

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.077



拉挤 GFRP 管材与钢管连接的拉伸试验研究

祝明桥,李志彬,王瑶,张紫薇

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:拉挤型 GFRP 管材节点的可靠连接是保证其正常工作的前提。为研究其拉伸连接性能,采用胶接连接和螺栓连接两种连接方式对 GFRP 管材与钢管连接件分别开展了拉伸试验研究。在胶接连接试验中,研究了胶层剪应力沿长度方向的分布特征、受力机理及失效过程、胶接长度对承载力影响等。试验结果表明:胶层剪应力在加载初期沿长度方向呈现两端大、中间小的分布特征,高应力发生在胶接端,并随荷载上升逐步往加载端胶层转移;胶接长度的增加能显著提高连接构件承载力,但当长度达到管径的 1.6 倍后,继续增加胶接长度对承载力的提升并不大,故可考虑将 1.6 倍管径作为 GFRP 管材的有效胶接长度。在螺栓连接试验中,研究了 e/d (端距/栓径)、螺栓排数 n 对连接承载力及破坏模式的影响。试验结果表明:当 $e/d=7$ 时,承载力达到最大值,破坏形式以挤压破坏为主;根据螺栓排数 n 与承载力的关系,可以推导相应折减系数来计算承载力。

关键词:GFRP 管材;胶接连接;螺栓连接;拉伸试验

中图分类号:TU382 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)04-0104-08

Tensile test of pultruded GFRP pipe connected with steel pipe

Zhu Mingqiao, Li Zhibin, Wang Yao, Zhang Ziwei

(Department of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China)

Abstract: The reliable connection of pultrusion forming GFRP pipe joints is a prerequisite to ensure the normal operation of the components. In order to explore its tensile connection performance, two kinds of connection modes of bonding connection and bolt connection in GFRP pipe and steel pipe connector are adopted in this study to carry out the tensile test. The distribution characteristics, force mechanism, failure process and the influence of bonding length on load-bearing capacity of glue layer shear stress along the length direction were studied in the adhesive bonding test. The results show that the shear stress of the glue layer is large at both ends and small in the middle along the length direction at the initial stage of loading. As the load increased, the stress gradually shifted towards the loading end of the glue layer. The increase of bonding length can significantly improve the load-bearing capacity of the connecting parts, but when the length reaches 1.6 times of the pipe diameter, the increase of the bonding length is not sensitive to the increase of the load-bearing capacity any more. Therefore, the 1.6 times the pipe diameter can be regarded as the effective bond length of the GFRP pipe. Additionally, the influence of e/d (edge distance/bolt diameter) and bolt row number on the connection load-bearing capacity and failure mode were studied

收稿日期:2018-12-20

基金项目:国家自然科学基金(51578236)

作者简介:祝明桥(1968-),男,博士,教授,主要从事混凝土结构及新材料应用研究,E-mail:1531290279@qq.com。

Received:2018-12-20

Foundation item:National Natural Science Foundation of China(No. 51578236)

Author brief:Zhu Mingqiao(1968-),PhD, professor, main research interests: concrete structure and application of new materials,E-mail:1531290279@qq.com.

in the bolt connection experiment. The results show that when e/d is equal to 7, the load-bearing capacity reaches the maximum value and the main failure mode is extrusion failure. According to the relationship between the bolt row number and the load-bearing capacity, the corresponding reduction coefficient can be readily deduced for calculating the load-bearing capacity.

Keywords: GFRP pipe; adhesive bonding; bolt connection; tensile test

拉挤成型的玻璃纤维增强复合管材(简称 GFRP 管材)是用单向玻璃纤维作为增强材料,玻璃纤维布作为包裹加强层,在牵引力作用下,纤维材料浸渍树脂后通过金属模具进行预成型并固化而成的一种新型复合管材^[1]。拉挤型 GFRP 管材作为桁架结构中的受拉杆件,因具备轻质高强、抗腐蚀等特点,可以很好地减轻结构自重、提高结构的抗腐蚀性^[2]。但是拉挤型 GFRP 管材各向异性较为严重,运用在组合结构中还存在节点连接关键性问题。复合材料连接问题最早是出现在航天航空领域,据有关文献统计,在航天航空领域,复合材料的破坏有 70% 是发生在连接部位,连接部位对结构的整体性、耐久性、疲劳性有重要的影响^[3]。

