

预应力碳纤维板加固锈蚀钢梁抗弯性能试验研究

张宗星^{1,3}, 徐宇轩¹, 秦广冲², 徐善华³, 彭圣元³

(1. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国船舶重工集团国际工程有限公司, 北京 100121;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 通过碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced composites, CFRP)加固锈蚀钢梁抗弯性能试验, 研究不同预应力度 CFRP 板对锈蚀钢梁破坏模式及抗弯承载力的影响, 揭示 CFRP 板加固锈蚀钢梁受拉区对提升其正截面承载力的作用机理, 探讨 CFRP 板加固锈蚀钢梁界面粘结应力分布规律。结果表明: 试件破坏模式均为跨中粘结界面剪切破坏后 CFRP 板的撕裂, 且 CFRP 板断裂位置大多在加载点。锈蚀钢梁破坏后 CFRP 板产生 5~10 mm 的纵向滑移。粘结剪应力主要分布在 CFRP 板端部区域, 且剪应力最大值在加载点处。15% f_u 预应力水平 CFRP 板可以将锈蚀钢梁承载力提升 23.26%, 达到未锈蚀状态时的承载力, 同时提高 CFRP 板的利用率高达 71.59%。

关键词: CFRP 板; 预应力; 锈蚀; 钢梁; 抗弯性能

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)04-0591-07

Experimental study on bending resistance of corroded steel beams strengthened with prestressed carbon fibre plate

ZHANG Zongxing^{1,3}, XU Yuxuan¹, QIN Guangchong², XU Shanhua³, PENG Shengyuan³

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Jiangsu Xuzhou, 221116, China;

2. China Shipbuilding Industry Corporation International Engineering Co., Ltd., Beijing 100121, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Through the flexural performance test of rusty steel beams strengthened with carbon fiber reinforced composite (CFRP), the effects of different prestressing degrees of CFRP plates on the failure modes and bending capacity of rusty steel beams are studied, the mechanism of tensile zone of corroded steel beam strengthened with CFRP plates to enhance its normal section bearing capacity is revealed, and the distribution of the interfacial stress of corroded steel beam strengthened with CFRP plates is discussed. The test results show that the failure modes of the specimens are the tear of the CFRP plate after the shear failure of bonding interface on the mid span, and the fracture location of the CFRP plate is mostly at the loading point. After the destruction of the damaged steel beam, the longitudinal slip of 5~10 mm is generated on the CFRP plate. The shear stress is mainly concentrated on the end of CFRP, and the peak value of shear stress appears at the loading point. 15% f_u prestressed CFRP plate can increase the bearing capacity of the corroded steel beam by 23.26%, reaching the bearing capacity in the non-corroded state, and improve the utilization rate of CFRP plate by up to 71.59%.

Key words: CFRP plate; prestress; rust loss; steel beam; bending strength

长期处于腐蚀环境下的钢结构工程, 往往难以通过防护与构造措施避免锈蚀, 导致钢结构从满足使用要求的安全状态转变为逐渐破坏或突然失效的危险状态^[1-2]。然而, 传统钢结构加固技术主要通过焊接、螺栓连接或粘结钢板等方式, 存在结构自重增加、施工不便、耐久性不足等问题^[3-4]。因此, 如何有效加固锈蚀钢结构并提升其

承载性能, 是土木工程领域亟需解决的关键问题。

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有轻质、高强、耐腐蚀和施工方便等优点, 广泛应用于钢结构加固修复^[5-8]。但现有研究表明碳纤维板在加固损伤结构过于被动, 严重影响碳纤维板高强度的发挥, 甚至造成结构优先于碳纤维板破坏。而预应力 CFRP 加固技术可以解决以上难点^[9]。Zhou

收稿日期: 2022-11-11

修回日期: 2023-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52108292, 51678477); 中国博士后科学基金资助项目(2021M703508)

第一作者: 张宗星(1990—), 男, 硕导, 研究方向为工程结构耐久性。E-mail: zhangzongxinglr@163.com

等^[10]采用预应力 CFRP 板材加固铝梁, 试件抗弯刚度和极限承载力分别提升了 32.8%、31.13%。贾永辉^[11]通过预应力 CFRP 板加固损伤钢梁实验, 发现预应力 CFRP 板可以有效抑制带缺陷钢梁裂纹发展, 提高钢梁极限承载力。霍君华等^[12]开展 CFRP 加固损伤钢梁抗弯性能试验研究, 通过切除钢梁部分下翼缘模拟局部腐蚀, 但腐蚀引起的钢结构缺陷与人为缺陷(线切割、焊缝)存在差异, 锈蚀钢结构表面粗糙不平, 造成了钢材塑性和断裂韧性降低, 形成了锈蚀表面与 CFRP 粘结层独有的相互作用机理^[13-14], 有必要针对预应力 CFRP 板加固锈蚀钢梁的抗弯性能开展深入研究。

