

铆螺母安装过程仿真建模及锁紧力矩衰退规律研究

王立俊^{①②} 柯书忠^{①②} 高靖靖^{①②} 周玉宝^{①②} 吕慧慧^{①②} 李皓^③

(①河南航天精工制造有限公司, 河南 信阳 464000; ②河南省紧固连接技术重点实验室, 河南 信阳 464000; ③天津大学机械工程学院, 天津 300350)

摘要: 铆螺母是一种新型紧固件, 现已广泛应用于汽车、航空和建筑等领域。基于 ABAQUS 有限元仿真软件建立了铆螺母安装与失效过程的三维有限元数值仿真模型。结合仿真分析以及试验研究, 分别探究了铆螺母变形区厚度对紧固件安装成型规律影响, 以及收口工艺参数对锁紧力矩的影响规律。结果表明, 变形区厚度为 0.44 mm 时铆接结构的轴向拉拔力最大, 并且能够紧密贴合被连接件。此外, 采用矩形收口能够保证铆螺母获得比较均匀的径向变形, 并且获得足够的锁紧力矩。并且开展了锁紧力矩衰减实验, 探究了收口后铆螺母多次使用后的力矩衰减规律。开展了铆螺母变形区厚度与收口形式对结构的力学性能影响研究, 对此类紧固件的设计制造具有一定的参考意义。

关键词: 铆螺母; 有限元仿真; 锁紧力矩; 力学性能

中图分类号: TH131.3, TH142.2, TB31 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.05.015

Simulation modeling of rivet nut installation process and study of locking torque recession

WANG Lijun^{①②}, KE Shuzhong^{①②}, GAO Jingjing^{①②}, ZHOU Yubao^{①②}, LV Huihui^{①②}, LI Hao^③

(①Henan Key Laboratory of Fastening Technology, Xinyang 464000, CHN; ②Henan Key Laboratory of Fastening Connection Technology, Xinyang 464000, CHN; ③School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, CHN)

Abstract: Blind rivet nut is a new type of fastener, now widely used in the automotive, aviation and construction fields. In this paper, a 3D finite element numerical simulation model of the blind rivet nut installation and failure process is established with ABAQUS simulation software. Combined the simulation analysis as with the experimental research, the influence of the thickness of the rivet nut deformation zone on the fastener installation forming and closure process parameters on the locking torque were investigated respectively. The results show that the riveted structure has the highest axial pull-off force at a deformation zone thickness of 0.44 mm and is able to closely fit the connected parts. In addition, the use of a rectangular closure ensures that the riveted nut obtains a relatively uniform radial deformation and a sufficient locking torque. Furthermore, the decay of the locking torque was investigated and the decay of the rivet nut after repeated use was investigated. Carry out the influence of the rivet nut deformation zone thickness and the form of closure on the mechanical properties of the jointed, which has a certain reference significance for the design and manufacture of such fasteners.

Keywords: blind nut rivet; FEM; locking torque; mechanical property

在汽车与航空领域, 紧固件的连接装配仍以机械连接为主。在机械连接中, 螺栓连接由于其可靠性高, 可重复拆装等优点而广泛应用于航空航天、汽车和能源等领域。但螺栓连接工艺比较复杂, 重量较大, 对被连接件的两端空间也有较大的要求。

空心铆钉作为一种新型的铆接紧固件, 改善了装配连接中的轻量化问题, 而且能做到单面连接, 更加适应结构紧凑性设计, 但是连接强度较低。近年来, 针对以上问题, 学者们提出了一种新型的铆螺母紧固件^[1]。



收压块呈现 120°对称放置于距离铆螺母壁 0.5 mm 处, 避免铆螺母变形时发生接触碰撞。为了研究不同收压块形状对连接质量的影响, 分别设计了 4 种不同形状的收压块进行收压, 分别为 2 mm×2 mm, 2 mm×3 mm, 3 mm×3 mm 截面的矩形和压头为球形的收压块, 不同收压块示意图如图 4 所示。由于铆螺母沉头部分的不规则性, 本文采用十节点的修正二次四面体进行网格划分。较小的网格尺寸能够提高模型的准确性, 但也会增加计算成本。综合考虑模型的准确性和计算效率, 确定螺母的全局网格尺寸为 0.6, 厚度方向设置 4 个积分点, 将变形区位置的网格尺寸细化到 0.2。夹层的网格尺寸设置为 1, 并对孔周进行网格细化。为保证接触时紧固孔壁为主面, 将孔周网格尺寸细化到 0.7, 并且在厚度方向设置 5 个积分点保证应力应变的连续性。考虑到铆螺母与夹层材料之间的相互作用关系, 因此在两个构件之间需要进行接触设置, 法向接触设置为“硬接触”, 切向接触设置为“罚函数”, 并且所有的摩擦界面均由 0.1 的恒定库仑摩擦系数建模。其中螺纹接触部分采用主从面接触设置, 将螺栓设置为主面, 铆螺母螺纹设置为从面, 恒定库仑摩擦系数为 0.1。

