

铆钉动态剪切力学性能仿真分析及试验验证

杨沛*, 惠战荣

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 针对航空制造中的常用铆钉, 利用有限元软件ABAQUS进行无预应力和有预应力2种情况下的数值仿真, 研究铆接预应力对铆钉剪切力学性能的影响。利用分离式Hopkinson拉杆动态剪切试验, 验证仿真方法的可行性。结果表明: 铆钉铆接时的预应力使铆钉的剪切强度增大, 因此在利用有限元分析铆钉的力学性能过程中, 应该考虑预应力的影响。

关键词: 铆钉; 剪切; 分离式Hopkinson拉杆

中图分类号: V251.9

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2015) 08-0013-69-05

铆接是一种不可拆卸的连接, 它是依靠铆钉钉杆墩粗形成墩头将构件连接在一起^[1]。在飞机制造中, 铆接连接件应用尤其广泛。

飞机铆钉连接结构的强度直接影响飞机整体结构的强度。大部分铆钉承受的是剪切力, 因此铆钉剪切性能研究是非常重要的。在有限元数值仿真方面, 目前为止没有研究者提出满意的铆钉连接建模方式。铆接过程导致的结构脆变, 铆接连接在动态载荷下的强度以及一个简单的铆钉单元的特性描述等问题都没有得到理想的解决。B. Langrand等人^[2-5]提出了一种铆钉铆接的纯数值仿真方法, 这种方法基于三维有限元能精确地仿真材料的本构模型和失效准则。目前大部分的参考文献都只是关于铆钉铆接过程的数值仿真, 并没有关于铆钉铆接后动态剪切过程数值仿真方面的相关文献发表。

选取一种常用铆钉, 利用有限元软件ABAQUS进行无预应力和有预应力(先铆接后剪切)2种情况下的动态剪切数值仿真, 并利用分离式Hopkinson拉杆进行动态剪切试验, 将仿真结果与试验结果进行对比, 验证仿真方法的可行性。

1 铆钉试样

试样选取钉头形状为100°剪切沉头(100°Flush Shear

Head), 直径为4.0mm, 长度为8.0mm, 材料为2117-T4铝合金的铆钉, 文中简称 $\Phi 4.0$ -8-FSH。

铆钉孔直径大小的确定以及墩头直径和高度的确定均参照文献[6]。被铆接板厚度为2mm, 铆钉孔与铆钉之间采取精密装配, 铆钉孔直径=铆钉直径+0.1mm, 墩头高度为1.7mm, 铆钉墩头如图1所示。铆接使用压铆机, 由同一人操作, 确保试样件制备的统一性。

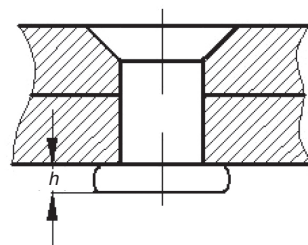


图1 铆钉墩头示意图

Fig.1 Sketch of the rivet heading

2 动态剪切数值仿真

在铆钉的数值仿真过程中, 分为2种情况进行仿真分析, 即无预应力剪切数值仿真和有预应力剪切数值仿真。在仿真过程中将剪切板视作刚体, 消除剪切板变形对仿真结果的影响。为简化仿真, 对在仿真过程中可能出现的所有面-面

收稿日期: 2015-07-23; 退修日期: 2015-09-25; 录用日期: 2015-10-19

*通讯作者. Tel.: 029-86832627 E-mail: yangpei0408@yeah.net

引用格式: YANG Pei, HUI Zhanrong. Simulation analysis and test verification of dynamic shear mechanical property of aeronautic rivet[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(03): 69-73. 杨沛, 惠战荣. 铆钉动态剪切力学性能仿真分析及试验验证[J]. 航空科学技术, 2016, 27(03): 69-73.

