

粘结层和预应力对CFRP板加固损伤钢梁抗弯性能的影响

王海涛 卞致宁 熊浩 陈敏生 吴琼

Effects of the adhesive layer and prestress on the flexural behavior of damaged steel beams strengthened with CFRP plates

WANG Haitao, BIAN Zhining, XIONG Hao, CHEN Minsheng, WU Qiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220409.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氯盐环境下锈蚀预应力混凝土梁抗弯性能试验

Flexural behavior test of corroded prestressed concrete beams under chloride environment

复合材料学报. 2020, 37(3): 707–715 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190624.003>

预应力高性能混杂纤维增强布加固HPC梁的DNLC单元研究

Research on DNLC element for HPC beams strengthened with high performance prestressed HFRP sheet

复合材料学报. 2017, 34(5): 1152–1158 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160729.001>

CFRP加固钢板的粘结界面剥离破坏

Interfacial debonding failure of CFRP-strengthened steel structures

复合材料学报. 2021, 38(12): 4090–4105 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210317.003>

CFRP布端绕双杆自锁加固混凝土窄梁抗弯试验

Flexure tests on narrow concrete beams strengthened with CFRP sheets end-locked by winding around twin-rods

复合材料学报. 2018, 35(8): 2216–2221 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171115.002>

偏心受拉作用下预应力CFRP筋-型钢混凝土构件抗裂试验

Experiment on crack resistance of prestressed CFRP tendons-steelreinforced concrete members under eccentric tension

复合材料学报. 2021, 38(3): 920–931 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200710.001>

CFRP-钢界面粘结性能试验与数值模拟

Experimental study and numerical simulation for bond behavior of interface between CFRP and steel

复合材料学报. 2018, 35(12): 3534–3546 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180316.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

粘结层和预应力对 CFRP 板加固损伤钢梁抗弯性能的影响



分享本文

王海涛¹, 卞致宁¹, 熊浩^{*2,3}, 陈敏生¹, 吴琼¹

(1. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122;

3. 上海碳纤维复合材料土木工程应用工程技术研究中心, 上海 200122)

摘要: 为了对比粘结层和预应力对碳纤维增强聚合物复合材料 (CFRP) 板加固损伤钢梁抗弯性能的影响, 进行了 5 根 H 型损伤钢梁的抗弯试验, 分析了特征荷载、荷载-挠度曲线、CFRP 板应变及其强度利用率的变化。试验结果表明: 有粘结和无粘结 CFRP 板具有相近的加固效果, 特征荷载差值小于 2%; 非预应力 CFRP 板在正常使用阶段的加固效果很小, 而预应力 CFRP 板加固钢梁的特征荷载比非预应力 CFRP 板提高了近 30%。平截面假定适用于有粘结 CFRP 板-钢梁复合截面, 而不适用于无粘结 CFRP 板-钢梁复合截面。相比于非预应力 CFRP 板, 对 CFRP 板施加预应力可以显著提高 CFRP 板的强度利用率。建立的有限元模型可以较好地预测试件的抗弯性能, 增加 CFRP 板的预应力、厚度和弹性模量可以提高损伤钢梁的抗弯加固效果。

关键词: CFRP 板; 有粘结加固; 无粘结加固; 预应力; 钢梁; 抗弯性能

中图分类号: TU399 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)03-1718-11

Effects of the adhesive layer and prestress on the flexural behavior of damaged steel beams strengthened with CFRP plates

WANG Haitao¹, BIAN Zhining¹, XIONG Hao^{*2,3}, CHEN Minsheng¹, WU Qiong¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Construction Eighth Engineering Division CO., LTD., Shanghai 200122, China; 3. Research Center of Shanghai Carbon Fiber Composite Application Technology in Civil Engineering, Shanghai 200122, China)

Abstract: In order to investigate the effects of the adhesive layer and prestress on the flexural behavior of damaged steel beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) plates, five damaged H-steel beams were tested under flexure. The characteristic load, load-deflection curve, CFRP plate strain and its strength utilization were analyzed. Test results show that the unbonded CFRP plate has a similar strengthening efficiency to the bonded CFRP plate, with a difference of less than 2% in the characteristic loads. The non-prestressed CFRP plate provides only a very small strengthening efficiency under the normal service state. However, the characteristic loads of steel beams strengthened with the prestressed CFRP plate can be significantly increased by about 30% compared with the non-prestressed CFRP plate. The plane section assumption is satisfied in the bonded CFRP plate-steel beam composite section while it is not satisfied in the unbonded CFRP plate-steel beam composite section. Compared with the non-prestressed CFRP plate, the strength utilization of the CFRP plate can be obviously increased when a prestress is applied in the CFRP plate. The developed finite element model can predict the flexural behavior of the specimens with good accuracy. The increase in the prestress, thickness and elastic modulus of the CFRP plate can increase the flexural strengthening efficiency of damaged steel beams.

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-03-31; 录用日期: 2022-04-01; 网络首发时间: 2022-04-12 10:04:06

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220409.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (51708174); 中建股份科技研发计划项目 (CSCEC-2020-Z-1); 上海市科技计划项目 (20DZ2253000)

National Natural Science Foundation of China (51708174); CSCEC Technology R&D Program (CSCEC-2020-Z-1); Shanghai Science and Technology Program (20DZ2253000)

通信作者: 熊浩, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新材料在土木工程中的应用 E-mail: xionghao@cscec.com

引用格式: 王海涛, 卞致宁, 熊浩, 等. 粘结层和预应力对 CFRP 板加固损伤钢梁抗弯性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1718-1728.

WANG Haitao, BIAN Zhining, XIONG Hao, et al. Effects of the adhesive layer and prestress on the flexural behavior of damaged steel beams strengthened with CFRP plates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1718-1728(in Chinese).

Keywords: CFRP plate; bonded strengthening; unbonded strengthening; prestressing; steel beam; flexural behavior

碳纤维增强聚合物复合材料 (CFRP) 具有轻质高强、耐久和抗疲劳性能好、可设计性强等优点,近年来 CFRP 已被广泛应用于工程结构的加固中^[1-5],相比于混凝土结构加固,采用 CFRP 加固钢结构的研究和应用虽起步较晚但近年来也正在受到关注。利用粘结剂将 CFRP 外贴于待加固构件表面是目前较普遍的加固方法, Yousefi 等^[6]进行了外贴 CFRP 板加固钢梁的抗弯试验,发现普通外贴加固容易发生 CFRP 板的剥离失效。如果考虑二次受力等原因,普通外贴 CFRP 板的加固效果将非常有限, CFRP 板的高强度特性不能充分发挥^[7-8]。 Galal 等^[9]通过对比带端部锚固与无端部锚固的 CFRP 加固损伤钢梁,发现端部锚固在一定程度上可以抑制 CFRP 的剥离。为了更好地解决外贴 CFRP 板的剥离和加固效果不明显的问题,国内外学者开展了预应力 CFRP 板加固钢梁抗弯性能的相关研究^[10-14],发现预应力 CFRP 板能更明显地提高钢梁的承载力和刚度,预应力 CFRP 板的端部锚固也可以很好地改善 CFRP 板的端部剥离问题。