本文通过室外中性盐雾试验模拟近海大气环境, 得到锈蚀龄期为 6 个月的 H 型钢构件。为了模拟钢梁下翼缘易锈蚀的情况, 将未腐蚀和腐蚀钢梁沿腹板中心轴切割成两个 T 形截面。并采用焊接方法, 以腹板中轴为界, 将 T 形截面焊接为下翼缘锈蚀而上翼缘未锈的拼接钢梁, 研究 CFRP 板加固锈蚀钢梁受拉区对提升其正截面承载力的作用机理及界面应力分布的影响。

1 试验概况

1.1 材料性能

依据 GB/T 10125—2012《人造气氛锈蚀试验-盐雾试验》^[15]和 GB/T 24517—2009《金属和合金的锈蚀户外周期喷淋暴露试验方法》^[16], 采用中性盐雾加速腐蚀试验模拟近海大气环境, 对 Q235B 热轧 H 型钢进行快速腐蚀, 总龄期为 6 个月。试件截面尺寸为 150 mm×150 mm×6 mm×8 mm。从钢梁翼缘截取板条制成标准试件进行拉伸试验, 腐

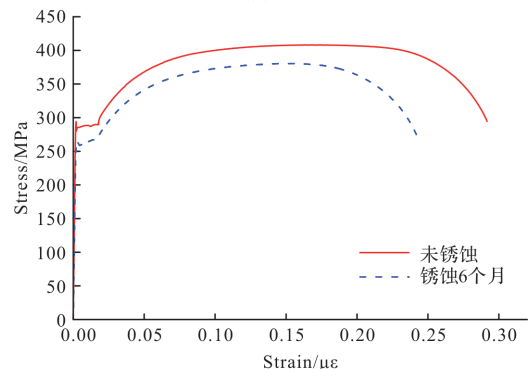
蚀试件及钢材本构关系如图 1 所示。采用质量损失率评价构件锈蚀程度, 公式如下。

$$\eta = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为试件锈蚀率(%), M_0 和 M_1 分别为试件锈蚀前后的质量(g)。



(a) 锈蚀试件



(b) 锈蚀钢材应力-应变曲线

图 1 锈蚀试件及钢材应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of corroded specimen

CFRP 板选用卡本公司的高强碳纤维板, 规格为 50 mm×2 mm, 粘结剂为 Sikadur®-30CN 双组份环氧结构加固碳板胶, 基本力学性能为厂家提供参数, 详见表 1。

表 1 加固材料的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of materials

材料	抗拉强度/MPa	剪切强度/MPa	剪切模量/GPa	弹性模量/GPa	伸长率/%	泊松比
CFRP	2454	60.7	6	168	1.66	0.25
Sikadur®-30 CN	46	26	1.23	3.2	1.5	0.25

1.2 试件设计

通过中性盐雾加速腐蚀试验, 得到锈蚀龄期 6 个月的试验试件, 并以腹板中轴为界, 将未腐蚀和腐蚀钢梁沿腹板中心轴切割成两个 T 形截面。并采用焊接方法, 控制 150 mm 的截面高度, 以腹板中轴为界, 将 T 形截面焊接为下翼缘锈蚀而上翼缘未锈的拼接钢梁。另外, 在钢梁端部下翼缘打孔, 通过螺栓连接方式固定碳纤维板。试验共制作 5 根钢梁, 其中 1 根为完好钢梁、1 根为未加固锈蚀钢梁、3 根为不同预应力水平 CFRP 板加固的锈蚀钢梁, 具体制作过程见图 2。



(a) 试件切割

(b) 加工成型

图 2 试件加工过程

Fig. 2 Specimen processing process

根据 Sikadur®-30 CN 加固胶使用说明, 称量 Part A、Part B, 按组分 A : B = 3 : 1 (重量比) 进行混合, 最后用搅拌机混合呈均匀灰色。胶内掺

入少量直径 1 mm 的钢球控制胶层厚度, 并用丙酮清洗打磨后的钢梁表面, 均匀涂胶. 然后施加预应力, 具体施加过程如下: 将钢梁置于张拉装置中间, 并用 G 字夹将其与底座钢梁固定, 防止张拉过程产生微小位移. 然后将 CFRP 板锚固于固定端, 并拉直 CFRP 板达到预应力水平后用高强螺栓夹紧. 预应力水平通过粘贴在 CFRP 板中间的应变片读数控制, 同时预应力张拉过程, 如图 3 所示, 试件主要参数见表 2.

