

文章编号:1007-9629(2024)08-0757-07

极端湿热环境对 CFRP/钢界面性能的影响

李传习^{1,2,*}, 司曙英¹, 高有为¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410076;

2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要:为掌握极端湿热环境下 CFRP/钢界面性能的退化机理,用 Sika-30 胶黏剂制作了 12 个 CFRP/钢双搭接试件,并在 70 °C 的模拟海水中浸泡不同时间后进行拉伸剪切试验.结果表明:CFRP/钢双搭接试件的破坏模式受浸泡时长的影响较小;CFRP/钢界面平均抗剪强度随浸泡时长呈先上升后下降趋势;浸泡 90 d 后,CFRP/钢界面平均抗剪强度较未浸泡试件下降了 35.6%.

关键词:CFRP/钢;破坏模式;黏结滑移本构关系;抗剪强度

中图分类号:TU599;TU391

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.08.011

Influence of Extreme Wet-Heat Environment on Adhesive Bonding Performance of CFRP/steel Interfaces

LI Chuanxi^{1,2,*}, SIDU Yinghu¹, GAO Youwei¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To understand the deterioration mechanism of CFRP/steel interface properties under extreme hot and humid environment, 12 of CFRP/steel double lap specimens using Sika-30 adhesive were prepared. These specimens were immersed in simulated seawater at 70 °C for different time for tensile shear test. The results show that the failure mode of these specimens were less affected by the soaking time. The average shear strength of the CFRP/steel interfaces increased first and then decreased with the soaking time. After soaking for 90 days, the average shear strength of the CFRP/steel interfaces decreased by 35.6% compared with that of unsoaked specimen.

Key words: CFRP/steel; failure mode; bond-slip constitutive relation; shear strength

碳纤维增强聚合物(CFRP)因其轻质、高强、耐腐蚀等优点被广泛用于加固结构^[1-4].然而,在使用 CFRP 板加固钢结构时,二者之间的黏结界面往往成为薄弱环节^[5-7],容易受温度、湿度、氯盐侵蚀等外界环境因素的影响.其中,温度和湿度是影响界面黏结性能的主要因素^[8-11].Heshmati 等^[12]发现,在 45 °C 水浴中浸泡 1 a 后的 CFRP/钢双搭接试件,其强度明显低于在 20 °C 水浴中浸泡的试件.同样,Nguyen 等^[13]也发现,在模拟海水条件下,CFRP/钢试件的强度和刚度退化速度比在恒温恒湿条件(50 °C、90% 相对湿

度)下更快.值得注意的是,当环境温度超过胶黏剂玻璃转化温度(T_g)时,CFRP/钢双搭接试件的强度和刚度会显著下降^[14-15].综上,温度、湿度及老化时间对 CFRP/钢界面的黏结性能均有影响,但既往研究条件多为一般环境(温度低于 50 °C),而在现实中钢结构内部温度可超 60 °C,这超过了大多数胶黏剂的 T_g .当温度超过 60 °C 时,大多数环氧树脂类胶黏剂会软化,导致空气中的水分侵蚀速度加快,进而大幅降低 CFRP 与钢之间的黏结性能.此外,CFRP/钢界面极限承载能力计算模型主要基于一般环境^[12,16]条件建立

收稿日期:2023-10-09; 修订日期:2024-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778069);湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40173);湖南省研究生科研创新重点项目(QL20210180)

第一作者(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

的,其在极端环境下的适用性尚待验证.

Sika-30胶黏剂由于其高强度和较高的 T_g (62℃,该温度高于大多数环氧树脂胶的 T_g ^[17-19]),在高温环境下表现出较好的稳定性,因此常被用于CFRP加固工程.因此,本文采用Sika-30胶黏剂制备了12个CFRP/钢双搭接试件,并在70℃的模拟海水水浴环境中进行测试.通过对试件的破坏模式、极限承载能力、界面剪应力以及黏结-滑移本构关系的分析,揭示高温水浴环境下CFRP/钢界面黏结性能的退化机理,并探讨该环境下CFRP/钢界面极限承载能力的计算方法.

1 试验

1.1 试验材料

试验采用了型号为Q345B的钢板,以及Sika-30胶黏剂和南京海拓公司生产的单向CFRP板.所有相关材料参数均由供应商提供,并详细列于表1中.

