

文章编号:1674-8190(2013)02-186-07

胶-螺混合连接结构强度分析及影响因素研究

孟毛毛,赵美英,弥晓亮,万小鹏
(西北工业大学 航空学院,西安 710072)

摘要:为深入分析胶-螺混合连接结构强度及影响因素,利用 ABAQUS 平台建立胶-螺混合连接三维渐进损伤模型,采用界面层损伤判据及退化方法来模拟胶层的损伤破坏。首先,将胶-螺混合连接结构强度分别与胶接结构、螺接结构强度进行对比,详细阐释胶-螺混合连接结构与胶接结构承载机理及胶接区应力分布形式;然后,分析讨论钉头形式及宽径比对混合连接结构强度和损伤形式的影响。结果表明:胶-螺混合连接结构强度优于胶接结构和螺接结构,并得到了可有效提高结构强度的钉头形式及最佳宽径比。

关键词:复合材料;混合连接;单搭接;埋头钉;损伤

中图分类号: TB33

文献标识码: A

Analysis of the Bonded-bolted Hybrid Composite Joints' Strength and Influences

Meng Maomao, Zhao Meiyang, Mi Xiaoliang, Wan Xiaopeng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to analyze the structural strength of bonded-bolted hybrid composite joints and the influence factors comprehensively, a three-dimensional progressive damage model of bonded-bolted joints is established with ABAQUS and by employing cohesive zone method to simulate the behavior of adhesive. Firstly, the structural strength of bonded-bolted hybrid joints, bonded joints and bolted joints are compared respectively and a detailed explanation is made to the load carrying mechanism and stress distribution in bonding area of bonded-bolted hybrid joints and bonded joints; then, the influences of bolt head type and width to diameter ratio to the structural strength and damage type to bonded-bolted hybrid structure are discussed. The result shows that bonded-bolted hybrid joint is the best among the three in terms of structural strength, and putting forward the best bolt head type and width to diameter ratio to improve the structural strength.

Key words: composite; hybrid joints; single-lap joints; countersunk head; damage

0 引言

复合材料以其高比强度、高比模量、良好的抗疲劳损伤、力学性能的可设计性等优良性质,在航空航天领域的应用越来越广泛。但由于当前技术水平的限制和结构设计、工艺、维修、检查的需要,必须安排一定的设计分离面,这就不得不考虑复合材料结构的连接设计问题。目前工程上复合材料

结构的连接方式主要有机械连接(包括螺栓连接和铆钉连接)、胶接以及混合连接。对机械连接和胶接的相关理论,国内已经有很多学者进行了深入地分析与讨论,但是对胶连接和螺栓连接组合使用的胶-螺混合连接,虽然在很多领域已经大量使用,国内外相关研究和报道却较少,且各自结论不一。白瑞祥等^[1-2]认为胶-螺混合连接对提高接头的承载能力没有很好的效果,其原因主要是胶接和螺栓连接的承载机理不同,导致两种连接方式不能同时发挥作用,故对结构连接强度的提高没有积极影响;Young Hwan Lee 等^[3-4]研究表明,胶-螺混合

收稿日期:2012-06-04; 修回日期:2012-06-28

通信作者:孟毛毛, mengmm324@sina.com

连接对连接强度有积极影响,尤其是接头中的胶连接达到其极限承载力,螺栓连接所承担的荷载亦应同时达到其极限或稍有余量时,连接强度有明显提高,但没有给出具体的几何设计参数和有效的提高方法。因此,本文将胶-螺混合连接分别与胶接和机械连接的连接强度进行对比,并对影响胶-螺混合连接的基本因素进行研究分析。

1 三维渐进损伤模型分析方法

运用 ABAQUS 有限元软件模拟分析复合材料层合板混合连接结构,采用三维渐进损伤模型分析层合板和胶粘剂的损伤模式及损伤扩展情况。

1.1 复合材料的失效判据及材料退化方法

模型需要考虑的复合材料层合板的失效模式包括:纤维拉伸失效、纤维压缩失效、基体拉伸失效、基体压缩失效、纤维-基体剪切、法向分层失效等。本文采用目前被广泛认可的改进后三维 Hashin 准则^[5]来判断层合板的失效,应用 S. C. Tan^[6]提出的材料退化理论对模型中发生失效的纤维与基体进行刚度退化。