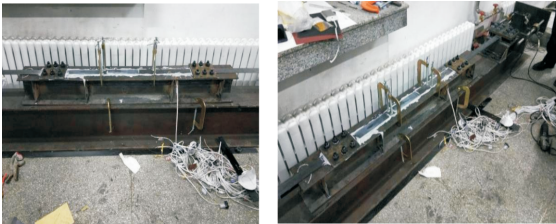


图 3 预应力张拉装置
Fig. 3 Tension device of prestress

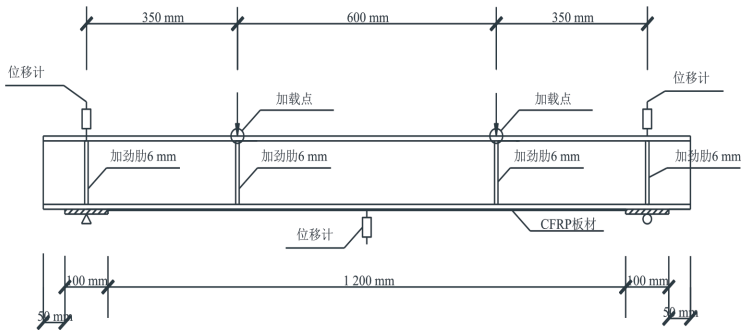


图 4 加载装置示意图
Fig. 4 Schematic diagram of loading device

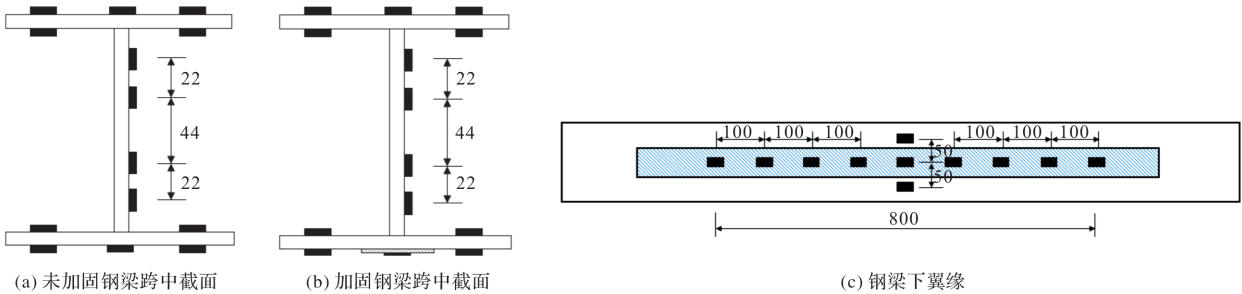


图 5 试验钢梁应变片位置
Fig. 5 Position of strain gauge of steel beam

2 试验现象

通过试验发现: 未加固钢梁的破坏形态为纯弯段上翼缘局部失稳, CFRP 板加固钢梁的破坏形态均为 CFRP 板的断裂, 且位置大多在加载点附近, 具体破坏模式, 如图 6 所示.

A-0 (未锈蚀钢梁): 加载初期, 试件变形较小, 处于弹性变形阶段. 加载至 0.7 P_u (P_u 为极限

表 2 试件主要参数

Tab. 2 Main parameters of specimens

试件编号	锈蚀程度 η	加固方式	预应力水平
A-0	未锈蚀	未加固	0
A-1	14 %	未加固	0
B-1	14 %	非预应力加固	0
BP-1	14 %	预应力加固	8 % f_u
BP-2	14 %	预应力加固	15 % f_u

注: f_u 为碳纤维板的极限抗拉强度

1.3 加载装置及测点布置

加载初期, 荷载每级增加 30 kN; 当试件屈服时, 每级增加 15 kN. 试件一端为滑动铰支座, 水平方向可以适量移动, 另一端为固定铰支座. 加载过程中钢梁承受对称集中荷载作用, 间距为 600 mm. 试验内容测量包括应变和位移, 力的控制通过力传感器进行. 试验装置如图 4 所示, 应变片粘贴位置见图 5.

