

# FRP 加固金属结构技术应用研究进展

余周辉<sup>1</sup>, 胡芳友<sup>1</sup>, 崔爱永<sup>1</sup>, 何西常<sup>2</sup>, 赵培仲<sup>1</sup>

(1.海军航空工程学院 青岛校区 航空机械系, 山东 青岛 266041;

2.陆军工程大学, 江苏 徐州 221004)

**摘要:** 从 FRP 加固金属结构设计研究、界面性能研究、工艺研究、耐久性研究等 4 个方面回顾了 FRP 加固金属结构技术的发展历程。探讨了 FRP 加固技术的优势, 总结了现阶段 FRP 修复技术取得的成就和现阶段发展存在的不足。最后, 对未来 FRP 修复技术的发展做了总结。可以预见, 随着高性能 FRP 的不断研制成功以及研究的深入, FRP 修复技术必将得到更广泛的应用。

**关键词:** FRP; 加固技术; 金属结构

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.02.005

**中图分类号:** TB332; V258

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)02-0024-08

## Applied Research Progress of FRP Reinforced Metal Structure

YU Zhou-hui<sup>1</sup>, HU Fang-you<sup>1</sup>, CUI Ai-yong<sup>1</sup>, HE Xi-chang<sup>2</sup>, ZHAO Pei-zhong<sup>1</sup>

(1.Department of Aeronautical and Mechanical Engineering, Qingdao Branch, Naval Academy of Aeronautical Engineering, Qingdao 266041, China; 2.Army Engineering University, Xuzhou 221004, China)

**ABSTRACT:** In this paper, the development history of FRP reinforced metal structure technology was reviewed from 4 aspects: the research on metal structure design of FRP reinforcement, interface performance, adhesion process and durability. The advantages of FRP repair technology were discussed. The achievements and deficiency of FRP repair technology in current development were summarized. And the development of FRP repair technology in the future was summeried. Predictably, with the development of high performance FRP, FRP repair technology will be used more widely.

**KEY WORDS:** FRP; reinforced technology; metal structure

金属结构在服役过程中, 经常出现由于自然环境腐蚀、外部交变载荷或人为因素的破坏而引发的各种损伤。若不对这些损伤部位进行及时的修复, 就会降低金属结构的使用性能, 同时对结构的安全留下隐患, 容易引发严重的工程事故。传统的金属结构方法包括铆接、螺接或焊接修复等, 虽然在一定程度上可以恢复原结构的承载能力, 但这些修复方法又给修复结构带来新的问题<sup>[1-2]</sup>。如采用铆接或螺接的修复方法, 需要在损伤部位进行开孔、铰铣等工艺, 不仅工艺复杂, 效率低, 还会削弱原结构的受力界面, 形成

新的应力集中<sup>[3-4]</sup>。采用焊接时产生的高温作用容易造成焊接部位组织劣化、韧性下降, 抵抗脆性断裂的能力变差且焊后结构内部留有残余应力。纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Polymers, 简称 FRP) 的出现为修复金属损伤结构提供了全新的研究方向, FRP 加固修复损伤金属结构技术应运而生。该技术利用胶粘剂将 FRP 粘贴在损伤金属表面, 通过一定的固化方式将损伤金属与 FRP 粘结成整体, 在外部载荷作用下, 通过胶层的传递作用使部分载荷传递到 FRP, 降低金属结构损伤部位的应力集中, 制止或缓解损伤

收稿日期: 2017-11-14; 修订日期: 2017-11-15

作者简介: 余周辉 (1987—), 男, 博士生, 主要从事先进材料制备与成型技术研究。

通讯作者: 胡芳友 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事航空结构损伤激光维修工程与航空机械设计等方面研究。

处裂纹扩展速率,恢复或提高金属结构的承载能力。与传统的金属结构修复技术相比,FRP 修复金属结构具有以下明显优势<sup>[5-8]</sup>。

1) FRP 采用直接粘贴的形式修复损伤结构,因而对原结构损伤小,基本不破坏原结构的整体性,不会形成新的应力集中,对母材无二次损伤。

2) FRP 材料具有密度低、比强度和比刚度、抗疲劳性能好等特点。在达到同等修复效果情况下,FRP 修复结构几乎不增加原结构质量。

3) FRP 具有优异的抗酸、碱、盐等腐蚀能力。在保证有效粘贴的情况下,FRP 对损伤区域形成封闭结构,对腐蚀环境起到很好的隔离保护作用。

4) FRP 可设计性强,因而对于不同的损伤可通过改变修复工艺来提高结构的修复效果,丰富了修复手段。

5) FRP 具有操作简单和可成形性强等特点,通常 FRP 为柔性,采用手糊粘贴的方式就可以修复复杂曲面结构,这对于传统的焊接工艺具有明显优势。

目前,FRP 加固金属结构按加固形式可分为两类:FRP 加固无损伤结构,该类结构表面无明显损伤,但在服役过程中出现承载力无法满足使用要求的情况;FRP 加固损伤金属结构,该类结构局部表面带有明显损伤,如表面划痕、腐蚀凹坑、裂纹等,其承载力已明显不足。通过在损伤构件表面粘贴 FRP 可恢复或提高损伤结构的拉伸性能<sup>[9]</sup>、弯曲性能<sup>[10]</sup>、受压性能<sup>[11]</sup>或疲劳性能<sup>[12]</sup>等。FRP 加固金属结构研究的内容主要包括以下几方面研究: FRP 加固金属结构设计研究、FRP 加固金属结构界面性能研究、FRP 加固金属结构粘结工艺研究、FRP 加固金属结构耐久性能等。文中将从以上几个方面回顾 FRP 加固金属结构的研究。

