复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

# CFRP-钢层状复合结构的表面划痕损伤容限

王斌华 康思思

# Scratch damage tolerance at the surface of CFRP-steel laminated composite structure

WANG Binhua, KANG Sisi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210820.004

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

飞机用复合材料斜胶接修补结构的冲击损伤

Impact damage of composite scarf bonded repair structure for aircraft

复合材料学报. 2018, 35(10): 2698-2705 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171220.001

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

结构参数对复合材料V型构件固化变形影响试验及解析分析

Experimental and analytic analysis of the structure parameters on process-induced distortions of V-shaped composite parts

复合材料学报. 2017, 34(12): 2722-2733 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170301.002

搭接长度和铺层方式对CFRP复合材料层合板胶接结构连接性能和损伤行为的影响

Effect of lap length and stacking sequence on strength and damage behaviors of adhesively bonded CFRP composite laminates

复合材料学报. 2020, 37(1): 121-131 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190308.001

复合材料双面贴补修理拉伸解析分析模型及试验验证

An analytical model and its validation for a composite double lap joints under unidirectional tension

复合材料学报. 2017, 34(10): 2194-2204 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170104.002

棉花纤维增强冰弹对复合材料层合板冰撞动响应的影响

Effect of cotton fibers reinforced hail on impact dynamic behavior of composite panels

复合材料学报. 2018, 35(12): 3298-3303 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180319.005

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 39 卷 第 7 期 7 月 2022 年
Vol. 39 No. 7 Jul 2022

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20210820.004

# CFRP-钢层状复合结构的表面划痕损伤容限

分享本文

王斌华*，康思思
（长安大学 道路施工技术与装备教育部重点试验室，西安 710064）

**摘 要**：碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP)-钢层状结构在实际运营过程中，脆性碳纤维层容易出现划痕等表面损伤，因此为了保障损伤后复合结构的安全运行，需要对其进行损伤容限研究。基于边界效应理论模型 (Boundary effect model，BEM)，建立了表面划痕损伤后的 CFRP-钢层状结构三点弯曲断裂强度解析模型，并在 CFRP 表面分别预制了 0.2 mm 和 0.4 mm 深度的表面初始划痕缺陷，通过三点弯曲梁的成组试验验证了理论模型的可行性。研究结果表明：(1) 利用金相显微镜观测了 CFRP-钢层状结构三点弯曲极限荷载时的断裂特征，确定了表面划痕损伤后 CFRP 的结构特征参数 $C_{ch}$，代入解析模型获得了 CFRP 层的拉伸强度，并与 CFRP 直接拉伸试验测试的拉伸强度对比，两者偏差小于 10%；(2) 该解析模型为“断裂荷载=拉伸强度×等效面积”的线性方程形式，“等效面积”仅与 CFRP-钢层状结构和表面裂纹的几何参数有关，因此，通过 CFRP 的直接拉伸强度可以预测表面损伤后 CFRP-钢层状结构的断裂强度，实现损伤容限设计。

**关键词**：CFRP-钢层状结构；表面划痕；损伤容限；断裂强度；解析模型

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)07-3530-12

## Scratch damage tolerance at the surface of CFRP-steel laminated composite structure

WANG Binhua*, KANG Sisi
(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract**: In the actual operation process, the surface of brittle carbon fiber layer of carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-steel layered structure suffered from scratch and other damage. Therefore, it is necessary to study the damage tolerance to ensure the safe operation of the damaged composite structure. An analytical model of fracture strength at the three-point bending (3-p-b) test for CFRP-steel laminated structure with surface scratch damage was established based on the boundary effect model (BEM). And the initial scratch defects of 0.2 mm and 0.4 mm depth were prefabricated on the surface of CFRP, respectively. The feasibility of this theoretical model was verified at the 3-p-b tests. The results indicate that: (1) The fracture characteristics of CFRP-steel laminated structure at the 3-p-b tests were observed by metallographic microscope, and the structural characteristic parameter $C_{ch}$ of CFRP after scratch damage was determined. The tensile strength of CFRP layer was carried out according to this analytical model, and the deviation is less than 10% compared with the tensile strength measured by CFRP direct tensile test. (2) The analytical model is a linear equation of “fracture load = tensile strength × equivalent area”. The “equivalent area” is only related to CFRP-steel laminated structure and the geometric parameters of surface crack. Therefore, the fracture strength of CFRP-steel laminated structure with surface damage can be predicted by the direct tensile strength of CFRP, and the damage tolerance design can be realized.

**Keywords**: CFRP-steel laminated composite structure; surface scratch; damage tolerance; fracture strength; analytic model

**收稿日期**：2021-06-09; **修回日期**：2021-07-12；**录用日期**：2021-07-26；**网络首发时间**：2021-08-20 20:29:31
**网络首发地址**：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210820.004
**基金项目**：陕西省自然科学基金 (2021JM-148)
**通信作者**：王斌华, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为结构/材料的变形、损伤与断裂 E-mail: wangbh@chd.edu.cn
**引用格式**：王斌华, 康思思. CFRP-钢层状复合结构的表面划痕损伤容限 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 3530-3541.
WANG Binhua, KANG Sisi. Scratch damage tolerance at the surface of CFRP-steel laminated composite structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3530-3541(in Chinese).

碳纤维增强树脂复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer，CFRP) 具有高强度、高弹性模量、质量轻、抗腐蚀能力强、疲劳性能好以及良好的减震性能等优点，在航空航天、风力动力机、车辆以及轨道交通、石油输运、海洋工程等领域中得到重要应用[1-9]。

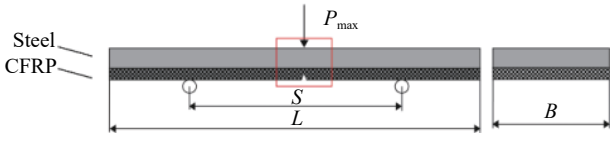
工程实践已表明，CFRP 还可以有效地加固或修复现有的钢结构，且能够最大限度地保证加固构件的自重不会显著增加，截面尺寸以及加固构件的外观不会发生明显改变，结构加固后其承载性能、疲劳寿命、耐腐蚀性能都可以得到改善[10-16]。许多学者通过力学模型、仿真、试验等一系列方法对 CFRP-钢复合结构的力学性能进行了研究。路志浩[17] 采用粘贴碳纤维布加固某炼钢车间钢吊车梁，不仅操作方便而且施工周期短，实践结果表明，2008 年加固至今，碳纤维加固层降低了梁整体的应力水平及圆弧端应力集中程度，改善了吊车梁的抗疲劳性能，经检测已超出预期加固效果。Huo 等[18] 对冲击载荷下 CFRP 与钢界面极限承载力提高的机制进行了分析，提出了冲击载荷作用下碳纤维布-钢界面极限承载力的保守预测公式，通过三点弯曲试验，研究了冲击载荷速度、CFRP 层数和 CFRP 宽度对 CFRP 加固钢板界面粘结性能的影响，发现随着 CFRP 层数、宽度的增加，极限承载力都有显著提高。郭奥等[19] 对碳纤维布加固 H 型钢梁的抗弯性能进行了研究，推导了 CFRP 加固钢梁在弹性阶段的受弯承载力的计算公式，通过加固钢梁与未加固钢梁的力学性能对比分析，总结出碳纤维布加固钢梁能有效提高承载力。Tafsirojjaman 等[20] 对 CFRP 加固圆形中空截面 (CHS) 构件在单调荷载和循环荷载作用下的性能进行了研究，结果表明：CFRP 加固可以有效的提高薄壁方钢构件的抗弯承载力、割线刚度、耗能能力和延性。此外，CFRP 还提高了简支梁在单调载荷作用下的弯矩承载力。王家栋[21] 通过有限元模型分析了碳纤维板的厚度、宽度、长度以及胶层厚度对加固钢梁受弯承载性能的影响，结果表明：采用 CFRP 板进行加固能显著提高钢梁的屈服载荷，且随着 CFRP 厚度和宽度的增加，钢梁的承受载荷能力正比例增加。

