

碳纤维复合管-铝合金胶接接头拉伸性能研究

王 华^{1,2}，王希杰^{1,2}，王增加^{1,2}

(1. 西安康本材料有限公司，西安 710089; 2. 高性能碳纤维制造及应用国家地方联合工程研究中心，西安 710089)

摘要：以直径为 80 mm，壁厚为 1 mm 的碳纤维复合管-Al 合金胶接接头为研究对象，通过整体拉伸试验比较了不同胶接长度、胶层厚度、外加紧固件对接头破坏载荷的影响。结果表明：胶接面的破坏载荷随着胶接长度的增大先增大后减小，随着胶层厚度的增大而降低。随着胶接长度和厚度的增加，胶接面由复合材料分层破坏和部分胶层的剪切破坏转向胶接界面剥离破坏。在胶接面上施加紧固件能够抵消部分附加弯矩引起的剥离应力，从而提高接头的破坏载荷。胶接长度为 100 mm，胶层厚度为 0.01 mm~0.02 mm，施加三条非均布紧固件的胶接面能够承受最大为 255 kN 的破坏载荷。

关键词：碳纤维复合管；胶接；拉伸性能；破坏载荷；复合材料

中图分类号：TB332 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-8000(2020)06-0095-04

1 前 言

复合材料在航空航天领域使用的比例越来越大，但是在主要承力部件中金属材料仍然不可或缺，因此会不可避免地涉及复合材料与金属异质材料的连接问题^[1]。从结构强度、重量和使用维护角度看，理想的复合材料管结构设计要求尽量减少管的连接接头，实现结构的整体性。但是由于生产、运输、安装过程中对尺寸的限制和使用中的检查、修理等要求，管接头成为复合材料连接中必不可少的部件^[2]。

复合材料管连接部位的受力性能、稳定性和可靠性决定了复合材料结构的完整性和安全性。因此，接头连接技术成为复合材料结构设计的关键环节^[3]。胶接技术可以有效解决异质材料之间的连接问题，并且具有重量轻、应力分布均匀、抗疲劳等优良性能^[4]。国内学者通过解析模型和试验，研究了平面层状结构的复合材料承载力与粘接面之间的关系，据此提出了控制技术^[5-7]。平面层状结构在固化过程中胶接面施加应力均匀，易于提高复合材料的破坏载荷。但是碳纤维管件作为刚性材料，与金属进行胶接后，胶接面张力施加困难，容易造成胶接面缺陷，导致接头破坏载荷不高。目前主要研究的碳纤维复合管直径不大于 50 mm，壁厚为 2 mm~4 mm，并且胶接后接头所承受的拉力也仅有 20 kN~120 kN^[8-11]。本文探讨了直径为 80 mm，壁厚为 1 mm 的碳纤维复合管与铝合金接头的胶接工艺，通过优化工艺参数，将其破坏载荷提升到 250 kN 以上，具

有良好的力学性能。使用该工艺连接的碳纤维复合管-铝合金接头已经通过临近空间飞行验证。

2 试验部分

2.1 管件及连接材料

(1)碳纤维复合管使用西安康本材料有限公司研制的 T700/YPH-69 中温固化环氧碳纤维单向预浸料制备，树脂含量为(40±3)%。预浸料铺层由内向外顺序为：[±45/0/0/±20/0/0/±45/0/0/±20/0/0/±45/3K 平]。采用模压内加压成型工艺进行固化。碳纤维管件胶接面需进行打磨处理。

(2)铝合金接头材料选用高强度的 7075 铝合金，屈服极限为 490 MPa，拉伸强度为 552 MPa，弹性模量 $E = 71 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.33$ ，胶接面作滚花处理^[12]。