现有的预应力 CFRP 板加固钢梁抗弯性能研究主要集中在有粘结预应力 CFRP 板加固技术上,加固时由于需要粘结剂,一方面会延长施工周期,另一方由于构件端部机械式锚具(如夹片式锚具)的存在,导致粘结剂厚度比外贴加固大很多,增加加固成本。无粘结预应力 CFRP 板加固技术则可以很好地避免以上问题,但 CFRP 板与钢梁的共同工作完全依靠端部锚具,因此采用该技术加固后的构件力学性能和加固效果需要研究。 Ghafoori 等^[15]和 Hosseini 等^[16]设计了张弦式和平

板式预应力 CFRP板张拉锚固装置,并利用该装置进行了无粘结预应力 CFRP 板加固钢梁在弹性阶段的抗弯性能试验,结果表明加固后钢梁的承载力显著提高,设计的锚固装置可靠。叶华文等^[17]开展了无粘结预应力 CFRP 板加固损伤钢梁的疲劳试验,发现施加预应力能够降低裂纹扩展速率和受损钢梁残余挠度超过 40%,当 CFRP 板的有效预应力达到 900 MPa 时,钢梁的疲劳寿命可提高 8 倍以上。整体上看,目前国内外仅有极少数针对该技术的研究,在工程应用前仍需对该技术进行更多的研究和验证。

采用 CFRP 板加固钢梁时,基于是否使用粘结剂及施加预应力可分为不同的加固方法,为了对比不同方法的加固效果,本文对不同预应力水平下的有粘结和无粘结 CFRP 板加固损伤钢梁的抗弯性能进行试验和有限元分析,通过对比特征荷载、荷载-位移曲线、CFRP 板应变及其强度利用率等,评估粘结层和预应力对 CFRP 板加固效果的影响,为 CFRP 板在钢梁抗弯加固中的研究和应用提供参考。

1 试验方案

1.1 原材料

钢梁的钢材等级为 Q235 B,根据 GB/T 228.1—2010^[18]实测的钢梁受拉翼缘主要力学指标如表 1 所示。CFRP 板的截面尺寸为 50 mm×2 mm,对于有粘结 CFRP 板加固试件,采用两组份环氧粘结剂将 CFRP 板粘贴在钢梁受拉翼缘下表面,粘结剂的 A 和 B 组份按质量比 2 : 1 混合,根据 GB/T 3354—2014^[19]实测的 CFRP 板主要力学指标及厂家提供的粘结剂主要力学指标见表 1。

表 1 材料的主要力学性能
Table 1 Main mechanical properties of materials

Material type	Elasticity modulus/GPa	Yielding stress/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%
Q235 B steel	207.0	271	429.0	15.78
CFRP plate	163.0	-	2 516.0	1.54
Adhesive	4.5	-	49.2	1.64

Note: CFRP—Carbon fiber reinforced polymer.

1.2 试件设计

试验采用热轧 H 型钢梁制作试件,钢梁的截面尺寸为 200 mm×200 mm×8 mm×12 mm,长度为

3 400 mm,净跨为 3 000 mm,在支座、加载点及支座与加载点的中点处焊接加劲肋,加劲肋厚度为 8 mm。为了模拟初始损伤,在钢梁跨中下翼缘

两侧对称切割两条长度为 40 mm、宽度为 2 mm 的缺口，其中缺口端部的尖端长度为 5 mm。共设计 5 根损伤钢梁试件，包括 1 根未加固钢梁和 4 根加固钢梁，分别采用有粘结和无粘结方式进行加固，每种加固方式设计了非预应力和预应力 2 种预应力水平，加固试件的 CFRP 板长度均为 2 600 mm，试件的设计参数如表 2 所示。表中，试件 B-0 为未加固钢梁；试件 B-BR 为有粘结无预应力 CFRP 板加固钢梁，为了避免 CFRP 板的端部剥离，根据 YB/T 4558—2016^[20] 的构造要求，在

CFRP 板端部正、负 45°方向各粘贴 3 层碳纤维布，其中碳纤维布宽度为 200 mm，单层厚度为 0.167 mm，碳纤维布覆盖钢梁受拉翼缘端部下表面并延伸包裹至受拉翼缘上表面；试件 B-UR 为无粘结无预应力 CFRP 板加固钢梁，为了保证无粘结 CFRP 板加固系统的工作，采用楔形夹片式锚具进行锚固（见 1.3 节）；试件 B-PBR 和 B-PUR 分别为有粘结预应力和无粘结预应力 CFRP 板加固钢梁，设计预应力均为 850 MPa，采用研发的反向张拉锚固系统进行预应力张拉和 CFRP 板锚固（见 1.3 节）。

表 2 CFRP 板加固损伤钢梁试件的加固参数

Table 2 Strengthening parameters of damaged steel beam strengthened with the CFRP plate specimens

Specimen	Sectional area of CFRP plate/mm×mm	Strengthening method	Designed prestress/MPa
B-0	-	Unstrengthening	-
B-BR	50×2	Bonded strengthening	0
B-UR	50×2	Unbonded strengthening	0
B-PBR	50×2	Bonded strengthening	850
B-PUR	50×2	Unbonded strengthening	850

Notes: In the specimen, the first letter B represents the beam; The number 0 represents the unstrengthening, the letters BR, UR, PBR and PUR represent bonded CFRP plate strengthening, unbonded CFRP plate strengthening, prestressed bonded CFRP plate strengthening, and prestressed unbonded CFRP plate strengthening, respectively.

1.3 CFRP 板锚具及预应力张拉

反向张拉锚固系统主要由固定端锚具、固定端支座、张拉端锚具和张拉端支座组成，如图 1 所示，其中张拉端锚具和固定端锚具均为楔形夹片式锚具，张拉端支座和固定端支座分别通过 6 个高强螺栓连接到钢梁下翼缘。通过反向张拉工艺进行预应力张拉，即将千斤顶放置在张拉端锚具内侧通过顶推锚具实现预应力张拉，如图 1 所示。相比于常用的正向张拉工艺，反向张拉工艺所需的端部操作空间大幅降低，即使端部空间受限也能实施张拉，具有更广的工程适用性。施加预应力时，通过监测粘贴在 CFRP 板表面的应变片数据来控制张拉应力的大小。正式张拉前先取 CFRP 板张拉控制应力的 10% 进行预张拉，以确保仪器和张拉系统能正常工作；正式张拉阶段采