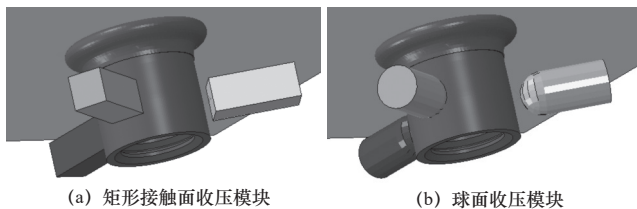


图 4 不同收压形式仿真模型

铆螺母材料为 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢, 由于提出的模型包含了铆螺母的铆接变形与失效过程, 因此模型中需要定义 304 不锈钢的塑性行为和材料的损伤行为, 相关材料参数由供货商提供。夹层材料选取 6061 铝合金, 材料的塑性行为与损伤行为均使用 J-C 本构模型进行定义, 其表达式如下。

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^*) \quad (1)$$

其中:

$$T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0) \quad (2)$$

式中: T_m 为熔化温度; T_0 为参考温度; A 为在参考应变率和参考温度下的初始屈服应力; B 和 n 为材料应变硬化模量和硬化指数; C 为材料应变率强化参数; m 为材料热软化指数, 通过霍普金森压杆实验测得, 并通过对照文献 [15] 中 6061 铝合金本构

模型的数值验证。铆螺母材料与 6061 铝合金的参数设置分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 304 不锈钢的材料参数

密度 $\rho/(g/cm^3)$	弹性模量 E/MPa	抗拉强度 S/MPa	泊松比 ν
7.8	199 340	780	0.3

表 2 6061 铝合金的 J-C 本构参数

A	B	n	C
231.86	124.77	0.31	0.013

2 实验设计

2.1 铆螺母铆接实验

铆螺母由航天精工公司提供, 型号均为 SCE106-050-030。选取 5 种不同的变形区厚度: 0.49 mm、0.44 mm、0.39 mm、0.34 mm、0.29 mm 将不同变形区厚度的铆螺母进行编号, 编号结果如表 3 所示。使用四轴加工中心将厚度为 3 mm 的 6061 铝板加工成 40 mm×40 mm 的试件, 并在板中心与四周加工出紧固孔, 用于实验装置的铆接与固定。使用铆接设备将铆螺母与夹层连接, 连接完成后置于收口模块装置进行收口处理。将铆螺母变形锁紧后的连接件使用金刚石砂线切割机沿样件的中心线剖开, 使用超景深显微镜观察截面形貌。

表 3 不同变形区厚度的铆螺母编号

变形区厚度/mm	0.49	0.44	0.39	0.34	0.29
编号	HD1	HD2	HD3	HD4	HD5

2.2 铆接结构拉拔实验

为探究铆螺母变形后的拉拔力, 将不同变形区厚度的铆螺母连接件固定在特殊设计的夹具上进行铆螺母的拉拔实验。实验在电子万能试验机上进行。最后记录不同厚度的拉拔力, 实验装置设置如图 5 所示。试验结束后将破坏后的铆螺母取下, 观察分析连接结构的失效形式。

2.3 铆螺母锁紧力矩测试

铆螺母收口工艺是在铆螺母铆接完成后, 通过对铆螺母下端进行挤压变形从而达到增大铆螺母锁紧力矩的目的, 以此提高铆接整体连接结构的可靠性。收口工艺一般使用收口模具进行, 图 6 为常用的收口模具实物图。铆螺母型号依然使用 SCE106-050-030, 该螺母收口过程使用 2 mm×3 mm 矩形接

