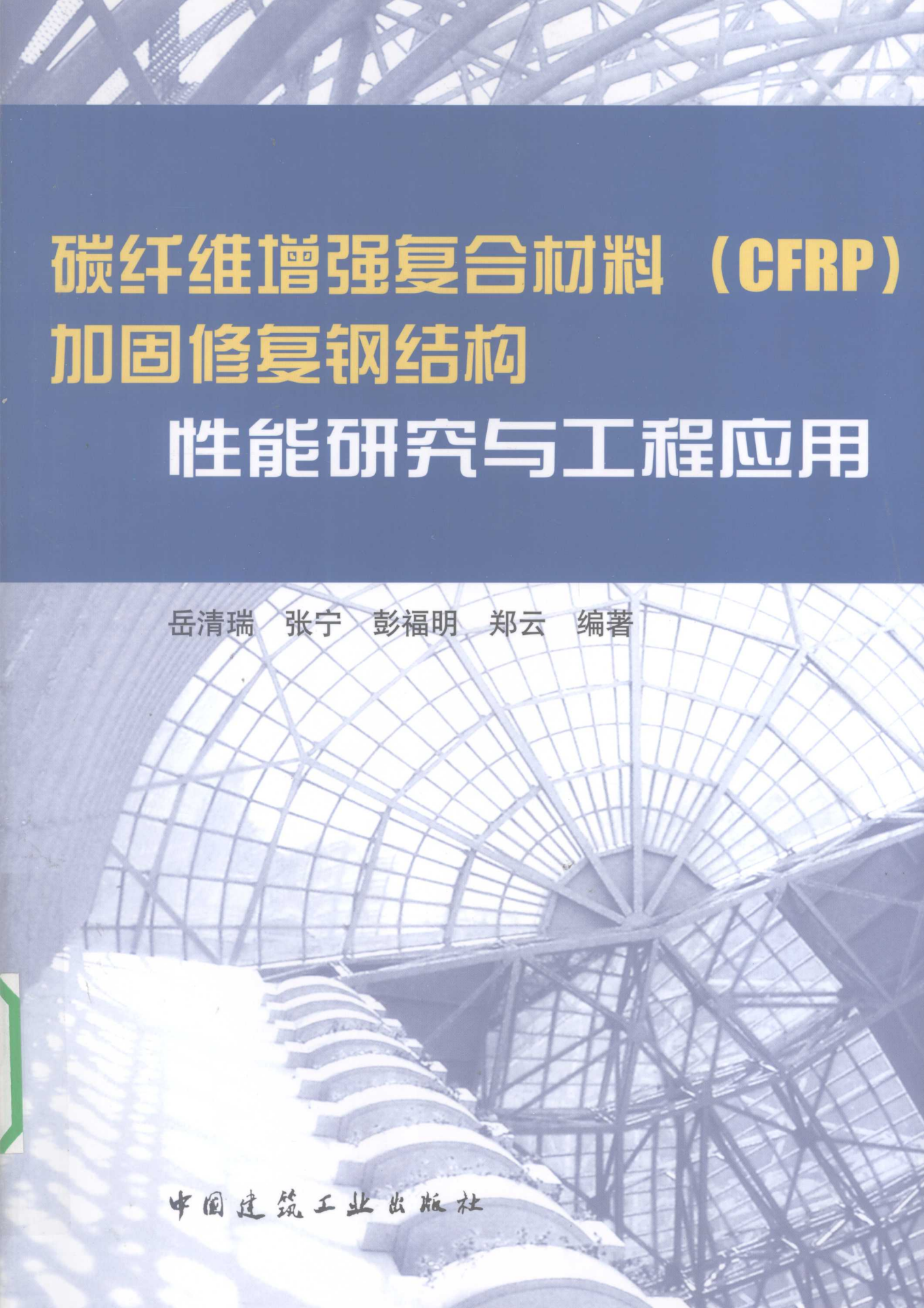


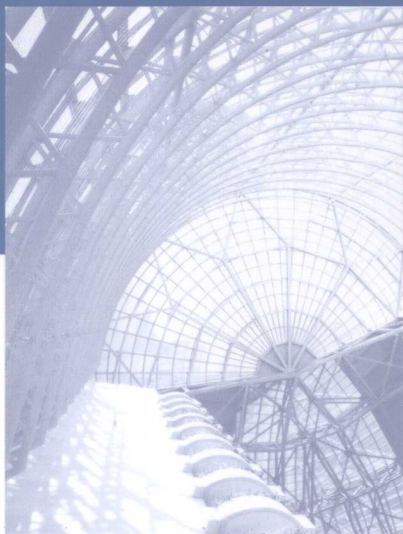


碳纤维增强复合材料 (CFRP) 加固修复钢结构 性能研究与工程应用

岳清瑞 张宁 彭福明 郑云 编著

中国建筑工业出版社

责任编辑：王莉慧、刘瑞霞
封面设计：王 显



经销单位：各地新华书店、建筑书店

网络销售：本社网址 <http://www.cabp.com.cn>

网上书店 <http://www.china-building.com.cn>

博库书城 <http://www.bookuu.com>

图书销售分类：建筑结构与岩土工程(S10)