然而，碳纤维脆性大、抗冲击性较差[22]，并且胶接成型的 CFRP 含有约 30% 的脆性树脂基体，因此 CFRP 的力学性能受基体表面或内部微缺陷影响显著，其力学性能尺寸效应明显[23]。Yuan 等[24] 通过试验和边界效应理论研究了纯 CFRP 板出现表面微损伤后的断裂强度，通过该理论模型可知，当板厚分别为 2.09 mm、跨度为 66 mm 和板厚为 1.44 mm、跨度为 46 mm 的 CFRP 表面出现平均深度 30 μm 的浅划痕后，可预测其三点弯曲极限承载力分别下降 1.5% 和 5.5%，因此，当表面划痕损伤深度增大，CFRP 板的承载力会进一步降低。另外，值得注意的是当 CFRP 板用于粘贴加固机械装备或钢结构时，整体结构在运营阶段中脆性 CFRP 板表面也容易出现微损伤缺陷，例如浅划痕，此时含表面损伤的 CFRP-钢复合结构的力学性能是否还能继续满足使用要求，是非常需要关注的，对于设计人员和使用方都需要确定该复合结构的 CFRP 表面损伤容限值。因此，对于工程结构中广泛存在的 CFRP-钢层状复合结构，CFRP 表面损伤后整体结构的力学性能评价值得研究，有必要将边界效应理论向多层异质复合结构推广。

本文基于三点弯曲试验方法对 CFRP-钢复合结构的断裂强度进行了研究，利用边界效应理论 (BEM)[25-26]，建立了 CFRP-钢复合结构断裂强度的解析模型，并对不同 CFRP 表面初始裂纹深度的 CFRP-钢复合结构进行三点弯曲试验，分析了 CFRP-钢复合结构中的断裂机制，试验验证了解析模型预测表面微裂纹损伤后的 CFRP-钢复合结构断裂强度的合理性。

## 1 CFRP-钢复合结构断裂强度解析模型

CFRP-钢复合结构的几何模型如图 1 所示，其中模拟 CFRP 表面划痕损伤的初始裂纹长度为 $a_0$，三点弯曲试验的跨距为 $S$，试件总长度为 $L$，试件宽度为 $B$，钢板的厚度为 $h_1$，CFRP 的板厚为 $h_2$。




CFRP—Carbon fiber reinforced polymer; $S$—Span length; $L$—Sample length; $B$—Sample width; $P_{max}$—Maximum fracture load

图 1 碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP)-钢复合结构的几何模型

Fig. 1 Geometric model of carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-steel composite structure

假定初始裂纹尖端处损伤区的虚拟裂纹长度 $\Delta a_{fic}$，并假定损伤区内的名义应力为 $\sigma_n$；钢板上表面处的应力为 $\sigma_s$，应变为 $\varepsilon_s$，其弹性模量为 $E_s$；钢与 CFRP 界面处的应力为 $\sigma'_s$，应变为 $\varepsilon'_s$；CFRP 在裂尖损伤区的应变为 $\varepsilon_n$，CFRP 的当量弹性模量

为$E_n$，如图 2 所示。根据平截面假定可得如下平衡方程式：

$$\frac{E_s}{E_n}=n \tag{1}$$

$$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon'_s}=\frac{x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0}{x}=\frac{\sigma_n/E_n}{\sigma'_s/E_s}\Rightarrow$$
$$\sigma'_s=\frac{x}{x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0}n\sigma_n \tag{2}$$

$$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_s}=\frac{x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0}{h_1-x}=\frac{\sigma_n/E_n}{\sigma_s/E_s}\Rightarrow$$
$$\sigma_s=\frac{h_1-x}{x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0}n\sigma_n \tag{3}$$

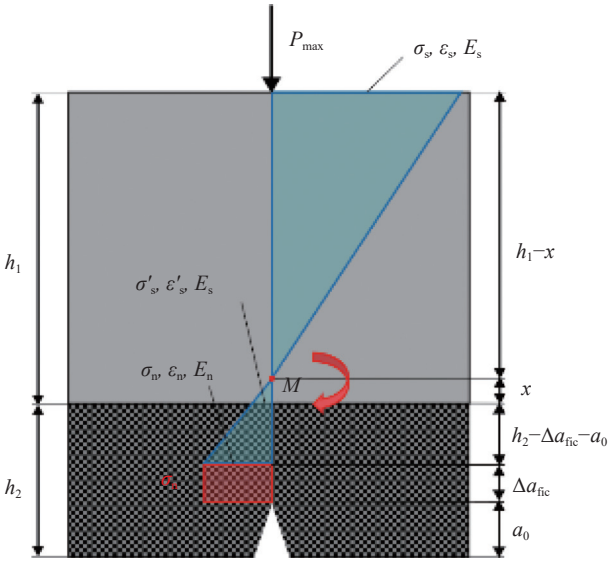
根据 CFRP-钢试件整体水平方向的力平衡得：

$$\frac{1}{2}\varepsilon_s E_s(h_1-x)B=\frac{1}{2}\varepsilon'_s E_s xB+\frac{1}{2}(\varepsilon_n+\varepsilon'_s)(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)BE_n+E_n\varepsilon_n\Delta a_{fic}B \tag{4}$$

由式 (1)~(4) 可得：

$$x=\frac{nh_1^2-(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)^2-2(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)\Delta a_{fic}}{2(h_2-a_0+nh_1)} \tag{5}$$

如图 2 所示，跨中截面内的弯矩 $M$ 与截面上的应力、应变的平衡关系式如下：




$h_1$—Thickness of steel plate; $h_2$—Thickness of CFRP plate; $\Delta a_{fic}$—Crack tip damage zone/fictitious crack growth; $\sigma_n$—Nominal stress at crack tip damage zone; $\varepsilon_n$—Nominal stress at crack tip damage zone; $\sigma_s$—Stress at upper surface of steel plate; $\varepsilon_s$—Strain at upper surface of steel plate; $E_s$—Elastic modulus of steel plate; $\sigma'_s$—Stress at the interface between steel and CFRP on steel plate; $\varepsilon'_s$—Strain at the interface between steel and CFRP; $E_n$—Equivalent elastic modulus of CFRP; $a_0$—Initial crack depth; $x$—Distance from the neutral axis of CFRP/steel layered structure to the bonding interface between CFRP and steel; $M$—Moment in CFRP/steel layered structure

图 2　CFRP 裂纹处截面的应力-应变图

Fig. 2　Stress-strain diagram of CFRP crack section

$$\sigma_n\Delta a_{fic}B\left(x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0+\frac{1}{2}\Delta a_{fic}\right)+\frac{1}{2}\sigma'_s xB\times\frac{2}{3}x+\frac{1}{2}\sigma_s(h_1-x)B\times\frac{2}{3}(h_1-x)+\frac{1}{2}(\varepsilon_n+\varepsilon'_s)(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)BE_n\left[h_2-\Delta a_{fic}-a_0-\frac{(3x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}{3(2x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}+x\right]=M \tag{6}$$

另外，如图 2 所示，由跨中截面内力矩平衡可得：

$$\frac{1}{2}P_{max}\times\frac{1}{2}S=M \tag{7}$$

因此，由式 (6) 和 (7) 可得极限承载力$P_{max}$与虚拟裂纹$\Delta a_{fic}$范围处的名义应力$\sigma_n$之间的关系，见下式：

$$\frac{1}{2}P_{max}\times\frac{1}{2}S=\frac{1}{2}\sigma_s(h_1-x)B\times\frac{2}{3}(h_1-x)+\sigma_n\Delta a_{fic}B(x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0+\frac{1}{2}\Delta a_{fic})+\frac{1}{2}\sigma'_s xB\times\frac{2}{3}x+\frac{1}{2}(\varepsilon_n+\varepsilon'_s)(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)BE_n\left[h_2-\Delta a_{fic}-a_0-\frac{(3x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}{3(2x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}+x\right] \tag{8}$$

因此，可得虚拟裂纹$\Delta a_{fic}$处的名义应力$\sigma_n$为

$$\sigma_n=\left(\frac{1}{2}P_{max}\times\frac{1}{2}S\right)\Bigg/\left(\left\{\frac{n(h_1-x)^3+nx^3}{3(x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}+\frac{(2x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}{2(x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}[h_2-\Delta a_{fic}-a_0-\frac{(3x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}{3(2x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}+x]+(x+h_2-a_0-\frac{1}{2}\Delta a_{fic})\Delta a_{fic}\right\}B\right) \tag{9}$$