胶接连接作为复合材料连接技术的重要分支之一,已有众多学者对其连接性能开展了实验及理论研究^[4]。从已有研究成果可知,胶接连接性能跟连接形式、被胶接件弹性模量、纤维铺层顺序、胶层厚度、连接的几何尺寸等因素有关^[5-10]。螺栓连接具有受环境影响较小、连接简单、造价低、能传递较大载荷等优点^[4]。影响螺栓连接性能的参数主要有纤维铺层比例及顺序、连接的几何参数、拧紧力矩等^[11-14]。Rosner 等^[14]对拉挤型 GFRP 层合板进行了单螺栓连接拉伸试验,发现端距 e 与螺栓直径 d 之比、板宽 W 与螺栓直径 d 之比对连接承载力及破坏模式有重要影响。王花娟等^[15]试验研究了玻璃纤维织物/环氧层合板单螺栓连接的最佳连接几何参数,结果表明:当 $e/d \geq 3$ 、 $W/d \geq 4$ 时,连接承载力趋于稳定,破坏模式基本为挤压破坏。Hart 等^[16]曾经对复合材料层压板的胶接连接做出过建议,推荐最外层铺层方向与载荷方向平行,以限制层间破坏。

学者们对 GFRP 连接虽有相关研究^[17-18],但现有复合材料的连接性能研究主要是关于纤维铺层结构层合板的互相搭接连接,而关于 GFRP 管材与钢管连接性能的相关研究较少。另外,GFRP 管材主要由单向玻璃纤维丝构成,纤维组成结构与复合层合板有较大不同,而且 GFRP 管材的截面形式、被连接件种类对其连接性能的影响也不同。本文采用两种连接方式:胶接和螺栓连接,开展了 GFRP 管材与钢管连接的拉伸试验研究。胶接连接试验中选取胶接长度作为变量,螺栓连接中选取端距和螺栓个数

为变量,分别研究了各连接方式参数的变化对连接试件承载力、破坏模式等试验结果的影响,得出最佳设计参数,可为后续桁架结构节点连接方式及参数的选择提供参考。

1 GFRP 管材连接试验

1.1 试验材料及构件设计

连接构件由 GFRP 管材和钢管连接件组成,而钢管连接件由内外不锈钢套管与螺栓通过螺纹连接组成,GFRP 管插入间隙与之相连(如图 1)。在沿胶接长度方向上的两胶接端头中,以靠近螺栓加载方向为加载端,另一端作为胶接端来进行区分。试验选取的 GFRP 管材为拉挤成型,主要由纵向纤维构成,表层由纤维布包裹,作为增强层,直径与厚度分别为 42、5 mm,抗拉强度为 440 MPa,弹性模量为 2.8×10^4 MPa。内外不锈钢管的直径分别为 32、50 mm,抗拉强度 ≥ 520 MPa,厚度同为 4 mm,弹性模量为 1.93×10^5 MPa。胶接连接所用胶黏剂为 3M 公司生产的 DP-460 双组份环氧树脂类结构胶黏剂;在螺栓连接试验中,为保证螺栓不发生屈服,选用等级为 12.9 级高强螺栓,螺栓直径为 6 mm。

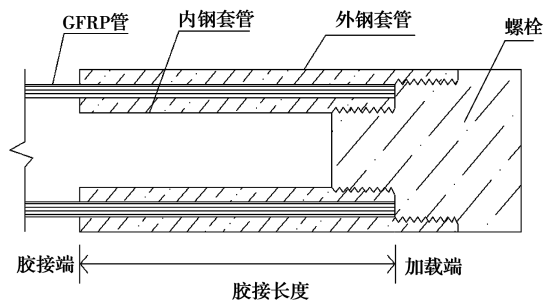


图 1 GFRP 管材与钢管连接件配合连接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of matching connection between GFRP pipe and steel pipe fittings

1.2 试件设置

1.2.1 胶接连接参数设置 胶接连接以胶接长度为变化参量,研究了胶接长度与连接承载力的关系,试件参数设置见表 1。拉伸载荷方向为管材轴向方向,试验应变采集仪器型号为 Ut7121Y 静态应变仪,百分表量程 30 mm。在每个连接件外钢管表面沿胶接长度方向上对称贴置两排应变片,研究轴向剪应力的分布特征及随荷载的变化规律。在靠近

胶接端处的 GFRP 管和外钢套管上用胶黏剂分别固定挡片和百分表,测量连接节点在荷载作用下的拉伸变形。构件实图如图 2 所示。

表 1 胶接连接参数设置

Table 1 Parameter setting of bonded connection

试件编号	胶接长度/ mm	胶接面积/ mm ²	胶层厚度/ mm	固化时间/d
1#	34	7 812	0.2	3
2#	68	15 625	0.2	3
3#	102	23 437	0.2	3
4#	136	31 250	0.2	3
5#	150	34 687	0.2	3



