

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.04.068

CFRP 板/钢界面黏结性能水浴试验研究

王恺¹, 罗南海²

(1. 现代投资股份有限公司, 湖南 长沙 410004; 2. 株洲市城市建设发展集团有限公司)

摘要:针对很多受损钢结构经常处于高温高湿的环境中,采用一种新型高强度胶黏剂—环氧载体胶膜,利用水浴试验对 CFRP 板/钢界面在高温高湿耐久性能展开了研究,制作了 9 个 CFRP 板/钢双搭接接头试件。试验结果表明:不水浴与 25 ℃水浴 20 d 试件的破坏模式均为 CFRP 板层离,70 ℃水浴 20 d 试件的破坏模式为钢/胶层界面剥离和 CFRP 板层离的混合破坏;25 ℃水浴 20 d 试件与不水浴试件极限承载力几乎相同,而 70 ℃水浴 20 d 试件相对 25 ℃水浴 20 d 试件其极限承载力只下降了 15.3%,降低幅度并不大,此胶膜形成的黏结界面耐久性能良好;在加载后期,与不水浴试件不同的是,水浴试件 CFRP 板表面峰值应变与界面峰值剪应力有进一步向 CFRP 板端传递的过程。

关键词:水浴试验;耐久性能;胶膜;CFRP 板;双搭接接头

近年来,碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,CFRP)因具有比强度高、比模量大、耐久性能好等优点,被广泛应用于结构加固领域。在南方,很多受损的钢结构经常处于高温高湿的环境中,采用环氧胶黏剂将 CFRP 材料补片粘贴到钢板表面加固钢结构时,必须考虑环境因素对 CFRP/钢界面性能的影响。该文采用一种新型高强度胶黏剂—环氧载体胶膜,其玻璃转化温度(T_g)为 69.5 ℃,远大于结构加固中几种常用胶黏剂的玻璃转化温度(Araldite 420、Sika 30 胶黏剂的 T_g 分别为 41.7、49.5 ℃),能够使用处于更高环境温度的受损钢结构中。此胶膜的耐高温性能虽好,但在温度和湿度同时作用下 CFRP

与钢之间界面耐久性能仍需进一步研究。
该文通过水浴试验研究在一定温度和水浴天数下 CFRP 板/钢界面黏结性能的变化规律,利用准静态拉伸试验方法得出各试件的极限承载力、界面破坏模式、CFRP 板表面应变分布、界面剪应力分布等。

1 试验

1.1 试验材料

试验采用某环氧载体胶膜以及拉挤成型 CFRP 单向板,钢板采用桥梁结构钢 Q345qD。胶膜、CFRP 板及钢板材料参数见表 1。图 1 为该胶膜的照片。

表 1 胶膜、CFRP 板及钢板材料参数

材料	厚度/ mm	宽度/ mm	拉伸强 度/MPa	弹性模 量/GPa	断裂延伸 率/%	钢—钢接头的 剪切强度/MPa
胶膜	0.3	—	—	1.78	—	33.3
CFRP 板	1.4	50	2 263	161.20	1.65	—
钢板	12.0	50	514	206.00	—	—

1.2 试件设计与制备

CFRP 板/钢双搭接接头的试件设计参考美国标准 ASTM D3528—96(2008)及相关研究,水浴试验方法参考国家军用标准 GJB 3383—1998《胶接耐久性试验方法》,试验分为 3 组:第一组为不水浴试件;第二组为 25 ℃水浴 20 d 试件;第三组为 70 ℃水浴 20 d 试

件,每组试件各 3 个,共 9 个试件,试件参数详见表 2。试件的形式、尺寸及 CFRP 板表面应变片布置如图 2 所示。应变片从接头 CFRP 板端(以下简称 CFRP 板端)到接头钢板端(以下简称钢板端)依次编号为 1~7,其位置以钢板端为原点、以指向 CFRP 板端为 x 轴正向。钢板表面处理采用机械打磨,打磨程度至表面



