

# 装配间隙对 GF/E 螺栓连接强度的影响

王花娟 杨杰 刘新东 刘小建

(西安航天复合材料研究所,西安 710025)

**文 摘** 实验研究了装配间隙对 GF/E 层合板螺栓连接性能的影响。在其它条件固定的情况下,选取了不同间隙,测试了装配间隙对螺栓连接强度的影响。实验结果表明:GF/E 层合板螺栓连接承载能力随着间隙的减小而增加,当间隙  $< 0.1$  mm 时,螺栓连接强度达到稳定值。

**关键词** 复合材料,装配间隙,挤压强度

## Fit-Up Gap Effect on Bolted Joints Strength of Twill GF/E Composites

Wang HuaJuan Yang Jie Liu Xindong Liu Xiaojian

(Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025)

**Abstract** On the condition of other factors fixed, the effect of specimen fit-up gap on the bearing strength of twill glass fabric/epoxy composites was performed experimentally. The results show that the load capacity of glass fabric reinforced epoxy laminates with bolted connection is increased by decreasing fit-up gap, however, when the gap is decreased to less than 0.1 mm, an insignificant effect on the load capability of the connection is observed.

**Key words** Composite material, Fit-Up gap, Bearing strength

### 1 引言

复合材料因其高比强度、高比模量、良好的抗疲劳性和材料铺层可设计性等优异特性,在航天航空领域得到日益广泛的应用。在使用中,复合材料往往要同复合材料或金属材料连接起来。螺栓连接是最常见的连接方法,但连接处往往是结构的薄弱环节,承载时最先破坏。影响螺栓连接强度的因素很多,有开孔位置、铺层方向、装配间隙等,很多研究者对开孔位置和铺层方向进行了广泛的实验研究和理论分析<sup>[1~8]</sup>,而对装配间隙研究的较少。

在实际应用中,为便于装卸和维修,螺栓连接往往采用间隙配合,但装配间隙的存在会影响连接强度。Lanza<sup>[9]</sup>研究了装配间隙对正交层合板销钉连接强度的影响。D Nicola 和 Fantle<sup>[10]</sup>研究了装配间隙对 C/E 层合板连接强度的影响。本文研究了装配间隙 GF/E 螺栓连接结构强度的影响。

### 2 实验

#### 2.1 原材料

斜纹高强玻璃布,面密度为  $230 \text{ g/m}^2$ ,厚度为  $0.22 \text{ mm}$ ,南京玻璃纤维研究设计院生产;TD85 环

氧树脂,芳香胺固化剂。

#### 2.2 试样制备

复合材料层合板制作采用织物预浸布模压成型。玻璃布通过多功能浸胶机预浸胶,制作成预浸玻璃布,裁剪后在压制平板上铺设,铺设时各层织物经/纬向严格排布,铺设到要求厚度后,在热压机上热压成型。固化制度:室温  $70 / 3 \text{ h}$   $100 / 3 \text{ h}$   $120 / 3 \text{ h}$   $160 / 6 \text{ h}$  自然降温,成型压力  $4 \sim 5 \text{ MPa}$ 。固化后的层板厚度为  $4 \text{ mm}$ ,树脂质量分数为  $38\%$ 。板形件脱模后按相关标准进行机加,制作试样。GF/E 层合板的力学性能见表 1。

表 1 GF/E 层合板基本力学性能<sup>1)</sup>

Tab 1 Mechanical properties of GF/E composites

拉伸模量 /GPa	压缩模量 /GPa	拉伸强度 /MPa	压缩强度 /MPa	剪切强度 /MPa	泊松比
11.7	15.4	423	270	37.9	0.14

注:1)数据为纬向数据。

试样几何尺寸见图 1,拉伸载荷  $P$  与试样平行。试样长度  $L = 150 \text{ mm}$ ,厚度  $t = 4 \text{ mm}$ ,宽度  $W = 30 \text{ mm}$ ,边距  $E = 25 \text{ mm}$ 。分别制作了 5 种装配间隙的试

