

# CFRP 加固受拉钢板的研究进展

张宁<sup>1</sup>, 王志宇<sup>1</sup>, 付磊<sup>1,2</sup>, 王清远<sup>1,3</sup>

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 四川理工学院机械工程学院, 四川 自贡 643000;

3. 成都大学建筑与土木工程学院, 成都 610106)

**摘要:**传统的钢结构加固方法包括钢板焊接、螺栓连接和铆接等。这些加固方法都存在缺点, 容易产生应力集中现象。CFRP 具有比强度和比刚度高等特点, 在加固钢结构上显示出很好的效果。以未受损钢板、受损钢板和含焊缝钢板为被加固的受拉钢板, 分别从单轴静力拉伸试验和疲劳试验两方面总结了 CFRP 在受拉钢板加固中的应用; 比较了不同学者在研究 CFRP-钢板粘接界面力学性能时采用的方法及其结论。总结发现, CFRP 在加固受拉钢板中效果良好, 但加固措施的耐久性、CFRP 布与 CFRP 板加固效果的差异、新型组合加固方法等一系列问题仍有待研究。

**关键词:**CFRP; 受拉钢板; 裂纹; 疲劳加固; 有效长度

**中图分类号:**TU31

**文献标志码:**A

## 引言

由于设计失误、材料强度不足、耐久性差、施工不当等因素, 现有民用建筑与基础设施有相当一部分需要修复加固。再者, 随着设计规范标准的提高, 一些已建成的结构承载力达不到要求, 需要对原结构进行补强加固, 钢结构构件容易受到腐蚀和疲劳等因素的影响而导致承载力降低, 这使得钢结构加固势不容缓。

现有的钢结构加固方法通常在原结构上焊接、螺栓连接或者胶接钢板, 这些方法存在耐久性差、需要架立脚手架耗费人力物力、无法在复杂表面上使用、由于焊接或者螺栓连接造成的应力集中对结构疲劳性能的削弱<sup>[1]</sup>等缺点。使用 CFRP 材料加固金属构件已经广泛应用于航空航天领域, 然而其在土木工程尤其是钢结构中应用较少。CFRP 由于具有弹性模量高、疲劳性能好等优点, 特别适合于受拉钢结构构件的静力和疲劳加固。

然而, CFRP 加固钢结构也存在缺点, 主要为: (1) 结构胶粘接时的平整度对粘接效果影响很大, 且不易控制, 碳纤维布的平整度比碳纤维板的平整度更难控制<sup>[2]</sup>; (2) 结构胶的耐久性有待验证, 且由于碳纤维的导电性质, 容易造成电腐蚀<sup>[3]</sup>。

本文收集整理了近年来国内外关于 CFRP 加固受拉钢板的相关文献, 总结比较了不同加固措施的优缺点, 讨论分析了研究其静力和疲劳性能的不同试验方法。最后, 对 CFRP 加固受拉钢板的进一步研究提出了建议, 并提出了新型组合加固措施。

## 1 试验

### 1.1 静力试验

通过单轴拉伸试验获得加固构件在静力拉伸下的屈服强度、极限承载力和伸长率等相关性能。

#### 1.1.1 未受损构件的补强加固

工程中存在一部分构件: 其本身没有受损, 承载力

收稿日期: 2015-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(51308363; 50978174); 四川省科技支撑计划项目(2015GZ0245)

作者简介: 张宁(1990-), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 主要从事钢结构加固疲劳方面的研究, (E-mail) 1114949427@qq.com;

王志宇(1980-), 男, 四川成都人, 博士, 主要从事工程结构疲劳方面的研究, (E-mail) zywang@scu.edu.cn

也没有降低,但是随着设计标准的提高,其承载力达不到新规范的要求。这时需要对这类构件进行补强加固。

马建勋等人对碳纤维布粘贴加固后的钢板进行了单轴拉伸试验<sup>[4]</sup>,研究了 CFRP 布对试件屈服荷载、承载力和延性的影响,并对 CFRP 布与钢板的共同工作问题进行了初步分析。试验结果表明:(1)用碳纤维布加固的钢板,在屈服之前二者能够很好地共同工作,屈服之后碳纤维的应变增长滞后,直至碳纤维脱胶或被拉断;(2)钢板粘贴碳纤维布后,试件屈服荷载有明显提高,提高幅度为 16%~18%。并且,在粘贴良好的情况下,其提高幅度随粘贴面积的增加而增大,极限承载力可提高 16%~25%。破坏模式是 CFRP 布在断面附近被拉断,或 CFRP 布端部发生脱胶。脱胶程度和位置对极限承载力有较大影响,这说明结构胶的性能在钢构件加固中起着非常重要的作用。