荷载)时, 钢梁跨中截面下翼缘屈服. 加载至 0.82 P_u 时, 钢梁上翼缘加载点处屈曲, 跨中挠度达到 16.54 mm. 加载至 0.89 P_u 时, 钢梁整体弯曲变形明显, 继续缓慢加荷至 402 kN 时, 钢梁上翼缘屈曲, 试件破坏.

A-1 (未加固锈蚀钢梁): 加载初期与 A-0 相似. 加载至 0.67 P_u 时, 钢梁跨中下翼缘屈服. 加载至 0.78 P_u 时, 钢梁整体变形明显, 跨中挠度达

到 13.86 mm. 加载至 $0.87 P_u$ 时, 钢梁上翼缘掉漆明显, 加载点处翼缘屈曲变形. 加载至 $0.91 P_u$

时, 钢梁下翼缘铁锈大面积脱落, 缓慢加载至 346.33 kN 时, 上翼缘屈曲变形严重, 钢梁破坏.

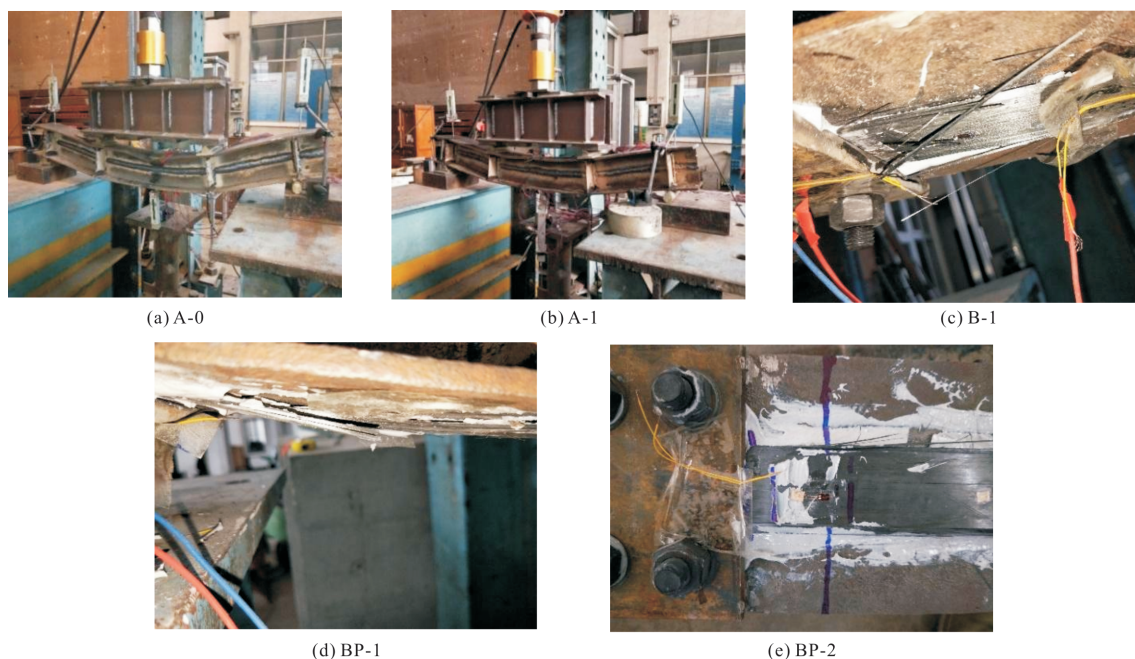


图6 不同锈蚀程度试件破坏模式

Fig. 6 Failure modes of specimen with different corrosion degrees

B-1(锈蚀钢梁, 粘贴非预应力 CFRP 板): 加载初期试件变形小, 处于弹性阶段. 加载至 $0.63 P_u$ 时, 钢梁跨中下翼缘屈服. 加载至 $0.83 P_u$ 时, 钢梁上翼缘加载点局部屈曲. 加载至 $0.91 P_u$ 时, 钢梁左侧螺栓锚固处发出巨大响声, 胶层局部出现裂纹. 加载至 $0.97 P_u$ 时, 胶层发出频繁响声, 持荷一段时间, 跨中 CFRP 板与钢梁基本脱离. 加载至 $0.98 P_u$ 时, 端部锚固处 CFRP 板撕裂破坏, 加载至 381.85 kN 时, 上翼缘屈曲严重, 钢梁破坏. 此时钢梁左侧锚固端 CFRP 板产生 5.0 mm 滑移.