用分级张拉形式，每级张拉至 CFRP 板张拉控制应力的 20%，达到张拉控制应力后进行 5% 的超张拉。

1.4 测量及加载方法

试验在量程为 2 000 kN 的液压伺服加载系统上进行，如图 2 所示，采用四点弯曲加载，两个加载点之间的距离为 500 mm。采用位移控制模式，钢梁屈服前的加载速率为 0.2 mm/min，屈服后的加载速率为 0.5 mm/min，在试件的跨中挠度达到 30 mm 时停止加载，此时试件已远超正常使用极

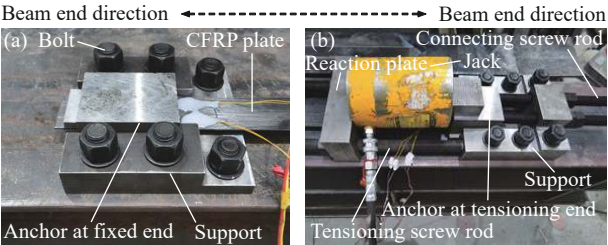


图 1 CFRP 板预应力张拉系统

Fig. 1 Prestress tensioning system of the CFRP plate



图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test setup of the experiment

限状态和翼缘屈服状态。为了测量试件的挠度和应变，在跨中、加载点和支座对应位置处布置位移计；为了研究应变沿 CFRP 板-钢梁复合截面的分布，在钢梁跨中沿竖向以 40 mm 间隔布置应变片，在 CFRP 板跨中位置也布置应变片；为了研究 CFRP 板应变沿长度的分布，在 CFRP 板表面从跨中向两端以 250 mm 间隔布置应变片。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

在加载过程中，所有试件均经历了弹性和弹塑性两个受力阶段，失效模式均为典型的受弯破坏，如图 3(a) 所示。在钢梁下翼缘屈服前，荷载随挠度呈线性增加；在下翼缘开始屈服后，未加

固试件荷载随着挠度的增大而缓慢增加，而各加固试件由于 CFRP 板的加固作用，荷载的增加速度比未加固试件的大。对于有粘结加固试件 B-BR 和 B-PBR，当下翼缘屈服范围达到一定程度后，CFRP 板在钢梁跨中周围出现了界面剥离现象，如图 3(b) 所示；界面剥离由下翼缘屈服引起，这是由于随着下翼缘的不断屈服，下翼缘与 CFRP 板之间的界面相对滑移将逐渐增大，当相对滑移超过最大允许滑移后就会导致剥离^[21]。对于无粘结 CFRP 板加固试件 B-UR 和 B-PUR，由于没有粘结层，钢梁下翼缘与 CFRP 板之间的距离随加载而不断减小，最终紧密贴合，如图 3(c) 所示。在整个加载过程中，所有试件均未发生 CFRP 板端部剥离破坏，验证了试验采用的锚固系统的有效性。

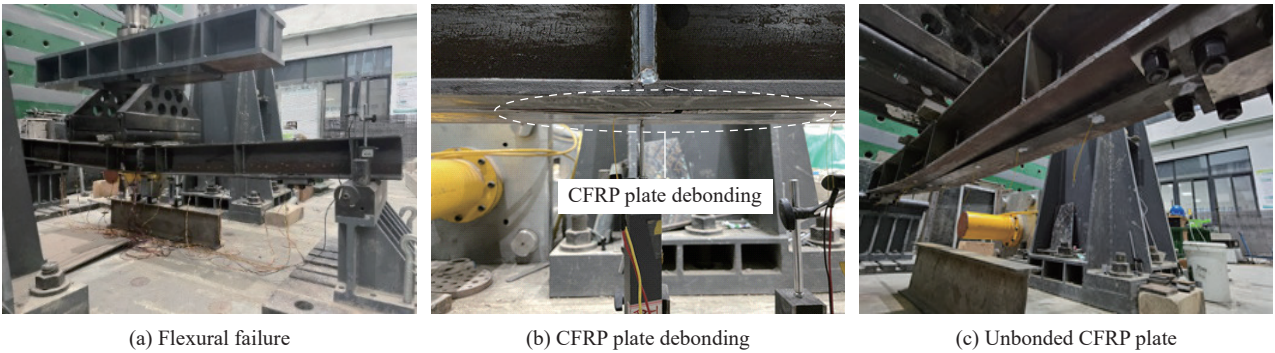


图 3 典型试验现象照片

Fig. 3 Photos of typical test phenomena

2.2 平截面假定验证

以试件 B-PBR 和 B-PUR 为例，分析采用有粘结和无粘结 CFRP 板加固的 CFRP 板-钢梁复合截面是否满足平截面假定，图 4 显示了 2 个试件的跨中截面应变沿竖向的分布。可知，有粘结 CFRP 板加固试件的复合截面在界面剥离前基本满足平截面假定。然而，无粘结 CFRP 板加固试件的复合截面无论在弹性阶段还是弹塑性阶段均不满足平截面假定，在加载过程中 CFRP 板的应变小于钢梁下翼缘应变，且随着荷载的增加两者的应变差越来越大；这主要是由于无粘结 CFRP 板加固试件的钢梁与 CFRP 板之间只能依靠两端的锚具传递荷载，导致 CFRP 板应变增量被“平均”到整个 CFRP 板长度上，使跨中截面的 CFRP 板应变明显滞后于钢梁下翼缘的应变。这说明粘结层的存在能够保证 CFRP 板与钢梁的变形协调，而无粘结 CFRP 板与钢梁之间不能满足变形协调

条件，同时有粘结 CFRP 板可以更有效地限制钢梁下翼缘的应变发展。

2.3 CFRP 板加固损伤钢梁特征荷载

为了定量对比不同加固方式的加固效果，选取特征荷载进行分析。根据 GB/T 50017—2017^[22] 的规定，主梁的挠度容许值为 $l/400$ (l 为钢梁跨度)，针对本试验即为 7.5 mm，将该挠度对应的荷载记为 $P_{7.5}$ ，代表着正常使用极限状态下的荷载，将下翼缘屈服时对应的荷载作为屈服荷载，记为 P_y ，代表着承载力极限状态下的荷载。本节以 $P_{7.5}$ 和 P_y 作为特征荷载进行分析，表 3 列出了各试件的特征荷载及相对于未加固试件的提高程度，即 $\alpha_{7.5}$ 和 α_y 。可以看出，与未加固试件相比，各加固试件的特征荷载均有提高，整体上屈服荷载 P_y 的提高幅度远大于正常使用极限状态荷载 $P_{7.5}$ 的提高幅度，说明 CFRP 板在钢梁屈服后的加固效果远大于在正常使用阶段的加固效果。当预应力