李耘宇等人提出一种将 CFRP 与钢板复合而成的 FRP/钢复合板<sup>[5]</sup>,其方法为将充分浸渍树脂的 CFRP 布包裹在钢板上,以达到补强加固的效果。通过对该种 FRP/钢复合板的单轴拉伸试验发现:(1)随着碳纤维布层数的增加,钢板屈服前的刚度并未受到太大影响;(2)FRP/钢复合板有良好且稳定的二次刚度;(3)包裹碳纤维布一层、两层、三层的钢板的屈服荷载分别较纯钢试件提升了 35%、62%、100%,屈服荷载显著增大。

Pierluigi Colombi<sup>[6]</sup>等人试验研究了 CFRP 板对钢板的补强加固作用。通过在 CFRP 板表面粘贴应变片测得其单轴拉伸试验时的应变沿拉伸方向的变化情况。试验发现:构件的屈服和钢板的屈服同时发生,钢板屈服后,CFRP 板和钢板逐渐脱胶分离,极限承载力没有因为 CFRP 板的加固而增大,所有试件的破坏模式均为脱胶破坏。

### 1.1.2 受损构件的修复加固

钢材作为一种活性金属材料,其本身易受到腐蚀、疲劳荷载等因素的影响而产生薄弱截面、裂纹等应力集中部位。这些应力集中部位需要被及时发现并进行有效的加固。针对不同的受损情况,学者做了相关的静力实验研究。

张宁等<sup>[7]</sup>通过在钢结构缺陷部位粘贴 CFRP 布,检验了 CFRP 布对钢材截面减小部位的修复作用和对钢材屈服荷载的提高幅度。在试件中间位置两侧各开设一直径为 5 mm 的半圆孔以模拟钢结构的缺陷部位。试验结果发现,粘贴碳纤维增强复合材料可以明显提高钢结构的屈服承载力(16%以上),而对极限承载力的影响很小。复合构件的破坏形式为胶层破坏,碳纤维与钢板逐

渐剥离,脱胶至试件中部后荷载完全由钢板承担,钢板达到极限承载力而破坏。

杨勇新<sup>[8]</sup>在 CFRP 端部缠绕玻璃纤维布锚固,以降低 CFRP 端部的应力集中程度,从而延缓了该处的剥离,提高了碳纤维布的使用效率,从而使构件的屈服荷载进一步提高。

由于在螺栓连接或铆接时需要在母材上开孔,从而削弱了净截面,同时在洞口边缘形成应力集中区。因此有必要研究 CFRP 对开孔钢板处的修复加固作用。Pierluigi Colombi<sup>[6]</sup>等研究了 CFRP 板对开孔钢板的修复加固作用。在试件中心处开设一直径为 20 mm 的洞口,用于模拟螺栓、铆钉等洞口。沿横向和纵向等距离布置应变片以采集加固后洞口处 CFRP 板的应变。通过各个测点的应变值发现:在钢板屈服之前,CFRP 板上的应变保持良好的线性关系,到达屈服点后,CFRP 板的应变保持为一定值直至破坏。CFRP 板的两端最先脱胶,然后向中间的开孔处扩展。

Lam C C<sup>[9]</sup>使用 CFRP-钢双侧搭接试件模拟 CFRP 对板上裂缝的加固作用,因为在裂纹处粘贴 CFRP 可以将部分荷载分由 CFRP 承担,同时 CFRP 对裂纹开口的张开有约束作用。试验考虑了多种因素:CFRP 布/CFRP 板,CFRP 受拉刚度与钢板受拉刚度的比值 ETR,接头搭接长度。结果发现:CFRP 布和 CFRP 板的加固效果差距很小,当搭接长度不变,而 ETR 分别是原来 2 倍和 3 倍时,极限荷载分别增加 14.7% 和 83.5%,搭接长度从 25.4 mm 增加到 50.8 mm,极限荷载增大 74%,之后搭接长度继续增加,极限荷载的增加很小,而相应的拉伸长度却增大了 26%。

叶华文<sup>[10]</sup>等通过对粘贴不同预应力水平 CFRP 板加固的双边缺口钢板单轴拉伸试验发现:CFRP 板的力学性能稳定,在高应力条件下蠕变很小。与非预应力试件不同,因钢板的不平直和定位偏差会导致预应力偏心作用,在试件中产生弯曲应力,使得钢板在轴心受拉作用下厚度方向应力不均一。在预压应力作用下,钢板的拉应力水平降低,因此加固试件的承载能力提高,但加固试件的刚度提高并不明显。

