

引用格式:王延明,林静瑜,王海涛,等.止裂孔与碳纤维复材(CFRP)板组合修复带单边裂纹钢板的疲劳性能[J].工业建筑,2026,56(5):130-140. WANG Yanming, LIN Jingyu, WANG Haitao, et al. Fatigue Performance of Single-Edged Cracked Steel Plates Repaired with Combined Stop-Hole and CFRP Plate[J]. Industrial Construction, 2026, 56(5): 130-140 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG26031403

止裂孔与碳纤维复材(CFRP)板组合修复带单边裂纹钢板的疲劳性能^{*}

王延明¹ 林静瑜² 王海涛² 史健喆² 郭聪聪² 陈治吉²

(1. 江苏高速公路工程养护有限公司,江苏淮安 223005;2. 河海大学土木与交通学院,南京 210098)

摘 要 钻孔止裂法是工程中常用的钢结构疲劳裂纹修复方法,但其面临修复效果不可靠、损伤截面等问题。通过将外贴碳纤维复材(CFRP)板与钻孔止裂法结合,形成组合修复方法,可以弥补单一方法的不足,实现疲劳裂纹高效修复。为探究 CFRP 板对止裂孔修复效果的提升作用,基于局部应力-应变法和断裂力学理论,对止裂孔与 CFRP 板组合修复单边开裂钢板的疲劳性能进行了数值分析,建立了组合修复钢板的两阶段疲劳寿命评估方法,通过与既有试验结果对比,验证了该评估方法的可行性。同时分析了止裂孔孔径、CFRP 板厚度和弹模等参数对组合修复开裂钢板疲劳性能的影响。结果表明:相比于止裂孔修复,组合修复能够显著降低孔边应力以及裂纹再生后的应力强度因子,推迟裂纹扩展并显著降低扩展速率;相比于 CFRP 板修复,组合修复可贡献额外的裂纹萌生寿命,显示了组合修复方法的高效性。

关键词 止裂孔;CFRP 板;开裂钢板;疲劳性能;数值模拟

Fatigue Performance of Single-Edged Cracked Steel Plates Repaired with Combined Stop-Hole and CFRP Plate

WANG Yanming¹ LIN Jingyu² WANG Haitao² SHI Jianzhe² GUO Congcong² CHEN Zhiji²

(1. Jiangsu Expressway Engineering Maintenance Limited Company, Huai'an 223005, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The stop-hole method is a commonly used technique for repairing fatigue cracks of steel structures in engineering practice; however, it suffers from issues such as unreliable repair effectiveness and damage to the cross-section. By combining externally bonded CFRP plates with the stop-hole to form a combined repair method, the limitations of a single method can be compensated for, achieving efficient repair of fatigue cracks. To investigate the enhancement effect of CFRP plates on stop-hole repair, a numerical analysis of the fatigue performance was conducted on single-edged cracked steel plates repaired with combined stop-hole and CFRP plate, based on the local stress-strain approach and fracture mechanics theory. A two-stage fatigue life assessment method for combined repaired steel plates was established and validated through comparisons with existing experimental studies. The results showed that, compared with the stop-hole repair, the combined repair method significantly reduced the stress around the hole edge and the stress intensity factor after crack re-initiation, thereby delaying crack propagation and significantly reducing the crack growth rate. Compared with CFRP plate repair, the

^{*} 国家自然科学基金项目(52378233,52508262);中国博士后科学基金项目(2025M773262)。

第一作者:王延明,高级工程师,主要从事桥梁工程管养研究,408976122@qq.com。

通信作者:王海涛,博士,教授,主要从事工程结构高效加固技术研究,cewh@hhu.edu.cn。

收稿日期:2026-03-14

combined repair method provided additional crack initiation life, demonstrating its high repair efficiency.

Keywords: stop-hole; CFRP plate; cracked steel plate; fatigue performance; numerical simulation

0 引言

承受循环荷载的钢结构在长期服役后,很多都面临疲劳裂纹的威胁,严重影响了结构的安全和耐久性,特别是裂纹不断扩展会导致构件突然断裂,造成灾难性事故,可以说疲劳开裂已成为制约钢结构安全长寿的重要工程问题^[1-2]。为了确保疲劳损伤钢结构的安全服役,相比于更换开裂钢构件,对疲劳裂纹进行有效修复更为经济可行。因此,研究高效便捷的疲劳裂纹修复技术具有重要意义和应用价值。在实际工程中,钻孔止裂法是常用的疲劳裂纹修复方法,通过在裂纹尖端附近钻止裂孔,达到延缓裂纹继续扩展的目的。然而,使用止裂孔修复后,裂纹常在孔边重新萌生,疲劳寿命的延长仅仅取决于裂纹再生寿命。止裂孔直径是影响止裂效果的重要因素之一,虽然增大止裂孔直径可降低应力集中,延长裂纹再萌生寿命^[3],但当孔径过大时,会削弱截面,并缩短后续的裂纹扩展长度。此外,采用冷扩孔和置入高强螺栓等技术,也可以提高止裂孔的修复效果^[4-6]。然而,以上提升止裂孔修复效果的方法均只提高了裂纹再生寿命,而当疲劳裂纹从止裂孔边缘再次萌生后,这些方法对疲劳裂纹扩展性能几乎没有改善。

碳纤维复材(CFRP)具有高强度、低密度及优异的抗疲劳性等优势,近年来应用 CFRP 修复疲劳裂纹吸引了研究者的关注。大量研究表明,在疲劳裂纹周围粘结碳纤维布和 CFRP 板可以降低疲劳应力和裂纹扩展速率,有效增加疲劳寿命^[7-12]。比如,吴刚等^[7]研究表明,相比于焊接钢板方法,外贴 CFRP 方法在改善损伤钢梁的失效模式、增加疲劳寿命等方面具有显著优势。Wang 等^[9]研究表明,在相同的 CFRP 加固量下,CFRP 板比 CFRP 布的修复效果更好,外贴 CFRP 对中心裂纹和单边裂纹钢板的疲劳寿命均有显著延长,分别提高了 3.0~3.9 倍和 7.8~10.3 倍。尽管如此,采用外贴 CFRP 修复方法时,由于裂纹尖端依然存在,导致裂纹仍然会继续扩展,只是通过降低裂纹扩展速率来延长疲劳寿命。因此,该方法对疲劳寿命的提高效果仅取决于对裂纹扩展寿命的改善程度。