BP-1(锈蚀钢梁, 粘贴预应力度 $8\% f_u$ 的 CFRP 板): 加载初期与 B-1 相似. 加载至 $0.93 P_u$ 时, 右侧锚固端胶层出现四条细微裂纹, 裂纹间距 3 mm. 加载至 $0.97 P_u$ 时, 钢梁上翼缘加载点处屈曲变形, 突然胶层与碳板处发出巨大响声, 胶层与 CFRP 板大面积脱离. 加载至 $0.98 P_u$ 时, 钢梁下翼缘右侧(距离支座 30 mm 处), CFRP 板横向被撕裂成段并纵向拉断. 加载至 393.9 kN 时, 上翼缘屈曲, 钢梁破坏. 此时钢梁左侧锚固处 CFRP 板滑移 10 mm.

BP-2(锈蚀钢梁, 粘贴预应力度 $15\% f_u$ 的 CFRP 板): 加载至 $0.63 P_u$ 时, 钢梁跨中挠度超过 6.5 mm, 达到正常使用极限状态. 加载至 $0.88 P_u$ 时, 钢梁底部出现响声, 胶层出现裂纹.

加载至 426.88 kN 时, 钢梁底部出现巨响, 胶层与 CFRP 板大面积脱离, 钢梁底部左侧 CFRP 板横向撕裂, 继续缓慢加载, 上翼缘中段屈曲变形, 钢梁破坏. 此时钢梁右侧碳板产生 10 mm 滑移.

3 试验结果分析

3.1 荷载-挠度曲线

试件的荷载-位移曲线, 如图 7 所示. 从图中可以看出, 所有试件的荷载-位移曲线形式基本一致, 但脱胶导致 CFRP 加固钢梁曲线出现下降段, 并由于锚固端的作用其承载力持续增加.

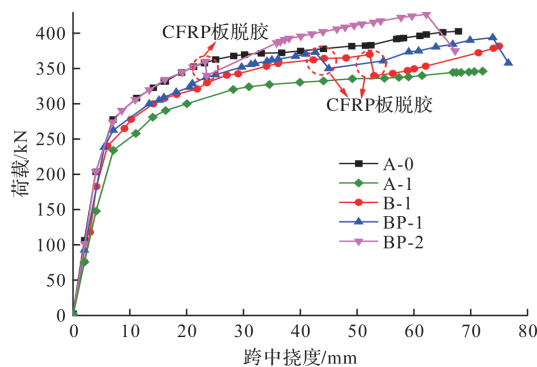


图7 试件的荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curve of specimens

表 3 为试件的极限荷载和屈服荷载. 从图中可以发现, 相对于未加固锈蚀钢梁, CFRP 板加固锈蚀钢梁屈服承载力提高了 2.56%~23.9%, 极限

承载力提高了 7.95%~23.26%, 预应力 CFRP 板比未施加预应力的具有更明显的优势; 相对于未锈损钢梁, CFRP 板加固锈损钢梁屈服承载力恢复到 86.64%~104.69%, 极限承载力恢复到 92.82%~105.98%, 说明预应力 CFRP 板可将锈蚀钢梁恢复至未锈蚀状态。

表 3 试件极限荷载和屈服荷载对比
Tab. 3 Comparison of ultimate load and yield load of specimens

试件编号	屈服荷载/kN	与试件 A-1 梁对比	与试件 A-0 对比	极限荷载/kN	与试件 A-1 对比	与试件 A-0 对比
A-0	277	18.38%	/	402.78	16.30%	/
A-1	234	/	-15.52%	346.33	/	-14.01%
B-1	240	2.56%	-13.36%	373.85	7.95%	-7.18%
BP-1	263	12.22%	-5.2%	393.9	13.74%	-2.2%
BP-2	290	23.9%	4.69%	426.88	23.26%	5.98%

3.2 应变分析

3.2.1 平截面假定

试件跨中截面应变分布情况, 如图 8 所示. 从图中可以看出, 钢梁的跨中截面应变基本符合平截面假定, 但中性轴并不位于 H 型钢截面的对称轴位置, 而随着荷载增加, 逐渐下移。