根据边界效应理论 (BEM)[25-26]，虚拟裂纹$\Delta a_{fic}$范围内的名义应力$\sigma_n$与三点弯曲梁损伤区材料的拉伸强度$f_t$之间的关系如下式，由于本研究对象为 CFRP-钢的层状结构，表面划痕出现在 CFRP 薄板表面，因此$f_t$为 CFRP 板的拉伸强度：

$$\sigma_n=\frac{f_t}{\sqrt{1+\dfrac{a_e}{a^*_{ch}}}} \tag{10}$$

式中：$a_e$为等效裂纹长度；$a^*_{ch}$为特征裂纹长度。等效裂纹长度$a_e$见下式：

$$a_e=\left[\frac{(1-\alpha)^2\cdot Y(\alpha)}{1.12}\right]^2\cdot a_0=(1-\alpha)^4\cdot a_0 \tag{11}$$

式中：$a_0$为初始裂纹深度；$\alpha$为$a_0$与 CFRP-钢复合结构的总厚度$h_1+h_2$的比值；$Y(\alpha)$是几何因子，由于本文预测层状薄板的表面微裂纹断裂强度，因此$\alpha$远小于 1，$Y(\alpha)$近似取 1.12。$a_{ch}^*$是 CFRP-钢层状复合结构的拉伸强度 $f_t$和$K_{IC}$有关的材料常数，且与结构特征参数 $C_{ch}$ 有关，见下式：

$$a_{ch}^* = 0.25\left(\frac{K_{IC}}{f_t}\right)^2 \approx 3C_{ch} \tag{12}$$

初始裂纹尖端的虚拟裂纹长度$\Delta a_{fic}$是由离散系数$\beta$和结构特征参数 $C_{ch}$ 决定的，即裂纹尖端损伤区的范围是与材料的结构特征参数直接相关，如下式，且由于材料的随机特性，假定$\beta$服从正态分布，根据文献 [27]，$\beta$均值取为 1.5：

$$\Delta a_{fic} = \beta \cdot C_{ch} = 1.5C_{ch} \tag{13}$$

由式 (8)~(13) 可得：

$$\begin{aligned} P_{max} = & f_t \cdot \frac{4B}{S\sqrt{1+\dfrac{a_e}{3C_{ch}}}}\left\{\frac{n(h_1-x)^3+nx^3}{3(x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}+\right. \\ & \frac{(2x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}{2(x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}\left[h_2-\Delta a_{fic}-\right. \\ & \left. a_0-\frac{(3x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}{3(2x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}+x\right]+ \\ & \left.\left(x+h_2-a_0-\frac{1}{2}\Delta a_{fic}\right)\Delta a_{fic}\right\} \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} 令A_e = & \frac{4B}{S\sqrt{1+\dfrac{a_e}{3C_{ch}}}}\left\{\frac{n(h_1-x)^3+nx^3}{3(x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}+\right. \\ & \frac{(2x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}{2(x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}\left[h_2-\Delta a_{fic}-\right. \\ & \left. a_0-\frac{(3x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)(h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}{3(2x+h_2-\Delta a_{fic}-a_0)}+x\right]+ \\ & \left.(x+h_2-a_0-\frac{1}{2}\Delta a_{fic})\Delta a_{fic}\right\} \end{aligned}$$

因此，式 (14) 为

$$P_{max} = f_t \cdot A_e \tag{15}$$

对于 $n$ 组 ($n$=1, 2, 3 ···) 试验结果，测试获得 $n$ 组 $P_{max\text{-}i}$，因此根据下式可以测试获得 $n$ 组 $f_{t\text{-}i}$，类似于$\beta$的随机特性，假定 $P_{max\text{-}i}$ 服从正态分布，因此 $f_{t\text{-}i} \sim N(\mu, \sigma^2)$：

$$f_{t\text{-}i} = \frac{P_{max\text{-}i}}{A_e} \tag{16}$$

通过式 (15) 可知，等效面积$A_e$仅与 CFRP-钢层状复合结构的几何尺寸、结构特征参数 $C_{ch}$ 等常数有关，CFRP 板的拉伸强度 $f_t$为直线方程 (15) 的斜率，因此利用该公式，如果已知 CFRP 板拉伸强度 $f_t$和 CFRP 板的表面划痕深度$a_0$，就可以预测 CFRP-钢层状复合结构的断裂强度$P_{max}$，实现含表面划痕损伤的 CFRP-钢层状复合结构的断裂强度预测。另外，根据 BEM 理论可知断裂韧度 $K_{IC}$：

$$K_{IC} = 2f_t \cdot \sqrt{3C_{ch}} \tag{17}$$

由式 (17) 可知，通过缺口试件的三点弯曲试验获得极值荷载$P_{max}$，就可以得到 CFRP 板的拉伸强度 $f_t$。为了对比验证该模型的正确性，参考文献 [24]，首先，通过直接拉伸试验测试 CFRP 板的抗拉伸强度；然后，制备 CFRP-钢层状复合结构试件，并在 CFRP 板表面分别加工初始缺口深度 $a_0$约为 0.2 mm 和 0.4 mm 的表面损伤，根据该公式计算不同表面损伤后的 CFRP 板的拉伸强度，并与直接拉伸试验测试结果对比验证一致性；最后，根据式 (15)，预测 CFRP 板含有不同表面划痕损伤时 CFRP-钢层状复合结构的断裂强度，实现损伤容限预测。

## 2 试验研究

### 2.1 CFRP 和 CFRP-钢复合材料试件制备

为了测试 CFRP 板的拉伸强度和弹性模量，参考标准 ASTM D3039/D3039M[28] 制备了直接拉伸试件。碳纤维布为 2D 平纹编织，型号为 A-38/3K，其材料性能如表 1 所示，采用中国易拓复合材料生产销售的型号为 YT-CC302S 的 E51 低粘度环氧树脂胶 AB 进行 CFRP 板制作，按树脂和固化剂质量比 3∶1 进行均匀混合，其材料性能如表 2 所示，并均匀涂覆到每一层碳纤维布上，依次将 8 层 200 mm×250 mm 的碳纤维布铺放在一起，放入青岛华博机械科技有限公司生产的型号为 HBSCR 10T/300AV-S 高温真空热压机，在温度为 60℃、压力为 0.6 MPa 下热压 3 h。最后利用机械

**表 1 A-38/3K 碳纤维丝材料性能**

**Table 1 Material properties of A-38/3K carbon fiber**

| Type | Elastic modulus/GPa | Yield strength/MPa | Elongation/% |
|---|---|---|---|
| A-38/3K | 240 | 3 800 | 1.6 |

表 2　环氧树脂胶粘剂材料性能

Table 2　Material properties of epoxy adhesive

| Type | Viscosity/(mPa·s) | Hardness/shoreD | Tensile strength/MPa | Bending strength/MPa |
|---|---|---|---|---|
| YT-CC302S | 200-300 | 90 | 320 | 230 |

铣刀加工成 150 mm×25 mm 的 CFRP 板，并在拉力试验机夹持端双面粘贴 30 mm×25 mm×1.5 mm 厚的钢垫片，共加工了 6 个试件，试件示意图见图 3。