## 1 FRP 加固金属结构设计研究

FRP 加固结构设计的研究对 FRP 更广泛的应用具有很强的指导意义,是 FRP 加固应用的基础。FRP 修复金属结构最先应用于航空领域的金属薄壁结构,修复的方式是将 FRP 粘贴于损伤处以恢复或提高结构的承载能力,加固方式较为简单。这一类加固方式也是目前研究和应用最为广泛的。应用范围包括:轴向拉伸构件表面粘贴 FRP 提高拉伸性能<sup>[13-14]</sup>;受弯构件表面粘贴 FRP 恢复构件刚度和承载能力<sup>[15-16]</sup>;轴心受压构件表面粘贴 FRP 提高构件抗压极限承载力和受压稳定性<sup>[17-18]</sup>;金属管外表面包裹粘贴 FRP 提高结构的稳定性<sup>[19-20]</sup>等,这类试样加固形式如图 1 所示。

随着研究的深入,FRP 加固形式也呈多样式发展。沙吾列提·拜开依等<sup>[11]</sup>采用 GFRP 套管包裹加固

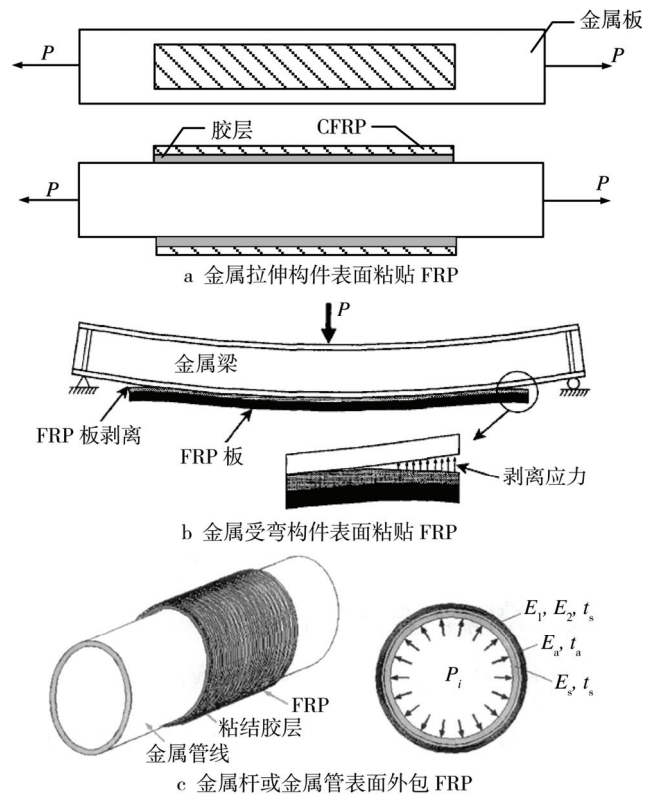


图 1 表面粘贴 FRP 加固金属结构

角钢构件,对比研究了未加固试样、仅 GFRP 套管加固和 GFRP 套管加固同时在 GFRP 套管与角钢间填充竹篾三种类型试样的抗压性能,如图 2 所示。

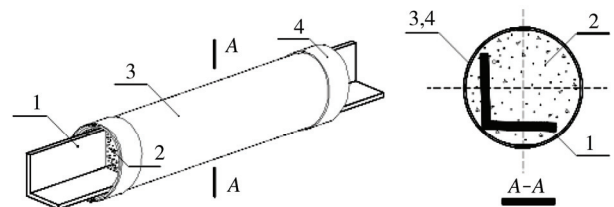


图 2 FRP 加固角钢构件

研究表明,GFRP 套管加固后,试样破坏形态由一阶弯曲失稳破坏向构件端部局部变形破坏转变,仅 GFRP 套管加固对承载力影响不大,GFRP 填充加固可大幅提高构件的承载能力,最大提高 2.86 倍。Teng 等<sup>[21-22]</sup>利用 FRP 与混凝土和钢材相互组合,设计了一种 FRP-混凝土-钢双臂空心构件取代现有的钢筋混凝土结构。与原钢筋混凝土比较,新型构件具有自重轻、施工方便、耐腐蚀性强、抗压强度高、抗震性能好等优点。尽管初始造价要略高于钢筋混凝土结构,但从长远利益来看,具有很好的发展前景。在此基础上,张磊等<sup>[23]</sup>研究了一种快速 FRP 加固钢结构的新技术,可在几小时内完成对损伤结构的修复和养护。笔者首先利用已经完成的 FRP 预浸板和薄膜

胶,然后在损伤位置粘贴 FRP 并同时抽真空加温养护。通过双盖板搭接节点的拉伸试验,测量了 FRP 与钢板界面的粘结性能,研究了该方法加固的抗弯性能。结果表明,采用该技术经过 80 °C/4 h 养护,FRP 与钢板间粘结性能良好。同时,研究结果发现,采用高模量 CFRP 加固钢梁结构对提高钢梁结构的极限承载力并不一定有益,采用较低模量 GFRP 与高模量 CFRP 交替作用效果更为明显。

FRP 预应力加固或预应力和锚固组合加固是在无预应力加固的基础上发展起来的一种新型修复技术,其目的是增大 FRP 的拉应变,减小或消除 FRP 应变滞后现象,避免 FRP 过早的产生剥离破坏,提高 FRP 的使用效率。该技术首先利用辅助设备张拉 FRP 到一定值后再粘贴到加固结构表面或利用辅助设备对加固结构产生一个受力状态相反的变形后再粘贴 FRP,从而达到抵消部分初始载荷的作用。吴涛<sup>[24]</sup>的研究结果表明,与无预应力加固钢梁相比,预应力加固钢梁结构的刚度、屈服载荷和极限载荷都有更为明显的提高,其提高幅度随 CFRP 用量和预应力水平的提高而提高。彭福明等<sup>[25]</sup>利用有限元软件对比分析了 CFRP 有无预应力加固修复金属管线的修复效果。研究结果表明:与损伤金属管线相比,CFRP 无预应力加固后钢管的环向应力下降 14.8%,采用预应力加固钢管的环向应力下降 47.6%。这表明相同加固材料下,采用预应力加固可大幅提高加固效果,经济效果显著。

