

高温下复合材料螺栓接头强度的试验研究

徐鲁兵¹, 张宏建², 吕文礼², 温卫东²

(1.中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;

2.南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 目的 研究高温环境对树脂基复合材料螺栓连接接头的强度和破坏模式的影响规律。方法 以 T300/BMP316 复合材料为研究对象, 在室温~310 °C 范围内对不同宽孔比的螺栓连接接头开展拉伸试验研究。结果 获得了不同宽孔比、不同温度环境下树脂基复合材料螺栓连接接头强度和破坏模式的变化规律。结论 不同宽孔比螺栓接头试件的载荷-位移曲线既具有共性特征, 又具有明显的差异。宽孔比对复合材料螺栓接头的拉伸强度和破坏模式均具有明显的影响, 在相同温度下, 接头的拉伸强度随着宽孔比的增大而下降, 其破坏模式将由拉伸-挤压破坏逐步向剪切-挤压破坏转变, 宽孔比越大, 拉伸破坏模式占的比重越小, 而剪切破坏占的比重越大。试验温度虽然没有改变同一宽孔比复合材料螺栓接头的破坏模式, 但对其拉伸强度影响明显, 相同宽孔比下复合材料螺栓接头静载强度随着温度的升高而降低, 这是由于随着温度的升高, 树脂基体的性能下降明显, 使得接头中更易出现拉伸破坏和挤压破坏等, 进而大大降低了复合材料螺栓接头的强度。

关键词: 树脂基复合材料; 螺栓连接; 损伤模式; 载荷-位移曲线;

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.09.010

中图分类号: TJ04; V258 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2017)09-0048-05

Experimental Study on Strength of Bolted Joint of Composites at Elevated Temperature

XU Lu-bing¹, ZHANG Hong-jian², LYU Wen-li², WEN Wei-dong²

(1.China Aviation Powerplant Research Institute (CAPI), Zhuzhou 412002, China;

2.College of Energy & Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: Objective To study effects rules of high temperature on strength and damage modes in bolted joints made of composites. **Methods** Various tensile tests for bolted joints of T300/BMP316 composites with different W/D were conducted at indoor temperature-310 °C. **Results** Change rules on strength and failure mode of bolted joints made of resin matrix composites with different W/D and temperature were obtained. **Conclusion** There are common features and apparent differences in load-displacement curves of bolted joints with different W/D which has apparent influences on the tensile strength and damage mode of bolted joints made of composites. At the same temperature, the tensile strength decreases with the increase of W/D. The damage mode changes from tensile-crushing failure mode to shear-crushing failure mode. When W/D increases, the domination mode changes from tensile failure to shear failure. The damage modes of joints are insensitive to the temperature, but the strength of joints decreases greatly when the temperature increases, which is because it is easy to cause the tensile failure and crushing failure in joints due to the mechanical properties degradation of resin at elevated temperature.

KEY WORDS: resin matrix composites; bolted joint; damage mode; load-displacement curve

收稿日期: 2017-04-22; 修订日期: 2017-05-01

基金项目: 江苏省航空动力系统重点实验室开放课题 (No.NJ20140019)

作者简介: 徐鲁兵 (1981—), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航空发动机涡轮结构度设计。

树脂基复合材料由于具有比刚度、比强度高，抗腐蚀性好及可设计性等优点，在航空、航天、船舶、汽车等多种军民领域得到了广泛的应用。由于工程结构特征、工艺水平限制和使用维修等原因，在设计中需要分析复合材料构件的连接。螺栓连接由于具有承受载荷较高、装卸方便且十分可靠等优点而成为了复合材料连接中最主要的一种机械连接方式，在航空、航天领域中得到了广泛的使用^[1]。如在空客 A380 的机身上，其复合材料结构件部位的连接共需 10 000 多螺钉，一对机翼的连接共需 8 000 个螺钉；在 F-22 上其机翼使用的连接件多达 14 000 个^[2]，现代先进航空发动机上应用复合材料的部位同样也使用了较多的螺栓连接。

