



同濟大學 1907-2017
Tongji University



总主编 伍江 副总主编 雷星晖

余倩倩 顾祥林 著

粘贴碳纤维增强复合材料改善焊接结构 和含缺陷钢板的疲劳性能研究

Fatigue Behavior of Welded Joints and Centre
Cracked Steel Plates Strengthened with Carbon
Fibre Reinforced Polymer Materials



同濟大學出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

余倩倩 顾祥林 著

粘贴碳纤维增强复合材料改善焊接结构 和含缺陷钢板的疲劳性能研究

Fatigue Behavior of Welded Joints and Centre
Cracked Steel Plates Strengthened with Carbon
Fibre Reinforced Polymer Materials



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

钢结构构件在服役过程中,受到外界荷载和环境因素的共同作用,疲劳裂纹易从应力集中处萌生、扩展。粘贴碳纤维符合增强复合材料补强,能够有效地改善钢结构构件疲劳性能。本书对碳纤维增强复合材料补强含先天细小缺陷的焊接结构和不同程度初始损伤的构件展开研究,为不同形式补强钢构件疲劳曲线提供基础数据,为设计修缮提供理论依据。

本书适合土木、材料专业科研人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

粘贴碳纤维增强复合材料改善焊接结构和含缺陷钢板的疲劳性能研究 / 余倩倩,顾祥林著. —上海: 同济大学出版社, 2017. 8

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978 - 7 - 5608 - 7003 - 8

I. ①粘… II. ①余…②顾… III. ①非金属复合材料—补强—焊接接头—研究 IV. ①TG441.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093839 号

粘贴碳纤维增强复合材料改善焊接结构和含缺陷钢板的 疲劳性能研究

余倩倩 顾祥林 著

出品人 华春荣 责任编辑 吕 炜 熊磊丽

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 15

字 数 300 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 7003 - 8



定 价 71.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何晶晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城 莫天伟 夏四清 顾 明 顾祥林 钱梦騷
徐 政 徐 鉴 徐立鸿 徐亚伟 凌建明 高乃云
郭忠印 唐子来 闾耀保 黄一如 黄宏伟 黄茂松
戚正武 彭正龙 葛耀君 董德存 蒋昌俊 韩传峰
童小华 曾国荪 楼梦麟 路秉杰 蔡永洁 蔡克峰
薛 雷 霍佳震

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前 言

钢结构构件在服役过程中,受到外界荷载和环境因素的共同作用,疲劳裂纹易从应力集中处萌生、扩展。近年来,粘贴纤维增强复合材料补强成为一种新兴的钢结构疲劳损伤修补方式。已有研究表明,粘贴碳纤维增强复合材料(carbon fibre reinforced polymer, CFRP)补强,能够有效改善钢构件疲劳性能。但是,现有的研究大多关注于 CFRP 补强含微小人工缺陷的试件,有必要对 CFRP 补强含先天细小缺陷的焊接结构和不同程度初始损伤的构件展开进一步研究。

选取非承重十字形焊接接头,研究其粘贴 CFRP 布补强后的疲劳性能,主要考虑 CFRP 补强率的影响。试验过程中,观察到试件在焊趾处或母材处断裂。补强后,试件疲劳强度提高 16.2%~29.1%。

继而采用有限元数值方法,对此类焊接接头焊趾处应力集中系数和裂纹尖端应力强度因子进行参数分析。主要考虑了焊趾半径、补强率、补强材料弹性模量、裂纹深度和单/双面粘贴等多种因素的影响。计算结果表明,相比未补强试件,应力集中系数和应力强度因子在补强试件中下降趋势明显。焊趾半径和补强率是影响此类焊接接头疲劳性能的重要因素。提高 CFRP 布和粘结材料的弹性模量有助于进一步提高补强效果。

对 21 个平面外纵向焊接接头试件进行疲劳试验,分别采用 CFRP 布和 CFRP 板双面粘贴补强。试验过程中记录试件破坏模式和对应的疲劳寿命。发现疲劳裂纹从焊趾处萌生,逐步扩展直至试件断裂破坏。试验数据略显离

散,补强试件疲劳寿命最多延长至 135%。

与之类似,采用有限元方法对试验试件进行建模,分析补强后试件焊趾处应力集中系数的变化情况。参数分析结果表明,粘贴 CFRP 材料补强能够有效改善此类焊接接头焊趾处应力集中程度,降低钢板应力场。补强率的增加有利于提高试件疲劳性能。采用较高弹性模量的 CFRP 材料可以获得更好的补强效果,且这种趋势在 CFRP 板补强体系中更为明显。已有的数据显示,粘结材料弹性模量对应力集中系数影响不大。进一步采用边界元方法分析经 CFRP 补强的此类焊接接头疲劳裂纹扩展全过程。首先通过对比数值结果和文献中 CFRP 板补强含单面焊接钢板的试件试验结果来验证该方法,继而对补强体系中单/双面补强、单/双面焊接和 CFRP 弹性模量等因素进行研究分析。计算结果表明,双面粘贴 CFRP 板补强更为有效。双面焊接试件相比单面焊接试件疲劳寿命较短。对于双面粘贴试件,提高 CFRP 板弹性模量能够有效提高补强效率;而对于单面粘贴试件,CFRP 弹性模量对试件疲劳寿命影响不大。

