

文章编号:1671-4229(2023)02-0001-09

湿热环境及荷载作用下 CFRP 加固 钢结构耐久性研究进展

李俊辉^{1,2}, 费忠宇¹, 刘宗超¹, 邓 军^{1*}

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 佛山科学技术学院 交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528225)

摘要: 碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)粘贴加固技术能显著改善受损钢结构的静力和疲劳性能,但环境暴露和荷载作用会导致加固结构的性能退化,影响加固结构的长期耐久性。文章总结了国内外近期 CFRP 加固钢结构的耐久性研究成果,关注湿热环境、荷载,以及二者耦合作用对加固结构力学性能的影响规律,介绍了相应的界面损伤机制,并探讨了 CFRP 加固钢结构未来的研究需求。

关键词: 钢结构加固; CFRP; 疲劳荷载; 湿热环境; 耐久性

中图分类号: U 441.2 文献标志码: A

Review on durability of CFRP-strengthened steel structures under hygrothermal and loading conditions

LI Jun-hui^{1,2}, FEI Zhong-yu¹, LIU Zong-chao¹, DENG Jun^{1*}

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. School of Transportation, Civil Engineering & Architecture, Foshan University, Foshan 528225, China)

Abstract: Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) strengthening technology can significantly improve the static and fatigue performances of damaged steel structures. However, the mechanical behaviour and long-term durability of strengthened steel structures may deteriorate due to the harsh environments and the loading conditions. This paper reviews the current state of research regarding the durability of steel structures strengthened by CFRP, with a particular emphasis on the impact of the hygrothermal environment, loading, and their coupling effect on the mechanical properties of steel structures strengthened by CFRP. Besides, interface damage mechanisms are introduced and lastly the future research needs are discussed.

Key words: steel structure strengthening; CFRP; fatigue loading; hygrothermal environment; durability

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer)具有强度高、自重轻、耐腐蚀性好、抗疲劳性好和施工方便等优点,在钢结构加固领域逐渐得

到重视^[1-4],并取得了一些工程实际应用^[5-6]。研究表明,外贴 CFRP 加固修复钢结构能够显著提升承载力和疲劳性能^[4,7-9],尤其是采用预应力

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178278, 51778151, 52208309)

作者简介: 李俊辉(1993—),男,博士. E-mail:lijunhui@gzhu.edu.cn

*通信作者. E-mail:dengjun@gzhu.edu.cn

引文格式: 李俊辉, 费忠宇, 刘宗超, 等. 湿热环境及荷载作用下 CFRP 加固钢结构耐久性研究进展[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(2): 1-9.

CFRP 加固技术,能更有效地抑制裂纹开展,提高结构刚度,充分发挥 CFRP 材料强度等^[10-12]。同时,国内外学者也给出了 CFRP 加固钢结构的疲劳设计方法^[6, 13]。

尽管 CFRP 具有良好的耐久性能,但钢结构加固工程中使用的粘结胶通常都为环氧树脂,环氧树脂对温度及湿度都较为敏感^[14-16]。研究结果表明,恶劣环境(如高温^[17-19]、湿热环境^[20-22]、冻融循环^[23-25]和海洋环境^[26-29]等)暴露下会使得粘结胶的力学性能下降,进而导致界面粘贴强度下降。如果荷载和环境因素共同作用,加固结构的力学性能退化将进一步加剧^[30]。此外,还需要考虑环境和荷载耦合作用的钢结构加固设计方法的进一步完善。

在实际加固工程中,考虑到我国南方湿热地区,温度和湿度的交替变化,将导致粘结胶性能的退化以及粘结界面结合力的减弱。同时,车辆超载疲劳作用将进一步加剧粘结界面的损伤。本文重点关注湿热环境、荷载,以及二者耦合作用对 CFRP 加固钢结构力学性能的影响规律,介绍了相应的界面损伤机制,通过相关文献综述,探讨了未来的研究需求。

1 CFRP 加固钢结构耐久性影响因素

由于钢结构基体强度较大,CFRP 加固钢结构的破坏模式主要有:①CFRP 断裂;②CFRP 层间剪切破坏;③CFRP 与粘结胶界面破坏;④粘结胶内聚破坏;⑤粘结胶与钢界面破坏^[1]。因此,CFRP 加固钢结构环境耐久性主要取决于加固材料、粘结胶和粘结界面。CFRP 材料具有良好的耐久性,

但粘结界面通常为环氧树脂,其对温度及湿度都较为敏感^[14-16]。本文结合国内外研究现状总结了影响 CFRP 加固钢结构耐久性的因素,如图 1 所示。研究表明,湿热环境对 CFRP 加固钢构件的力学性能影响最为明显^[20-21]。此外,钢结构在应用过程中会经受各类不同的荷载,包括结构自重、反复荷载等^[31],不同的荷载类型均会对加固结构的长期性能产生影响,尤其是荷载和恶劣环境耦合作用对加固构件耐久性影响更大。因此,本文将详细讨论湿热环境及其与荷载耦合作用对 CFRP 加固钢结构耐久性的影响。