ISBN 978-7-112-10573-1



9 787112 105731 >

(17498) 定价：36.00 元

碳纤维增强复合材料(CFRP) 加固修复钢结构性能研究 与工程应用

岳清瑞 张宁 彭福明 郑云 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

碳纤维增强复合材料 (CFRP) 加固修复钢结构性能研究与工程应用/岳清瑞等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2009

ISBN 978-7-112-10573-1

I. 碳… II. 岳… III. 碳纤维增强复合材料—钢结构—加固—研究 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 210665 号

结构工程加固是土木工程中重要的一个研究应用领域, 其中碳纤维增强复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymers, 简称 CFRP) 加固技术作为一种高效率、低成本的先进结构修复方法, 目前已经广泛应用于混凝土结构的修复中。而 CFRP 修复钢结构技术国内外还鲜有研究。相对于传统的钢结构加固方法, CFRP 加固技术有许多突出的优点, 如不会导致应力集中、不会产生残余应力、施工方便、易于维护等。本书对 CFRP 加固钢结构技术进行了系统的理论分析和试验研究, 并将该技术应用于工程实践。

本书共有 9 章, 主要包括目前国内外的研究和应用状况, CFRP 加固各类钢结构构件 (轴向拉伸构件、受弯构件和钢管线等) 的理论分析, CFRP 加固钢结构的疲劳寿命分析; CFRP 加固钢结构的静力拉伸试验, 疲劳性能试验 (包括含裂纹钢材、十字形横肋小试件、圆弧端吊车梁模型和 H 型钢梁), 粘结性能试验及粘结材料优选; CFRP 加固钢结构的影响因素分析, CFRP 加固钢结构的设计建议及算例, 工程应用和检验方法等。

本书可供国内外从事钢结构加固设计的技术人员和研究人员、工程施工人员、建设管理人员、高等院校相关领域的师生及其他关心工程结构加固问题的读者阅读和参考。

* * *

责任编辑: 王莉慧 刘瑞霞

责任设计: 赵明霞

责任校对: 兰曼利 孟楠

碳纤维增强复合材料 (CFRP) 加固修复钢结构 性能研究与工程应用

岳清瑞 张宁 彭福明 郑云 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京千辰公司制版

世界知识印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16¼ 字数: 405 千字

2009 年 3 月第一版 2009 年 3 月第一次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 36.00 元

ISBN 978-7-112-10573-1

(17498)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

在各类工业与民用建筑物、构筑物、桥梁、涵洞、隧道、压力容器、管道、塔桅等中存在大量的钢制结构。这些钢制结构在运行过程中会受到自然环境的侵蚀、外部荷载的作用或人为因素的破坏,不可避免地会存在各种各样的损伤和缺陷,当损伤累积到一定程度时,就会引起材料宏观力学性能的劣化,最终导致结构失效。

鉴于社会资源的稀缺性和工程建设的经济性,这些钢结构不可能一旦出现损伤就退役,同时结构损伤具有局部性和多发性的特点,因此为了延长这些损伤钢结构的使用寿命和确保结构安全工作,避免资源浪费,就必须对损伤结构构件进行修复。

传统的钢结构修复方法是把钢板焊接、螺接、铆接或者粘结到结构的损伤部位。这些方法虽在一定程度上改善了原结构缺陷部位受力状况,但同时又给结构带来一些新的问题。如采用螺接或铆接修复方法对损伤钢结构进行修复,则需要在母材上损伤部位区域开孔,这又会削弱了结构的受力截面,恶化了损伤区域的受力情况,形成新的应力集中区;另外普通螺栓在动荷载作用下易发生松动,高强度螺栓易发生应力松弛现象;而采用铆接修复,铆接处铆合温度过高,易引起局部材质硬化,铆合质量不易控制,不易确定其结构修补的效果。随着我国经济建设的迅速发展,钢结构缺陷问题日益突出,寻求经济高效的钢结构修补技术是现代土木工程领域迫切要求解决的问题。

CFRP 修复损伤钢结构 (Carbon Fiber Repair Steel Structures) 技术是一种新型、高效、实用的结构修复技术,与传统的钢结构修复方法相比,粘贴 CFRP 修复钢结构技术具有明显的优势:如 CFRP 材料自重轻,比强度和比刚度高,修复后基本不增加原结构的自重和原构件的尺寸;具有良好的抗疲劳性能和耐腐蚀性能,能够有效地改善动荷载环境下缺陷构件应力集中和承载情况,对酸、碱、盐等腐蚀介质具有很好的抗腐蚀能力;修复中不需要对母材钻孔,对母材承载截面基本无削弱等。其应用领域适用于钢结构承载力修复、疲劳修复、锈蚀修复和脆性修复等。