综上可知,外贴 CFRP 可以很好地弥补止裂孔修复方法的不足。一方面,裂纹从止裂孔萌生后,外贴 CFRP 可以显著降低裂纹扩展速率,提高裂纹扩展寿命;另一方面,外贴 CFRP 可以降低止裂孔边缘的应力幅,提高止裂孔对裂纹萌生的改善作用;此外,CFRP 可以弥补止裂孔对截面承载力的削弱,从而实现“无损”修复^[13]。因此,将止裂孔与外贴 CFRP 技术联合应用,形成组合修复技术,有望更高效地延长开裂钢构件的疲劳寿命,该组合修复方法能够克服相关单一方法在提高裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命方面不能兼顾的局限性。例如,Nakamura 等^[14]的试验结果显示,采用 25 mm 直径的止裂孔修复后,疲劳寿命达到了未修复的 1.6 倍,而组合修复的疲劳寿命达到了未修复的 80 倍以上,也明显高于 CFRP 板的修复结果。Jiang 等^[15]的研究结果表明,采用高弹模 CFRP 与止裂孔组合修复钢板的裂纹萌生寿命和疲劳寿命分别达到了单独止裂孔修复的 8.4 倍和 7.0 倍。总体上,虽然目前有个别试验验证了组合修复的高效性,但关于止裂孔与 CFRP 组合修复开裂钢构件疲劳性能的研究仍然非常有限。

为深入研究 CFRP 板对止裂孔修复效果的提升作用,明确外贴 CFRP 板的提升机理,本文基于局部应力-应变法和断裂力学理论,采用 ABAQUS 软件,对止裂孔与 CFRP 板组合修复的单边开裂钢板进行了数值分析,形成了组合修复开裂钢板的简化疲劳寿命预测方法,并通过将预测结果与既有试验结果进行对比,验证了预测方法的合理性。在此基础上,分析了止裂孔、外贴 CFRP 板及其组合修复方法对疲劳裂纹的修复效果,并考察了止裂孔直径、CFRP 板厚度和弹性模量等 3 个关键参数对疲劳性能的影响。

1 试件介绍

本文采用含单边裂纹的狗骨式钢板作为研究对象,为了对比不同方法对疲劳裂纹的修复效果,设计了未修复试件、止裂孔单独修复试件、CFRP 板单独修复试件和止裂孔与 CFRP 板组合修复试件 4 组试件。试件尺寸与课题组先前开展的相关

静力拉伸试件^[13,16]完全相同,试件总长 640 mm、厚 10 mm,中间段长 360 mm、宽 100 mm,两端夹持段长 100 mm、宽 150 mm,过渡区长 40 mm;在拉伸段中部边缘处,通过线切割方法加工 1 条贯穿初始裂纹,长 30 mm,宽 0.2 mm。未修复试件的几何尺寸见图 1(a)。对于止裂孔修复试件,以初始裂纹尖端为中心钻取圆形止裂孔,直径为 8 mm,详见图 1(b)。对于 CFRP 板修复试件和组合修复试件,分别在未修复试件和止裂孔修复试件的基础上双面对称粘贴 CFRP 板,见图 1(c)和(d)。钢材为热轧 Q355 结构钢,参考前期研究^[17]中相关牌号钢材的测试结果,屈服强度为 385 MPa,弹性模量为 200 GPa,极限抗拉强度为 557 MPa。用于修复的 CFRP 板名义宽度和厚度分别为 100 mm 和 1.4 mm,粘贴长度为 360 mm,黏结剂厚度为 1 mm。基于前期研究,CFRP 板的弹性模量、拉伸强度和极限延伸率分别为 169 GPa、2723 MPa 和 1.61%,黏结剂的弹性模量、拉伸强度和极限延伸率分别为 3.85 GPa、38.3 MPa 和 1.33%^[16]。试件承受正弦波常幅应力加载,最大应力 $\sigma_{\max}$ 为 120 MPa,应力比 R 为 0.1。

2 疲劳寿命评估方法

2.1 裂纹萌生寿命评估

局部应力-应变法已经被广泛用于预测裂纹萌生寿命^[18-19]。基于考虑了平均应力 σ_m 影响的修正 Confin-Manson 公式^[20],可以评估裂纹萌生寿命 (N_0),如式(1)所示。

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_0)^b + \varepsilon'_f (2N_0)^c \quad (1)$$

式中: $\Delta \varepsilon$ 为止裂孔边缘的局部应变范围; σ'_f 和 b 分别为疲劳强度系数和指数,对于模拟采用的 Q355 钢,分别取值 961.4 MPa 和 -0.091^[21]; ε'_f 和 c 分别为疲劳延性系数和指数,对于 Q355 钢,分别取 0.19 和 -0.458^[21]; σ_m 为止裂孔边缘的局部平均应力; E 为钢材的弹性模量。根据式(2)可以得到局部应变和局部应力范围。

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (2a)$$

$$\Delta \sigma \cdot \Delta \varepsilon = \frac{\Delta S^2 K_f^2}{E} \quad (2b)$$

式中: $\Delta \sigma$ 为止裂孔边缘的局部应力范围; K' 和 n' 分别是循环应力-应变曲线的系数和指数,对于 Q355 钢,分别取值 1096.5 MPa 和 0.184^[21]; ΔS 为缺口部

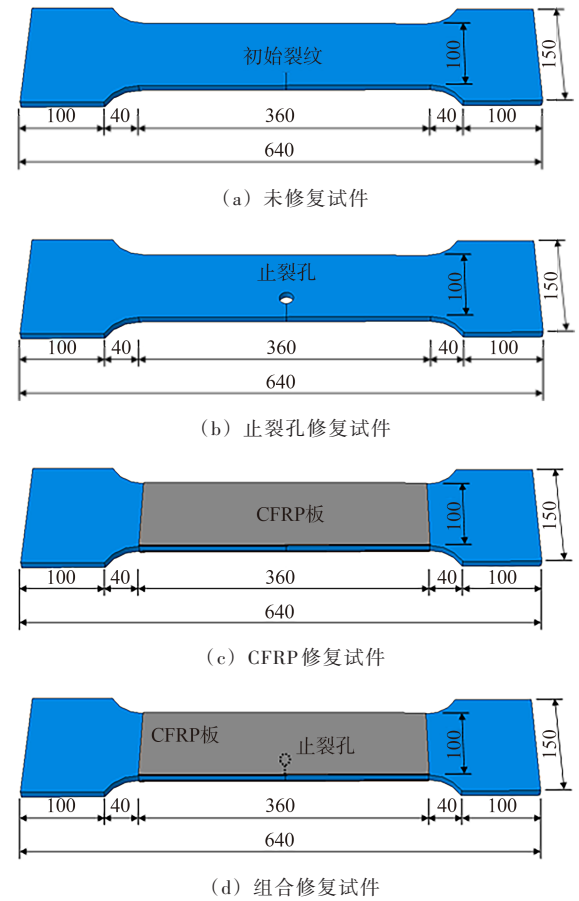


图1 试件的几何尺寸 mm

Fig. 1 Geometric dimensions of specimens

位的名义应力范围,采用式(3)计算; K_f 为疲劳应力集中系数,采用式(4)计算^[22-23]。

$$\Delta \varepsilon_s = \Delta \varepsilon_c \quad (3a)$$

$$\Delta \sigma_0 b_s t_s = E \Delta \varepsilon_s (b_s - a') t_s + E_c \Delta \varepsilon_c b_c t_c \quad (3b)$$

$$\Delta S = \Delta \varepsilon_s \cdot E \quad (3c)$$

式中: $\Delta \sigma_0$ 为施加的远端拉应力范围; $\Delta \varepsilon_s$ 和 $\Delta \varepsilon_c$ 分别为钢板和 CFRP 板的名义应变范围; b_s 和 b_c 分别为钢板和 CFRP 板的宽度; t_s 和 t_c 分别为钢板和 CFRP 板的厚度; E_c 为 CFRP 板的弹性模量; a' 为缺口的投影长度。

$$K_f = 1 + (K_t - 1)q \quad (4a)$$

$$q = \frac{1}{1 + a^*/\rho} \quad (4b)$$

$$a^* = 0.025 \left(\frac{2070}{f_u} \right)^{1.8} \quad (4c)$$

式中: K_t 为弹性应力集中系数,通过后续的线弹性有限元分析确定; q 为缺口敏感系数; ρ 为止裂孔半径; a^* 为材料常数; f_u 为钢材的抗拉强度(557 MPa)。