## 1.2 疲劳试验

### 1.2.1 未受损构件补强加固

Bocciarelli M<sup>[11]</sup>等试验研究了双侧 CFRP 板加固的钢板在应力幅分别为 83 MPa,100 MPa,120 MPa 和 160 MPa 时的疲劳加固效果,如图 1(a)所示。试验发现:在疲劳荷载作用下 CFRP 板逐渐脱胶,加固试件的刚度逐渐退化,故可以选择刚度作为试件渐进整体破坏的评价

指标。脱胶破坏始于 CFRP 板两端,然后向中部扩展直至完全脱胶。通过观察,脱胶部位发生在钢板和胶层界面,少数几个试件的破坏方式为胶层内聚破坏。CFRP 板加固方法在疲劳荷载作用下的效果比焊接钢板加固的方法更好。在疲劳加固时,应当合理选择 CFRP 板的厚度和弹性模量、胶层的厚度,以减少 CFRP 在疲劳试验时脱胶。

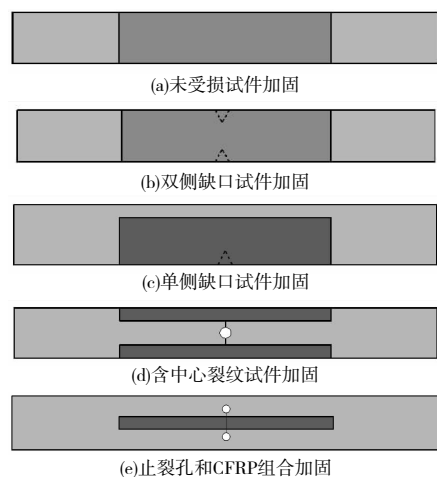


图1 疲劳加固试验试件样式

### 1.2.2 含裂纹构件修复加固

在 CFRP 加固钢结构的疲劳性能研究方面,目前的研究主要涉及损伤钢板钢梁及焊接节点的 CFRP 加固,研究参数主要有 CFRP 板/布,CFRP 加固量,CFRP 宽度,CFRP 长度,CFRP 弹性模量,单面或双面加固,有无预应力等。试验结果表明,与传统的焊接钢板加固方法相比,外贴 CFRP 是一种高效便捷的钢结构加固方法,可以显著降低钢结构的裂纹扩展速率,提高疲劳寿命<sup>[12]</sup>。

东南大学的吴刚<sup>[13]</sup>等对外贴高弹模碳纤维增强复合材料(高弹模 CFRP)板、高强度 CFRP 板、钢丝-玄武岩纤维复合板(SBFCP)和焊接钢板等加固人工受损钢梁疲劳性能进行试验研究,试验发现:等拉伸刚度加固条件下,纤维增强复合材料加固钢梁的疲劳寿命总体上是未加固钢梁的 3.33~5.26 倍,高弹模 CFRP 板加固效果最理想。

Jones S C<sup>[14]</sup>等对 21 个含边裂纹和 8 个含中心裂纹的受拉构件进行疲劳试验研究,考察了 CFRP 类型、长度、宽度、单面或双面粘贴、裂纹扩展前后粘贴等因素对加固效果的影响,试件样式如图 1(b)和(d)所示。对于含边裂纹钢板,当双面粘贴加固时,加固后构件的剩余疲劳寿命与未加固构件相比最大提高 115%。对于含中央裂纹钢板,当双面粘贴加固时,加固后构件的剩余疲劳寿命与未加固构件相比最大提高 54%。所有试件的

破坏模式均为脱胶破坏,CFRP 没有断裂的现象。试验中,含中心裂纹的受拉构件由中部向两端脱胶,这与单轴拉伸试验中的中部开孔加固试件的脱胶方向相反。单面粘贴加固的效果相较于未加固试件提升很小,其原因为单面加固使得构件沿厚度方向刚度分布不均,造成在拉伸时产生弯曲作用,从而对加固效果造成影响。在加固含中心裂纹试件时,CFRP 覆盖整个被加固区域的加固效果要比仅覆盖裂纹起始点的加固效果好。

Buyukozturk O<sup>[15]</sup>等人研究了 CFRP 的长度、宽度对切口钢板试件拉伸疲劳性能的影响,试件样式如图 1(c)所示。研究发现,加固试件的疲劳寿命和 CFRP 的长度、宽度成正相关。验证了 CFRP 在加固受损钢板的有效性,然而其耐久性仍有待验证。有关 FRP-钢粘接耐久性的研究表明:表面处理和环境状态对 FRP 和钢板的影响很大,而且存在电解腐蚀的潜在可能<sup>[3]</sup>。