图 2 胶接连接构件实物图

Fig. 2 Sectional view of placement of fiberglass in GFRP tube

1.2.2 机械连接参数设置 在单螺栓连接试验中,设置了不同端距来研究 e/d 比值对螺栓连接承载力及破坏模式的影响,单螺栓连接 GFRP 管栓孔的端距设置如图 3 所示;在多螺栓连接实验中,为了验证参数正确性及螺栓排数对连接承载力的影响,设置了多螺栓连接的拉伸试验,试验参数端距 e 和排距 P 的确定是基于单螺栓的连接试验结果,多螺栓连接采用十字连接构型,具体参数见表 2,多螺栓端距与排距设置见图 4,螺栓连接构件实物图见图 5 所示。

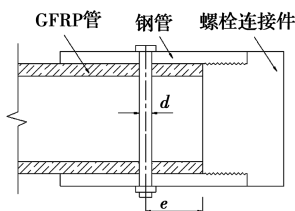


图 3 单排螺栓连接设置图

Fig. 3 Single row bolt connection setup diagram

1.3 加载及测量指标

连接拉伸试验构件加载方向为 GFRP 管材的拉挤成型方向,每组试件有 3 个相同构件,试件采用 600 kN 万能实验机进行加载。胶接连接构件采用分级加载,每 10 kN 为一级,加载速度为 1 mm/min

表 2 螺栓连接实验试件设置

Table 2 Specimen with different end distances

试件编号	e/d 比值	螺栓排数	孔径/mm
SJ1	2	1	6
SJ2	3	1	6
SJ3	4	1	6
SJ4	5	1	6
SJ5	6	1	6
SJ6	7	1	6
SJ7	8	1	6
SJ8	7	2	6
SJ9	7	3	6
SJ10	7	4	6

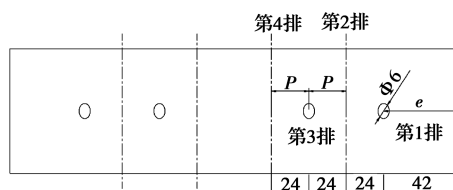


图 4 多螺栓连接 GFRP 管栓孔设置示意图

Fig. 4 Bolt setting of multiple bolted connection GFRP tube

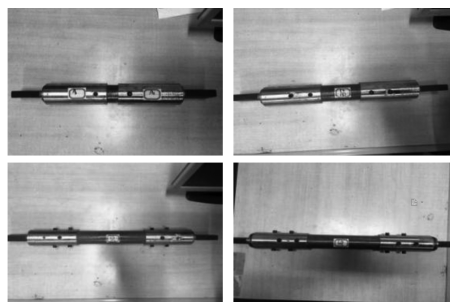


图 5 螺栓连接构件实物图

Fig. 5 Components of bolted connection

左右,螺栓连接构件采用匀速加载,加载速度控制在 1 mm/min。试验主要测量各级荷载作用下应变测点的应变、连接构件的承载力。当加载过程中出现持荷困难,荷载不再继续增加,同时,观测到连接件或连接介质发生破坏(如剪切、剥离、劈裂等破坏模式),即停止试验。

2 胶接实验结果与分析

2.1 荷载-拉伸变形关系及破坏模式

图 6 为不同胶接长度的荷载-拉伸变形曲线。从图中可知,在加载初期,荷载-拉伸变形曲线近似一条直线,在加载后期,曲线增长明显变缓,越接近极限荷载时,变形量增大。当胶接长度只有 34 mm 时,曲线斜率和极限荷载最小;增加到 68 mm 时,曲线斜率和极限荷载明显增大;继续增加胶接长度,曲线斜率和极限荷载变化不大;但胶接长度增加到 150 mm 时,极

限荷载和位移虽有增大,但曲线斜率明显下降,破坏时表现出一定的延性。由此可看出,GFRP 管胶接破坏并不完全是脆性破坏,破坏时具有一定的延性,并且胶接长度越长,破坏时延性越好。

