

复合材料干涉螺栓压入过程力学行为数值及试验分析*

Numerical and Experimental Analysis on Mechanical Behavior During Bolt Insertion Process for Composite Joint With Interference-Fit

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 段元欣 程晖 刘平
北京控制与电子技术研究所 栾超
中航工业西安航空计算技术研究所 樊芊

[摘要] 基于 ABAQUS 6.11 软件平台, 针对碳纤维增强复合材料的干涉螺栓压入过程, 建立三维有限元模型进行了数值模拟。随后开展了相应的干涉螺栓准静态压入试验, 结合有限元仿真结果, 通过对载荷-位移曲线的研究, 分析了螺栓压入过程中的行为特性。结果表明, 干涉量的大小对于干涉螺栓压入行为具有直接影响, 螺栓杆与孔壁的摩擦力在压钉力中占据主导地位。

关键词: 复合材料 干涉连接 有限元分析 载荷-位移曲线

[ABSTRACT] A bolt installation process for the composite joint simulation using three-dimensional (3-D) finite element analysis (FEA) is conducted considering the interference-fit (0.4% and 1.0%). An experimental study is also carried out. The load-displacement curves which are obtained from the FEA and experiment are used to reveal the mechanical behavior of interference-fit bolt installation process. The result shows that the interference-fit percentage could significantly influence the installation process, and the friction force induced by the interference-fit dominates the inserting force.

Keywords: Composite Interference-fit Finite element analysis Load-displacement curve

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.20.064

近年来, 随着复合材料设计、加工技术的不断发展, 碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)得到广泛的应用。与之相应的, 机械连接, 尤其是螺栓连接, 在复合材料结构上的应用也越来越多。相比于传统金属材料, 复合材料的各向异性、非均质性、脆性材料等特性使其对应力集中非常敏感。Thoppul 等^[1]指出, 在连接结构承受外部载荷的状态下, 螺栓与连接

孔之间间隙的增加将会减小两者的有效接触面积, 导致接触压应力的激增, 而干涉配合可以有效避免这一情况, 降低孔周局部区域的应力集中程度。干涉配合作为一种有效的结构疲劳增益方法, 在金属结构连接方面已经有广泛的应用, 对于复合材料结构连接来说, 适当的干涉量可以有效提高其疲劳寿命^[2]。

对复合材料构件进行干涉螺栓连接时, 由于直径差的原因, 需要一个轴向压钉力将螺栓压入连接孔中, 该作用力主要用于驱动螺栓前端倒角处复合材料的扩张变形及螺栓杆与孔壁之间的接触摩擦。但是, 由于复合材料延伸率小、层间强度低、抗冲击能力差等原因, 以及连接板孔边入口和出口位置不受刚性约束的工艺条件, 使得复合材料在干涉螺栓压入过程中, 容易在孔壁与螺栓间的较大轴向力作用下, 出现层间分层、出口撕裂等损伤现象, 影响结构的强度及疲劳寿命, 在早期的工程应用中, 复合材料螺栓连接结构一般多采用间隙配合连接^[3]。因此, 研究干涉螺栓压入过程的力学特性, 掌握干涉量等关键工艺参数对于连接行为的影响规律, 对于提高 CFRP 干涉螺栓连接结构的连接质量, 具有重要研究及工程应用意义。本文将基于 ABAQUS 6.11 有限元分析软件, 建立 CFRP 复合材料干涉螺栓压入过程的仿真模型, 并开展相关干涉配合连接的试验研究, 通过压入过程中的载荷-位移曲线, 结合有限元分析结果, 分析螺栓压入过程中的行为机理, 为工程实践应用提供参考。

1 有限元模型

相比于双搭接结构, 单搭接结构在沿板厚度方向具有更明显的应力集中及更低的承载强度, 在飞机结构关键部位的应用中, 单搭接比双搭接更具典型性^[4]。因此, 本文的研究对象为单螺栓干涉连接的碳纤维增强复合材料(CFRP)单搭接接头, 同时, 孔周应力状态是一个复杂的三维问题, 因此需要建立三维实体有限元模型以模拟干涉域的应力状态。