表1 钢板、CFRP板和Sika-30的尺寸和力学指标
Table 1 Size and main mechanical indexes of steel plate, CFRP plate and Sika-30

Material	Thickness/ mm	Width/ mm	Tensile strength/ MPa	Elasticity/ GPa	Elongation at break / %
Steel	12.0	50	514.0	206.00	-
CFRP	1.4	50	2 263.0	161.20	1.65
Sika-30	-	50	25.3	12.13	0.22

1.2 试件设计与制备

试件的设计(见图1)和制作分别参照美国标准ASTMD 3528-96(Reapproved 2008) *Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesure Joints by Tension Loading* 和国家军用标准GJB 3383—1998《胶接耐久性试验方法》.本研究共制作12个试件,每个试件由2块钢板和2块CFRP板

组成,具体参数如表2所示.

为模拟海水环境,试验采用了5%的NaCl溶液,并将试件分为4组,即25℃下水浴0d为1组,70℃下水浴30、60、90d各1组,每组包含3个试件.

在试验开始前,对钢板和CFRP的表面进行抛光处理,确保钢板接触界面光滑,CFRP板结合界面无树脂基质,并用丙酮擦拭钢板与CFRP的接触界面.制作过程中,首先在一块CFRP板上涂抹Sika-30结构胶,撒上直径为1mm的钢球以控制结构胶层的厚度,然后对准粘贴钢板,再用相同方法粘贴另一块CFRP板.之后,试件被压重4h以挤出多余的结构胶,并在常温下养护7d.养护完成后,试件被分组放入70℃的水浴箱中.试件的尺寸、形状及CFRP板表面应变片的布置如图1所示.

水浴结束后,对试件进行静力拉伸破坏试验,并对其荷载-位移曲线、剪切强度及破坏模式进行了分析,结果详见表2.

1.3 静力拉伸试验方法

试验在300kN高低温箱拉伸试验机上完成.试验开始前,先对试件进行精确对中,并将高低温箱温度调至25℃.考虑到温度的变化对夹具和试件变形的影响,本试验在确定高低温箱内温度稳定至25℃后才夹紧试件的固定端,并开始加载.加载过程中,使用静态应变测试系统来采集应变数据,并确保加载速率为0.3mm/min.

2 结果与分析

2.1 破坏模式

为方便统计和分析,本文定义了3种破坏模式:当试件出现CFRP板层离破坏时,称为a型破坏;当试件黏结层与钢界面剥离破坏时,称为b型破坏;当黏合剂失效时,称为c型破坏.

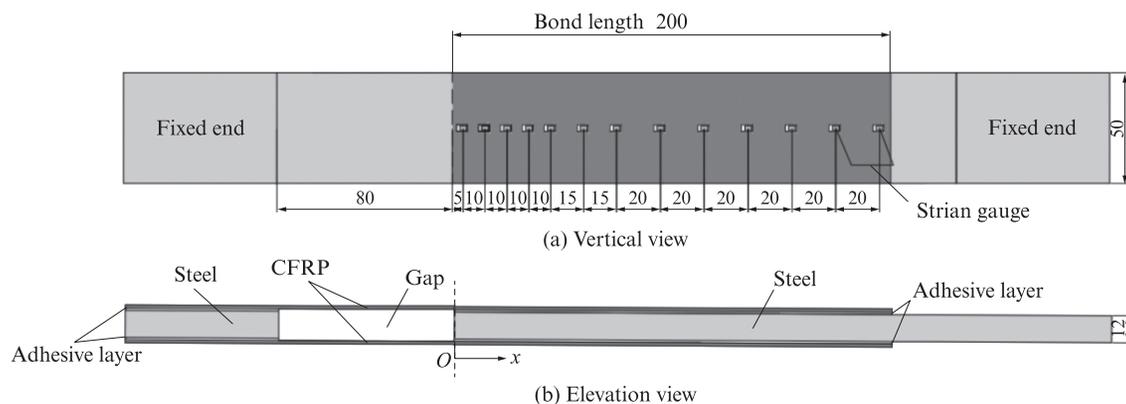


图1 CFRP/钢双搭接试件尺寸及应变片布置

Fig. 1 Size of CFRP/steel double lap specimen and layout of strain gauges (size: mm)