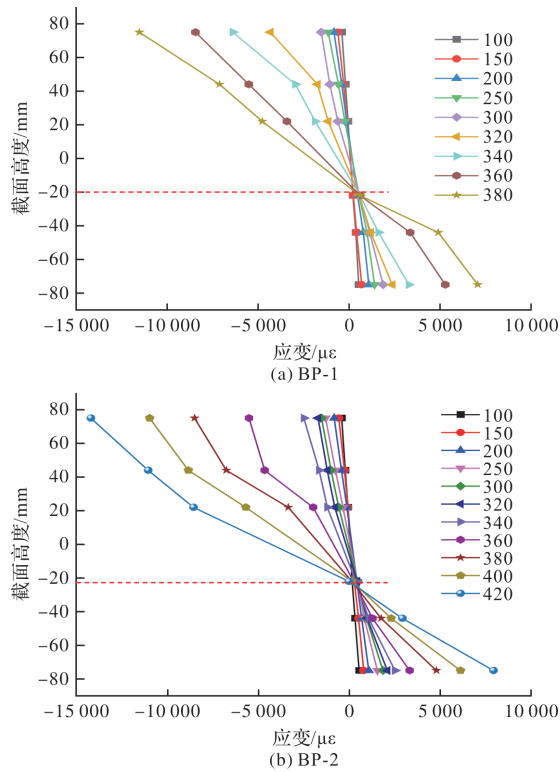


图 8 试件跨中截面应变分布

Fig. 8 Strain distribution of cross section of specimen

3.2.2 CFRP 板纵向应变分布

CFRP 板纵向应变分布如图 9 所示. 试件达到剥离荷载前, CFRP 板处于粘结状态, 应变沿钢梁跨度方向变化规律明显. 当达到剥离荷载后, 碳板处于无粘结应力状态, 沿长度方向应力重分布, CFRP 板各位置应变基本相同。

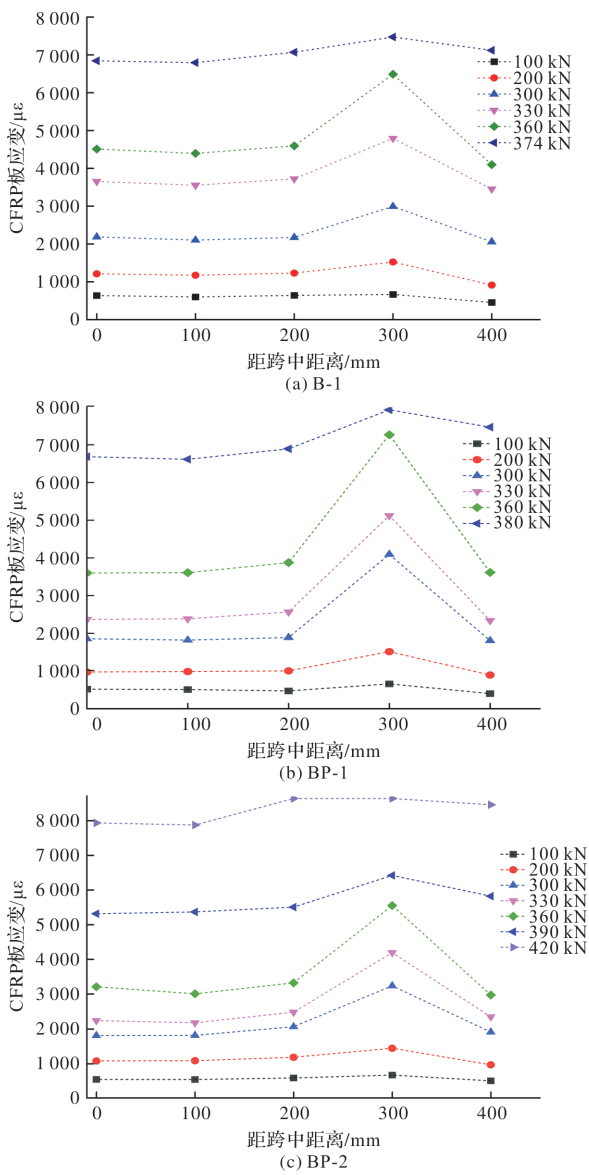


图 9 碳板在不同荷载作用下的应变

Fig. 9 Strain of carbon plate under different loads

3.2.3 界面剪应力分析

通过张贴在 CFRP 板表面应变片测得的应变, 计算加固钢梁界面剪应力为

$$\tau_{i+0.5} = \frac{\epsilon_i - \epsilon_{i+1}}{\Delta L_{i,i+1}} E_p t_p \quad (2)$$

