

文章编号:1007-9629(2023)03-0266-09

CFRP 板-钢黏结界面的疲劳性能

柯璐¹, 朱夫瑞¹, 李传习^{2,*}, 陈正¹, 张清华³

(1. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南长沙 410114; 3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川成都 610031)

摘要:开展了碳纤维增强聚合物(CFRP)板-钢双搭接试件的疲劳试验,考虑荷载水平的影响,分析了黏结界面的疲劳性能,比较了基于平均黏结应力幅或局部黏结应力幅的中值及设计疲劳曲线(S-N曲线)的适用性.结果表明:疲劳荷载下CFRP板-钢接头的主要破坏模式为钢-胶层界面剥离或钢-胶层/CFRP板-胶层界面剥离的混合破坏模式;不同荷载水平下荷载-位移曲线斜率的变化趋势大致相同;界面损伤从界面黏结应力较大的加载端开始,逐渐向自由端扩展,扩展至一定程度后界面突然断裂;采用幂函数公式预测试件的疲劳寿命时,基于平均黏结应力幅S-N曲线的拟合优越性更为显著,疲劳极限为1.88 MPa;最后,给出了具有95%可靠度的设计S-N曲线.

关键词:碳纤维增强聚合物;钢板;黏结界面;疲劳性能;疲劳曲线

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.03.007

Fatigue Behavior of Bonding Interface between CFRP Laminates and Steel

KE Lu¹, ZHU Furui¹, LI Chuanxi^{2,*}, CHEN Zheng¹, ZHANG Qinghua³

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The fatigue experiments of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminates-steel double lap joint specimens were carried out. Considering the effects of load levels, the fatigue behaviors of the interface were analyzed. Meantime, the applicability of the mean stress-number of cycle(S-N) curve and designed S-N curve based on mean or local bond stress range were compared. The results show that the main failure modes of specimens under fatigue load are steel-adhesive interface debonding or the mixed mode of steel-adhesive and CFRP laminate-adhesive interface debonding. The slope variation trend of load-displacement curves at different load levels is roughly the same. The interface damage starts from the load end with larger interfacial bond stress and gradually extends to the free end. After expanding to a certain extent, the interface suddenly fails. Using a power function formula to predict fatigue life of specimen, the fitting superiority of S-N curve based on mean bond stress range is more significant, and the fatigue limit is 1.88 MPa. Finally, the designed S-N curve with 95% probability is given.

Key words: carbon fiber reinforced polymer (CFRP); steel plate; bonding interface; fatigue behavior; stress-number of cycle curve

收稿日期:2022-03-04; 修订日期:2022-04-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208307,52078059,51878186);“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB2600900);广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2022KY0009)

第一作者:柯璐(1991—),男,湖北黄梅人,广西大学助理教授,博士生导师,博士.E-mail:kelu@gxu.edu.cn

通讯作者:李传习(1963—),男,湖南衡阳人,长沙理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:lichuanxi2@163.com

当前,中国许多在役钢桥存在疲劳开裂病害,亟需加固和修复^[1].传统加固方法多为焊接、栓接或铆接钢板,会在原结构中引入新的残余应力和应力集中^[2-3].碳纤维增强聚合物(CFRP)具有轻质高强、耐腐蚀以及抗疲劳等优异性能,能够有效弥补传统加固方式的不足,已经在钢结构加固领域引起广泛的关注^[4-7].

CFRP板与钢结构黏结界面的疲劳性能是加固系统的关键问题^[8-9].然而,目前疲劳荷载下CFRP加固钢结构的研究多聚焦于疲劳荷载对加固系统黏结性能的影响,而非黏结界面本身^[10-12].Wang等^[13]开展了CFRP板-钢接头的疲劳试验,发现荷载-滑移曲线存在滞后现象,在对数坐标下疲劳寿命与荷载水平呈线性关系.Doroudi等^[14]发现高荷载水平的疲劳加载会导致界面刚度降低,而低荷载水平的疲劳加载对界面刚度没有影响.Colombi等^[15]研究了不同应力比下CFRP板-钢双搭接接头的界面疲劳性能,发现应力比对疲劳寿命的影响较小.此外,定义了疲劳曲线(S-N曲线),并保守估计试件疲劳极限对应钢板中的应力幅为75 MPa,且疲劳极限对应应力比不敏感.由上述分析可知,已有研究很少探讨界面的损伤破坏机理,也较少提出相应的S-N曲线.

本文通过开展CFRP板-钢双搭接试件的疲劳试验来探究黏结界面的疲劳损伤机理和疲劳寿命预测方法,分析了疲劳荷载作用下试件的破坏模式、荷

载-位移关系以及界面损伤的发展历程,讨论了基于平均黏结应力幅和局部黏结应力幅S-N曲线的界面疲劳寿命预测方法,以期CFRP加固钢结构的疲劳设计提供理论支撑.

1 试验

1.1 材料性能

CFRP板采用南京海拓公司生产的单向板CFRP1.4-50,材料参数由制造商提供;采用双组分环氧黏结剂Araldite 420,依据ASTM D638-10《Standard test method for tensile properties of plastics》制备了3个黏结剂拉伸试件(试件尺寸及测点布置见图1),通过准静态拉伸力学测试得到其应力-应变曲线如图2(a)所示,可见该黏结剂为非线性黏结剂;钢板采用Q345qc桥梁钢,通过2个试件的拉伸试验得到其应力-应变关系如图2(b)所示.Araldite 420和Q345qc的材料参数取各试件的试验平均值,结果详见表1.