(3)胶接剂使用黑龙江省科学院石油化学研究院生产的 J-133 胶黏剂。常温时剪切强度为 37.8 MPa，100 ℃时剪切强度为 15 MPa。

2.2 试验方法及标准

GB/T 5349—2005《纤维增强热固性塑料管轴向拉伸性能试验方法》将碳纤维管状复合材料拉伸性能测试方法分为两种：整体拉伸方法和取样拉伸方法。整体拉伸方法适用于公称直径 $D \leq 100 \text{ mm}$ 的试样，取样拉伸方法适用于公称直径 $D \geq 150 \text{ mm}$ 的试样。公称直径为 100 mm~150 mm 的构件可参照使用^[13]。

收稿日期：2019-10-18
作者简介：王华（1982-），男，硕士，高级工程师，主要从事碳纤维复合材料方面的研究，wanghua0451@163.com。

参照 GB/T 5349—2005,截取 600 mm 长碳纤维试验管件,两端胶接铝合金接头。碳纤维管件胶接面及铝合金接头胶接面均需使用丙酮进行表面清洁,待晾干后方可进行胶接,胶接后的接头常温放置 24 h 即可进行拉伸试验。使用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的型号为 UTM5305X 的 30 T 万能拉伸机进行拉伸,拉伸速度为 2 mm/min。

3 结果与讨论

3.1 胶接长度的影响

增大胶接长度是提高接头整体承载性能的有效方法。从图 1 可以看出:随着胶接长度由 60 mm 增大至 140 mm,接头的破坏载荷先增大然后减小,破坏载荷在 100 mm 长度处达到最大值。搭接长度的增大使得胶层承载面积增大,提高了胶接面抗破坏的载荷。但是较长的胶接长度也更容易使胶接部位出现胶接厚度不均、空隙等缺陷,使得接头的破坏载荷反而随着胶接长度的增大而减小。因此存在一个最佳的胶接长度,使得破坏载荷取得最大值。在本试验中 100 mm 是一个理想的搭接长度。

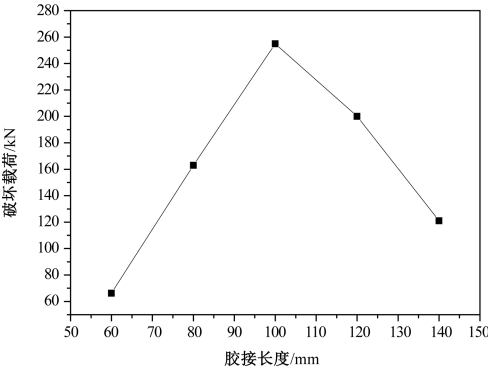


图 1 胶接长度对破坏载荷的影响

Fig. 1 Effect of bonding length on failure load

图 2 为不同胶接长度的胶接面破坏。从图上可以看出,当胶接长度较短时,接头的失效为胶层的粘附破坏,在接头表面没有出现纤维撕裂的迹象。随着胶接长度的增加,胶接面除了有胶层的粘附破坏,还出现了复合材料的分层破坏,并在胶接面内以基体开裂的形式沿 45°纤维铺层方向扩展。接头继续加长,在接头端部的胶接面上出现了胶层和接头的界面破坏,这种破坏能够极大地降低接头破坏载荷。

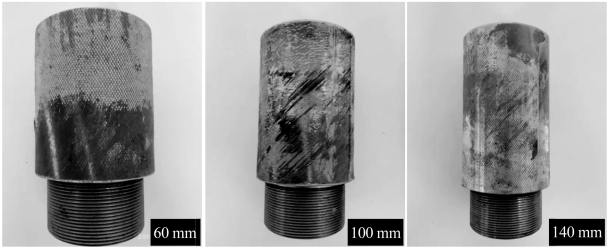


图 2 不同胶接长度的胶接面破坏

Fig. 2 Adhesive joint damage of different bonding length

3.2 胶层厚度的影响

图 3 为胶接接头的胶层厚度与破坏载荷的关系。由图可以看出:随着胶层厚度的增加,胶接面所能承受的破坏载荷趋于变小。当胶层厚度在 0.1 mm~0.2 mm 范围内,胶层承受的破坏载荷变化不大,但是胶层厚度增大到 0.25 mm~0.3 mm 时,胶接面所承受的破坏载荷急剧下降,大约为前者的 40%。