* 航空科学基金项目(2014ZE53056)资助。

1.1 模型结构简化及尺寸设计

在进行有限元分析时,首先需对分析的工程问题进行几何建模,而实际的几何结构一般较为复杂,使有限元模型复杂化,且会加大有限元分析的计算量及不收敛几率。因此需要根据研究对象,对实际几何结构在不失真的前提下进行简化建模。对于本文所研究的CFRP结构干涉螺栓连接结构而言,其连接板一般为尺寸相对较大的两层或多层板的叠层构件,高锁螺栓杆与CFRP孔连接处一般会有沉头或埋头孔的存在,螺接过程中复合材料层合板通过底面支撑及专用夹具固定。在螺栓干涉压入问题的研究中,主要分析对象是高锁螺栓与CFRP孔壁在螺接过程中的相互挤压作用,包括螺栓前端倒角与孔壁的接触挤压变形以及螺栓杆与孔壁的接触摩擦两部分。因此,在建模过程中,螺栓螺纹部分予以忽略,螺栓的有限元模型建立成与销钉结构类似的光杆结构。

为了与试验保持一致,模型的尺寸设计源自于美国材料试验学会(ASTM)的聚合物基体复合材料挤压强度标准测试方法D5961/D5961M^[5],以其中的单螺栓单搭接试件测试方法为目标,构建的模型尺寸如图1所示。其中,螺栓规格为M6,对应的宽径比为6,端径比为3,保证了模型的边界效应不会影响到对孔周应力的分析。

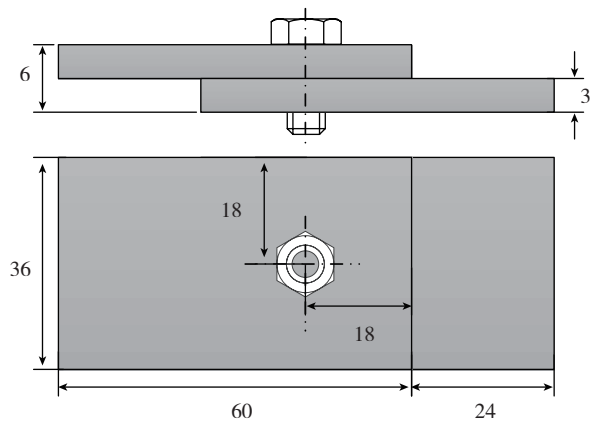


图1 有限元模型的结构尺寸(单位: mm)

Fig.1 Structure size of FEA model (all dimensions in mm)

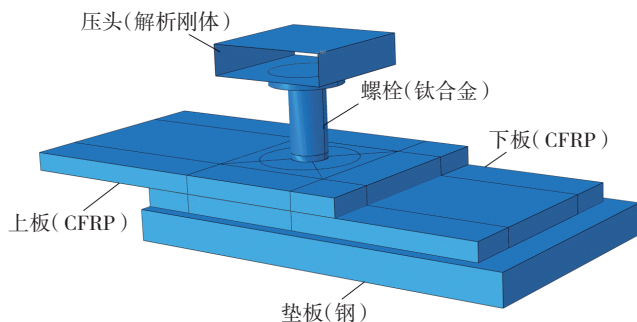


图2 有限元模型的部件组成

Fig.2 Components of FEA model

当螺栓直径发生变动时,对应的模型尺寸也会按照比例进行修改。此外,假设试件的夹持部位为理想状态,那么对于夹持部分的试件结构就可以予以忽略^[2],因此有限元模型中的试件长度为60mm。

有限元模型的部件组成如图2所示,CFRP层合板干涉螺栓压钉过程的三维有限元模型包含以下4个部分:

(1)压头,用于模拟试验机压头,将螺栓压入复合材料连接孔中,通过解析刚体建立;

