展阶段和失稳扩展阶段。最早由 Irwin (1957)指出可用“应力强度因子 K ”表示裂纹顶端应力奇异性大小^[17]。同年美国人 Paris, P. C. 提出在循环荷载作用下,裂纹尖端的应力强度因子幅值是控制构件疲劳裂纹扩展速率的基本参量,并于 1963 年提出了著名的指数幂定律 Paris 公式,即裂纹扩展速率公式^[18]。J. W. Fisher 首先将该理论应用于实践,对美国及加拿大地区多座发生疲劳断裂的钢桥进行研究,并取得了良好的效果^[19]。后来在解决工程实际问题时,许多学者对 Paris 公式的具体形式做了大量修正。如 Donahue (1972)等考虑门槛应力强度因子幅 ΔK_{th} 的影响,对 Paris 公式做出修正;W. Elber (1971)提出裂纹闭合理论,对裂纹扩展加速和迟滞现象做出了初步解释,并引入裂纹闭合参数来修正 Paris 公式^[20];近年一些学者利用量子化的断裂力学理论提出了广义的疲劳裂纹扩展 Paris 公式,Taylor (2005)等已经成功地将量子断裂力学理论应用于静力失效和无限寿命设计中^[21]。

1.2 我国钢桥疲劳研究现状

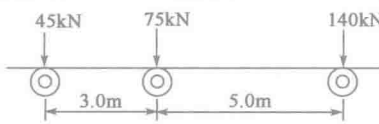
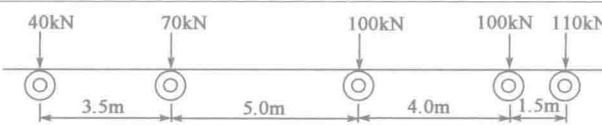
1.2.1 车辆荷载谱

公路桥梁承受的车辆荷载为随机动力荷载,不同时段、路段上作用的车辆荷载各不相同。车辆荷载的准确与否直接关系到疲劳研究结论的可靠性。美国、英国等国家对其国内的车流交通进行了广泛的研究及统计,并建立了适用于本国的疲劳车模型。国外很多规范,如 BS5400、AASHTO、Eurocode 等均对疲劳荷载进行了明确规定^[22-24]。2015 年颁布的《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)对我国的桥梁疲劳荷载形式及大小进行了明确的规定。在此之前,我国公路桥梁的抗疲劳设计中尚无疲劳验算荷载可以参照,并且公路桥梁规范仅对强度设计时不利布置的标准活荷载进行了规定。已有实测结果表明,标准活荷载与实际的车辆荷载对桥梁结构产生的损伤效应相差较大,采用标准车辆荷载进行结构疲劳设计不符合实际情况^[25,26]。

《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)针对不同的疲劳验算情况给出了三种疲

劳荷载模型,但这三种模型能否较好地适应我国车辆荷载的整体情况还需要进一步的研究分析。另外,我国交通量分布情况受地区影响较大,在满足规范要求的疲劳荷载基础上,结合本地区的交通量情况将疲劳荷载模型地区化,能够使桥梁的抗疲劳设计在社会经济上达到最优化。目前,国内已有部分研究针对局部地区交通状况给出了当地车辆荷载谱,如中交规划设计院统计分析了南京三桥、南京二桥及虎门大桥等车辆荷载,得到不同车型对桥面板损伤度^[27-29]。河海大学根据 2006 年、2010 年江阴大桥实测车流建立了随机车辆荷载谱^[30-32],如表 1-1 所示。然而由于架桥位置的不同,桥梁的日交通车流量亦存在明显差异,如东部沿海发达地区和西部欠发达地区同等级公路的车流量最大相差有 10 倍之多。因此,仅参考现有的国外规范、我国现有的钢结构桥梁设计规范或我国部分地区的车辆荷载谱很难精确反映实桥的受荷状况,需要立足于当地具体情况并根据具体统计数据来分析。