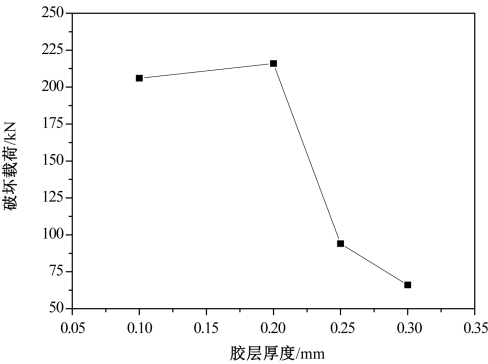


图 3 胶层厚度对破坏载荷的影响

Fig. 3 Effect of adhesive layer thickness on failure load

胶层厚度的增加造成破坏载荷下降的原因可以由图 4 看出。研究破坏后的胶接面发现:胶接厚度不同,胶接面的破坏机理也不相同。当胶层厚度为 0.1 mm~0.2 mm 时,由于胶层较薄,缺陷引起的破坏较小,胶接面的失效形式主要为胶接区的复合材料分层破坏和部分胶层的剪切破坏。当胶层厚度为 0.25 mm~0.3 mm 时,胶接面上发生了由局部涂胶不均匀引起的界面剥离破坏及胶层的剪切破坏。

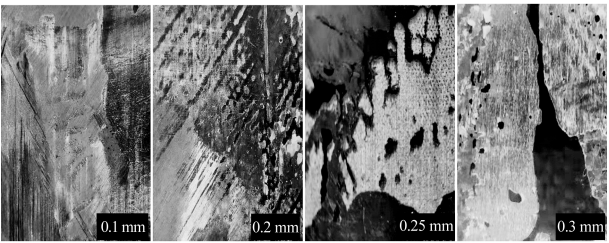


图 4 不同厚度胶层的胶接面破坏

Fig. 4 Damage of different adhesive layer thickness

接头强度随着胶层厚度的增加而降低。这是因为胶层厚度变大,胶黏剂与被粘物表面容易产生界面空隙导致胶层过早破坏,难以承受较大的破坏载荷。本试验中,采用 0.1 mm~0.2 mm 的胶接厚度能够获得良好的胶接效果。

3.3 外部紧固件的影响

胶接接头在受拉伸载荷时,由于载荷中心线与胶层几何中心线不重合,在胶接处产生的附加弯矩会引起次弯曲效应,导致胶接区域端部往往应力集中,降低接头承载能力。为了抑制次弯曲效应,在接头胶接面外侧不同位置安装不同数量的紧固件进行测试,测试结果如图 5、图 6 所示。

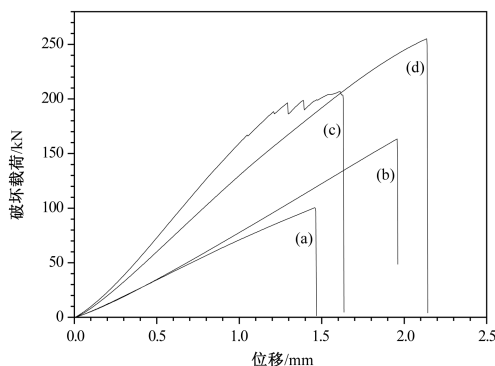


图 5 紧固件对破坏载荷的影响

(a) 无紧固件; (b) 两条均布紧固件;
(c) 三条均布紧固件; (d) 三条非均布紧固件

Fig. 5 Effect of fasteners on failure load

(a) No fastener; (b) Both fasteners; (c) Three evenly spaced fasteners;
(d) Three unevenly spaced fasteners

