

碱环境下拉挤型玻璃纤维聚氨酯螺柱性能的试验研究

侍伟¹, 吴发红^{1,2}, 张镓杰², 许玉佼², 徐婕²

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;
2. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要:为研究拉挤型玻璃纤维聚氨酯螺柱在碱环境下的相关性能,对直径12 mm的拉挤型玻璃纤维聚氨酯螺柱与M12型普通钢制螺栓在pH=13的氢氧化钠溶液环境下进行试验对比,并与常规环境下的性能进行比较,得出如下结论:(1)在常规环境下和1 000 h的pH=13碱环境浸泡下,拉挤型玻璃纤维螺柱和普通钢制螺栓的抗剪承载力基本不变,且拉挤型玻璃纤维螺柱的抗剪承载力约为普通钢制螺栓抗剪承载力的70%~80%;(2)拉挤型玻璃纤维螺柱破坏为脆性破坏,破坏前会听到“丝丝”响声,试件内纤维逐渐被剪断,最终试件由于抗剪承载力不足被破坏;(3)碱环境对拉挤型玻璃纤维螺柱的影响较大,其腐蚀程度随浸泡时间的延长而不断增大,螺柱表面逐渐有纤维颗粒掉落,螺纹部分甚至出现缺口,导致安装时无法施加预紧扭矩而不适合继续使用。

关键词:玻璃纤维;螺柱;碱环境;腐蚀;抗剪承载力

中图分类号:TQ171.77

文献标志码:A

文章编号:1671-5322(2020)01-0036-07

纤维增强复合材料(FRP)作为一种新型材料,逐渐应用于航空航天、土木工程、军事装备、环境保护等领域^[1]。根据纤维增强复合材料中增强相材料的不同,纤维增强复合材料可分为玻璃纤维增强复合材料(GFRP)、碳纤维增强复合材料(CFRP)、玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)等,其常见的制备工艺有拉挤、缠绕、模压和手糊等^[2]。本文主要研究拉挤型玻璃纤维复合材料。

螺栓连接作为复合材料结构连接中最广泛使用的一种形式,得到许多学者的重视,有许多研究成果问世。周毛毛等^[3]通过拉挤型玻璃纤维复合板材的拉伸试验,测得GFRP板材的抗拉强度和弹性模量等基本力学参数;马毓等^[4]对拉挤型玻璃纤维复合板材的螺栓连接进行拉伸试验,从顺纤维和横纤维两个受力方向研究了螺栓连接接头的不同破坏模式;刘玉擎等^[5]从螺栓直径与板件厚度比、搭接板件组成及荷载作用方向3个方面,分析了各变化参数对拉挤GFRP层合板螺栓连接力学性能的影响;陈尚能等^[6]通过海水各组

分对GFRP腐蚀性能的影响研究,探讨了海水浸泡对GFRP性能的影响因素和腐蚀机理。

上述研究大多针对玻璃纤维复合板材进行,而对玻璃纤维螺柱的研究还比较少。本文主要研究直径12 mm的拉挤型玻璃纤维聚氨酯螺柱的力学性能,以及不同时长碱环境下碱离子对其耐碱腐蚀性能的影响,并与M12型普通钢制螺栓进行对比试验,探讨其不同的影响规律。

1 拉挤型玻璃纤维聚氨酯螺柱与普通钢制螺栓的连接试验

1.1 试件制作

试验中玻璃纤维螺柱为江苏飞博尔新材料科技有限公司生产的拉挤型玻璃纤维聚氨酯螺柱,螺柱长度为50 mm,直径为12 mm,螺纹间距为2 mm(螺柱有效直径 d 由游标卡尺测得并取平均值,配套螺母采用市面上流通的高强钢制螺母);螺柱轴向方向与纤维方向一致,其力学性能参数参考拉挤型玻璃纤维层合板的材性试验结果,见

表 1。试验所用拉挤型玻璃纤维层合板为单向板,即其纤维铺层方向都是同一角度。对比试验采用 M12 型普通钢制螺栓和螺母进行。试验中玻璃纤维螺柱共 3 组,每组 3 个试件;普通钢制螺栓共 2 组,每组 3 个试件。玻璃纤维螺柱和普通钢制螺栓如图 1 所示。