触面收压模具，收压力为 300 μm ，使用 M5 螺栓与之匹配。

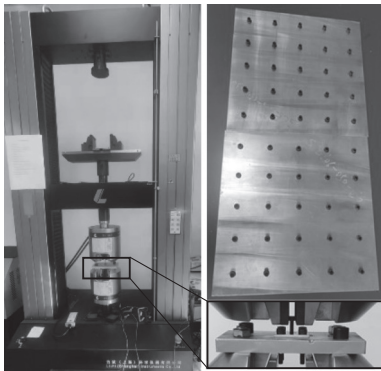


图 5 柳螺母拉拔实验装置

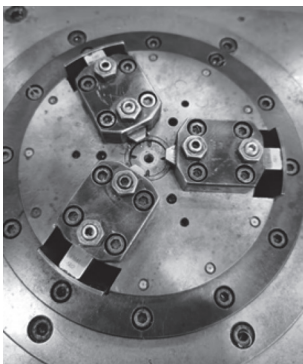


图 6 典型收口模块实物图

锁紧力矩的测试设备为扭力试验机，试验件安装如图 7 所示，实验项目为 15 次拧入拧出循环试验，技术要求和实验方法分别按 HB7686-2001 和 HB7687-2001 进行。记录 15 次拧入拧出的锁紧力矩和松脱力矩数据。

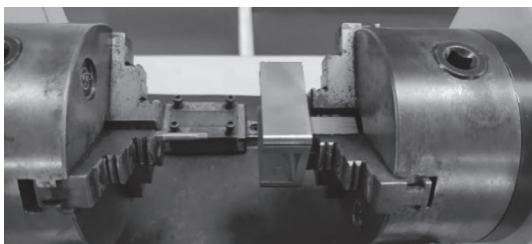


图 7 电子扭转试验机

3 结果与讨论

3.1 柳接过程分析

通过有限元仿真得到不同变形区厚度下柳螺母柳接变形仿真与实验结果进行对比。不同的变形区厚度对应的仿真与实验结果如图 8a~e 所示。由图 8a 可知，当变形区厚度为 0.49 mm 时 (HD1)，柳螺母柳接变形后螺纹区域发生严重的变形，柳螺母

的结构发生了一定的破坏。这可能导致后续安装过程中螺栓不能顺利旋入。由图 8b~e 可知，对于 HD2、HD3、HD4、HD5 的柳螺母柳接的变形后能够形成贴合紧密的鼓包折叠区域。当变形区厚度太大时，螺纹段螺母壁与变形区之间厚度相差较小，柳接时起始变形位置靠近螺纹段，鼓包折叠区域两端的曲率半径过大最终导致柳螺母未能紧密贴合工件材料。图 8f 为不同厚度柳接变形区柳接后形成鼓包区域面积。由结果可知，柳螺母变形区厚度 HD 是影响最终柳接鼓包大小及贴合程度的重要因素。鼓包锁紧面积随着变形区厚度减小而减小。其原因可能是变形区厚度会影响鼓包折叠区下部圆角的曲率，厚度越薄则曲率越小，这将导致变形过度集中于变形区而使得鼓包区域变小。

图 9 为最大夹紧压应力随变形区厚度的变化趋势。由于 HD1 情况下柳螺母螺纹段变形严重，在此处不做分析。由结果可知，对于柳接后贴合紧密的柳螺母，最大压应力随着变形区的厚度减小而呈现先下降后升高的趋势。锁紧后，夹紧压应力主要由两个方面提供：(1) 柳螺母变形区材料塑性变形对被连接材料的挤压作用。(2) 被连接材料与柳螺母非变形区发生接触，螺纹段的挤压载荷通过折叠区传递到夹层上。对于较厚的变形区，夹紧压应力主要由方式 (1) 提供。随着变形区厚度减薄，材料塑性变形提供的夹紧力越来越小。当变形区厚度太薄时，鼓包变形只发生在预设的变形区，这导致折叠区下部分的曲率半径过小，加载时螺纹区与上部分折叠区发生接触，形成较大的夹紧压应力。由以上分析表明，型号为 HD2 的柳螺母不仅能够紧密贴合夹层材料，并且安装后对夹层材料的压应力与锁紧面积明显优于其他型号。因此本文选择变形区厚度为 0.44 mm 的柳螺母进行后续研究。

3.2 柳螺母拉脱失效

在柳螺母顺利完成变形锁紧后，其拉拔力是评价连接性能的一个重要指标，能够一定程度上反映出柳螺母变形锁紧的紧固程度。设计并研究了 5 种不同变形区厚度参数下柳接结构的拉脱过程，其仿真与实验结果如图 10 所示。图 10a 为仿真与实验的拉拔力-位移曲线，实验结果标记为 Exp 并用实线绘图，仿真结果标记为 Sim 并用虚线绘图。实验结果的曲线相对于仿真结果来说具有一定的滞后性，这是因为在进行实验时，试验机、夹具体和夹持螺