(2)平头螺栓,材料为钛合金TC4,螺栓光杆直径为6mm,光杆长度为14mm,为了保证收敛性及降低运算量,螺纹部分予以忽略,螺栓前段处理成具有平缓过渡区域的倒角,螺栓下端与复材板上表面平齐,与连接孔同轴;

(3)CFRP层合板,试件厚度为3mm,层合板单层厚度0.3mm,铺层顺序为 $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$,所用材料为T700SC/3660。复合材料板上连接孔的直径小于螺栓直径,根据相对干涉量的不同,建立不同直径的通孔;

(4)垫块,在试验中,试件下方垫有钢制垫块以消除层合板在压钉力作用下产生的弯曲,为了与试验环境相一致,有限元模型中也建立了钢制垫块,并与下板下表面相贴合,垫块中央有直径为6.2mm的通孔,以保证螺栓压出后不会发生干涉。

表1 复合材料、钛合金及钢的材料属性

材料	杨氏模量 / GPa	泊松比	剪切模量 / MPa
钛合金	110	0.3	...
钢	210	0.3	...
CFRP	120 (E_1), 6.5 (E_2), 6.5 (E_3)	0.3 (μ_{12}), 0.3 (μ_{13}), 0.5 (μ_{23})	5200 (G_{12}), 5200 (G_{13}), 3900 (G_{23})

注: E表示弹性模量; μ 表示泊松比; G表示剪切模量。

模型中所用到的材料包括国产碳纤维增强复合材料T700SC/3660,钛合金TC4(Ti-6Al-4V),以及45#钢,其材料属性如表1所示。

1.2 网格单元及边界条件

划分网格是建立有限元模型的一个重要环节,网格密度及单元类型等因素直接影响有限元分析的精度和计算规模。为了在保证分析精度的同时减少计算量,根据应力分布的规律,对有限元模型进行了部件分割,将干涉螺栓压入过程中应力集中程度明显及高应力梯度的区域划分出来,如高锁螺栓中的光杆及倒角区域、复合材料层合板中的孔周区域等。为了保证网格由孔周等密度区域向复材板边缘等低密度区域的顺利过渡,对复材板进行了进一步的部件分割,如图3所示。

模型网格及边界条件,如图3所示,模型由三维连续六面体单元构成,螺栓光杆与复材板孔壁干涉

区域的应力分布是本文研究的基础,因此复合材料层合板孔周区域和螺栓钉杆部分采用最小尺寸为 $0.3\text{mm} \times 0.3\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ 的精细网格,而复材板边缘区域、螺栓钉头以及垫块等应力梯度较小的区域均采用较稀疏的网格。该模型所关注的是应力问题,且几乎不存在弯曲问题,但部件之间有复杂的接触关系,因此不能采用二次单元,8节点六面体线性积分单元是适宜的选择,其中,在线性积分单元之下,又以非协调模式单元更为适应应力分析问题,但是,相较于缩减积分单元,其计算成本较高^[6]。因此,该模型中精细网格部分的单元类型为C3D8I,用以提升计算精度,稀疏网格部分单元类型为C3D8R,用以节省计算成本。此外,在复合材料建模中需要注意的是,在层合板厚度方向上,铺层数量应与网格层数一一对应^[7]。