表 1 拉挤型玻璃纤维层合板力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of pultruded glass fiber laminates

参数	数值
纵向弹性模量/GPa	30.10
横向弹性模量/GPa	3.73
泊松比	0.12

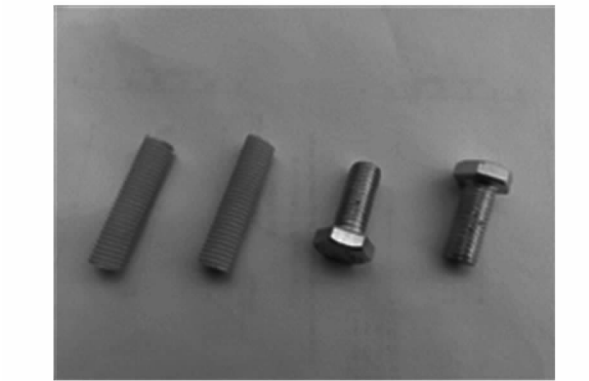


图 1 拉挤型玻璃纤维螺柱、普通钢制螺栓

Fig 1 Pultruded glass fiber studs, ordinary steel bolts

试验连接试件接头部分采用固定尺寸钢板,尺寸如图 2 所示。钢板采用 Q235 钢,弹性模量为 206 GPa,板厚 $t = 4\text{ mm}$;连接螺栓孔直径 $D = 12\text{ mm}$ 。按《钢结构设计标准》^[7]中螺栓排列端距和边距的构造要求,螺栓中心至构件边缘距离的最大容许距离为 $4D$ 或 $8t$ (取两者的较小值),顺内力方向时的最小容许距离为 $2D$,垂直内力方向、锯割边、其他螺栓时的最小容许距离为 $1.2D$ 。同时结合其他尺寸界定研究的结论,确定试件端距 $E = 30\text{ mm}$,边距 $W/2 = 20\text{ mm}$ 。故试件总长 $L = 110\text{ mm}$,宽度 $W = 40\text{ mm}$,夹持端端头长 $L' = 35\text{ mm}$,板厚 $t' = 8\text{ mm}$ 。

1.2 试验方法及装置

按《纤维增强塑料性能试验方法总则》^[8]规定进行试验。试验前对钢板夹持端表面进行粗糙处理,便于试验机夹具固定,防止试验过程中发生滑动;用氢氧化钠固体试剂和蒸馏水配制 $\text{pH} = 13$ 的氢氧化钠溶液。试验时,取密封玻璃瓶 3 个,其