叶华文<sup>[8]</sup>等通过对粘贴不同预应力水平 CFRP 板加固的双边缺口钢板疲劳试验发现:非预应力 CFRP 板的粘贴可以提高钢板疲劳寿命 50% 左右,对改善钢板的疲劳性能是有限的,而引入预应力后效果更好,在相同条件下因预应力的引入,提高了钢板的疲劳寿命至少 5 倍以上,临界裂纹长度在加固后提高了近 2 倍,提高了 CFRP 材料利用率。

### 1.2.3 焊接构件修复加固

赵恩鹏<sup>[16]</sup>通过试验和计算对比,定量分析对接焊 Q345 钢板在采用 CFRP 布加固前后的疲劳性能的改善,并采用有限元软件 ANSYS 对 CFRP 布加固焊接 Q345 钢板进行受力分析。试验构件采用实际工程中大量存在的板材对接焊中的单面 V 形焊,是疲劳性能的薄弱环节。构件的加载方式为三点弯曲正弦加载,CFRP 粘贴在受拉一侧。当构件发生相对较大变形后,粘结 CFRP 的胶层发生破坏,CFRP 与钢板剥离加固失效。

张宁<sup>[17]</sup>等人对两组十字形横肋试件进行拉-拉循环荷载作用下的疲劳试验研究,试件一组未加固,为原状焊缝,另一组为 CFRP 加固,CFRP 粘贴方向与焊缝垂直,粘贴宽度与钢板相同。试验采用等幅疲劳试验加载程序,波形为正弦波,频率为 500 次/分。在试验中发现,在不同应力幅和应力比作用下,碳纤维加固试件和对比试件的破坏形式都表现为金属的疲劳。试验结果表明,在等应力幅、等应力值、应力比相同条件下,粘贴有 CFRP 布的试件疲劳寿命可以提高 318%。

陈涛<sup>[18]</sup>选取非承重十字形焊接接头对 CFRP 改善焊接接头的疲劳性能进行研究,考察外贴 CFRP 用量和应力幅对疲劳寿命的影响。试验前量测焊趾角度和半

径。试验时,观察试件破坏形态并记录相应的寿命。之后采用精细化模型,分析焊趾半径、复合纤维材料用量、粘贴材料弹性模量等参数对局部应力集中程度的影响。结果表明:CFRP 布加固能够提高疲劳寿命,参数分析表明焊趾半径对应力集中程度的影响最为显著。

王志宇<sup>[19]</sup>等针对波形钢板焊接连接件开展了系列疲劳试验,试验结果表明,波形钢板焊接连接件的疲劳破坏主要发生在近波形钢腹板倾斜段终点部位焊趾处,波形倾斜段倾角和曲率半径与波高的比值对波形钢板平直段与倾斜段过渡段部位的局部应力集中影响显著,应作为设计控制参数。通过对比 CFRP 加固方案<sup>[20]</sup>对其典型构造细节的疲劳寿命的影响表明,对于波形钢板平直段与倾斜段过渡段部位的加固效果最为显著,采用单层单面加固方案可使其疲劳寿命提高 85% 左右。

## 2 CFRP - 钢板粘接界面力学性能研究

### 2.1 常规粘接界面

CFRP 与钢结构之间的荷载传递直接影响到加固效果和 CFRP 的利用效率。

钢板与碳纤维复合材料之间的粘结力是一种复杂的相互作用,从机械学角度分析,包括化学吸附力、物理静电力和界面咬合力等,从力学角度分析,包括剪应力和正应力。当钢板受力后,由于变形协调,钢板、粘结剂和碳纤维增强复合材料共同受力,并在粘结平面内产生粘结剪应力,其值沿着构件长度方向变化<sup>[21]</sup>。

设  $E_s$ 、 $E_p$  和  $E_a$  分别为钢板、CFRP 和结构胶的杨氏弹性模量;  $G_s$ 、 $G_p$  和  $G_a$  分别为钢板、CFRP 和结构胶的剪切弹性模量;  $t_s$ 、 $t_p$  和  $t_a$  分别为钢板、CFRP 和结构胶的厚度;  $n_p$  为 CFRP 层数。

#### 2.1.1 CFRP 双侧加固模型

Colombi P<sup>[6]</sup> 在建立加固试件弹性阶段分析模型(图 2)时作如下假设:

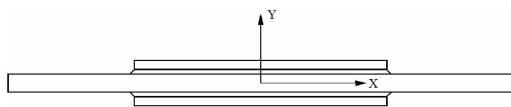


图 2 CFRP 双侧加固模型

- (1) 钢板、CFRP 和胶层均处于弹性阶段。
- (2) 钢板和 CFRP 间没有相对滑移。
- (3) 在胶层厚度方向上的应力保持不变,即不考虑胶层厚度。

经过公式推导,最终得到切应力沿长度方向的计算

公式:

$$\tau(x) = P \left( \frac{E_p t_p}{E_s t_s + 2E_p t_p} \right) \lambda \frac{\sinh(\lambda x)}{\cosh(\lambda L)} \quad (1)$$

其中

$$\lambda^2 = \frac{G_a}{t_a} \left( \frac{1}{E_p t_p} + \frac{2}{E_s t_s} \right) \quad (2)$$

彭福明<sup>[22]</sup>等将胶层视为剪切弹簧,忽略胶层的正应力。在钢板面内拉力作用下建立碳纤维复合材料修复钢结构力学模型,得出了胶层界面粘接剪应力:

$$\tau(x) = P \left( \frac{E_p t_p}{E_s t_s + 2E_p t_p} \right) \lambda \frac{\sinh(\lambda x)}{\cosh(\lambda L)} \quad (3)$$

其中

$$\lambda^2 = \frac{\left( \frac{1}{E_p t_p} + \frac{2}{E_s t_s} \right)}{\left( \frac{1}{4} \frac{t_s}{G_s} + \frac{t_a}{G_a} + \frac{3}{8} \frac{t_p}{G_p} \right)} \quad (4)$$

#### 2.1.2 CFRP 单侧加固模型

Bocciarelli M<sup>[23-24]</sup>建立了单侧粘贴碳纤维复合材料修复钢结构力学模型,如图 3 所示。做出了如下假设:

- (1) 钢板,CFRP 和胶层均处于弹性阶段。
- (2) 钢板的平截面假设。
- (3) 在胶层厚度方向上的应力保持不变,即不考虑胶层厚度。
- (4) 钢板和 CFRP 间没有相对滑移。
- (5) 忽略弯矩作用对 CFRP 的影响。

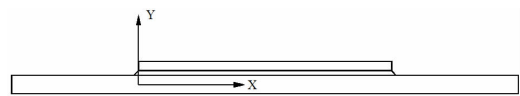


图 3 CFRP 单侧加固模型

经公示推导,得出胶层的剪应力和剥离应力计算公式:

$$\tau_A(x) = -\frac{1}{b_A} \frac{\lambda P}{f_2(EA)_s} e^{-\lambda x} \quad (5)$$

$$\sigma_A =$$

$$\frac{1}{b_A} \left[ \frac{a_3 C_1 \lambda^2}{a_1 \lambda_4 + a_2} e^{-\lambda x} + 2\beta^2 e^{-\beta x} (C_3 \sin(\beta x) - C_4 \cos(\beta x)) \right] \quad (6)$$

#### 2.1.3 CFRP 双侧搭接模型

Colombi P<sup>[6]</sup>等建立了双侧粘贴 CFRP 盖板单轴拉伸力学模型(图 4),得出了胶层的剪切应力。

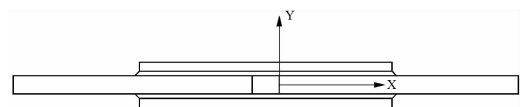


图 4 双侧粘贴 CFRP 盖板力学模型

$$\tau(x) = \frac{P}{2} \left( \frac{E_s t_s}{E_s t_s + 2E_p t_p} \right) \lambda \left( \sinh(\lambda x) - \frac{\cosh(\lambda x)}{\tanh(\lambda L)} \right) - P \left( \frac{E_p t_p}{E_s t_s + 2E_p t_p} \right) \lambda \frac{\cosh(\lambda x)}{\sinh(\lambda L)} \quad (7)$$

### 2.1.4 CFRP 有效粘接长度

彭福明<sup>[24]</sup>等提出粘结剪应力主要分布在 CFRP 端部一定长度的范围内,超过该范围界面剪应力基本为零,CFRP 中不存在应力梯度。定义当 CFRP 中的拉力达到其承担荷载的 98% 时所对应的长度  $L_{eff}$  称为 CFRP 的有效粘接长度,其值为:

$$L_{eff} = 3.912 \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \frac{t_s}{G_s} + \frac{t_a}{G_a} + \frac{3}{8} \frac{t_p}{G_p}}{\frac{1}{E_p t_p} + \frac{2}{E_s t_s}}} \quad (8)$$