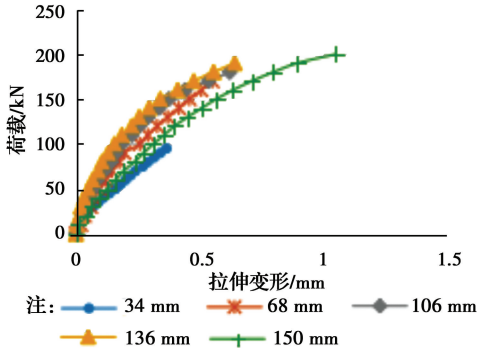


图 6 不同胶接长度的荷载-拉伸变形曲线

Fig. 6 Load-tensile deformation curve of different bonding lengths

胶接连接构件中,每组试件发生的破坏几乎都是 GFRP 管层间发生剥离(见图 7),表层纤维丝被拉出。原因可能是 GFRP 管与钢管连接件胶接连接节点在承受拉伸荷载时,由于荷载路径偏心,粘结界面不仅存在剪应力作用,同时也存在剥离应力。而 GFRP 管横向(厚度方向)强度低,它的层间拉伸强度低于胶黏剂与被胶件的粘结拉伸强度,GFRP 管材容易在胶接端部高拉伸剥离应力作用下发生层间破坏。



图 7 GFRP 管材胶接破坏图

Fig. 7 Debonding failure of GFRP tube

2.2 胶层剪应力分布特征

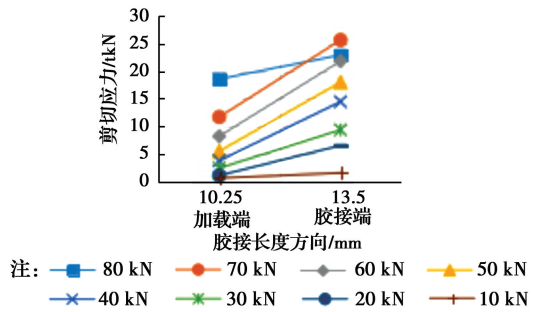
根据静力平衡条件和试验所测应变测点数据可以计算沿长度方向上不同位置段的平均剪切应力 τ_i ,如式(1),再用平滑曲线连接各剪切应力点得出沿胶接长度方向的剪切应力分布曲线。

$$\tau_i = \frac{(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i)E_s A_s}{\pi d h_i} \quad (1)$$

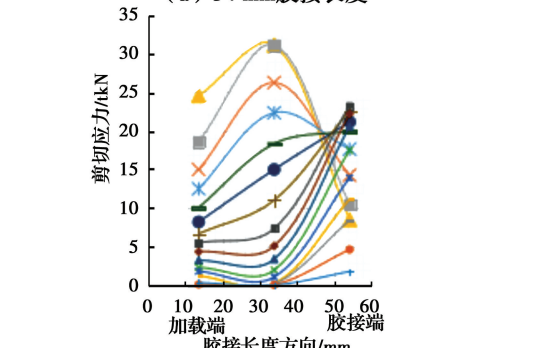
式中: E_s 为不锈钢管弹性模量; A_s 为内外钢套管的实际横截面积; d 为粘结面的直径; h_i 为应变测点距离。

图 8 为编号 1#、2#、5# 试件沿胶接长度方向上不同荷载作用下的剪应力分布曲线,从图 8 可知:胶层沿胶接长度方向截面的切应力(胶层剪应力)分布是不均匀的。在加载初期,1# 试件胶层剪应力从

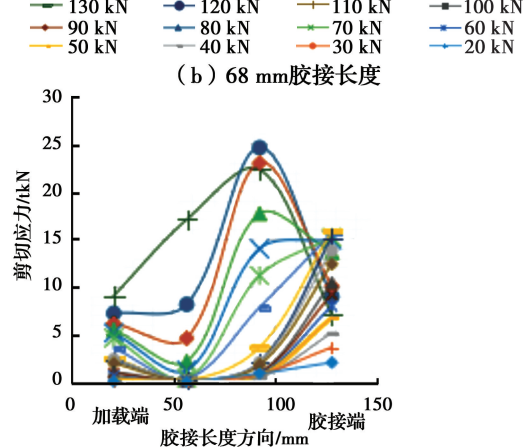
加载端到胶接端逐渐增大;2#、5# 试件中间胶层剪应力趋近于零。随着荷载不断增加,1# 试件胶层剪应力持续增大,直至试件发生破坏;当 2# 试件达到一定荷载时,GFRP 管加载端头(胶接端)处胶层的剪应力最先达到峰值,继续增加荷载时,胶层的剪应力开始出现下降,相邻(朝加载端方向)处胶层的剪应力由较低的应力水平开始迅速增加。在临近极限荷载时,胶层剪应力峰值出现在中间段,曲线呈抛物线特征;5# 试件在胶接端处胶层剪应力达到峰值后,胶层剪应力出现在距胶接端长度 1/3 处,未完全向中间转移。GFRP 管与钢管连接界面失效是一个逐步破坏的过程,由胶接端处往加载端处逐步破坏。