由于复合材料自身具有各向异性、脆性、非均匀性等力学特性，螺栓连接处承载复杂，同时存在孔边应力集中和钉孔切断纤维等现象，使得复合材料螺栓连接部位成为了结构中的薄弱环节，容易发生破坏。统计表明，60%~80%的复合材料构件破坏发生在其连接处^[3]。因此，国内外很多学者针对复合材料层合板螺栓连接结构在室温下的强度及破坏形式开展了多方面的研究，建立了多种强度预测模型，取得了较好的结果^[4-10]。

近年来，随着树脂耐高温水平的突破，树脂基复合材料的最高使用温度可高达 350 ℃，使其在先进航空发动机中的应用范围进一步扩大。目前国内外对树脂基复合材料层合板螺栓连接件在高温环境下的强度及破坏形式开展的研究较少，这影响了树脂基复合材料层合板的工程应用进程。

文中在室温~310 ℃范围内对树脂基复合材料层合板螺栓连接接头开展了强度及破坏形式的试验研究，分析了温度及不同温度下宽孔比分别对树脂基复合材料层合板螺栓连接接头强度及破坏形式的影响规律，为其工程应用提供了参考。

1 试验

1.1 试验件设计

试验所采用的试件由 T300/BMP316 复合材料加工制造而成的，试验件的铺层顺序为 [45/-45/90/0/-45/0/45/0/90/0]s。为研究温度及不同温度下宽孔比分别对复合材料层合板螺栓接头强度的影响规律，分别设计了宽孔比为 3，4，5 三种不同尺寸的试验件，试验件的尺寸如图 1 所示。试件的加强片采用 T300/BMP316 复合材料加工制造而成，并采用二次成型法与试件连为一体。

1.2 试验过程

在复合材料层合板连接接头强度试验中，试验件与试验机之间采用双剪夹具进行连接，如图 2a 所示。

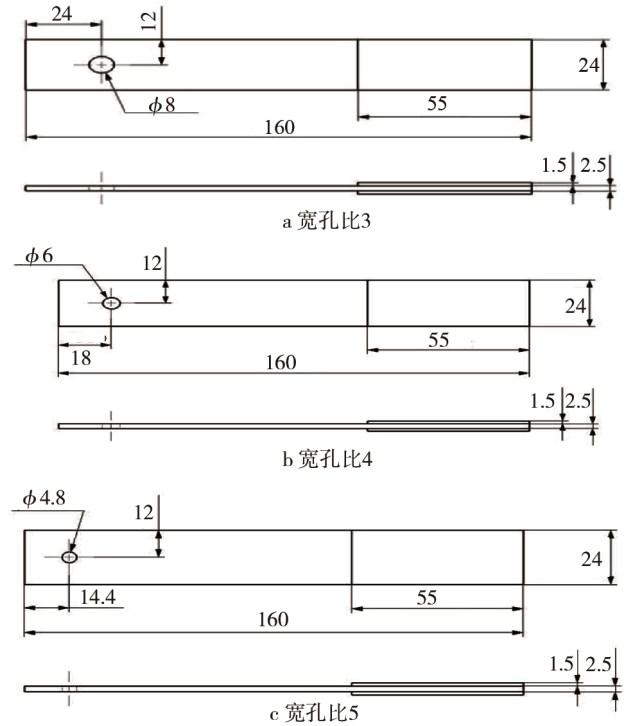
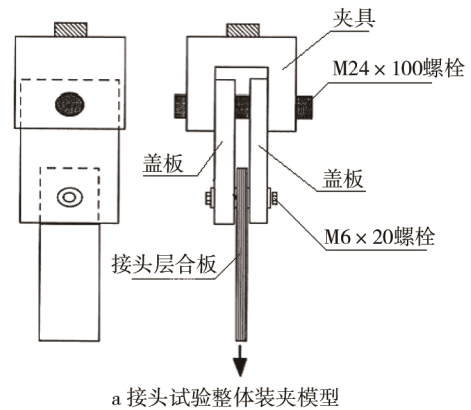