刘素丽<sup>[25]</sup>进行了一系列 CFRP 布与钢板的粘接剪切试验,发现 CFRP 的粘贴宽度对有效粘接长度没有明显的影响,CFRP 的粘贴层数(厚度)对有效粘接长度影响较大,有效粘接长度随着粘接层数的增加而增大。综合试验结果,提出了考虑 CFRP 层数的 CFRP 与钢板有效粘接长度的计算公式:

$$L_{eff} = \sqrt{\frac{E_p \left( 1 - \frac{n_p E_p t_p}{420000} \right) n_p t_p}{0.5 f_v}} \quad (9)$$

杨勇新<sup>[8]</sup>考虑了固化温度与使用环境的温差,根据试验测得的碳纤维布的应变分布,得到了碳纤维布与钢板之间的黏结应力分布和碳纤维布的有效黏结长度,并与理论公式的计算结果进行了对比,二者吻合较好。

$$L_{eff} = -\frac{1}{\lambda} \ln \left[ 1 - 0.98 \frac{P \left( \frac{1}{E_p t_p} + \frac{2}{E_s t_s} \right)}{\left[ \frac{P}{E_s t_s} + (\alpha_s - \alpha_p) \Delta T \right] \left[ 2 + \frac{E_s t_s}{E_p t_p} \right]} \right] \quad (10)$$

式中,  $\alpha_s$  和  $\alpha_p$  分别为钢材和 CFRP 的热膨胀系数,  $\Delta T$  为结构胶的固化温度与使用温度的温差。

Smith H 考虑了胶层的塑性性能,提出当胶层的最大切应变达到极限状态时搭接接头的强度达到最大值<sup>[9]</sup>,建议双面搭接接头的有效粘接长度计算:

$$L_{eff} = \frac{P}{2\tau_{max}} + \frac{2}{\sqrt{\frac{G_{ep}}{\eta} \left( \frac{1}{E_p t_p} + \frac{2}{E_s t_s} \right)}} \quad (11)$$

式中,  $\tau_{max}$  为胶层设计剪切强度,  $G_{ep}$  为等效弹塑性剪切模量。

### 2.2 不规则粘接界面

部分被加固试件含有裂纹、缺口等,因此在加固时,粘接界面在裂纹、缺口处也是不连续的,故称作不规则粘接界面。不规则界面通常不能用常规的力学模型进行分析,常用有限元软件进行分析 CFRP 在降低裂纹、缺口处应力集中系数的作用。

Yu Q Q<sup>[26]</sup>提出了使用边界元法研究 CFRP 对不同损伤程度钢板的加固作用。数值计算结果与实验数据的比较验证了边界元法在分析碳纤维复合材料加固下钢板裂纹扩展的可靠性。参数化分析了 CFRP 长度、CFRP 宽度、CFRP 刚度和胶层剪切弹性模量对应力强度因子(SIF)的影响。经数值分析发现,加固后裂纹端部应力集中系数降低,CFRP 刚度越大效果越明显。

王海涛<sup>[27]</sup>应用有限元方法研究了 FRP 粘贴位置对含中心裂纹钢板、含单侧裂纹钢板加固效果的影响。其中加固效果用中心裂纹两端的应力集中系数的降低量表示。得出了应力集中系数与裂纹长度和相对位置的关系。Lam C C<sup>[10]</sup>等使用有限元法研究了 CFRP 加固对含边裂纹钢板裂纹端部的应力集中系数的影响。在模拟时,CFRP 和胶层根据 Mindlin 板假设采用壳单元,并假设 SIF 在钢板厚度方向没有变化。通过三维有限元模型,对 CFRP 长度,CFRP 宽度和 CFRP 层数的影响进行了参数化分析。

Jones S C<sup>[14]</sup>用有限元软件对两侧缺口单侧/双侧 CFRP 加固的试件进行了静力弹性阶段的分析。发现:单侧 CFRP 加固时,加载路径出现偏心,导致钢板承受弯矩作用,进而推测该弯矩作用会导致 CFRP 过早脱胶,影响整体加固效果,试验也证实了这种推测。

陈礼威<sup>[28]</sup>用有限元软件对碳纤维复合材料修复含中心圆孔钢板的疲劳寿命进行了数值分析。研究了孔洞大小、补片长度、宽度和厚度对钢板疲劳寿命的影响,分析了复合材料胶接修补的效果。利用复合材料胶接修补中心开圆孔的钢板,最大可以使其疲劳性能提高 18 倍,CFRP 宽度和厚度与疲劳寿命正相关,当补片宽度为孔径 8 倍以上时,增加宽度对疲劳寿命影响不大,补片的长度为孔径的 3~4 倍时,修复效果最佳。