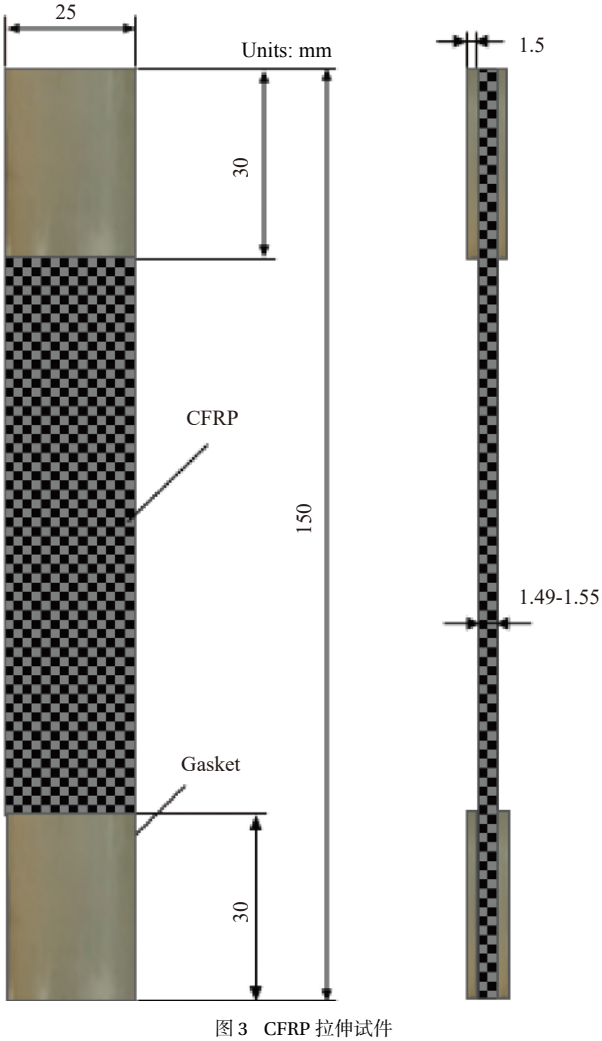



图 3　CFRP 拉伸试件

Fig. 3　Tensile specimen of CFRP

CFRP-钢层状复合结构试件的碳纤维布材料同 CFRP 板直接拉伸试件，选用的钢板为 Q235 普通碳素结构钢 (A3)，材料性能如表 3 所示。制备 CFRP-钢试件之前，先在室温下用丙酮溶液超声清洗钢表面 30 min，然后进行钢表面喷砂处理以提高 CFRP 与钢之间的粘接强度。并且，为了提高喷砂后钢表面的润湿性，利用课题组已有研究成果[29-30]，配制浓度为 3% 的丙酮树脂溶液对钢表面进行预浸润以进一步提高 CFRP 与钢之间的粘接性能。与 CFRP 板制作过程相同，8 层 200 mm×250 mm 碳纤维布铺放好后，将喷砂并预浸润处理后的钢板粘在碳纤维布上，放入高温真空热压机，在温度为 60℃、压力为 0.6 MPa 下热压 3 h。最后，利用机械铣刀加工成 $L\times B$=150 mm×25 mm 的 CFRP-钢层状复合结构，再用刀片在 CFRP-钢层状复合结构的 CFRP 跨中表面划出裂纹 (缺口) 深度 $a_0$ 分别约为 0.2 mm 和 0.4 mm 的初始裂纹。两种初始裂纹的 CFRP-钢试件各制作 8 个，试件示意图见图 1。

### 2.2　CFRP 直接拉伸测试试验

利用济南天辰 100 kN 电子万能试验机以 1 mm/min 的位移控制模式对 CFRP 板进行直接拉伸试验，并布置钢铁研究总院引伸计 YYU-25/50 测试 CFRP 板在拉伸载荷方向上的弹性模量，试件断裂后照片见图 4，其弹性模量和断裂载荷结果见表 4，可得 CFRP 板直接拉伸强度均值为 $f_{\text{t-T}}$=424.31 MPa，弹性模量均值为 41 GPa，即测试得 $E_{\text{n}}$ =41 GPa。

### 2.3　CFRP-钢复合结构的三点弯曲断裂试验

本试验利用电子万能试验机以 1 mm/min 的位移控制模式施加竖向载荷，三点弯曲试验时支点跨距 $S$=96 mm，加载形式见图 1，典型的载荷-位移曲线如图 5 所示，CFRP-钢层状复合结构裂尖区断裂照片如图 6、图 7 所示，三点弯曲试件几何参数及试验结果如表 5 所示。

由图 5 可以看出，即使 CFRP 跨中表面有 0.2 mm 和 0.4 mm 初始划痕，CFRP 加固钢板后仍可以进

表 3　钢板的力学性能

Table 3　Mechanical properties of steel plate

| Type | Elastic modulus/GPa | Yield strength/MPa | Tensile strength/MPa |
|---|---|---|---|
| Q235 | 206 | 235 | 420 |

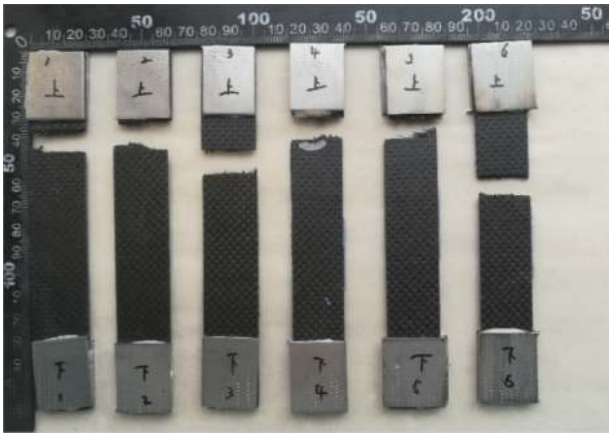


图 4　CFRP 板拉伸试件断裂照片

Fig. 4　Fracture pictures of CFRP tensile specimens

**表 4　CFRP 板直接拉伸试验结果**

**Table 4　Direct tensile test results of CFRP plate**

| Specimen number | Maximum tension/N | Elastic modulus/GPa | Tensile strength/MPa |
|---|---|---|---|
| CFRP-1 | 24 225.4 | 43 | 402.86 |
| CFRP-2 | 24 657.5 | 40 | 374.22 |
| CFRP-3 | 26 330.7 | 39 | 387.20 |
| CFRP-4 | 29 312.6 | 40 | 478.96 |
| CFRP-5 | 30 215.4 | 40 | 523.39 |
| CFRP-6 | 22 608.1 | 42 | 379.23 |

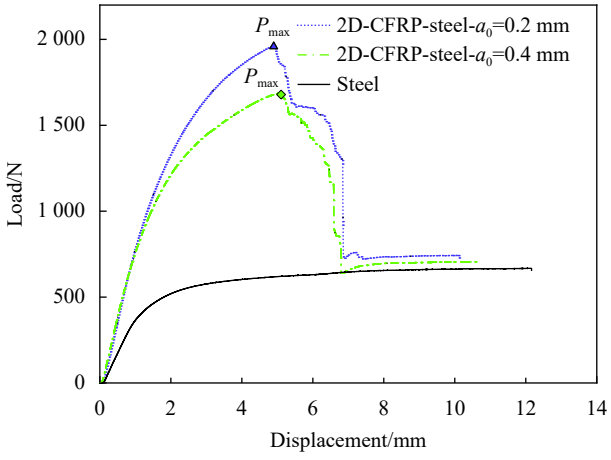
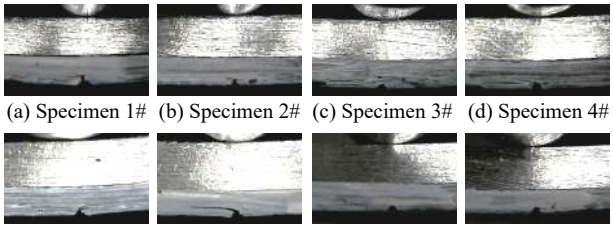



图 5　CFRP-钢复合结构的位移-载荷曲线

Fig. 5　Displacement-load curves of CFRP-steel composite structure

一步提升其抗弯力学性能 2 倍以上，说明了 CFRP 加固钢结构的有效性和显著性，另外，由表 5 可知，相对于 0.2 mm 的表面划痕损伤，0.4 mm 的划痕损伤降低了 CFRP-钢层状复合结构的极限承载力均值约 6.89%，而且，复合结构达到峰值载荷后，整体力学性能迅速下降，失去结构承载能力。因此，对于实际工程中 CFRP-钢复合结构，需要及时监测划痕损伤量值，以有效评估损伤后加固结构的力学性能。