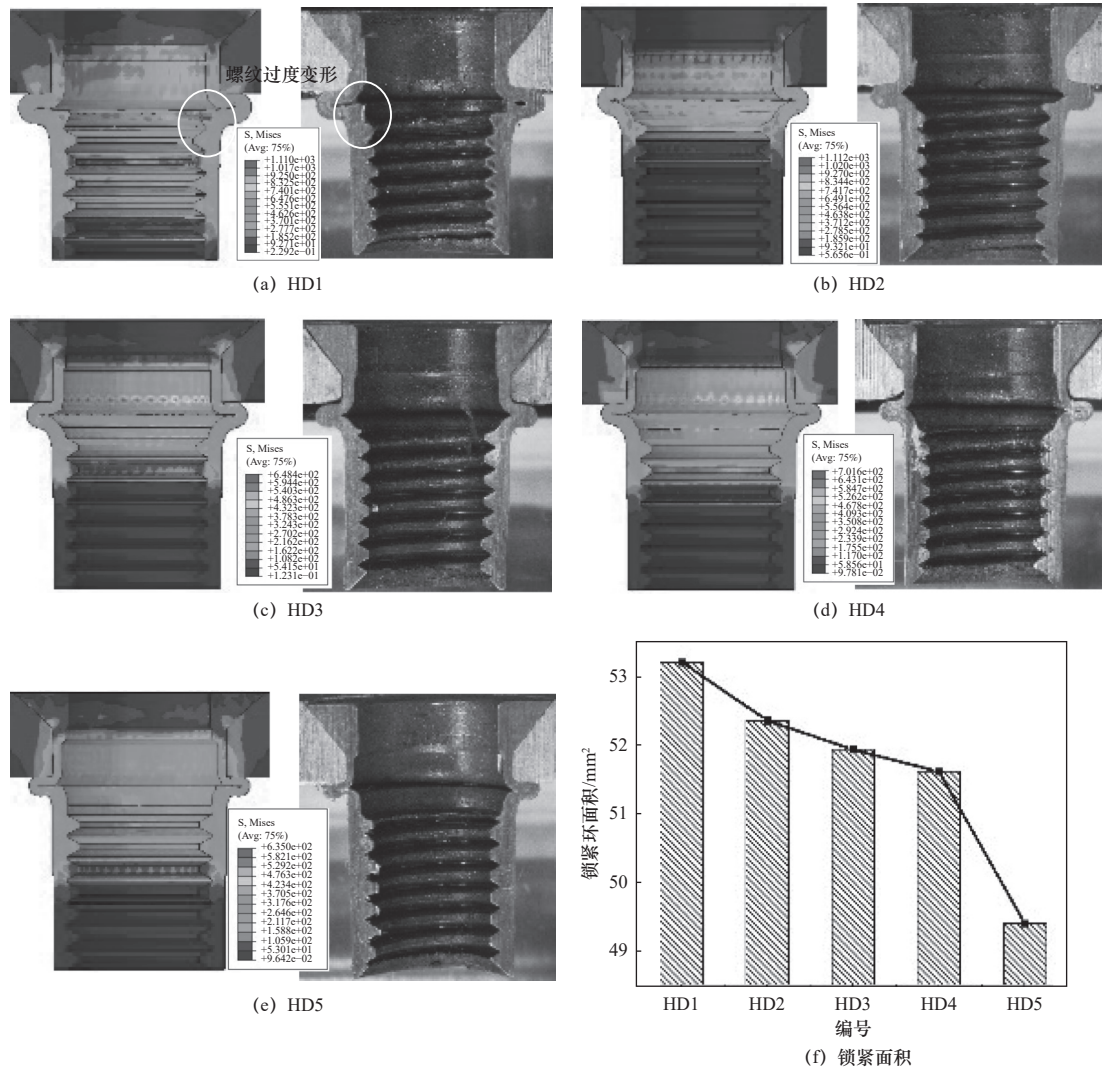


图8 铆螺母铆接成型的仿真与实验结果

栓之间存在一定的间隙，拉拔过程还需将这些间隙压紧，所以位移载荷较大。图10b对比了仿真与实验结果的拉拔力。仿真结果曲线形式与变化趋势与实验结果相比有较好的一致性，能够准确预测铆接结构的拉拔力。除了最大拉拔力，铆螺母安装过程中的初始拉拔力（如图10c中初始刚度 k_{ini} 下对应的最大拉拔力）也是评价连接结构安装质量的一个重要标准^[8]。如图10c所示为不同变形区厚度的铆螺母连接后的初始刚度，为了能够清晰地标明连接结构的初始刚度范围，将实验结果的局部进行放大并标出初始刚度和初始拉拔力。图10d为初始刚度对应的初始拉拔力。从对应结果可知，变形区厚度为0.44 mm的试件(HD2)具有最大的初始拉拔力。