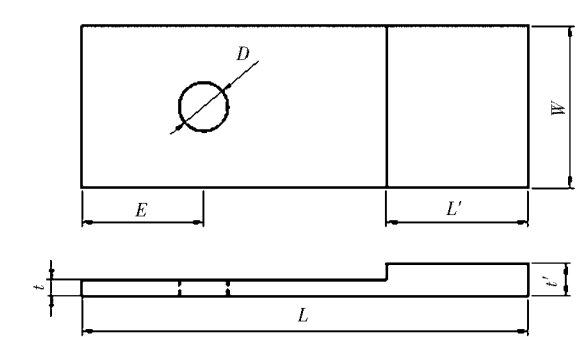


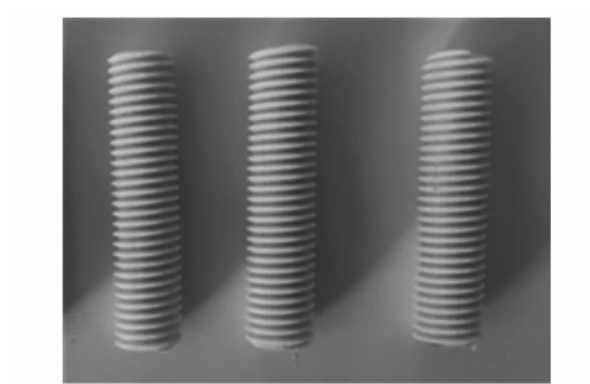
图 2 钢板试件尺寸

Fig 2 Size of steel plate specimen

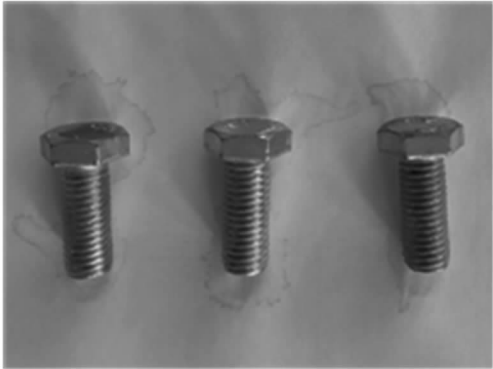
中两瓶分别放入一组玻璃纤维螺柱试件,第 3 瓶放入一组普通钢制螺栓试件;向 3 个玻璃瓶中分别倒入配制好的氢氧化钠溶液至试件浸没,密封后将 3 个玻璃瓶移入 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水箱中存放,以加速腐蚀进程,节约试验时间;将一组玻璃纤维螺柱试件和普通钢制螺栓试件浸泡 30 d (相当于常温环境下浸泡 1 000 h) 后取出,另一组玻璃纤维螺柱试件浸泡 60 d (相当于常温环境下浸泡 2 000 h) 后取出,并与常规环境下剩余的一组玻璃纤维螺柱试件和一组普通钢制螺栓试件进行外观比较和螺栓连接抗剪承载力试验。

浸泡后的试件如图 3 所示。将浸泡好的 2 组玻璃纤维螺柱试件取出晾干后,与清理干净的对孔钢板进行螺栓连接;在用扭力扳手施加 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 的螺栓预紧扭矩后,在螺柱与高强度螺母间滴入适量 502 胶水,以加固连接(要避免过多的胶水四处蔓延,影响试验数据准确性)。而普通钢制螺栓试件进行螺栓连接时,不需要施加预紧扭矩和滴加 502 胶水,直接拧紧即可。

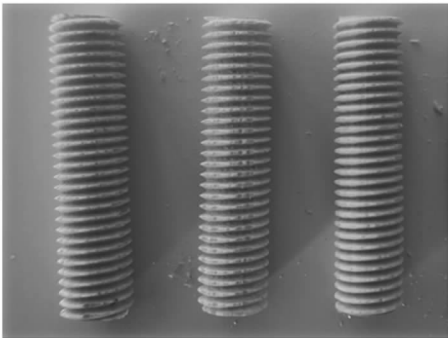
常规环境下的试件连接方式与浸泡后的试件相同。



a 浸泡 30 d 的玻璃纤维螺柱



b 浸泡 30 d 的普通钢制螺栓



c 浸泡 60 d 的玻璃纤维螺栓

图 3 浸泡后的试件

Fig 3 Specimen after being immersed

在连接好试件的每块钢板底面圆孔周围(试件外侧,见图 4)顺加载方向布置 3 片 BFH120-3AA-D150 型应变片,使其在不接触螺母的前提下尽量靠近圆孔。采用 1/4 桥路连接,不带温度补偿的 uT7116Y 高速静态应变仪测量试件沿荷载方向的应变,采样频率为 1 次/s。试验时,调整夹具位置,将试件两端放入夹具夹紧,试件的中心线与上下夹具的中心线对准;采用量程为 100 kN 的 Byes2100 电子万能试验机对连接试件匀速施加竖向荷载直至试件破坏,并由万能试验机自动记录荷载及位移数据。加载采用位移控制方法,加载速率为 2 mm/min,加载装置如图 5 所示。