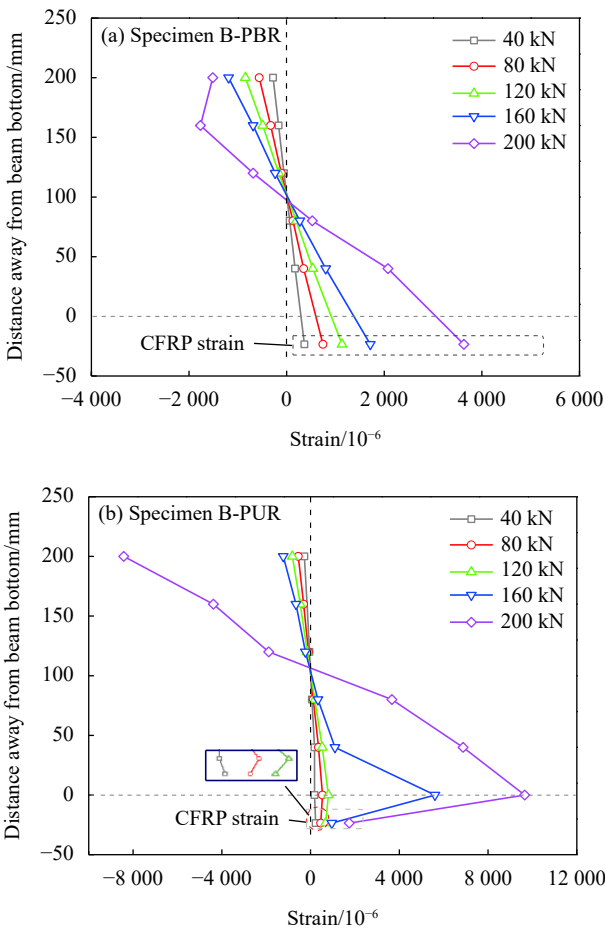


图 4 CFRP 板加固损伤钢梁跨中截面的典型应变分布
Fig. 4 Typical strain distributions at mid-span section of damaged steel beams strengthened with CFRP plates

表 3 CFRP 板加固损伤钢梁特征荷载比较				
Table 3 Comparisons of characteristic loads of damaged steel beams strengthened with CFRP plates				
Specimen	$P_{7.5}/\text{kN}$	$\alpha_{7.5}/\%$	P_y/kN	$\alpha_y/\%$
B-0	102.5	-	105.8	-
B-BR	104.6	2.0	124.6	17.8
B-UR	103.4	0.9	126.5	19.6
B-PBR	131.9	28.7	157.9	49.2
B-PUR	133.5	30.2	158.5	49.8

Notes: $P_{7.5}$ —Load when the mid-span deflection is 7.5 mm; P_y —Yielding load; $\alpha_{7.5}$ and α_y —Ratios between the $P_{7.5}$ and P_y of the strengthened beams and those of the unstrengthened beam, respectively.

水平相同时，有粘结与无粘结 CFRP 板加固试件的特征荷载非常接近，相差不超过 2%，说明在其他条件相同时，有粘结和无粘结 CFRP 板具有几乎相同的加固效果。试验还发现，无论采用有粘结还是无粘结 CFRP 板加固方式，非预应力 CFRP 板的加固效果均非常有限，尤其是在正常使用阶

段的改善效果非常微弱，且屈服荷载的提高幅度也低于 20%；相比较而言，施加预应力可以明显提高试件的特征荷载，预应力 CFRP 板加固试件的特征荷载 $P_{7.5}$ 和 P_y 比未加固试件分别提高了 28.7%~30.2% 和 49.2%~49.8%，比非预应力 CFRP 板加固试件分别提高了 26.1%~29.1% 和 25.3%~26.7%。

2.4 CFRP 板加固损伤钢梁荷载-挠度曲线

试件的荷载-挠度曲线如图 5 所示，图中预应力 CFRP 板加固试件考虑了预应力产生的初始反拱。可以看出，当预应力水平相同时，有粘结与无粘结 CFRP 板加固试件的荷载-挠度曲线在弹性阶段基本重合，试件的承载力及抗弯刚度相近。在弹塑性阶段，随着荷载的不断增加，有粘结 CFRP 板加固试件出现了 CFRP 板跨中剥离后，荷载发生突然降低，而无粘结 CFRP 板加固试件没有这个现象。此外，在弹性阶段非预应力 CFRP 板对钢梁抗弯刚度的影响很小，而只有在达到弹塑性阶段后，CFRP 板对钢梁抗弯刚度的提高才逐渐明显。与非预应力 CFRP 板相比，预应力 CFRP 板对钢梁抗弯刚度的提高更明显，而且由于初始反拱的引入，相同荷载下对挠度的降低也更明显。可见采用预应力有粘结和无粘结 CFRP 板加固方法对钢梁抗弯性能的提升更有效，加固效果更显著。

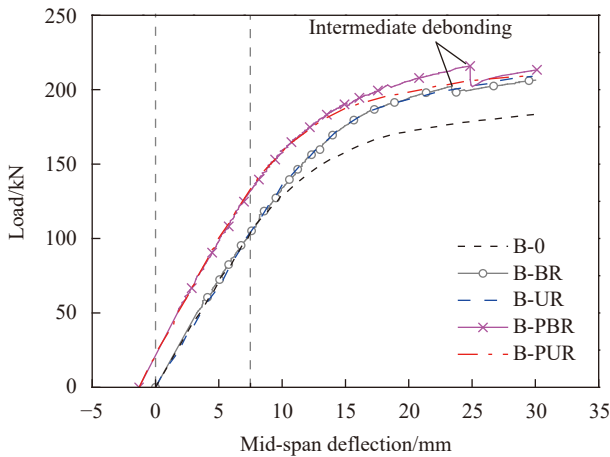


图 5 CFRP 板加固损伤钢梁荷载-挠度曲线
Fig. 5 Load-deflection curves of damaged steel beams strengthened with CFRP plates

2.5 CFRP 板应变分布

典型试件 CFRP 板应变沿长度方向的分布如图 6(a) 所示。可以看出，有粘结 CFRP 板加固试件的 CFRP 板应变由跨中向两侧逐渐降低，而无粘结 CFRP 板加固试件的 CFRP 板应变沿长度基本

保持不变,而且应变值明显小于相同荷载下有粘结 CFRP 板在纯弯段的最大应变。这主要是由于有粘结 CFRP 板加固试件中粘结剂充当钢梁与 CFRP 板之间的传力介质,CFRP 板与下翼缘界面之间的剪应力传递使 CFRP 板与钢梁的协同工作性能较好,因此 CFRP 板与下翼缘的应变分布规律接近;而无粘结 CFRP 板加固试件缺少粘结层,CFRP 板与下翼缘界面之间不存在剪应力的传递,因此 CFRP 板应变沿长度分布均匀,不存在应变梯度。图 6(b) 为加固试件的 CFRP 板跨中应变随荷载的变化曲线。可以看出,在钢梁屈服前,CFRP 板应变随荷载基本线性增大,当钢梁开始屈服后,CFRP 板应变增速开始变快,而且有粘结 CFRP 板加固试件的 CFRP 板跨中应变随荷载的增长速率明显大于无粘结 CFRP 板加固试件。此外,由于预应力 CFRP 板加固试件存在初始应变,在相同荷载下,其 CFRP 板应变明显大于非预应力 CFRP 板加固试件。