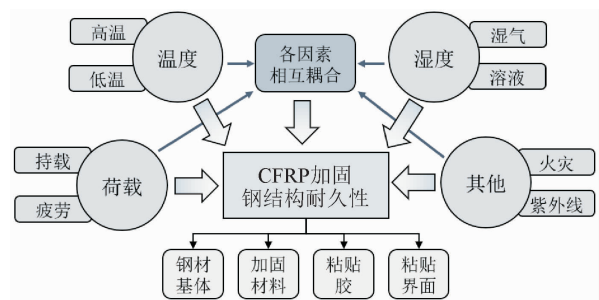


图 1 CFRP 加固钢结构耐久性主要影响因素

Fig. 1 Influence factors of durability of CFRP repaired steel structures

2 湿热环境的影响

CFRP 加固的钢构件不可避免地会接触到湿气,甚至还会接触到除冰、盐、水等其他溶液^[32]。目前,湿热环境对 CFRP 加固钢结构力学性能影响的代表性研究如表 1 所示。采用的试件形式主要有 CFRP/钢单搭接试件和双搭接试件,暴露环境包括不同温度下的湿气、蒸馏水及盐水等。

表 1 恶劣环境暴露下 CFRP 加固钢结构的研究

Table 1 Study of CFRP/steel system under harsh environments

参考文献	试件形式	环境工况
Heshmati, et al. ^[21]	CFRP/钢双搭接试件	浸泡在 45 °C 的蒸馏水
Agarwal, et al. ^[33]	CFRP/钢单搭接试件	①湿热循环(10 °C ~ 50 °C);②10 °C 到 40 °C 之间的湿热循环
Nguyen, et al. ^[34]	CFRP/钢双搭接试件	①在 20 °C 到 50 °C 的模拟海水中暴露 1 年;②恒温高湿;③变温高湿环境暴露 1 000 h
Dawood, et al. ^[35]	CFRP/钢双搭接试件	38 °C 的 NaCl 溶液(5%) 干湿循环至 6 个月
Heshmati, et al. ^[36]	CFRP/钢双搭接试件	①浸泡在 20 °C 和 45 °C 的蒸馏水;②浸泡在 20 °C 和 45 °C 的盐溶液;③在相对湿度为 95%, 温度为 45 °C 的湿气环境中暴露 3 年
Agarwal, et al. ^[23]	CFRP/钢单搭接试件	冻融循环(在 38 °C 下解冻 8 h, 在 -18 °C 下冷冻 16 h)

Nguyen 等^[34]将 CFRP/钢搭接试件在模拟海水(5% NaCl 溶液)中暴露 1 年,模拟海水温度分别为 20 °C 和 50 °C。在分别暴露 2 个月、4 个月、6 个月、9 个月和 12 个月,测量试件的残余刚度和强度。图 2 比较了各试件的刚度和强度退化规

律,结果表明,试件的刚度和强度退化主要发生在暴露的最初 2~4 个月,随后逐渐趋于稳定。尽管试件刚度退化趋势与强度相似,但刚度退化速度更高。此外,模拟海水温度越高,试件的刚度和强度退化越快,特别是在最初阶段。