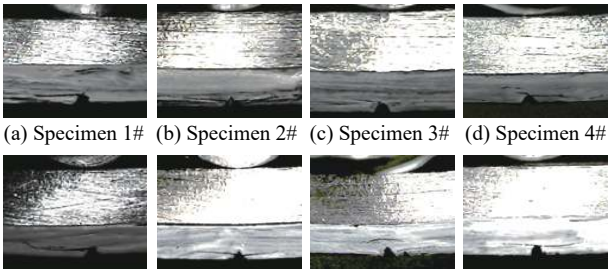


(a) Specimen 1#　(b) Specimen 2#　(c) Specimen 3#　(d) Specimen 4#

(e) Specimen 5#　(f) Specimen 6#　(g) Specimen 7#　(h) Specimen 8#

图 6　$a_0$=0.2 mm 的 CFRP-钢层状复合结构 $P_{max}$ 时刻对应的裂纹扩展

Fig. 6　Crack growth of CFRP-steel layered composite structure at $P_{max}$ ($a_0$=0.2 mm)



(a) Specimen 1#　(b) Specimen 2#　(c) Specimen 3#　(d) Specimen 4#

(e) Specimen 5#　(f) Specimen 6#　(g) Specimen 7#　(h) Specimen 8#

图 7　$a_0$=0.4 mm 的 CFRP-钢层状复合结构 $P_{max}$ 时刻对应的裂纹扩展

Fig. 7　Crack growth of CFRP-steel layered composite structure at $P_{max}$ ($a_0$=0.4 mm)

## 2.4　CFRP-钢复合结构的特征参数观测

在三点弯曲试验过程中，采用微距摄像头对试样进行视频录像，并在 CFRP-钢复合结构试样的 CFRP 侧面涂上白色颜料方便图像识别。为了观察发生极值载荷 $P_{max}$ 时裂纹尖端的损伤区，利用万能试验机控制器设定试验机载荷下降约 10% 时停止加载。图 6 和图 7 为所有试件的裂纹尖端损伤照片，可以看出不同试件裂尖处的裂纹扩展模式并不一致，分析原因包括预制裂纹形貌、试件制备缺陷等复杂随机因素，正如前文假定 $\beta$服从正态分布以反映该随机因素。

本研究中采用极值载荷发生后衰减 10% 停止加载的方式观测裂纹尖端裂纹损伤区长度，以确定结构特征参数$C_{ch}$。具体观测方法如下：(1) 将试验完成后的 CFRP-钢复合结构试样的碳纤维板取下来重新与平整钢片粘接，然后进行镶样、侧面抛磨处理，在金相显微镜下进行观察和测量；(2) 抛磨观测示意图如图 8 所示，图 9(a) 和 9(b)、图 9(c) 和 9(d) 分别为两个不同试样的相邻碳纤维束断面，从图 9(a) 和 9(c) 可以看出，碳纤维板的裂纹扩展进入横向碳纤维束区域，重新压平、粘接处理后该区域已闭合，而图 9(b) 和 9(d) 裂纹扩

表 5　CFRP-钢层状复合结构三点弯曲试验数据

Table 5　Three point bending test datas of CFRP-steel laminated composite structure

| Specimen type (2D-CFRP-steel) | $a_0$/mm | $h_1$/mm | $h_2$/mm | $P_{max}$/N | $f_t$/MPa | $K_{IC}$/(MPa·m$^{0.5}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.2 mm-1 | 0.190 | 2.98 | 1.50 | 1 919.9 | 412.85 | 9.91 |
| 0.2 mm-2 | 0.285 | 3.00 | 1.51 | 1 959.1 | 457.04 | 10.97 |
| 0.2 mm-3 | 0.205 | 2.99 | 1.50 | 1 824.3 | 398.56 | 9.57 |
| 0.2 mm-4 | 0.194 | 2.99 | 1.51 | 1 906.8 | 409.92 | 9.84 |
| 0.2 mm-5 | 0.183 | 2.99 | 1.52 | 1 963.1 | 414.96 | 9.96 |
| 0.2 mm-6 | 0.196 | 2.99 | 1.52 | 1 824.3 | 396.25 | 9.51 |
| 0.2 mm-7 | 0.249 | 3.00 | 1.52 | 1 840.8 | 419.31 | 10.06 |
| 0.2 mm-8 | 0.285 | 2.99 | 1.53 | 1 818.5 | 426.80 | 10.24 |
| 0.4 mm-1 | 0.427 | 3.01 | 1.45 | 1 728.2 | 437.50 | 10.50 |
| 0.4 mm-2 | 0.418 | 3.01 | 1.48 | 1 853.5 | 469.37 | 11.26 |
| 0.4 mm-3 | 0.434 | 3.00 | 1.51 | 1 769.5 | 455.93 | 10.94 |
| 0.4 mm-4 | 0.418 | 3.01 | 1.49 | 1 688.2 | 427.90 | 10.27 |
| 0.4 mm-5 | 0.372 | 3.01 | 1.50 | 1 794.5 | 442.24 | 10.61 |
| 0.4 mm-6 | 0.392 | 2.99 | 1.51 | 1 733.5 | 437.09 | 10.49 |
| 0.4 mm-7 | 0.394 | 2.99 | 1.52 | 1 731.8 | 437.28 | 10.49 |
| 0.4 mm-8 | 0.432 | 3.00 | 1.50 | 1 720.2 | 440.27 | 10.57 |

Notes: $a_0$—Initial crack depth; $h_1$—Steel thickness; $h_2$—CFRP thickness; $P_{max}$—Limit load; $f_t$—Tensile strength; $K_{IC}$—Fracture toughness.

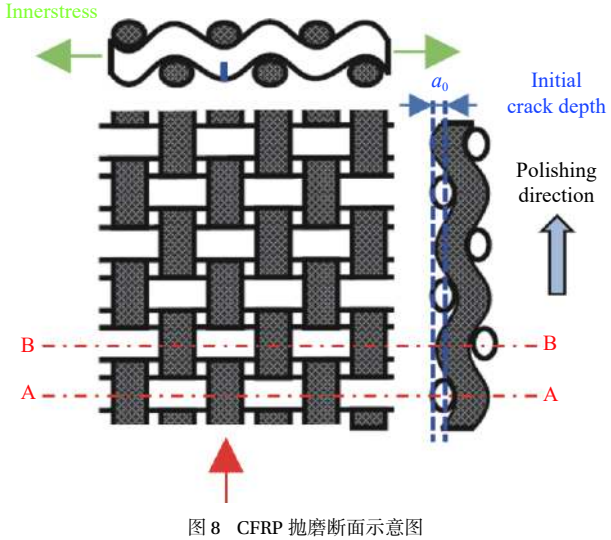
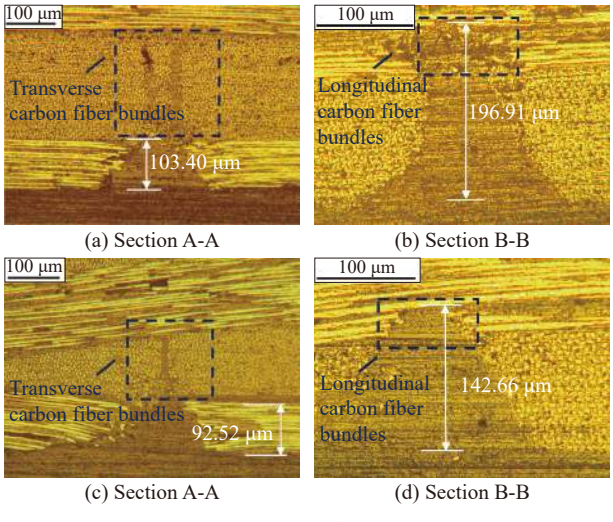



图 8　CFRP 抛磨断面示意图

Fig. 8　Polishing location for CFRP




(a) Section A-A　(b) Section B-B　(c) Section A-A　(d) Section B-B

图 9　金相显微镜下观察 CFRP-钢复合结构的裂纹扩展长度 ($\Delta a_{fic}$)