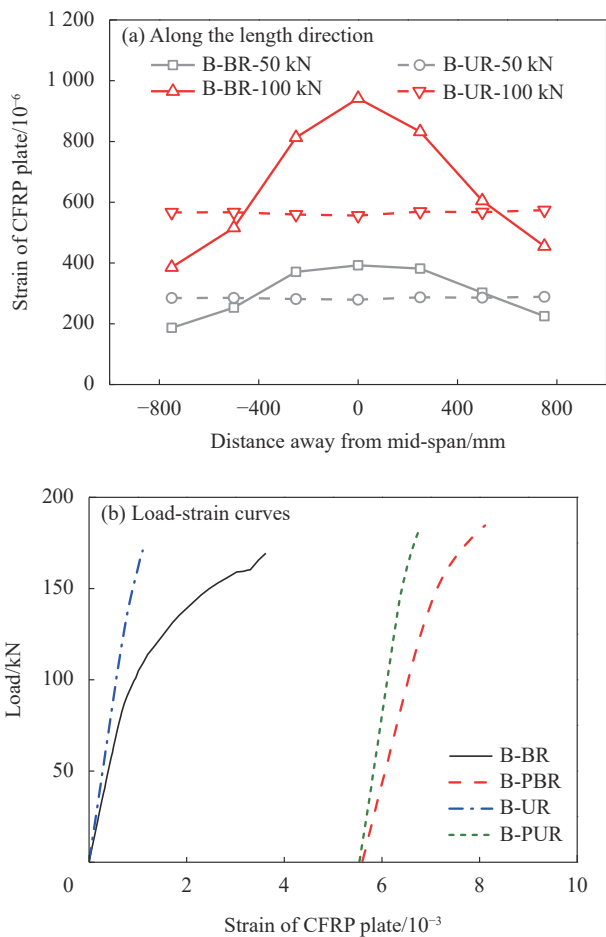


图 6 CFRP 板的应变分布

Fig. 6 Strain distributions of CFRP plates

2.6 CFRP 板强度利用率

CFRP 板具有高强优势,在加固时 CFRP 板强度能发挥多少值得关注。为了说明在不同加载阶段的 CFRP 板强度利用率,表 4 列出了各加固试件的 CFRP 板初始张拉应变(ϵ_0 ,取千斤顶卸下时的 CFRP 板应变)、两个特征荷载对应的 CFRP 板应变($\epsilon_{p7.5}$ 和 ϵ_{py})及其与极限应变(ϵ_u ,数值见表 1)的比值。可知,采用非预应力加固时,在正常使用阶段 CFRP 板的应变很低,其高强度特性远不能发挥,有粘结和无粘结方式的 CFRP 板强度利用率仅为 5.6% 和 3.8%,即使达到屈服荷载,其强度利用率也仅为 8.4% 和 4.7%。相比较而言,对 CFRP 板施加预应力是提高其强度利用率的有效方法,有粘结和无粘结方式在正常使用阶段的 CFRP 板强度分别发挥了 44.7% 和 40.9%,在屈服阶段分别达到 47.2% 和 42.1%。另一方面,通过比较有粘结和无粘结方式可以发现,有粘结方式的 CFRP 板强度利用率大于无粘结方式,不过在相同的预应力水平下,无粘结和有粘结方式的 CFRP 板强度利用率相差不大。

3 有限元分析

3.1 CFRP 板加固损伤钢梁有限元模型建立

对试验试件进行有限元模拟,以预测钢梁的抗弯性能。采用 ABAQUS 软件建立三维有限元分析模型,其中钢梁、CFRP 板及锚具均采用 8 节点的三维应力减缩积分单元 C3D8R 进行模拟。对于有粘结 CFRP 板加固试件 B-BR 和 B-PBR,试验发现在钢梁下翼缘屈服后界面发生了跨中剥离,为了反映界面跨中剥离对抗弯性能的影响,在模型中采用三维粘聚力单元 COH3D8 模拟胶层,将钢梁、胶层和 CFRP 板之间通过绑定相互连接。界面本构关系采用简化的双线性粘结-滑移关系^[23],模拟中采用的界面本构关系及参数如图 7 所示。采用二次名义应力准则作为界面的损伤起始判据,即当界面各个方向的名义应力比的平方和等于 1 时,界面开始出现损伤,如下式所示:

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \tag{1}$$

式中: t_n 、 t_s 和 t_t 分别为界面在 3 个方向上的应力; t_n^0 、 t_s^0 和 t_t^0 分别为界面在 3 个方向上破坏时的最大名义应力; 下标 n、s、t 分别表示垂直和平行于界面的 3 个方向。当损伤发生后,界面将进入损

表 4 CFRP 板应变及强度利用率比较

Table 4 Comparisons of CFRP plate strain and strength utilization

Specimen	$\varepsilon_0/10^{-6}$	$\varepsilon_{p7.5}/10^{-6}$	$\varepsilon_{p7.5}/\varepsilon_u/\%$	$\varepsilon_{py}/10^{-6}$	$\varepsilon_{py}/\varepsilon_u/\%$
B-BR	0	855	5.6	1 287	8.4
B-UR	0	581	3.8	723	4.7
B-PBR	5 605	6 877	44.7	7 276	47.2
B-PUR	5 542	6 300	40.9	6 485	42.1

Notes: ε_0 —Initial tensioning strain of the CFRP plate; $\varepsilon_{p7.5}$ —Strain of the CFRP plate at $P_{7.5}$; ε_{py} —Strain of the CFRP plate at P_y ; ε_u —Ultimate strain of the CFRP plate.

伤演化阶段，采用基于能量的线性准则定义界面的损伤演化过程，如下式所示：

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} + \frac{G_{III}}{G_{IIIc}} = 1$$

(2)

式中： G_I 、 G_{II} 和 G_{III} 分别是界面在混合模式下 I 型(张开型)、II 型(滑开型)和 III 型(撕开型)开裂的能量释放率； G_{Ic} 、 G_{IIc} 和 G_{IIIc} 分别为界面发生纯 I 型、II 型和 III 型开裂时的临界能量释放率。

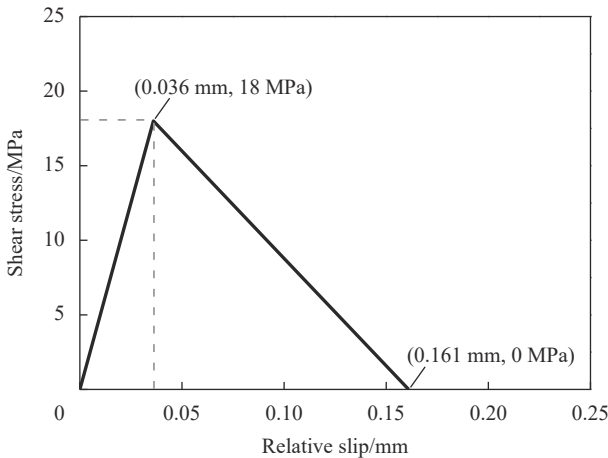


图 7 CFRP 板加固损伤钢梁的界面粘结-滑移关系

件 B-PBR 和 B-PUR，采用降温法对 CFRP 板施加预应力。试件的边界条件设置为简支，与试验保持一致。在计算时，对有限元模型施加位移荷载，进行非线性分析。