具体的退化方式为:当发生纤维拉伸破坏时,仅将 E_1 退化为初始值的 0.07 倍,发生纤维压缩破坏时,将 E_2 、 G_{12} 和 G_{23} 退化至初始值的 0.14 倍;当发生基体拉伸破坏时, E_2 、 G_{12} 和 G_{23} 的退化系数为 0.2,发生基体压缩破坏时, E_2 、 G_{12} 和 G_{23} 的退化系数为 0.4;当发生纤维-基体剪切破坏时,将 G_{12} 、 V_{12} 退化为 0;当发生法向分层破坏时,将 E_3 、 G_{13} 、 G_{23} 、 V_{13} 和 V_{23} 均退化为 0。

1.2 界面层损伤判据及退化

判断界面层损伤起始的二次名义应力准则形式为

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (1)$$

式中: t_n 、 t_s 、 t_t 分别为界面层的法向正应力和两个切向剪应力; t_n^0 、 t_s^0 、 t_t^0 分别为界面层法向和两个切向的临界应力,即界面层的抗拉与抗剪强度;“ $\langle \rangle$ ”表示 $t_n > 0$ 时, $\langle t_n \rangle = t_n$; $t_n \leq 0$ 时, $\langle t_n \rangle = 0$,即认为拉伸可产生损伤,压缩不会产生损伤。

界面层的材料退化采用线性形式,即认为界面层材料刚度随被粘接面间分离位移线性减小。判断界面层完全失效采用 B-K 准则,其形式为

$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left(\frac{G_s}{G_T} \right)^\eta = G^c \quad (2)$$

式中: $G_s = G_n + G_t$, $G_T = G_n + G_s$, $G^c = G_n^c + G_s^c + G_t^c$; G_n 、 G_t 分别为界面层 I 型和 II 型断裂能量释放率; G_n^c 、 G_s^c 、 G_t^c 分别为界面层 I 型、II 型和 III 型断裂临界能量释放率; η 为界面层材料参数,表示 I 型与 II 型、III 型断裂能量释放率的混合比。B-K 准则认为 II 型与 III 型断裂临界能量释放率相等,即 $G_s^c = G_t^c$ 。

1.3 金属板胶接单搭接结构强度对比分析

引用文献[7]中铝板单搭接胶接连接结构试验模型及结果,模型几何尺寸如图 1 所示。

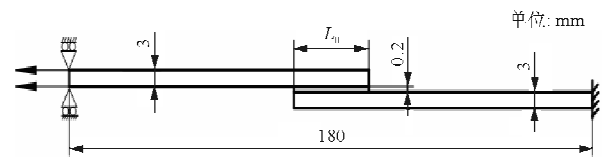


图 1 金属单搭接胶接结构几何模型

Fig. 1 Geometric model of single-lap bonded metal structure

L_0 为搭接长度,分别取 5、10 和 20 mm,采用单边固定,单向 2 mm/min 加载方式,试验载荷为 100 kN,试验环境为常温,结构材料参数如表 1 所示。

表 1 胶粘剂 Araldite AV138 材料参数

Table 1 Material parameters of Araldite AV138 adhesive

参数	数值	参数	数值
E/MPa	4 890	τ_u^0/MPa	30.20
G/MPa	1 560	$G_n^c/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	0.20
τ_u^0/MPa	39.45	$G_s^c/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	0.38

运用 ABAQUS 软件建立三维实体模型来模拟试验,有限元模型如图 2 所示。铝板采用八节点实体应力减缩积分单元 C3D8R 模拟,胶层采用 Cohesive 单元 COH3D8 模拟,采用 Tie 连接将铝板与胶粘剂固接在一起。