图 1 胶膜照片

露出金属光泽即可,CFRP 板的黏结面用砂纸轻轻打磨以去除表面树脂基体,所有CFRP板与钢板表面均

用丙酮擦拭干净。制作时先将裁剪好的胶膜贴于待粘钢板上,然后在其上粘贴 CFRP 板,再用橡胶滚轮在试件上均匀滚压以使胶膜与 CFRP 板和钢板充分接触,两面粘贴完毕后,将试件移入恒温箱,在试件上施加约为 0.05 MPa 的压应力,然后在 90 ℃高温下固化 2 h。将固化完后的试件一组放置在 25 ℃常温环境中,一组放入 25 ℃水温的水浴箱中水浴 20 d,第 3 组放入 70 ℃水温的水浴箱中水浴 20 d。

表 2 水浴试验的试件参数与试验结果

试件编号	极限荷载/kN	平均值/ kN	极限位移/mm	平均值/ mm	剪切强度/MPa	平均值/ MPa	破坏模式
JM-25 ℃-0 d-1	148.30		2.77		18.54		a
JM-25 ℃-0 d-2	156.40	150.97	2.72	2.65	19.55	18.87	a
JM-25 ℃-0 d-3	148.20		2.47		18.53		a
JM-25 ℃-20 d-1	155.75		3.36		19.47		a
JM-25 ℃-20 d-2	139.60	149.03	3.00	3.18	17.45	18.63	a
JM-25 ℃-20 d-3	151.73		3.17		18.97		a
JM-70 ℃-20 d-1	116.88		2.37		14.61		a/b
JM-70 ℃-20 d-2	133.69	126.21	2.87	2.67	16.71	15.78	a/b
JM-70 ℃-20 d-3	128.05		2.76		16.01		a/b

注:a 表示 CFRP 层离破坏,b 表示钢/胶层界面剥离破坏。

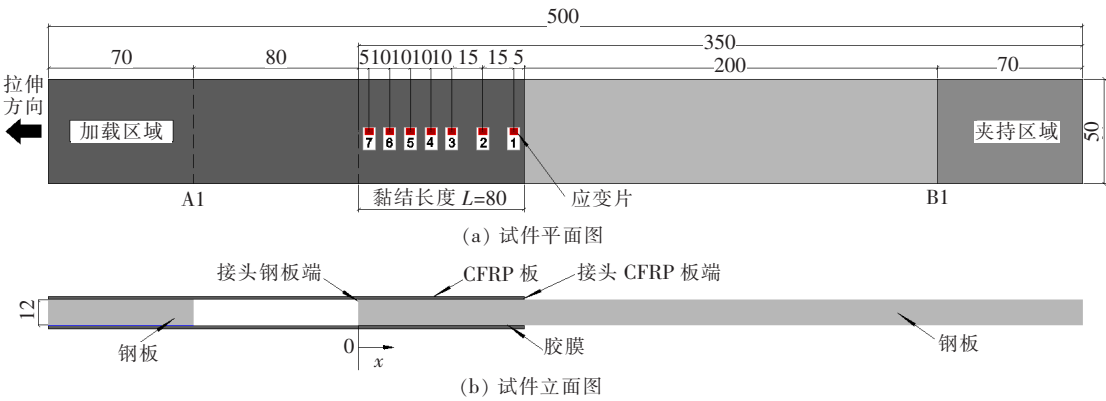


图 2 CFRP 板/钢双搭接试件形式、尺寸及应变片布置示意图(单位:mm)

1.3 试验方法

试验在 30 t 微机控制电子万能试验机上进行,试验开始前先进行严格对中,采用位移加载控制,加载速率为 0.4 mm/min,试验在常温 25 ℃左右环境中进行。加载过程中采用 JH7281 多功能静态应变测试系统采集应变数据,采集频率为 0.5 Hz。