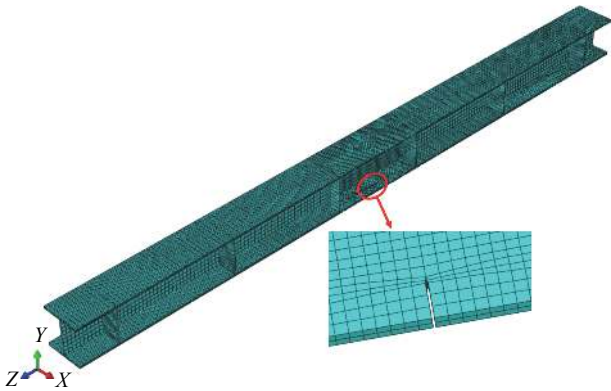


图 8 CFRP 板加固损伤钢梁有限元模型

Fig. 8 Finite element model of damaged steel beams strengthened with CFRP plates

3.2 CFRP 板加固损伤钢梁有限元计算结果

有限元得到的荷载-挠度曲线与试验结果的对比如图 9 所示。可以看出，无论对于无粘结还是有粘结 CFRP 板加固试件，有限元计算结果与试验结果均符合较好。对于有粘结 CFRP 板加固试件，有限元也可以模拟出由下翼缘屈服引起的界面跨中剥离。总体上看，建立的有限元模型可以较好地预测不同预应力水平下有粘结和无粘结 CFRP 板加固损伤钢梁的全过程受力性能。

表 5 列出了有限元得到的特征荷载与试验结果的对比。发现两者符合较好，误差在 5% 以内，说明本文建立的有限元模型可以较好地预测不同预应力水平下有粘结和无粘结 CFRP 板加固损伤钢梁的特征荷载。

图 10 为有限元得到的试件 B-PUR 的位移云图和应力云图。可以看出，有限元得到的钢梁竖向位移沿跨中对称分布，CFRP 板与钢梁下翼缘贴

考虑到锚固系统在整个加载过程中没有发生滑移和锚固失效，为了简化建模过程，在模拟时忽略张拉端和固定端支座，直接将锚具通过绑定与钢梁的下翼缘连接，同时将 CFRP 板、夹片和锚杯也分别通过绑定进行连接。典型的有限元网格划分如图 8 所示。在有限元模型中，钢梁按各项同性材料进行定义，采用弹塑性本构模型，使用 Von Mises 准则作为屈服准则。对于 CFRP 板，不考虑垂直碳纤维丝方向的材料性能，仅考虑 CFRP 板沿纤维方向的材料性能，其应力-应变关系为理想的线弹性关系。钢材和 CFRP 板的材料性能均按表 1 取值。对于预应力 CFRP 板加固试

表 5 CFRP 板加固损伤钢梁有限元与试验结果的对比

Table 5 Comparisons of finite element and test results of damaged steel beams strengthened with CFRP plates

Specimen	$P_{7.5}$			P_y		
	Test/kN	Finite element/kN	Ratio	Test/kN	Finite element/kN	Ratio
B-0	102.5	104.4	1.02	105.8	106.1	1.00
B-BR	104.6	107.4	1.03	124.6	131.1	1.05
B-UR	103.4	104.2	1.01	126.5	127.8	1.01
B-PBR	131.9	138.3	1.05	157.9	164.5	1.04
B-PUR	133.5	137.6	1.03	158.5	163.4	1.03

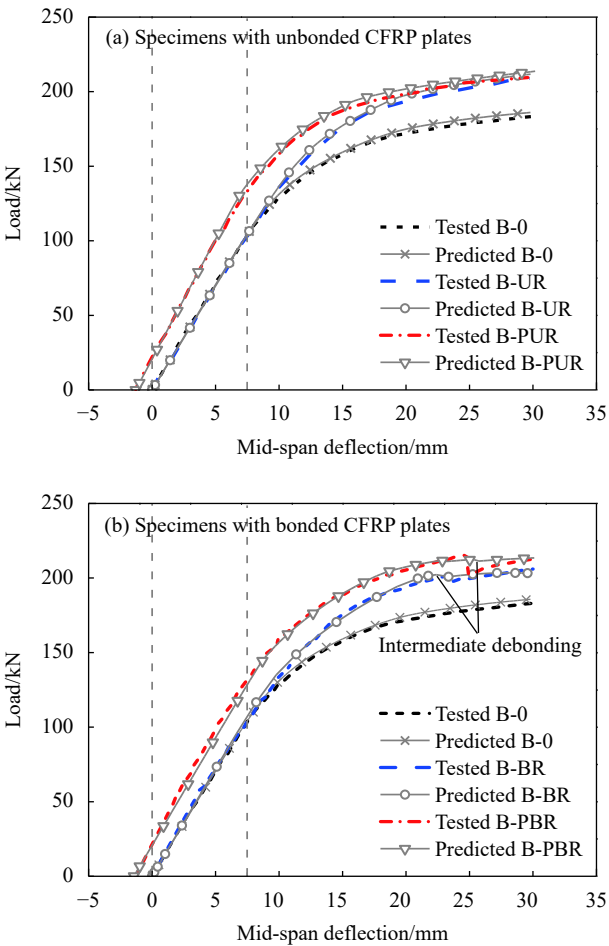


图 9 CFRP 板加固损伤钢梁荷载-挠度曲线对比

Fig. 9 Comparisons of load-deflection curves of damaged steel beams strengthened with CFRP plates

合，与试验观察到的现象一致。钢梁的应力分布呈现由跨中向两端减小的趋势，应力最大值出现在下翼缘的缺口尖端，可以看出在缺口尖端处表现出明显的应力集中现象。

3.3 CFRP 板加固损伤钢梁有限元参数分析

前述研究发现粘结和无粘结 CFRP 板具有相近的加固效果，因此本节以无粘结 CFRP 板加固钢梁为对象进行参数分析。

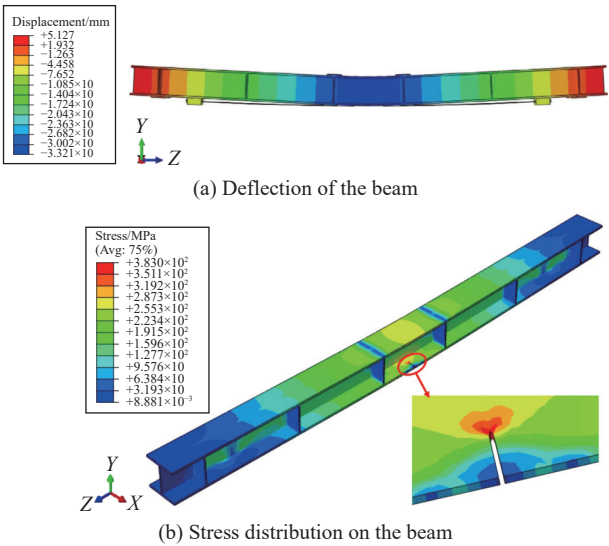


图 10 试件 B-PUR 的位移和应力分布

Fig. 10 Displacement and stress distributions of the specimen B-PUR

3.3.1 CFRP 板预应力的影响

选取 CFRP 板预应力分别为 600 MPa、850 MPa 和 1 100 MPa 进行模拟，CFRP 板的厚度均保持为 2 mm，得到的荷载-挠度曲线如图 11 所示。可以看出，CFRP 板的预应力越大，钢梁的反拱越大，

