

复合材料层板单钉沉头螺栓连接结构拉伸性能

Tensile Property of Single Countersunk Bolt Composite Laminate Joints

黄文俊¹, 孙永波², 程小全³, 聂宏¹

(1 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016;

2 中国民航大学 工程技术培训中心, 天津 300300;

3 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

HUANG Wen-jun¹, SUN Yong-bo², CHENG Xiao-quan³, NIE Hong¹

(1 College of Aerospace Engineering, Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2 Engineering Training Center, Civil Aviation University of

China, Tianjin 300300, China; 3 School of Aeronautic Science

and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

摘要: 通过 ABAQUS 软件建立三维累积损伤有限元模型, 计算复合材料层板单钉沉头螺栓连接结构的条件挤压载荷, 并对其损伤机理与破坏过程进行分析; 选用适合该类结构层板的损伤判据与衰减准则进行验证。计算获得的初始挤压破坏载荷与实验结果吻合良好, 说明所建模型的有效性。在此基础上, 分析了接触面摩擦、螺栓刚度和连接金属板刚度等因素对连接结构拉伸性能的影响。结果表明: 接触面摩擦因数和螺栓刚度对结构拉伸性能的影响较为明显, 金属板刚度的影响很小。

关键词: 复合材料层板; 单钉沉头螺栓连接; 拉伸性能; 损伤

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.12.002

中图分类号: V214.8 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2013)12-0008-05

Abstract: A 3D finite element progressive damage model was established with ABAQUS software. The offset bearing failure load of the single countersunk bolt composite laminate joint was calculated, and the damage mechanism and failure course were analyzed. Laminate damage criteria and stiffness attenuation rules for this type of structure were applied and verified. The numerical results indicate good agreement with the test results, which prove validity of this model. The influence of the contact surface friction, bolt stiffness and stiffness of the connecting metal plate on the joint tensile property is studied. The results show that the contact surface friction factor and bolt stiffness have a great effect on the joint tensile performance, but the effect of the metal plate stiffness can be ignored almost.

Key words: composite laminate; single countersunk bolt joint; tensile property; damage

由于复合材料具有比强度高、比刚度大以及材料可设计性强等优点, 在航空航天以及其他工业领域中得到了越来越广泛的应用。对于飞机结构的某些部位, 如蒙皮, 凸头连接难以满足气动外形光滑度的要求, 需要改用沉头连接。目前, 先进飞机表面大都是复合材料层板结构, 因此, 复合材料层板沉头螺栓连接在飞机结构中的应用非常普遍。

国内外对于复合材料层板沉头螺栓连接拉伸性能及其损伤机理的研究工作较少^[1]。M. Chishti 等^[2]通

过实验研究了复合材料层板单钉单搭沉头螺栓连接结构的承载能力, 分析了层板的损伤机理, 同时还研究了螺栓拧紧力矩、装配间隙和沉头半径对损伤扩展和接头强度的影响。B. Egan 等^[3]建立了单钉单搭复合材料层板沉头螺栓连接结构非线性有限元模型, 分析了不同装配间隙下螺栓孔附近层板的应力分布情况, 得到了不同铺层形式层板连接结构的应力-应变曲线, 发现了沉头端附近铺层分担的载荷较大。

本工作是在复合材料层板沉头多钉连接钉载分配

影响因素研究的基础上^[4],利用 ABAQUS 软件建立复合材料层板沉头螺栓连接三维累积损伤有限元模型,选择合适的铺层失效判据与材料性能衰减准则,对连接结构的初始挤压破坏载荷与损伤机理进行研究,同时分析了接触面摩擦、螺栓刚度以及连接金属板刚度对接头拉伸性能的影响。研究结果可为复合材料沉头螺栓连接结构的设计与分析提供一定的参考。

1 层板单钉沉头螺栓连接结构建模

图 1 为层板沉头螺栓连接三维有限元模型网格图。单搭连接结构在单向拉伸载荷作用下,载荷作用在两个连接板的中面上。由于载荷偏心,结构在连接部位会产生附加弯矩和面外变形,即次弯曲。次弯曲是单搭连接结构的固有属性,它不仅会改变接头的局部应力、应变场,还会影响连接接头的承载能力。因此,单搭连接比双搭连接结构的力学行为更复杂^[1]。