本专著作为第一部应用碳纤维增强材料修复缺陷钢结构 (CFSS) 新技术方面的著作,研究了碳纤维材料加固修复缺陷钢板、受弯钢梁、金属管线的静力性能和疲劳构件粘贴 CFRP 后的改善性能,并对 CFRP 加固修复钢结构的粘结机理、加固材料的要求、CFRP 与金属材料的表面处理、CFRP 与金属之间的荷载传递及构造措施、粘结耐久性、CFRP 与金属的电偶腐蚀等进行了论述。与 10 年前碳纤维加固混凝土技术的提出给土木工程加固领域带来的轰动一样,本书所论述的创新的技术方法,将会使 CFSS 技术在钢结构构件损伤修复方面发挥重要作用,具有很大的经济和社会效益。

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 FRP 修复钢结构的特点	2
1.3 国内外研究状况	4
1.3.1 国外相关研究状况	4
1.3.2 国内相关研究状况	11
1.4 本章小结	13
参考文献	14
第2章 CFRP 修复钢构件的应力及有限元分析	18
2.1 轴向拉伸构件	18
2.1.1 应力分析	18
2.1.2 有效粘结长度	23
2.1.3 复合构件的刚度	24
2.2 受弯构件	24
2.2.1 界面应力分析	26
2.2.2 CFRP 的拉力	29
2.2.3 加固梁的挠度	29
2.2.4 CFRP 修复受弯构件有限元分析	29
2.3 钢管线	33
2.3.1 轴对称平面应变问题的基本方程	33
2.3.2 承受内压的缠绕 CFRP 管线的应力应变计算	35
2.3.3 承受内、外压力钢管线的应力应变计算	36
2.3.4 未损伤钢管线的应力分析	36
2.3.5 损伤钢管线加固前的应力分析	36
2.3.6 损伤钢管线加固后的应力分析	37
2.3.7 CFRP 修复钢管线有限元分析	39

2.4	轴心受压构件	40
2.4.1	弹性稳定分析	41
2.4.2	有限元分析	42
2.5	CFRP 加固含孔钢板	43
2.5.1	含孔钢板的受力分析及性能评估	43
2.5.2	CFRP 加固含孔钢板性能的参数分析	45
2.6	CFRP 加固钢结构疲劳构件	48
2.6.1	应力强度因子概念	48
2.6.2	有限元模型	50
2.6.3	CFRP 加固含裂纹受拉钢板分析	54
2.6.4	CFRP 加固钢梁的应力强度因子分析	68
	参考文献	73
第3章	CFRP 加固钢结构的疲劳寿命分析	76
3.1	疲劳寿命分析方法	77
3.1.1	名义应力法	77
3.1.2	局部应力应变法	78
3.1.3	断裂力学分析方法	78
3.1.4	损伤力学方法	78
3.1.5	本文采用的疲劳寿命分析方法	79
3.2	疲劳寿命分析模型	79
3.2.1	疲劳裂纹扩展一般规律	79
3.2.2	考虑裂纹闭合效应的分析模型	80
3.2.3	疲劳寿命预测公式	81
3.3	疲劳寿命预测结果与试验结果比较	81
3.3.1	疲劳裂纹扩展速率参数 (C 、 m) 的确定	81
3.3.2	CFRP 加固钢板的疲劳寿命预测	82
3.3.3	CFRP 加固钢梁的疲劳寿命预测	84
3.4	CFRP 加固钢结构的疲劳验算	87
3.4.1	Miner 线性累积损伤理论	87
3.4.2	变幅疲劳的等效应力幅	87
3.4.3	CFRP 加固钢结构的疲劳验算方法	88
3.4.4	计算实例	89
	参考文献	94
第4章	CFRP 加固修复钢结构静力拉伸试验研究	95
4.1	CFRP 加固缺损钢板的静力拉伸试验	95
4.1.1	试件设计与试验材料	95
4.1.2	试验量测与试验结果分析	98

4.1.3	试验参数分析	103
4.2	CFRP 加固钢板的粘结应力及有效粘结长度试验	108
4.2.1	试验材料	108
4.2.2	试件设计与制作	109
4.2.3	试验现象	111
4.2.4	试验结果及分析	111
4.2.5	粘结应力分析及有效粘结长度	112
4.2.6	试验结论	114
	参考文献	114
第5章	CFRP 加固钢构件疲劳性能研究	115
5.1	CFRP 加固含裂纹钢板的疲劳试验研究	115
5.1.1	试验方案	115
5.1.2	试验过程	118
5.1.3	试验结果	120
5.2	十字形横肋小试件疲劳应用试验方案模拟研究	125
5.2.1	十字形横肋小试件制作及试验方案	125
5.2.2	十字形小试件 CFRP 疲劳加固有限元模拟	126
5.2.3	十字形小试件疲劳试验结果分析	127
5.3	圆弧端模型试件疲劳应用试验研究	129
5.3.1	圆弧端模型试件制作及试验方案	129
5.3.2	碳纤维加固圆弧端模型试件试验结果分析	130
5.3.3	碳纤维加固圆弧端模型试件疲劳有限元模拟	132
5.4	CFRP 加固钢梁的疲劳试验研究	134
5.4.1	试验方案	134
5.4.2	CFRP 粘贴加固工艺	136
5.4.3	主要试验结果	137
	参考文献	150
第6章	CFRP 加固修复钢结构的胶结性能	151
6.1	粘结机理	151
6.1.1	粘结的一般过程	152
6.1.2	粘结力的来源	152
6.2	粘结材料的选择	154
6.2.1	第一阶段: 粘结材料的初选	155
6.2.2	第二阶段: CFRP 与钢材之间的粘结性能	159
6.3	界面粘结力学分析	160
6.3.1	CFRP 端部胶层界面脱胶分析	161
6.3.2	钢梁疲劳裂纹处胶层界面局部脱胶分析	170