表2 水浴试验的试件参数与试验结果
Table 2 Sample parameters and test results of water bath test

Specimen	Ultimate bearing capacity /kN		Limit displacement/mm		Bond strength/MPa		Failure mode
	P_{ult}	Average	D_{max}	Average	τ	Average	
25 °CSika30-1	126.94		7.51		6.35		a/b
25 °CSika30-2	106.32	111.76	7.42	7.32	5.31	5.59	a
25 °CSika30-3	102.03		7.03		5.10		a/b
70 °C-30 d-1	113.82		8.35		5.69		a/b
70 °C-30 d-2	105.21	129.78	8.20	9.52	5.26	6.49	a/b
70 °C-30 d-3	170.33		12.00		8.51		a/b/c
70 °C-60 d-1	72.44		7.15		3.62		a/b
70 °C-60 d-2	95.08	78.88	7.70	7.21	4.75	3.94	a
70 °C-60 d-3	69.13		6.79		3.46		a/b
70 °C-90 d-1	86.11		8.50		4.31		a/b
70 °C-90 d-2	54.27	71.84	6.00	6.96	2.71	3.60	a/b
70 °C-90 d-3	75.16		6.37		3.76		a/b

Note: P_{ult} —indicates ultimate tensile capacity; D_{max} —indicates limit displacement; τ —indicates bond strength; a—indicates the CFRP layer failure; b—indicates the bond layer and steel interface stripping failure; c—indicates adhesive failure; ‘*/’*’or’*’/’*’/’*’—indicates two or more mixed failure modes.

图2展示了CFRP/钢双搭接试件的界面破坏情况.由图2可以观察到,4组试件的主要破坏模式均为a型.对于水浴0、30、60 d的试件组,不难发现在靠近CFRP板与钢板黏贴段前端(如图1所示坐标原点附近)的一小部分区域,由于应力集中导致了钢与黏结剂界面的脱黏破坏.值得注意的是,水浴90 d的试件组表现出了与其他组不同的破坏模式,即CFRP板碳纤维表层离破坏并伴随纵向撕裂的现象.经过分析,本文认为这是因为CFRP板层间强度低于Sika-30胶黏剂与CFRP板和钢板的之间界面强度,同时也低于Sika-30胶黏剂的内聚剪切强度.

2.2 荷载位移曲线

图3描绘了4组试件在加载过程中的荷载-位移曲线,其中位移代表固定端与加载端之间的相对位

移.从图3可以看出:水浴0 d组3个试件的荷载-位移曲线高度重合,显示出很好的一致性;随着水浴时间的增加,水浴30、60、90 d组中的试件荷载-位移曲线之间的偏差逐渐增大.这表明在高温水浴环境下,碳纤维板基体或黏结剂基体的性能离散性随水浴时间延长而增加.

对各组试件的平均极限荷载进行统计,结果分别为111.22(水浴0 d组)、129.78(水浴30 d组)、78.88(水浴60 d组)、71.84 kN(水浴90 d组).相较于水浴0 d组,水浴30 d组试件的极限荷载提升了17%,这可能是由于黏结剂的后固化作用增强了黏结强度.然而,随着水浴时间的进一步延长,水浴60、90 d组试件极的限荷载分别下降了29%和36%,显示出水浴对试件性能的负面影响.

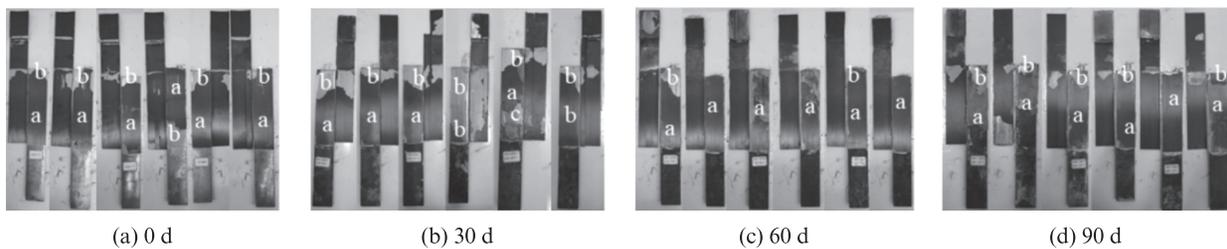


图2 CFRP/钢界面破坏模式
Fig. 2 Failure modes of CFRP/steel interface

在极限位移方面,4组试件的平均极限位移分别为7.48(水浴0 d组)、9.52(水浴30 d组)、7.21(水浴60 d组)、6.96 mm(水浴90 d组).与水浴0 d组相比,水浴30 d组试件的极限位移增加了27%,这可能与

黏结剂后固化导致的性能提升有关.然而,水浴60、90 d组试件的极限位移分别下降了4%和7%,表明长时间的水浴处理对试件的变形能力也产生了不利影响.