黄丽华等<sup>[26]</sup>对比了钢筋混凝土梁端部局部 U 型锚固和全梁 U 型锚固两种布置方式对加固效果的影响。结果表明,全梁 U 型锚固钢筋混凝土开裂载荷、屈服载荷和极限载荷都低于端部局部 U 型锚固,全梁 U 型锚固的加固方式不但造成经济的浪费,而且

使得结构的整体协调性能下降。刘君等<sup>[27]</sup>研究了 U 形纤维布加预应力加固对钢筋混凝土梁性能的影响,证明了施工工艺的可行性。研究结果表明,预应力加固大幅提高了 FRP 的强度使用效率,最大可达 96.1%,破坏形态由剥离破坏向 FRP 拉断破坏转变。当抗剪 FRP 的预应力值超过 244.84 MPa 时,修复结构长期预应力损失约为 15%。

## 2 FRP 加固金属结构界面性能研究

FRP 加固金属结构,部分载荷是通过胶层的剪切变形传递到 FRP 补片,因而 FRP 与金属界面的有效粘结是保证有效修复的前提。现有的研究表明,FRP 粘结修复金属结构常见的破坏形式主要有:胶层与金属界面剥离破坏、胶层与 FRP 界面剥离破坏、胶层内聚破坏、FRP 内部分层破坏、FRP 断裂破坏。按目前有机树脂性能而言,树脂与纤维间浸润性较好,很少出现第四种破坏。由于纤维材料具有高强度、高模量的特点,也较少出现第一种破坏。前三种是实际工程中最常出现的三种界面剪切破坏,因而纤维布-金属构件间的界面性能也成为主要研究热点。国内外也进行了大量的纤维布-金属构件界面粘接性能试验,取得了较为丰富的研究成果。影响 FRP-金属界面粘结性能的因素很多,包括纤维布和树脂种类、补片粘结长度、补片粘结宽度、补片层数、金属与 FRP 表面处理工艺、粘结工艺以及固化工艺等,且各因素之间存在相互耦合,因而问题较为复杂。研究方法包括试验研究和理论研究两方面,所用试验研究方法主要有剪切粘结强度试验、正拉粘结强度试验和简支梁试验等<sup>[28-29]</sup>,如图 3 所示。

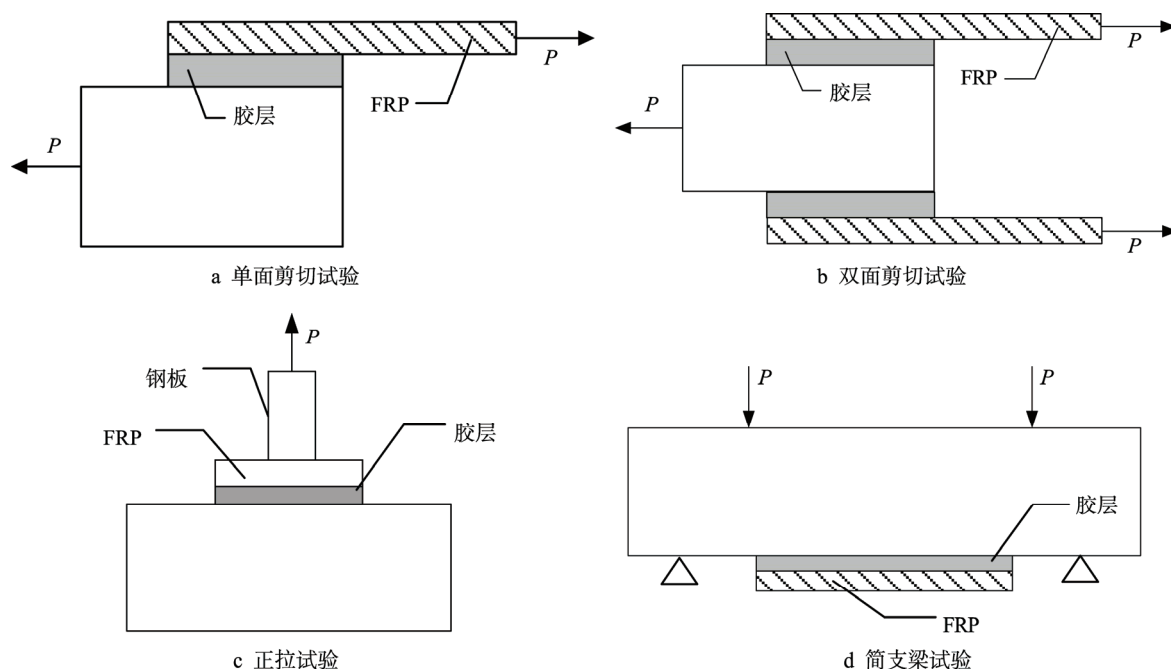


图 3 FRP 加固结构粘结试验方法

马建勋<sup>[30]</sup>等采用单剪试验方法研究了碳纤维布-钢构件的抗剪粘结性能, 分析了碳纤维布的粘结长度、宽度比、层数以及粘结工艺等参数对复合构件粘结性能的影响, 并对碳纤维布-钢构件截面应力分布进行了分析。试验过程发现, 碳纤维布与钢构件的粘结强度随粘结长度增加呈非线性增加, 从应力分析来看, 纤维布存在“有效粘结长度”, 超过一定长度后应力梯度基本不再变化, 未起到传递载荷作用。纤维布粘结宽度与带加固钢板宽度比对粘结应力有一定影响, 但效果要比粘结长度小得多。相比较而言, 碳纤维层数对粘结强度影响较大, 粘贴两层碳纤维布比粘贴一层碳纤维布粘结强度提高 76.9%~104.3%。由于各影响因素并非独立存在, 两两之间相互耦合。笔者通过理论分析采用应力集中系数  $\eta$  综合考虑各因素对加固效果的影响, 表达式为:

$$\eta = \frac{\lambda l}{2} (c+1) \text{th}(\lambda l/2)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{G}{t_0} \left( \frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)}$$