大桥计算等效车辆荷载模型 表 1-1

轴 数	示 意 图
2	
3	
4	
5	

1.2.2 疲劳损伤机理

由于疲劳产生机理复杂,其设计方法有安全寿命设计、损伤容限设计和耐久性设计等,各种设计方法相互补充。安全寿命设计主要依据材料的 $S-N$ 曲线和 Miner 累计损伤理论,损伤容限设计以断裂力学为理论基础,耐久性设计则是以经济寿命控制为目标,需要定义构造细节疲劳质量和初始疲劳损伤状态。对于钢箱梁疲劳性能的研究来说,由于裂纹的存在,安全寿命设计不能完全确保安全。基于断裂力学的疲劳裂纹损伤理论克服了 $S-N$ 曲线的不足,着眼于从机理上解释疲劳现象,研究在微观和宏观两方面同时展开。

关于疲劳损伤萌生的微观机制,已经提出了多种疲劳裂纹萌生模型,如滑移带“挤出”和“侵入”模型、位错塞积模型、位错反应模型。在宏观方面,主要是研究疲劳裂纹扩展的力学模型和疲劳裂纹扩展速率表达式,一般把裂纹扩展分为三个阶段:裂纹萌生阶段、稳定扩展阶段和失稳扩展阶段。最早由 Irwin(1957)指出可用“应力强度因子 K ”表示裂纹顶端应力奇异性大小^[33]。同年美国人 Paris. P. C. 提出在循环荷载作用下,裂纹尖端的应力强度因子幅值是

控制构件疲劳裂纹扩展速率的基本参量,并于1963年提出了著名的描述裂纹扩展速率的 Paris 公式^[34]。后来在解决工程实际问题时,许多学者对 Paris 公式的具体形式做了大量修正。

但这些理论目前仍然存在应用的局限性。近50年来,国内外提出的裂纹扩展模型和表达式已达100多个,但这些表达式中含有部分物理意义不明确或测量结果均存在主观性的问题。较为成熟的疲劳裂纹扩展速率关系式,如 Forman 公式和 Walker 公式,均考虑了应力比的影响,Forman 公式同时也将材料的断裂韧性 K_{IC} 考虑为重要影响因素,但均存在由试验确定常数比较困难的问题^[35]。实际钢箱梁结构中存在裂纹部位多为焊接接头,所处环境及应力状态多变,对疲劳裂纹的扩展机理研究尚停留在理论层面。对钢桥裂纹疲劳机理的认识,国内外至今仍停留在半理论半经验方法。

1.2.3 疲劳预测及评估

钢桥疲劳损伤的预测评估,主要依据钢桥实测或计算的应变时程数据,来判定关键构件的疲劳寿命,并给出疲劳微裂纹扩展趋势。20世纪后半叶,随着新的试验手段、计算机和有限元应力分析计算等的发展和完善,疲劳科学得到前所未有的发展。对疲劳现象的定性认识日臻完善,出现大量有关疲劳寿命预测的理论,也提出一些疲劳寿命预测模型^[36,37]。早期国内外钢结构的疲劳预测及评估研究侧重开裂前局部应力分析和耐久性评估。

目前疲劳预测及失效评估方法,主要有以下几种:

一是通过裂纹尺寸特征及应力突变等进行判断,该方法直观、简便,国内和国际上疲劳试验多以应力突变和肉眼观测裂纹作为疲劳失效标准。

二是通过现有研究成果 $S-N$ 曲线,计算疲劳累计损伤度判断剩余寿命,这是现在最简便、运用最广泛的方法,该方法需依赖较精确的荷载统计和应力计算或监测该方法基于其他成果的对比参照,将损伤度简化为——对应关系,存在一定的经验或半经验性质,通常应用于疲劳开裂前的损伤判断,作为疲劳开裂寿命的评价。

三是基于断裂力学的临界值法,包括裂纹临界长度、临界应力强度因子、临界扩展速率等因素。通过断裂力学分析,研究疲劳开裂的发展规律以及疲劳裂纹扩展的全过程,判断各因素的变化规律,该方法考虑初始缺陷、扩展过程,结果更接近实际,但临界值较难判定、计算过程复杂。