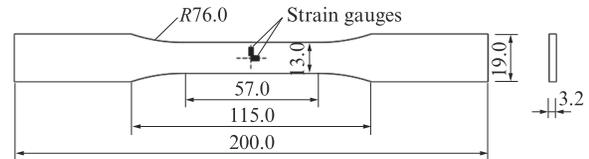


图1 黏结剂拉伸试件的尺寸和测点布置
Fig. 1 Dimensions and test points of adhesive tensile specimen(size: mm)

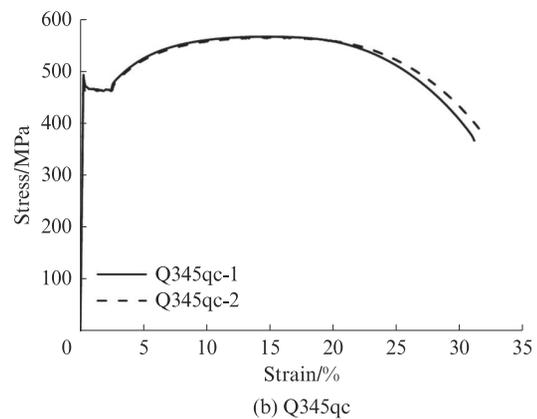
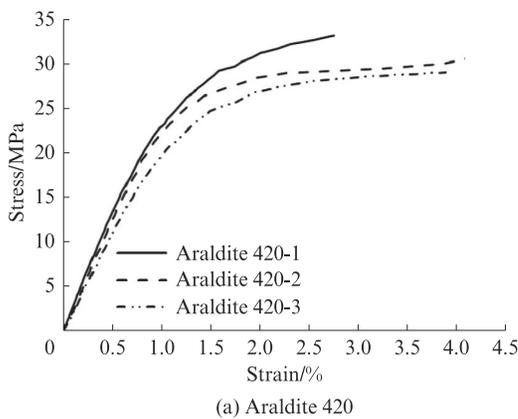


图2 Araldite 420和Q345qc的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of araldite 420 and Q345qc

表1 CFRP、黏结剂及钢材的性能
Table 1 Properties of CFRP, adhesive and steel

Material parameter	CFRP laminate	Araldite 420	Q345qc
Young's modulus/GPa	161.2	2.4	206.2
Yield strength/MPa			461.1
Tensile strength/MPa	2 263.0	30.5	565.0
Elongation at break/%	1.7	4.1	31.5
Poisson's ratio		0.3	0.3

1.2 试件设计与制备

CFRP板-钢双搭接试件的几何尺寸和应变片布置如图3所示.测试区长100 mm,锚固区长180 mm,由2块锚压板固定.上述设置可以确保破坏发生在测试区,便于试验观察.A、B分界线到试件两端为试验机夹持区.首先,对钢板表面进行机械打磨,然后用丙酮清洗,待表面干燥后立即涂抹黏结剂;其次,参

考 GB/T 7124—2008《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定 (刚性材料对刚性材料)》,在黏结范围胶层中均匀布置 4 颗直径为 0.5 mm 的小钢珠,用以控制胶层厚度,在布置时应远离加载端和自由端;接着,将经砂纸打磨好的 CFRP 板粘在钢板表面,挤出多余黏结剂,然后在表面均匀布置压载物;最后,将试件在室温下养

护 7 d,以确保胶层充分固化.应变片 G1~G5 及 G8~G12 布置在 CFRP 表面,以监测 CFRP 表面应变的变化.由于测试区加载端和自由端附近的 CFRP 应变值和应变梯度相对较大^[16-17],因此应变片在两端处布置得较为密集.应变片 G6 和 G7 布置于钢板两侧,用以校核负载偏心.

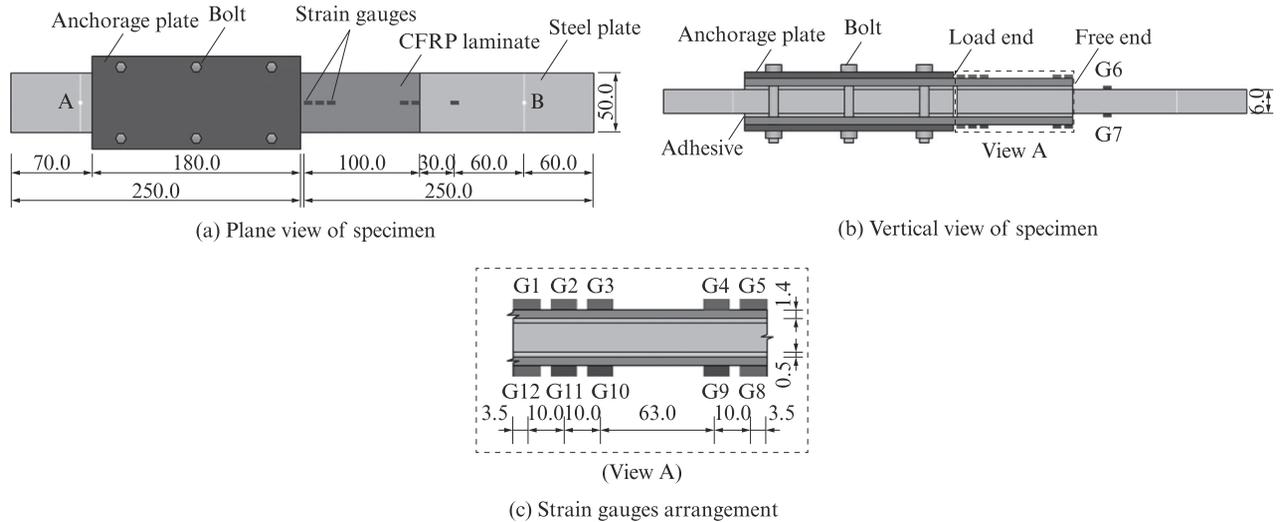


图3 CFRP板-钢双搭接试件的示意图

Fig. 3 Schematic view of CFRP laminate-steel double lap joint(size: mm)