采用 ABAQUS 软件数值模拟得到式(4a)中的 K_t

后,即可基于上述预测理论,评估止裂孔修复试件和组合修复试件的裂纹萌生寿命。在有限元模型中,CFRP板和钢板均采用C3D8I单元模拟,黏结层采用COH3D8单元模拟。钢板、CFRP板和胶层的全局种子尺寸为3 mm,对于存在止裂孔的试件,在孔周围区域加密网格,孔边缘的单元尺寸为0.8 mm×0.4 mm×1 mm。钢板-黏结层和CFRP板-黏结层界面均采用Tie约束。为了模拟试验机的夹持约束作用,对有限元模型的固定端约束所有自由度,而在加载端仅释放纵向自由度,并施加拉应力。有限元模型如图2所示。

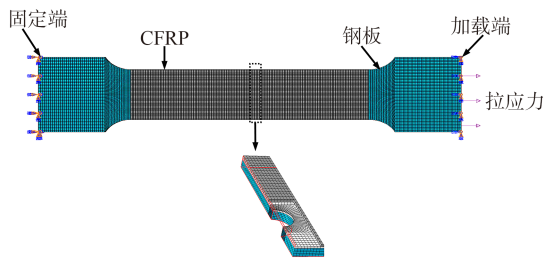


图2 典型的有限元模型
Fig. 2 Representative finite element model

在有限元模拟中,钢板和CFRP板定义为线弹性材料,其材料参数见第1节所述。疲劳裂纹的扩展可能引起胶接界面的局部剥离,从而降低疲劳裂纹修复效果^[17]。为了考虑黏结界面损伤的影响,在有限元中采用混合模式的内聚力模型来模拟黏结层。根据既有研究,所用黏结剂的内聚力模型为双线性^[13],其主要的内聚力模型参数见表1。在混合模式下,选用二次名义应力准则来确定黏结层的损伤起始,并采用基于能量释放率的线性准则来确定黏结层的失效。

表1 双线性内聚力模型主要参数

Table 1 Main parameters of the bilinear cohesive model				
断裂模式	$\sigma_i^{\max}/\text{MPa}$	δ_i^e/mm	δ_i^f/mm	$G_{i,c}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$
I型	38.3	0.010	0.013	0.255
II和III型	15.2	0.022	0.089	0.676

注: $\sigma_i^{\max}$ 、 δ_i^e 、 δ_i^f 和 $G_{i,c}$ 分别为最大黏结应力、弹性位移、失效位移和界面断裂能。

2.2 裂纹扩展寿命预测

采用线弹性断裂力学法预测裂纹从孔边再次萌生后的扩展寿命 N_p ,该方法已经被广泛应用于预测CFRP修复开裂钢构件的裂纹扩展寿命^[24-27]。Paris公式通过建立裂纹扩展速率(da/dN)与应力强度因子范围(ΔK)的关系,描述了疲劳裂纹的扩展规

律,见式(5)。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (5)$$

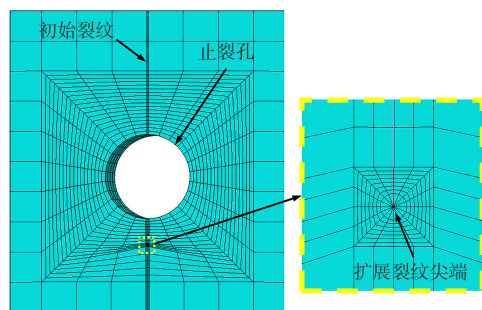
式中: C 、 m 为表征疲劳裂纹扩展的材料常数,对于采用的Q355钢,文献[17]实测的 C 和 m 分别为 6.03×10^{-15} 和3.639。

在ABAQUS有限元模型中,由于扩展有限元(XFEM)对刚萌生短裂纹的应力强度因子求解精度较差。为了提高应力强度因子的计算精度,对于从孔边再次萌生裂纹长度5 mm以内的应力强度因子,采用传统有限元计算,而当裂纹扩展大于5 mm时,采用XFEM求解,通过两种方法结合的方式进行裂纹扩展全过程模拟,既保证了精度,也提高了计算效率。当采用传统有限元时,在图2有限元模型基础上,对裂纹尖端的网格进行加密,如图3(a)所示。裂纹尖端区域的最内圈选用半径为0.05 mm的C3D15单元模拟,除最内圈以外的区域采用C3D20R单元模拟,外圈采用0.3 mm正方形边界与周围单元过渡。当采用XFEM求解时,在图2预测裂纹萌生寿命的有限元模型基础上,无需对裂纹尖端进行网格划分,仅需建立一个二维平面来定义裂纹面,如图3(b)所示。采用传统有限元和XFEM计算应力强度因子时,在相互作用模块中分别定义裂纹类型为Contour integral和XFEM。

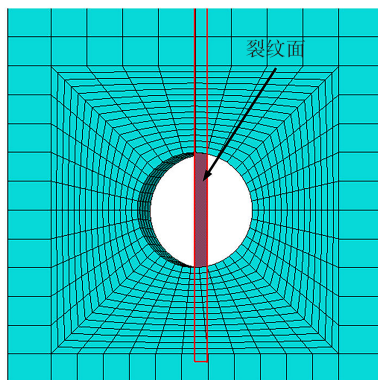
2.3 疲劳寿命评估方法验证

2.3.1 裂纹萌生寿命对比

基于上述裂纹萌生寿命评估方法,对既有研究^[28-29]中的相关试件进行预测。文献[28]中,边裂纹钢板尺寸为680 mm×120 mm×10 mm,初始裂纹长度为40 mm,试件Ua为止裂孔修复试件,在裂纹尖端钻取直径为13 mm的止裂孔;试件S1为止裂孔与CFRP布组合修复试件,止裂孔修复后再粘贴两层尺寸为400 mm×120 mm×0.5 mm的CFRP布进行单面修复;试验所用钢材为Q355,实测的弹性模量和拉伸强度分别为210 GPa和653 MPa,CFRP布的弹性模量为246 GPa; $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 分别为100 MPa和20 MPa。在文献[29]中,边裂纹钢板尺寸为400 mm×80 mm×8 mm,初始裂纹长度为28 mm,分别进行止裂孔修复、止裂孔与单面CFRP组合修复、止裂孔与双面CFRP组合修复,在距离裂纹尖端4 mm外钻取直径为8 mm的止裂孔;所用Q235钢材的弹性模量和拉伸强度分别为210 GPa和400 MPa,CFRP弹性模量为230 GPa;试验最大荷载为