式中: $\tau_{i+0.5}$ 为应变片之间的剪应力, ϵ_i 和 ϵ_{i+1} 分别为第 i 、 $i+1$ 应变片的应变, $\Delta L_{i,i+1}$ 为应变片的距离。 E_p 和 t_p 分别为 CFRP 板的弹性模量和厚度。

加载点位置的 CFRP 在不同荷载作用的界面剪应力如图 10 所示。当剪应力达到最小值, CFRP 板开始剥离。本文取界面剪应力最小对应的荷载作为 CFRP 板剥离荷载。试件剥离荷载, 如表 4 所示。

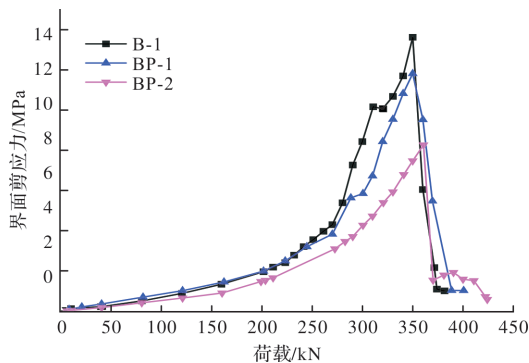


图 10 试件界面剪应力-荷载曲线

Fig. 10 Interfacial shear stress-load curve of specimen

表 4 试件的剥离荷载

Tab. 4 Stripping load of specimen

试件编号	最小剪应力/MPa	剥离荷载/kN
B-1	1.584	375
BP-1	1.478	380
BP-2	1.984	370

3.2.4 CFRP 板强度利用率分析

CFRP 板利用率为极限荷载对应的应变(包括初始应变)与其极限应变的比值。表 5 是试件不同阶段的 CFRP 板利用率。其中初始应变取张拉完成后放张拉时的瞬时应变, 钢梁屈服和极限荷载对应的应变取跨中 CFRP 板处。

表 5 碳板利用率

Tab. 5 Utilization ratio of CFRP plate

试件 编号	初始 应变 / $\mu\epsilon$	屈服荷载 对应的应 变/ $\mu\epsilon$	利用 率/%	极限荷载 对应的应 变/ $\mu\epsilon$	利用 率 /%
B-1	0	2 234	18.9	8 501	56.7
BP-1	1 200	2 418	24.1	8 410	64.1
BP-2	2 100	2 901	33.34	8 639	71.59

由表 5 可知钢梁屈服时, 非预应力 CFRP 板加固钢梁的碳纤维板利用率仅为 18.9%, 而 15% f_u 预应力水平下 CFRP 板利用率提高到 33.34%; 对比极限状态, 非预应力 CFRP 板加固钢梁的碳纤

维板利用率为 56.7%, 造成大量的浪费。但预应力 CFRP 板的自身利用率显著提高, 其中 15% f_u 预应力水平对应的利用率为 71.59%。可见预应力 CFRP 片材能够充分发挥材料性能, 提升碳纤维板的利用率, 使 CFRP 片材对结构起到主动加固的作用。

4 结论

(1) CFRP 板加固锈蚀钢梁的破坏均为 CFRP 板的撕裂, 试件破坏后 CFRP 板产生 5~10 mm 纵向滑移。粘结剪应力主要集中在碳纤维板端部区域, 且剪应力峰值出现在加载点;

(2) 预应力 CFRP 板可有效提升锈蚀钢梁承载力, 最高达 23.26%; 相比于未锈蚀钢梁, 预应力 CFRP 板加固锈蚀钢梁可将其极限承载力恢复至 92.82%~105.98%, 说明预应力 CFRP 板可将锈蚀钢梁承载力恢复至未锈蚀状态;

(3) 预应力 CFRP 板加固钢梁显著提升 CFRP 板利用率, 非预应力 CFRP 板加固钢梁的碳纤维板利用率仅为 56.7%, 15% f_u 预应力水平对应的碳纤维板利用率为 71.59%。