1.3 加载程序和测试设置

所有试验均在 250 kN 的 MTS 电液伺服疲劳试验机上进行,加载装置如图 4 所示.应变数据通过 DH3822 动态数据采集仪记录,采集频率为 100 Hz.3 个试件进行静力拉伸试验,采用位移控制,加载速率为 0.4 mm/min;16 个试件进行疲劳试验,采用频率为 6 Hz 的正弦波加载,应力比(P_{max}/P_{min} ,疲劳峰值荷载与谷值荷载的比值)控制为 0.1,循环加载直至试件断裂,记录其疲劳寿命(N).应注明的是,疲劳寿命的分散性很大,即使在同一荷载水平下,疲劳寿命也可能相差几倍,甚至十几倍^[18].

试件分为 8 组,记为 A~H. 试件标号采用“DX- n ”或“DX- m - n ”的形式表示.其中:D 代表双搭接, X 为加载类型(C 代表静力加载,F 代表疲劳加载), m 为荷载水平(P_{max}/P_{ult} ,疲劳峰值荷载与平均静力极限荷载的比值), n 为试件编号.

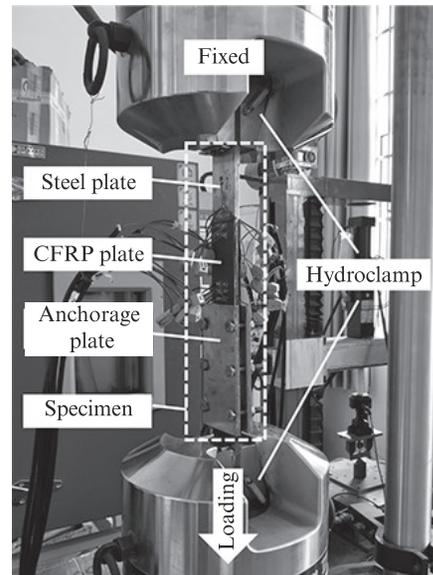


图4 试验加载装置

Fig. 4 Test loading set-up

2 结果与分析

2.1 破坏模式

表 2 为试件的疲劳试验结果.图 5 为疲劳试件的典型界面破坏模式.因试件锚固区不会发生破坏,故图 5 仅示出试件测试区(即图 3 视图 A 区域)的破坏模式.静力和疲劳试验共观察到 4 种破坏模式,分别

为:钢-胶层界面剥离(模式 a)、CFRP 板-胶层界面剥离(模式 b)、胶层内聚失效(模式 c)以及 CFRP 板层间剥离(模式 d).其中:所有静力拉伸试件的破坏模式均为 CFRP 板层间剥离,并且试件正反两面的破坏模式相同,与已有研究结果^[19]相吻合.对于疲劳试件,主要破坏模式为钢-胶层界面剥离,其次为钢-胶层界面剥离和 CFRP 板-胶层界面剥离的混合破坏模

表2 试件的疲劳试验结果
Table 2 Fatigue test results of specimens

Group	Specimen	Fatigue loading range/kN	Load level	N/times	P_{ult}/kN	Front failure mode	Reverse failure mode
A	DC-1	Static loading			131.09	d	d
	DC-2				122.35	d	d
	DC-3				124.17	d	d
B	DF-0.15-1	1.888-18.880	0.15	10 100 000	a	d + a	
C	DF-0.18-1	2.266-22.660	0.18	6 208 900		d + a	a
	DF-0.18-2					a + b	a + c
D	DF-0.2-1	2.517-25.170	0.20	1 124 325		b + a	a
	DF-0.2-2					d + a	a
	DF-0.2-3					a	a
	DF-0.2-4					a	a
E	DF-0.3-1	3.775-37.750	0.30	153 909		b + a	a
	DF-0.3-2					a + d	a
	DF-0.3-3					b + a	a
	DF-0.3-4					a	a
F	DF-0.4-1	5.035-50.350	0.40	97 901		a + d	b + a
	DF-0.4-2					a	a
G	DF-0.5-1	6.294-62.940	0.50	12 438		b + a	a
	DF-0.5-2					b + a	a
H	DF-0.6-1	7.552-75.520	0.60	6 231		d	a

Note: (a) Each specimen only lists the main failure mode, and the dominant failure mode is before “+”. (b) The definition of the front and reverse sides of the specimen is for convenience of expression only. (c) The strain gauge G1-G6 side of the specimen is defined as the front side, and the strain gauge G7-G12 side of the specimen is defined as the reverse side.