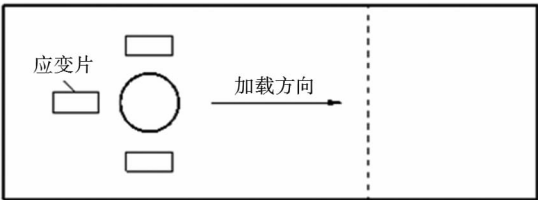


图 4 应变片布置

Fig 4 Configuration of strain gauge

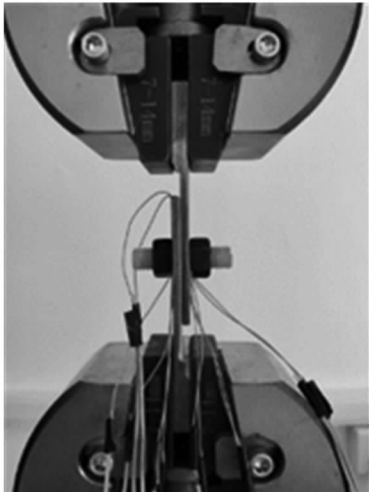


图 5 加载装置

Fig 5 Loading device

2 试验结果及分析

2.1 外观观察

试件加载前,以常规环境下的试件作为参照,对浸泡后的玻璃纤维螺栓试件和普通钢制螺栓试件进行外观检查。检查发现,浸泡 30 d 的玻璃纤维螺栓试件表面被轻微腐蚀,出现少量粉末状颗粒物,但结构基本完整;浸泡 60 d 的玻璃纤维螺栓试件表面与浸泡 30 d 的玻璃纤维螺栓试件相比腐蚀较为明显,出现较多粉末状颗粒物,同时螺纹结构部分出现一些缺口,检查过程中由于试件接触,缺口范围进一步扩大;浸泡 30 d 的普通钢制螺栓表面出现一些锈斑,但结构依然完整。外观检查结果表明,碱环境对玻璃纤维螺栓螺纹结构的影响较为明显。

另外,在连接试件施加螺栓预紧扭矩的过程中,被氢氧化钠溶液浸泡 60 d 的 3 个玻璃纤维螺栓试件,都出现了“滑丝”现象,从而无法施加预紧扭矩,即该螺栓在实际工程中已不能继续使用,但本试验为保证数据完整性,仍按照正常试验步骤进行。其他试件均未出现“滑丝”现象。

2.2 数据分析

试验中连接强度 σ 定义为:

$$\sigma = \frac{P}{dt}$$

式中: P 为连接试件发生破坏时的最大荷载, kN; d 为游标卡尺测得的有效螺栓直径(M12 型普通钢制螺栓有效直径按《钢结构设计标准》^[7]

规定,取 10.36 mm),mm; t 为打孔钢板板厚,mm。

试验中得到的试件破坏荷载、有效面积、连接强度及破坏模式如表 2 所示,试件平均破坏荷载、平均连接强度如表 3 所示。表 2 试件编号第 1 项中 30 代表被氢氧化钠溶液浸泡 30 d,60 代表被氢氧化钠溶液浸泡 60 d,常规环境下的试件编号第 1 项省略;第 2 项中 G 代表拉挤型玻璃纤维螺柱试件,F 代表普通钢制螺栓试件;第 3 项中数字

为试件在其组内的编号。由表 3 可知,被氢氧化钠溶液浸泡 30 d 的玻璃纤维螺柱试件和普通钢制螺栓试件的抗剪承载力与常规环境下的试件相比没有明显下降,而被氢氧化钠溶液浸泡 60 d 的玻璃纤维螺柱试件的抗剪承载力下降较明显;在相同环境条件下,拉挤型玻璃纤维螺柱的抗剪承载力约为普通钢制螺栓抗剪承载力的 70% ~ 80%。

表 2 试件破坏荷载、连接强度及破坏模式汇总表
Table 2 Summary of specimens' failure load, connection strength and failure mode

试件编号	破坏荷载 P/kN	有效面积 $d \times t/(\text{mm} \times \text{mm})$	连接强度 σ/MPa	破坏模式
30-G-1	22.74	10.87×4	523.00	剪断
30-G-2	23.40	10.98×4	532.79	剪断
30-G-3	22.23	10.93×4	508.46	剪断
30-F-1	28.61	10.36×4	690.40	剪断
30-F-2	29.10	10.36×4	702.22	剪断
30-F-3	29.17	10.36×4	703.91	剪断
60-G-1	18.73	10.42×4	449.38	剪断
60-G-2	20.71	10.21×4	507.10	剪断
60-G-3	19.47	10.39×4	468.48	剪断