2 试验结果与分析

2.1 破坏模式

图 3 为 3 组试件的破坏模式照片。由图 3 可知:没有经过水浴的试件其破坏模式都为 CFRP 板层离;当水浴温度为 25 ℃时,试件的破坏模式大都为 CFRP

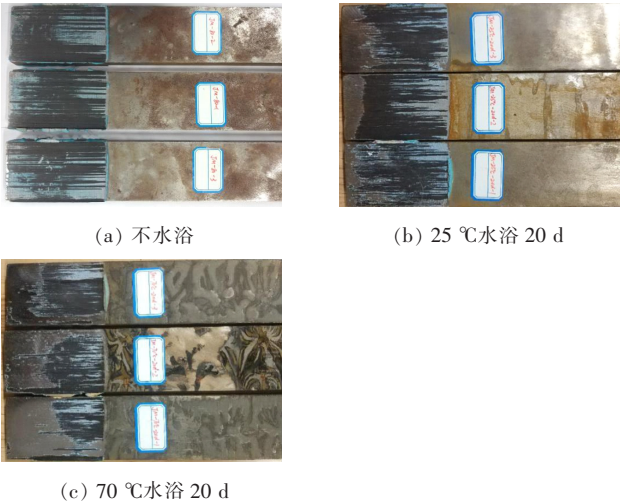


图3 试件破坏后的照片

板层离,只在钢板端部有少量的钢/胶层界面剥离;而水浴温度为70 °C时,试件出现了钢/胶层界面剥离和CFRP板层离的混合破坏模式,分析认为,在较高水温的环境中水浴20 d时,钢板与胶层的黏结强度有所下降,从而出现了大面积的钢/胶层界面破坏。

2.2 荷载位移曲线

图4为3组试件在加载过程中的荷载—位移曲线。

从图4可以看出:每一组中3个试件荷载—位移曲线的斜率基本相同,说明试件的拉伸刚度几乎一样。在加载前中期,荷载与位移几乎呈线性关系,在加载后期,由于界面出现了剥离,试件刚度下降,曲线斜率略有降低。有部分试件在加载后期出现了局部CFRP板剥离的现象,导致荷载瞬时下降。不水浴时,黏结长度为80 mm试件的平均极限荷载为150.97 kN,25 °C水浴20 d试件的平均极限荷载为149.03 kN。

图5为不水浴试件与25 °C水浴20 d试件极限荷载之间的关系。

由图5可知:两种情况下试件的极限荷载非常接近,说明在25 °C的水温下,水浴20 d对试件的极限承载力并没有影响,CFRP板与钢的黏结强度没有降低。由表2可知:70 °C水浴20 d试件的平均极限荷载为126.21 kN。图6为25 °C水浴试件与70 °C水浴试件极限荷载之间的关系,由图6可以看出:70 °C水浴试件的极限荷载相对25 °C水浴有所下降,平均极限荷载下降了15.3%,说明水温达到胶膜玻璃转化温度时,在一定的养护天数下,CFRP板与钢的黏结强度有所下降,但降低幅度不大。