式中:  $\lambda$  为胶层最大剪应力;  $E_1, E_2$  分别为 FRP 和钢结构的弹性模量;  $t_1, t_2$  分别为 FRP 和钢结构厚度。按照尽量降低界面应力集中系数的原则, 文献给出了工程应用中应尽量选取高模量的 FRP 和低剪切模量的胶粘结, 同时适量增加 FRP 和胶层的厚度等非常具有指导意义的建设意见。

杨勇新<sup>[31]</sup>等通过 CFRP 与钢板的拉伸剪切试验, 研究了粘结剂种类、CFRP 层数、粘结宽度、钢板材质、钢板厚度及养护温度等因素对界面粘结性能的影响, 对探讨了不同因素对试样破坏过程、破坏形态、粘结界面应力分布特点和 CFRP 应变分布的影响。结果表明, 钢板的材质和钢板厚度对有效粘结长度和极限承载力基本没有影响。在其他条件一致的情况下, 选择不同的粘结剂, 试样的有效粘结长度与极限载荷有明显不同。增加 CFRP 的粘结宽度, 有效粘结长度也基本未发生变化, 但极限载荷有明显提高。增加 CFRP 的粘结层数, 试验破坏形态由 CFRP 于钢板界面剥离破坏向 CFRP 层间破坏转变, 有效粘结长度和极限承载能力都有增大趋势。

彭福明<sup>[32]</sup>等采用有限元软件分析了钢板的性能、FRP 材料的性能、粘结剂的性能、FRP 厚度、粘结剂厚度、温度等参数对粘结界面应力的影响, 根据分析结果给出了几种改善界面应力传递的措施。分析结构表明, 增加 FRP 与钢板刚度比, FRP 端部剪应力与剥离应力增加, 减小 FRP 与钢板刚度比, FRP 端部剪应力与剥离应力减小。选择剪切模量更大的粘结剂, 界面剪应力和剥离应力增加而应力分布长度减小。增加粘结剂的厚度, 界面剪应力和剥离应力减小, 应力分布长度增加。当 FRP 端部界面应力较大时,

容易引起粘结界面的剥离破坏, 因而在工程实际中可采用一定的措施降低端部界面的应力集中。笔者建议采用 FRP 端部锚固、FRP 端部溢胶、FRP 端部 45 ° 倒角等措施在一定程度上可以降低 FRP 端部界面应力集中。

文献[33-34]基于断裂力学法对 FRP 加固钢结构界面进行了理论研究。断裂力学法通过比较裂纹扩展过程的能量释放率  $G$  和裂纹扩展所需临界能量释放率  $G_{cr}$  的大小, 确定胶层裂纹是否稳定。临界能量释放率  $G_{cr}$  通过材料试验获得, 能量释放率  $G$  通过分析方法或有限元计算获得, 简化的能量释放率  $G$  表达式为:

$$G = \frac{1}{b_f} \frac{U(b+\Delta b) - U(b)}{\Delta b}$$

式中:  $b_f$  表示 FRP 宽度;  $\Delta b$  表示胶层粘结界面裂纹扩展长度;  $U(b)$  为胶层裂纹长度为  $b$  时的总应变能;  $U(b+\Delta b)$  为胶层界面裂纹长度为  $b+\Delta b$  时的总应变能。当  $b$  足够小时, 通过计算胶层界面裂纹长度从  $b$  到  $b+\Delta b$  的总应变能即可得到能量释放率。研究结果表明, 增加 FRP 的长度可以降低能量释放率, 缓解胶层裂纹扩展。增大 FRP 的弹性模量和厚度, 加固效果越好, 但胶层界面能量释放率也逐渐增加, 容易达到临界能量释放率引发胶层界面裂纹扩展, 粘结界面变得不稳定。因而, FRP 的弹性模量和厚度也并非越大越好。

### 3 FRP 加固金属结构粘结工艺研究

国内外对 FRP 加固结构的粘结工艺研究较多, 按研究的内容可以分为: FRP 材料的性能、尺寸、厚度、胶层的属性及待加固材料自身性能对加固效果的影响<sup>[35-38]</sup>; 金属和 FRP 表面处理工艺对加固效果的影响<sup>[39-46]</sup>; 粘贴方式对加固效果的影响<sup>[47-50]</sup>。

#### 3.1 工艺参数

杨勇新等<sup>[35]</sup>通过 FRP 加固未损伤钢板和损伤钢板的静力拉伸试验, 探讨了不同纤维布及不同粘结工艺对修复效果的影响, 测量了碳纤维的应力分布, 并对不同破坏形态进行了分析。试验结果表明, 损伤钢板加固后的屈服载荷得到明显提高, 极限载荷提升较小, 而未损伤加固试样的屈服载荷和极限载荷变化均不明显。相同载荷下, 高模量碳纤维布加固的试件粘结应力较高, FRP 与钢板之间的粘结应力主要集中在端部区域。当采用 FRP 端部无锚固时, 钢板发生屈服后碳纤维布很快发生剥离破坏, 此时碳纤维布利用率较低。当采用 FRP 端部压条锚固或缠绕锚固时, 碳纤维布剥离破坏延后, 修复构件屈服载荷得到更为明显的提高。此外, 对于采用端部锚固的未损伤试样,

未粘结区域钢板拉断时碳纤维布仍未发生剥离。

Tavakkolizadeh 等<sup>[36]</sup>通过四点弯曲试验,探讨了 CFRP 加固完好钢-梁结构及损伤结构的加固效果,研究了 CFRP 粘贴层数、预损伤等级等因素对 CFRP 加固修复钢-梁混凝土结构加固效果的影响。多层粘贴时采用逐层内收的方式,三层粘贴时补片长度分别为 3.95, 3.65, 3.35 cm, 五层粘贴时补片长度分别为 3.95, 3.80, 3.65, 3.50, 3.35 cm。与未加固梁相比,加固完好钢-梁结构粘贴一层、三层、五层 CFRP 的加固结构极限承载力分别提高 44%, 51%和 76%,破坏形态也由一层混凝土压碎破坏向三层补片剥离破坏和五层腹板破坏转变。当分别采用一层、三层和五层加固预损伤等级为 25%, 50%和 100%的损伤结构时,修复结构的弹性模量分别提高 91%, 102%和 86%,承载能力分别提高 20%, 80%和 10%,表明当损伤等级较大时,加固效果明显下降。