表 3 试件平均破坏荷载及平均连接强度汇总表
Table 3 Summary of specimens' average failure load and connection strength

试件分组	平均破坏荷载 P/kN	平均连接强度 σ/MPa
30-G	22.79	521.42
30-F	28.96	698.84
60-G	19.64	474.99
G	22.97	520.22
F	28.86	696.43

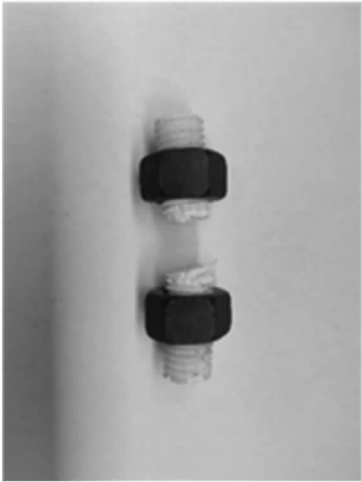
由表 2 可知,拉挤型玻璃纤维螺柱试件的破坏模式都是剪断破坏,其破坏形态如图 6 所示。玻璃纤维螺柱连接试件受拉一段时间后,随着荷载的不断增大从一开始的水平状态转变为略微倾斜状态;在螺柱即将被剪断破坏时,会发出一阵清脆的“丝丝”声,紧接着突然“啪”的一声,螺柱被剪断并从连接试件上飞出,同时接头钢板分离,连接试件破坏。对破坏后的接头钢板进行检查,可以发现钢板螺孔承压侧出现玻璃纤维螺柱的碎屑以及明显的螺纹咬痕,孔边板件也出现挤压损伤。普通钢制螺栓破坏模式与拉挤型玻璃纤维螺柱试件破坏模式类似,也是剪断破坏。螺栓剪断破坏时,随着“啪”的一声,螺栓被剪断并飞出,连接试件破坏,接头钢板也出现了与玻璃纤维螺柱试件

程度相当的螺纹咬痕及挤压损伤,但试件即将破坏时的持续时间要比玻璃纤维螺柱试件长一些。

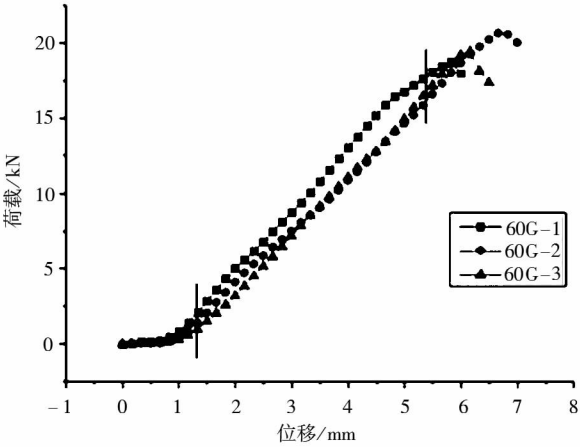
玻璃纤维螺柱试件和普通钢制螺栓试件的荷载—位移曲线如图 7 所示。由图 7a、7b 可知:玻璃纤维螺柱试件破坏主要包含 3 个阶段,其中第一阶段是位移增加,但荷载增长比较缓慢,连接试件在这一阶段主要克服螺柱与板件之间的摩擦力,同时螺柱螺纹也受到挤压,钢板螺孔与螺柱之间的空隙被填满;第二阶段随着位移的增加,荷载呈线性增长趋势,直至试件发生破坏时的最大荷