四是基于可靠度分析方法,该方法考虑因素全面,理论依据充分,但分析时必须要做一定的模型假设和简化,且分析过程复杂,基于线弹性断裂力学的疲劳可靠性评估的理论已在国外得到了较多的应用,而在国内尚处于起步阶段。

目前这些方法在用于评估钢桥面板开裂后疲劳承载性能方面尚有许多细节有待研究。

1.2.4 钢箱梁疲劳损伤检测及修复

钢箱梁疲劳裂纹特征多样,产生原因复杂,维护方案的选择需要借助检测技术进行判断,然后确定对应修复方法。欧美、日本等国已将钢桥疲劳问题列为重点研究对象,并在桥梁维修手册中进行了一些规定和说明。我国现有的规范涉及钢箱梁疲劳裂纹成因和检测技术的内容较少,对于钢箱梁疲劳裂纹的检测,依然以目视检查为主,辅以必要的工具(如放大镜、游标卡尺、钢尺等)。如果需要精确判断较大裂纹的宽度和深度以及发现细微裂纹,则需要借助仪器检测。常用的疲劳裂纹检测方法,主要有无损检测和有损检测两种。由于有损检测会对结构

造成一定的破坏,在役钢箱梁的疲劳裂纹检测一般不用。部分无损检测技术已用于钢箱梁疲劳裂纹的检测,但没有形成系统的检测方法。

常用疲劳裂纹无损检测方法,如磁粉检测法[图 1-3a)]、超声波检测法[图 1-3b)]、声发射检测法等,已应用于钢箱梁疲劳裂纹的检测,但各有其优缺点。磁粉检测法适用于铁磁性材料表面和近表面的无损检测,显示直观、结果可靠,但该方法难以正确判定缺陷性质和埋藏深度。超声波检测法探测速度快、灵敏度高,但是对于复杂的结构,评定结果受探伤人员的经验和技术熟练程度的影响较大。声发射检测法可检测动态裂纹,但受电噪声和机械声的影响较大,定位精度不高。其他无损检测技术,如 X 射线检测法、脉冲涡流检测法、红外线热成像检测法等^[38,39],均有着各自的应用特点,在钢箱梁维护过程中的适用性有待研究。隐蔽位置的疲劳裂纹检测以及在交通荷载作用下的裂纹动态检测,目前仍有许多问题尚未解决。