收稿日期:2007-08-13

作者简介:王花娟,1978 年出生,硕士,主要从事聚合物基复合材料的研究

样,每组试样数为 5 个。

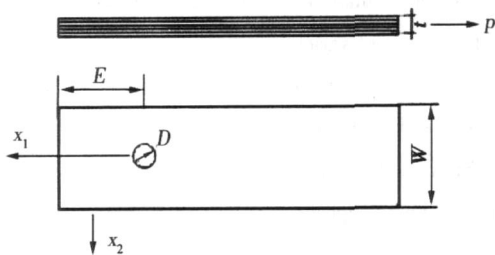


图 1 试样的几何尺寸

Fig 1 Geometry of laminated composite plate with circular hole

### 2.3 性能测试

本研究工作进行双搭接单孔螺栓静拉伸实验,螺栓连接性能测试按照 ASTM D 5961 标准进行。为避免螺栓的破坏,螺栓的强度要远远高于 GF/E 层合板的强度。采用的夹具和加载方式如图 2 所示。实验在 MTS318.25 材料试验机上进行,加载速率为 2 mm/min,螺栓扭紧力矩为 3 N·m,实验过程中设备自动记录加载孔的变形和载荷值,绘制应力—应变曲线。

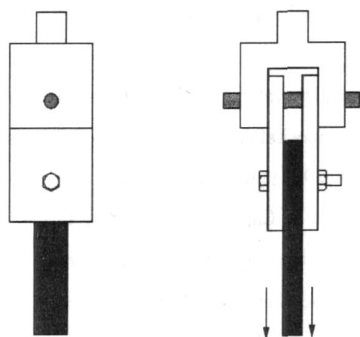


图 2 实验夹具

Fig 2 Testing fixture

最大破坏强度  $\sigma_a$  和挤压强度  $\sigma_b$  的定义分别如下:

$$\sigma_a = \frac{P_{max}}{D \cdot t} \quad (1)$$

$$\sigma_b = \frac{P_b}{D \cdot t} \quad (2)$$

式中:  $P_{max}$  为最大破坏载荷,  $P_b$  为偏移载荷,  $D$  为螺栓直径,  $t$  为试样厚度。

对挤压强度  $\sigma_b$  的解释为:基于新的有效原点,对挤压应力—挤压应变数据进行修正后,将弦向刚度线沿挤压应变轴从原点平移到 2% 的挤压应变的偏移量,确定该直线与挤压应力—挤压应变曲线的交点,作为挤压强度,见图 3。

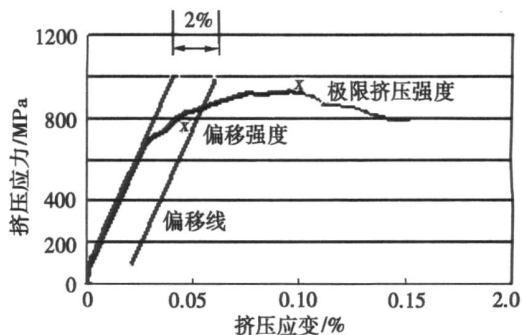


图 3 螺栓挤压破坏曲线

Fig 3 Stress-strain curves for bearing failure of bolted connection

### 3 结果与讨论

图 4 为螺栓孔应力—应变曲线。可以看出,各曲线起始段均近似为直线,间隙越小斜率越大。各曲线随着载荷的增加孔位移不断增加,约到 400 ~ 500 MPa 左右时试样发出噼啪响声,出现初始损伤(曲线出现斜率变化点),连接强度出现不同程度的降低,但试样继续承载,孔位移不断增加,最终破坏。从图 4 中还可以看出,装配间隙越小,螺栓连接性能越好,最大破坏强度也随着装配间隙的减小而增大。