从图10可知，最大拉拔力随着变形区的厚度减小呈现逐渐减小的趋势，这可能是由于变形区厚度越薄铆螺母折叠部分越容易发生变形。此外折叠

区域的面积减小也是最大拉拔力下降的一个重要原因。鼓包区域的面积越大，铆螺母与夹层的结合越紧密，接触面积较大时受拉后整体结构的应力分布更加均匀，因此能够提升最大拉拔力。但是对于HD1，螺纹段的变形使得铆螺母接结构发生了一定的破坏，铆螺母容易产生应力集中导致结构在受拉时过早发生失效。综上所述，当变形区厚度为0.44 mm时铆螺母的最大拉拔力和初始拉拔力均为最大、铆螺母变形合理，具有最优的连接质量。图11为拉拔过程的仿真和实验结果。从图中可以看出，整个连接结构的破坏分为两个方面：（1）安装夹层的变形、失效。（2）铆螺母鼓包锁紧处的变形。对比仿真与实验结果可知，变形区厚度对安装夹层的变形程度影响不大，但拉脱后铆螺母的变形程度随变形区厚度的变化趋势比较明显。变形区厚度越薄，铆螺母的鼓包锁紧区域变形越严重。

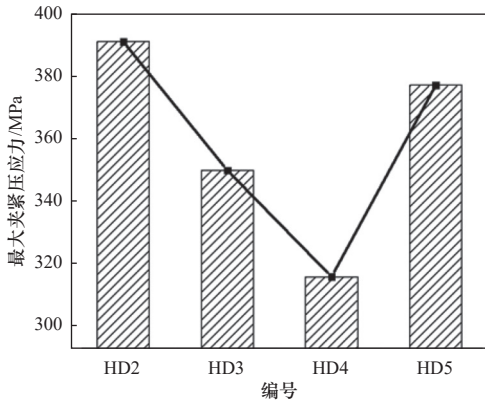


图9 最大压应力与变形区厚度的关系

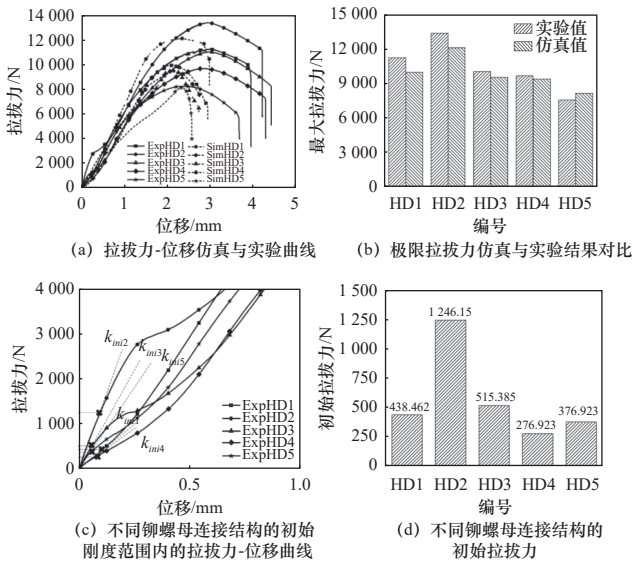


图10 拉拔力的仿真与实验结果

3.3 收口工艺对锁紧力矩的影响规律

图12为矩形模块收口后仿真结果与实验结果的对比图。从图中可以看出，仿真结果与实验结果具有较好的一致性。图13为在不同形状的收压块下对应的收口段变形仿真结果应力云图和螺栓旋入仿真结果。分析可知，收压块形状会一定程度上影响收口结果。对比4种不同型号的块状收压仿真结果发现，在同一进给量下，柳螺母收口的最大位移量几乎没有变化，收压块尺寸对柳螺母收口影响作用主要体现在变形影响区域上。收压块的宽度变化后，对柳螺母的收口位移区域的面积影响不大，宽3mm的收压块与宽2mm的收压块并没有体现出明显差异，但是长度为2mm的收压块变形区未影响到柳螺母底端，3mm长度的收压块对柳螺母底端也造成影响。其中，点状收压虽然能够使得柳螺母获得足够的变形量，但是由于变形只在小范围内，这将会造成柳螺母收口段发生应力集中。