(a) 34 mm 胶接长度



(b) 68 mm 胶接长度



(c) 150 mm 胶接长度

图 8 剪切应力在不同胶接长度上的分布

Fig. 8 Distribution of shear stress on different bonding lengths

根据 GFRP 管材胶接连接中胶层剪应力的分布特征,可知胶粘剂的高应力发生在胶接端,在加载初期荷载的传递主要靠胶接端处的胶层。只有当端头处胶层剪应力达到峰值时,荷载才开始往中间胶层传递,说明沿胶接长度方向的胶层剪应力不能同时达到峰值。虽然,在连接构件接近破坏之前,中间段胶层也传递了较大荷载,但端头处的剪应力已经下降,分担荷载能力减小。故连接区域内胶层发挥的效率是有限的,不能传递较大载荷。

2.3 胶接连接受力机理及破坏过程分析

胶接连接构件在承受拉伸荷载作用下,钢管与 GFRP 管分别发生拉伸变形,导致端头处胶层发生剪切变形(见图 9)。胶层剪应力在加载初期沿长度方向分布特征是两端大,中间小。由于 GFRP 管材与钢管的刚度不等,GFRP 管材比钢管更容易发生变形,节点在承受荷载时,胶接端(右端)处的 GFRP 管变形量比钢管的变形量大,因此,导致胶层高应力发生在胶接端,并随荷载作用增加较快。

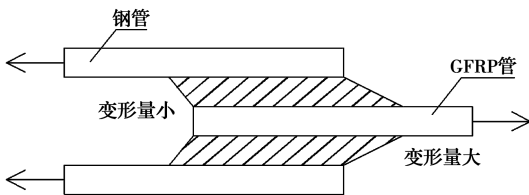


图 9 胶接连接节点处胶层变形示意图

Fig. 9 Diagram of adhesive layer deformation at joint joints

根据双搭接连接剥离应力^[5]和不同胶接长度剪应力分布特点可知,胶接端部处的 GFRP 表层在剥离应力和剪应力作用下最先出现裂纹,如图 10(a)所示。胶层传递荷载能力开始下降,胶接端相邻处(往加载方向)胶层的剪应力由低应力水平开始迅速增加。随着荷载不断上升,胶接端头处的 GFRP 管层间裂缝不断朝加载端方向扩展,如图 10(b)所示。当荷载值达到构件极限承载力时,GFRP 管层间形成贯穿裂缝,GFRP 管发生层间剥离破坏,如图 10(c)所示。

2.4 胶接长度对承载力的影响

先由每组 3 个试件求得试件承载力的平均值,然后再除以胶接面积、管材净截面积、管材极限承载力分别得出试件的平均剪切应力、平均破坏应力、连接效率(见表 3)。由表 3 可知,增加胶接长度能提高胶接连接的极限承载力、连接效率,但平均剪切应力随胶接长度增加而不断减小。

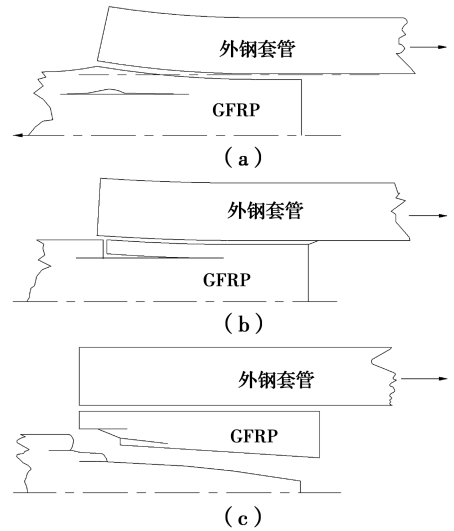


图 10 胶接界面失效过程

Fig. 10 Failure process of bonding interface

表 3 胶接连接构件实验数据

Table 3 Experimental data of bonded connection component

试件组	平均承载力/kN	平均剪切应力/MPa	平均破坏应力/MPa	连接效率/%
1#	92.5	11.84	159.23	36
2#	175	11.2	301.25	68.4
3#	189	8.06	325.35	73
4#	198	6.33	340.85	77.4
5#	206	5.93	354.62	80.5