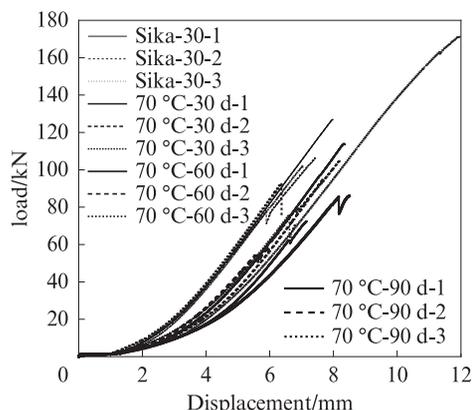


图3 加载过程中CFRP/钢双搭接试件荷载位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves for CFRP/steel double lap specimens during loading

综上所述,试件的极限荷载和极限位移随着水浴时间的增加呈现下降趋势,这可能与水分子对粘结剂和碳纤维板基体的侵蚀作用有关.尽管如此,在粘结剂后固化的影响下,水浴30 d组的试件在极限荷载和极限位移方面仍表现出一定程度的提升.

2.3 CFRP/钢黏结界面剪应力分布

根据相邻2个应变片*i*、*i-1*的正应变差值变化,算出*i*、*i-1*两点之间的界面剪应力^[20](应变片从原点

向固定端依次编号,*i*为正整数).

$$(\tau_{\text{average}})_{i,i-1} = \frac{\Delta \varepsilon_{i,i-1} E_p t_p}{\Delta l_{i,i-1}} = \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) E_p t_p}{l_i - l_{i-1}} \quad (1)$$

式中: $(\tau_{\text{average}})_{i,i-1}$ 为相邻2个测点*i*、*i-1*之间界面平均剪应力; $\Delta \varepsilon_{ij}$ 为两相邻测点正应变的差值,即 $\Delta \varepsilon_{i,i-1} = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}$; E_p 、 t_p 分别是CFRP板的弹性模量和厚度; $\Delta l_{i,i-1} = l_i - l_{i-1}$, 即为应变片*i*、*i-1*两点间距离.

图4为加载过程中CFRP/钢黏结界面剪应力分布情况.从图4可看出,在试件加载过程中,界面剪应力在坐标原点附近较大.在图4(a)~(c)中,距坐标原点23 mm处的剪应力随着荷载的增加先增加到一定的程度后急剧减小并反向增大.这是由于位于前端的黏层在应力增加过程中受损或达到了应力强度极限,导致CFRP板与钢板界面损伤或脱黏,并且前端黏层的顶托作用使CFRP板受反向作用力进而导致CFRP板上剪应力反向减小.在图4(a)~(c)中,随着荷载达到最后几级,长度方向分布的剪应力最大值逐渐向后转移并反超前端CFRP板的剪应力.这表明随着荷载的增大,前端剪应力达到或超过CFRP板与钢板结合层强度,剪应力向后传递.在图4(d),剪应力在前端最大,0~50 mm区间基本不变,而后呈指数型下降.