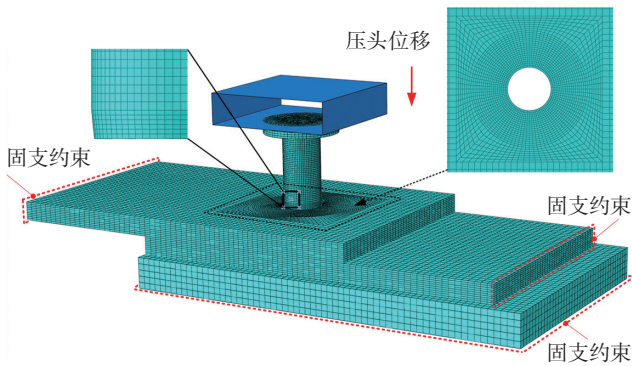


图3 模型网格及边界条件

Fig.3 Mesh and boundary conditions of FEA model

在干涉螺栓压入试验中,复合材料层合板两端用夹具固定,为防止轴向力过大引起层合板发生较大的弯曲变形,试件下表面会通过垫块进行支撑,随后高锁螺栓在压头作用下强迫压入复合材料孔中。因此,参照试验的约束关系,模型的边界条件包含4组,分别是复材板中的上板左端平面、下板右端平面和垫块底部的固支约束,以及压头沿 z 轴负向的位移。压头的位移用以模拟试验机下压过程,考虑到复合材料试件厚度为 6mm ,而螺栓光杆长度为 14mm ,为保证螺栓完全贯通试件,压头位移设置为 10mm 。

1.3 模型接触关系

该模型的接触关系复杂,如何通过接触对描述实际干涉压钉过程中的接触关系是模型建立的关键问题,在综合考虑接触离散化方法、滑移问题和摩擦系数设定等关键点的基础上,在模型中定义了4组接触对,如图4所示。其中,4组接触对全部定义为面对面离散,以保证应力计算的精度,在参考了网格密度、材料刚度、实际接触关系等因素的基础上,主从面的定义如图4所示。此外,除了螺栓与孔壁之间存在大尺寸的相对滑动需要采

用有限滑移外,其他3组接触均可以采用小滑移以降低运算量。在摩擦系数定义方面,螺栓-孔壁接触面上的摩擦力是该模型计算的关键,根据Kim^[2]和McCarthy^[8]的建议,摩擦系数可采用0.1。其余部分,压头与螺栓头之间可定义为0.3,用于消除刚体位移;垫块与下板之间也可采用0.3的数值;复合材料上下板之间的摩擦系数为0.7。

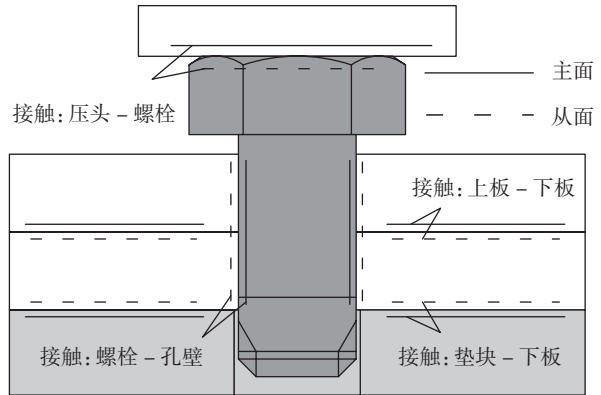


图4 模型的接触关系

Fig.4 Contact relation of FEA model

2 CFRP 试件干涉压钉试验

试验所采用试件为CFRP层合板单搭接多连接孔形式,如图5所示,试件尺寸设计参考D5961/D5961M^[5],并满足文献[9]对于最小间距和端距的建议。所用螺栓规格为TC4抗剪型平头高锁螺栓M6/f8,CFRP复合材料为T700SC/3660,其铺层与有限元模型中相同。

本次试验选择的相对干涉量分别为0.4%和1%,对应的连接孔理论直径分别为 $\Phi 5.976\text{mm}$ 和 $\Phi 5.941\text{mm}$ 。制孔质量对干涉配合螺接接头的强度与疲劳寿命等力学性能具有重要的影响。为保证制孔尺寸精度和表面质量,本试验利用数控机床配合专用硬质合金刀具钻制螺栓孔。首先,利用整体硬质合金钻头钻初孔,再利用硬质合金铰刀铰孔至最终尺寸。试验中的孔加工精度等级为H8,选用的铰刀精度等级为H7。为保证CFRP螺接孔的同轴度,采用一次钻削实现叠层结构制孔。试验机为INSTRON 5567型万能电子试验机,试验设定加载速率为 $2\text{mm}/\text{min}$,得到的最终试件如图6所示。