6.3.3 小 结	173
6.4 耐久性研究	174
6.4.1 CFRP 的耐老化性能	174
6.4.2 CFRP—钢材粘结耐久性	177
参考文献	180
第7章 CFRP 修复钢结构的影响因素	182
7.1 材料性能	182
7.1.1 钢 材	182
7.1.2 碳纤维增强复合材料	183
7.1.3 粘结材料	191
7.2 表面处理	202
7.2.1 钢材的表面处理	202
7.2.2 CFRP 材料的表面处理	204
7.3 CFRP 与钢之间的荷载传递	204
7.3.1 影响因素分析	204
7.3.2 改善荷载传递效果的措施	209
7.4 CFRP 修复钢结构的耐久性	211
7.4.1 水分的影响	211
7.4.2 热 老 化	211
7.4.3 化学介质	212
7.4.4 应力作用	212
7.4.5 改善耐久性的途径	212
7.5 碳纤维与钢材的电偶腐蚀	213
7.5.1 电偶腐蚀的基本知识	213
7.5.2 国内外关于碳纤维增强复合材料与钢材电偶腐蚀的试验研究	215
7.5.3 碳纤维增强复合材料与钢材电偶腐蚀的防护措施	217
7.6 本章小结	218
参考文献	219
第8章 CFRP 加固钢结构的设计建议及算例	221
8.1 钢结构加固原则	221
8.2 加固设计考虑的因素	222
8.3 加固设计的基本假定	222
8.4 材料选择	223
8.5 加固设计方法	223
8.5.1 CFRP 加固单轴拉伸构件	223
8.5.2 CFRP 加固受弯构件	224
8.5.3 CFRP 加固承受内压的钢管线	225

8.5.4 碳纤维疲劳加固方案应用设计模式	226
8.6 计算算例	226
参考文献	232
第9章 CFRP 加固修复钢结构工程应用及检验方法	233
9.1 国内外 CFRP 加固修复钢结构的工程实例	233
9.1.1 国外 CFRP 加固修复钢结构的工程实例	233
9.1.2 国内 CFRP 加固修复钢结构的工程实例	235
9.2 质量检验与验收	243
9.2.1 目测法	243
9.2.2 敲击法	244
9.2.3 超声波法	245
9.2.4 质量验收	246
9.3 CFRP 加固修复钢结构技术发展展望	247
参考文献	247

1.1 研究背景

在各类工业与民用建筑物、构筑物、桥梁、涵洞和隧道等工程结构中存在大量的钢结构,这些结构在国民经济中占有重要的地位,如钢结构桥梁、建筑物、构筑物、海岸和近海工程及石油化工用压力容器、管道、塔桅等。在这些钢制结构中,有些结构长期处于腐蚀环境中,有些结构经受交变荷载的作用;有些结构处于高温、高湿或高压的服役环境中,而有些结构内部则充满易燃、易爆、有毒、腐蚀等介质,它们在运行过程中会受到自然环境的侵蚀、外部荷载的作用或人为因素的破坏,不可避免地会存在各种各样的损伤和缺陷,尤其是在长期服役的钢结构中更为突出。材料的微观缺陷在载荷、环境等各种因素的作用下,逐渐成胚、孕育、扩展和汇合,当损伤累积到一定程度时,就会引起材料宏观力学性能的劣化,最终导致结构失效,例如钢制输送管道在周围环境和内部介质的作用下经常会发生化学或电化学腐蚀,严重时导致腐蚀穿孔和泄漏,一旦发生泄漏或爆炸,往往会发生火灾或中毒、爆炸等灾难性事故;同时,有毒有害物料进入大气、土壤和水源,既污染了环境,又造成了工程事故。

鉴于社会资源的稀缺性和工程建设的经济性,这些钢结构不可能一旦出现损伤就退役,同时结构损伤具有局部性和多发性的特点,因此为了延长这些损伤钢结构的使用寿命和确保结构安全工作,避免资源浪费,就必须对损伤结构构件进行修复。传统的钢结构修复方法是把钢板焊接、螺接、铆接或者粘结到结构的损伤部位。这些方法虽在一定程度上改善了原结构缺陷部位受力状况,但同时又给结构带来一些新的问题。