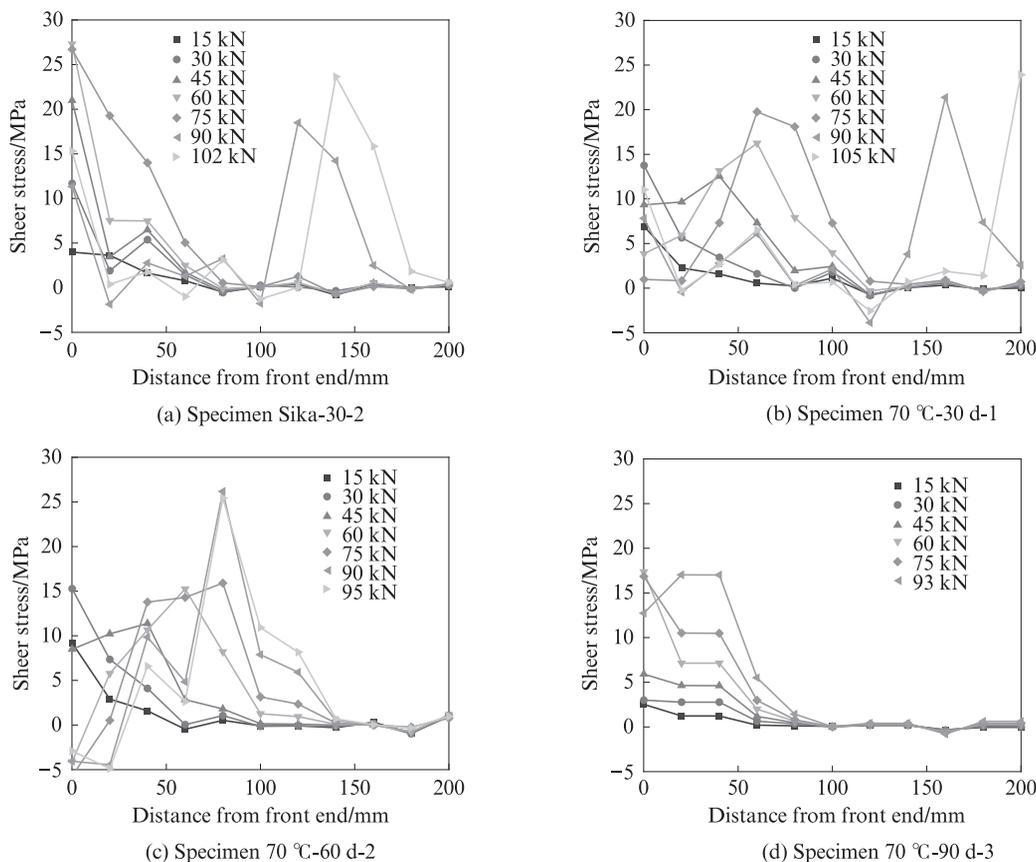


图4 加载过程中CFRP/钢黏结界面剪应力分布

Fig. 4 Shear stress distribution of CFRP/steel bonding interfaces during loading

2.4 CFRP/钢黏结滑移本构关系

黏结滑移本构(剪应力-滑移曲线)能够反应界面局部受力及黏结失效过程.考虑到CFRP板与钢板的刚度差,假定试件的前端CFRP板与钢板黏结部分的端部滑移量为零^[6].因此,从试件的前端到测点*i*对CFRP表面应变数值积分,可得出*i-1*与*i*之间的中点滑移量 $s_{i-1/2}$:

$$s_{i-1/2} = \frac{\epsilon_i + \epsilon_{i-1}}{4}(l_i - l_{i-1}) + \frac{\epsilon_{i-1} + \epsilon_{i-2}}{2}(l_{i-1} - l_{i-2}) + \sum_{i=3}^i \frac{\epsilon_{i-2} + \epsilon_{i-3}}{2}(l_{i-2} - l_{i-3}) \quad (2)$$

结合式(1)和式(2),可推导出不同荷载经历下各测点的界面剪应力与滑移之间的关系式(3).

$$S_{i-1/2} = E_p t_p \left(\frac{\Delta \epsilon_{i,i-1}^2}{4(\tau_{average})_{i,i-1}} + \frac{\Delta \epsilon_{i-1,i-2}^2}{2(\tau_{average})_{i-1,i-2}} + \sum_{i=3}^i \frac{\Delta \epsilon_{i-2,i-3}^2}{2(\tau_{average})_{i-2,i-3}} \right) \quad (3)$$

由图4可知,所测试试件均在离固定端40 mm处稳定,且该点经历了复合结构的整个损伤发展过程,画出该点加载历史的剪应力-滑移本构关系图(图5),对图中散点进行曲线拟合,相关系数均为0.97以

上,拟合度较好.对图5(a)~(d)各曲线进行对比分析,表明CFRP/钢黏结试件水浴时间不同,界面黏结滑移曲线也有差异.用双折线表示水浴0、30、60 d试件的界面黏结滑移曲线,采用一段抛物线加一段直线表示水浴90 d组试件的界面黏结滑移曲线.所有试件的黏结滑移曲线后段都出现明显的下降,提示界面劣化在加载后期相对缓慢.