(a) 传统有限元网格划分



(b) XFEM 网格划分

图3 有限元模型局部网格划分

Fig. 3 Local mesh of the finite element model

裂纹萌生寿命计算中用到的主要材料及疲劳性能参数见表2,主要结果见表3。可见,裂纹萌生寿命试验值与预测值的误差在30%以内。需要说明的是,目前疲劳试验中对于裂纹萌生的判定尚无统一标准,且止裂孔加工工艺等因素对裂纹萌生行为具有显著影响,导致裂纹萌生寿命的试验结果本身具有较大的离散性。同时,基于局部应力-应变法的裂纹萌生寿命评估模型并非严格的理论精确解,其预测结果在很大程度上依赖于模型中疲劳参数的取值。此外,有限元模拟过程中亦不可避免地存在一定的模型误差。因此,在综合考虑上述不确定性因素对萌生寿命预测精度的影响后,对模拟结果与文献试验结果进行对比发现,表明所采用的评估方法能够较为合理地用于止裂孔与CFRP板组合修复开裂钢板的裂纹萌生寿命评估。

表2 材料的主要疲劳性能参数

Table 2 Key fatigue parameters of materials

材料	K'/MPa	n'	σ'_f/MPa	b	ε'_f	c
Q345	1096.50	0.1840	961.4	-0.091	0.19	-0.458
Q235	999.76	0.1992	630.0	-0.080	0.16	-0.462

注:Q355材料参数来自文献[21];Q235的材料参数来自于文献[29]。

57.9 kN,应力比 R 为 0.1。

表3 预测结果与试验结果对比

Table 3 Comparison of predicted and experimental results

文献来源	试件	N_0			N_p			N_f		
		试验值/次	预测值/次	预测/试验	试验值/次	预测值/次	预测/试验	试验值/次	预测值/次	预测/试验
[28]	Ua	18000	12777	0.71	27500	30597	1.11	45500	43374	0.95
	S1	65000	64750	1.00	94000	91828	0.98	159000	156578	0.98
[29]	C28-H	4287	3218	0.75	8613	5833	0.68	12900	9051	0.70
	C28-HF	25086	19066	0.76	29471	31664	1.07	54557	50730	0.93
	C28-DHF	272833	327874	1.20	125625	181859	1.45	398458	509733	1.28
[17]	CU-1	—	—	—	142600	134376	0.94	142600	134376	0.94
	CS-1	—	—	—	672200	765349	1.14	672200	765349	1.14
	CS-2	—	—	—	547300	510377	0.93	547300	510377	0.93
	CS-3	—	—	—	478100	456269	0.95	478100	456269	0.95
	EU-1	—	—	—	74800	67596	0.90	74800	67596	0.90
	ES-1	—	—	—	654600	651979	1.00	654600	651979	1.00
	ES-2	—	—	—	846800	697359	0.82	846800	697359	0.82

2.3.2 裂纹扩展寿命对比

采用上述的裂纹扩展寿命评估方法,对文献[17,28-29]中的试件进行裂纹扩展寿命预测。在文献[28]中,材料常数 C 和 m 分别取 $1 \times 10^{-11.335}$ 和 2.827,在文献[29]中, C 和 m 分别取 $1 \times 10^{-10.941}$ 和 2.607,材料常数根据其试验的裂纹扩展曲线基于

割线法^[30]拟合得到。此外,为了更充分验证裂纹扩展寿命预测方法,排除止裂孔的影响,对文献[17]中的CFRP板修复开裂钢板试件进行了模拟,试验中的单边裂纹钢板尺寸为 $700 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,初始裂纹长度为 10 mm ,中心裂纹钢板尺寸为 $700 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,初始裂纹长度为 20 mm ;

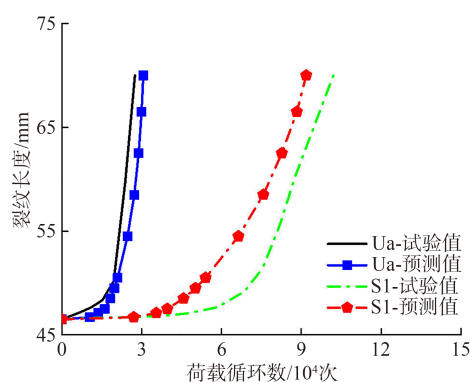
应力范围 $\Delta\sigma$ 为 120 MPa, 应力比为 0.2, 实测的 C 和 m 分别取 6.03×10^{-15} 和 3.639; 所用钢材与第 1 节所述相同, 所用 CFRP 板的实测弹性模量为 164 GPa。

预测的裂纹扩展曲线与试验曲线的对比如图 4 所示, 预测的裂纹扩展寿命与试验值的对比见表 3。可以看出, 采用上述方法得到的裂纹扩展曲线与试验曲线符合较好。对于部分 CFRP 修复试件在裂纹扩展后期误差逐渐增大, 主要原因是试验中 CFRP 的粘贴效果受施工工艺等影响, 在疲劳荷载下界面剥离程度大于有限元模拟。如文献[29]中试件 C28-DHF 在裂纹扩展过程中出现了端部剥离现象, 其扩展寿命误差达 44.8%。整体上看, 本文采用线弹性断裂力学理论并结合传统有限元和 XFEM 的预测方法, 可以较好地预测 CFRP 修复开裂钢板的裂纹扩展寿命, 合理地反映了组合修复试件的疲劳裂纹在孔边再萌生后的扩展规律。此外, 基于裂纹萌生寿命 N_0 和裂纹扩展寿命 N_p , 可以得到总疲劳寿命 N_t , 如表 3 所示。可见: 对于文献[28-29]中的组合修复试件, 相比于裂纹萌生寿命和扩展寿命, 总疲劳寿命的预测精度有了显著提高。这是因为去除了试验中裂纹萌生阶段与裂纹扩展阶段的划分标准与模拟中标准不一致所引起的误差。