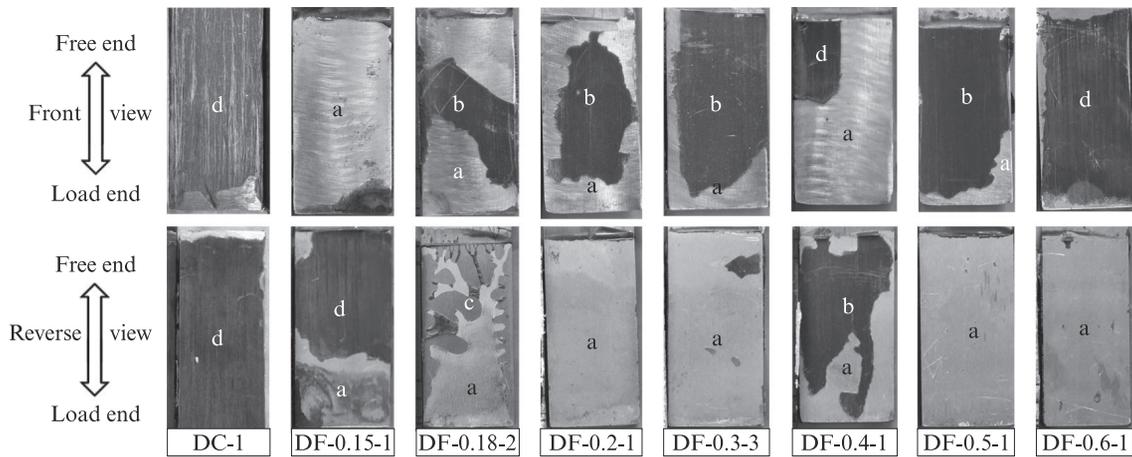


图5 疲劳试件的典型界面破坏模式
Fig. 5 Typical interface failure modes of fatigue specimens

式.由此可见,疲劳荷载下CFRP板加固钢结构的主要薄弱环节为钢-胶层界面,其次为CFRP板-胶层界面.此外,可以观察到疲劳试件正面与反面的破坏模式存在不对称行为,这可能与试件的制作工艺差异(如钢材和CFRP板表面处理、胶层缺陷等差异)有关,即疲劳荷载下接头破坏模式对制造误差更加敏感.值得注意的是,在出现的破坏模式中几乎不包括胶层内聚失效,表明Araldite 420胶层本身的剪切强度高于钢-胶层以及CFRP板-胶层界面的黏结强度.

2.2 荷载-位移曲线

静力试件的荷载-位移曲线如图6所示.由图6可见:

(1)3个静力试件荷载-位移曲线的变化趋势基本相同,大致可分为3个阶段.在加载初期,位移随着荷载的增加呈线性增长,界面处于弹性阶段,曲线斜率较大.

(2)随着荷载的增加,胶层界面出现损伤,随后界面进入弹塑性阶段,曲线斜率逐渐平缓而且大幅

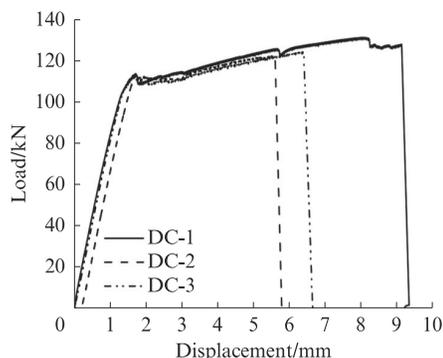


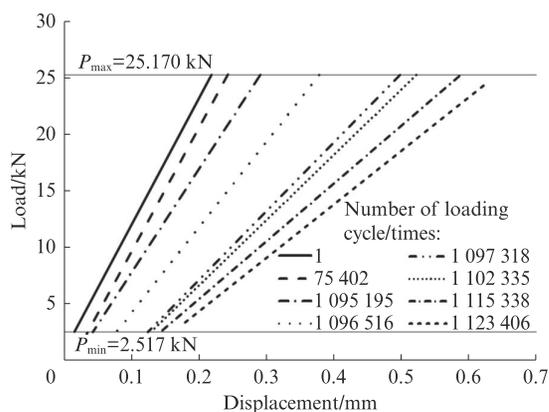
图6 静力试件的荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of static specimens

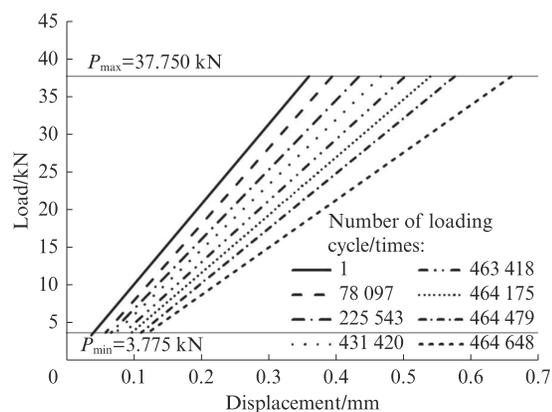
下降.在该阶段可以观察到CFRP板表面碳纤维与基体逐步剥离,试件开始出现损伤并不断扩展.

(3)继续加载,界面黏结逐渐失效,荷载骤降,试件进入破坏阶段.可以发现,加载至90% P_{ult} 左右时,荷载-位移曲线出现屈服台阶,表明静力荷载作用下基于CFRP层间剥离破坏的CFRP板-钢接头具有典型的延性破坏特征.

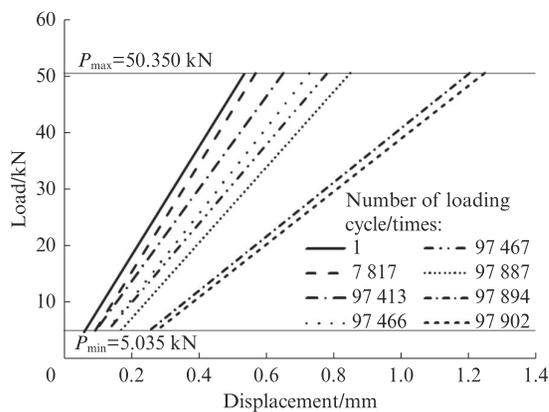
图7为部分疲劳试件不同循环次数下的荷载-位移关系.因疲劳试验所需时间较长,导致部分试件(DF-0.15和DF-0.18)在测试过程中数据采集出现故