接触,均设置摩擦系数恒定为0.2。

2.1 无预应力剪切数值仿真

利用CATIA软件,按照铆接后铆钉的形状尺寸建模,然后与剪切板进行装配,即忽略铆钉铆接预应力,无预应力的铆钉模型如图2所示。

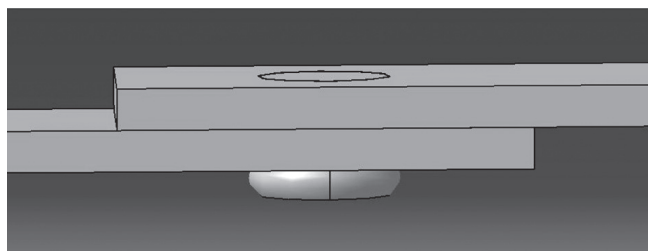


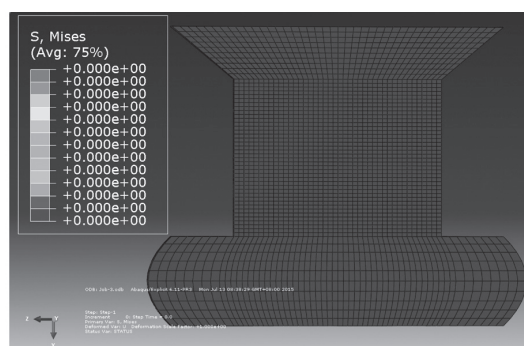
图2 无预应力的铆钉模型

Fig.2 The model of the rivet without pre-stress

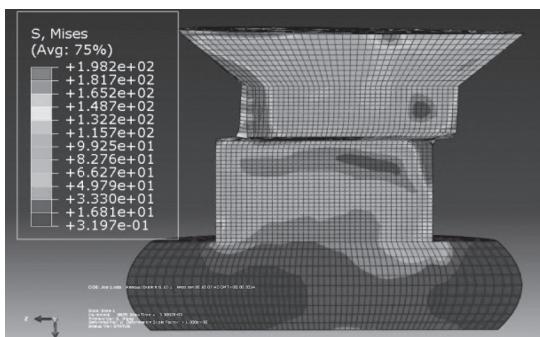
利用ABAQUS软件进行计算,由于剪切过程中涉及断裂,因此需要在property模块中设置相应Shear Damage断裂判据。设置剪切速度为15m/s,以便与试验结果在相同的边界条件下进行对比。剪切应力云图如图3所示,剪切开始时刻计为 $t=0$ s。

2.2 有预应力剪切数值仿真

有预应力剪切过程仿真设置2个分析步,第1个分析步为铆钉铆接过程,即冲头冲压铆钉的过程;第2个分析步为铆钉



(a) $t=0$



(b) $t=25\mu s$

图3 无预应力铆钉剪切应力云图

Fig.3 Shear stress nephogram of the rivet without pre-stress

动态剪切过程。

(1) 铆钉铆接过程数值仿真

铆钉铆接示意图如图4所示,从冲头接触铆钉开始,冲头位移逐渐增加,实现对铆钉的铆接。冲头随时间的位移曲线如图5所示,全过程冲头总位移为2.3mm,时间为1.0s。

压铆过程中不同阶段塑性应变分布如图6所示,从塑性应变云图可以看出,铆接初始阶段,塑性应变分布在整个钉杆上,但应变值较小。当铆钉墩头初始形成时,塑性应变主要集中在铆钉墩头上。