参考文献 References

- [1] 徐善华, 张宗星, 苏超, 等. 中性盐雾环境锈蚀 H 型圆柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1):49-57.
XU Shanhua, ZHANG Zongxing, SU Chao, et al. Experimental study on seismic behavior of corroded H-shaped steel columns under neutral salt spray environment[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1):49-57.
- [2] 徐善华, 张宗星, 何羽玲, 等. 考虑蚀坑影响的腐蚀钢板力学性能退化试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(2):164-171.
XU Shanhua, ZHANG Zongxing, HE Yuling, et al. Experimental study on monotonic tensile behavior of corroded steel in neutral salt spray environment[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2017, 49(2):164-171.
- [3] ZHAO Xiao-Lin, ZHANG Lei. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. Engineering Structures[J], 2007, (29):1808-1823.
- [4] 程璐, 冯鹏, 徐善华, 等. CFRP 加固钢结构抗疲劳技术研究综述[J]. 玻璃钢复合材料, 2013, (4):58-62.
CHENG Lu, FENG Peng, XU Shanhua, et al. The Technology and Research of Steel Structure Strengthened with CFRP[J], Composites Science and Engi-

- neering, 2007, (29):1808-1823.
- [5] 彭福明,岳清瑞,郝际平. 碳纤维增强复合材料(CFRP)加固修复损伤钢结构[J]. 工业建筑, 2003, 33(9):7-10.
- PENG Fuming, YUE Qingrui, HAO Jiping. CFRP for strengthening and repairing of damaged steel structure[J]. Industrial Construction, 2003, 33(9):7-10.
- [6] 卢亦焱,龚田牛,李杉,等. 预应力碳纤维布加固钢梁抗弯承载力研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(6):104-109.
- LU Yiyang, GONG Tianniu, LI Shan, et al. Study on flexural strength of steel beams strengthened with prestressed carbon fiber reinforced polymer (CFRP)[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(6):104-109.
- [7] 吴涛. 预应力碳纤维布加固钢梁抗弯性能研究[D]. 武汉:武汉大学, 2005.
- WU Tao. Research on flexural behavior of steel beams strengthened with prestressed CFRP sheets[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [8] 刘清平,王静峰. 采用H型钢梁与碳纤维布加固在工程中的应用[J]. 结构工程师, 2004, 20(6):70-73.
- LIU Qingping, WANG Jingfeng. Application of H-Shaped Beam and CFRP Sheet in Strengthening of a Building[J]. Structural Engineers, 2004, 20(6):70-73.
- [9] STRATFORD T, CADEI J. Elastic analysis of adhesion stresses for the design of a strengthening plate bonded to a beam[J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(1-2):34-45.
- [10] ZHOU Y, FAN H, JIANG K, et al. Experimental flexural behaviors of CFRP strengthened aluminum beams[J]. Composite Structures, 2014, 116(1):761-771.
- [11] 贾永辉. 预应力CFRP板加固带缺陷钢梁抗弯性能试验研究[D]. 广州:广东工业大学, 2017.
- JIA Yonghui. Experimental study on the flexural capacity of notched steel beams strengthened with prestressed CFRP plate[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017.
- [12] 霍君华,王连广,张海伏,等. 预应力CFRP布加固腐蚀钢梁试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11):72-77.
- HUO Junhua, WANG Liangguang, ZHANG Haifu, et al. Experimental research on prestressed CFRP sheets strengthened corroded steel beams[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(11):72-77.
- [13] 李安邦,徐善华. 锈蚀对钢板表面特性及CFRP板-锈蚀钢板界面黏结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(2):746-758.
- LI Anbang, XU Shanhua. Effect of corrosion on the surface properties of steel plate and interfacial bonding properties between CFRP plate and corroded steel plate[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(2):746-758.
- [14] 李安邦,徐善华,吴成,等. 外贴CFRP板加固锈蚀钢板疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(7):62-72.
- LI Anbang, XU Shanhua, WU Cheng. Experimental study on the fatigue performance of corroded steel plate strengthened with externally bonded CFRP plates[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(7):62-72.
- [15] 武汉材料保护研究所. 人造气氛锈蚀试验-盐雾试验:GB/T 10125—2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- Wuhan Research Institute of Materials Protection. Corrosion test in artificial atmosphere-salt spray test: GB/T 10125—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [16] 中国兵器工业第五九研究所. 金属和合金的腐蚀-户外周期喷淋暴露试验方法:GB/T 24517—2009[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.
- No. 59 Institute of China Ordnance Industry. Corrosion of metals and alloys-Outdoor cyclic spray exposure test method: GB/T 24517—2009[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.

(编辑 郑晓龙 沈 波)