峰值剪应力 τ_f 、刚度 K 、界面破坏能 G_f 及单元失效时极限滑移量 δ_f 常用于描述黏结滑移本构曲线^[6].刚度 K 反应了本构关系曲线的斜率;极限滑移量 δ_f 表示当峰值剪应力达到峰值 τ_f 时,材料发生失效的局部滑移量;界面破坏能 G_f 为 τ - s 曲线所包围的面积,通常利用微积分进行计算,也可以通过经验公式进行估算^[21]:

$$G_f' = 0.5\tau_f\delta_f \quad (4)$$

G_f 是通过积分计算得出的精确解; G_f' 是通过式(4)经验性地解出的值.表3列出了各组试件界面黏结滑移本构参数的测试和计算结果.计算结果显示不同试件组的本构参数存在明显的差异.水浴30 d试件组的 τ_f 和 G_f (G_f')值都远高于其他试件组,具体来

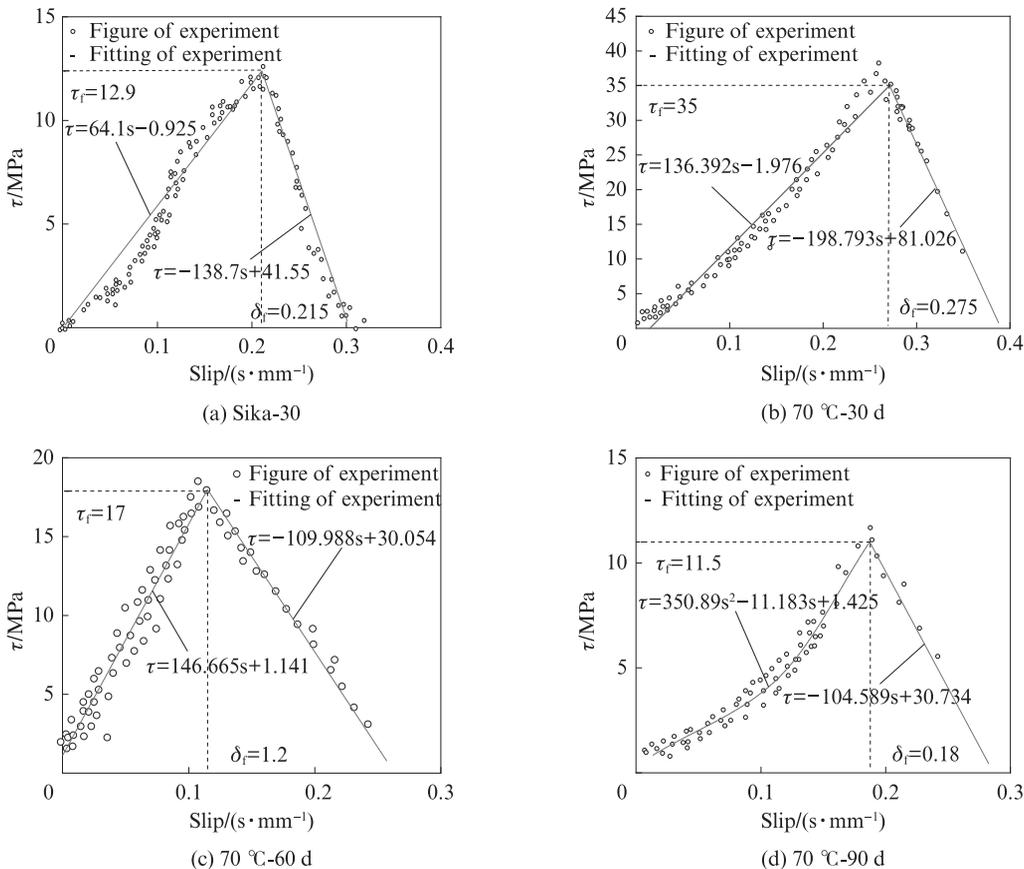


图5 CFRP/钢界面剪应力-滑移本构曲线

Fig. 5 Bond-slip constitutive curves for interfaces between CFRP and steel

表3 CFRP/钢界面黏结滑移本构参数的比较
Table 3 Comparison of the bond slip constitutive parameters of CFRP/ steel interface

Parameter	τ_i / MPa	δ_i / mm	K /(MPa· mm ⁻¹)	G_i /(MPa· mm)	G_i' /(MPa· mm)
25 °CSika30	12.9	0.215	64.100	1.935	1.387
70 °C-30 d	35.0	0.275	136.392	5.980	4.810
70 °C-60 d	17.0	0.120	146.665	2.210	1.020
70 °C-90 d	11.5	0.180	65.000	0.984	1.035

说,其 τ_i 值是其他试件组的2.05~3.04倍, G_i 值为2.36~5.3倍, G_i' 值为3.46~4.72倍。

2.5 CFRP/钢界面极限承载力模型

Xia等^[21]通过大量试验数据,提出了CFRP/钢双搭接试件极限抗剪承载力(P_{ult})计算模型。

$$P_{ult} = 2b_p \sqrt{2G_i E_p t_p} \quad (4)$$

表4 CFRP/钢界面极限承载力理论计算结果

Table 4 Theoretical calculation results of ultimate bearing capacity of CFRP/ steel interface