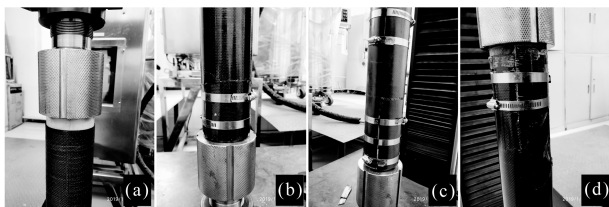


图 6 施加紧固件后的胶接面破坏

Fig. 6 Adhesive joint damage after fastening firmware

结合图 5 和图 6 可以看出:未施加紧固件的 1# 试样仅能承受 100 kN 的拉力,破坏模式表现为界面脱胶;在胶接面施加两条均布紧固件的 2# 试样能够承受 164 kN 的拉力,破坏模式表现为复合材料管断裂及胶接面脱胶;施加三条均布紧固件的胶接面能承受 207 kN 的拉力,破坏模式为复合材料断裂;施加三条非均布紧固件的胶接面能够承受 255 kN 的拉力,破坏时复合材料管基体破碎,管端部紧固件崩断飞溅。

通过拉伸试验发现,施加紧固件能够提高胶接面

的抗拉伸性能。特别是在靠近碳纤维复合管接头一端施加张力能够抑制次弯曲效应引起的附加弯矩,抵消部分剥离应力,从而提高接头胶接面的抗拉性能。

4 结 论

本论文探讨了直径为 80 mm,壁厚为 1 mm 的碳纤维复合管与铝合金接头的胶接工艺,通过拉伸得到如下结论:

(1) 随着胶接长度的增大,胶接面的破坏载荷先增大后减小,在本试验中理想的胶接长度为 100 mm;

(2) 胶接面的破坏载荷随着胶层厚度的增大而降低,胶接的失效模式由复合材料分层破坏和胶层的剪切破坏转向胶接界面的剥离破坏以及胶层的剪切破坏,在本试验中理想的胶层厚度为 0.01 mm~0.02 mm;

(3) 施加紧固件能够抵消附加弯矩引起的剥离应力,从而提高胶接面的破坏载荷。

参考文献

- [1] 郭居上,高维成. 热力载荷作用下复合材料板-铝合金板接头钉载分配与钉孔周边应力分布[J]. 计算机辅助工程, 2018, 27(4): 35-40.
- [2] 关志东, Yang Chihdar. 复合材料管接头拉扭作用下胶层应力分析[J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 96-101.
- [3] 李峰,刘加顺,张冬冬,等. GRPF 管-铝合金管纤维缠绕齿连接接头拉伸试验[J]. 复合材料学报, 2018, 35(10): 2678-2688.
- [4] 唐华清,刘龙权. 新型金属/复合材料混合连接结构试验研究[J]. 航空制造技术, 2017, 22: 45-49.
- [5] 刘遂,关志东,郭霞,等. 复合材料双搭接接头拉伸强度研究[J]. 航空材料学报, 2012, 32(5): 86-91.
- [6] 袁辉,刘鹏飞,王景全,等. 胶层厚度对胶连接头承载力的影响机理与控制[J]. 解放军理工大学学报, 2013, 14(1): 53-57.
- [7] 孙威. 接头端部开槽对复合材料胶接接头性能影响的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018: 39-44.
- [8] 莫丽蓉,陆湘贤,封进,等. FSAE 赛车碳纤维悬架粘接件拉伸强度改进分析[J]. 桂林航天工业学院学报, 2018(3): 329-333.
- [9] 王海鹏,刘梦媛,陈新文. 复合材料管-铝接头胶接结构抗拉性能试验研究[J]. 纤维复合材料, 2013, 27(3): 27-29.
- [10] 鞠苏,肖加余,江大志,等. 复合材料管接头与钢管间摩擦率及其对管接头强度的影响-数值分析[J]. 复合材料学报, 2007, 24(3): 167-172.
- [11] 韩江义,陈力. 碳纤维管与铝合金的胶接强度试验研究[J]. 现代制造工程, 2014(12): 64-67.
- [12] 雷良超,周光明,陆方舟,等. 复合材料缠绕接头拉伸失效性能有限元分析[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(4): 174-178.
- [13] 李建成,张海燕,刘庆云,等. 纤维增强热固性塑料管轴向拉伸性能试验方法: GB/T 5349—2005[S]. 北京: 中国建筑材料工业协会, 2005.

(下转第 104 页)