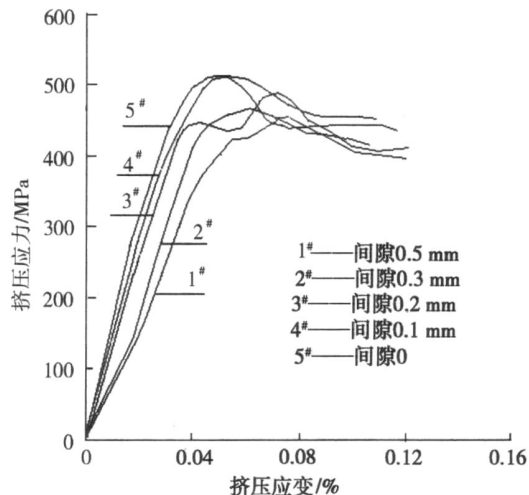


图 4 螺栓连接应力—应变曲线图

Fig 4 Stress-strain curves for bolted-banded laminates

表 2 列出了不同装配间隙试样的挤压强度、最大破坏强度值。

表 2 不同配合间隙的连接强度

Tab 2 Mechanical connection strength of different fit-up gap

试样	名义间隙/mm	孔直径/mm	螺栓直径/mm	装配间隙/ $\mu$ m	挤压强度/MPa	最大破坏强度/MPa
1#	0.5	6.55	5.97	580	411	441
2#	0.3	6.34	5.97	370	440	467
3#	0.2	6.24	5.97	270	456	494
4#	0.1	6.14	5.97	170	467	508
5#	0	5.93	5.97	-4	473	509

从表 2 可以看出,减小装配间隙能不同程度的增加连接强度。由图 4 还可以看出,在相同载荷下,间隙大的试样能吸收更多的能量和有较大的变形。

图 5 为其他间隙下挤压强度和最大破坏强度分别相对于 0 间隙的强度比值,由图 5 可以看出挤压强度和最大破坏强度随着间隙的增加下降趋势及程度基本相似。当间隙在 0~0.1 mm 时,挤压强度和最大破坏强度均变化不大,间隙在 0.1~0.5 mm 时,挤压强度和最大破坏强度下降较大,其中当间隙为 0.5 mm 时,挤压强度和最大破坏强度下降最多,为 13%。因此,当间隙为 0.1 mm 时,再减小装配间隙连接强度增加不明显。

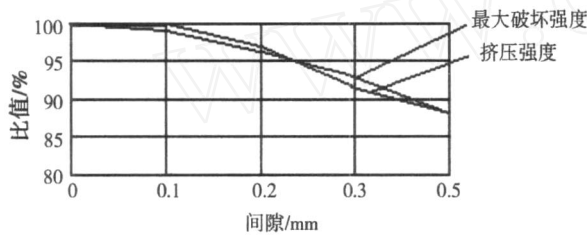


图 5 连接强度下降比值图

Fig 5 Decreasing percentage of strength

#### 4 结论

(1) 复合材料机械连接的装配间隙是影响连接强度的重要因素,螺栓连接复合材料的挤压强度和最大破坏强度均随着间隙的增加而下降,且下降程度很相似。此外,在相同载荷下间隙大的试样能吸收更多的能量和有较大的变形。

(2) 挤压强度和最大破坏强度虽然随着间隙的增加而下降,但当间隙为 0~0.1 mm 时,挤压强度和最大破坏强度达到稳定值,不再随着间隙的增加而有明显下降。

#### 参考文献

1 贾普荣,矫桂琼. 复合材料层压板挤压强度. 宇航材料

工艺, 1997; 27 (3): 48 ~ 50

2 Buket Okutan, Zuleyha Aslan, Ramazan Karakuzu A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-baded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate Science and Technology, 2001; (61): 491 ~ 497

3 Yi Xiao, Takashi Ishikawa Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part : Experimental investigation). Composites Science and Technology, 2005; (65): 1 022 ~ 1 031

4 Yi Xiao, Takashi Ishikawa Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part : modeling and simulation). Composites Science and Technology, 2005; (65): 1 032 ~ 1 043

5 Taner Yy 'maz, Tamer Sy 'nmazcelik Investigation of load bearing performances of pin connected carbon/polyphenylene sulphide composites under static bading conditions Materials and Design, 2007; (28): 520 ~ 527

6 Aktas Alaattin, Dirikolu M H. An experimental and numerical investigation of strength characteristics of carbon-epoxy pinned-joint plates Composites Science and Technology, 2004; (64): 1 605 ~ 1 611

7 Whitworth H A, Othieno M, Barton O. Failure analysis of composite pin loaded joints Composite Structures, 2003; (59): 261 ~ 266

8 Aktas A, Dirikolu M H. The effect of stacking sequence of carbon epoxy composite lam inates on pinned-joint strength Composite Structures, 2003; (62): 107 ~ 111

9 Lanza D S F, Cappello F, Clud G L. On the elastic behaviour of a cross-ply composite pin-joint with clearance fits Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1999; (12): 13 ~ 22

10 D Nicola A J, Fantle S L. Bearing strength behaviour of clearance-fit fastener holes in toughened grap-hite/epoxy laminates Composite Materials Testing and Design, 1993; (11): 20 ~ 37

(编辑 吴坚)