从图 11(a)胶接长度与承载力关系曲线可知,随胶接长度的增加,极限荷载前期增加较为明显,后期出现明显缓坡。在胶接试件中存在一个有效胶接长度,当胶接长度小于此长度时,构件承载力会随胶接长度增加而增加,而大于此长度时,构件承载力增加较少。试验表明,当胶接长度达到管径的 1.6 倍(68 mm)时,再增加胶接长度,承载力增加并不明显。从图 11(b)胶接长度与平均剪切应力关系曲线可知,随着胶接长度的增加,平均剪切应力不断降低。胶接长度为 34 mm 时,平均剪切应力值最高,但连接效率较低,只达到材料强度的 36%,难以充分发挥材料的强度。从构件承载力、连接效率和经济成本及减轻节点重量等因素考虑,针对该截面尺寸的管材,可取 68 mm 作为 GFRP 管与金属连接件的有效胶接长度。

3 螺栓连接实验结果与分析

3.1 端距对单螺栓连接性能的影响

单排螺栓的 e/d 比值与承载力关系曲线见图

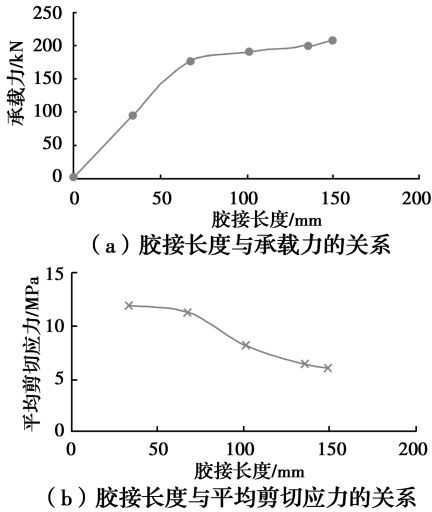


图 11 胶接长度与承载力及平均剪切应力的关系

Fig. 11 Relationship between bonding length ad capacity and mean shear stress

12,当 $e/d=2$ 时,承载力最低,随着 e/d 比值不断增加,极限破坏荷载逐渐增加。当 $e/d \geq 7$ 时,极限破坏荷载达到最大值,此后基本趋于稳定,不再增加。因 GFRP 管材的截面积是固定不变的,所以,其平均破坏应力与承载力的变化趋势相同。

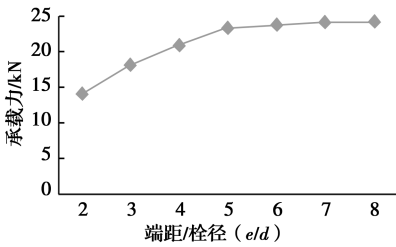


图 12 e/d 比值与承载力的关系

Fig. 12 Relationship between e/d and ultimate load

各试件的破坏模式如图 13 所示,当 $2 \leq e/d \leq 5$ 时,发生的破坏是剪切破坏,与目前复合材料板 $e/d \geq 3$ 时发生挤压破坏的几何参数不符^[5,14-15]。原因可能是试验所使用的 GFRP 管材为拉挤成型的 GFRP 管,主要由纵向玻璃纤维制成,而该几何参数大多是由针对具有一定铺层结构的复合层合板研究而来。复合层合板材由不同方向角度纤维组成,在一定程度上可以限制材料的剪切破坏。当 $e/d \geq 7$ 时,试件全部发生挤压破坏。由此可知,试件在保证发生挤压破坏时,端距与孔径的比值应该大于等于 7。

3.2 螺栓排数对连接性能影响

从多螺栓连接试验结果(表 4)和螺栓排数与承载力关系曲线(图 14)可知,随着螺栓排数增加,但

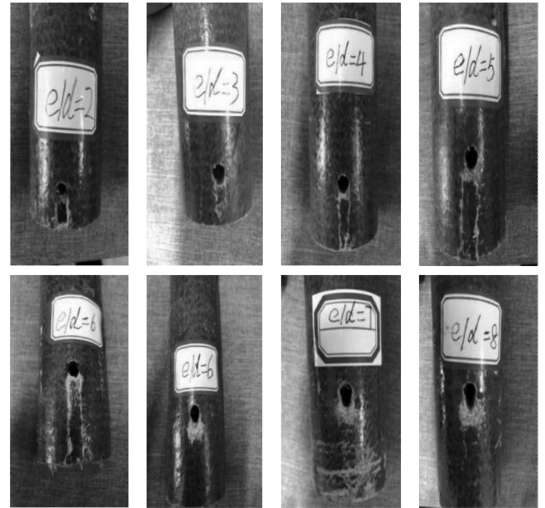


图 13 e/d 比值变化对破坏形式影响

Fig. 13 Effect of change in e/d on failure mode

表 4 多螺栓连接实验结果

Table 4 Experimental results of multiple bolted connection

试件编号	平均破坏荷载/kN	平均破坏应力/MPa	连接效率/%	破坏模式
SJ6	23.986	41.279	9	挤压破坏
SJ8	37.921	65.279	14.8	挤压破坏
SJ9	52.844	90.969	20.6	挤压破坏
SJ10	60.355	103.899	23.6	挤压破坏