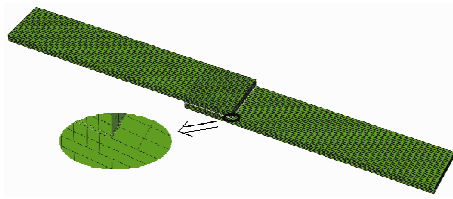


图 2 金属单搭接胶接结构有限元模型

Fig. 2 Finite element model for single-lap bonded metal structure

对单搭接胶接结构有限元模型进行计算分析, 分别得到单搭接连接件在对应搭接长度下的极限载荷, 并与试验值进行对比, 对比结果如表 2 所示。

表 2 不同搭接长度下结构拉伸强度对比
Table 2 Contrast of structural tensile strength for different length of lap

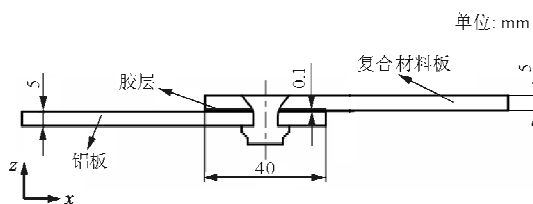
搭接长度 L_0 /mm	试验值/N	计算值/N	误差/%
5	3 285.4	3 055.3	7.00
10	4 085.3	3 946.5	3.40
20	4 231.6	4 080.7	3.57

从表 2 可以看出, 随着搭接长度的增加, 整体结构的承载能力随之增加, 并趋于平缓。因此, 在进行类似结构设计时, 应该适当地选取胶接搭接长度。同时, 对比分析计算值与试验值, 可以看出数值预测结果与试验测试结果吻合良好, 验证了该种建模方式的准确性。

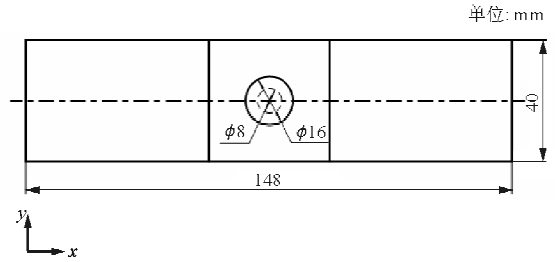
2 不同连接结构强度对比分析

2.1 模型建立

在航空结构中, 很多连接结构都要求具有很好的表面平整度, 故本文采用埋头螺栓单搭接结构来研究混合连接, 其模型如图 3 所示。



(a) 主视图



(b) 俯视图

图 3 复合材料混合连接结构几何模型

Fig. 3 Geometric model of composite mixed-connection structure

被连接板为铝板和复合材料层合板, 螺栓材质为钛合金。复合材料层合板铺层顺序为 $[45/-45/0/0/45/90/-45/0/45/0/-45/90/45/0/-45/0/45/0/-45/0]$, 单层厚度为 0.125 mm, 共 40 层。约束条件为单边固定, 单向静力拉伸, 施加载荷为 3 mm 拉伸位移载荷。

复合材料单向板材料参数如表 3 所示, 复合材料单向板强度如表 4 所示, 胶粘剂、铝板和钛合金材料参数如表 5 所示。

表 3 复合材料单向板材料参数
Table 3 Parameters of composite layer

参数/MPa	数值	参数/MPa	数值
E_1	129 330	μ_{23}	0.429 9
E_2	9 820	G_{12}	5 290
E_3	9 820	G_{13}	5 290
μ_{12}	0.305 6	G_{23}	3 434
μ_{13}	0.305 6		

表 4 复合材料单向板强度
Table 4 Strength of composite layer

强度类型/MPa	数值
纤维拉伸强度 X_T	1 723
纤维压缩强度 X_C	1 233
基体拉伸强度 Y_T	70
基体压缩强度 Y_C	223
剪切强度 S	134

表 5 胶粘剂、铝板和钛合金材料参数
Table 5 Material parameters of adhesive,
aluminum plate and titanium alloy

材料名称	参数/MPa	数值
胶粘剂	E	375
	G	140
	τ_0	65.6
	τ_s	110.5
	τ_r	110.5
	G_n^C	0.252
	G_s^C	0.665
	G_f^C	0.665
铝合金	E	71 800
	μ	0.33
钛合金	E	116 000
	μ	0.34