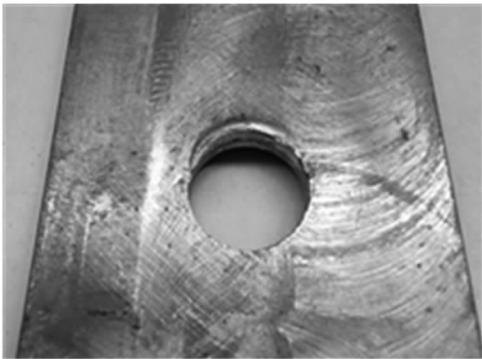
a 试件破坏



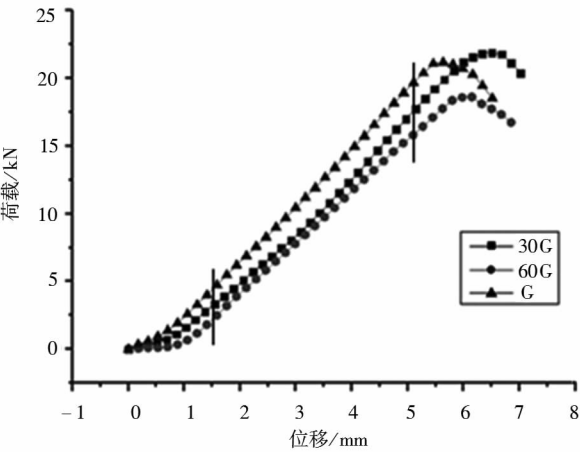
b 螺柱被剪断



b 60 d 玻璃纤维螺柱



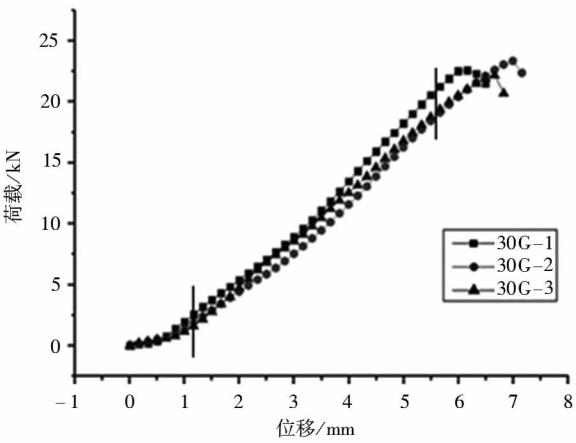
c 钢板内侧螺孔被挤压



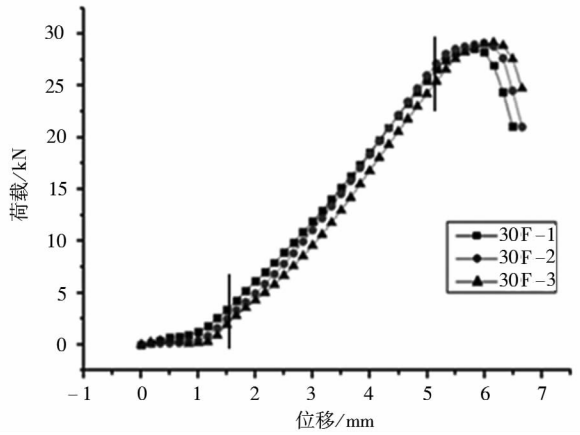
c 玻璃纤维螺柱曲线对比

图 6 螺柱破坏模式

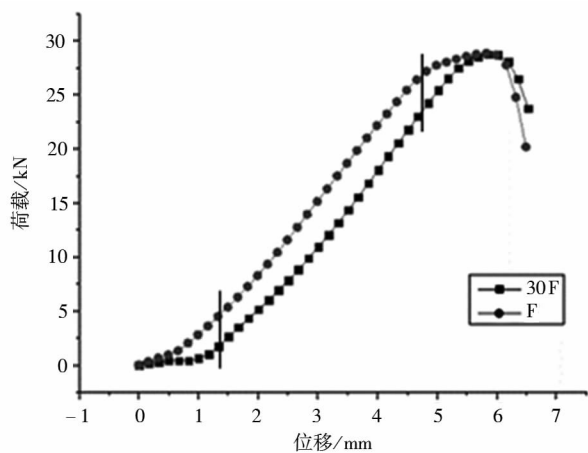
Fig 6 Stud failure mode



a 30 d 玻璃纤维螺柱



d 30 d 普通钢制螺栓



e 普通钢制螺栓曲线对比

图 7 荷载—位移曲线

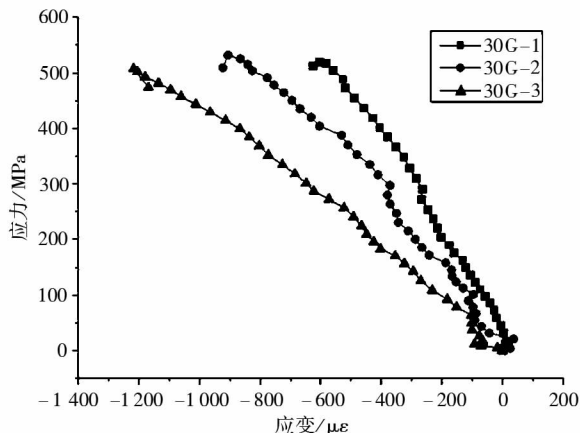
Fig 7 Load-displacement curves

载 P , 这一阶段连接试件处于孔壁承压状态; 第三阶段随着螺柱直接被剪断, 连接试件破坏, 荷载经过峰值后迅速降低。由图 7d 可知, 普通钢制螺栓试件破坏的 3 个阶段与玻璃纤维螺柱试件破坏大体相同, 只是在第三阶段普通钢制螺栓并没有立刻被剪断, 而是经过短暂的屈服阶段后被破坏。