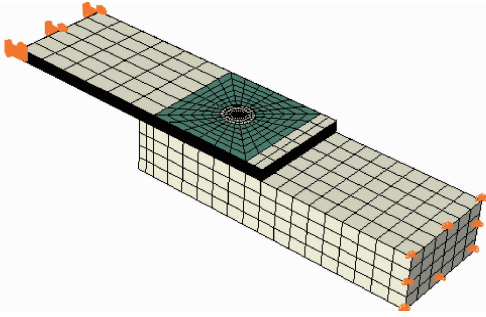


图 1 层板沉头螺栓连接结构三维有限元模型网格图
Fig. 1 3D FEM mesh of the countersunk bolt composite laminate joint

通过 ABAQUS 创建结构有限元模型时,选用 C3D8R 缩减积分线性单元,不但具有较好的弯曲性能,还可用于处理高强度问题。但是,单元大变形时会导致模型中的网格畸变^[5],所以,在高应力区,如复合材料层板螺栓孔周围,选用了协调模式下的全积分线性单元 C3D8I,其他非应力集中区则选用 C3D8R 单元^[3]。

沉头螺栓连接结构中的接触面较多,对其处理得是否恰当会直接影响所建模型的成败。对于复合材料层板与金属螺栓的接触按硬接触处理,采用库仑摩擦因数和有限滑移假设。图 2 给出了模型主从面的定义示意图。计算过程中,模型会遇到接触抖动问题。该问题的出现是由于从表面上的节点在开与合之间不断变换,导致相互作用严重中断,进而引起计算不收敛。解决这一问题首先须要考虑自动侵入容限,然后通过使用非对称方式和稳定节点来改善模型计算的收敛

性。由于稳定节点的黏性阻尼引起的能量损失对于计算结果影响很小,这里将其忽略不计^[6]。

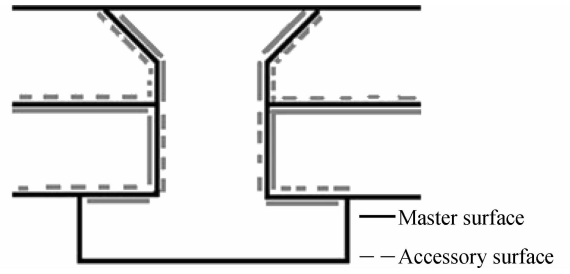


图 2 沉头螺栓连接模型主从面定义示意图
Fig. 2 Master and accessory surfaces definition of the countersunk bolt joint model

连接结构模型的一端为固支,另一端沿连接板平面受拉(图 1)。由于层板中角铺层相对结构纵向中面不具备对称性,因此不利用对称原理来减小模型尺寸与计算规模^[7]。

2 铺层失效判据与性能衰减准则

采用 Hashin 分类损伤判据^[8],判断复合材料层板在螺栓挤压载荷作用下各单元铺层是否发生了基体开裂、纤维断裂或纤维-基体剪切破坏等形式的损伤。分类损伤判据的具体表达式为

(1) 基体拉伸破坏 ($\sigma_{22} > 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

(2) 基体压缩破坏 ($\sigma_{22} < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

(3) 纤维拉伸破坏 ($\sigma_{11} > 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

(4) 纤维压缩破坏 ($\sigma_{11} < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

(5) 纤维-基体剪切破坏 ($\sigma_{11} < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

(6) 拉伸分层 ($\sigma_{33} > 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (6)$$

(7) 压缩分层 ($\sigma_{33} < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{Z_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (7)$$

式中: σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} 分别代表铺层轴向、横向以及层板厚

度方向的正应力分量; $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$ 代表铺层 3 个方向的剪切应力分量; X_T, X_C 代表铺层轴向的拉伸强度和压缩强度; Y_T, Y_C 代表铺层横向的拉伸强度和压缩强度; Z_T, Z_C 代表厚度方向的拉伸强度和压缩强度; S_{12}, S_{13}, S_{23} 代表铺层面内和层间剪切强度。