由于混合连接结构为 x 轴几何对称模型,为缩短计算时间,提高计算效率,本文建立对称简化模型,如图 4 所示。层合板、铝板以及螺栓采用八节点减缩积分单元 C3D8R 来模拟。为能更好地模拟埋头钉连接结构,考虑螺母对搭接结构的紧固作用,并在各部件相互接触部分设定接触,同时采用 Cohesive 单元 COH3D8 模拟胶层,与上下搭接板采用 Tie 连接固接在一起。

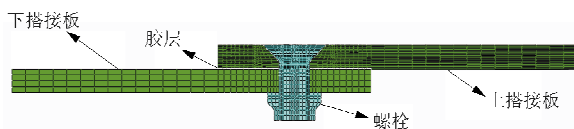


图 4 混合连接结构对称简化模型

Fig. 4 Simplified model of composite mixed-connection structure

2.2 强度对比分析

建立与混合连接几何参数相同的机械连接和胶接模型,并施加相同的约束条件和载荷方式,对比三种连接方式的结构强度,连接强度值如表 6 所示,模拟计算结果如图 5 所示。

表 6 三种连接结构连接强度对比

Table 6 Contrast of structure strength for three joints

连接形式	极限载荷/kN
机械连接	42.75
胶接连接	113.61
混合连接	115.08

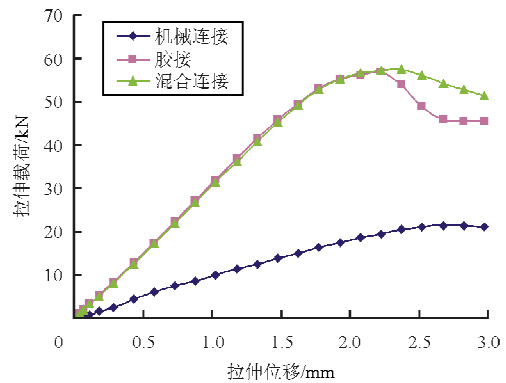


图 5 不同连接结构位移-载荷曲线

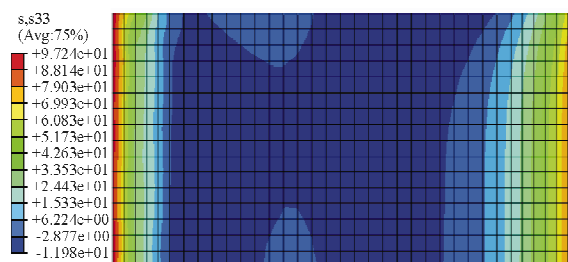
Fig. 5 Displacement-load curve for different joints

从表 6 可以看出,混合连接的结构强度最高,胶接结构次之,机械连接结构强度最低;但前两者的极限强度相差不多,都明显高于机械连接结构强度,这与文献[4]的研究结果相同。

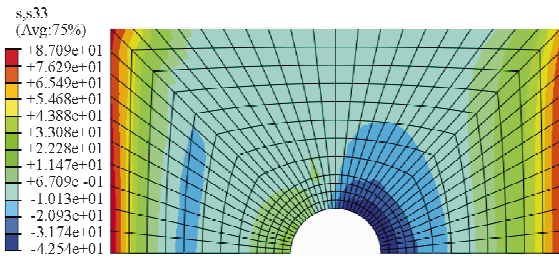
从图 5 可以看出,在加载过程中,混合连接结构的位移-载荷曲线与胶接结构基本重合,可以推测该结构最初的载荷主要由胶层来承担。随着载荷的增大,胶层逐渐发生损伤失效,位移-载荷曲线开始出现不同,尤其在达到强度极限时,胶接结构承载能力迅速下降,而混合连接结构则缓慢下降,这说明在胶层失效后,螺栓开始发挥承载作用。因此,混合连接结构比胶接结构具有更高的强度,且在发生破坏时不会突然失效。

2.3 胶层区应力对比分析

由结构强度对比分析可以看出,混合连接结构和胶接结构强度接近,都明显大于机械连接结构,为此,进一步深入对比分析混合连接与胶接结构的搭接区域应力分布情况。胶接结构和混合连接结构胶层分别达到极限载荷时的法向应力云图如图 6 所示。