根据文献[7]可知,铆钉被铆接后墩头部分分为小变形区域、大变形区域、难变形区域,如图7所示。

由图6可知,塑性应变区域主要位于铆钉墩头上,将墩

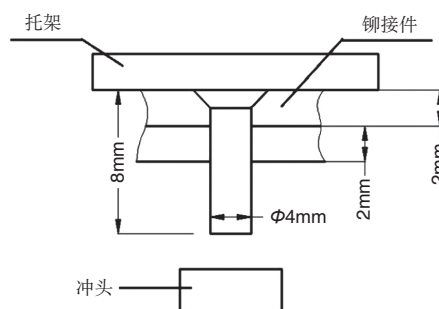


图4 铆钉铆接示意图

Fig.4 Sketch of riveting process

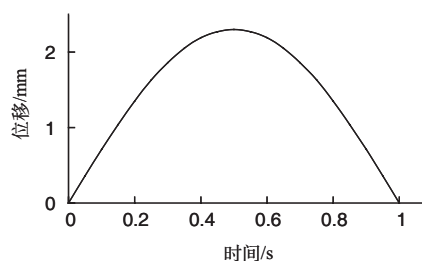


图5 冲头移动时间-距离曲线

Fig.5 Time-displacement curve of the punch

头处塑性应变云图放大观察,如图8所示。其塑性应变情况与文献[7]的难变形区域、大变形区域和小变形区域的分布相符合。

(2) 铆钉动态剪切过程数值仿真

铆接后铆钉剪切应力云图如图9所示,剪切开始时刻计为 $t=0$ s。

3 动态剪切试验

3.1 试验装置和原理

铆钉在动态载荷作用下的剪切试验采用图10所示的分离式Hopkinson拉杆系统进行。通过调节气炮气压及使用不

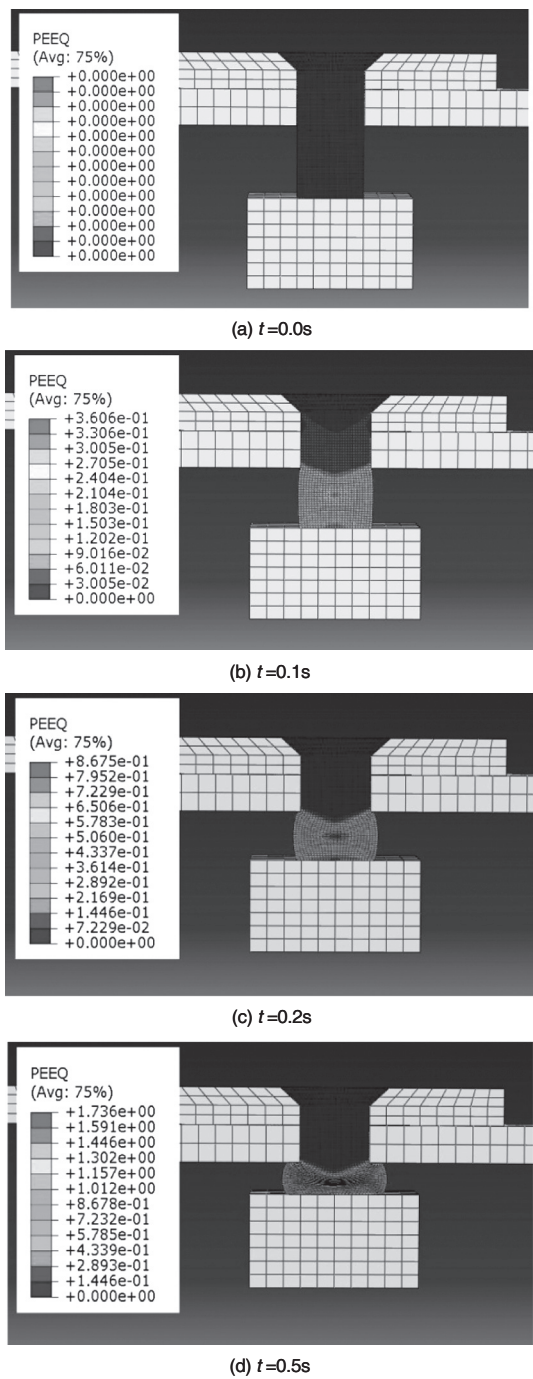


图6 压铆过程塑性应变分布云图

Fig.6 Plastic strain distribution of riveting process

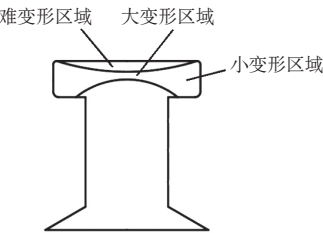


图7 铆接墩头区域分布

Fig.7 Regional distribution of rivet heading

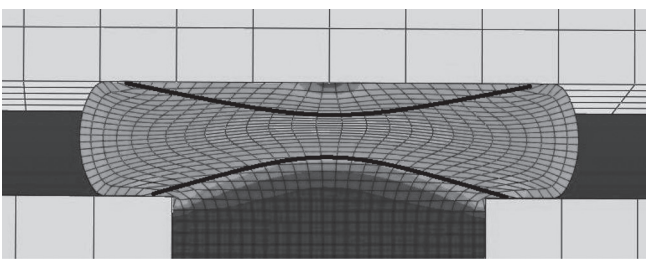


图8 数值仿真压铆后墩头示意图

Fig.8 Regional distribution of rivet heading through numeral simulation

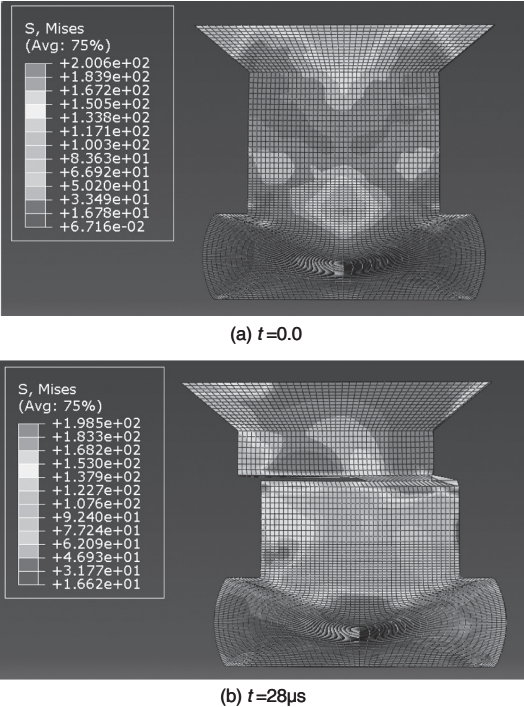


图9 有预应力铆钉剪切应力云图

Fig.9 Shear stress nephogram of the rivet with pre-stress

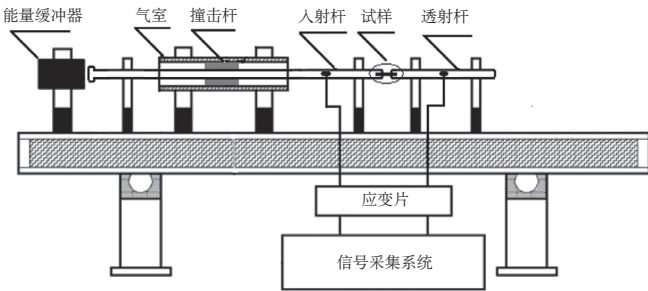


图10 Hopkinson拉杆装置示意图

Fig.10 Sketch of split Hopkinson tension bar setup

同长度的子弹实现不同应变率的加载。开始加载时,气室推动子弹撞击入射杆凸缘,在凸缘中产生压缩应力波,压缩应力波在自由端面反射成为拉伸应力波,之后拉伸波沿拉杆向试样传播,到达入射杆与试样接触面时,一部分入射波反射回入射杆中,另一部分经过试样传入透射杆。通过测量入