对于已经损伤的铺层单元,采用表 1 给出的 T300/QY8911 层板材料性能衰减准则进行材料性能衰减^[9-11]。表 1 中的 E_{ii} 为铺层材料 i 方向的拉压弹性模量, G_{ij} 和 μ_{ij} 为铺层材料相应方向的剪切模量与泊松比, $i, j=1, 2, 3$ 。

表 1 T300/QY8911 层板材料性能衰减准则 ^[9-11]	
Table 1 Stiffness attenuation rules of T300/QY8911 laminate ^[9-11]	
Failure mode	Stiffness attenuation rule
Fiber tensile failure	$E_{11} = 0.07E_{11}, E_{33} = 0.2E_{33}, G_{12} = 0.07G_{12}, G_{13} = 0.07G_{13}, \mu_{12} = 0.07\mu_{12}, \mu_{13} = 0.07\mu_{13}$
Matrix failure	$E_{22} = 0.07E_{22}, E_{33} = 0.2E_{33}, G_{12} = 0.07G_{12}, G_{23} = 0.07G_{23}, \mu_{12} = 0.07\mu_{12}, \mu_{23} = 0.07\mu_{23}$
Fiber-matrix shear failure	$G_{12} = 0.01G_{12}, \mu_{12} = 0.01\mu_{12}$
Delamination	$E_{33} = 0.01E_{33}, G_{12} = 0.01G_{12}, G_{13} = 0.01G_{13}, \mu_{23} = 0.01\mu_{23}, \mu_{13} = 0.01\mu_{13}$

3 连接结构拉伸性能计算与分析

复合材料层板单钉沉头螺栓连接结构由层板、钢板以及沉头螺栓组成。层板的铺层材料为 T300/QY8911 单向带,铺层顺序为 $[45/0/-45/90]_{4s}$ 。层板厚 4mm,宽 36mm,长 150mm,端距为 24mm。连接件采用钉头锥角为 90°的 M6 标准沉头螺栓,其材料为 ML30CrMnSiA,模量为 220GPa,泊松比为 0.3。连接金属板选用钢板,其模量为 200GPa,泊松比为 0.3。金属板的宽度与层板相同,厚度为 18mm。层板与金属板采用单搭连接方式。

图 3 所示为有限元计算得到的该单钉沉头螺栓连接结构载荷-位移曲线。参考 ASTM-D5961 标准^[12],孔变形 4% D (D 为螺栓孔的直径)时对应的载荷定义为复合材料层板单钉连接条件挤压载荷。按图3所示的方

法,得到单钉沉头螺栓连接结构的条件挤压载荷为 10.89kN,对应的条件挤压强度为 453.83MPa。

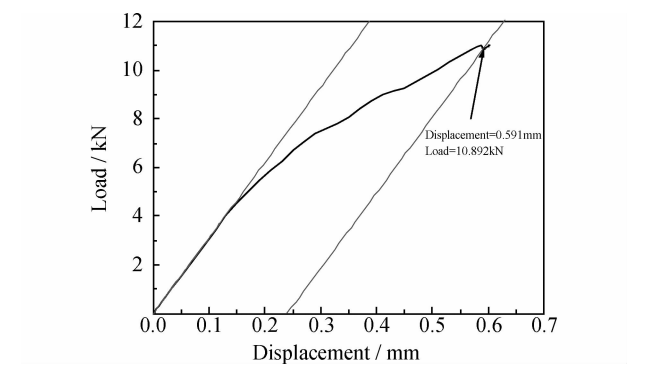


图 3 有限元模型计算出的载荷-位移曲线
Fig. 3 Load-displacement curve calculated by FEM

表 2 给出了上述连接结构对应实验件的实验结果^[13]。与实验结果相比,条件挤压载荷与强度计算结果的相对误差分别为 6.2%和 13.9%。由此可见所建模型的有效性。