(a) 胶接结构



(b) 混合连接结构

图6 胶层法向应力云图

Fig. 6 Stress cloud for normal direction in adhesive

从图6可以看出:胶接面在边缘处应力达到最大,但是仍未达到胶层的破坏强度极限;分析胶层左右端部的应力峰值,可以看出两种连接方式均在胶层右端,即下搭接板端部出现最大法向应力。由此可以推断,混合连接与胶接结构均在此处发生最终的损伤破坏。

混合连接与胶接结构搭接区域剪切应力及法向应力曲线如图7所示。

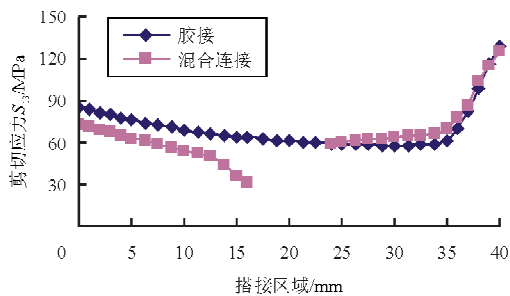
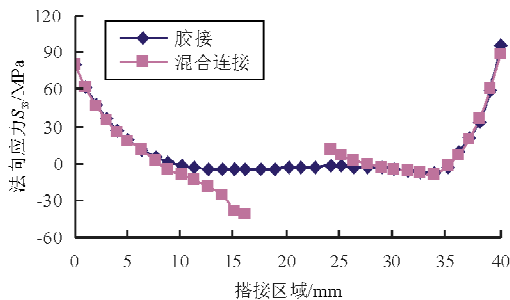
(a) 搭接区域剪切应力 S_{13} (b) 搭接区域法向应力 S_{33}

图7 胶接与混合连接结构应力曲线

Fig. 7 Stress curve of bonded and mix-connection structure

从图7可以看出:胶接形式由于其结构完整性,使得剪切应力 S_{13} 和法向应力 S_{33} 连续变化;混合连接结构中由于机械连接作用,破坏了层合板、胶层的连续性,导致混合连接结构的剪切应力 S_{13}

和法向应力 S_{33} 在螺栓连接位置出现应力突变,且在螺栓孔左端胶层应力出现明显下降。

混合连接的应力突变均发生在胶层应力较小的区域,并未对整个结构的承载能力造成严重影响;此外,由于混合连接结构在拉伸载荷作用下,剪切应力与法向应力均需要通过螺栓件来传递,这样有效地延缓了胶层两端极限应力的出现,同时螺栓与螺母的法向约束作用可在一定程度上阻止结构损伤地快速扩展,从而提高整体结构的连接强度。

3 混合连接结构强度的影响因素

3.1 钉头对混合连接结构强度的影响

在混合连接结构中,由于埋头钉的几何特性,造成连接结构的几何尺寸以及应力分布的不对称,增加了连接接头处胶层或胶接面失效的危险。下面以图3模型为基础,研究分析埋头钉钉头方向对混合连接结构强度的影响。

分别取铝-铝凸头钉连接、铝-铝埋头钉连接、复合材料-铝-1 埋头钉连接、复合材料-铝-2 埋头钉连接(-1表示埋头钉朝向复合材料板,-2表示埋头钉朝向铝板)四种混合连接方式,各材料参数如表3所示。取上下搭接板贴近胶层一侧的中线节点为特征节点,搭接区域取上下搭接板算术平均值,得到四种连接结构弯曲变形曲线如图8所示。

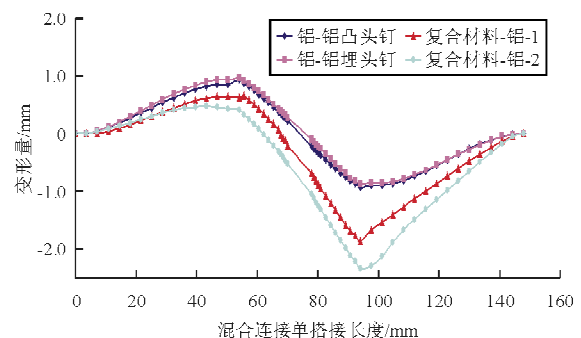


图8 不同连接方式结构变形曲线

Fig. 8 Deformation curve for different joints

由于单搭接结构的左右拉伸载荷不同轴,在搭接处会有附加弯矩形成,使接头产生法向位移,即次弯曲效应。当结构的约束采用单边固支,单边加载时,层合板的变形曲线便呈现“Z”字形。各连接结构搭接板端部变形量如表7所示。