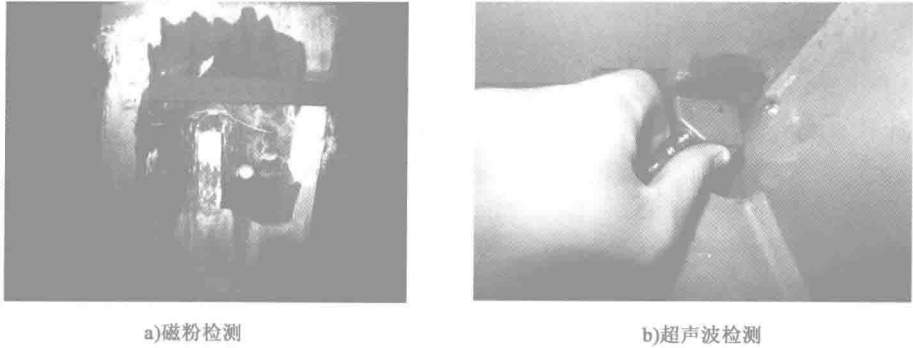


图 1-3 无损检测技术

针对疲劳裂纹的修复技术,目前在钢结构中常用的疲劳裂纹修复方法,主要有止裂孔法[图 1-4a)]、裂纹焊合法、钢板补强法、碳纤维补强法[图 1-4b)]及渗透填充法^[40,41]。但考虑到钢箱梁复杂的局部构造,大多焊缝细节只有止裂孔法和裂纹焊合法适用,其他方法更多地适用于面板上的疲劳裂纹。但钢箱梁受力复杂,采用止裂孔法对疲劳裂纹进行临时性止裂以延缓其扩展速率所取得的效果并不好,一段时间后疲劳裂纹往往会穿过止裂孔,继续扩展;而裂纹焊合法虽然是对疲劳裂纹修复的一种比较彻底的方法,但该方法最大的缺点是对重焊的质量要求很高,否则会引入新的缺陷,易引起二次开裂。日本近几年提出了 ICR 处理的修复方法[图 1-4c)],开裂试件经过 ICR 处理后,疲劳裂纹的开口产生闭合,其裂纹扩展速率大大降低,提高疲劳剩余寿命。这个方法还能够对焊缝进行预处理,通过塑性变形施加残余压应力,以提高局部疲劳强度^[42-44]。但 ICR 处理技术的研究目前也处于起步阶段,国内无相关的研究,在实桥修复中的实用性、局限性等还需进一步分析研究。

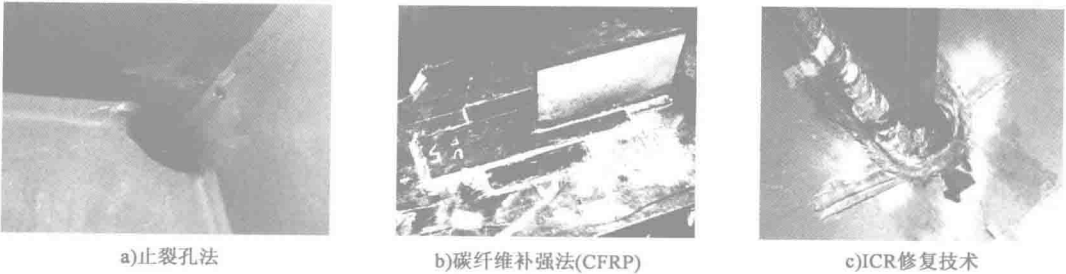


图 1-4 疲劳裂纹修复技术

1.3 缆索支承桥梁钢箱梁桥疲劳研究发展方向

1.3.1 试验手段

我国现阶段钢桥疲劳设计大多借鉴现有的国外规范,未有可参考的基于国内加工工艺水平针对钢桥面板的疲劳强度曲线。疲劳试验结果具有较大离散性,验证钢箱梁各焊接细节疲劳强度曲线需要进行大量疲劳试验。国内基于名义应力方法的大尺寸构造细节疲劳试验,大多采用 MTS 大型液压伺服疲劳试验机作为加载仪器[图 1-5a)]。这种试验机能够进行足尺寸的钢箱梁节段模型试验,但试验装置购置投入大、试验能耗高、加载频率低,往往得到一个数据点少则半个月长则半年以上。针对某一类构件细节总结其疲劳强度曲线需要至少几十个数据点,常规疲劳试验需要投入较多时间以及高昂费用。日本新研制的振动型疲劳试验机[图 1-5b)],通过电动机转动带动偏心激振器输出荷载,通过弹簧传力施加预应力和调节振幅,振动频率可达 20Hz,试验成本比传统疲劳试验大幅降低。

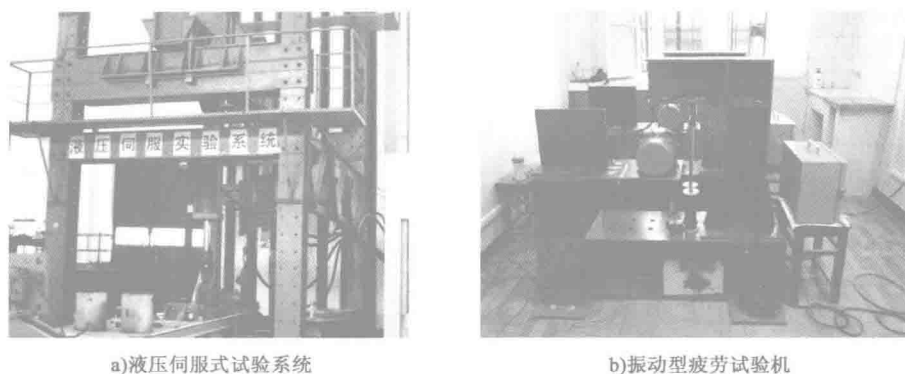


图 1-5 试验仪器

随着我国桥梁建设的推进,高强钢、新型结构用得越来越多,由于构件疲劳性能受构件细节、材料和制造工艺的影响较大,探索和发展新的试验手段,足尺大模型和细节模型试验相结合,成为疲劳试验发展趋势。