马建勋等<sup>[37]</sup>对粘贴不同面积 CFRP 加固的钢板进行了单轴拉伸试验,研究了 CFRP 粘结面积对修复结构承载力和延性的影响,并对 CFRP 与钢板之间协调变形、破坏机理进行了分析。实验结果表明,与未粘贴碳纤维布的试件相比,粘贴碳纤维布试件的屈服载荷和极限载荷都有较大提高,其提高幅度随粘结面积增加而增大。修复试样的破坏模式是补片发生剥离破坏,未能充分发挥补片的作用,因而良好的粘结工艺和胶的粘结强度是保证有效修复的前提。

Sean C 等<sup>[38]</sup>进行了 8 个含中心裂纹和 21 个边裂纹 CFRP 加固钢板的疲劳试验,分析了 CFRP 类型、长度、宽度粘贴方式等因素对加固效果的影响。结果表明,采用高模量的 CFRP 具有更好的加固效果,FRP 双面加固剩余疲劳寿命提高幅度大于单面加固。

### 3.2 表面处理工艺

表面处理工艺(包括待加固金属表面处理和 FRP 表面处理)的选择对界面性能有重要影响,是 FRP 修复金属结构的关键步骤之一。常见的金属表面处理工艺主要包括机械处理、化学处理和电化学处理。纤维表面处理主要包括氧化处理、表面涂层处理、等离子处理、化学接枝等。

赵培仲等<sup>[39]</sup>通过 GFRP 修复损伤铝板的拉伸试验,研究了外场环境下采用丙酮清洗、砂纸打磨、喷砂、酸洗等多种工艺处理待修复铝合金表面对修复效果的影响。结果表明,不同的表面处理工艺对修复效果有很大影响。简单的溶剂清洗修复效果较差,酸洗容易对原结构造成额外损伤,采用砂纸打磨或喷砂+溶液清洗可达到较好的修复效果。蔡洪能等<sup>[40]</sup>采用 CFRP 加固张开型裂纹钢结构,比较了 10%铬酸腐蚀、80#砂纸打磨、5%硝酸腐蚀、随机打洋眼+5%硝酸腐蚀和 100#金刚砂喷砂等不同钢结构表面处理对 FRP-

钢粘结接头剪切强度的影响,对比了加固前后裂纹扩展和疲劳寿命。试验结果表明,采用随机打洋眼+5%硝酸腐蚀和 100#金刚砂喷砂处理可获得较好的粘结性能,加固结构裂纹扩展速率得到抑制,疲劳循环次数得到明显提高。Liu J 和 Zhang Jinsheng 等<sup>[41-42]</sup>研究结果也表明,表面处理工艺对加固结构的初始加固效果和耐久性能都有重要影响。

许小芳等<sup>[43]</sup>采用硅烷偶联剂 KH550, KH560, KH570 对玄武岩纤维进行表面处理,研究了不同表面处理对玄武岩纤维增强复合材料界面粘结性能的影响。结果表明,纤维表面的偶联剂与树脂形成化学键合或 IDIPN, FRP 界面粘结性能和耐水性能都得到不同程度的提高。Yuan 等<sup>[44]</sup>采用浸渍法研究了硅烷偶联剂处理对铝合金氧化膜性能的影响。结果表明,偶联剂溶液浸泡 5 s 所得氧化膜的强度与铬酸盐溶液处理 30 min 效果相当,具有广阔的发展前景。

易增博等<sup>[45]</sup>研究了去离子水超声、浓硝酸浸泡、浓硝酸超声等表面处理工艺对 CFRP 结构和力学性能的影响。结果表明,表面处理增强了碳纤维与树脂界面间的机械和化学作用,界面粘结强度和抗拉强度得到明显提高。Peng 等<sup>[46]</sup>采用等离子和超声技术对 CFRP 进行表面处理。结果表明,等离子和超声处理使得聚合物的分布更加均匀,提高了聚合物对纤维的浸润性,界面缺陷减少,CFRP 的性能得到大幅提升。

### 3.3 粘贴方式

FRP 加固方式主要可以分为外贴法和嵌入式贴法两种,每种方法具体又可分为好几种,同一损伤试样,采用不同的粘贴方式对加固效果有很大影响。与外贴法相比,嵌入式贴法与修复结构整体性更强,有效克服了由于补片粘结失效引起的剥离破坏,FRP 利用率明显提高。目前,外贴法在混凝土和金属结构加固领域都有应用,嵌入式贴法还主要应用于混凝土结构,金属结构加固研究还很少。王海涛等<sup>[47]</sup>研究了以等刚度为原则,采用 FRP 平铺和叠加两种外贴加固方式对含中心裂纹和单边裂纹钢板的应力强度因子和裂纹扩展寿命的影响。结果表明,同一加固方式下,FRP 厚度与裂纹初始长度对加固钢板的裂纹扩展寿命有较大影响。对于含中心裂纹钢结构,当 FRP 厚度较小时,叠加方式的加固效果优于平铺方式;反之当 FRP 厚度较大时,平铺方式的加固效果优于叠加方式。对于含单边裂纹结构,叠加加固方式的裂纹扩展寿命要远高于平铺方式。因而在实际工程中,应根据损伤类型选择相对应的加固方式。

Blaschko 等<sup>[48]</sup>对比了采用碳纤维布外贴加固和嵌入式加固的双剪试验。结果表明,嵌入式加固的粘结强度要明显高于外贴加固。Tarek 等<sup>[49]</sup>的研究结果也表明,采用嵌入式加固,纤维布与待加固结构的有