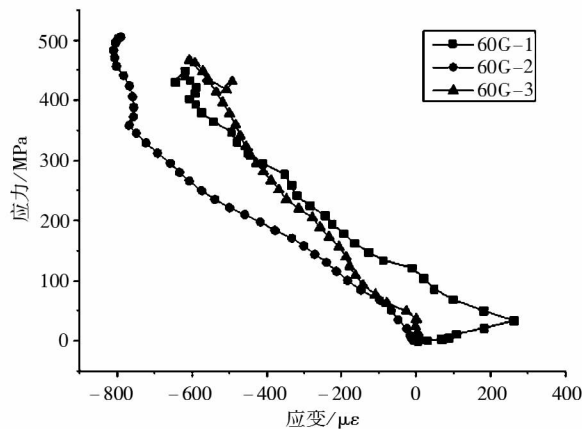
对图 7a、7b 的曲线取平均值, 并与常规环境下试件的荷载—位移曲线对比, 得到图 7c 的玻璃纤维螺柱对比曲线。由图 7c 可知, 被氢氧化钠溶液浸泡 30 d 的玻璃纤维螺柱试件的抗剪承载力与常规环境下的试件基本持平, 而被氢氧化钠溶液浸泡 60 d 的玻璃纤维螺柱试件的抗剪承载力下降较多; 浸泡后的试件在破坏第一阶段用时较长, 说明碱环境对拉挤型玻璃纤维螺柱试件的影响较大, 螺柱螺纹被氢氧化钠溶液部分腐蚀, 螺纹强度降低, 使得连接试件在进入孔壁承压阶段前, 需要耗费更多时间来填满空隙, 且氢氧化钠溶液浸泡时间越长对玻璃纤维螺柱试件的影响越大。由图 7e 可知, 被氢氧化钠溶液浸泡 30 d 后, 普通钢制螺栓试件的抗剪承载力基本不变, 但是同样存在螺纹被部分腐蚀的问题。

浸泡后的玻璃纤维螺柱试件的应力—应变曲线如图 8 所示。由图 8 可知: 连接试件在破坏第一阶段主要克服螺柱与板件之间的摩擦力, 同时填满钢板螺孔与螺柱之间的空隙, 此时板件端头靠近螺孔处的应力很小, 应变也在拉应变与压应变之间浮动, 部分试件要克服的摩擦力较大, 出现短暂的拉应变阶段; 进入破坏第二阶段后, 板件孔