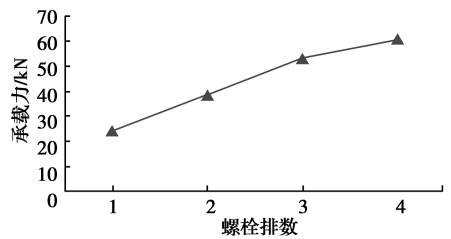


图 14 螺栓排数与承载力关系

Fig. 14 Relationship between row number of bolts and capacity

并非线性增加,GFRP 管螺栓连接的破坏荷载逐渐增大,与金属材料螺栓连接相比有较大差别。从 1 排螺栓连接到 4 排螺栓连接,每增加 1 排螺栓,承载力分别增加了 13.9、14.9、7.5 kN,相对增加连接效率分别为 64%、39%、15%。当螺栓排数大于等于 3 后,破坏荷载增加值变小,连接效率虽有提高,但相对增加连接效率明显降低。以上规律与复合材料层合板螺栓连接规律类似。复合材料多排螺栓连接特性与金属材料有很大不同,对于金属材料连接,当达到极限荷载时,栓孔荷载分配基本一致,而复合材料螺栓连接在达到极限荷载时,栓孔间荷载分配是不均的,分配比例较为复杂,主要与被连接件的相对刚

度有关^[5]。GFRP管螺栓连接承载力最高的为4排螺栓连接,但连接效率只有23%,远没有达到GFRP管材的强度值。

3.3 螺栓连接承载力计算

当螺栓排数较多时,由于栓孔荷载分配的不均匀性,端部螺栓荷载分配要比中间栓孔的荷载分配更高,可以根据试验结果推导出相应的折减系数 β_n 来计算多排螺栓连接的承载力。

根据试验结果,可推导出当螺栓排数取值为 n 排时的折减系数 β_n 。

$$\beta_2 = \frac{P_2}{nP_{br}} = \frac{37.921}{2 \times 23.986} = 0.79$$

$$\beta_3 = \frac{P_3}{nP_{br}} = \frac{52.844}{3 \times 23.986} = 0.73$$

$$\beta_4 = \frac{P_4}{nP_{br}} = \frac{60.355}{4 \times 23.986} = 0.629$$

式中: n 为螺栓排数, P_i ($i=2,3,4$)为 n 排螺栓连接承载力; P_{br} 为单排螺栓发生挤压破坏时的连接承载力; $P_{br}=2\sigma_{br}dt$ 。

从以上多排螺栓连接的折减系数可以得出,当已知GFRP管材多螺栓连接栓孔直径的大小 d ,螺栓排数 n ($n \leq 4$),单螺栓连接栓孔的挤压强度为 σ_{br} ,那么,多排螺栓计算公式为

$$P_n = 2n\sigma_{br}td\beta_i \quad (2)$$

式中: σ_{br} 为栓孔的挤压强度, P_n 为 n 排螺栓连接发生挤压破坏时的承载力; d 为栓孔直径; t 为GFRP管的厚度。

4 结论

通过对拉挤型GFRP管材胶接连接、螺栓连接试验研究可以得出以下结论:

1)胶接连接中胶层剪应力沿长度方向分布不均匀,随着荷载的增加,胶层剪应力峰值由胶接端朝中间段胶层转移。

2)胶接连接中,增加胶接长度可以提高极限承载力,但胶接长度与承载力并不成线性关系。前期增加胶接长度能显著提高构件承载力,但当长度达到管径的1.6倍(68 mm)后,再增加胶接长度对承载力提升并不大,由此可考虑将1.6倍管径作为拉挤型GFRP管材的有效胶接长度。

3)拉挤型GFRP管材螺栓连接在保证不发生拉伸破坏时,端距与栓径的比值在 $e/d \geq 7$ 、排距与螺栓直径比值 $p/d \geq 8$ 范围中可保证连接破坏为偏安