图 1 螺栓接头试件几何尺寸



a 接头试验整体装夹模型

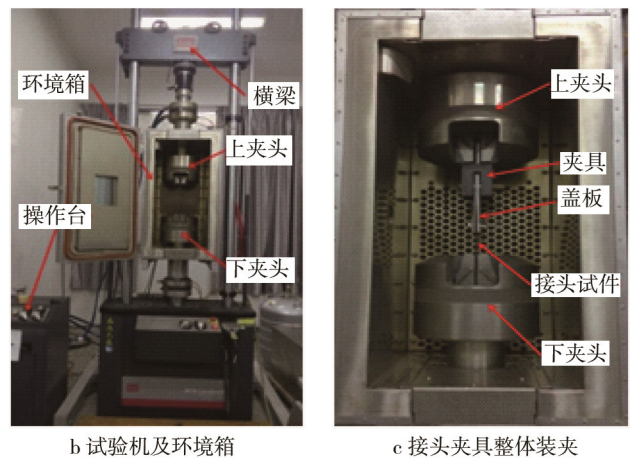


图 2 MTS-Landmark 试验机及接头夹具的整体装夹

夹具材料是 45 钢，盖板材料是弹簧钢，厚度为 3.5 mm。装夹时利用材料为 45 钢的 M24×100 的螺栓将夹具与盖板连接，利用材料为 TC4 的 M6×20 螺栓将

试件与盖板连接。

将三种不同宽孔比的试验件分别在室温, 150, 230, 310 °C 温度下开展拉伸试验研究。试验在 MTS-Landmark 试验机上进行, 该试验机最大载荷为 ± 250 kN, 温度控制范围为 $-129 \sim +315$ °C。试验过程中, 试验件及夹具均处于环境箱中, 该环境箱采用的是开路线圈加热, 能快速将温度加热到所需的试验温度, 并采用闭环 PID 来控制温度变化, 使温度始终保持在试验温度的 ± 2 °C 以内。在整个试验过程中, 加热到所需温度的时间控制在 10~20 min 范围内, 为了保证环境箱内的温度场均匀, 还需保温 10 min。试验机、配套的环境箱以及夹具在试验机上的整体装夹如图 2b 和 c 所示。在进行试验时, 均采用位移加载, 其加载速率为 1 mm/min。

2 试验结果及分析

2.1 接头载荷-位移曲线及破坏模式分析

图 3 给出了宽孔比分别为 3, 4, 5 的复合材料螺栓接头在 230 °C 下的载荷-位移曲线。从图 3 中可以看出, 不同宽孔比螺栓接头试件的载荷-位移曲线具有以下共性特征。

1) 在试件的初始拉伸阶段, 不同宽孔比的试件位移逐渐增大, 而载荷均没有明显增加, 这主要是由于试件与螺栓为间隙配合, 此时试验机的拉伸主要使螺栓和试孔壁逐渐接触, 因此载荷增加不明显。

2) 待螺栓与试件孔壁完全接触后, 载荷基本随位移线性增加。

3) 随着载荷的继续增加, 接头的螺栓孔因受到较大的挤压力开始出现孔边被压碎的现象; 随着位移的继续增大, 由于孔边被挤压破坏使得载荷反而出现了降低的情况, 此时能听到层合板内部出现破坏时发出的“啪啪”声响。

4) 当位移进一步增大时, 原来螺栓孔边被压碎的材料被螺栓进一步挤压压实, 此时螺栓接头又开始承载, 随着位移的增加其载荷又开始出现增大的趋势。

5) 载荷的下降-上升过程将持续几个循环, 当载荷增大到某一数值时, 能清晰地听到一声爆裂般的声音, 接头发生失效破坏, 随位移增大载荷迅速降低。

比较图 3 中三种不同宽孔比复合材料螺栓接头试件的载荷-位移曲线可以看出, 出现初始损伤后的复合材料螺栓接头的再承载能力随着宽孔比的增大而下降。宽孔比为 3 时, 试件在初始损伤出现后依然具有很强的承载能力(初始损伤强度是低于总强度的 50%), 载荷微降后随位移依然呈线性增加趋势; 而宽孔比为 4 和 5 时, 试件在初始损伤出现后虽然还能