射杆和透射杆上相应的入射、反射和透射应力波,可以得到试样两端面上的力和速度信息,用于确定材料的动态变形特性。

$$\begin{cases} F_{\text{input}}(t) = S_b E(\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)) \\ F_{\text{output}}(t) = S_b E \varepsilon_t(t) \\ V_{\text{input}}(t) = C_0 (\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)) \\ V_{\text{output}}(t) = C_0 \varepsilon_t(t) \end{cases}$$

式中: F_{input} , F_{output} , V_{input} 和 V_{output} 分别为试样表面的力和速度; S_b , E 和 C_0 分别为杆子的横截面积、杨氏模量和弹性波波速; $\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_r(t)$ 和 $\varepsilon_t(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波脉冲。

3.2 剪切试验过程

铆钉动态剪切试验在 $\Phi 14\text{mm}$ 分离式Hopkinson拉杆装置上进行,其中入射杆和透射杆长均为1.5m。入射杆为钢杆,应力波弥散效应可以忽略。剪切试验装置的实物如图11所示。

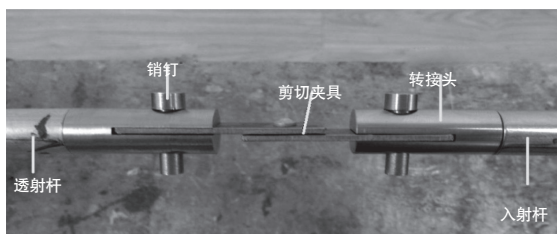


图11 剪切试验装置实物图

Fig.11 Picture of shear test set-up

4 结果对比分析

将无预应力和有预应力两种情况下数值仿真结果与动态剪切试验得到的剪切力-位移曲线进行对比,如图12所示,图12中的剪切力为试件破坏时铆钉的剪力。

由图12可以看出,在数值仿真铆钉剪切的过程中,初始条件有预应力与无预应力情况相比,仿真的剪切力结果相

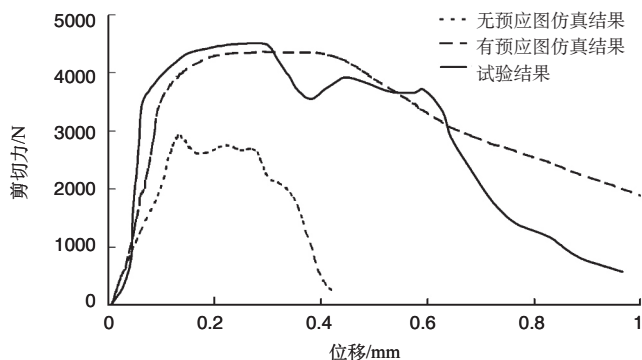


图12 Φ4.0-8-FSH铆钉的剪切力-位移曲线

Fig.12 Shear load-displacement curves of Φ4.0-8-FSH

差较大,有预应力时的剪切力远远大于没有预应力时的剪切力;有预应力仿真结果和试验结果基本吻合,剪切力上升到最大值处对应的位移基本一致,这也验证了仿真结果的可行性和准确性。因此,在利用有限元研究铆钉的剪切力学性能过程中,为了与实际情况相符,应考虑预应力的影响。