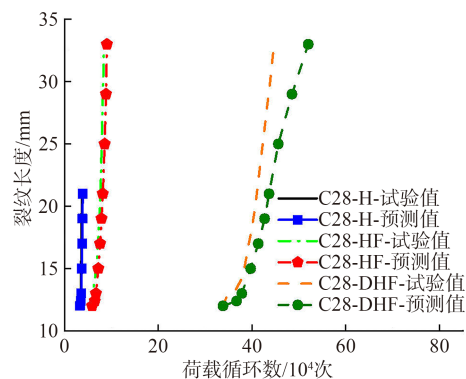
3 不同修复方法的疲劳性能对比分析

3.1 修复方法对应力集中程度的影响

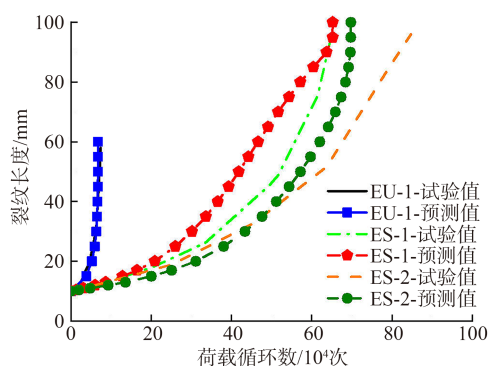
在 120 MPa 应力作用下, 采用不同修复方法的试件裂纹尖端或止裂孔周边的应力云图如图 5 所示。需要说明的是, 由于上述有限元分析求解的物理量为弹性参数, 在模拟中将钢材设置为了弹性, 因此本节以弹性应力进行分析。可以看到, 未修复试件在裂纹尖端处存在严重的应力集中程度, 弹性峰值应力为 2665 MPa。采用止裂孔修复后, 由于裂纹尖端被止裂孔去除, 应力集中程度明显降低, 弹性峰值应力降低至 1220 MPa, 降低了 54.2%。采用 CFRP 板修复后, 由于 CFRP 与钢板共同承担了外加荷载, 弹性峰值应力降低至 836.6 MPa, 相比未修复试件降低了 68.6%。采用组合修复后, 应力集中程度得到更大降低, 弹性峰值应力仅为 603.6 MPa, 与止裂孔修复相比, 组合修复的峰值应力降低了 50.5%, K_t 从止裂孔修复的 6.71 降低至组合修复的 4.42。因此, 采用组合修复可获得比止裂孔修复更长的裂纹萌生寿命。



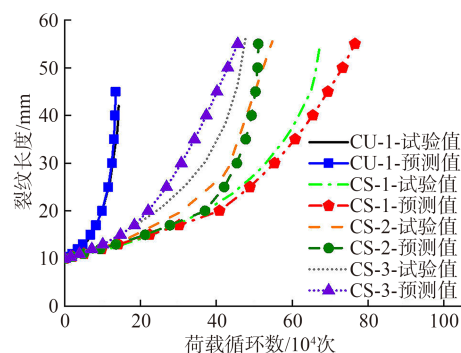
(a) 文献[28]试件



(b) 文献[29]试件



(c) 文献[17]单边裂纹试件



(d) 文献[17]中心裂纹试件

图 4 裂纹扩展曲线对比

Fig. 4 Comparison of crack propagation curves

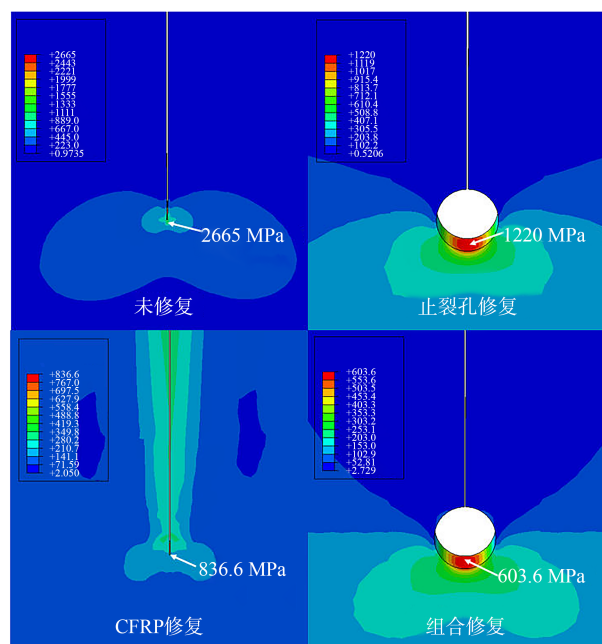


图5 不同修复方法下的弹性应力云 MPa

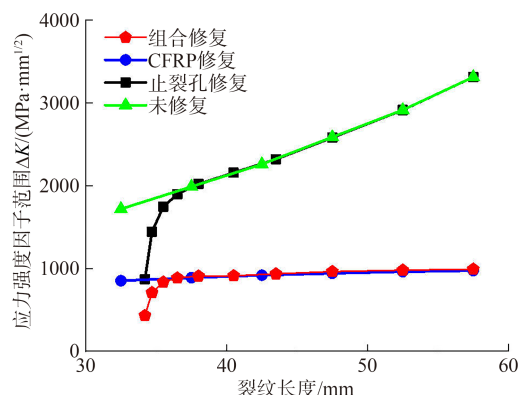
Fig. 5 Elastic stress contours under different repair methods

3.2 修复方法对应力强度因子的影响

修复方法对 ΔK 的影响见图6。可知:与未修复试件相比,在裂纹刚开始扩展阶段,止裂孔修复试件的 ΔK 明显更低,说明止裂孔修复可以在孔边缘局部区域内降低再萌生裂纹的 ΔK ,此时止裂孔的存在对裂纹扩展起到延缓作用。随着裂纹的继续扩展,未修复试件和止裂孔修复试件在相同裂纹长度下的 ΔK 基本一致,说明止裂孔的修复作用已完全丧失。此外,止裂孔的存在实际上减少了后续的裂纹扩展长度(减小值为止裂孔半径)。因此,止裂孔对疲劳寿命的影响,一方面表现为贡献了萌生寿命,另一方面取决于裂纹扩展长度减少所造成的减小效应,以及止裂孔边缘局部区域内 ΔK 降低所造成的增加效应。当采用CFRP板修复时,CFRP能够显著降低整个裂纹扩展过程中的 ΔK ,且在裂纹扩展长度较大时, ΔK 的降低效果更为明显。与CFRP板修复相比,组合修复在裂纹扩展初期可以降低 ΔK ,在裂纹扩展后期对 ΔK 的降低程度与CFRP单独修复基本一致,说明此时止裂孔对裂纹扩展已没有影响, ΔK 主要受CFRP修复作用的影响。因此,与两种单一修复方法相比,组合修复对 ΔK 的降低效果更加显著。

3.3 修复方法对疲劳寿命的影响

修复方法对裂纹扩展曲线的影响见图7。对于未修复试件和止裂孔修复试件,裂纹扩展阶段的临

图6 修复方法对 ΔK 的影响Fig. 6 Effects of repair methods on ΔK

界裂纹长度取60 mm,对于CFRP修复试件和组合修复试件,临界裂纹长度取100 mm。与未修复试件相比,止裂孔修复延缓了裂纹的继续扩展,表明止裂孔带来了裂纹萌生阶段,为疲劳寿命贡献了萌生寿命。但随着荷载循环次数的增加,裂纹重新在孔边萌生并继续扩展,并且在裂纹扩展过程中,止裂孔修复和未修复试件的裂纹增长速率趋于相同,最终止裂孔修复试件的疲劳寿命 N_f 达到了 1.62×10^4 次,是未修复试件(N_f 为 0.92×10^4 次)的1.8倍。当采用CFRP板修复时,其裂纹扩展明显比未修复试件缓慢,但CFRP修复未给疲劳寿命贡献萌生寿命, N_f 为 36.87×10^4 次,是未修复试件的40倍。因此,对于本研究试件,CFRP修复对开裂钢板疲劳性能的提升程度比单个止裂孔更有效。以上对比也表明,使用CFRP板修复和止裂孔修复对疲劳寿命的增强机制显著不同。