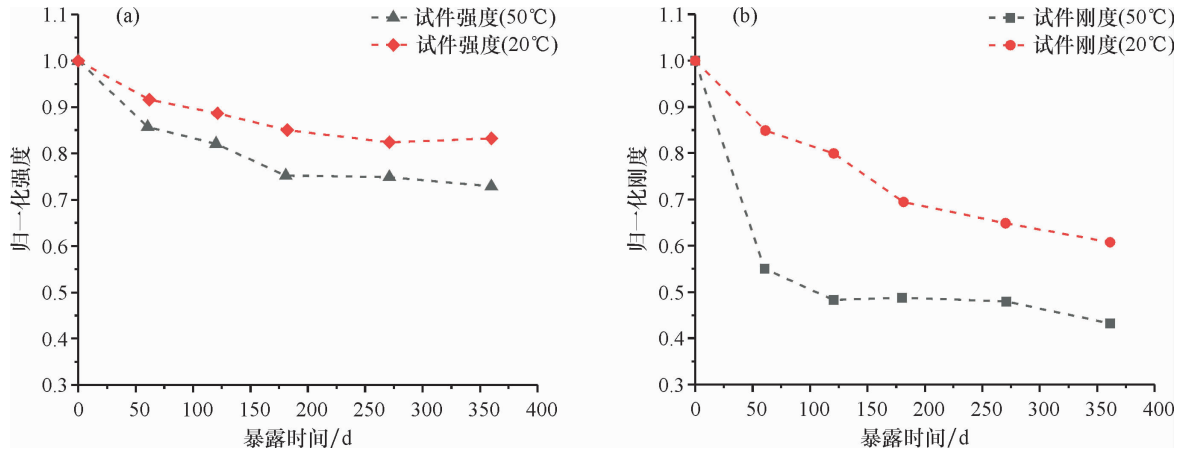


图 2 不同温度模拟海水下试件的强度和刚度变化

Fig. 2 Strength and stiffness of specimens under simulated sea water with different temperatures

Nguyen 等^[37]还将 CFRP/钢搭接试件暴露于 ①恒温恒湿(50 °C 与 90% 的相对湿度)1 000 h;②从变温(20 °C 到 50 °C)恒湿(90% 的相对湿度)250 次和 500 次循环(分别相当于 500 h 和 1 000 h)。通过拉伸试验测得试件的残余刚度和强度,

如图 3 所示。两种情况下的试件在 1 000 h 的环境暴露后,强度和刚度的退化都小于 10%。但 50 °C 的恒温和 90% 的相对湿度的组合会引起更明显的退化,特别是在暴露的早期阶段。

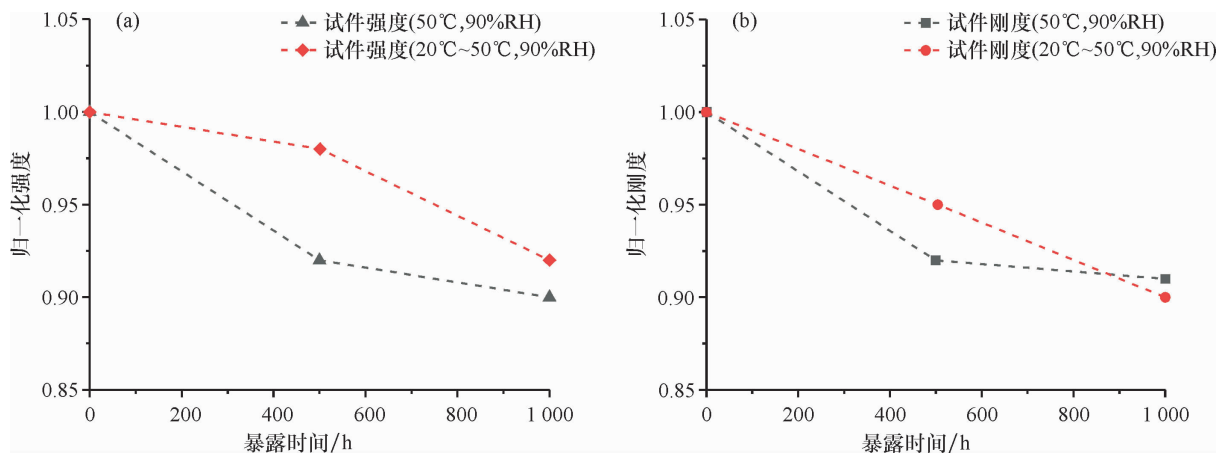


图 3 搭接试件的归一化强度和刚度

Fig. 3 Normalized strength and stiffness of specimens

相对于溶液浸泡或湿气暴露,干湿循环工况更符合真实环境。Dawood 等^[35]将 CFRP 钢板双搭接试件在浓度为 5% 的 NaCl 溶液中进行干湿循环暴露。试验结果表明,环境老化使得部分试件在 6 个月后的粘贴强度下降了 60%, 粘贴强度的

降低可能主要是由于钢和 CFRP 之间界面的退化。此外,试验还发现硅烷底涂剂能显著提高试件耐久性能,玻璃纤维有助于提高试件的初始粘贴强度,但不能提高粘结耐久性,二者结合使用则能显著增加试件的整体粘贴强度与环境耐久性。

此外, Yu 等^[38]对 CFRP 加固钢板试件进行了高盐、高湿环境暴露试验, 试验结果同样表明, 湿热环境对试件的力学性能影响明显, 表面处理是预防试件力学性能退化的关键。Li 等^[27]对 CFRP 加固钢板在干湿循环作用下的耐久性进行试验, 发现干湿循环会降低试件的屈服强度和极限强度, 但是几乎不影响试件的刚度。