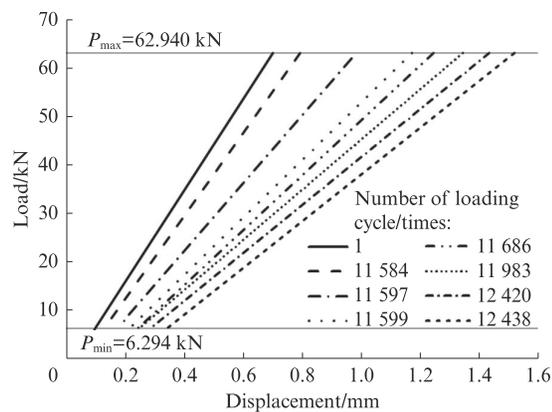
(a) DF-0.2-1



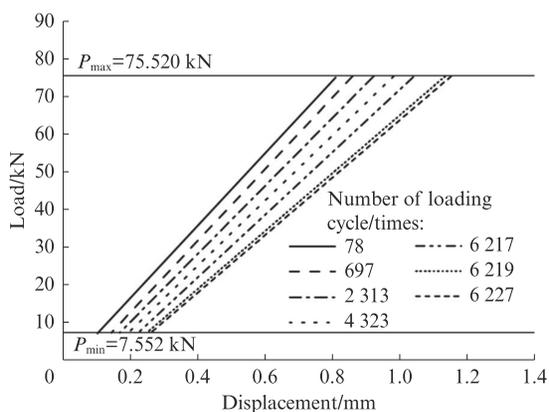
(b) DF-0.3-2



(c) DF-0.4-1



(d) DF-0.5-1



(e) DF-0.6-1

图7 不同循环次数下疲劳试件的荷载-位移关系

Fig. 7 Load-displacement relationships of fatigue specimens under different loading cycles

障,故此处无法给出其荷载-位移关系.已有研究表明,疲劳加载下的荷载-位移曲线存在迟滞现象,迟滞回线包围的面积代表每个循环内的断裂能释放量^[13].由于试验系统仅记录了每个循环周期内峰值和谷值荷载对应的位移,故图中仅示出了峰值荷载卸载至谷值荷载的过程,未能示出迟滞曲线.各循环曲线堆叠,形成了图中的阴影区域.

由图7可知,不同荷载水平下荷载-位移曲线的变化趋势基本相同.曲线斜率可以表示试件的整体刚度.在加载循环初期,曲线斜率的变化不大,代表试件的刚度几乎没有退化;随着加载的进行,黏结界面软化,试件刚度稳步降低;在临近破坏阶段,由于疲劳损伤的累积,斜率发生突变,刚度骤降.

此外,随着循环次数的增加,试件的最小位移、最大位移以及二者的差值均逐渐增大,表明疲劳加载使试件产生了一定程度的损伤,发生了明显的界面软化,导致界面疲劳性能不断退化.同时观察到疲劳谷值荷载作用导致的位移变化较小,而峰值荷载作用导致的位移发展范围较大,证明疲劳峰值荷载对界面疲劳性能的影响更为不利,但仍远小于静力加载破坏时产生的位移,表明疲劳破坏相对于静力破坏发展更为迅速、更不易被观测到,属于脆性破坏.

2.3 界面损伤过程分析

CFRP板较薄,其表面的应变变化可以表征黏结界面的损伤发展过程.加载端附近的应变值及应变梯度均最大,界面损伤通常始于此处,故重点分析端点附近测点G1~G3与G10~G12的应变变化.以试件DF-0.3-3为例,通过CFRP表面应变和界面黏结应力的发展曲线,探究界面损伤的发展过程和失效机理.

试件DF-0.3-3测点G1~G3与G10~G12的应变变化曲线如图8所示.由图8可见,无论是在不同测点处还是在不同循环次数下,应变受谷值荷载的

影响均不大,但峰值荷载的作用效果显著.

测点*i*与*i*+1中点处的界面黏结剪应力($\tau_{i+1/2}$)可通过CFRP表面的应变插值近似计算^[18]:

$$\tau_{i+1/2} = \frac{\Delta \epsilon_i E_p t_p}{\Delta l_i} = \frac{(\epsilon_i - \epsilon_{i+1}) E_p t_p}{l_{i+1} - l_i} \quad (1)$$

式中: ϵ_{i+1} 为测点*i*+1处CFRP板的应变; ϵ_i 为测点*i*处CFRP板的应变; E_p 为CFRP板的弹性模量, GPa; t_p 为CFRP板的厚度, mm; Δl_i 为测点*i*与测点*i*+1间的距离, mm.

采用式(1)计算得到G1/G2、G11/G12中点(距加载端8.5 mm)和G2/G3、G10/G11中点(距加载端18.5 mm)处在疲劳峰值荷载作用下的界面剪应力发展曲线,如图9所示.

由图8、9可知:

(1)在加载初期,应变和剪应力随着与加载端距离的增加而减小.随着循环次数的增加,G1处的应变逐渐减小,G2和G3处的应变逐渐增大,之后反超G1处;G1/G2中点的界面剪应力相应地表现为先急剧减小,然后反向增大.这是由于加载端附近的界面不断软化,然后引发局部钢-胶层剥离所致,如图5中试件DF-0.3-3正面自由端端部的破坏模式a所示.

(2)随后,应变集中逐渐由加载端向自由端转移.当循环至约78 412次时,G1~G3处的应变突增,G10~G12处的应变下降至0,黏结剪应力突然跳跃然后变为接近于0.表明此时试件反面的整个黏结区域内突然发生了钢-胶层界面剥离破坏,此侧的CFRP板不再分担荷载;试件正面的CFRP板还未完全剥离,荷载转由该侧的CFRP板承担.