为了剔除焊缝内初始缺陷和焊趾几何参数离散性对研究结果的影响,进一步调查初始疲劳损伤对 CFRP 补强钢构件疲劳性能的影响,采用含不同长度线裂纹的钢板试件进行疲劳试验,以研究在不同程度疲劳损伤情况下粘贴 CFRP 材料的补强效率。同时考虑了补强粘贴方式和 CFRP 弹性模量的影响。试验结果表明,不论初始损伤程度如何,采用 CFRP 材料补强均能够有效减缓裂纹扩展速率,延长试件残余疲劳寿命。采用高弹性模量 CFRP 板、覆盖初始裂纹粘贴和在裂纹扩展初期(损伤程度较小)采取补强措施,能够进一步提高补强效率。

采用有限元方法对含缺陷钢板裂纹尖端应力强度因子进行参数分析。变量包括裂纹长度、单/双面粘贴和 CFRP 板弹性模量。数值结果表明,在裂纹扩展后期采取补强措施,应力强度因子下降更为明显。单面补强钢板试件,存在平面外弯曲的现象,相比双面粘贴试件补强效率降低。提高 CFRP 板弹性模量,对双面或单面补强钢板试件,均能够大幅降低裂纹尖端的应力

强度因子值。同时采用边界元方法对此类试件疲劳裂纹扩展全过程进行分析。预测得到的疲劳裂纹扩展过程及疲劳寿命和试验结果吻合良好,表明边界元法能够有效预测 CFRP 板补强钢板的疲劳性能。在此基础上,采用边界元模型对补强体系中的重要参数,包括粘贴长度、补强率、CFRP 板弹性模量以及粘结层剪切模量进行分析,研究它们对裂纹尖端应力强度因子的影响。参数分析结果显示,补强体系中存在一个有效粘结长度。相比普通弹性模量 CFRP 补强体系,高弹性模量 CFRP 补强体系中的有效粘结长度较大。随着补强率的增加,裂纹尖端应力强度因子明显下降。采用高弹性模 CFRP 材料能够达到更好的补强效果。提高粘结层剪切模量能够降低补强钢板裂纹尖端应力强度因子,但当粘结层剪切模量超过 350 MPa 后,应力强度因子下降速率明显减缓。

采用线弹性断裂力学,基于未补强钢板裂纹尖端应力强度因子经典解法,考虑补强后钢板中应力场的变化和由此引起的几何修正系数变化,提出 CFRP 补强含中心缺陷钢板裂纹尖端应力强度因子计算方法。采用本书和文献中试验结果比较验证,试验数据涵盖多种不同参数,包括不同程度初始缺陷、补强材料几何尺寸及力学性能和补强粘贴方式等。结果表明,这种方法能够偏于保守地计算粘贴 CFRP 的含缺陷钢板裂纹尖端应力强度因子,且结果合理准确。进一步采用这种方法分析 CFRP 弹性模量、补强率和粘贴长度对裂纹尖端应力强度因子的影响。数值计算结果的趋势和边界元方法参数分析结论一致。

本书拓展了 CFRP 补强焊接接头和含不同程度初始损伤构件方面的研究,并对这种补强方法提出了一些建议。为不同形式焊接接头的疲劳曲线提供基础数据,为设计修缮提供理论依据。

目 录

总序
论丛前言
前言

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究现状	2
1.3.1 钢结构疲劳损伤及其补强方法	3
1.3.2 用于钢结构补强的纤维增强复合材料及粘结剂	5
1.3.3 粘贴 CFRP 材料改善钢结构构件疲劳性能试验研究	7
1.3.4 粘贴 CFRP 材料改善钢结构构件疲劳性能数值模拟分析	13
1.3.5 粘贴 CFRP 材料改善钢结构构件疲劳性能理论分析	16
1.3.6 小结	22
1.4 研究内容	22
第 2 章 粘贴 CFRP 改善非承重十字形焊接接头疲劳性能试验研究	24
2.1 非承重十字形焊接接头试件	24
2.2 非承重十字形焊接接头试验装置和加载制度	28
2.3 非承重十字形焊接接头试件破坏模式	28
2.4 非承重十字形焊接接头试件疲劳寿命	29
2.5 本章小结	31