继续承载, 但能力下降明显(初始损伤强度约占总强度的 80%~90%), 初次损伤后载荷降幅较大, 并且在随后的较长一段位移范围内载荷随位移呈缓缓的非线性增大。

复合材料螺栓接头试件的载荷-位移曲线是由其破坏模式及过程所决定的, 为此, 对螺栓接头试件拉伸后的断口进行了分析研究。图 4 给出了不同宽孔比的复合材料螺栓接头试件在不同温度下发生整体失效破坏后的断口照片。

在同一温度下, 对比图 4 中不同宽孔比的复合材料螺栓接头的破坏模式, 可以发现: 宽孔比为 3 的复合材料螺栓接头的破坏模式为以拉伸破坏为主, 同时伴有螺栓孔挤压破坏的拉伸-挤压组合破坏模式, 宽孔比为 4 的接头为以螺栓孔挤压破坏为主, 同时伴有拉伸破坏的挤压-拉伸组合破坏模式, 宽孔比为 5 的接头为剪切破坏同时伴有少量螺栓孔挤压破坏的剪切-挤压组合破坏模式。由以上分析可知, 随着复合材料螺栓接头宽孔比的增大, 其破坏模式将由拉伸-挤压破坏逐步向剪切-挤压破坏转变, 宽孔比越大, 拉伸破坏模式占的比重越小, 而剪切破坏占的比重越大。这也是造成不同宽孔比下复合材料螺栓接头试件的载荷-位移曲线不同的主要原因。

在同一宽孔比下, 对比图 4 中不同试验温度下复合材料螺栓接头的破坏模式, 可以得出以下几点。

1) 随着试验温度的升高, 虽然宽孔比为 3 的复合材料螺栓接头的破坏模式依然为拉伸-挤压组合破坏模式, 但是拉伸破坏中更多的表现为基纤剪切和分层破坏, 这也使得高温下的接头强度大大降低。

2) 宽孔比为 4 的复合材料螺栓接头的破坏模式并未随着温度的升高而改变, 但是挤压-拉伸组合破坏模式中拉伸破坏所占的比重随温度的升高而增加。

3) 随着温度的升高, 宽孔比为 5 的复合材料螺栓接头在不同的试验温度下其破坏模式仍是剪切-挤压组合破坏, 但随着温度的升高, 该组合破坏模式中的挤压破坏所占的比重越来越高。

造成以上现象的原因主要是由于复合材料的基体树脂性能受温度的影响较大, 随着温度的升高, 不仅造成了树脂基体性能下降导致更容易破坏, 而且还使得纤维与基体的粘合力下降, 更容易造成基体开裂、基纤剪切和分层等破坏, 从而使得复合材料螺栓接头中更易出现拉伸破坏和挤压破坏等, 大大降低了复合材料螺栓接头的强度。

2.2 螺栓连接接头强度结果及分析

表 1 给出了不同宽孔比的螺栓接头在室温, 150, 230, 310 °C 环境下的静载强度值及同一宽孔比下以室温下的静载强度为基准的接头强度随温度的降低

率。从表 1 中可以看出，螺栓接头静载强度随着温度的升高而降低，且温度越高，静载强度的降低幅度越大，这主要是因为温度的升高降低了树脂的性能，使得拉伸破坏和挤压破坏更容易发生；不同宽孔比下螺栓接头的强度随温度的下降过程略有不同，这主要由于宽孔比不同所造成的接头破坏模式不同所引起的；在 310 °C 时，各宽孔比下的强度下降率均在 40% 左右。

表 2 给出了在室温，150，230，310 °C 环境下以宽孔比为 3 的静载强度为基准时螺栓接头强度随着宽孔比的增大而导致的强度降低率值。从表 2 中可以看出，在不同的温度下，复合材料螺栓连接接头的强度随着宽孔比的增大而下降，不同温度下在宽孔比为 4 时的强度下降率差别较大，但在宽孔比为 5 时，各温度下的强度下降率均在 50% 左右。