### 3 结论与展望

(1)单轴静力拉伸试验包括未受损钢板的补强加固和受损构件的修复加固。未受损试件的单轴拉伸试验发现:粘贴 CFRP 可以有效提高原试件的屈服强度、伸长率和屈服后的二次刚度,但是对极限强度和屈服前刚度的提高很小。加固试件的破坏模式一般为

CFRP 脱胶破坏。受损试件的拉伸试验结果表明:CFRP 可以显著提高受损构件的极限承载力,破坏模式同样为脱胶破坏,CFRP 两端最先脱胶,然后向中部扩展直至完全脱胶。CFRP 用量增加则加固效果变好,施加预应力的 CFRP 加固效果明显提高,而试件刚度基本不变。

(2) 疲劳试验分未受损钢板的补强加固,受损钢板的修复加固和焊接构件的加固。其中未受损钢板加固试件疲劳试验发现:在疲劳荷载作用下 CFRP 逐渐脱胶,且脱胶速度呈加速趋势,随着 CFRP 的脱胶,整体试件的刚度也随之降低,故可以以试件刚度反映构件脱胶情况。关于受损钢板修复加固方面的研究较多,存在单边缺口、双边缺口、中心裂纹、边裂纹、止裂孔等一系列人工制造缺陷方法,试验发现,CFRP 在加固含上述缺陷的受拉钢板时效果显著,能够增加原试件的疲劳寿命。与静力试验破坏模式不同的是:疲劳试验时,CFRP 从中部应力集中部位向两端逐渐脱胶。焊接构件的 CFRP 加固正成为研究热点,焊接受拉构件包括对接焊缝、十字形横肋和波形钢板焊接连接件等,焊缝和焊趾处容易产生应力集中,经试验和精细化模型模拟计算发现,CFRP 能显著降低应力集中部位的应力集中系数,从而增加焊接构件的疲劳寿命。

基于 CFRP - 钢板界面是 CFRP 加固受拉钢板的薄弱环节,本文介绍了 CFRP - 钢板粘接界面力学性能研究现状。关于规则粘接界面和不规则粘接界面的研究方法存在较大区别,规则粘接界面多通过简化的力学模型进行分析,而不规则粘接界面多通过有限元等方法进行数值模拟研究。规则粘接界面研究发现:CFRP 端部为应力集中部位,单侧 CFRP 加固界面不仅存在剪切应力还存在剥离应力,粘结剪应力主要分布在 CFRP 端部一定长度的范围内,超过该范围界面剪应力基本为零,即 CFRP 存在有效长度,相关学者进行了这方面的研究,得出了一系列有效长度的计算公式。不规则粘接界面的研究常用有限元法,能直观的反映构件各部位的应力水平,而且可以进行参数化研究,优化加固方法。

CFRP 加固受拉钢板的研究仍存在以下问题:

(1) CFRP 板与 CFRP 布差异较大,而两者加固效果差别的研究较少,有时甚至不加区分。

(2) 目前对 CFRP 加固受拉钢板的耐久性以及恶劣气候环境条件下的性能研究比较少。

(3) 现有的 CFRP 加固形式单一,应探讨组合加固方法,如引入螺栓、垫块施加垂直于钢板的横向预紧力。

#### 参考文献:

- [1] 郑云,叶列平,岳清瑞.FRP 加固钢结构的研究进展[J].工业建筑,2005,35(8):20-25.
- [2] KARBHARI V M,Shulley S B.Use of composites for rehabilitation of steel structures-determination of bond durability[J].J Mater CivilEng,1995,7(4):239-245.
- [3] TAVAKKOLIZADDEH M, SAADATMANESH H. Galvanic corrosion of carbon and steel in aggressive environments[J].J Compos Construct,2001,5(3):200-210.
- [4] 马建勋,宋松林,赖志生.粘贴碳纤维布加固钢构件受拉承载力试验研究[J].工业建筑,2003,33(2):1-4.
- [5] 李耘宇,王言磊,欧进萍.FRP/钢复合板单轴拉伸性能试验研究[J].工业建筑,2013,43(S):80-83.
- [6] COLOMBI P,POGGI C.Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates [J]. Construction and Building Materials, 2005,20(1):22-33.
- [7] 张宁,岳清瑞,佟晓利,等.碳纤维布加固修复钢结构粘结界面受力性能试验研究[J].工业建筑,2003,33(5):71-80.
- [8] 杨勇新,岳清瑞,彭福明.碳纤维布加固钢结构的黏结性能研究[J].土木工程学报,2006,39(10):1-5.
- [9] LAM C C,CHENG J J,YAM C H,et al.Repair of steel structures by bonded carbon fibre reinforced polymer patching:experimental and numerical study of carbon fibre reinforced polymer-steel double-lap joints under tensile loading[J].Can.J.Civ.Eng,2007,34(1):1542-1553.
- [10] 叶华文.预应力碳纤维板(CFRP)加固钢板受拉静力及疲劳性能试验研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [11] BOCCIARELLI M, COLOMBI P, FAVA G, et al. Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates[J].Composite Structures,2009, 87(4):334-343.
- [12] LIU H B,AL-MAHAIDI R,ZHAO X L.Experimental study of fatigue crack growth behaviour in adhesively reinforced steel structures[J]. Composite Structures, 2009,90(1):12-20.
- [13] 吴刚,刘海洋,吴智深,等.不同纤维增强复合材料加固钢梁疲劳性能试验研究[J].土木工程学报,2012, 45(4):21-28.