效粘结面积增加,纤维布的利用率得到有效提高。当其他条件一致时,CFRP 嵌入式的加固效率是外贴加固的3倍,嵌入式加固试样的性能明显高于外贴加固试样。曾宪桃等<sup>[50]</sup>通过 CFRP 加固钢筋混凝土的弯曲试验,分析了内嵌加固对加固结构破坏形态、开裂弯矩、极限载荷的影响,并对比了内嵌加固与外贴加固对修复结构的区别。结果表明,与外贴加固相比,内嵌加固具有更好的加固效果,极限载荷提高 15.5%~22.7%。

## 4 FRP 加固金属结构耐久性能

大多数 FRP 修复结构在使用过程中都暴露在各种环境下,不同的环境会对修复结构的耐久性产生明显的影响。20 世纪 80 年代,国外学者已展开 FRP 加固结构的耐久性研究,国内起步较晚,研究的内容包括树脂和 FRP 等加固材料的耐久性<sup>[51]</sup>、FRP 与待修复结构粘结界面的耐久性<sup>[52]</sup>、FRP 修复结构的耐久性<sup>[53]</sup>。

任慧韬等<sup>[51]</sup>采用人工加速老化试验方法,通过对比老化前后的拉伸试验,研究了采用胶粘剂 A 和 B 浸渍的 GFRP 和 CFRP 在冻融环境、碱性环境、湿热环境、浸水环境下其性能的变化。研究结果发现,粘结剂在人工加速老化(试验箱温度 45℃,相对湿度 70%,降雨周期 20~120 min,氙灯功率 6 kW) 1000 h 后,胶粘剂拉伸性能未出现明显退化,压缩性能和弯曲性能均有一定下降。23℃环境下 FRP 自来水浸泡 30 d,CFRP 的拉伸性能基本没有发生明显变化,而 GFRP 的抗拉强度和极限应变分别下降 10%和 8%,弹性模量变化不大,CFRP 的耐水性能明显优于 GFRP。冻融循环(温度为-17~8℃)100 次后,CFRP 的抗拉强度和极限应变分别下降 4.4%和 5.1%,GFRP 的抗拉强度和极限应变分别下降 10%,弹性模量未发生明显变化。湿热环境(温度 40℃,湿度 98%)下老化 1000 h 后,CFRP 拉伸性能变化不大,GFRP 出现明显下降。其中,采用胶粘剂 A 浸渍的 GFRP 抗拉强度下降 26%,弹性模量下降 12%,采用胶粘剂 B 浸渍的 GFRP 抗拉强度下降 16%,弹性模量下降 17%。25℃氢氧化钙饱和溶液浸泡 30 d,未预涂粘结剂的 CFRP 和 GFRP 抗拉强度分别下降 35%和 74%,预涂胶粘剂的 CFRP 抗拉强度基本不变,GFRP 抗拉强度下降 52%,表明碱性环境对 FRP 片材有明显的侵蚀作用,CFRP 的耐碱性能优于 GFRP,同时采用表面预涂粘结剂的方式可有效提高 FRP 的耐碱性能。

Jonathan 等<sup>[52]</sup>研究了 pH 为 8.5 的海水环境、pH 为 3 的酸性环境、pH 为 12 的碱性环境、pH 为 7 的水环境、60℃和 72℃的高温环境和 38℃/湿度 100%的湿热环境对树脂、FRP 与混凝土界面和 FRP 与钢结构粘结性能的影响。研究结果表明,紫外线辐照后,

树脂的脆性增加。随着温度、湿度的增加,树脂的弹性模量、抗拉强度逐渐下降,而断裂延伸率有所增加。碱性环境、酸性环境和水环境对 FRP-混凝土结构和 FRP-钢结构粘结性能都有一定的不利影响,其中,碱性环境下 FRP 粘结结构界面性能最大,酸性环境和水环境次之。

胡安妮<sup>[53]</sup>分别研究了载荷和腐蚀环境共同作用对 FRP 加固混凝土结构和 FRP 加固钢结构耐久性的影响。试验表明,干湿循环对 FRP-混凝土结构粘结性能有一定不利影响,粘结试件极限载荷随干湿循环次数增加呈逐渐下降趋势。当预加载荷与腐蚀环境共同作用时,与只有干湿环境作用试件相比,相同干湿循环次数内,当预加载荷(低于 30%极限载荷)较小时,极限载荷并未出现明显下降;当预加载荷(大于 50%极限载荷)较大时,试样极限载荷出现较大幅度下降。FRP 和钢结构在冻融循环和干湿循环环境下的界面粘结性能试验表明,冻融循环和干湿循环处理后,FRP 加固钢结构界面粘结性能出现大幅下降。干湿循环 15 次试样粘结极限载荷下降 57%,冻融循环 25 次试样粘结极限载荷下降 60%。当预加载荷与干湿环境共同作用 FRP-钢结构时,FRP-钢结构粘结性能变得不稳定,极限载荷大幅下降,当预加载荷为极限载荷 30%时,干湿循环 120 次后试样极限载荷下降幅度达 78%。

总结已有的部分研究成果,可将环境因素对 FRP 加固结构的影响归为以下几类<sup>[54-57]</sup>。

1) 温度、水分、化学介质等环境因素对粘结剂都有较为明显的劣化作用,胶粘剂的抗拉强度、抗压强度和弹性模量等都逐渐下降。酸、碱性环境对 CFRP 有一定的劣化作用,干湿环境、冻融环境、温度、湿度等对 CFRP 的抗拉强度、弹性模量和断裂延伸率影响则很小,某些性能还有所提高。与 CFRP 相比,GFRP 受酸、碱性环境影响更大。在干湿环境、冻融环境、高温高湿环境作用下,GFRP 的抗拉强度、弹性模量和断裂延伸率都有不同程度的下降。总体而言,加固材料中,粘结剂性能受环境影响最大,CFRP 的耐久性能优于 GFRP。