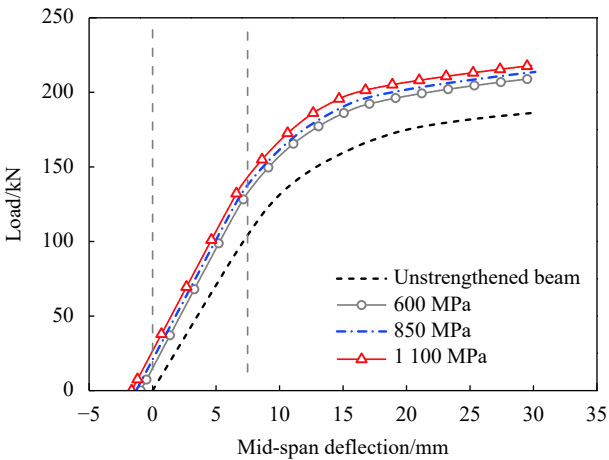


图 11 CFRP 板预应力对 CFRP 板加固损伤钢梁荷载-挠度曲线的影响

Fig. 11 Effect of the CFRP plate prestress on the load-deflection curves of damaged steel beams strengthened with CFRP plates

在相同荷载下的挠度越小，同时正常使用极限状态特征荷载和屈服荷载也随着预应力的增大而逐渐增大。总体上看，钢梁的抗弯加固效果随着预应力的增大而提高。

3.3.2 CFRP 板厚度的影响

选取 CFRP 板厚度分别为 1.4 mm、2.0 mm 和 3.0 mm 建立有限元模型，CFRP 板预应力均保持为 850 MPa，得到的荷载-挠度曲线如图 12 所示。由于在相同的预应力下，CFRP 板的预拉力随着 CFRP 板厚度的增加而增大，因此随着 CFRP 板厚度的增加，钢梁的反拱逐渐增大，在相同荷载下的挠度逐渐降低，特征荷载也逐渐提高。因此，钢梁的抗弯加固效果随着 CFRP 板厚度的增加逐渐增大。

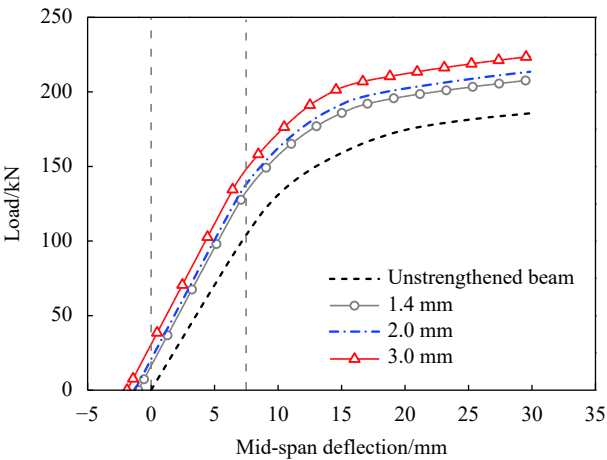


图 12 CFRP 板厚度对 CFRP 板加固损伤钢梁荷载-挠度曲线的影响
Fig. 12 Effect of the CFRP plate thickness on the load-deflection curves of damaged steel beams strengthened with CFRP plates

3.3.3 CFRP 板弹性模量的影响

选取 CFRP 板弹性模量分别为 160 GPa、300 GPa 和 450 GPa 进行分析，CFRP 板厚度均为 2 mm，预应力均为 850 MPa，得到的荷载-挠度曲线如图 13 所示。可以看出，随着 CFRP 板弹性模量的增加，钢梁的弹性抗弯刚度变化很小，只有进入弹塑性阶段后抗弯刚度的提高才逐渐明显。由于模型中不同弹性模量 CFRP 板的截面面积和预应力相同，即 CFRP 板的预拉力相同，因此弹性模量的增加对反拱没有影响，对正常使用极限状态特征荷载的影响也很小，对屈服荷载的提高也不明显。因此，当 CFRP 板的预拉力不变时，仅增加 CFRP 板的弹性模量虽然可以提高抗弯加固效果，但效果并不明显。

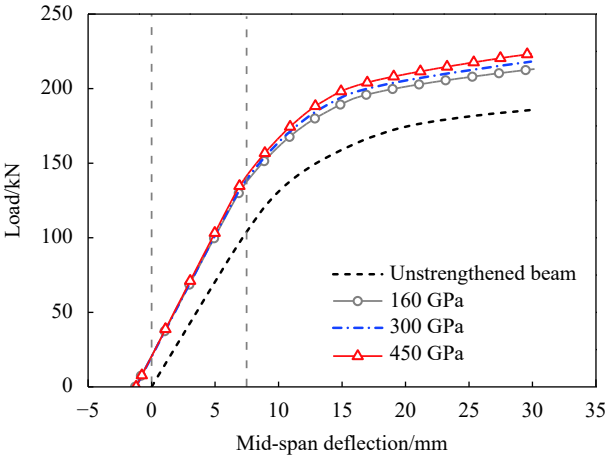


图 13 CFRP 板弹性模量对 CFRP 板加固损伤钢梁荷载-挠度曲线的影响
Fig. 13 Effect of the CFRP plate elastic modulus on the load-deflection curves of damaged steel beams strengthened with CFRP plates

4 无粘结预应力 CFRP 板加固技术的特点

以上研究发现，无粘结预应力 CFRP 板加固技术在钢梁抗弯加固方面显示出良好的性能。该技术的主要特点有：

(1) 在施工方面，工序少、速度快。一方面该技术在使时无需对钢梁表面进行打磨或喷砂处理，也不需要填充粘结剂；另一方面在预应力张拉完成后，无需进行粘结层养护即可投入使用。这在灾后等条件下需要快速抢险加固以恢复结构功能时尤其有利；

(2) 在受力方面，无粘结预应力 CFRP 板具有与有粘结预应力 CFRP 板几乎相同的加固效果，显著高于外贴非预应力 CFRP 板的加固效果，而且在受力过程中 CFRP 板应变分布更加均匀，避免了界面剥离的不利影响；