针对两种干涉量共进行了6组重复试验,如图7所示为其中具有代表性的6组数据。可以看出随着干涉量的增大,压入螺栓所需的驱动载荷也明显增大。在试验开始阶段,存在一段斜率近似为零的无载荷阶段,因为此时螺栓前端倒角与连接孔接触,接触部位直径小于连接孔孔径,所以虽然螺栓处于下压状态,但没有明显载荷,随着下压位移的增大,螺栓开始与孔壁完全接触,前端倒角驱动复材板孔壁扩展变形,光杆处与孔壁相互

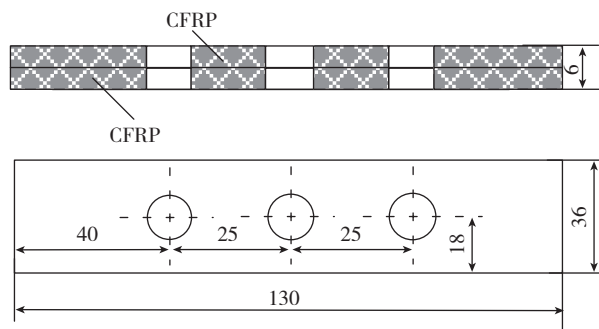


图5 干涉压钉试验试件尺寸(单位: mm)

Fig.5 Specimen Size of the interference-fit insertion test

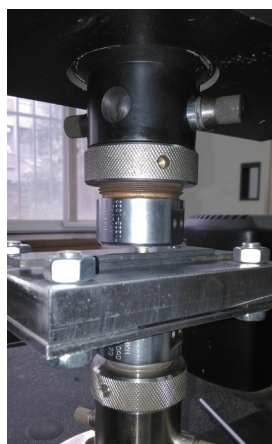


图6 CFRP试件干涉螺栓压钉试验

Fig.6 Bolt insertion test of CFRP interference-fit joint

接触产生摩擦力,而且接触面积的不断增大导致摩擦力增大,相应的驱动载荷也不断增大。因为CFRP试件为叠层结构,因此压头位移达到1/2,即3~4mm之间时,所有曲线均出现了一次明显的拐点,此处对应于上下复合材料试件的接触面。随着倒角压入下层复材板中,载荷再次呈现非线性的增长,直至最终钉头端与上板上表面接触,外载荷急剧增大。

通过对两种干涉量的载荷-位移曲线对比可以发现,两者存在一些明显的差异。首先,试验起始的载荷滞后阶段因为孔径的不同而不同,1%干涉量的滞后阶段较短,仅为0.2~0.3mm左右,而0.4%干涉量的滞后阶段约0.5mm,由此而导致中间阶段曲线拐点的出现位置也是1%干涉量明显提前于0.4%干涉量;其次,虽然曲线的增长为非线性的,但大干涉量的增长曲率明显高于

小干涉量;最后,在螺栓即将压出阶段,0.4%干涉量的一组曲线呈现一段平台期,载荷近似不再增长,而与之相对的1%干涉量的载荷反而出现了明显的下降,对此的解释应该是大干涉量压入过程中,螺栓前端倒角处驱动复材孔壁膨胀扩张所需要的力较大,当倒角逐渐压出下层复合材料下表面,即螺栓即将贯穿试件时,驱动复合材料变形所需的力逐渐降低直至消失,压钉力此时主要由螺栓与孔壁的摩擦主导,因此最终阶段压钉载荷出现明显的下降阶段。