2) 酸性环境、碱性环境、干湿环境、冻融环境、湿热环境、应力环境等对 FRP 加固结构界面粘结性能都有较为明显的不利影响。老化处理后,界面粘结强度下降明显,原因主要是环境因素的作用使得胶粘剂产生膨胀、溶解、龟裂等,使得胶粘剂自身粘结性能下降明显。其次,侵蚀介质渗入粘结界面取代粘结剂,削弱界面的粘结强度。与单一环境因素作用试样作对比,当两种或两种以上环境共同作用时,界面粘结性能下降速率呈上升趋势,粘结界面性能变得非常不稳定。

3) 酸性环境、碱性环境、干湿环境、冻融环境、

湿热环境、应力环境等对 FRP 加固结构的抗拉、抗弯或抗压性能都有一定的不利影响。老化处理后, 粘结界面成为加固结构的薄弱单元, FRP 与加固结构的变形协调能力下降, 容易过早地发生 FRP 与加固结构界面剥离破坏, FRP 的利用率严重下降。选择不同的胶粘结、不同的表面处理工艺以及加固工艺等对加固结构的耐久性能也有一定影响。

上述研究成果也为将来如何提高加固结构的耐久性能提供了研究方向。

1) 研制性能更优异的胶粘剂, 提高胶粘剂的交联度、耐水性能、玻璃化转变温度以及与被粘物的粘结性能等。

2) 选择更好的工艺对被粘材料进行表面处理, 使胶粘剂与被粘物表面充分浸润, 减少界面粘结缺陷, 提高粘结剂与被粘物界面的物理或化学连接。

3) 选择合理的粘结工艺。粘结工艺的不同对加固结构耐久性也有一定的影响, 如含胶量、FRP 尺寸、补片层数、粘贴方式等。

4) 加固后的表面防护措施。采用防腐涂层对粘结区域进行表面防护可在一定程度上延缓水或其他腐蚀对 FRP 的侵蚀, 改善加固结构的耐久性。

## 5 结论与展望

FRP 加固金属结构作为一种新型修理技术, 已经得到越来越多的研究和应用, 尽管已取得一定的成就, 但作为一种新技术, 仍有很多问题亟待解决。未来应重点研究以下几个方面的内容: 尽快制定相应的行业标准和具体的修理准则, 使修理过程规范化; 新型加固结构的设计研究, 使 FRP 修复金属技术得到更广阔的应用; 研制新型高性能材料, 包括提高 FRP 材料和粘结剂性能, 降低 FRP 价格等; 表面不规则构件的损伤修理研究; 表面处理工艺的研究, 提高修理结构粘接性能; 修复效果的评估准则和测试方法的研究。

### 参考文献:

- [1] 胡芳友, 回丽, 易德先, 等. 飞机损伤的激光抢修技术[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2245-2249.
- [2] MALARVIZHI S, BALASUBRAMANIAN V. Effects of Welding Process on AA2219 Aluminum Alloy Joint Properties[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(5): 962-973.
- [3] 周传文. 全自动钻铆技术在飞机壁板上的应用[J]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [4] 刘岩, 贾若. 铆接冲击力对飞机蒙皮的影响[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2013, 20(4): 261-263.
- [5] ORTON S L, JIRSA J O, BAYRAK O. Design Considerations of Carbon Fiber Anchors[J]. Journal of Composites

- for Construction, 2008, 12(6): 608-616.
- [6] YUAN H, TENG J. Full-range Behavior of FRP-toconcrete Bonded Joints[J]. Engineering Structures, 2004, 26(8): 553-565.
- [7] BENACHOUR A, BENYOUCEF S, TOUNSI A, et al. Interfacial Stress Analysis of Steel Beams Reinforced with Bonded Prestressed FRP Plate[J]. Engineering Structure, 2009, 30(11): 3305-3315.
- [8] RAMOS G, CASAS J R, ALARCON A. Repair and Strengthening of Segmental Bridges Using Carbon Fibers[J]. Engineering Structures, 2004, 26(5): 609-618.
- [9] 张术宽. FRP 加固含缺陷钢结构的破坏力学分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [10] LIU X, SILVA P F, NANNI A. Rehabilitation of Steel Bridge Members with FRP Composite Materials[C]// Proc 1st Int Conf Composites in Construction. 2001.
- [11] 沙吾列提·拜开依, 冯鹏, 叶列平, 等. FRP 快速抗弯曲加固轴压钢构件方法的试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 105-113.
- [12] 张珂, 杨晓华, 周凯, 等. 复合材料补片参数对修理后金属结构疲劳性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(3): 369-373.
- [13] 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.
- [14] YANG Jia-qi, SMITH S T, FENG Peng. Effect of FRP-to-metal Bonded Joint Configuration on Interfacial Stresses: Finite Element Investigation[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 62: 215-228.
- [15] MILLER T C. The Rehabilitation of Steel Bridge Griders Using Advanced Composites Materials[D]. Master's Thesis: University of Delaware, 2000.
- [16] 和超, 丁红岩, 范世平, 等. 纤维布加固无粘结预应力梁抗弯试验研究[J]. 天津大学学报, 2012, 45(11): 969-975.
- [17] VALERIE L, ERWIN G, LAW M. Strategies for the Repair of Stress-corrosion Cracked Gas Transmission Pipelines: Assessment of the Potential for Fatigue Failure of Dormant Stress-corrosion Cracks Due to Cyclic Pressure Service[J]. Global Pipeline Monthly, 2008, 4(1): 118-125.
- [18] 冯鹏, 张龔华, 叶列平. FRP 套管砂浆组合加固双轴对称轴压钢构件试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 29-37.
- [19] SHAAT A, FAM A. Axial Loading Tests on Short and Long Hollow Structural Steel Columns Retrofitted Using Carbon Fibre Reinforced Polymers[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, 33(4): 458-470.
- [20] 朱春阳, 赵颖华, 李晓飞. FRP-钢管-混凝土构件抗震性能试验研究[J]. 复合材料学报, 2013, 30(1): 180-186.
- [21] TENG J G, YU T, WONG Y L. Hybrid FRP-concrete-steel Tubular Columns: Concept and Behavior[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(4): 846-854.
- [22] 余涛, 滕锦光. FRP-混凝土-钢双壁空心构件及其在桥梁结构中的应用前景[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011, 9(5): 20-23.
- [23] 张磊, 滕锦光, HOLLAWAY L C, 等. 一种快速 FRP 加