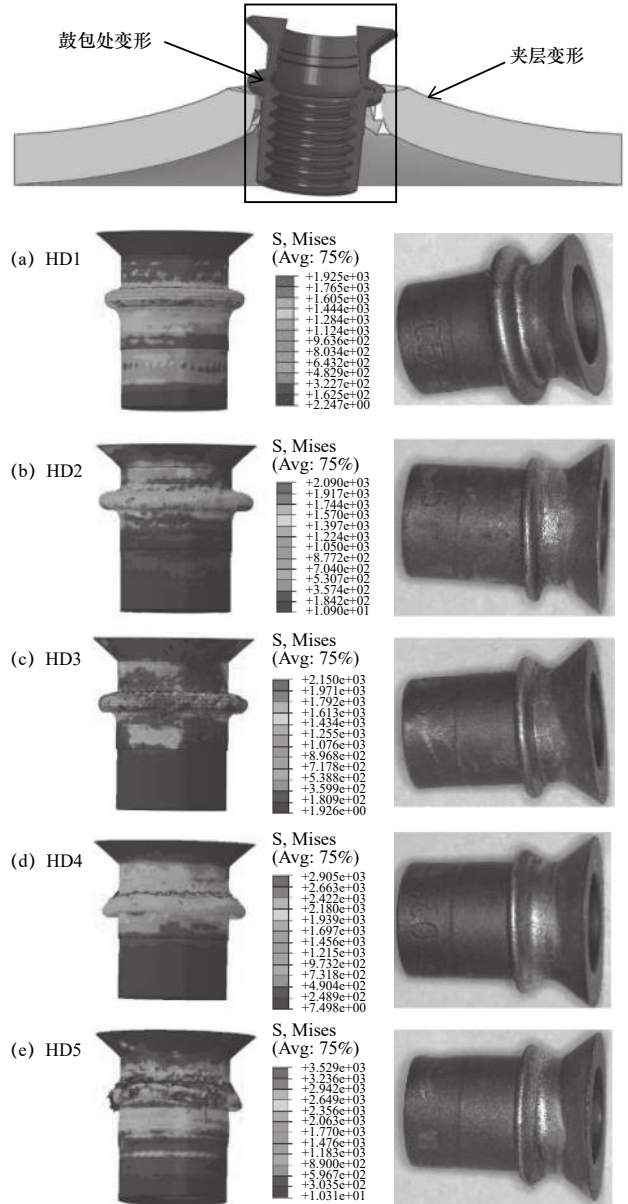


图11 连接结构拉脱后的破坏形式

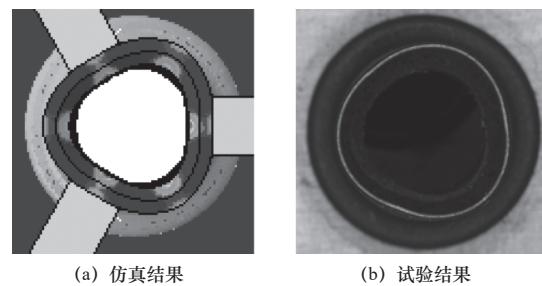


图12 收口仿真与实验结果

由于力矩值只能在节点上单一显示，因此需在仿真软件可视化模块中，创建XY数据，在ODB场变量输出中，导出唯一节点的RM值，得到XY曲线，该曲线为锁紧力矩-时间曲线图，其中2mm×3mm收压锁紧力矩曲线如图14所示，由于仿真模

型设置了一个接触步，因此在开始时力矩输出为0，当螺栓开始旋入时，力矩迅速提升至最大，随着螺栓拧入所需力矩逐渐变小，安装完毕后旋入力矩下降到0。将几种不同形式的收压块收口后的锁紧力矩分别记录在表4中。由变形云图可知，收压块截面形状为2 mm×3 mm时，锁紧力矩较大，并且收口区域的变形均匀。