焊接修复技术是目前钢结构修复中普遍采用的方法,它是在结构损伤部位焊接金属盖板或型钢,使结构恢复正常承载能力而得以安全运行的修复技术。如埋地管道因腐蚀会引起坑、槽等体积缺陷,通过对缺陷部位的简单清理、打磨,采用与管道材质和规格相同或相近的片状或半环状管材焊接在缺陷部位并将其覆盖,然后进行一些简单热处理和表面防腐处理,从而使管道恢复承压能力。但是这种方法主要采用现场焊接,焊接时高温作用使焊接部位组织及性能劣化、材质变脆,断裂韧性降低,抵抗脆性断裂的能力变差,影响结构运行的安全性;另外焊缝或多或少会存在一些缺陷,在荷载作用下会萌生新的裂纹断裂源;同时在焊接过程中易产生氢脆、焊接后结构内部存在残余应力,和其他作用结合在一

起可能导致开裂,裂缝一旦扩展,就有可能一断到底,造成严重后果。

此外焊接修复技术对操作要求也较高,如焊接操作人员为熟练工人,可能修复焊缝的缺陷较少,而如果为非熟练工人操作,可能其所修复焊缝的焊接缺陷就较多,因此一般对修复结构,焊后需要进行现场探伤;另外由于焊缝高温熔化和冷却过程中成分和组织的变化,如果焊条选择不当,很容易造成焊缝的电位比母材低,焊缝与母材组成电偶腐蚀电池,将大大加速焊缝的电偶腐蚀速度;当损伤结构内存在大量易燃易爆介质时,修补期间还需要停止运行,焊接修复属于明火作业,对于壁厚不均的结构,如果焊接电流会穿透管壁造成介质泄漏,造成维修结构的爆炸危险,带来很大的经济损失。

如采用螺接或铆接修复方法对损伤钢结构进行修复,则需要在母材上损伤部位区域开孔,这又会削弱了结构的受力截面,恶化了损伤区域的受力情况,形成新的应力集中区;另外普通螺栓在动荷载作用下易发生松动,高强度螺栓易发生应力松弛现象;而采用铆接修复,铆接处铆合温度过高,易引起局部材质硬化,铆合质量不易控制,不易确定其结构修补的效果。

始于20世纪60年代的粘钢技术,它是用特制的胶粘剂将钢制盖板粘贴于钢结构的损伤部位,使钢制盖板与带缺陷的原结构紧密结合在一起,钢制盖板承担了原结构的部分荷载,降低了原结构缺陷部位承受的荷载,从而达到修复的效果。这种方法虽说避免了焊接、螺接、铆接等修复方法产生残余应力、削弱构件截面、劣化母材材质等的不足,但同时又带来钢制盖板容易锈蚀,维护费用较高,其厚度也较大,既不利于成形,施工工效低,又会在粘结界面产生较大的剥离应力,与界面剪应力共同作用导致界面过早发生剥离破坏,修复质量不易保证等缺陷,限制了该技术的应用。因此,寻求经济高效的钢结构修补技术是现代土木工程领域迫切要求解决的问题。

1.2 FRP 修复钢结构的特点

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymers,简称FRP)是由高性能纤维,如碳纤维(Carbon Fiber)、玻璃纤维(Glass Fiber)和芳纶纤维(Aramid Fiber)等与基体,主要是树脂(Polymer)体系按一定比例、并经过一定加工工艺制成的一种复合材料。它的性能与其组成和加工工艺密切相关,随着FRP的开发应用和粘结剂性能的不断改进,高性能复合材料依靠其优异的性能在航空、航天、体育、卫生、电子、兵器等领域得到了广泛的应用,至今已有三四十年的历史,目前在这些领域仍然是先进的主导修复技术。

20世纪80年代以来,FRP修补技术作为一种高效率、低成本的先进结构修复方法,即将已固化的、半固化的或未固化的FRP材料,粘贴到结构破坏损伤部位以完成结构修复的方法,已在土木工程中得到了很大重视并进行了广泛的研究与应用。目前碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,简称CFRP)修复混凝土结构技术已经成熟并广泛应用于混凝土梁、板、柱、桥墩等工程结构的修复中^[1-1-15]。而FRP粘结修补飞机、航空器部件的铝金属薄板缺陷的成功运用,为其向钢结构工程领域移植及进一步拓展提供了技术基础和借鉴。

FRP修复钢结构技术是通过在钢结构损伤区域表面涂覆特制的胶粘剂,将FRP片材粘贴到钢结构损伤部位的表面,使一部分荷载通过胶层传递到FRP片材上,降低了钢结

构损伤部位的应力水平,将钢结构和 FRP 粘结成整体,协调变形、共同工作,使裂纹扩展速率降低或制止了裂纹的扩展,以提高钢结构承载能力和改善其疲劳性能,延长了结构的使用寿命,从而提高结构服役安全可靠性的修复方法。

与传统的钢结构修复方法相比,粘贴 FRP 修复钢结构技术具有明显的优势^[1-6,1-7]:

(1) FRP 材料自重轻,力学性能优越,比强度和比刚度高,要达到同样的修复效果,FRP 的尺寸明显小于金属板的尺寸,同时 FRP 本身密度小,而粘贴修复又省去了紧固件,修复后基本不增加原结构的自重和原构件的尺寸;

(2) FRP 具有可设计性,即可以根据结构缺陷的严重程度和受力情况,在单向 FRP 中,通过改变组分和组分含量以改变其纵向和横向性能以及它们的比值;对于 FRP 板采用改变 FRP 铺层的取向与顺序而改变复合材料的弹性特性和刚度特性来设计复合材料的性能,从而适应特殊应用的要求,最大限度地提高结构的修复效果;

(3) FRP 具有可成形性,对于复杂曲面结构(如压力容器、管道、安全壳等)的修复,该方法具有特别的优势;

(4) FRP 具有良好的抗疲劳性能,能够改善动荷载环境下缺陷构件应力集中和承载情况,有效地阻止裂纹的继续扩展,从而提高结构的抗疲劳性能;

(5) 对母材损伤小,不需要对母材钻孔,对母材承载截面基本无削弱,不破坏原结构的整体性,不会形成新的应力集中源,避免了新的孔边裂纹的产生。不增加新的焊缝,不会产生残余应力,不会形成新的裂纹疲劳源;

(6) FRP 本身对酸、碱、盐等腐蚀介质具有很好的耐腐蚀性能,柔性的 FRP 修复任意封闭结构和形状复杂的被修复结构表面,基本上可以保证近 100% 的有效粘贴率,与金属表面有良好的界面粘结性能、密封性,减少了渗漏甚至腐蚀的隐患,很少出现二次腐蚀破坏现象,这一点对石油化工行业的压力容器、输送管道等结构尤为重要;

(7) 粘贴 FRP 修复钢结构是连续的面际连接(即两者相邻表面结合起来),整个粘结面都承受荷载,克服了焊接仅依靠边缘结合而内部不能结合的缺陷。钢结构与 FRP 构成整体,荷载从原钢结构传递到 FRP 更加均匀有效,应力分布更为均匀,大大缓解了应力集中,这些都显著地提高了静强度和刚度,抗疲劳性能好,延长了结构的使用寿命;

(8) 该方法施工便捷,简便易行,成本低,效率高,特别适合于现场修复。现场实施无需大型专用设备,可节省人工与机器设备搬运,修复所用的时间短,大约是常规修复方法所用工时的 1/3~1/5,狭小空间亦可施工;

(9) 施工过程中无焊接明火,现场主要采用常温固化工艺施工,安全可靠,对生产影响小,适用于特种环境,如燃气罐、贮油箱、井下设备(具有爆炸危险的情况)、电缆密集处或化工车间、炼油厂等环境;

(10) 有利于实现 CFRP 的自感知智能特性。可以利用碳纤维自身的导电性能,根据补强片电阻的变化规律来获得修复部位的应变及应力信息,实现对结构的安全监视与诊断。

因此,粘贴 FRP 修复钢结构技术是一种很有发展前途的新型结构修复技术,具有广阔的应用前景,它可以应用到飞机机身的裂纹修复、钢结构桥梁和建筑物的修复以及船体结构、压力容器、输送管道和钢储罐等的结构缺陷修复。

1.3 国内外研究状况

粘贴 FRP 修复钢结构时, 应选择合适的修复材料、正确地进行修复设计和选择正确的修复方案, 这就需要对原结构和修复后的复合结构进行深入的力学分析。同时, 为了评估该技术的修复效果, 必须对修复结构进行试验研究。根据分析手段的不同, 国内外的研究基本上是从两方面进行, 即理论分析和试验研究。

1.3.1 国外相关研究状况

在 20 世纪 70 年代, 在美国空军飞行力学研究室 (AFFDL)、Northrop 公司、Douglas 航空公司等率先采用 FRP 进行胶结修补飞机损伤构件, 随后澳大利亚、英国、法国等国家相继对这项技术展开了全面的研究和应用。

1.3.1.1 理论分析

由于 FRP 性能差异较大、粘贴质量的影响因素甚多, 因此用试验方法来研究 FRP 修复钢结构受到一定的限制。一般情况下, 理论分析方法是研究 FRP 粘贴修复技术的主要手段, 特别是在基础研究阶段, 通过理论计算分析, 可以用较少的费用, 获得大量有用的信息, 并为试验提供必要的数据, 然后做少量的验证性试验。

1. 解析方法

Erdogan, Arin 和 Ratwani 等人采用平面弹性理论的复变函数方法^[1-8~1-10], 以应力函数为出发点, 用解析方法分析了含裂纹金属板粘贴复合材料后的受力情况, 对金属板内裂纹尖端的应力强度因子、FRP 中的最大拉伸应力和胶层内的最大剪应力进行了分析。在该分析模型中, 胶层被认为是各向同性材料, 并能发生弹塑性变形; 金属板和 FRP 均处于平面应力状态, 两者之间的作用力通过胶层的剪切变形来实现, 并把胶层对金属裂纹板和 FRP 的剪切力作为体力, 在各自的厚度上均匀分布。