为验证结果的普遍性,选取钉头形状为平圆头(Universal Head),直径为4.8mm,长度为8.0mm,材料为2117-T4铝合金的铆钉(文中简称Φ4.8-8-UH)。将无预应力和有预应力两种情况下数值仿真结果和动态剪切试验得到的剪切力-位移曲线进行对比,如图13所示。由图13可知,上述结论具有普遍性。

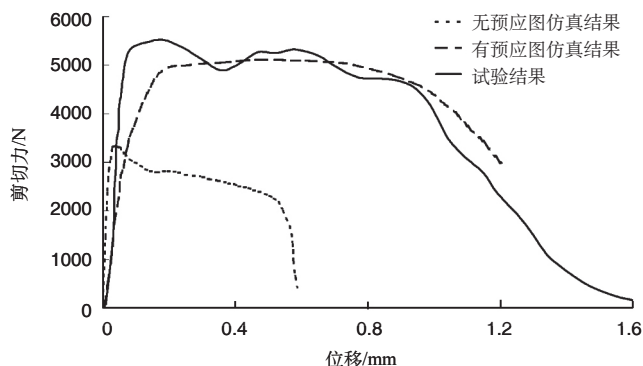


图13 Φ4.0-8-UH铆钉的剪切力-位移曲线

Fig.13 Shear load-displacement curves of Φ4.0-8-UH

5 结束语

通过仿真分析和试验对铆钉动态剪切力学性能进行研究,得到结论如下:

- (1) 压铆过程中,铆钉的塑性应变区域主要出现在铆钉墩头上;
- (2) 铆接过程中的预应力使得铆钉剪切强度增加;
- (3) 在利用有限元研究铆钉的力学性能过程中,应该考虑预应力的影响。

AST

参考文献

- [1] 汪清.C/SiC复合材料连接接头应力与破坏形式数值分析[D].西安:西北工业大学,2005.
WANG Qing. The numerical analysis of stress and failure mode of connecting head of C/SiC composite material[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.(in Chinese)
- [2] Langrand B, Patronelli L, Deletombe E, et al. An alternative numerical approach for full scale characterization for riveted joint design[J].Aerospace Science and Technology, 2001, 6(2002):

- 343-354.
- [3] Langrand B, Patronelli L, Deletombe E, et al. Full scale experimental characterisation for riveted joint design[J]. Aerospace Science and Technology, 2002, 6(5): 333-342.
- [4] Langrand B, Deletombe E, Markiewicz E, et al. Numerical approach for assessment of dynamic strength for riveted joints[J]. Aerospace Science and Technology, 1998, 3(1999): 431-446.
- [5] Langrand B, Deletombe E, Markiewicz E, et al. Riveted joint modeling for numerical analysis of airframe crashworthiness[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000, 38(2001): 21-44.
- [6] 航空制造工程手册总编委会.航空制造工程手册(飞机装配)第二版[M].北京:航空工业出版社,1993:227-248.
- Aviation Manufacturing Engineering Handbook Total Editorial Board. Aviation manufacturing engineering handbook(aircraft assembly) 2nd ed[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993: 227-248.(in Chinese)
- [7] 刘平.铆接变形及其有限元分析[D].西安:西北工业大学,2007.
- LIU Ping. Rivet deformation and FE simulation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.(in Chinese)
- 作者简介**
杨沛(1988—)女,助理工程师。主要研究方向:结构强度试验。
Tel: 029-86832627
E-mail: yangpei0408@yeah.net

Simulation Analysis and Test Verification of Dynamic Shear Mechanical Property of Aeronautic Rivet

YANG Pei*, HUI Zhanrong

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: To discuss the influence of pre-stress on the rivet shear mechanical properties, the pre-stressed and non pre-stressed numerical simulation with a aviation manufacturing commonly used rivet using the finite element software ABAQUS were carried out. To verify the feasibility of simulation method, the dynamic shear tests were carried out by using the split Hopkinson tension bar. The result shows that, the shear strength of the rivet will increase because of the pre-stress. The influence of pre-stress should be taken into account when using finite element method to study the mechanical properties of rivets.

Key Words: rivet; shear; split Hopkinson tension bar

Received: 2015-07-23; Revised: 2015-09-25; Accepted: 2015-10-19

*Corresponding author. Tel.: 029-86832627 E-mail: yangpei0408@yeah.net