2.3 应变分布

图7为3组试件中代表性试件的CFRP板表面应变分布。

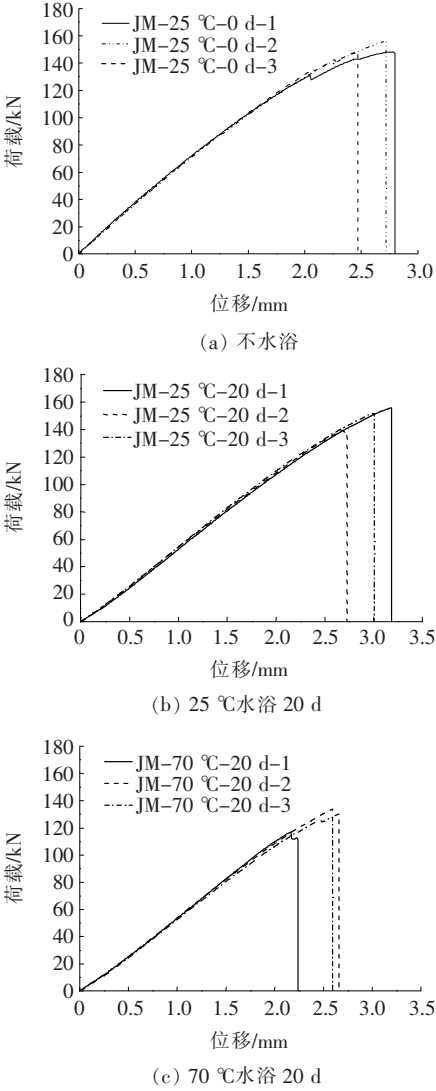


图4 试件加载过程中荷载—位移曲线

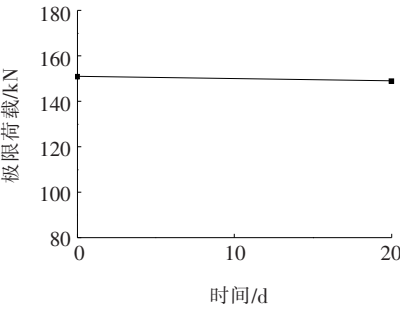


图5 不水浴与25 °C水浴20 d极限荷载变化

在加载前期,只有靠近钢板端的CFRP板产生应变,随着加载的进行,应变大致呈指数形式分布,峰值应变始终在钢板端处;在加载后期,不水浴试件CFRP

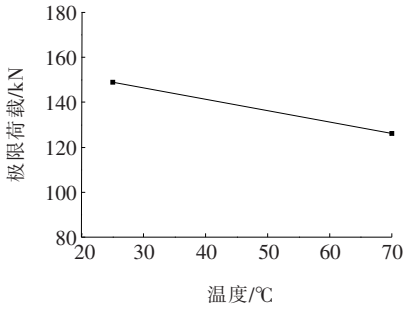
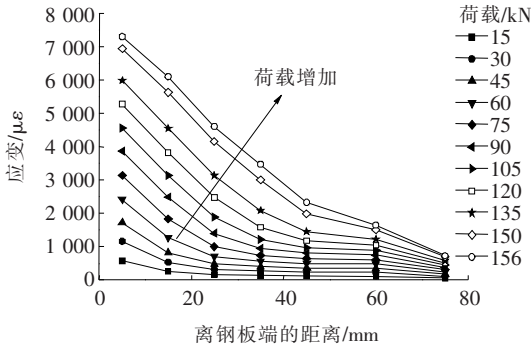
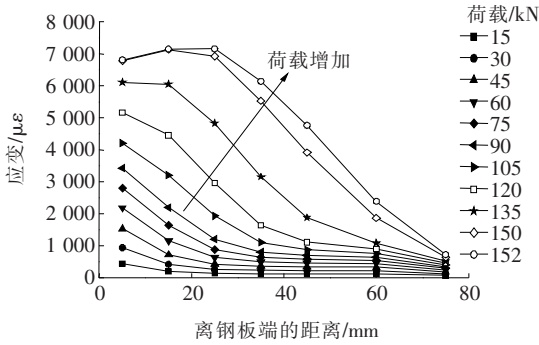


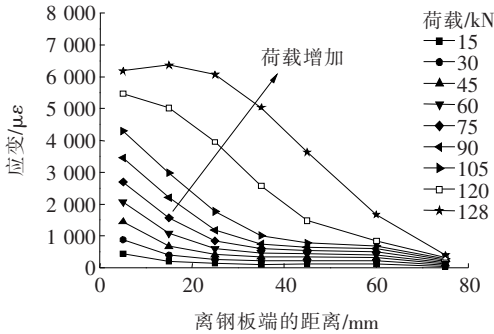
图 6 25 °C 水浴与 70 °C 水浴极限荷载变化



(a) 不水浴



(b) 25 °C 水浴 20 d



(c) 70 °C 水浴 20 d

图 7 试件加载过程中 CFRP 板表面应变分布

板表面应变依然呈指数形式分布，而水浴试件钢板端的应变达到一定值后不再增加，峰值应变逐渐向 CFRP 板端转移，整个黏结长度上的 CFRP 板都参与了受力。不水浴试件的 CFRP 板表面极限应变为