Keer, Lin 和 Mura 等人用傅立叶变换^[1-11], 分析了结构粘贴 FRP 后的修复效果。该求解方法较有特色, 采取了较少的假设, 长度方向虽然仍考虑为无穷大, 但裂纹板和修复板宽度则是有限的, 由于胶层厚度是有限厚度, 所以认为应该考虑胶层厚度的影响, 并假定不存在脱胶现象。但是, 裂纹板和修复板仅限于各向同性材料, 且两者的泊松比相同。因此, 在使用时受到很大的限制, 当修复板为 FRP 时, 此方法不能使用。

Sebastian 对工字形钢梁受拉翼缘外侧粘贴 FRP 后组合梁的弹-塑性性能进行了分析^[1-12], 考察了组合截面从弹性阶段发展到弹塑性阶段的全过程特性, 共分为五个阶段。由于粘贴了复合材料, 因此组合截面不再关于强轴对称, 对于这种截面需要由二个参数来定义它的弹塑性性能, 而且随着截面弹塑性曲率的增大中性轴向复合材料方向移动。分析时, 假定组合截面的变形仍符合平截面假定。

2. 数值方法

数值方法主要有边界元法和有限元法。数值方法的主要优点是不作许多假设, 适应性强, 分析时不受结构形状、受载情况和边界条件的限制, 能够比较真实地反映工程实际。

粘贴 FRP 修复钢结构时, 存在 FRP 与胶层之间和胶层与金属表面之间的界面, 因此

在建立有限元分析模型时,如何考虑修复结构的界面应力和建立相对真实的胶层数学模型是关键。Jones 和 Callinan 等人采用有限元方法^[1-13,1-14],研究了粘贴 FRP 修复中心穿透裂纹板的裂纹尖端应力强度因子、胶层中最大剪切应力和 FRP 中的最大拉伸应力。分析中将金属板与 FRP 板化成一般的平面单元,将胶层模型化成特殊的“胶元”,认为胶层只发生剪切变形,且限制在线弹性范围内,并且在线弹性范围内考虑整个修复结构的横向剪切变形。由于裂纹尖端存在应力奇异性、应力梯度较大,故一般在裂纹尖端使用裂尖奇异单元。后来,他们还将 FRP 修复的有限元方法推广到 FRP 结构的裂纹修补问题^[1-15]。Kan 和 Ratwani^[1-16]在计算中则考虑了胶粘剂非线性性能的影响,Chandra 等^[1-17]利用 J 积分与有限元相结合的办法计算了孔边裂纹板、中心穿透裂纹板的裂尖应力强度因子。

Tran 和 Shek 用有限元和边界元相结合的方法,分析了粘贴 FRP 后的修复效果^[1-18]。在这个分析模型中,采用剪切弹簧模型来模拟胶层的作用,将通过胶层传递的表面剪切力视为体力作用于裂纹板和 FRP 上,FRP 采用有限元方法分析,而裂纹板则采用边界元处理,并利用裂纹表面的边界条件进行求解。文中同时分析了单边粘贴修复和双边粘贴修复以及胶层厚度对裂纹尖端应力强度因子的影响。

Sun 等利用“双板-弹簧”模型考虑了中心穿透裂纹板的单边及双边粘贴修复问题^[1-19],并且计算了中心椭圆脱胶时裂尖的能量释放率。为了考察“双板-弹簧”模型的精度,他们同时还进行了三维有限元分析,三维计算结果表明,弯曲应力沿板厚为线性分布,这进一步表明可以使用二维板元来简化修复问题的建模。

Naboulsi^[1-20]、Schubbe^[1-21]采用三板技术分析了粘贴 FRP 修复裂纹钢结构。在他们的分析模型中,将裂纹金属板、胶层和 FRP 板都用二维 Mindlin 板单元来模拟,为了保证变形协调,在金属板-胶层界面和胶层-FRP 界面的节点之间引入约束方程。并采用该模型分析了金属板裂纹尖端的应力强度因子和胶层界面裂纹的能量释放率。

1.3.1.2 试验研究

国外对 FRP 修复钢结构的试验研究主要集中在以下几个方面:

1. FRP 修复高强铝合金薄板

FRP 修复钢结构最早是从航空领域开始应用的。由于飞机制造采用了大量的高强铝合金薄壁构件,因此,机身出现裂纹后,可以采用高性能的 FRP 进行修复和修复,既可以减轻修复的重量,提高使用的耐久性,同时,由于裂纹构件受力状态复杂,可以利用复合材料的可设计性进行优化,最大限度地利用复合材料的性能。

Jones 和 Callinan 在试验和计算的基础上研究了粘贴 FRP 修复前后金属板裂纹张开位移和应力强度因子之间的关系^[1-22],结果表明:对于中心穿透裂纹板,修复前后裂纹板的应力强度因子之比等于裂纹张开位移之比。他们还对粘贴硼/环氧复合材料修复铝合金的表面裂纹进行了有限元分析和试验研究^[1-23]。