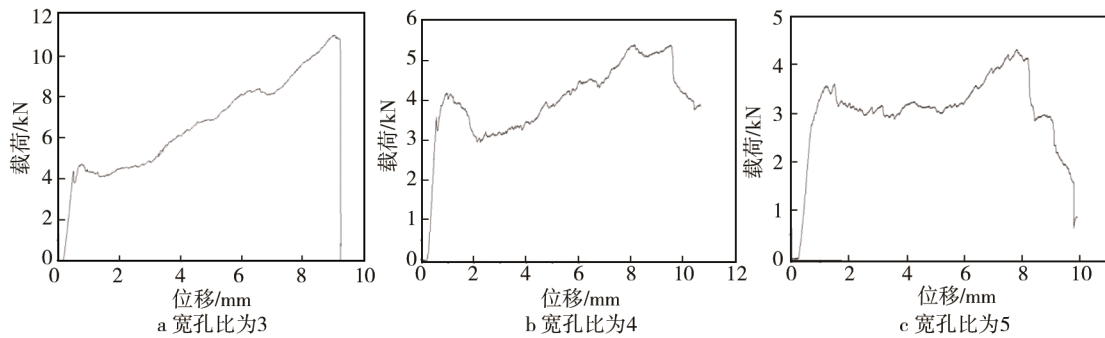


图 3 230 °C 下不同宽孔比的螺栓接头的载荷-位移曲线

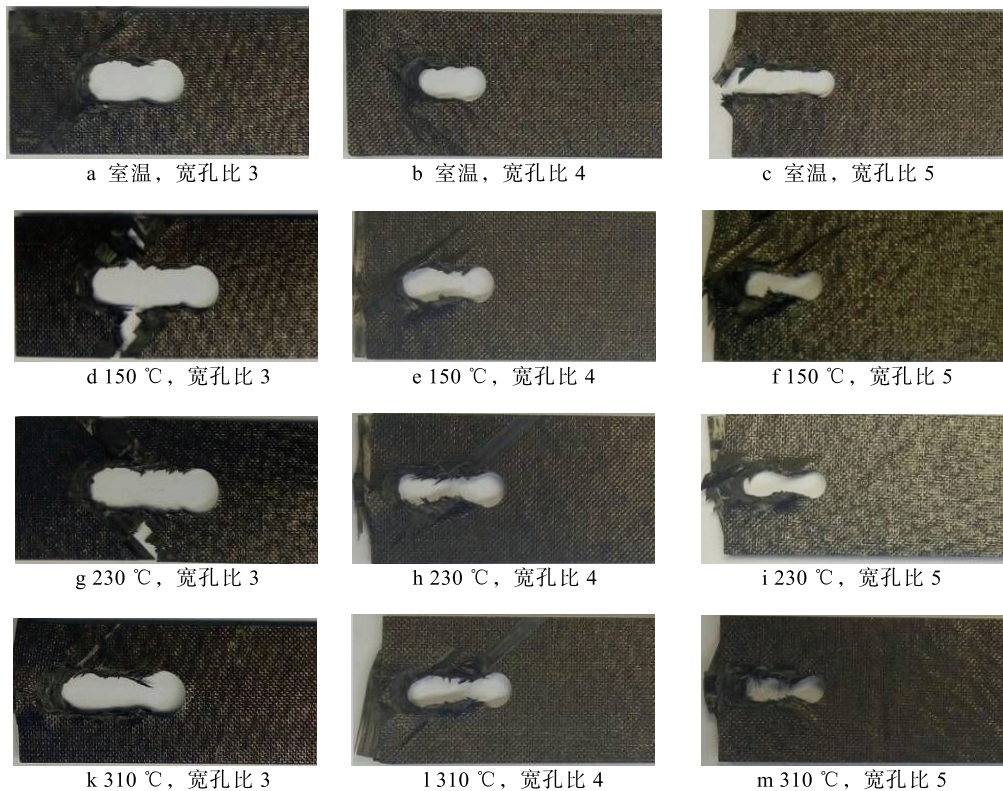


图 4 不同温度、不同宽孔比的复合材料螺栓接头试件失效破坏断口照片

表 1 不同宽孔比螺栓接头的静载强度及随温度的降低率

宽孔比	室温		150 °C		230 °C		310 °C	
	强度值/MPa	降低率/%	强度值/MPa	降低率/%	强度值/MPa	降低率/%	强度值/MPa	降低率/%
3	153.38	—	146.84	4.26	141.66	7.64	90.42	41.05
4	140.71	—	100.64	28.48	88.26	37.28	81.83	41.84
5	74.16	—	67.80	8.58	60.15	18.89	44.73	39.68