表4 不同收口模具铆螺母锁紧力矩仿真结果

模具形状 / (mm×mm)	2×2	2×3	3×3	球面
锁紧力矩 / (N·mm)	1 254.75	1 797.63	1 834.77	921.31

金属材料受到较大的力，发生塑性变形后，由于其蠕变现象和恢复现象，将会发生回弹，只能保留一部分塑性变形。螺栓多次拧紧配合对收口处的变形作用机理即是如此。收口处发生扩口后将会发生回弹，仅保留一定量的塑性变形，这导致再次安装时收口量变小，锁紧力矩发生衰减。图15中，试件1、2、3为同一模具和工艺参数的铆螺母，AVE为3个试件试验结果的平均值。通过拧紧力、松脱力矩衰减实验曲线可知，铆螺母锁紧力矩和松脱力矩的衰减曲线具有相似性，力矩值随着循环试验次数增加而逐渐下降，最终锁紧力矩趋于稳定。并且，无论是锁紧力矩还是松脱力矩，力矩的衰减主要出现在第一次拧入拧出中。

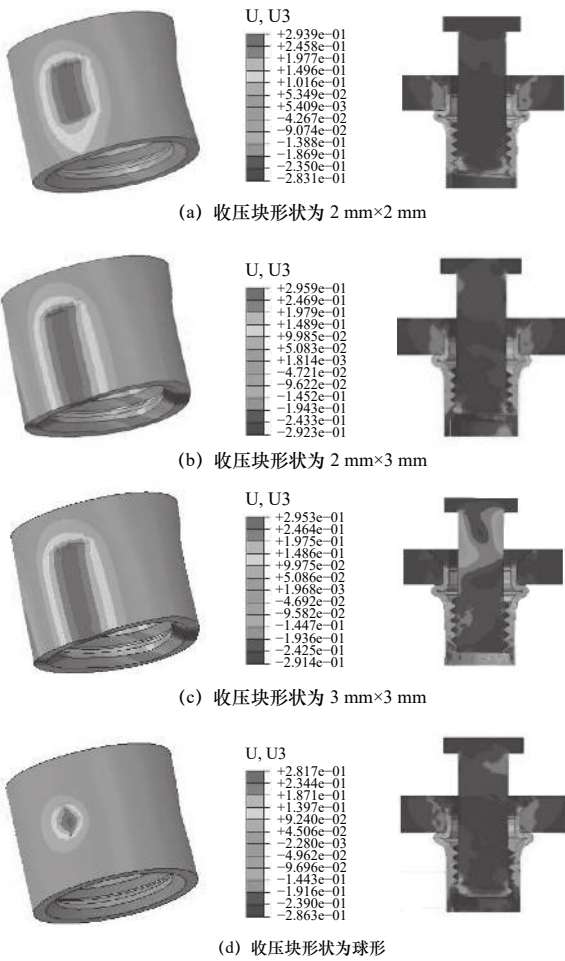
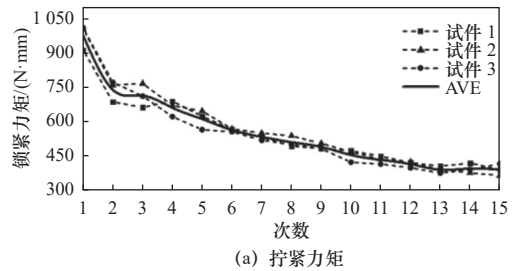
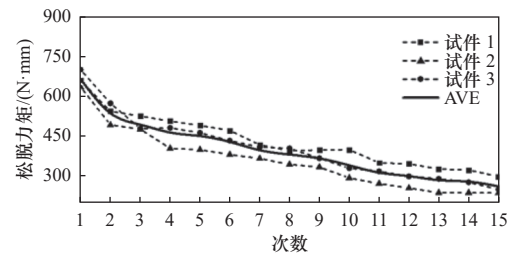


图13 收压过程结束后铆螺母变形云图与螺栓旋入仿真结果



(a) 拧紧力矩



(b) 松脱力矩

图15 循环试验拧紧与松脱力矩

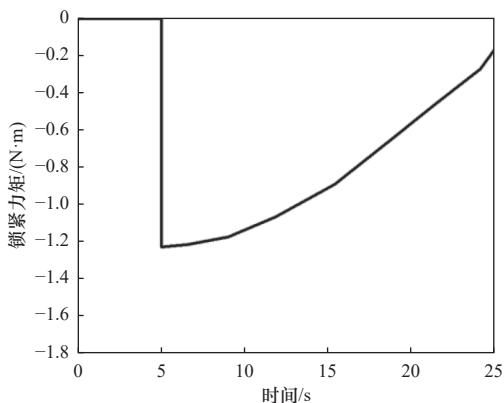


图14 截面为2 mm×2 mm 锁紧力矩曲线图

4 结语

通过实验与仿真相结合的方法，分别研究了在不同变形区厚度下铆螺母的铆接变形情况、收口工艺对锁紧力矩的影响规律以及铆接结构的拉拔失效形式与机理。对比仿真与实验结果的可知，本文提出的有限元模型能够很好地预测铆螺母的安装过程与拉拔过程失效结果，并得到以下结论：