Heshmati 等^[21, 24, 36]也考虑了不同温度下的水泡环境、盐溶液环境、干湿循环及冻融循环等因素对 CFRP-钢搭接试件的影响, 结果表明, 搭接试件强度受盐溶液干湿循环环境影响最明显, 搭接试件的强度下降了 47%, 而试件强度受冻融循环影响不大。Li 等^[27]对 CFRP 加固钢板在干湿循环腐蚀条件下的耐久性做了研究, 发现随着干湿循环次数的增加, 加固试件的屈服强度和极限强度明显下降, 但是加固前后的刚度随着干湿循环次数的变化不明显。

3 湿热环境与荷载作用的影响

在实际加固工程中, 经过加固的结构始终面临荷载和恶劣环境的共同影响, 荷载和恶劣环境耦合会加速加固结构的老化进程。研究表明, 疲劳不会导致 CFRP 的材料软化^[39]。然而, 循环加载和持续加载都将加剧表面缺陷, 并且随着疲劳循环的增加, 界面脱粘也会逐渐增加^[40]。一般来说, 由韧性基体组成的复合材料, 由于纵向开裂的趋势较低, 往往具有较高的疲劳强度和寿命^[41]。但是荷载作用会导致粘结界面的较高应力状态, 有可能产生微裂纹导致侵蚀介质能更快地渗透到结合层中, 这将进一步加剧加固结构界面性能退化^[30]。表 2 总结了考虑环境和荷载两个因素下 CFRP 加固钢结构的相关研究。

表 2 恶劣环境和荷载共同作用下 CFRP 加固钢结构的研究
Table 2 Study of CFRP/steel system subjected to harsh environment and load

参考文献	试件形式	环境工况	荷载情况
Borrie, et al. ^[42]	CFRP/钢双搭接试件	在 3 种不同的温度(20 °C、40 °C 和 50 °C)下的 NaCl 溶液暴露至 6 个月	荷载峰值:0.2 倍和 0.5 倍承载力 疲劳次数:1 次和 600 万次
Wu, et al. ^[43]	CFRP/钢双搭接试件	无	荷载峰值:0.21 到 0.62 倍承载力。 疲劳次数:0.05 次到 1 000 万次
Yu, et al. ^[38]	CFRP/钢双搭接试件	养护阶段进行盐雾和高湿环境暴露	疲劳加载 200 万次和 600 万次
Agarwal, et al. ^[33]	CFRP/钢单搭接试件	10 °C ~ 50 °C 冷热循环暴露	持载:持载数值为试件极限荷载的 30% ~ 50%
Nguyen, et al. ^[34, 37]	CFRP/钢双搭接试件	在 20 °C ~ 50 °C 循环温度与 50 °C 恒温的 NaCl 溶液分别暴露 500 h、1 000 h	静力荷载, 加载至试件破坏
Nguyen, et al. ^[44]	CFRP/钢双搭接试件	暴露在 20 °C ~ 50 °C 之间的 1 h 温度循环和恒定的 90% RH	持载:分别为无暴露试件限负荷的 0% (无负荷)、15%、25% 和 35%
Dawood, et al. ^[35]	CFRP/钢双搭接试件	在 38 °C 下的 NaCl 溶液分别暴露 1 ~ 6 个月	静力荷载, 加载至试件破坏
Wang, et al. ^[28]	CFRP/钢双搭接试件	NaCl 溶液干湿循环 0 d、90 d、180 d	疲劳损伤 300 次(0.1 ~ 0.7 倍极限荷载)
Li, et al. ^[27]	CFRP 加固缺陷钢梁	NaCl 溶液干湿循环 0 d、90 d、180 d	疲劳损伤 400 次(0.1 ~ 0.5 倍界面剥离荷载)
Li, et al. ^[45]	预应力 CFRP 加固缺陷钢梁	NaCl 溶液干湿循环 0 d、90 d	疲劳损伤 400 次(0.1 ~ 0.5 倍界面剥离荷载)

原加固结构的恒载占整个结构荷载的比例很高。试验中常采用持载的方式来研究恒载对加固结构力学性能的影响。Agarwal 等^[33]对 CFRP/钢

搭接试件施加了极限荷载 30% 和 50% 的持载。结果表明, 持载 21 天并没有导致试件承载力的明显下降。然而, 当持载与温度循环(10 °C ~ 50 °C)

结合在一起时,所有试件都在 108 次温度循环之前发生了破坏。必须注意的是,暴露温度仍然低于粘贴胶的玻璃转化温度 $T_g(62\text{ }^\circ\text{C})$ 。

Nguyen 等^[34, 37]也研究了持载和环境共同作用对 CFRP/钢搭接试件的影响。当环境温度低于粘结胶的玻璃转化温度时,即使持载水平达到极限荷载的 80%,试件的承载能力变化几乎不变;但是当环境温度高于粘结胶的玻璃转化温度时,试件即使承受较小的荷载(对照试件 20% 的承载力)也会发生剥离破坏。因此,尽管持续负荷很高,但是如果温度保持在玻璃转化温度以下,CFRP 与钢之间的粘结性能不会受到影响。