表 7 不同连接结构搭接板端部变形量

Table 7 Deformation at the free end of adherend for different joints

钉头形式	上搭接板端部变形量 S_1 /mm	下搭接板端部变形量 S_2 /mm
铝-铝凸头钉	0.930 3	0.930 0
铝-铝埋头钉	0.934 5	0.849 9
复合材料-铝-1	0.647 0	1.860 8
复合材料-铝-2	0.474 4	2.331 8

对于铝-铝凸头钉连接结构,由于连接结构完全对称,且材料参数也相同,故上下连接板端部变形量相同。铝-铝埋头钉连接结构,虽然上下搭接板材料相同,但是因为埋头钉造成上搭接板的开口不规则,使得搭接板在孔边处受力不均匀,贴近胶层处挤压载荷较大,远离胶层处挤压载荷较小,最终导致上搭接板端部变形量 S_1 略大于下搭接板端部变形量 S_2 。

对于复合材料-铝连接结构,上搭接板端部变形量 S_1 明显小于下搭接板端部变形量 S_2 ,其主要原因是铝板的弯曲刚度大于层合板,导致上下搭接板在同一附加弯矩作用下,结构发生严重不对称变形。进一步对比分析复合材料-铝-1 与复合材料-铝-2 变形曲线,当埋头钉朝向铝板时,下搭接板端部变形量 S_2 明显大于埋头钉朝向层合板的情况,这是由于当埋头钉钉头朝向铝板时,铝板孔边的载荷不均匀,加剧了铝板端部向外翘,当层合板的弯曲刚度小于铝板时,就会导致铝板端部变形量更大;而当埋头钉朝向层合板时,由于铝板的弯曲刚度大于层合板,约束了层合板的端部变形,使整个层合板的端部变形量主要由附加弯矩产生。

复合材料-铝-1 与复合材料-铝-2 的位移-载荷曲线如图 9 所示。

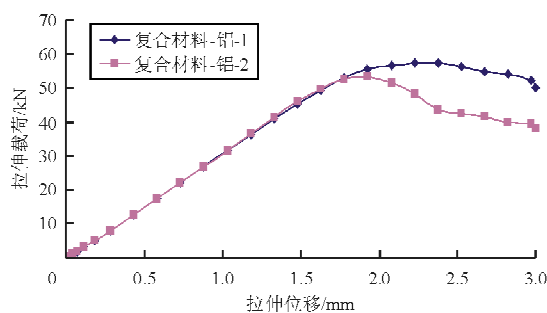


图 9 不同钉头方向位移-载荷曲线

Fig. 9 Displacement-load curve for different nail head directions

从图 9 可以看出,埋头钉朝向层合板的连接方式优于埋头钉朝向铝板的连接方式。当埋头钉朝向层合板时,因为铝板的弯曲刚度大于层合板的弯曲刚度,可以有效地延缓层合板在铝板端部发生的分层失效;当埋头钉朝向铝板时,由于埋头钉的作用,加剧了铝板端部法向应力集中,最终导致整个连接结构在此处发生层合板的分层损伤破坏,这与 2.3 节中的推断相吻合。因此,在设计混合埋头单搭接结构时,应主要考虑搭接板弯曲刚度对整体结构的影响,还应将螺栓头朝向弯曲刚度较小的一侧,有利于提高整体结构的连接强度。