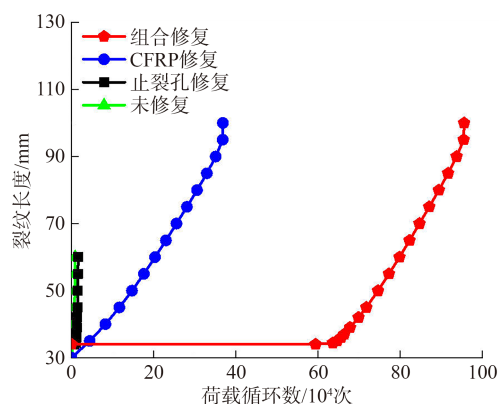


图7 修复方法对疲劳寿命的影响

Fig. 7 Effects of repair methods on fatigue life

当采用止裂孔与CFRP板组合修复时, N_f 为 95.60×10^4 次,达到未修复试件的104倍。由图7可知:与止裂孔修复相比,组合修复显著延长了裂纹

萌生寿命,其萌生寿命(59.43×10^4 次)为止裂孔修复试件(0.70×10^4 次)的 85 倍,这是因为在止裂孔修复的基础上,额外粘贴 CFRP 板能够显著降低止裂孔边缘的应力集中(见 3.1 节所述)。由此可见,在裂纹萌生阶段,CFRP 板与止裂孔共同发挥作用使萌生寿命大幅延长。同时,组合修复和 CFRP 板修复试件的裂纹扩展寿命相近,虽然由于止裂孔的存在,组合修复试件的裂纹扩展长度比 CFRP 板修复试件短 4 mm,但由于止裂孔可以降低孔边局部范围的应力强度因子(见 3.2 节分析),其裂纹扩展速率在起初较低,随后两者基本相同,最终达到相似的裂纹扩展寿命。这表明在裂纹扩展阶段,当裂纹尖端位于止裂孔影响区时,止裂孔与 CFRP 板共同发挥作用,在超出影响区后,由 CFRP 板提供修复作用。可见,止裂孔与 CFRP 板组合修复方法在裂纹萌生和裂纹扩展两个阶段均能起到有效的增强作用,使得组合修复试件的疲劳寿命远远超过单一方法的修复试件,凸显了组合修复的高效性。

4 参数分析

4.1 止裂孔直径

采用了 8, 13, 18 mm 3 种止裂孔直径来考虑孔径对疲劳性能的影响,其对止裂孔修复试件疲劳性能的影响如图 8 所示。可知:随着孔径从 8 mm 增大到 18 mm,萌生寿命 N_0 从 0.70×10^4 次增长到 1.66×10^4 次,增加了 137%。这是因为孔径的增大降低了孔边应力集中程度, K_t 从 6.71 降低到 5.08。从图 8(a)中可以发现:随着孔径的增加,应力强度因子的局部影响区不断增大,说明止裂孔对局部 ΔK 的降低效果越大,对裂纹扩展初期的疲劳寿命提高越大。但同时孔径从 8 mm 增大到 18 mm 时,损失的潜在裂纹扩展长度也从 4 mm 增大到 9 mm,这说明止裂孔孔径增大对裂纹扩展寿命的影响受 ΔK 的降低效果和潜在裂纹扩展长度的减少效应两方面控制。随着孔径的增加, N_p 从 0.92×10^4 次增长到 1.02×10^4 次,增加了 11%,说明在本研究中止裂孔孔径增大带来的 ΔK 降低效果大于裂纹扩展长度的减少效应,但 N_p 的变化并不明显。总体上,随着止裂孔孔径从 8 mm 增大到 18 mm, N_f 从 1.62×10^4 次增长到 2.68×10^4 次,增加了 65%。说明在目前的研究参数下,适当增大止裂孔直径,可以提高止裂孔的修复效果。

孔径对组合修复试件疲劳性能的影响如图 9

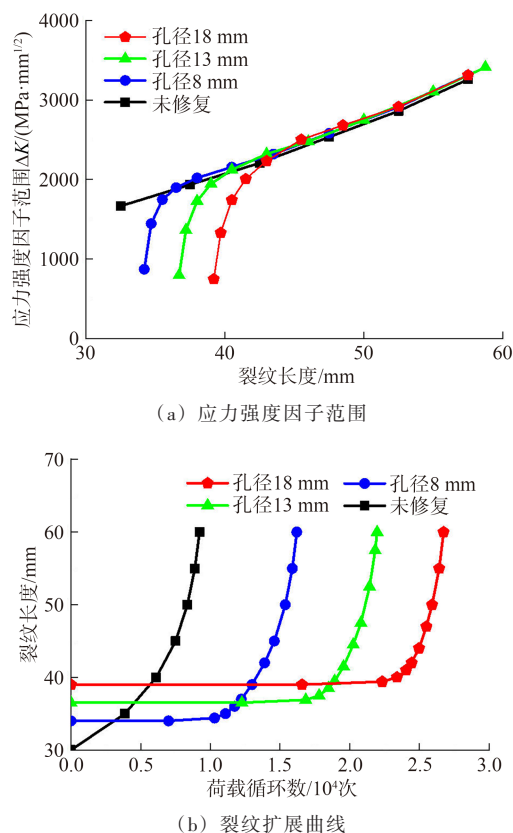


图 8 止裂孔直径对止裂孔修复试件疲劳性能的影响
Fig. 8 Effects of stop-hole diameter on the fatigue performance of stop-hole repaired specimens

所示。可知:随着孔径增大, N_0 从 59.43×10^4 次增长到 494.55×10^4 次,增加了 732%,增加程度远大于止裂孔单独修复的增加程度,这是由于外贴 CFRP 的存在,组合修复相比单独止裂孔修复更有效降低了应力集中, K_t 从 4.42 降低到 3.17。由图 9(a)可知:随着孔径的增大,在裂纹扩展初期 ΔK 局部降低区增大,但当超出局部影响区后,孔径越大的试件,裂纹扩展后期的 ΔK 越大,这是因为大孔径带来局部粘贴面积的减小,使得 CFRP 的加固效果减弱。由图 9(b)可知,叠加孔径增大带来潜在裂纹扩展长度的减小,使得止裂孔孔径从 8 mm 增大到 18 mm 时, N_p 变化不大,从 36.17×10^4 次增长到 36.21×10^4 次。最终,随着止裂孔孔径增大, N_f 从 95.60×10^4 次增长到 530.76×10^4 次,增加了 455%。可见,在本文条件下,随着孔径的增加,组合修复的疲劳性能越好。此外,结合止裂孔与 CFRP 板组合修复开裂钢板的静力测试结果^[13],组合修复可以完全弥补止裂孔带来的截面损失,因此应用组合修复技术时,可以允许比单独止裂孔修复更大的孔径,