后续 Nguyen 等^[44]对不同养护环境下(120 °C 的高温养护和 23 °C 的常温养护)CFRP/钢搭接试件在温度、持载和湿度 3 个因素作用下的力学性能退化规律进行研究。将试件在持载状态下,同时暴露在 20 °C ~ 50 °C、湿度为 90% 的变温循环中,试件失效时间如图 4 所示。结果发现,对于持载水平仅为 15% 的极限强度的常温养护试件,仅仅在环境暴露 2 h 后就发生了破坏。值得指出的是,对于没有持载,只单独暴露在相同环境影响下的试件,仅仅出现 10% 的承载力退化。因此,在温度和湿度共同作用的环境中,持载是试件的力学性能退化的关键因素,较高持载水平将大大减少加固试件的失效时间。此外,在相同持载情况下,高温养护比常温养护能使 FRP/钢搭接试件表现出更好的时变力学性能。

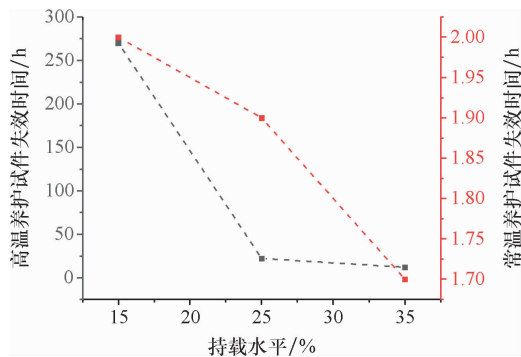


图 4 高温和荷载作用下搭接试件失效时间

Fig. 4 Failure time of joints subjected to high temperatures and sustained loads

Yu 等^[38]对养护期间内的 CFRP/钢双搭接试件进行了盐雾环境和高湿环境暴露,随后部分试件直接进行静载试验,另一部分试件则在经受疲劳预损伤后,再进行静载试验。结果表明,试件在

受到环境和疲劳损伤后,粘贴强度最高下降了 11%,而合适的表面处理能有效预防试件的强度和刚度退化。

Gao 等^[46]对 CFRP 加固构件在高温和荷载共同作用下的剥离进行了研究,指出如果粘结长度足够长,则剥离荷载仅取决于界面断裂能和温度变化。温度升高会导致剥离荷载和有效粘结长度的增加,有效粘结长度的增加速率取决于界面的粘结滑移关系。

任慧韬等^[47]也对荷载和恶劣环境共同作用下的带有转动铰的工字钢/CFRP 组合试件的耐久性能进行了研究,结果发现,荷载和腐蚀环境共同作用对组合试件的承载力有很大不利影响,承载力将下降到参考试件极限荷载的 22%。主要原因是由于腐蚀介质渗透到粘结界面,导致胶层的剪切强度下降,界面破坏特征也产生了明显的变化。

Li 等^[28-29]研究了疲劳损伤与湿热环境共同作用对 CFRP/钢搭接试件、CFRP 加固缺陷钢梁力学性能的影响。结果发现,疲劳损伤导致 CFRP/钢搭接试件的界面粘贴强度和刚度明显下降。而湿热环境和疲劳损伤共同作用则进一步加剧了搭接试件界面强度下降。此外,疲劳损伤对加固钢梁的界面开裂影响明显,但对刚度影响不明显。湿热环境和疲劳损伤共同作用则导致加固梁的承载力和刚度持续下降。在此基础上, Li 等^[47-48]还研究了湿热环境和疲劳荷载共同作用下预应力加固缺陷钢梁的界面耐久性,研究结果表明,疲劳损伤和湿热环境对预应力加固梁的界面剥离同样影响明显如图 5 所示,尤其是在湿热环境的暴露下,预应力加固梁的疲劳寿命将下降 27%。

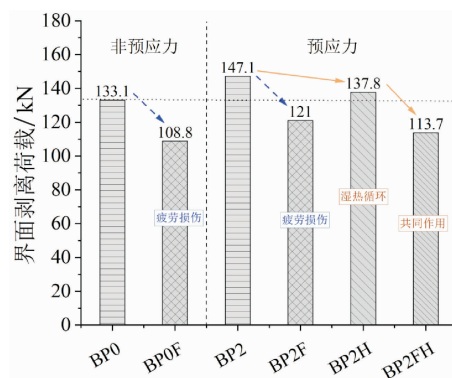


图 5 预应力 CFRP 加固缺陷钢梁的界面剥离荷载^[47]

Fig. 5 Interfacial debonding load of notched steel beam repaired with prestressed CFRP plate^[47]