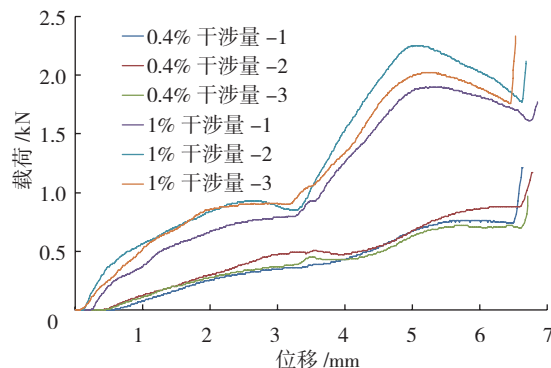


图7 压钉过程中的载荷-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curves during interference-fit insertion process

3 结果分析与讨论

3.1 有限元分析结果

基于试验中0.4%和1%的干涉量设定,有限元分析中也采用相同的钉孔比例,此外,有限元分析中还额外加入2%的大干涉量设定,以研究螺栓-孔壁间摩擦力的变化规律。因此,有限元模型共3组,除复合材料板上连接孔直径不同外($\Phi 5.976\text{mm}$ 、 $\Phi 5.941\text{mm}$ 和 $\Phi 5.882\text{mm}$),其余设置均相同。压钉力通过压头参考点输出,摩擦力通过螺栓与孔壁的接触对输出,最终结果如图8所示。

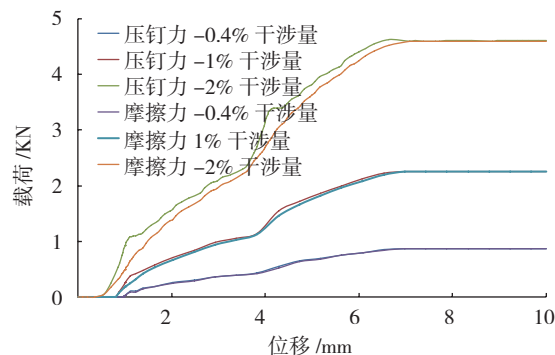


图8 有限元分析中压钉力与摩擦力的对比

Fig.8 Comparison between axial force and friction force in FEA

通过对比可以发现,在不考虑复合材料损伤属性退化的前提下,随着干涉量的增大,压钉力及摩擦力都在

不断增大,而且载荷增长斜率也随之提升。需要注意的是,干涉量越小,摩擦力在压钉力中占据的比例越大,当干涉量增大至 2% 时,压钉力与摩擦力之间出现了明显的差异,而且压钉过程的结束阶段也出现了载荷下降的阶段,这也证实了前文试验中对于最终阶段载荷下降原因的推测。

3.2 试验结果与有限元分析结果对比

如图 9 所示为在 0.4% 和 1% 干涉量条件下,分别通过有限元数值模拟与试验测定得到的 CFRP 层合板试件干涉螺栓压入试验的载荷位移曲线的对比。需要注意的是,因为试验与有限元中起始阶段的载荷滞后程度不一,为了便于比较,无论是有限元模拟还是试验均去除了载荷滞后阶段的曲线,直接从载荷零点开始对比。

通过观察可以发现,两种方法获得的结果依然存在一定程度的差异,这主要是因为试验中因为加工精度的制约,实际螺栓尺寸和连接孔直径均在一定范围内波动,因此实际干涉量也在一定范围内波动。此外,复合材料因为加工和干涉挤压造成孔周材料损伤以及材料属性退化,而螺栓与孔壁的实际摩擦系数等因素也未考

虑到有限元模型中。但是,从曲线总体情况来讲,有限元数值仿真的结果曲线与试验曲线表现出了一致的趋势,结果具有较好的吻合性。而且,对于起始阶段的载荷滞后、试件接触面处的曲线拐点、载荷的增长趋势及各阶段的压钉力具体数值等方面,有限元模型均做出了较完善的预测。当试件干涉量为 0.4% 时,有限元预测的最大压钉力为 0.863kN,比 3 组试验数据平均得到的 0.776kN 增加 11.2%;当干涉量为 1% 时,有限元模拟最大结果为 2.258kN,比试验中平均最大载荷增加 9.38%。