全的破坏形式—挤压破坏。

4)对于中等厚度(厚度为5 mm左右)的拉挤GFRP管型材两种连接方式,胶接连接效率较高,而螺栓连接效率远低于胶接连接。综合考虑连接效率和制作工艺等因素,建议选择胶接连接方式。

参考文献:

- [1] 顾轶卓,李敏,李艳霞,等.飞行器结构用复合材料制造技术与工艺理论进展[J].航空学报,2015,36(8):2773-2797.
GU Y Z, LI M, LI Y X, et al. Progress on manufacturing technology and process theory of aircraft composite structure [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2015, 36(8): 2773-2797. (in Chinese)
- [2] 赵启林,高建岗,潘大荣,等.复合材料-金属组合桁架桥的设计计算现状与问题探讨[J].建筑结构,2017,47(Sup1):824-828.
ZHAO Q L, GAO J G, PAN D R, et al. Present situation and problems of design and calculation of hybrid FRP-steel truss bridge[J]. Building Structure, 2017, 47(Sup1): 824-828. (in Chinese)
- [3] 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.
YE L P, FENG P. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36. (in Chinese)
- [4] 高佳佳,楚珑晟.纤维增强树脂基复合材料连接技术研究现状与展望[J].玻璃钢/复合材料,2018(2):101-108.
GAO J J, CHU L S. Research status and prospect of fiber reinforced resin matrix composites joining technology [J]. FRP / composites, 2018(2):101-108. (in Chinese)
- [5] 谢鸣九.复合材料连接技术[M].上海:上海交通大学出版社,2016.
XIE M J. Joining technology of composite materials [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2016. (in Chinese)
- [6] ZENG Q G, SUN C T. Novel design of a bonded lap joint [J]. AIAA Journal, 2001, 39: 1991-1996.
- [7] AVILA A F, BUENO P. Stress analysis on a wavy-lap bonded joint for composites[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004, 24(5): 407-414.

- [8] CHUANG W Y, TSAI J L. Investigating the performances of stepwise patched double lap joint [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013, 42: 44-50
- [9] SILVA L F M, DAS NEVES P J C, ADAMS R D, et al. Analytical models of adhesively bonded joints: Part I: Literature survey [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, 29(3): 319-330.
- [10] SILVA L F M, DAS NEVES P J C, ADAMS R D, et al. Analytical models of adhesively bonded joints: Part II: Comparative study [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, 29(3): 331-341.
- [11] 邢立峰, 曹安港, 毕凤阳, 等. 纤维增强复合材料螺栓连接性能试验研究[J]. *舰船科学技术*, 2018, 40(3): 102-105.
XING L F, CAO A G, BI F Y, et al. An experimental study on bolt joint performance of fiber reinforced composite materials[J]. *Ship Science and Technology*, 2018, 40(3): 102-105. (in Chinese)
- [12] 黄学优, 张彦飞, 杜瑞奎, 等. 铺层结构对 EP/GF 复合材料沉头螺栓连接失效的影响[J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(3): 65-69.
HUANG X Y, ZHANG Y F, DU R K, et al. Effects of stacking structures on countersunk bolt joint failure of EP/GF composites [J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(3): 65-69. (in Chinese)
- [13] 谢鸣九. 影响复合材料机械连接强度的因素研究[R]. 中国飞机强度研究所.
- XIE M J. Factors affecting the mechanical connection strength of composites [R]. *China Institute of Aircraft Strength*. (in Chinese)
- [14] ROSNER C N, RIZKALLA S H. Bolted connections for fiber-reinforced composite structural members: Experimental program [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1995, 7(4): 223-231.
- [15] 王花娟, 杨杰, 刘新东, 等. 几何参数对玻璃纤维织物/环氧层合板螺栓连接强度影响的实验研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2008(1): 3-5, 29.
WANG H J, YANG J, LIU X D, et al. Experimental study on bolted joints strength of twill glass fabric epoxy composites [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2008(1): 3-5, 29. (in Chinese)
- [16] SMITH L J. Adhesive bonded single lap joints [R]. NASA CR-112236, 1973.
- [17] 胡东晋. GFRP 复合套管拉压受力性能及影响参数研究[D]. 西安:西安理工大学, 2016.
HU D J. Study on tensile and compressive properties and influence parameters of GFRP composite casing [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] LEES J M. Behaviour of GFRP adhesive pipe joints subjected to pressure and axial loadings [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(8): 1171-1179.

(编辑 胡玲)