4 湿热环境与荷载作用引起的界面退化机制

在湿热环境暴露后,水分可以进入到粘贴胶或粘贴胶与钢基体的界面,从而导致 CFRP 加固钢构件性能退化。具体包括两方面:胶粘剂本身的性能退化和界面性能的退化。

Shi 等^[49]研究发现,在湿热环境中,水分子在环氧树脂内的渗透会产生一连串的物理形貌变化。由于水分子不断地渗透侵蚀,致使环氧树脂表面裂纹萌生,整体刚度退化。裂纹的不断增大导致环氧基体与氧气充分接触,继而为水分子的渗透提供通道,从而加速环氧树脂的塑化。

张晖等^[50]采用扫描电子显微镜(SEM)对环氧树脂断面形貌变化分析后发现,经过湿热老化后,环氧树脂断面出现较深的凹陷,断面纹路变得丰富且萌生了裂痕,说明湿热环境对材料局部已经造成了不可逆转的塑性变形。

Kiilunen 等^[51]对高温湿热环境下的环氧树脂胶进行湿热老化试验,试验发现,在高温湿热环境下,环氧树脂内部化学结构发生变化,主要是环氧基发生氧化反应和环氧主链断裂,从而发生解交

联反应。这些化学结构变化会引起环氧树脂材料的粘结性能和力学性能的退化,对材料造成不可逆的永久性损伤。

Rain 等^[52]通过试验证实了水分子的渗透与扩散会使得粘结界面的出现脱粘和环氧树脂基体塑化,在高温湿热环境下,与水分充分接触的界面会出现性能退化,而环氧树脂内部的后固化作用将导致界面出现分层破坏。

Li 等^[53]将 CFRP/钢单剪试件进行疲劳损伤和湿热环境暴露,随后利用扫描电子显微镜(SEM)对破坏界面进行微观分析,通过分析界面的表面形貌和元素分布,明确了疲劳荷载和湿热环境共同作用导致的界面退化机制。湿热环境和疲劳损伤后的界面微观形貌如图 6 所示。研究表明,亲水基团加速了水分的渗透,导致不均匀的膨胀应力,并在粘结胶中产生交错的微裂缝。水分的侵入会导致胶粘剂发生塑化或物理和化学的分解,造成胶粘剂的强度和刚度的下降。此外,疲劳荷载引起的微裂纹会加剧这一过程,进一步降低了界面的粘结强度。同时水分的侵入破坏环氧树脂的 C-C 链,羟基氧化会生成低强度的析出物,可能的氧化反应如图 7 所示。

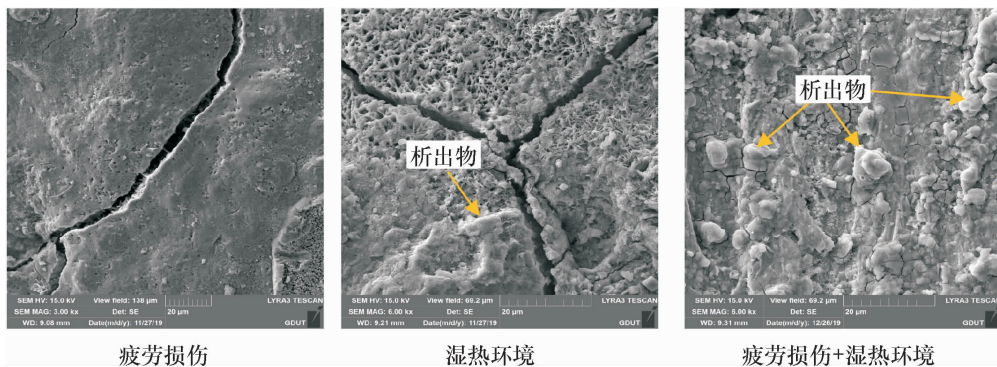


图 6 破坏界面的 SEM 图^[53]

Fig. 6 SEM images of the fracture interface

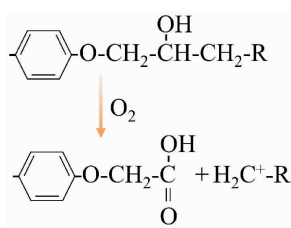


图 7 O-H 官能团的氧化反应^[53]

Fig. 7 The oxidation reaction of O-H group

5 结论与展望

本文对 CFRP/钢界面耐久性问题进行了综述。相比溶液浸泡和湿气暴露,干湿循环暴露导致 CFRP 加固钢结构的承载力和刚度退化更明显。当环境和荷载耦合作用后,CFRP 加固钢结构的力