4 结论

(1) 与试验结果的比较表明,本文所建立的 CFRP 层合板干涉螺栓压钉过程数值仿真模型可以有效模拟干涉压入过程中的载荷曲线及相关力学特性;

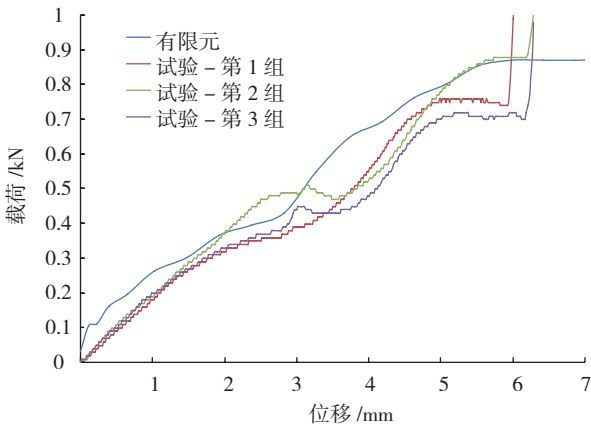
(2) 干涉量的大小对于压入过程的载荷-位移曲线有直接的影响,干涉量越大,所需要的压钉力也越大,曲线的非线性特性越明显;

(3) 随着干涉量的增大,驱动连接孔孔壁变形膨胀所需要的力在压钉力中所占据的比重将显著增加,并将导致螺栓压出阶段载荷下降。

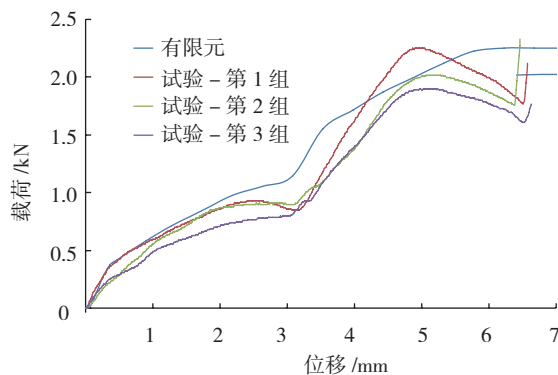
参考文献

- [1] THOPPUL S D, FINEGAN J, GIBSON R F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures—a review. *Compos Sci Technol*, 2009, 69(3): 301–329.
- [2] KIM S Y, HE B, SHIM C S. An experimental and numerical study on the interference-fit pin installation process for cross-ply glass fiber reinforced plastics (GFRP). *Composites Part B: Engineering*, 2013, 54: 153–162.
- [3] 蔡闻峰, 薛小平. 先进复合材料结构飞机机械连接技术现状及发展方向. *航空精密制造技术*, 2010, 46(2):24–26.
- [4] MCCARTHY M A, LAWLOR V P, STANLEY W F, et al. Bolt-hole clearance effects and strength criteria in single bolt, single lap, composite joints. *Compos Sci Technol*, 2002, 62(10–11):1415–1431.
- [5] American Society for Testing and Materials. ASTM D 5961/D 5961M–13 Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates. America: American Society for Testing and Materials, 2013.
- [6] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] STOCCHI C, ROBINSON P, PINHO ST. A detailed finite element investigation of composite bolted joints with countersunk fasteners. *Compos Part A—Appl S*, 2013, 52:143–150.
- [8] MCCARTHY C T, MCCARTHY M A, STANLEY W F, et al. Experiences with modeling friction in composite bolted joints. *J Compos Mater*, 2005, 39(21):1881–1908.
- [9] NIU M CY. 实用飞机复合材料结构设计与制造. 程小全, 张纪奎, 译. 北京: 航空工业出版社, 2010.

(责编 宁军)



(a) 0.4% 干涉量



(b) 1% 干涉量

图9 不同干涉量下下载荷-位移曲线的对比

Fig.9 Comparison of load-displacement curves under different interference-fit