从而提高组合技术的修复效果。

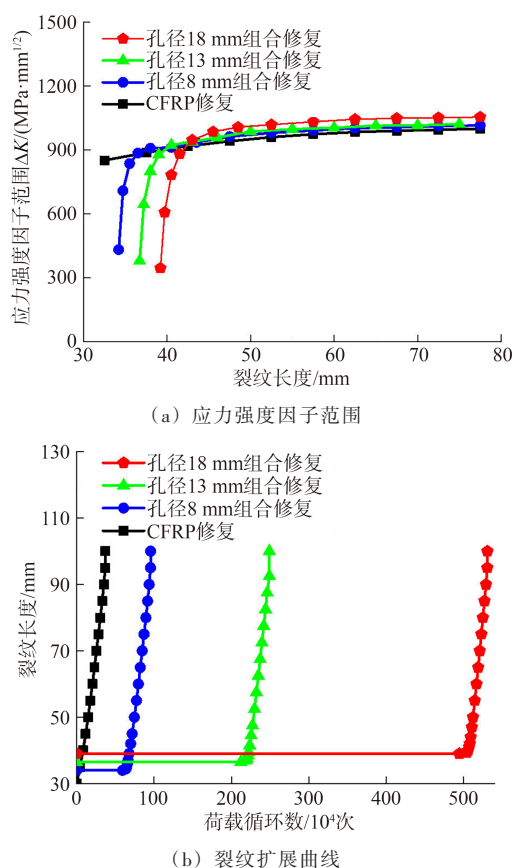


图9 止裂孔孔径对组合修复试件疲劳性能的影响
Fig. 9 Effects of stop-hole diameter on the fatigue performance of combined repaired specimens

4.2 CFRP板厚度

为了研究CFRP板厚度对组合修复效果的影响,对CFRP厚度为0 mm(止裂孔修复)、0.7 mm和1.4 mm的组合修复试件进行了分析,结果如图10所示。可知:随着CFRP板厚度从0 mm增大到1.4 mm, N_0 从 0.70×10^4 次增长到 59.43×10^4 次,增加了84倍。如图10(a)所示,与止裂孔修复试件相比,0.7 mm和1.4 mm厚的CFRP板能在整个裂纹扩展过程中显著降低 ΔK ,而且降低程度随着CFRP板厚度增加而增大。这是由于厚度较大的CFRP板可以分担更大的疲劳应力,从而降低了裂纹尖端的应力水平,并且厚度更大的CFRP板对裂纹张开的约束作用更大。 ΔK 的降低使得 N_p 从 0.92×10^4 次增长到 36.17×10^4 次,增加了38倍。由图10(b)可知:疲劳寿命的提升效果也随着CFRP厚度增加而逐渐增强,使用0.7 mm厚CFRP板修复试件的 N_f (24.12×10^4 次)是止裂孔修复试件

(1.62×10^4 次)的15倍,而使用1.4 mm厚CFRP板修复试件的 N_f (95.60×10^4 次)是止裂孔修复试件的59倍。

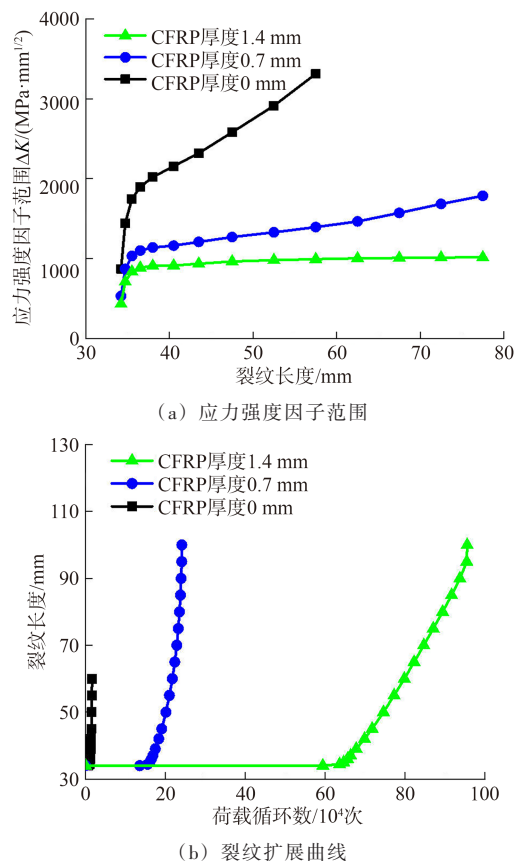


图10 CFRP板厚度对组合修复试件疲劳性能的影响
Fig. 10 Effects of CFRP plate thickness on the fatigue performance of combined repaired specimens

4.3 CFRP板弹性模量

CFRP板弹性模量对疲劳性能的影响见图11。需要说明的是,由于弹性模量为436 GPa时的疲劳寿命大于1000万次,其裂纹扩展曲线不在图11(b)中显示。由图11可知:随着弹性模量从127 GPa增大至436 GPa, N_0 从 31.76×10^4 次增长到大于 100×10^4 次。这是由于在止裂孔降低应力集中的基础上,CFRP板弹性模量的增大降低了应力集中程度和最大应力, K_t 从4.52降低到4.18。由图11(a)可知:CFRP板弹性模量增大使得裂纹扩展阶段的 ΔK 显著减小,对应的 N_p 从 22.54×10^4 次增长到 210.65×10^4 ,增加了8.3倍。图11(b)显示了CFRP弹性模量对疲劳裂纹扩展的影响。可见:当CFRP弹性模量从127 GPa增加到169 GPa, N_f 从 54.30×10^4 次增长到 95.60×10^4 次,增加了76%。这表明,增加CFRP板

弹性模量可以有效提升组合修复试件的疲劳性能。

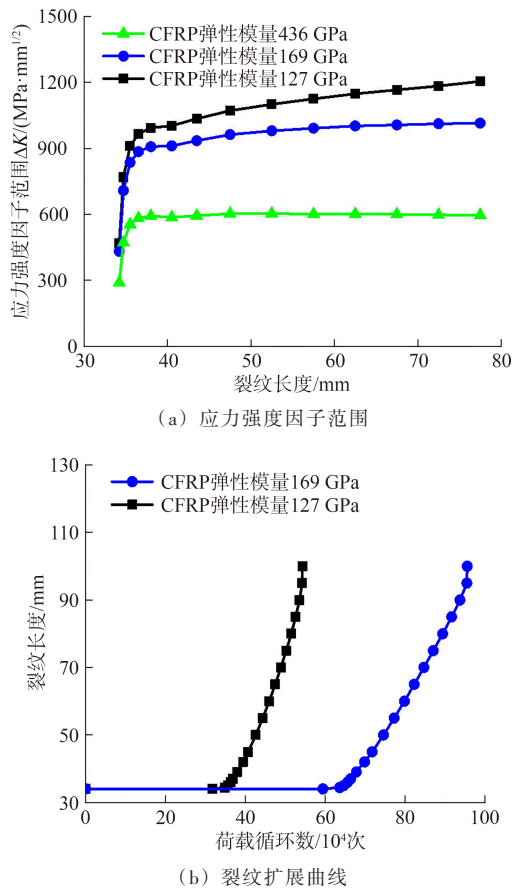


图11 CFRP板弹性模量对组合修复试件疲劳性能的影响

Fig. 11 Effects of elastic modulus of CFRP plates on the fatigue performance of combined repaired specimens