学性能会进一步下降。尤其是疲劳荷载导致的界面微裂纹会加剧腐蚀介质的侵入,给 CFRP 加固钢结构的耐久性带来巨大挑战。

尽管学者们在 CFRP 加固钢结构耐久性方面开展了大量的研究,但仍建议对以下方向进行更深层次的研究。

(1) 现有 CFRP 加固钢结构的抗疲劳设计方法并未考虑湿热环境对界面性能的影响。由于实际工程环境多种多样,应进一步开展各类环境下

加固钢构件的疲劳试验,建立考虑多因素融合的理论分析模型,并提高预测模型的适用性。

(2) 荷载和湿热环境会导致界面老化,如何采用合适的无损检测技术实现界面的损伤检测和长期监测十分关键。由于界面损伤受多种因素的影响,为了量化分析,还需要进行更多试验研究,建立多因素界面损伤模型,并标定各因素对检测结果的影响系数。

参考文献:

- [1] Zhao X L, Zhang L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures[J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(8): 1808-1823.
- [2] Deng J, Lee M M K, Moy S S J. Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate[J]. *Composite Structures*, 2004, 65(2): 205-215.
- [3] Deng J, Lee M M K. Fatigue performance of metallic beam strengthened with a bonded CFRP plate[J]. *Composite Structures*, 2007, 78(2): 222-231.
- [4] Deng J, Lee M M K. Behaviour under static loading of metallic beams reinforced with a bonded CFRP plate[J]. *Composite Structures*, 2007, 78(2): 232-242.
- [5] Hosseini A, Ghafoori E, Al-Mahaidi R, et al. Strengthening of a 19th-century roadway metallic bridge using nonprestressed bonded and prestressed unbonded CFRP plates[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 209: 240-259.
- [6] Ghafoori E, Motavalli M, Nussbaumer A, et al. Design criterion for fatigue strengthening of riveted beams in a 120-year-old railway metallic bridge using pre-stressed CFRP plates[J]. *Composites Part B*, 2015, 68: 1-13.
- [7] Colombi P, Bassetti A, Nussbaumer A. Delamination effects on cracked steel members reinforced by prestressed composite patch[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2003, 39(1): 61-71.
- [8] Teng J G, Yu T, Fernando D. Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 78: 131-143.
- [9] Aljabar N J, Zhao X L, Al-Mahaidi R, et al. Experimental investigation on the CFRP strengthening efficiency of steel plates with inclined cracks under fatigue loading[J]. *Engineering Structures*, 2018, 172: 877-890.
- [10] 叶列平, 庄江波, 沙吾列提·拜开依, 等. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土 T 形梁的试验研究[J]. *工业建筑*, 2004, 34(S1): 94-101.
- [11] Li J H, Wang Y, Deng J, et al. Experimental study on the flexural behaviour of notched steel beams strengthened by prestressed CFRP plate with an end plate anchorage system[J]. *Engineering Structures*, 2018, 171: 29-39.
- [12] Deng J, Fei Z Y, Li J H, et al. Fatigue behaviour of notched steel beams strengthened by a self-prestressing SMA/CFRP composite[J]. *Engineering Structures*, 2023, 274: 115077.
- [13] Hu L L, Feng P, Zhao X L. Fatigue design of CFRP strengthened steel members[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 119: 482-498.
- [14] Blackburn B P, Tatar J, Douglas E P, et al. Effects of hygrothermal conditioning on epoxy adhesives used in FRP composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 679-689.
- [15] Savvilitidou M, Vassilopoulos A P, Frigione M, et al. Effects of aging in dry environment on physical and mechanical properties of a cold-curing structural epoxy adhesive for bridge construction[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 552-561.
- [16] Gholami M, Sam A R M, Yatim J M, et al. A review on steel/CFRP strengthening systems focusing environmental performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 301-310.