3.2 板宽径比对混合连接结构强度的影响

保证其他参数不变,改变层合板的宽度,研究不同板宽下,结构的载荷分配情况。不同宽径比 (W/D) 与结构螺栓承载比例、结构极限强度关系图如图 10 所示。

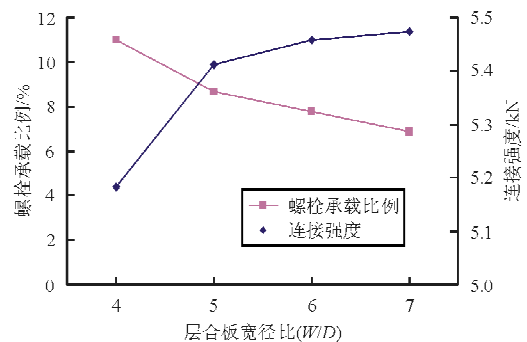


图 10 宽径比与螺栓载荷、连接强度曲线

Fig. 10 Curve of bolt load and connection strength change with wide-diameter ratio

从图 10 可以看出,随着 W/D 不断增大,螺栓的承载比例减小,且减少的比例趋于平缓;同时,结构的连接强度随着 W/D 的增大而增大。当 $W/D = 4$ 时,单搭接的搭接面积相对较小,胶层的承载能力较弱,随着 W/D 的不断增大,搭接区域中胶接面积所占的比例不断增加,结构的强度明显增大,且胶层的承载比例也随之不断增大,因此螺栓的承载作用被削弱,螺栓承载比例逐渐下降。

4 结 论

(1) 对于单钉连接结构,胶-螺混合连接的结构强度略高于胶接连接,远高于螺栓连接。

(2) 混合连接结构在承载初期主要由胶层来

传递载荷,在结构发生胶层失效后,螺栓开始发挥连接作用。因此,胶-螺混合连接结构提高了整体结构的连接强度。

(3) 混合埋头单搭接结构在发生胶层破坏时,首先在刚度较大的搭接板端部发生。在设计类似结构时,应该主要考虑搭接板拉伸与弯曲刚度对整体结构的影响,同时埋头钉钉头朝向弯曲刚度较小的搭接板有利于提高结构连接强度。

(4) 宽径比对混合连接结构强度的影响分析表明,随着板宽的不断增大,结构的连接强度也随之增加,螺栓的承载比例逐渐降低;选取适当的宽径比,对提高混合连接结构的承载性能有利,针对本文模型,宽径比应该选为5左右。

参考文献

- [1] 白瑞祥,郭兆璞,陈浩然,等. 复合材料层合板、壳胶-铆混合连接件有限元分析[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(3): 280-284.
Bai Ruixiang, Guo Zhaopu, Chen Haoran, et al. Finite element analysis of adhesive-bolted joint for composite plate and rotary shell structures[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(3): 280-284. (in Chinese)
- [2] Hart-Smith L J. Bonded-bolted composite joints[J]. Journal Aircraft, 1985, 22(11): 993-1000.
- [3] Young Hwan Lee, Do Wan Lim, Jin Ho Choi, et al. Failure load evaluation and prediction of hybrid composite double lap joints[J]. Composite Structures, 2010, 92(12): 2916-2926.
- [4] Jin Hwe Kweon, Jae Woo Jung, Tae Hwan Kim, et al. Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding[J]. Composite Structures, 2006, 75(1-4): 192-198.
- [5] 陈坤艳,林志伟. 复合材料 π 接头渐进失效分析[J]. 计算机辅助工程, 2011, 20(3): 19-24.
Chen Shenyang, Lin Zhiwei. Progressive failure analysis on composite π joint[J]. Computer Aided Engineering, 2011, 20(3): 19-24. (in Chinese)
- [6] Tan S C. Tensile and compressive notched strength of PEEK matrix composite laminates[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1987, 6(3): 253-267.
- [7] Campilho R D S G, Banea M D, Pinto A M G, et al. Strength prediction of single and double-lap joints by standard and extended finite element modeling[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011, 31(5): 363-372.

作者简介:

孟毛毛(1988-),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料连接结构分析与设计。

赵美英(1962-),女,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器结构设计、复合材料结构分析与设计、智能材料结构设计等。

弥晓亮(1986-),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构设计。

万小鹏(1962-),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器总体设计、飞行器结构设计。

(编辑:马文静)