Chandra 利用光弹试验方法^[1-24],研究了 CFRP 对裂纹尖端应力强度因子的影响,分析结果表明:含裂纹板经粘贴修复后,裂纹尖端的应力强度因子可下降 80%~90%。

Alawi 和 Saleh 对粘贴修复后的结构通过疲劳裂纹扩展试验^[1-25],研究了 FRP 的几何外形尺寸、原结构的表面质量、FRP 的数量、单面粘贴或双面粘贴对疲劳裂纹扩展速率的影响。其基本出发点是:通过对疲劳试验数据的统计分析,得出 Paris 裂纹扩展公式中的

材料常数,并认为粘贴修复结构中疲劳裂纹扩展速率降低的主要原因是由疲劳裂纹扩展公式中参数的改变引起的。由于疲劳试验试件的数量有限,没有得到原结构表面质量与修复效果的关系。Lai^[1-26]、Kam^[1-27]考察了粘贴碳/环氧复合材料修复裂纹铝合金板的疲劳性能。

Baker 等采用硼/环氧复合材料来修复飞机的金属构件^[1-28],并已成功用于军用飞机的修复中。Baker 还对含疲劳裂纹的 A12024-T3 构件粘贴硼/环氧复合材料修复进行了试验,研究了修复结构的脱胶及试验温度对修复效果的影响^[1-29],研究结果表明:脱胶出现在金属板裂纹周围,脱胶裂纹出现在界面上而不是出现在胶层内部,脱胶导致裂纹扩展速率的增大,文中提出了一种估计脱胶对修复效果影响的简单模型,通过试验还意外地发现:利用胶膜粘贴 FRP 修复裂纹板时,修复结构工作在 100℃ 下,修复效果仍然不受影响。

2. CFRP 修复钢结构

由于环境劣化导致钢结构桥梁截面严重削弱,交通量日益增加使现有的桥梁不能满足运行的需要,为了保证桥梁安全运行,就必须对现役损伤钢结构桥梁进行修复。

(1) 受弯构件修复

1) 修复自然腐蚀钢梁

Miller 对四个足尺钢梁进行了试验^[1-30],长 21 英尺(6.4m),截面为美国标准钢梁 S24 × 80。这些钢梁是从 Rausch Creek 桥上替换下来的损伤钢梁,钢梁受拉翼缘和腹板大部分截面都已被腐蚀掉,钢梁的刚度降低了 20%~32%。在钢梁受拉翼缘外侧表面粘贴 CFRP 板修复后,其刚度提高了 10%~37%,极限承载力提高了 17%~25%。试验采用的 CFRP 板由单向碳纤维(T-300 型碳纤维)和乙烯基树脂复合而成,纤维体积含量为 51%、抗拉强度为 930MPa、弹性模量为 112GPa、泊松比为 0.37、延伸率为 0.9%。

2) 修复人工切槽钢梁

Missouri-Folla 大学对粘贴 CFRP 板修复损伤钢梁进行了试验研究^[1-31],共完成了四根钢梁的三点弯曲试验,试验梁两端简支。钢梁长度为 2.74m、支座间距为 2.438m,钢梁截面为 W12 × 14;修复材料为 CFK200/2000,其抗拉强度为 2300MPa,拉伸弹性模量为 200GPa,宽度为 100mm,厚度为 1.4mm。第一个试件未修复,作为对比件;第二个试件也未修复,但是在受拉翼缘开有一宽度为 106mm 的槽口,用来模拟由于腐蚀而造成的截面严重削弱。第三个和第四个试件具有和第二根钢梁相同的槽口,第三根梁在全长范围内粘贴宽 100mm 的 CFRP 板,而第四根钢梁只在跨中四分之一范围内粘贴 100mm 宽的 CFRP 板,用来考察粘贴长度对修复的影响。为了减小侧扭屈曲的影响,在两端支座处和跨度四分点处采用四组横向支撑。试验加载过程中,试件 1 和试件 2 由于侧向屈曲而破坏;试件 3 和试件 4 由于槽口处存在应力集中和较大的剪切应力,因此剥离从槽口处开始,然后向 CFRP 板两端延伸,当 CFRP 板完全剥离后加载结束。试件 3(全长范围粘贴修复)CFRP 板的剥离相对较慢;对于四分之一范围内粘贴 CFRP 板的试件 4,整个 CFRP 板突然发生剥离破坏。与对比梁相比,修复梁的刚度略有增加,但承载力则显著提高,试件 3 的塑性承载能力增加了 60%,试件 4 的塑性承载能力增加了 45%。

Tavakolizadeh 和 Saadatmanesh^[1-32]对八根钢梁进行了四点弯曲试验,钢梁截面为 S5 × 10,长 1300mm。其中六个试件在受拉翼缘的跨中切槽,深度分别为 3.2mm 和 6.4mm。对每组切槽