(3)此后,G1~G3处的应变维持在一个较高的水平,且应变值几乎相同.界面剪应力保持为0,表明加载端附近的界面剥离范围已经超过G3,此阶段约占疲劳寿命的13%.当循环至约90 517次时,G1~G3处的应变骤降为0,此时正面的CFRP板也

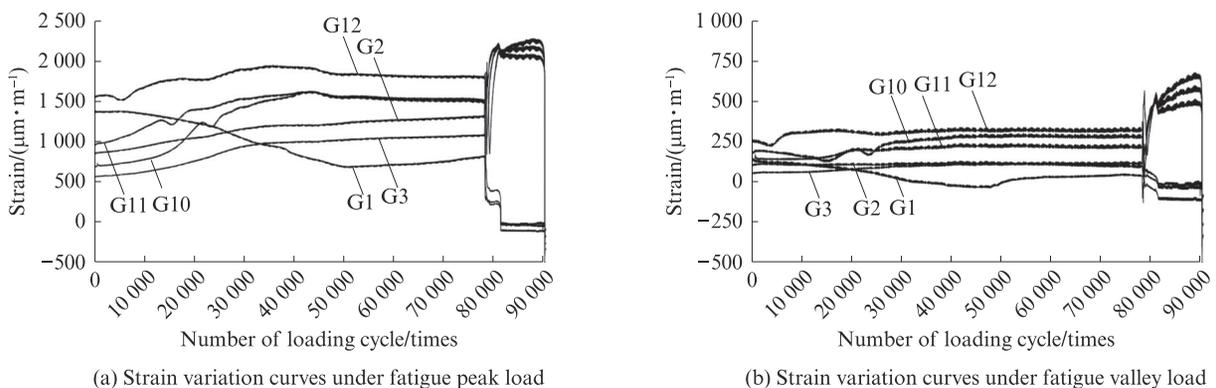


图8 试件DF-0.3-3测点G1~G3与G10~G12的应变变化曲线
Fig. 8 Strain variation curves of measuring points G1-G3 and G10-G12 for specimen DF-0.3-3

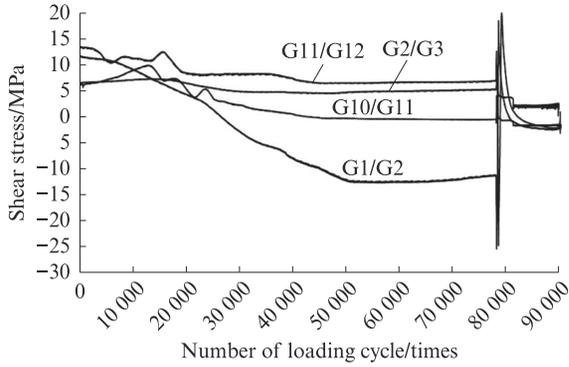


图9 试件DF-0.3-3在峰值荷载下的界面黏结剪应力发展曲线

Fig. 9 Interfacial shear stress development curves of specimen DF-0.3-1 under fatigue peak load

全部剥离,试件破坏.根据破坏模式,可以判断是突然发生了CFRP板-胶层界面剥离.

此外,疲劳试件两侧的界面剪应力发展并不对称,破坏也并不完全同步.这是由于实际试验中存在不可避免的材质不均匀性、表面处理差异等不可控因素.疲劳荷载下CFRP板-钢的界面损伤从界面黏结剪应力较大的加载端开始,不断向自由端发展.界面损伤的发展过程可分为稳定发展阶段和加速发展阶段.

2.4 疲劳寿命预测

2.4.1 中值S-N曲线

当前S-N曲线一般采用2种表达形式:一是基于平均黏结应力幅($\Delta\tau_m$),二是基于局部黏结应力幅($\Delta\tau_l$).疲劳荷载作用下疲劳寿命与界面黏结应力幅($\Delta\tau$)之间的关系可以采用幂函数公式(式(2))拟合,绘制双对数坐标下黏结界面的S-N曲线如图10所示.图中线性拟合曲线为中值S-N曲线,对应50%的预测可靠度.试验过程中超过500万次循环而未失效的试件,认为其具有无限疲劳寿命,在图中采用“→”

表示溢出.这类数据在拟合中不予考虑,通常采用水平线来估计^[18, 20].

$$(\Delta\tau)^m N = c \tag{2}$$

式中: m 和 c 为材料常数.

对式(2)两边取对数,可得:

$$\lg N = A \lg \Delta\tau + B \tag{3}$$

式中: $A = -m, B = \lg c$.

由于G1/G2中点处(距加载端8.5 mm)的黏结应力是现有应变测试手段下可测得的最大黏结应力,且应力梯度相较其他位置也更大,故采用此处加载初期的最大黏结应力幅来构造基于局部黏结应力幅的S-N曲线,局部黏结应力按式(1)计算.平均黏结应力幅为整个黏结区域内黏结应力幅的平均值,采用式(4)计算.

$$\Delta\tau_m = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2lb_{\text{steel}}} \tag{4}$$

式中: l 为黏结长度,mm; b_{steel} 为钢板宽度,mm.