- [17] Feng P, Hu L L, Zhao X L, et al. Study on thermal effects on fatigue behavior of cracked steel plates strengthened by CFRP sheets[J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 82: 311-320.
- [18] Li S, Zhu T, Lu Y Y, et al. Effect of temperature variation on bond characteristics between CFRP and steel plate[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2016, 2016: 5674572.
- [19] Fernandes R L, de Moura M F S F, Moreira R D F. Effect of temperature on pure modes I and II fracture behavior of composite bonded joints[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 96: 35-44.
- [20] 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 & Engineering*, 2018, 40(1): 1071-1080.
- [21] Heshmati M, Haghani R, Al-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.
- [22] 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.
- [23] Agarwal A, Foster S J, Hamed E, et al. Influence of freeze-thaw cycling on the bond strength of steel-FRP lap joints[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 60: 178-185.
- [24] Heshmati M, Haghani R, Al-Emrani M. Durability of CFRP/steel joints under cyclic wet-dry and freeze-thaw conditions [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 126: 211-226.
- [25] 刘群峰, 孙亚民, 王怡, 等. 冻融/干湿环境影响下 CFRP 板-钢界面黏结性能试验[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(2): 247-258.
- [26] Batuwitige C, Fawzia S, Thambiratnam D, et al. Durability of CFRP strengthened steel plate double-strap joints in accelerated corrosion environments[J]. *Composite Structures*, 2017, 160: 1287-1298.
- [27] Li S, Hu J Y, Lu Y Y, et al. Durability of CFRP strengthened steel plates under wet and dry cycles[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2018, 18(2): 381-390.
- [28] 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.
- [29] Li J H, Deng J, Wang Y, et al. Experimental study of notched steel beams strengthened with a CFRP plate subjected to overloading fatigue and wetting/drying cycles[J]. *Composite Structures*, 2019, 209: 634-643.
- [30] Zhao X L, Asce F, Bai Y, 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): 318-320.
- [31] 程璐, 冯鹏, 徐善华, 等. CFRP 加固钢结构抗疲劳技术研究综述[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(4): 58-62.
- [32] Heshmati M, Haghani R, Al-Emrani M. Environmental durability of adhesively bonded FRP/steel joints in civil engineering applications: State of the art[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 81: 259-275.
- [33] Agarwal A, Foster S J, Hamed E. Wet thermo-mechanical behavior of steel-CFRP joints – An experimental study[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 83: 284-296.
- [34] 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.
- [35] Dawood M, Rizkalla S. Environmental durability of a CFRP system for strengthening steel structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(9): 1682-1689.
- [36] Heshmati M, Haghani R, Al-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.
- [37] Nguyen T C, Bai Y, Al-Mahaidi R, et al. Time-dependent behaviour of steel/CFRP double strap joints subjected to combined thermal and mechanical loading[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(5): 1826-1833.
- [38] Yu Q Q, Gao R X, Gu X L, et al. Bond behavior of CFRP-steel double-lap joints exposed to marine atmosphere and fatigue loading[J]. *Engineering Structures*, 2018, 175: 76-85.
- [39] Haber Z B, Mackie K R, Zhao L, et al. Thermo-mechanical durability of CFRP-strengthened RC beams[R]. University of Central Florida, Orlando, 2009.

- [40] Pantazopoulou S J, Bonacci J F, Sheikh S. Repair of corrosion-damaged columns with frp wraps[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2001, 5(1): 3-11.
- [41] Konur O, Matthews F L. Effect of the properties of the constituents on the fatigue performance of composites: A review[J]. *Composites*, 1989, 20(4): 317-328.
- [42] Borrie D, Liu H B, Zhao X L, et al. Bond durability of fatigued CFRP-steel double-lap joints pre-exposed to marine environment[J]. *Composite Structures*, 2015, 131: 799-809.
- [43] 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.
- [44] Nguyen T C, Bai Y, Zhao X L, et al. Curing effects on steel/CFRP double strap joints under combined mechanical load, temperature and humidity[J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 40(7): 899-907.
- [45] Li J H, Zhu M C, Deng J. Flexural behaviour of notched steel beams strengthened with a prestressed CFRP plate subjected to fatigue damage and wetting/drying cycles[J]. *Engineering Structures*, 2022, 250: 113430.
- [46] Gao W Y, Dai J G, Teng J G. Analysis of mode II debonding behavior of fiber-reinforced polymer-to-substrate bonded joints subjected to combined thermal and mechanical loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 136: 241-264.
- [47] 任慧韬, 李杉, 高丹盈. 荷载和恶劣环境共同作用对 CFRP-钢结构黏结性能的影响[J]. *土木工程学报*, 2009(3): 36-41.
- [48] Deng J, Li J H, Zhu M C. Fatigue behavior of notched steel beams strengthened by a prestressed CFRP plate subjected to wetting/drying cycles[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 230: 109491.
- [49] Shi X Q, Zhang Y L, Zhou W, et al. Effect of hygrothermal aging on interfacial reliability of silicon/underfill/FR-4 assembly[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2008, 31(1): 94-103.
- [50] 张晖, 阳建红, 李海斌, 等. 湿热老化环境对环氧树脂性能影响研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2010, 33(3): 41-43.
- [51] Kiilunen J, Frisk L. Hygrothermal aging of an ACA attached PET flex-on-board assembly[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2014, 4(5): 104-108.
- [52] Rain P, Brun E, Guillermin C, et al. Experimental model of a quartz/epoxy interface submitted to a hygrothermal ageing: A dielectric characterization[C]//*Proceedings of the 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. Piscataway: IEEE, 2010.
- [53] Li J H, Xie Y, Zhu M C, et al. Degradation mechanism of steel/CFRP plate interface subjected to overloading fatigue and wetting/drying cycles[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 179: 109644.

【责任编辑: 陈 钢】