- 固钢结构的新技术[J]. 土木工程学报, 2008, 41(1): 6-14.
- [24] 吴涛. 预应力 CFRP 加固钢梁抗弯性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [25] 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.
- [26] 黄丽华, 李宇婧, 张耀烨, 等. 不同种类 FRP 加固混凝土梁加固效果试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(1): 102-107.
- [27] 刘君, 周朝阳, 韩殿牧原, 等. 抗剪加固 U 形纤维布条带预应力系统设计及试验[J]. 湖南大学学报, 2016, 43(11): 47-54.
- [28] NAKABA K, KANAKUBO T, FURUTA T. Bond Behavior between Fiber-reinforced Polymer Laminates and Concrete[J]. ACI Structure Journal, 2001, 98(3): 1-9.
- [29] HOMAM S M. Fiber Reinforced Polymers and FRP-concrete Composites Subjected to Various Loads and Environmental Exposures[D]. Canada: University of Toronto, 2005.
- [30] 马建勋, 宋松林, 蒋湘闽. 碳纤维布-钢构件抗剪粘结性能试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 181-186.
- [31] 杨勇新, 马明山. 碳纤维布与钢材粘结性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(5): 31-33.
- [32] 彭福明, 郝际平, 岳清瑞, 等. FRP 加固修复钢结构的荷载传递效果分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 26-30.
- [33] DENG Jun, MARCUS M K Lee, STUART S J Moy. Stress Analysis of Steel Beams Reinforced with a Bonded CFRP Plate[J]. Composite Structures, 2004, 65: 205-215.
- [34] MUKHOPADHYAYA P, SWAMY N. Interface Shear Stress: A New Design Criterion for Plate Debonding[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(1): 35-43.
- [35] 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.
- [36] TAVAKKOLIZADEH M, SAADATMANESH H. Repair of Damaged Steel-concrete Composite Girders Using Fiber-reinforced Polymer Sheets[J]. Journal of Composites for construction, 2003, 7(4): 311-322.
- [37] 马建勋, 宋松林, 赖志生, 等. 粘贴碳纤维布加固钢结构受拉承载力实验研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(2): 1-4.
- [38] SEAN C J, SCOTT A, CIVJAN P E. Application of Fiber Reinforced Polymer Overlays to Extend Steel Fatigue Life[J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(44): 331-338.
- [39] 赵培仲, 张永刚, 周向华, 等. 表面处理工艺对复合材料粘结修理性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(3): 44-47.
- [40] 蔡洪能, 陆玉姣, 王雅生, 等. FRP 补强疲劳损伤钢结构裂纹扩展研究[J]. 材料工程, 2006(Z1): 378-381.
- [41] LIU J, CHAUDHURY M K. Effect of Surface Morphology on Crack Growth at a Sol-gel Reinforced Epoxy/Aluminum Interface[J]. The Journal of Adhesion, 2006, 82: 487-516.
- [42] ZHANG Jin-sheng, ZHAO Xu-hui, ZUO Yu, et al. Effect of Surface Treatment on Adhesive Properties of Aluminum-alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2008, 24(2): 236-240.
- [43] 许小芳, 申世杰, 刘亚兰, 等. 玄武岩纤维增强环氧树脂复合材料复合机制[J]. 复合材料学报, 2011, 28(4): 99-106.
- [44] YUAN W, VAN O W J. Characterization of Organofunction Silane Films on Zinc Substrates[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1997, 185(1): 197-209.
- [45] 易增博, 冯利邦, 郝相忠, 等. 表面处理对碳纤维及其复合材料性能的影响[J]. 材料研究学报, 2015, 29(1): 67-74.
- [46] PENG He, YONG Gao. Surface Modification and Ultrasonication Effect on the Mechanical Properties of Carbon Nanofiber/Polycarbonate Composites[J]. Composites, Part A, 2006(37): 1270-1275.
- [47] 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.
- [48] BLASCHKO M & Z. Rehabilitation of Concrete Structures with Strips Glued into Slits[C]// Proceeding of the 12th International Conference on Composite Materials. Paris, 1999.
- [49] TAREK H, SAMI R. Investigation of Bond in the Concrete Structure Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips[J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(3): 248-356.
- [50] 曾宪桃, 成香莉, 高保彬. 内嵌碳纤维增强塑料板条抗拉加固混凝土梁试验研究[J]. 工程力学, 2008, 21(9): 106-114.
- [51] 任慧韬, 姚谦峰, 胡安妮. 纤维增强复合材料的耐久性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 520-525.
- [52] JONATHAN M W. Accelerated Testing for Bond Reliability of Fiber Reinforced Polymers to Concrete and Steel in Aggressive Environments[D]. Tucson: The University of Arizona, 2003.
- [53] 胡安妮. 荷载和恶劣环境下 FRP 增强结构耐久性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [54] GRACE N F, SINGH S B. Durability Evaluation of Carbon Fiber-reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design[J]. ACI Structure Journal, 2005, 102(1): 40-53.
- [55] MA Hai-yan. Freezing-thawing Durability and Improvement of High Strength Shrinkage Compensation Concrete with High Volume Admixtures[J]. Constr Build Mater, 2013, 39: 124-129.
- [56] CROMWELL J R, HARRIES K A, SHAHROOZ B M. Environmental Durability of Externally Bonded FRP Materials Intended for Repair of Concrete Structures[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2528-2539.
- [57] 杨勇新, 郭春红, 才鹏, 等. FRP 加固结构常用浸渍树脂湿热耐老化研究[C]// 第四届全裹 FRP 应用技术学术交流会. 济南, 2006.