(1) 变形区的厚度是影响铆螺母铆接质量的重要因素。变形区厚度太大(0.49 mm)，铆螺母

虽然形成了鼓包区域，但是与螺栓配合的螺纹段也发生了严重变形，这不仅会在螺牙之间引入微小的损伤，还会影响后续螺栓的连接过程。而变形区较小时，连接结构的拉拔力较小，结构容易发生。得到当铆螺母变形区厚度选取为 0.44 mm 时，整个结构初始拉拔力和破坏拉拔力均为最大，铆螺母连接结构的连接质量最好。

(2) 收压块的形状将会影响收口效果，在相同的收压量下，点状收压块和矩形收压块收压后铆螺母的最大变形量几乎相同，但是点状收压将会导致结构发生应力集中，服役过程中容易导致结构的破坏，2 mm×2 mm 的矩形收压后收口段的变形影响区较小，而 2 mm×3 mm 和 3 mm×3 mm 的收压块变形影响区大小几乎相同。

(3) 有限元仿真结果能较好反映锁紧力矩的实验结果。锁紧力矩与松脱力矩随着循环次数的升高而逐渐降低，并且力矩的衰减主要集中在第一次循环，当循环次数较高时，锁紧与松脱力矩衰减变小。

参 考 文 献

- [1] 钱成森. 一种拉铆螺母: 中国, CN213039635U[P]. 2021-04-23.
- [2] Kalkowsky F, Glienke R, Blunk C, et al. Design and execution of bearing type shear connections with blind rivets in steel construction[J]. *Stahlbau*, 2020, 89(4): 304-325.
- [3] Lucjan W, Monika L. Experimental strength analysis of riveted joints using blind rivets[J]. *Journal of Kones*, 2019, 26(1): 199-206.
- [4] Kelly B, Costello C. FEA modelling of setting and mechanical testing of aluminum blind rivets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153-154: 74-79.
- [5] Roskowitz M, Godzimirski J, Jaształ M, et al. Improvement of fatigue life of riveted joints in helicopter airframes[J]. *Eksplotacja I Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2021, 23(1): 165-175.
- [6] 李诚, 董话, 马斌, 等. 拉铆螺母在无人机复合材料口框上的应用[J]. *航空精密制造技术*, 2020(6): 55-58.
- [7] 钱一彬. 盲铆螺母安装对飞机金属结构疲劳品质的影响[J]. *中国科技信息*, 2017(9): 41-42, 44.
- [8] Studziński R. Experimental investigation of the use of blind rivets in sandwich panels[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2020, 23(9): 3669-3684.
- [9] Studziński R, Ciesielczyk K. Use of blind rivets in sandwich panels — experimental investigation of static and quasi-cyclic loading[J]. *Buildings*, 2020, 14(9): 155.
- [10] Roskowitz M, Godzimirski J, Jaształ M, et al. Analytical models of axially loaded blind rivets used with sandwich beams[J]. *Energies*, 2021, 14: 579.
- [11] Velde D, Van A, Coppeters S, et al. On the numerical prediction of the torque-to-turn-value of a blind rivet nut[J]. *International Journal of Material Forming*, 2020, 13(1): 127-141.
- [12] 王立东, 刘风雷, 赵庆云. 收口量对钛合金自锁螺母锁紧性能的影响[J]. *航空制造技术*, 2017(Z2): 79-82, 87.
- [13] 吴南星, 鲍星, 徐梅香. 不同因素对高锁螺母锁紧力矩影响的研究[J]. *航空制造技术*, 2016(9): 103-106.
- [14] 张晓斌, 杨乾, 王洪飞, 等. 盲孔镶嵌自锁螺母锁紧力矩仿真及试验研究[J]. *现代制造工程*, 2022(2): 10-15.
- [15] 刘再德, 王冠, 冯银成, 等. 6061铝合金高应变速率本构参数研究[J]. *矿冶工程*, 2011, 31(6): 120-123.

第一作者/通信作者: 王立俊, 男, 1990年生, 工程师, 主要研究方向为航空紧固件研发及技术服务。
E-mail: 5071351@qq.com

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2022-12-13)

文章编号: 20230520

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。