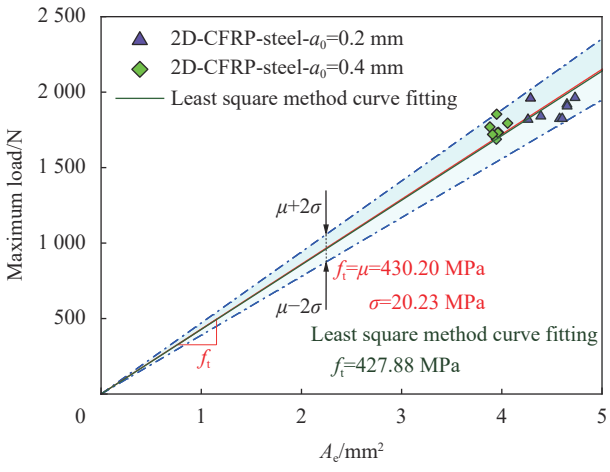
Fig. 9　Crack growth length of CFRP-steel composite structure at metallographic microscope ($\Delta a_{fic}$)

展进入纵向碳纤维区域，由于碳纤维束断裂后收缩导致无法闭合，因此可以通过观察和测量相邻两个断裂面之间裂纹深度差值确定裂纹扩展长度，即边界效应理论模型中虚拟裂纹扩展长度$\Delta a_{fic}$。因此，图 9(a) 和 9(c) 的裂纹长度为 103.4 μm 和 92.52 μm，图 9(b) 和 9(d) 的裂纹长度 196.91 μm 和 142.66 μm，则两个试样的裂纹扩展长度分别为 196.91−103.4=93.51 μm 和 142.66−92.52=50.14 μm，取两者均值得平均裂纹扩展长度为 72 μm，由式 (13) 可得结构特征参数$C_{ch}$为 48 μm。

## 3　分析与讨论

### 3.1　CFRP-钢复合结构断裂性能

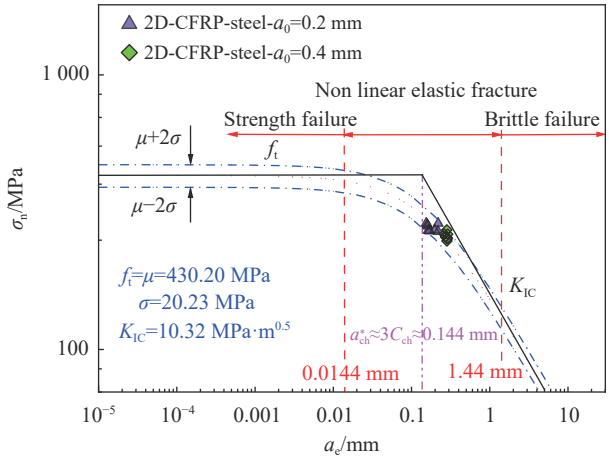
根据式 (15) 可知，等效面积$A_e$可由结构参数计算得到，因此由极值载荷$P_{max}$计算可得拉伸强度$f_t$。为了验证解析模型是否能够准确描述表面出现浅裂纹损伤的 2D-CFRP-钢复合结构的断裂行为，图 10 中绘制了两种不同初始裂纹深度 CFRP-钢复合结构的$P_{max}$-$A_e$曲线，由图可知，随着$A_e$的增加，极值载荷$P_{max}$增大，且由于 CFRP 为非均质脆性材料，每个试样之间存在尺寸偏差、缺陷差




$\mu$—Average; $\sigma$—Standard deviation;
$f_t$—Tensile strength of CFRP plate; $A_e$—Equivalent area

图 10 CFRP-钢复合结构的 $P_{max}$-$A_e$ 曲线

Fig. 10 $P_{max}$-$A_e$ curves of CFRP-steel composite structure




$\sigma_n$—Nominal stress; $a_e$—Equivalent crack length; $K_{IC}$—Fracture toughness of CFRP plate; $a^*_{ch}$—Length of characteristic crack; $C_{ch}$—Characteristic composite microstructure

图 11 CFRP-钢复合结构的 $\sigma_n$-$a_e$ 曲线

Fig. 11 $\sigma_n$-$a_e$ curves of CFRP-steel composite structure

异等随机因素，因此，相同初始裂纹深度试样的数据之间具有一定的分散性，通过可靠度评价，试样数据仍在 95% 的置信区间范围内，因此该解析模型能够描述 CFRP 表面裂纹损伤的 2D-CFRP-钢复合结构的断裂行为。图 10 中，对两种不同初始裂纹深度的 CFRP-钢复合结构试验数据进行最小二乘法拟合，拟合曲线斜率为 427.88 MPa，而解析模型样本估计可得 $f_t$为 430.20 MPa，两者相对误差为 0.54%，表明解析模型分析结果与线性最小二乘法拟合结果一致性好。

由表 4 可知，相比较直接拉伸试验测得拉伸强度 $f_{t\text{-}T}$=424.31 MPa，含表面裂纹试件的三点弯曲试验测得 CFRP 板平均拉伸强度为 430.20 MPa，两者相对误差为 1.39%，偏差较小，表明了解析模型的有效性。

另外，相对于线性拟合方法，本文所建立的解析模型还可以分析获得随着试件尺寸变化的置信区间，例如$A_e$增大则置信区间增大，该趋势结果与试件尺寸增大出现试验数据分散性增大的实际现象一致，因此该模型符合工程结构评价要求。

对式 (10) 两边取对数，由表 5 的试验结果可得 2D-CFRP-钢复合结构的$\sigma_n$-$a_e$曲线，通过曲线可以判断不同初始裂纹深度的 2D-CFRP-钢复合结构的断裂模式，如图 11 所示。由图可知，2D-CFRP-钢复合结构的特征裂纹长度$a^*_{ch} \approx 3C_{ch} \approx 0.144$ mm，当$a_e/a^*_{ch} > 10$[31]，即$a_e$为 1.44 mm 时，属于脆性断裂，主要由断裂韧度$K_{IC}$控制；当$a_e/a^*_{ch} < 0.1$[32]，即$a_e$为 0.0144 mm 时，属于强度破坏，主要由材料拉伸强度$f_t$控制；当$0.1 < a_e/a^*_{ch} < 10$，即$0.0144\ \text{mm} < a_e < 1.44$ mm时，属于非线弹性断裂问题。将表 5 中试验结果绘制于图 11 中，结果表明裂纹深度分别为 0.2 mm 和 0.4 mm 的 2D-CFRP-钢复合结构属于非线弹性断裂破坏。

### 3.2 CFRP-钢层状复合结构损伤容限

CFRP-钢层状复合结构在实际服役过程中，不可避免的会在脆性碳纤维表面出现表面划痕损伤，因此损伤后的复合结构力学性能预测是需要研究的，基于式 (15) 建立的解析模型可用于预测微裂纹损伤后复合结构的力学性能。分别对初始裂纹深度为 0.001 mm、0.01 mm 和 0.1 mm 的 CFRP-钢复合结构极限承载力$P_{max}$进行预测，如图 12 所示，从图中可以看出，随着初始裂纹深度

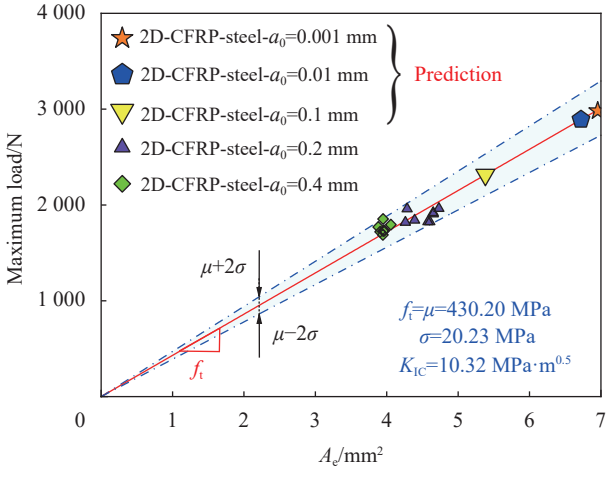



图 12 CFRP-钢复合结构的 $P_{max}$-$A_e$ 曲线预测

Fig. 12 $P_{max}$-$A_e$ curves prediction of CFRP-steel composite structure

的减小，极限承载力均值$P_{max}$呈线性增加，且根据式 (15) 和式 (16) 得 95% 可靠度的极限承载力上限和下限值，详细结果见表 6。图 13 为 CFRP-钢层状复合结构的$\sigma_n$-$a_e$预测曲线图，可以看出，初始裂纹深度为 0.001 mm 和 0.01 mm 的 2D-CFRP-钢复合结构破坏属于强度破坏，初始裂纹深度为 0.1 mm 的 2D-CFRP-钢复合结构破坏属于非线弹性断裂破坏。