图10(a)、(b)分别给出了基于平均黏结应力幅和局部黏结应力幅的界面S-N曲线.基于二者中值S-N曲线的疲劳寿命预测公式分别见式(5)、(6).

$$\lg N = -5.110 \lg \Delta\tau_m + 8.103 \tag{5}$$

$$\lg N = -4.366 \lg \Delta\tau_l + 9.805 \tag{6}$$

由图10可见:无论基于何种黏结应力幅,在双对数坐标下的S-N曲线均呈线性关系.基于平均黏结应力幅S-N曲线的可决系数(R^2)为0.934,拟合效果较好;基于局部黏结应力幅S-N曲线的可决系数为0.777,拟合优度稍差.此外,平均黏结应力幅的方差为1.55,局部黏结应力幅的方差为4.93;局部黏结应力幅的分散性较大,可能是因为局部黏结应力对黏结界面制造缺陷(由材质不均匀、表面处理不当、涂胶不当、施压不当或环境因素等引起的孔洞、微裂纹等)具有更强的敏感性.而平均黏结应力幅对缺陷敏

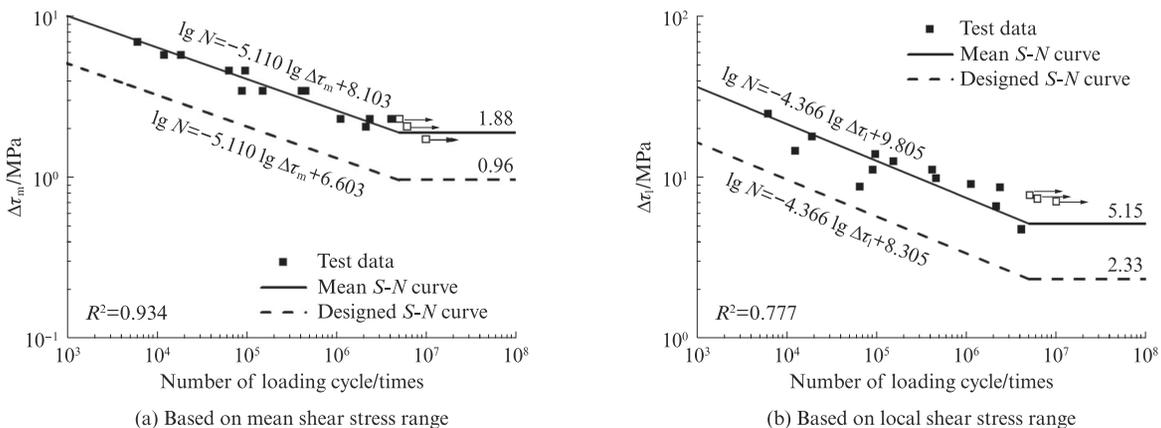


图10 黏结界面的S-N曲线
Fig. 10 S-N curves of bonding interface

感性较小,故预测结果偏差相对较小。

因此,基于幂函数公式预测界面疲劳寿命时,采用平均黏结应力幅似乎更为适合。需要说明的是,本文只讨论了最常用的幂函数公式下基于2种黏结应力幅的拟合结果,结果显示基于平均黏结应力幅的拟合优度更高,但若使用其他公式进行S-N曲线拟合,结论可能存在差异,需要进一步研究。

此外,基于无限疲劳寿命准则,得到基于平均黏结应力幅和局部黏结应力幅的500万次疲劳寿命对应的黏结应力幅(即常幅疲劳极限)分别为 $\Delta\tau_{m,D}=1.88$ MPa和 $\Delta\tau_{l,D}=5.15$ MPa,相当于静力黏结强度的15%和41%。换言之,在疲劳荷载作用下,当试件的平均黏结应力幅小于1.88 MPa或局部黏结应力幅小于5.15 MPa时,认为界面具有无限寿命。

2.4.2 设计S-N曲线

在实际工程的安全疲劳设计中,不能直接采用中值S-N曲线的确定性关系,而是需要采用具有95%可靠度的S-N曲线来保证工程安全。该设计曲线由中值S-N曲线下移1.645倍样本标准差得到^[21],该方法认为疲劳寿命在对数坐标下服从正态分布。

基于本文试验结果得到的设计曲线(图10中虚线所示),基于平均黏结应力幅和局部黏结应力幅的疲劳设计曲线分别见式(7)、(8)。由图10可见,基于2种黏结应力幅的所有试验数据点均位于设计曲线上侧,证明具有95%可靠度的2种设计S-N曲线具有很好的预测安全性。由设计曲线得到基于平均黏结应力幅的疲劳极限(对应500万次疲劳寿命) $\Delta\tau_{m,D}=0.96$ MPa,基于局部黏结应力幅的疲劳极限 $\Delta\tau_{l,D}=2.33$ MPa,分别相当于静力黏结强度的8%和19%,可以作为工程应用指导的参考。

$$\lg N = -5.110 \lg \Delta\tau_m + 6.603 \quad (7)$$

$$\lg N = -4.366 \lg \Delta\tau_l + 8.305 \quad (8)$$

虽然2种基于应力幅的设计曲线均具有很好的安全性,但在实际工程中进行黏结接头设计时,推荐使用基于平均黏结应力幅的设计S-N曲线。一是因为基于平均黏结应力幅的设计曲线的安全冗余更大;二是平均黏结应力幅的计算简单且无需测试,而局部黏结应力幅的获取相对复杂,需要进行初期加载和应变测试。因此,推荐采用具有95%可靠度的基于平均黏结应力幅的S-N曲线作为设计曲线,相应的疲劳极限(对应于500万次疲劳寿命)为0.96 MPa。