- [14] JONES S C, CIVJAN S A. Application of fiber reinforced polymer overlays to extend steel fatigue life[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 7(4): 331-338.
- [15] BUYUKOZTURK O, GUNES O, KARACA E. Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites[J]. *Construction & Building Materials*, 2004, 18(1): 9-19.
- [16] 赵恩鹏, 牛忠荣, 胡宗军, 等. CFRP 加固焊接钢结构的疲劳性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2011, 41(S): 354-358.
- [17] 张宁, 岳清瑞, 杨勇新, 等. 碳纤维布加固钢结构疲劳试验研究[J]. *工业建筑*, 2004, 34(4): 19-21.
- [18] 陈涛, 余倩倩, 顾祥林, 等. 粘贴碳纤维复合材料后非承重十字形焊接接头疲劳性能[J]. *建筑结构学报*, 2010, 30(S2): 270-274.
- [19] 王志宇, 王清远. 波形钢板焊接连接件的疲劳试验研究及寿命评价[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(9): 133-142.
- [20] WANG Z Y, WANG Q Y. Fatigue strength of CFRP strengthened welded joints with corrugated steel plates [J]. *Composites: Part B*, 2015, 72(4): 30-39.
- [21] 郑云, 叶列平, 岳清瑞. FRP 加固钢结构的研究进展[J]. *工业建筑*, 2005, 35(8): 20-25.
- [22] 彭福明, 张晓欣, 岳清瑞, 等. FRP 加固金属拉伸构件的性能分析[J]. *工程力学*, 2007, 24(3): 189-192.
- [23] BOCCIARELLI M, COLOMBI P. Elasto-plastic debonding strength of tensile steel/CFRP joints[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, 85: 59-72.
- [24] 彭福明. 纤维增强复合材料加固修复金属结构界面性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
- [25] 刘素丽. 碳纤维布与钢板的粘结机理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [26] YU Q Q, ZHAO X L, CHEN T, et al. Crack propagation prediction of CFRP retrofitted steel plates with different degrees of damage using BEM [J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 82: 145-158.
- [27] 王海涛, 吴刚, 吴智深. FRP 布置方式对含裂纹钢板加固后的疲劳性能影响分析[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(1): 56-63.
- [28] 陈礼威, 章向明. 含孔洞钢板复合材料修复疲劳寿命数值分析[J]. *海军工程大学学报*, 2008, 20(3): 36-39.

## Research Progress of Tensile Steel Plates Strengthened by CFRP

ZHANG Ning<sup>1</sup>, WANG Zhiyu<sup>1</sup>, FU Lei<sup>1, 2</sup>, Wang Qingyuan<sup>1, 3</sup>

(1. School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

3. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

**Abstract:** Traditional steel structure strengthening methods include steel plate welding, bolt connecting, riveting and so on. These methods have shortcomings, and are easy to produce stress concentration phenomenon. CFRP has high specific strength and rigidity, and it also shows a good effect on strengthening steel structure. In this paper, the steel plates are divided into three types: non-damaged steel plate, damaged steel plate and welded steel plate, and the application of CFRP in tensile steel plate reinforcement is divided into two aspects: single axial static tension test and fatigue test. The methods used in the study of the mechanical properties of the CFRP-steel interface and the conclusions drawn by different scholars were compared. It can be concluded that the effect of CFRP on the strengthening steel plate is good, but a series of problems such as: the durability of the reinforcement measure, the difference of reinforcement effect between CFRP sheet and CFRP plate, new composite strengthening method, are still needed to be studied.

**Key words:** CFRP; tensile steel plate; crack; fatigue reinforcement; effective length