1.3.2 理论研究

近十几年来,许多公路桥梁车流量日益增长,超载问题越发严峻,铁路桥梁则需要适应更高的车速。与此同时,我国钢桥用材的屈服强度从 240MPa 提高到 420MPa,一些新型焊接细节和更优化的钢结构形式不断出现。这些都意味着我国钢桥疲劳的理论研究面临更大的挑战。

针对钢箱梁疲劳损伤理论的研究,我国可参考的规范尚停留在 20 年前。随着国际上疲劳理论研究的不断进步,原来钢桥领域尚未考虑到的复杂工况或条件得以继续更深入地研究。如钢箱梁的闭口加劲钢桥面板承受的车轮荷载作用位置与大小不断改变,焊缝处于弯曲、剪切与扭转引起的复杂多轴受力状态;再如钢箱梁结构由于各细节的应力水平相差不大,多处裂纹

共同作用不可避免。这些问题都是切实存在,但以往由于理论限制而尚未深入讨论。如今,在其他领域已开展了很多类似的试验及理论研究,如在机械领域,针对焊接接头主应力轴旋转而引起的多轴疲劳,已建立多轴疲劳破坏准则、基于临界面法的多轴疲劳寿命预测方法等^[45-47];在航空航天领域,国内外研究人员发表了许多的裂纹扩展概率断裂力学(PFM)模型,研究成果为钢桥多部位裂纹损伤分析方法奠定了初步的理论基础^[48-49]。

我国还需加强工程实用的疲劳理论研究,如疲劳设计的目标量化、新材料的应用分析等,材料、工艺等制造因素的理论支持不可忽视。比如,加拿大 Albert 大学与 Queen 大学的研究成果与 20 世纪 60 年代各国的研究结果均显示,采用以往的焊接工艺,钢材在屈服强度上的优势不一定与焊接细节的疲劳成正比。我国传统焊接工艺不能满足高强钢抗疲劳要求,随着桥梁用钢不断向强度及性能更高的要求发展,必须在焊接工艺或焊缝处理手段方面开发新技术以支撑高强钢在钢桥领域的应用。

1.3.3 钢箱梁维护技术及其标准化

钢箱梁后期维护是目前国内外研究的热点问题之一。现阶段我国在钢桥维护方面的研究还比较滞后,特别是相应设计规范在这方面的研究还亟待进一步完善。维护手段仅停留在对检测出来的裂缝进行扩缝焊接或局部换板的处理上,实桥运营过程中,尽管也有健康检测系统进行实时监测,但其关注重点是桥梁整体状态(图 1-6),对疲劳损伤的针对性不足。