3 结论

(1)静力荷载作用下CFRP板-钢双搭接试件的破坏模式为CFRP板层间剥离。疲劳荷载作用下

CFRP板-钢双搭接试件的破坏模式主要为钢-胶层界面剥离以及钢-胶层与CFRP板-胶层界面剥离的混合破坏,且正反面的破坏模式存在不对称行为。

(2)在不同疲劳荷载水平下,CFRP板-钢双搭接试件荷载-位移曲线斜率的变化趋势大致相同。在加载初期变化不大,试件的刚度几乎未发生退化;随着加载的进行,黏结界面软化,斜率稳步下降,试件的刚度逐渐降低;疲劳损伤不断累积,斜率发生突变,试件破坏。

(3)在疲劳荷载作用下CFRP板-钢界面的损伤从界面黏结剪应力较大的加载端开始,逐渐向自由端扩展,扩展至一定程度后界面突然破坏。

(4)采用幂函数公式预测试件的疲劳寿命时,基于平均黏结应力幅的疲劳曲线(S-N曲线)相较局部黏结应力幅的拟合优越性更为显著、精度更高,疲劳极限为1.88 MPa。

(5)在实际工程设计中,推荐采用具有95%可靠度的基于平均黏结应力幅的S-N曲线作为设计曲线,相应的疲劳极限为0.96 MPa。

参考文献:

- [1] 中国公路学报编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2):1-97. Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2):1-97. (in Chinese)
- [2] 李传习, 李游, 贺君, 等. 固化剂对室温胶黏CFRP板/钢板界面性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2):339-347. LI Chuanxi, LI You, HE Jun, et al. Effect of curing agent on interfacial performance of adhesively bonded CFRP laminate/steel plate cured at room temperature[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2):339-347. (in Chinese)
- [3] YANG Y M, ZHAO J, ZHANG S S, et al. Effect of mechanical anchorage on the bond performance of double overlapped CFRP-to-steel joints[J]. Composite Structures, 2021, 267:113902.
- [4] 任慧韬, 姚谦峰, 胡安妮. 纤维增强复合材料的耐久性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5):520-526. REN Huitao, YAO Qianfeng, HU Anni. Experimental study on durability of fiber reinforced polymer[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5):520-526. (in Chinese)
- [5] 庄宁, 夏浩瑜, 董洪汉, 等. 海洋环境CFRP钢管混凝土复合桩基腐蚀试验研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(12):1-14. ZHUANG Ning, XIA Haoyu, DONG Honghan, et al. Corrosion test study of concrete filled CFRP steel tube pile foundations in marine environment [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(12):1-14. (in Chinese)
- [6] 邓军, 黄培彦. CFRP板与钢梁粘接的疲劳性能研究[J]. 土木

- 工程学报, 2008, 41(5):14-18.
- DENG Jun, HUANG Peiyan. Fatigue behaviour of adhesive bonding in steel beams strengthened with a CFRP plate[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(5):14-18. (in Chinese)
- [7] 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.
- LI Chuanxi, KE Lu, CHEN Zhuoyi, et al. Fatigue behavior and CFRP reinforcement of diaphragm cutouts in orthotropic steel bridge decks[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(5):63-75. (in Chinese)
- [8] 胡黎俐. 预应力碳纤维复材板增强钢柱的整体稳定性研究[D]. 北京:清华大学, 2020.
- HU Lili. Study on overall buckling behavior of steel columns reinforced with pre-stressed CFRP strips[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020. (in Chinese)
- [9] 于宙. CFRP-钢界面粘结疲劳性能试验研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
- YU Zhou. Experimental research on bond fatigue performance of CFRP-steel interfacial[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [10] ZHANG L, CAO S Y, TAO X. Experimental study on interfacial bond behavior between CFRP sheets and steel plates under fatigue loading[J]. Materials, 2019, 12(3):377-390.
- [11] ZHAO X L, BAI Y, RIADHI A, et al. Effect of dynamic loading and environmental conditions on the bond between CFRP and steel: State-of-the-art review [J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(3):1-11.
- [12] HUANG S L, FU Q N, YAN L B, et al. Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials-A critical review [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13:1441-1484.
- [13] WANG H T, WU G, PANG Y Y, et al. Experimental study on the bond behavior between CFRP plates and steel substrates under fatigue loading[J]. Composites Part B:Engineering, 2019, 176:107266.
- [14] DOROUDI Y, FERNANDO D, ZHOU H, et al. Fatigue behavior of FRP-to-steel bonded interface: An experimental study with a damage plasticity model [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 139:105785.
- [15] COLOMBI P, FAVA G. Fatigue behaviour of tensile steel/CFRP joints[J]. Composite Structures, 2012, 94(8):2407-2417.
- [16] WU C, ZHAO X L, CHIU W K, et al. Effect of fatigue loading on the bond behaviour between UHM CFRP plates and steel plates[J]. Composites Part B:Engineering, 2013, 50:344-353.
- [17] WU C, ZHAO X, DUAN W H, et al. Bond characteristics between ultra high modulus CFRP laminates and steel [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 51:147-157.
- [18] MOHABEDDINE A, CORREIA J, AIRES MONTENEGRO P, et al. Probabilistic S-N curves for CFRP retrofitted steel details [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 148:106205.
- [19] 李传习, 柯璐, 陈卓异, 等. CFRP-钢界面粘结性能试验与数值模拟[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12):3534-3546.
- LI Chuanxi, KE Lu, CHEN Zhuoyi, et al. Experimental study and numerical simulation for bond behavior of interface between CFRP and steel[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12):3534-3546. (in Chinese)
- [20] JIMENEZ-VICARIA J D, CASTRO-FRESNO D, PULIDO M D G. Fatigue behaviour of adhesive bonds in tensile CFRP-metal double-strap joints with puddle iron plates taken from a 19th century bridge[J]. Composite Structures, 2020, 251:112600.