表2 螺栓接头的静载强度随宽孔比增大的降低率

宽孔比	室温		150 °C		230 °C		310 °C	
	强度值/MPa	降低率/%	强度值/MPa	降低率/%	强度值/MPa	降低率/%	强度值/MPa	降低率/%
3	153.38	—	146.84	—	141.66	—	90.42	—
4	140.71	8.26	100.64	31.47	88.26	37.7	81.83	9.5
5	74.16	51.65	67.80	53.83	60.15	57.54	44.73	50.53

3 结论

文中在室温~310 °C范围内对树脂基复合材料层合板螺栓连接接头开展了强度及破坏形式的试验研究,分析了温度及不同温度下宽孔比分别对树脂基复合材料层合板螺栓连接接头强度及破坏形式的影响规律,获得了以下结论。

1) 不同宽孔比螺栓接头试件的载荷-位移曲线既具有共性特征,又具有明显的差异。螺栓与试件孔壁完全接触后,载荷基本随位移线性增加,随着载荷的继续增加,复合材料层合板内部出现损伤导致载荷出现多次突降,但并未影响试验件的整体强度,载荷突降后继续随着位移增加直至接头发生最终失效。初始损伤出现后试件的载荷-位移曲线受宽孔比影响较大,这主要是因为宽孔比越大,接头拉伸破坏模式占的比重越小,而剪切破坏占的比重越大。

2) 宽孔比对复合材料螺栓接头的拉伸强度和破坏模式均具有明显的影响。接头的拉伸强度随着宽孔比的增大而下降,宽孔比从3增加到5,各温度下的接头强度下降率均在50%左右。在相同温度下,随着复合材料螺栓接头宽孔比的增大,其破坏模式将由拉伸-挤压破坏逐步向剪切-挤压破坏转变,宽孔比越大,拉伸破坏模式占的比重越小,而剪切破坏占的比重越大。

3) 试验温度虽然没有改变同一宽孔比复合材料螺栓接头的破坏模式但对其拉伸强度影响明显。相同宽孔比下复合材料螺栓接头静载强度随着温度的升高而降低,试验温度从室温增大到310 °C时,各宽孔比下的强度下降率均在40%左右。这是由于随着温度的升高,树脂基体的性能下降明显,使得接头中更易出现拉伸破坏和挤压破坏等,进而大大降低了复合材

料螺栓接头的强度。

参考文献:

- [1] 闵昌万,谭志勇,费庆国. 复合材料热结构螺栓连接刚度试验分析方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(6): 876-880
- [2] 杨乃宾,章怡宁. 复合材料飞机结构设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 1-9.
- [3] 汪裕炳,张全纯. 复合材料的结构连接[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992: 8-14.
- [4] CAMANHO P P, MATTHEWS F L. A Progressive Damage Model for Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates[J]. Composite Materials, 1999, 33: 2248-2280.
- [5] 孙胜,曹增强,甘学东. 复合材料螺栓连接强度与损伤扩展分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(5): 112-115.
- [6] 崔海涛,温卫东. 复合材料层合板单排多钉双剪联接接头强度分析[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 623-628.
- [7] 周松. 复合材料螺栓连接渐进损伤的实验及数值分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] HUHNE C, ZERBST A K, KUHLMANN G. Progressive Damage Analysis of Composite Bolted Joints with Liquid Shim Layers Using Constant and Continuous Degradation Models[J]. Composite structures, 2010, 92: 189-200.
- [9] 王丹勇. 层合板接头损伤失效及疲劳寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [10] 赵美英,周银华,卢焱钧. 基于特征曲线法的复合材料螺栓连接强度三维分析方法[J]. 科学技术与工程学报, 2010, 10(17): 4158-4162.