表 6　不同表面裂纹深度的 CFRP-钢复合结构极限承载力 $P_{max}$ 预测值

Table 6　$P_{max}$ prediction of CFRP-steel composite structures with different surface crack depths

| $a_0$/mm | Upper limit of ultimate load/N | Lower limit of ultimate load /N | Average of limit load/N | Average decline/% |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 3 274.11 | 2 711.28 | 2 992.74 | – |
| 0.001 | 3 272.94 | 2 710.31 | 2 991.67 | 0.04 |
| 0.01 | 3 163.20 | 2 619.43 | 2 891.36 | 3.39 |
| 0.1 | 2 532.80 | 2 097.40 | 2 315.14 | 22.64 |
| 0.2 | 2 017.21 | 1 976.75 | 1 996.98 | 33.27 |
| 0.4 | 1 719.44 | 1 678.98 | 1 699.21 | 43.22 |

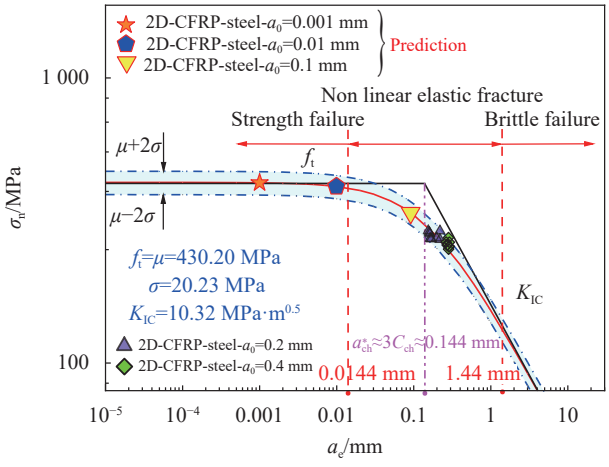



图 13　CFRP-钢复合结构的$\sigma_n$-$a_e$曲线预测

Fig. 13　$\sigma_n$-$a_e$ curves prediction of CFRP-steel composite structure

不同表面裂纹深度的 CFRP-钢复合结构极限承载力预测如表 6 所示，可以看出，当 CFRP 表面无裂纹损伤时，2D-CFRP-钢复合结构的极限承载力为 2 992.74 N，当碳纤维表面出现不同程度的损伤时，CFRP-钢复合结构出现了不同程度的载荷下降量，当初始表面裂纹深度为 0.1 mm 时，复合结构的极限承载力下降量达到了 22.64%，载荷变化范围为 2 097.40~2 532.80 N，当初始表面裂纹深度为 0.4 mm 时，复合结构的极限承载力下降量超过了 40%，因此表面损伤导致 CFRP-钢复合结构的载荷下降量是比较显著的，为了保证 2D-CFRP-钢复合结构在实际运营过程中的安全性，加强表面损伤检测是十分有重要的。

## 4　CFRP-钢复合结构特征参数 $C_{ch}$ 对断裂性能的影响

基于边界效应理论建立的 CFRP-钢复合结构的极限承载力解析模型中，拉伸强度 $f_t$和断裂韧度$K_{IC}$的非线弹性断裂与结构特征参数$C_{ch}$有关，但是由于 CFRP-钢复合结构试样中纤维束是横纵双向编织的，试样之间的几何结构是不同的，测量精确的值是非常困难的，所以评估结构特征参数$C_{ch}$对拉伸强度 $f_t$和断裂韧度$K_{IC}$的影响是非常有必要的。在$C_{ch}$为 48 μm 的基础上，假定存在 30% 的绝对偏差，即分别取$C_{ch}$为 33.6 μm 和 62.4 μm，对三种结构特征参数下拉伸强度 $f_t$和断裂韧度$K_{IC}$的均值和标准差进行了分析，如表 7 所示。相比较$C_{ch}$为 48 μm 的拉伸强度 $f_t$和断裂韧度$K_{IC}$，$C_{ch}$为 33.6 μm 和 62.4 μm 的拉伸强度 $f_t$和断裂韧度$K_{IC}$的相对误差最多是 14%，尤其是断裂韧度$K_{IC}$的相对误差更小，最大不超过 6%。也就是说，虽然

表 7　不同 $C_{ch}$ 值对 CFRP-钢复合结构断裂性能的影响

Table 7　Effects of various $C_{ch}$ values on fracture properties of CFRP-steel composite structures

| | $f_t$/MPa | | | $K_{IC}$/(MPa·m$^{0.5}$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $C_{ch}$/μm | 33.6 | 48 | 62.4 | 33.6 | 48 | 62.4 |
| Average $\mu$ | 487.24 | 430.20 | 395.41 | 9.78 | 10.32 | 10.82 |
| Standard deviation $\sigma$ | 26.96 | 20.23 | 16.20 | 0.54 | 0.49 | 0.44 |
| Error/% | 13.26 | 0 | −8.08 | −5.23 | 0 | 4.84 |

CFRP-钢层状复合结构中碳纤维的结构特征参数较难进行测量，但是在近似的结构特征参数范围内，可以得到较准确的断裂性能估算值，所以可以通过直接拉伸强度 $f_{t\text{-}T}$ 对碳纤维表面含有微裂纹的 CFRP-钢层状复合结构的损伤容限进行较准确的预测。

## 5 结 论

针对脆性碳纤维出现划痕等表面损伤问题，基于边界效应理论模型，建立了表面划痕损伤后碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP)-钢层状复合结构的极限承载力解析模型，在 CFRP 表面分别预制了 0.2 mm 和 0.4 mm 深度的表面划痕初始缺陷，通过三点弯曲成组试验验证了复合结构解析模型的可行性，并预测了表面微裂纹损伤的 CFRP-钢层状复合结构极限承载力，得出以下结论：

(1) 将边界效应理论应用到层状组合结构，通过宏观的力学分析建立了 CFRP-钢层状复合结构的极限承载力解析模型，该模型可以预测层状复合结构微裂纹的表面损伤容限。

(2) 制备 CFRP-钢复合结构试件，通过试验和观测的方法，验证了解析模型对 CFRP-钢层状复合结构的可行性。

(3) 针对 CFRP-钢层状复合结构的断裂特征和损伤区大小，提出了确定结构特征参数的方法，分析了结构特征参数 $C_{ch}$ 对 CFRP-钢层状复合结构断裂性能的影响，结果表明在近似的结构特征参数范围内，可以得到较准确的断裂性能估算值。

(4) 基于解析模型可以较为准确的预测表面微裂纹损伤后 CFRP-钢层状复合结构的极限承载力和断裂强度，相比较表面无裂纹损伤的 CFRP-钢复合结构，碳纤维表面的缺陷对复合结构承载力的影响是较为显著的，为了保证 CFRP-钢复合结构在实际运营过程的安全，加强对复合结构的表面损伤检测是非常有必要的。

## 参考文献：


[1] 熊健, 李志彬, 刘惠彬, 等. 航空航天轻质复合材料壳体结构研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(6)：1629-1650.
XIONG Jian, LI Zhibin, LIU Huibin, et al. Advances in aerospace lightweight composite shell structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2021，38(6)：1629-1650(in Chinese).

[2] 肖何, 陈藩, 刘寒松, 等. 国产ZT7H碳纤维表面状态及其复合材料界面性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2554-2567.
XIAO He, CHEN Fan, LIU Hansong, et al. Surface state of domestic ZT7H carbon fiber and interface property of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(8): 2554-2567(in Chinese).

[3] 李红, 刘旭升, 张宜生, 等. 新能源电动汽车异种材料连接技术的挑战、趋势和进展[J]. 材料导报, 2019, 33(23)：3853-3861.
LI Hong, LIU Xusheng, ZHANG Yisheng, et al. Challenges, trends and progress of dissimilar material bonding technology for new energy electric vehicles[J]. Material Guide，2019，33(23)：3853-3861(in Chinese).