尽管如此，无粘结预应力 CFRP 板加固技术由于不使用粘结剂，结构与 CFRP 板之间的传力完全依靠两端的锚具，若锚具失效就意味着加固效果随即丧失。因此，锚具需要有更高的可靠性，设计时应该设定更高的可靠指标。

5 结论

(1) 粘结层对钢梁特征荷载和抗弯刚度几乎没有影响，有粘结和无粘结碳纤维增强聚合物复合材料 (CFRP) 板具有几乎相同的抗弯加固效果。

(2) 对 CFRP 板施加预应力可以显著提高钢梁的抗弯加固效果，预应力 CFRP 板加固试件的屈服荷载相比未加固试件提高了约 50%，正常使用极限状态下的荷载提高了约 30%，而在正常使用

阶段非预应力 CFRP 板的加固效果非常小。

(3) 有粘结 CFRP 板-钢梁复合截面在跨中剥离前基本满足平截面假定, CFRP 板沿长度具有明显的应变梯度; 而无粘结 CFRP 板-钢梁复合截面不满足平截面假定, CFRP 板应变沿长度保持不变并小于有粘结 CFRP 板的最大应变值。

(4) 非预应力 CFRP 板的高强度特性远不能发挥, 对 CFRP 板施加预应力是提高 CFRP 板在正常使用阶段和屈服阶段强度利用率的有效方法。有粘结 CFRP 板的强度利用率略大于无粘结 CFRP 板。

(5) 采用 ABAQUS 软件建立的三维有限元模型可以较好地预测不同预应力水平下有粘结和无粘结 CFRP 板加固损伤钢梁的抗弯性能。增加 CFRP 板的预应力、厚度和弹性模量均可以提高损伤钢梁的抗弯加固效果。

参考文献:

- [1] 王海涛, 吴刚, 张磊. FRP 修复开裂钢板的应力强度因子影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 440-445.
WANG Haitao, WU Gang, ZHANG Lei. Influencing factor analysis of stress intensity factor for FRP-strengthened cracked steel plates[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 440-445(in Chinese).
- [2] 柏佳文, 魏洋, 张依睿, 等. 新型碳纤维增强复合材料-钢复合管海水海砂混凝土圆柱轴压试验[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 3076-3085.
BAI Jiawen, WEI Yang, ZHANG Yirui, et al. Axial compression behavior of new seawater and sea sand concrete filled circular carbon fiber reinforced polymer-steel composite tube columns[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 3076-3085(in Chinese).
- [3] 陈卓异, 彭彦泽, 李传习, 等. 高温下双搭接钢-CFRP 板胶界面力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2021, 38(2): 449-460.
CHEN Zhuoyi, PENG Yanze, LI Chuanxi, et al. Experimental study for the adhesive interface mechanical properties of double lapped steel-CFRP plate at high temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(2): 449-460(in Chinese).
- [4] WANG H T, LIU S S, LIU Q L, et al. Influences of the joint and epoxy adhesive type on the CFRP-steel interfacial behavior[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 103167.
- [5] 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.
WANG Haitao, WU Gang, WU Zhishen. Study on the effect of FRP configurations on the fatigue behavior of strengthened steel plate with an initial crack[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 56-63(in Chinese).
- [6] YOUSEFI O, NARMASHIRI K, GHAEMDOUST M R. Structural behaviors of notched steel beams strengthened using CFRP strips[J]. Steel and Composite Structures, 2017, 2(1): 35-43.
- [7] SWEEDAN A M I, ALHADID M M A, EL-SAWY K M. Experimental study of the flexural response of steel beams strengthened with anchored hybrid composites[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 99: 1-11.
- [8] TENG J G, YU T, FERNANDO D. Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 78: 131-143.
- [9] GALAL K, SEIF ELDIN H M, TIRCA L. Flexural performance of steel girders retrofitted using CFRP materials[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 16(3): 265-276.
- [10] LI J, WANG Y, DENG J, et al. Experimental study on the flexural behaviour of notched steel beams strengthened by prestressed CFRP plate with an end plate anchorage system[J]. Engineering Structures, 2018, 171: 29-39.
- [11] SIWOWSKI T W, SIWOWSKA P. Experimental study on CFRP-strengthened steel beams[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 149: 12-21.
- [12] 卢亦森, 张学朋, 吴涛, 等. 预应力碳纤维布加固钢梁的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(5): 707-715.
LU Yiyen, ZHANG Xuepeng, WU Tao, et al. Experimental research on steel beams strengthened by prestressed CFRP[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(5): 707-715(in Chinese).
- [13] GHAFOORI E, MOTAVALLI M. Flexural and interfacial behavior of metallic beams strengthened by prestressed bonded plates[J]. Composite Structures, 2013, 101: 22-34.
- [14] 万世成, 黄侨, 关键. 预应力 CFRP 板加固钢-混凝土组合梁受弯性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 86-93.
WAN Shicheng, HUANG Qiao, GUAN Jian. Test on flexural behavior of steel-concrete composite beams strengthened with prestressed carbon fiber reinforced polymer plates[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3): 86-93(in Chinese).
- [15] GHAFOORI E, MOTAVALLI M. Innovative CFRP-prestressing system for strengthening metallic structures[J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(6): 1-14.
- [16] HOSSEINI A, GHAFOORI E, MOTAVALLI M, et al. Flat prestressed unbonded retrofit system for strengthening of existing metallic I—Girders[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 155: 156-172.

[17] 叶华文, 李新舜, 帅淳, 等. 无粘结预应力CFRP板加固受损钢梁疲劳试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(1): 129-136.
YE Huawen, LI Xinsun, SHUAI Chun, et al. Fatigue experimental analysis of damaged steel beams strengthened with prestressed unbonded CFRP plates[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(1): 129-136(in Chinese).

[18] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验: 第一部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Standardization Administration of China. Tensile test of metallic materials: Part 1: Test method at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010(in Chinese).

[19] 中国国家标准化管理委员会. 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法: GB/T 3354—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
Standardization Administration of China. Test method for tensile properties of directional fiber reinforced polymer matrix composites: GB/T 3354—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014(in Chinese).

[20] 中华人民共和国工业和信息化部. 纤维增强复合材料加固修复钢结构技术规程: YB/T 4558—2016[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2017.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Technical specification for strengthening steel structures with fiber reinforced polymer: YB/T 4558—2016[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017(in Chinese).

[21] WANG H T, WU G. Bond-slip models for CFRP plates externally bonded to steel substrates[J]. [Composite Structures](#), 2018, 184: 1204-1214.

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB/T 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017(in Chinese).

[23] 庞育阳. 极端服役环境下CFRP-钢界面粘结性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
PANG Yuyang. Study on the bond behavior of CFRP-steel interfaces under extreme service environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2019(in Chinese).