第 3 章	粘贴 CFRP 改善非承重十字形焊接接头疲劳性能数值模拟分析	32
3.1	影响非承重十字形焊接接头应力集中系数的参数分析	32
3.1.1	有限元模型	33
3.1.2	有限元计算结果	34
3.1.3	应力集中系数	36
3.1.4	疲劳寿命	39
3.2	影响非承重十字形焊接接头应力强度因子的参数分析	41
3.2.1	应力强度因子简介	41
3.2.2	ABAQUS 中的应力强度因子求解	43
3.2.3	有限元模型	43
3.2.4	有限元计算结果	45
3.2.5	数值解和经典解的比较	49
3.2.6	CFRP 布补强率对应力强度因子的影响	51
3.2.7	裂纹深度对应力强度因子的影响	52
3.2.8	CFRP 布弹性模量对应力强度因子的影响	53
3.2.9	粘结材料弹性模量对应力强度因子的影响	54
3.2.10	单/双面补强对应力强度因子的影响	57
3.3	本章小结	59
第 4 章	粘贴 CFRP 改善平面外纵向焊接接头疲劳性能试验研究	61
4.1	平面外纵向焊接接头试件	61
4.2	平面外纵向焊接接头试验装置和加载制度	65
4.3	平面外纵向焊接接头试件破坏模式	66
4.4	平面外纵向焊接接头试件疲劳寿命	68
4.5	平面外纵向焊接接头试件疲劳裂纹扩展	70
4.6	本章小结	71
第 5 章	粘贴 CFRP 改善平面外纵向焊接接头疲劳性能数值模拟分析	72
5.1	影响平面外纵向焊接接头应力集中系数的参数分析	72
5.1.1	有限元模型	72
5.1.2	有限元计算结果	74
5.1.3	应力集中系数	77
5.1.4	疲劳寿命	79

5.2	平面外纵向焊接接头疲劳裂纹扩展全过程模拟	82
5.2.1	文献中的试验研究	83
5.2.2	用边界元方法模拟疲劳裂纹扩展过程简介	85
5.2.3	边界元模型	86
5.2.4	边界元方法预测结果和试验结果的比较	88
5.2.5	补强粘贴方式影响	96
5.2.6	焊接钢板影响	101
5.2.7	CFRP 弹性模量影响	104
5.2.8	焊接接头初始损伤预测	106
5.3	本章小结	107
第 6 章	粘贴 CFRP 改善含缺陷钢板疲劳性能试验研究	109
6.1	含缺陷钢板第一批疲劳试验	110
6.1.1	含缺陷钢板第一批试件	110
6.1.2	含缺陷钢板第一批试验装置和加载制度	112
6.1.3	含缺陷钢板第一批试件破坏模式和疲劳寿命	113
6.1.4	含缺陷钢板第一批试件疲劳裂纹扩展	114
6.1.5	不同程度初始损伤的影响	118
6.2	含缺陷钢板第二批疲劳试验	120
6.2.1	含缺陷钢板第二批试件	120
6.2.2	含缺陷钢板第二批试验装置和加载制度	124
6.2.3	第二批试验疲劳裂纹扩展测量	124
6.2.4	第二批试件破坏模式和疲劳寿命	126
6.2.5	疲劳裂纹扩展	131
6.2.6	不同程度初始损伤的影响	136
6.2.7	补强体系的影响	137
6.2.8	与已有文献结果的比较	139
6.3	本章小结	142
第 7 章	粘贴 CFRP 改善含缺陷钢板疲劳性能数值模拟分析	144
7.1	影响含缺陷钢板应力强度因子的参数分析	144
7.1.1	有限元模型	144
7.1.2	有限元计算结果	146

7.1.3	数值解和经典解的比较	148
7.1.4	裂纹长度影响	149
7.1.5	单/双面补强影响	150
7.1.6	CFRP 板弹性模量影响	151
7.2	含缺陷钢板疲劳裂纹扩展全过程模拟	152
7.2.1	边界元模型	152
7.2.2	边界元方法预测结果和试验结果的比较	154
7.2.3	应力分析	158
7.2.4	应力强度因子分析	164
7.3	本章小结	175
第 8 章	粘贴 CFRP 改善含缺陷钢板疲劳性能理论分析	177
8.1	试验研究介绍	178
8.1.1	作者进行的疲劳试验	178
8.1.2	相关文献的试验结果	178
8.2	CFRP 补强含缺陷钢板裂纹尖端应力强度因子分析方法	181
8.2.1	未补强钢板裂纹尖端应力强度因子经典解	181
8.2.2	CFRP 补强钢板应力强度因子求解	182
8.3	未补强钢板试件裂纹尖端应力强度因子经典解验证	187
8.4	CFRP 补强钢板试件裂纹尖端应力强度因子解法试验结果验证	188
8.4.1	计算试验结果对应的应力强度因子值	188
8.4.2	计算结果和试验结果比较	188
8.5	应力强度因子参数分析	193
8.5.1	CFRP 板弹性模量影响	193
8.5.2	CFRP 补强率影响	195
8.5.3	CFRP 粘结长度影响	199
8.6	本章小结	201
第 9 章	结论和展望	203
	参考文献	206
	后记	221