7 300 $\mu\epsilon$ ，25 °C 水浴 20 d 试件的 CFRP 板表面极限应变为 7 160 $\mu\epsilon$ ，而 70 °C 水浴 20 d 试件的 CFRP 板表面极限应变为 6 364 $\mu\epsilon$ ，比 25 °C 水浴试件要小，这主要是由于 70 °C 水浴试件的极限荷载较小。与不水浴试件 CFRP 板表面应变分布不同的是，水浴试件 CFRP 板表面峰值应变在后期有一个向 CFRP 板端传递的过程，从试件的破坏模式来看，这是因为水浴试件在钢板端附近出现了钢/胶层界面破坏的情况，使得 CFRP 板与钢产生了剥离，从而峰值应变会进一步向后传递。

2.4 剪应力分布

界面剪应力分布能够反映 CFRP/钢界面应力沿黏结长度的传递规律，揭示界面剥离失效的过程。通过布置在 CFRP 板表面的应变片可求得相邻测点 i 和测点 $i-1$ 间的界面平均剪应力：

$$(\tau_{\text{avg}})_i = \frac{\Delta\epsilon_i E_p t_p}{\Delta l_i} = \frac{(\epsilon_i - \epsilon_{i-1}) E_p t_p}{l_i - l_{i-1}} \quad (1)$$

式中： ϵ_i 为 CFRP 板表面测点 i 处的应变； $\Delta\epsilon_i$ 为测点 i 与测点 $i-1$ 处应变的差值； E_p 、 t_p 分别为 CFRP 板的弹性模量、厚度； l_i 为测点 i 距 CFRP 板端的距离； Δl_i 为测点 i 与测点 $i-1$ 之间的距离。

图 8 为 3 组试件中代表性试件在加载过程中 CFRP 板/钢界面的剪应力分布。

从图 8 可以看出：在加载前中期，剪应力最大值始终位于钢板端；加载后期，对于不水浴试件，当钢板端处剪应力达到峰值时有下降的趋势，但试件在此时突然破坏，峰值剪应力还来不及向后传递；对于水浴试件，当钢板端剪应力达到胶膜与钢板和 CFRP 板的黏结强度时，CFRP 板/钢界面出现剥离，此时剪应力迅速下降到零，但剩余黏结长度部分仍能继续承载，峰值剪应力进一步向 CFRP 板端转移，剥离也进一步向后发展，直到试件破坏。25 °C 水浴与 70 °C 水浴试件 CFRP 板/钢界面剪应力分布规律基本一致，不同的是，25 °C 水浴试件界面峰值剪应力略偏高一些，这可能是由于在 70 °C 水浴环境中，胶膜与钢板和 CFRP 板的黏结强度有所降低。

3 结论

(1) 不水浴与 25 °C 水浴 20 d 试件的破坏模式均为 CFRP 板层离，70 °C 水浴 20 d 试件的破坏模式为钢/胶层界面剥离和 CFRP 板层离的混合破坏。