Specimen group	Test/kN	Xia model/kN	Xia model/Test	Xia model-A/kN	Xia model-A/Test
25 °CSika30	111.76	89.68	0.80	90.21	0.81
70 °C-30 d	129.78	146.58	1.13	148.04	1.15
70 °C-60 d	78.88	67.86	0.86	77.36	0.98
70 °C-90 d	71.84	68.34	0.95	77.92	1.08

如表4所示,由Xia模型和Xia-A模型计算的各组极限承载能力较接近,并且与实测数据的偏差在可接受的范围内,再次验证 G_i 取 $0.5\tau_i \delta_i$ 是可行的。

综上所述,CFRP/钢试件的界面退化程度会随水浴时间的延长而加剧,同时失效模式也会随之变化。具体来说,水浴初期(0~30 d),黏结剂的后固化和界面退化现象并存,但后固化作用更为显著,从而提升了试件的极限承载力。此时的界面失效主要是由于黏结剂强度以及碳纤维束之间的黏结力不足。进入水浴中期(30~60 d),界面退化进一步加剧,后固化作用减弱或提升效果远不及退化速度,CFRP/钢试件的界面退化程度较初期更为严重。随着水浴时间的延长,水分子逐渐渗透进CFRP板材中,导致碳纤维束之间的黏结剂强度也逐渐退化。在此阶段,碳纤维束黏结剂强度的不足成为导致CFRP/钢试件界面失效的主要因素。到了水浴后期(60~90 d),碳纤维束之间的黏结剂强度退化更为严重,而界面黏结剂的退化则趋于稳定。由于界面黏结剂的强度大于碳纤维束之间的黏结剂强度,因此碳纤维束之间的黏结力不足最终导致了CFRP/钢试件的界面失效。

其中, G_i 满足经验值(即 $G_i = 0.5\tau_i \delta_i$),故有:

$$P_{ult} = 2b_p \sqrt{\tau_i \delta_i E_p t_p} \quad (5)$$

式中: b_p 为CFRP板宽度。Xia等^[21]建议 $\tau_i = 0.8\tau_a$ (τ_a 为黏结剂的拉伸极限强度)。本文认为 τ_i 与 τ_a 之间的关系可能受CFRP/钢结构服役的环境影响,因此,在Xia模型的基础上, τ_i 和 G_i 取实测值;CFRP/钢试件的极限荷载受CFRP板与钢板刚度差的影响,故引入一个变量 β 将此模型进一步扩展为Xia-A,式(5)变形为式(6)。 β 为CFRP板与钢板刚度比,即 $t_p b_p E_p / 0.5t_s b_s E_s$, t_s 、 b_s 、 E_s 分别为钢板的厚度、宽度和弹性模量。

$$P_{ult} = 2b_p \sqrt{\tau_i \delta_i E_p t_p (1 + \beta)} \quad (6)$$

将Xia模型和Xia-A模型计算的各组极限承载力与实测极限承载力进行对比,结果如表4所示。

3 结论

(1)极端湿热环境的时长对CFRP/钢双搭接试件的破坏模式影响较小,但对其界面抗剪承载力影响较大。试件平均抗剪强度从大到小的依次为9.52、7.32、7.21、6.96 MPa,对应的试件分别为70 °C-30 d、25 °C sika30、70 °C-60 d和70 °C-90 d。

(2)在极端湿热环境下,CFRP/钢界面的黏结滑移本构关系随着水浴时间的延长而变化。水浴30 d试件组的峰值剪应力、极限滑移量、峰值剪应力对应的滑移量最大,并且随着水浴时间的增长,试件的峰值剪应力、极限滑移量有减小的趋势。

(3)在极端湿热环境下的CFRP/钢界面的抗剪承载力可采用Xia模型或Xia-A模型来计算。

参考文献:

- [1] 庄宁,夏浩瑜,董洪汉,等.海洋环境中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):1262-1268. ZHUANG Ning, XIA Haoyu, DONG Honghan, et al. Corrosion test of CFRP concrete filled steel tube composite pile foundation in Marine environment [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(12):1262-1268.(in Chinese)
- [2] BAI Y, NGUYEN T C, ZHAO X L, et al. Environment-assisted degradation of the bond between steel and carbon-fiber-reinforced