[4] 籍龙波, 朱学武, 丁建鹏, 等. 乘用车碳纤维复合材料研究及应用进展[J]. 汽车文摘, 2020(9)：17-22.
JI Longbo, ZHU Xuewu, DING Jianpeng, et al. Research and application progress of carbon fiber composites for passenger cars[J]. Automotive Digest，2020(9)：17-22(in Chinese).

[5] 杨桂英, 赵睿, 肖冰, 等. 碳纤维复合材料在汽车轻量化中的应用[J]. 当代石油石化, 2020, 28(10)：24-28.
YANG Guiying, ZHAO Rui, XIAO Bing, et al. Application of carbon fiber composite in automobile lightweight[J]. Petroleum & Petrochemical Today，2020，28(10)：24-28(in Chinese).

[6] 王军照, 丁存光, 肖云健, 等. 车用碳纤维复合材料应用研究[J]. 中国新技术新产品, 2020(18)：53-57.
WANG Junzhao, DING Cunguang, XIAO Yunjian, et al. Research on the application of carbon fiber composites for vehicles[J]. New Technology and New Products in China，2020(18)：53-57(in Chinese).

[7] 张莉, 董磊, 刘志远. 碳纤维复合材料在轨道交通车辆转向架上的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8)：190-193.
ZHANG Li, DONG Lei, LIU Zhiyuan. Application of carbon fiber composite material in bogie of rail transit vehicle[J]. Urban Mass Transit，2020，23(8)：190-193(in Chinese).

[8] 梁云, 谌亮, 杨集友, 等. 碳纤维复合材料在轨道交通车辆转向架上的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1)：129-133.
LIANG Yun, SHEN Liang, YANG Jiyou, et al. Application of carbon fiber composite material in bogie of rail transit vehicle[J]. Urban Mass Transit，2020，23(1)：129-133(in Chinese).

[9] 李荣翔. 海洋环境下CFRP复合桩水平承载特性研究[D]. 开封: 河南大学, 2019.
LI Rongxiang. Study on horizontal bearing characteristics

of CFRP composite pile in marine environment[D]. Kaifeng: Henan University, 2019(in Chinese).

[10] 完海鹰, 李瑭颖. CFRP加固钢管柱极限承载力正交模拟与数值分析[J]. 安徽建筑, 2019, 26(9)：110-112.
WAN Haiying, LI Tangying. Orthogonal simulation and numerical analysis of ultimate bearing capacity of steel tubular columns strengthened with CFRP[J]. Anhui Architecture，2019，26(9)：110-112(in Chinese).

[11] 查晓玮. CFRP加固偏压H型钢柱承载力试验研究与数值模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
ZHA Xiaowei. Experimental study and numerical simulation of the bearing capacity of H-shaped steel column reinforced by CFRP[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020(in Chinese).

[12] WANG Y, LI J H, DENG J, et al. Bond behaviour of CFRP/steel strap joints exposed to overloading fatigue and wetting/drying cycles[J]. Engineering Structures，2018，172：1-12.

[13] 张彤彤, 吴健, 王纬波. CFRP加固损伤钢板的弯曲性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(12)：26-30.
ZHANG Tongtong, WU Jian, WANG Weibo. Bending behavior of damaged steel plate strengthened with CFRP[J]. Composite Materials Science and Engineering，2020(12)：26-30(in Chinese).

[14] LEPRETRE E, CHATAIGNER S, DIENG L, et al. Fatigue strengthening of cracked steel plates with CFRP laminates in the case of old steel material[J]. Construction and Building Materials，2018，174：421-432.

[15] CHEN T, YAO J X, LIU R Y, et al. Fatigue behavior of steel plates with multi-holes repaired by CFRP[J]. Composite Structures，2020，242：112163.

[16] 李旭. CFRP布加固压弯钢构件极限承载力理论分析与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2018.
LI Xu. Theoretical analysis and experimental study on ultimate bearing capacity of steel members strengthened with CFRP sheets [D]. Shenyang: Shenyang University, 2018(in Chinese).

[17] 路志浩. 碳纤维在重型厂房钢吊车梁加固中的应用[J]. 上海建设科技, 2020, 238(2)：13-17.
LU Zhihao. Application of carbon fiber in reinforcement of steel crane beam of heavy workshop[J]. Shanghai Construction Science & Technology，2020，238(2)：13-17(in Chinese).

[18] HUO J S, ZHANG X F, YANG J, et al. Experimental study on dynamic behavior of CFRP-to-steel interface[J]. Structures，2019，20：465-475.

[19] 郭奥, 杨勇新, 贾彬. 碳纤维布加固H型钢梁的抗弯性能及承载力计算[J]. 西南科技大学学报, 2019, 34(1)：45-48.
GUO Ao, YANG Yongxin, JIA Bin. Flexural behavior and bearing capacity calculation of H-beam strengthened with CFRP sheets[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology，2019，34(1)：45-48(in Chinese).

[20] TAFSIROJJAMAN T, FAWZIA S, THAMBIRATNAM D, et al. Behaviour of CFRP strengthened CHS members under monotonic and cyclic loading[J]. Composite Structures，2019，220：592-601.

[21] 王家栋. 纤维增强复合材料加固钢梁受力性能试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
WANG Jiadong. Experimental study on mechanical behavior of steel beams strengthened with fiber reinforced composites [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019(in Chinese).

[22] CAMINERO M A, RODRÍGUEZ G P, MUÑOZ V. Effect of stacking sequence on Charpy impact and flexural damage behavior of composite laminates[J]. Composite Structures，2016，136：345-357.

[23] 施琪, 吴亚平, 王丽霞, 等. 碳纤维复合材料抗拉性能测试结果的影响因素分析[J]. 兰州交通大学学报, 2008(4)：57-59.
SHI Qi, WU Yaping, WANG Lixia, et al. Analysis of influence factors on tensile test results of carbon fiber composites[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University，2008(4)：57-59(in Chinese).

[24] YUAN B Y, HU Y S, HU X Z. Critical bending load of CFRP panel with shallow surface scratch determined by a tensile strength model[J]. Composites Science and Technology，2020，191：108072.

[25] HU X Z, WITTMANN F. Size effect on toughness induced by crack close to free surface[J]. Engineering Fracture Mechanics，2000，65(2-3)：209-221.

[26] HU X Z, GUAN J F, WANG Y S, et al. Comparison of boundary and size effect models based on new developments[J]. Engineering Fracture Mechanics，2017，175：146-167.

[27] WANG Y S, HU X Z. Determination of tensile strength and fracture toughness of granite using notched three-point-bend samples[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2016，50(1)：1-12.

[28] ASTM international. Standard test method for tensile prop-

erties of polymer matrix composite materials: ASTM D3039/D3039M [S]. West Conshohocken, United States: ASTM international, 2017.

[29] WANG B H, BAI Y X, HU X Z, et al. Enhanced epoxy adhesion between steel plates by surface treatment and CNT/short-fibre reinforcement[J]. Composites Science and Technology，2016，127：149-157.

[30] WANG B H, HU X Z, LU P M. Improvement of adhesive bonding of grit-blasted steel substrates by using diluted resin as a primer[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives，2017，73：92-99.

[31] 管俊峰, 胡晓智, 王玉锁, 等. 用边界效应理论考虑断裂韧性和拉伸强度对破坏的影响[J]. 水利学报, 2016, 47(10)：1298-1306.

GUAN Junfeng, HU Xiaozhi, WANG Yusuo, et al. The influence of fracture toughness and tensile strength on failure is considered by boundary effect theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2016，47(10)：1298-1306(in Chinese).

[32] 管俊峰, 胡晓智, 李庆斌, 等. 边界效应与尺寸效应模型的本质区别及相关设计应用[J]. 水利学报, 2017, 48(8)：955-967.

GUAN Junfeng, HU Xiaozhi, LI Qingbin, et al. Essential difference between boundary effect model and size effect model and related design application[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2017，48(8)：955-967(in Chinese).