5 结论

本文进行了止裂孔与CFRP板组合修复单边开裂钢板的数值模拟研究,对比分析了外贴CFRP板对止裂孔修复效果的提升作用,并揭示了其提升机理,同时进行了参数分析。主要结论如下:

1)采用的疲劳寿命评估方法可以合理地评估止裂孔与CFRP板组合修复开裂钢板的疲劳性能。有限元模拟结果表明,组合修复方法可以大幅提升单独止裂孔的修复效果,在本文研究参数下,组合修复可将开裂钢板的疲劳寿命提升100倍以上,远大于单独止裂孔修复和单独CFRP板修复的提升效果。

2)相比止裂孔修复,组合修复能够更有效地降低孔边的应力水平和应力集中系数,有效延缓裂纹的再萌生;同时,组合修复能大幅降低裂纹扩展过

程中的应力强度因子,显著降低裂纹扩展速率。相比CFRP板修复,组合修复能贡献突出的裂纹萌生寿命,同时对后续裂纹扩展寿命影响较小。因此,组合修复能够实现裂纹萌生寿命和扩展寿命的显著延长。

3)止裂孔孔径、CFRP板厚度和弹性模量对组合修复效果均有明显影响。在本文研究条件下,随着孔径从8 mm增大到18 mm,组合修复试件的疲劳寿命增加455%;粘贴0.7 mm和1.4 mm厚度CFRP板的组合修复试件的疲劳寿命分别为止裂孔修复试件的15倍和59倍;当CFRP板弹性模量从127 GPa增大到169 GPa,疲劳寿命增加了76%。

参考文献

- [1] 张清华,李俊,崔闯,等. 钢桥面板疲劳开裂加固处治关键问题研究进展[J]. 中国公路学报, 2024, 37(5): 246-266.
- [2] 吉伯海,袁周致远. 钢箱梁疲劳开裂维护研究现状[J]. 工业建筑, 2017, 47(5): 1-6.
- [3] FENG L P, LING L P, MENG C, et al. Analysis on stop-hole parameters for fatigue cracks at arc notch in steel bridge deck [C]// Journal of Physics: Conference Series. Albania; 2022.
- [4] 柯璐,李友林,李传习,等. 冷扩止裂孔修复含I型裂纹钢板的疲劳性能试验[J]. 中国公路学报, 2024, 23(11): 76-88.
- [5] FANG L, FU Z Q, JI B H, et al. Reinforcement effect of high-strength bolts for stop-hole under out-of-plane bending loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2023, 28 (1): 04022129.
- [6] 姜旭,吕志林,强旭红,等. 高强螺栓止裂法修复含裂纹钢板疲劳受力性能[J]. 同济大学学报, 2021, 49(4): 476-486.
- [7] 吴刚,刘海洋,吴智深,等. 不同纤维增强复合材料加固钢梁疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 21-28.
- [8] YU Q Q, ZHAO X L, CHEN T, et al. Crack propagation prediction of CFRP retrofitted steel plates with different degrees of damage using BEM [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 82: 145-158.
- [9] WANG H T, WU G, JIANG J B. Fatigue behavior of cracked steel plates strengthened with different CFRP systems and configurations [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(3): 04015078.
- [10] 叶华文,张超凡,邓加林,等. 预应力CFRP布置方式对加固含复合型边裂纹钢结构的疲劳性能影响[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(2): 82-92.
- [11] 李传习,柯璐,陈卓异,等. 正交异性钢桥面板弧形切口及其CFRP补强的疲劳性能[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 63-75.
- [12] 王海涛,吴刚,张磊. FRP板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.

- [13] WANG H T, GUO C C, TAN K H, et al. Enhancing the structural integrity of cracked steel plates using combined CFRP and stop-hole method: parametric study and failure mechanism [J]. Structures, 2026, 86: 111466.
- [14] NAKAMURA H, JIANG W, SUZUKI H, et al. Experimental study on repair of fatigue cracks at welded web gusset joint using CFRP strips [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47 (10): 1059-1068.
- [15] JIANG X, LYU Z L, QIANG X H, et al. Improvement of stop-hole method on fatigue-cracked steel plates by using high-strength bolts and CFRP strips [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 6632212.
- [16] 郭聪聪. CFRP与止裂孔组合修复开裂钢板的静力及疲劳性能研究[D]. 南京:河海大学, 2024.
- [17] 王海涛. CFRP板加固钢结构疲劳性能及其设计方法研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
- [18] WU H, IMAD A, BENSEDIDQ N, et al. On the prediction of the residual fatigue life of cracked structures repaired by the stop-hole method[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32 (4): 670-677.
- [19] RAZAVI N, AYATOLLAHI M R, SOMMITSCH C, et al. Retardation of fatigue crack growth in high strength steel S690 using a modified stop-hole technique[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 169: 226-237.
- [20] MORROW J. Fatigue design handbook [M]. Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, 1968.
- [21] 廖小伟. 低温环境下桥梁钢材与焊接细节的疲劳性能研究[D]. 北京:清华大学, 2018.
- [22] PETERSON R E. Relation between life testing and conventional tests of materials [J]. Materials Research & Standards, 1963, 3 (7): 547-552.
- [23] PETERSON R E. Analytical approach to stress concentration effects in aircraft materials: technical report 59-507[R]. U. S. Air Force-WADC SYMP Fatigue Metals, Dayton, Ohio, 1959.
- [24] 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.
- [25] RASHNOOIE R, ZEINODDINI M, AHMADPOUR F, et al. A coupled XFEM fatigue modelling of crack growth, delamination and bridging in FRP strengthened metallic plates [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 279: 109017.
- [26] CHEN T, LI Z X, GU X L, et al. Fatigue performance of CFRP-strengthened steel pipes with semi-elliptical surface cracks[J]. Engineering Structures, 2025, 340: 120774.
- [27] ZHANG Y N, HU L L, CHEN T, et al. Fatigue behavior of CFRP-strengthened butt-welded high-strength steel connections with surface cracks [J]. Engineering Structures, 2025, 332: 120090.
- [28] 王贤强, 杨奔, 刘朵, 等. 止裂孔复合加固单边裂纹钢板疲劳性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(21): 100-105.
- [29] 黄传海. FRP与止裂孔复合修复含裂纹钢结构的疲劳性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2021.
- [30] ASTM. Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates: ASTM E647-11 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2011.