表 2 层板单钉沉头螺栓连接结构实验结果 ^[13]				
Table 2 Test results of the laminate single countersunk bolt joint ^[13]				
Specimen	Laminate width/mm	Laminate thickness/mm	Offset bearing load/kN	Offset bearing strength/MPa
1#	36.03	4.33	8.50	327.17
2#	36.03	4.35	10.88	416.67
3#	36.05	4.38	11.25	428.08
Average	36.04	4.37	10.21	390.64

4 钉孔挤压损伤机理分析

图 4 所示为层板螺栓连接区的应力云图。可以看出,高应力主要发生在螺杆与层板接触区域,这与凸头螺栓连接情况有较大差别。相对而言,沉头连接更容易产生应力集中,并且应力集中主要发生在沉头端附近,钉头锥面部分基本没有应力集中,因此,其承载能力相对较低,更易发生破坏^[14-16]。铺层设计时,可适当增加层板的 0°铺层,以提高其承载与转载能力。

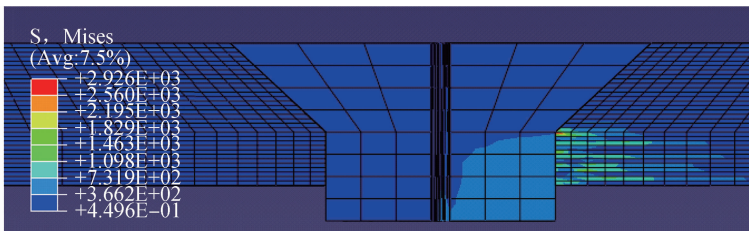


图 4 单钉沉头螺栓连接区应力云图
Fig. 4 Stress contours of single countersunk bolt joint

由于应力集中主要发生在沉头端附近,当载荷较大时,螺杆与沉头之间应力过度梯度较大(两个面上作用的载荷方向不同),直杆顶端处的钉孔边容易发生较大变形,使钉孔间隙增大,次弯曲明显,进而加剧应力在沉头端附近的集中程度,使得该处结构发生分层。分层先在钉头末端发生,相应的铺层为 90° 和 -45° ,然后逐渐沿着层板向周向与厚度方向扩展至层板与螺杆接触区域,如图 5 所示。

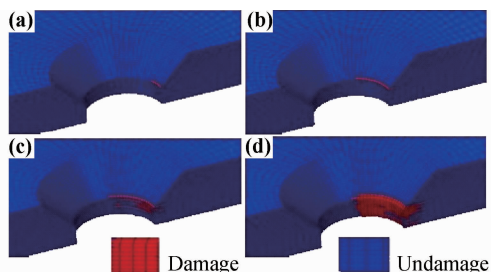


图 5 层板分层扩展过程 (a)2.948kN;
(b)3.614kN;(c)4.455kN;(d)5.282kN

Fig. 5 Delamination propagation of the laminate (a)2.948kN;
(b)3.614kN;(c)4.455kN;(d)5.282kN

当载荷为 3.291kN 时(比初始分层损伤载荷大),基体开始发生损伤,其后损伤扩展规律如图 6 所示。基体损伤首先发生在钉头末端 -45° 铺层上,然后沿孔边周向扩展,这是由于接触面逐渐增大造成的。周向扩展到一定程度后,基体损伤沿加载方向扩展。

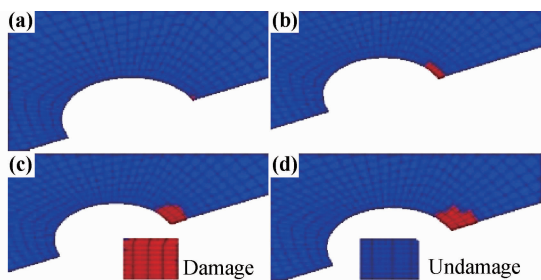


图 6 沉头连接 -45° 铺层基体损伤扩展过程 (a)3.291kN;
(b)4.053kN;(c)5.280kN;(d)5.283kN

Fig. 6 -45° ply matrix damage propagation of the countersunk bolt joint (a)3.291kN;(b)4.053kN;
(c)5.280kN;(d)5.283kN