(2) 25 °C 水浴 20 d 试件与不水浴试件极限承载力几乎相同，而 70 °C 水浴 20 d 试件相对 25 °C 水浴 20 d

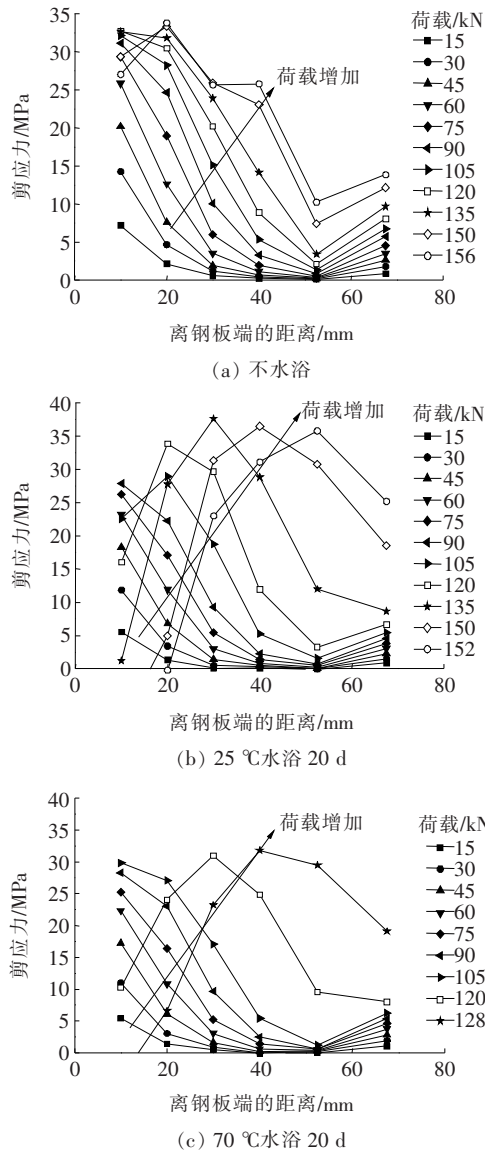


图8 试件加载过程中CFRP板/钢界面剪应力分布

试件其极限承载力下降了15.3%,但下降的幅度并不大,这说明在一定温度范围内此胶膜形成的黏结界面具备良好的耐久性能。

(3) 在加载后期,与不水浴试件不同的是,水浴试件CFRP板表面峰值应变与界面峰值剪应力有进一步向CFRP板端传递的过程。

参考文献:

[1] 彭福明,郝际平,岳清瑞,等.碳纤维增强复合材料(CFRP)加固修复损伤钢结构[J].工业建筑,2003(9).

[2] 黄侨,万世成,关键,等.装配式预应力CFRP板锚具有限元分析与施工技术[J].中外公路,2019(2).

[3] Al-Mosawe 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.

[4] 王吉忠,杨俊龙,崔文佳.盐溶液干湿循环对CFRP-混凝土界面粘结性能的影响[J].复合材料学报,2018(8).

[5] 潘勇,夏叶飞,张红雷,等.预应力CFRP板在公路桥梁加固中的应用[J].中外公路,2017(2).

[6] 李传习,杨宁,张玉平,等.杭州江东大桥钢箱梁的日照温度梯度及顶推过程中末段梁的变形[J].交通科学与工程,2009(1).

[7] 施慕桓. FRP单搭接和FRP加固钢结构粘结性能的耐久性试验研究[D].大连理工大学硕士学位论文,2008.

[8] 吴健,张彤彤,李泓运,等.基于海洋环境的CFRP加固含裂纹钢板拉伸性能试验研究[J].中国造船,2017(3).

[9] Al-Shawaf A, Al-Mahaidi R, Zhao X L. Effect of Elevated Temperature on Bond Behaviour of High Modulus CFRP/Steel Double-Strap Joints[J]. Australian Journal of Structural Engineering, 2009, 10(1): 63-74.

[10] Zhou H, Manuel Urgel J, Emberley R, et al. Behaviour of the FRP-to-Steel Bonded Joints under Elevated Temperature[C]. The Sixth Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, 2017: 1-6.

[11] Nguyen T, Bai Y, Zhao X, et al. Mechanical Characterization of Steel/CFRP Double Strap Joints at Elevated Temperatures[J]. Composite Structures, 2011, 93(6): 1604-1612.

[12] ASTM S D. Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2008.

[13] GJB 3383-1998 胶接耐久性试验方法[S].