壁开始承压, 且随着应力的不断增大, 板件端头都表现为压应变且呈线性增长趋势; 在破坏第三阶段, 连接试件破坏, 应力与应变也随之迅速下降。



a 30 d 玻璃纤维螺柱



b 60 d 玻璃纤维螺柱

图 8 应力—应变曲线

Fig 8 Stress-strain curves

3 结论

(1) 在常规环境下和 1 000 h 的 $\text{pH} = 13$ 碱环境浸泡下, 拉挤型玻璃纤维螺柱和普通钢制螺栓的抗剪承载力基本不变, 且拉挤型玻璃纤维螺柱的抗剪承载力约为普通钢制螺栓抗剪承载力的 70% ~ 80%。

(2) 拉挤型玻璃纤维螺柱破坏为脆性破坏, 破坏前会听到“丝丝”响声; 试件内纤维逐渐被剪断, 最终试件由于抗剪承载力不足被破坏。

(3) 碱环境对拉挤型玻璃纤维螺柱的影响较大, 其腐蚀程度随浸泡时间的延长而不断增大, 螺柱表面逐渐有纤维颗粒掉落, 螺纹部分甚至出现缺口, 导致安装时无法施加预紧扭矩而不适合继续使用, 因此实际应用过程中应避免过长时间的

碱环境接触。

(4) 本文仅对江苏飞博尔新材料科技有限公司生产的拉挤型玻璃纤维聚氨酯螺柱进行了碱环境下浸泡 1 000 h 和 2 000 h 的模拟腐蚀试验, 研究结论存在一定的局限性, 后续研究可从进一步

延长腐蚀时间(如腐蚀 3 000 h 或更长时间)、置于不同腐蚀环境(如酸环境、氯离子环境等)、运用电镜扫描技术以及改进生产工艺等方面进行更加深入的探讨。

参考文献:

[1] 马明明, 张彦. 玻璃纤维及其复合材料的应用进展[J]. 化工新型材料, 2016, 44(2): 38-40.
[2] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36
[3] 周毛毛, 惠颖. 拉挤型玻璃纤维复合材料性能试验研究[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(11): 1-3.
[4] 马毓, 赵启林, 魏鹏, 等. 拉挤成型复合材料螺栓连接接头破坏模式试验研究[C]. //第 18 届玻璃钢/复合材料学术年会论文集. 北京, 2010: 103-107.
[5] 刘玉擎, 都骛, 辛灏辉, 等. 拉挤 GFRP 型材层合板螺栓连接试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 223-229.
[6] 陈尚能, 申明霞, 曾少华, 等. 玻璃纤维增强环氧树脂复合材料耐海水性能研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(2): 108-114.
[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
[8] 中华人民共和国国家纤维增强塑料标准化技术委员会. 纤维增强塑料性能试验方法总则: GB/T 1446—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

Experimental Research on the Properties of Pultrusion Type Glass Fiber Polyurethane Studs in Alkaline Environment

SHI Wei¹, WU Fahong^{1,2}, ZHANG Jiajie², XU Yujiao², XU Jie²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;
2. College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

Abstract: In order to study the relative performance of pultrusion type fiberglass polyurethane stud in alkali environment, the pultrusion type fiberglass polyurethane stud with diameter of 12 mm and M12 type ordinary steel bolt were tested and compared in sodium hydroxide solution with pH value of 13, and the performance was compared with that in conventional environment. It is concluded that the shear capacity of pultrusion type glass fiber stud and common steel bolt is basically unchanged under the normal environment and the alkali environment of 1 000 h with pH value of 13, and the shear capacity of pultrusion type glass fiber stud is about 70% ~ 80% of that of common steel bolt. The failure of pultrusion type glass fiber stud is brittle failure. Before failure, the sound of "silk" will be heard, and the fiber in the specimen will be cut off gradually. Finally, the specimen will be damaged due to insufficient shear bearing capacity. The alkali environment has a greater influence on the pultruded glass fiber studs, and its corrosion degree increases continuously with the immersion time. Fiber particles gradually fall on the surface of the studs, and the threaded parts even have gaps. As a result, the pre-tightening torque cannot be applied during installation and it is not suitable for continued use.

Keywords: glass fiber; stud; alkali environment; corrosion; shear capacity

(责任编辑: 李华云)