实验观察到的层板损伤主要是螺杆孔边区域的分层与基体损伤。计算结果与实验结果相符。当分层与基体损伤累积到一定程度时,连接结构的载荷-位移曲线表现出明显的非线性。

5 影响因素分析

5.1 螺栓刚度的影响

选取航空工业中常用的铝合金、钛合金以及钢作

为材料制成相同尺寸的螺栓,通过材料模量的不同来研究螺栓刚度的影响。图 7 为不同螺栓刚度下层板单钉沉头连接结构的载荷-位移曲线。

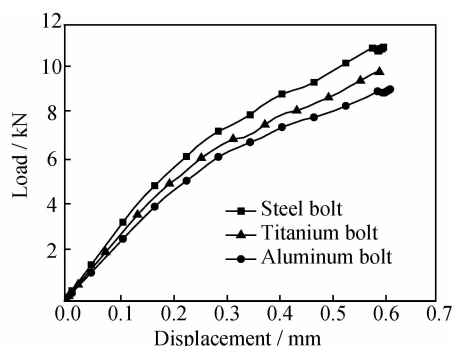


图 7 不同螺栓刚度下连接结构的载荷-位移曲线
Fig. 7 Load-displacement curves of the joint with different bolt stiffness

从计算结果看,随着螺栓刚度的减小,层板初始损伤载荷较小,且条件挤压载荷明显变小;结构拉伸刚度变小。因此在结构设计中,针对本工作所研究的复合材料,螺栓应该选择模量较大的材料。

5.2 金属板刚度的影响

同样采用改变金属板材料的方法来研究金属板刚度的影响。图 8 为不同金属板刚度下单钉沉头连接结构的拉伸载荷-位移曲线。可知,金属板刚度越小,层板初始损伤载荷越小,条件挤压载荷也会下降,但两者的降低幅度都很小;结构拉伸刚度略有减小。也就是说,连接金属板刚度对层板单钉沉头螺栓连接结构拉伸性能的影响很小。

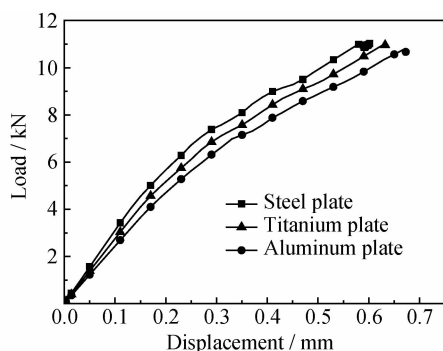


图 8 不同金属板刚度下连接结构的载荷-位移曲线
Fig. 8 Load-displacement curves of the joint with different metal plates stiffness

5.3 摩擦因数的影响

螺栓与层板间的摩擦对于单钉连接结构拉伸性能的影响较大,这是因为摩擦力参与传载,可以提高结构的承载能力。图 9 为不同摩擦因数 f 下单钉沉头连接

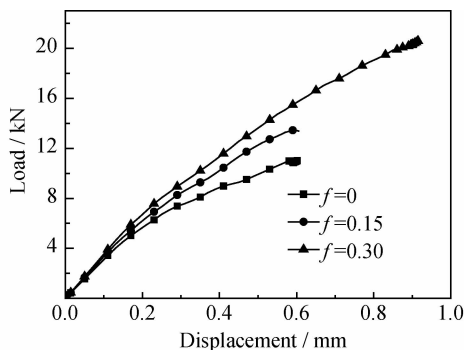


图9 不同摩擦因数下单钉沉头连接结构的载荷-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of the single countersunk bolt joint under different friction factor

结构的载荷-位移曲线。可以看出,摩擦因数不同,载荷-位移曲线的变化规律存在较大差别。随着摩擦因数的增加,层板初始损伤载荷变大,条件挤压载荷提高;结构拉伸刚度增大明显。因此,适当提高连接接触面的摩擦因数,可以提高接头的拉伸性能。