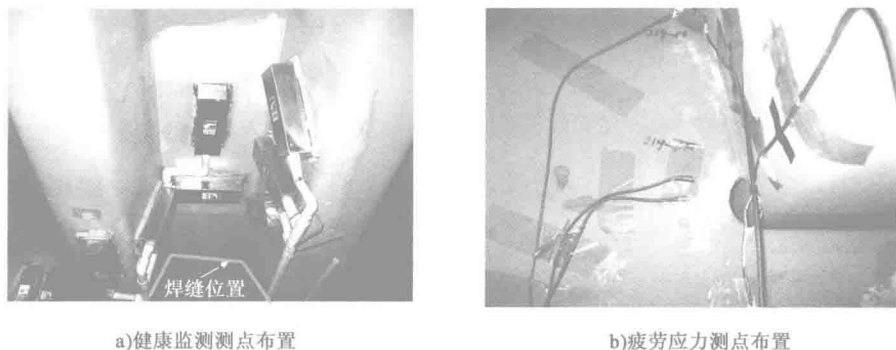


图 1-6 钢箱梁局部应力测点布置对比

美国的桥梁养护手册中,比较重视桥梁耐久性不足的影响,尤其强调了对腐蚀病害检测和防治。美国重视无损检测技术的应用,并针对较成熟的无损检测技术(如雷达、冲击波法)制定了技术标准。但是由于各国钢桥所处环境迥异、材料及施工工艺也有较大不同,国外的钢桥养护技术准则并不一定适用于我国钢桥。另外,我国某些公路钢桥上车流量巨大,超载的情况严重,需要制定具有针对意义的养护规程。

我国针对钢箱梁已有疲劳病害的维护工作尚处于起步阶段,部分研究对大跨度桥梁设计寿命期内的监测、维护与管理策略做了一些原则性的规定^[50],如江阴大桥管理中心编制的《大型桥梁养护管理》对钢箱梁出现疲劳裂纹时的处理做了一些规定^[51]。但相比日本以及欧美等桥梁大国,这些研究目前大多都处于理论阶段,内容较为宏观,没有完善的检修方法,无法投入应用。我国现有的规范涉及钢箱梁病害评定及检修的内容较少,缺乏针对性,且可操作性较

差。河海大学针对钢箱梁的评定、检测、修复等进行了系统的研究^[52,53],提出了考虑钢箱梁结构特点的针对性维护方法。对钢箱梁维护技术开展相关研究,编制相应的维护及修复技术指南具有十分重要的科学意义和工程应用价值。

1.4 结 语

钢箱梁的局部疲劳问题,无法通过设计及构造彻底避免,且贯穿桥梁整个运营阶段,影响因素众多。认识钢箱梁中存在的疲劳问题,不仅能为我国缆索支承桥梁中钢箱梁的维护工作提供理论与技术支持,而且对提高我国钢桥的设计和制造水平也具有非常重要的意义。目前我国钢箱梁疲劳损伤相关研究,已经成为桥梁领域的热点方向,深入研究并制定符合我国国情的公路桥梁疲劳荷载谱,并针对高强钢疲劳评价及多轴和多裂纹评估等问题进行研究,有利于我国的研究水平和研究成果缩短与国外差距,并可为制定符合我国国情的钢箱梁疲劳维护相关标准或规程提供依据。

本章参考文献

- [1] 项海帆. 世界大桥的未来趋势——2011年伦敦国际桥协会议的启示[C]//第二十届全国桥梁学术会议论文集(上册). 北京:人民交通出版社,2012.
- [2] 葛耀君,项海帆. 桥梁结构的耐久性和安全性思考[J]. 预应力技术,2011(01).
- [3] 潘际炎. 中国钢桥[J]. 中国工程科学,2007,9(7):18-26.
- [4] American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association. AREMA Manual for Railway Engineering. Chapter 15 Steel Structures. USA: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, 2002.
- [5] DOEBLING S W, FARRAR C R. The State of the Art in Structural Identification of Constructed Facilities[R]. The ASCE committee on Structural Identification of Constructed Facilities. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1999.
- [6] 土木学会鋼構造委員会. 厚板溶接継手に関する調査研究小委員会報告書[R]. 日本:2007.
- [7] 张允士,李法雄,熊锋,等. 正交异性钢桥面板疲劳裂纹成因分析及控制[J]. 公路交通科技,2013,30(8):75-80.
- [8] WONG K Y. Structural Identification of Tsing Ma Bridge [J]. Transaction of the Hong Kong Institute of Engineers, 2003, 10(1): 38-47.
- [9] 孔祥福,周绪红,狄谨,等. 钢箱梁斜拉桥正交异性桥面板的受力性能[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(3):52-56.
- [10] Xiao Z G, Yamada K, Inoue J, et al. Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck[J]. International journal of fatigue, 2006, 28(4): 409-416.
- [11] Kwon K, Frangopol D M. Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data[J]. International Journal of Fa-