- polymer[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(9):4014054.
- [3] 何媛媛, 武丽, 董江峰, 等. CFRP加固对冻融再生混凝土短柱承载能力的影响[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(3):451-458.
HE Yuanyuan, WU Li, DONG Jiangfeng, et al. Effect of CFRP strengthening on load bearing capacity of freeze-thaw recycled concrete short columns [J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(3):451-458. (in Chinese)
- [4] 谢剑, 乔羽, 王启辰. 极地低温下CFRP筋与混凝土的黏结性能[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(3):533-537.
XIE Jian, QIAO Yu, WANG Qichen. Bonding behavior between of CFRP bar and concrete at polar temperature [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(3):533-537. (in Chinese)
- [5] 柯璐, 朱夫瑞, 李传习, 等. CFRP板-钢黏结界面的疲劳性能[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(3):266-274.
KE Lu, ZHU Furui, LI Chuanxi, et al. Fatigue properties of CFRP plate-steel bonding interface [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(3):266-274. (in Chinese)
- [6] 李传习, 柯璐, 陈卓异, 等. CFRP-钢界面粘胶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 and numerical simulation of CFRP steel interface bonding performance [J] *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(12):3534-3546. (in Chinese)
- [7] Al-MOSAWA A, Al-MAHAIDI R, ZHAO X. Effect of CFRP properties, on the bond characteristics between steel and CFRP laminate under quasi-static loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98:489-501.
- [8] AROUCHE M M, BUDHE S, ALVES L A, et al. Effect of moisture on the adhesion of CFRP-to-steel bonded joints using peel tests[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40:1-8.
- [9] KORTA J, MLYNIEC A, UHL T. Experimental and numerical study on the effect of humidity-temperature cycling on structural multi-material adhesive joints [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 79:621-630.
- [10] 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 properties of room temperature bonded CFRP plate/steel plate [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2):339-347. (in Chinese)
- [11] 朱德举, 姚明侠, 张怀安, 等. 动态拉伸荷载下温度对CFRP/钢板单搭接剪切接头力学性能的影响[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(8):28-35.
ZHU Deju, YAO Mingxia, ZHANG Huaian, et al. Effect of temperature on mechanical properties of CFRP/ Steel plate single lap shear joint under dynamic tensile load [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(8):28-35. (in Chinese)
- [12] HESHMATI M, HAGHANI R, AI-EMRANI M. Durability of bonded FRP-to-steel joints: Effects of moisture, de-icing salt solution, temperature and FRP type[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 119:153-167.
- [13] NGUYEN T C, BAI Y, ZHAO X L, et al. Durability of steel/CFRP double strap joints exposed to sea water, cyclic temperature and humidity[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(5):1834-1845.
- [14] GUO D, LIU Y L, GAO W Y, et al. Bond behavior of CFRP-to-steel bonded joints at different service temperatures: Experimental study and FE modeling [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 362:129836.
- [15] LI Y, MA X W, LI H Y, et al. Effect of moisture-heat coupling on mechanical behavior of nano-SiO₂ adhesives and CFRP-steel lap joints[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 183:110391.
- [16] DAWOOD M, RIZKALLA S. Environmental durability of a CFRP system for strengthening steel structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(9):1682-1689.
- [17] KE L, LI C X, LUO N H, et al. Enhanced comprehensive performance of bonding interface between CFRP and steel by a novel film adhesive [J]. *Composite Structures*, 2019, 229:111393.
- [18] ZHOU H, TORRES J P, FERNANDO D, et al. The bond behaviour of CFRP-to-steel bonded joints with varying bond properties at elevated temperatures[J]. *Engineering Structures*, 2019, 183:1121-1133.
- [19] 陈卓异, 彭彦泽, 李传习, 等. 高温下双搭接钢-CFRP板胶粘界面力学性能试验[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(2):449-460.
CHENG Zhuoyi, PENG Yanze, LI Chuanxi, et al. Experimental study on the mechanical properties of the adhesive interface of double lapped steel CFRP plate at high temperature [J] *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(2):449-460. (in Chinese)
- [20] HESHMATI M, HAGHANI R, AI-EMRANI M. Effects of moisture on the long-term performance of adhesively bonded FRP/steel joints used in bridges [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 92:447-462.
- [21] XIA S H, TENG J. Behaviour of FRP-to-steel bonded joints [C]// *International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*. Hong Kong: Hong Kong University Press, 2005: 411-418.