6 结论

(1)复合材料层板单钉沉头螺栓连接结构累积损伤模型计算结果与实验结果相符,模型与分析方法是有效的。

(2)沉头连接结构设计中,应尽可能缩小沉头比,增加螺杆与钉孔的接触面积,以提高其承载能力。

(3)钉头与螺杆界面处的应力集中首先使层板发生分层损伤,然后发生基体破坏。在这个区域增加层板铺层间的界面剪切强度,可以改善接头的拉伸性能。

(4)螺栓与钉孔接触面之间的摩擦力参与了载荷的传递,使得连接结构的刚度与条件挤压强度明显增加,承载能力提高。摩擦因数增大,条件挤压强度增加。螺栓刚度对条件挤压强度有一定影响,螺栓刚度越大,结构刚度与条件挤压强度越大。连接金属板刚度对于接头的刚度与条件挤压强度影响很小。

参考文献

- [1] 孙永波,程小全,张纪奎. 复合材料层板沉头螺栓连接研究进展[J]. 航空制造技术,2012,(18):75-78.
SUN Y B, CHENG X Q, ZHANG J K. Countersunk bolt composite joints research progress[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2012,(18):75-78.
- [2] CHISHTI M, WANG C H, THOMSON R S, et al. Experimental investigation of damage progression and strength of countersunk

composite joints[J]. Composite Structures,2012,94(3):865-873.

- [3] EGAN B, MCCARTHY C T, MCCARTHY M A, et al. Stress analysis of single-bolt, single-lap, countersunk composite joints with variable bolt-hole clearance[J]. Composite Structures,2012,94(3):1038-1051.
- [4] 孙永波. 复合材料层板沉头螺栓连接研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2012.
- [5] STARIKOV R, SCHÖN J. Quasi-static behavior of composite joints with countersunk composite and metal fasteners[J]. Composites Part B,2001,32(5):401-411.
- [6] CHISHTI M, WANG C H, THOMSON R S, et al. Numerical analysis of damage progression and strength of countersunk composite joints[J]. Composite Structures,2012,94(2):643-653.
- [7] BENCHEKCHOU B, WHITE R G. Stresses around fasteners in composite structures in flexure and effects on fatigue damage initiation part 2: countersunk bolts[J]. Composite Structures,1995,33(2):109-119.
- [8] IREMAN T. Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints[J]. Composite Structures,1998,43(3):195-216.
- [9] 李钟海. 平面编织复合材料胶螺混合连接性能研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2012.
- [10] HÜHNE C, ZERBST A K, KUHLMANN G, et al. Progressive damage analysis of composite bolted joints with liquid shim layers using constant and continuous degradation models[J]. Composite Structures,2010,92(2):189-200.
- [11] KIM H, KEDWARD K T. Joining and repair of composite structures[C]. Kansas City, MO, USA:ASTM Special Technical Publication,2003.
- [12] ASTM D5961/D5961M-10, standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates[S].
- [13] 张爽. 复合材料机械连接结构损伤破坏仿真设计方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2010.
- [14] STARIKOV R, SCHÖN J. Fatigue resistance of composite joints with countersunk composite and metal fasteners[J]. International Journal of Fatigue,2002,24(1):39-47.
- [15] DARWISH F, GHARAIBEH M, TASHTOUSH G. A modified equation for the stress concentration factor in countersunk holes[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids,2012,36:94-103.
- [16] MCCARTHY C T, GRAY P J. An analytical model for the prediction of load distribution in highly torqued multi-bolt composite joints[J]. Composite Structures,2011,93(2):287-298.

收稿日期:2013-02-21;修订日期:2013-09-11

作者简介:黄文俊(1972-),男,博士生,主要研究方向为直升机旋翼系统设计与分析技术,E-mail:chrhijw@163.com

通讯作者:程小全(1966-),教授,博导,主要从事复合材料结构损伤容限分析与设计技术研究工作,联系地址:北京航空航天大学飞机设计研究所(100191),E-mail:xiaoquan_cheng@buaa.edu.cn