

托板螺母用抽芯铆钉的仿真与实验研究

石智辉¹, 王瑞强¹, 洪俊杰², 孙清超¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 东方蓝天钛金科技有限公司, 山东 烟台 264003)

摘要: 针对托板螺母用抽芯铆钉在铆接后承受载荷能力弱、钉套鼓包容易开裂而影响铆接合格率的问题, 利用仿真与实验相结合的方法对抽芯铆钉的力学规律、钉套鼓包破坏情况进行了探索。以 100° 小沉头托板螺母用抽芯铆钉为研究对象, 借助有限元仿真软件 DEFORM-3D 建立模型, 并进行了安装仿真、抗拉仿真与剪切仿真。探索了铆钉结构尺寸对抗拉力的影响规律, 得出每种型号的托板螺母用抽芯铆钉存在的最优钉套伸出长度, 确定了铆钉抗拉力与钉套内径成反比、与钉杆头部直径成正比, 并且利用钉套内径和钉杆头部直径两因素探究了钉套壁厚与钉套鼓包位置最大主应力的关系, 预测了钉套可能发生的破坏现象。最后通过对应的实验, 验证了有限元仿真模型的合理性。相关研究为提高托板螺母用抽芯铆钉的铆接合格率与研制提供了参考。

关键词: 抽芯铆钉; 钉套鼓包; 剪切力; 抗拉力; 托板螺母

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.017

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 02-0113-06

Simulation and experimental research on blind rivets for plate nuts

Shi Zhihui¹, Wang Ruiqiang¹, Hong Junjie², Sun Qingchao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Oriental Bluesky Titanium Technology Co., Ltd., Yantai 264003, China)

Abstract: Aimed at the problems that the load bearing capacity of blind rivets for plate nuts was weak after riveting, and the bulge of rivet sleeve was prone to cracking, which affected the riveting qualification rate, the mechanical law for the blind rivets and the damage situation for the bulge of rivet sleeve were explored by the method of combining simulation with experiment. For 100° small countersunk head blind rivets for plate nuts, the model for installation simulation, tensile simulation and shear simulation was established by the finite element simulation software DEFORM-3D, and the influence law of rivet structure sizes on tensile resistance force was explored. Then, the optimal extension length of rivet sleeve for each type of blind rivets for plate nuts was obtained, and it was determined that the tensile resistance force of rivet was inversely proportional to the inner diameter of rivet sleeve and directly proportional to the diameter of rivet rod head. Furthermore, the relationship between the wall thickness of rivet sleeve and the maximum principle stress at the bulge position of rivet sleeve was explored by using the inner diameter of rivet sleeve and the diameter of rivet rod head, and the possible failure phenomenon of the rivet sleeve was predicted. Finally, through the corresponding experiments, the rationality of the finite element simulation model was verified. Thus, the related research provides a reference for improving the riveting qualification rate and development of blind rivets for plate nuts.

Key words: blind rivets; bulge of rivet sleeve; shear force; tensile resistance force; plate nut

抽芯铆钉, 也可称作盲铆钉, 是一种适用于单面铆接的铆钉, 其可靠性高、连接强度大、寿命长、操作使用方便, 可用于铝合金、结构钢和复合材料的连接, 常在飞机不开敞部位的铆接及维修中使用^[1]。在只能采用单面铆接, 并且对连接强度、可

靠性和寿命要求较高的场合, 设计飞机时大量使用了美国德事隆公司生产的 CheeryMAX 铆钉, 如果要使用国产的传统紧固件, 就必须改进设计方案, 这样就增加了设计难度, 使飞机结构设计复杂化^[2]。近年来, 国内也加大了这类铆钉的研制力度, 从而满足了飞机设计的需求, 在铆接过程中, 铆钉可能会由于结构尺寸的设计不合理而降低铆接的合格率, 出现铆接后力学性能不能满足要求或者钉套开裂的问题。因此, 探究铆钉结构参数对铆接力学性能的影响规律, 对铆钉的研制具有重要意义。

国内外人员在铆钉铆接方面做了大量研究, 但



收稿日期: 2020-12-31; 修订日期: 2021-03-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目 (DUT19LAB17)

作者简介: 石智辉 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1245638368@qq.com

通信作者: 孙清超 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: qingchao@dlut.edu.cn

是在铆钉结构尺寸对铆接力学性能的影响方面研究较少。庄水和赵华^[3]对铆钉铆接成形全过程进行了有限元数值仿真,分析了成形过程中的弹塑性应力、应变分布及其变化规律;张永强等^[4]对铆钉铆接过程进行数值模拟,分析铆接成形过程中应力、应变以及载荷变化规律,并且以底切量与底部厚度两参数为研究对象,通过实验验证了仿真的有效性;杨悦等^[5]采用主应力法,结合有限元仿真,分析铆钉铆接过程中试件的受力情况,通过工艺试验,获得在保证机械连接可靠性前提下飞机铆接的最佳干涉量范围;张鸿羽等^[6]针对不同材质航空用沉头铆钉进行了装配数值模拟,并研究了两种铆钉装配后铆钉及被连接板应力、应变的异同;万书会等^[7]和王海龙等^[8]等通过建立有限元仿真模型对铆钉杆部干涉量进行了研究。影响铆接力学性能的铆钉结构参数有很多,因此,需要不断的研究发掘。

近年来,有限元仿真技术迅速发展,其中 DEFORM-3D 是针对复杂金属成形过程的三维金属流动分析的有限元仿真软件^[9],本文利用该软件对 100°小沉头托板螺母用抽芯铆钉进行了数值仿真模拟,并且从钉套伸出长度、钉套内径、钉杆头部直径 3 方面探索了铆钉结构尺寸对抗拉力的影响规律,以及钉套壁厚与钉套鼓包破坏的关系,最后进行了仿真的实验验证。

1 托板螺母用抽芯铆钉有限元仿真

铆接过程的有限元仿真步骤包括建立三维模型、定义材料类型、划分网格、建立接触关系,以及设置边界条件、施加载荷、计算求解和后处理等^[10]。利用投影仪对 5 件托板螺母用抽芯铆钉进行真实尺寸测量后取平均值,在 Solidworks 软件中建立几何模型,另存为 STL 格式后,将其导入 DEFORM-3D 模拟软件中。

钉套与钉杆的材料分别为 A286 高温合金与 305 不锈钢,材料的性能如表 1 所示,抗拉工装与剪切工装材料为高硬度合金钢,相比于塑性体铆钉,可以视为刚体,同理铆枪顶片也设置为刚体。安装板材料为铝合金,仿真中将其设置为刚体,这样做的目的是在不影响安装实验中钉套鼓包形成的前提下,在安装仿真完成后可以去除钉杆,用同一模型设置 2 个操作进行抗拉仿真。设定模拟温度为 20 ℃,通过万能拉伸试验机处理后得到钉套、钉杆材料的真实应力-真实应变曲线,考虑铆接后钉套鼓包位置

表 1 钉套与钉杆的性能参数

Table 1 Performance parameters of rivet sleeve and rivet rod

| 材料 | 泊松比 | 弹性模量 E/MPa |
|----------------|-----|---------------------|
| 钉套材料-A286 高温合金 | 0.3 | 201 |
| 钉杆材料-305 不锈钢 | 0.3 | 195 |

的材料得到硬化,由后继屈服条件及加卸载准则^[11],得到抗拉实验中的钉套头部材料,即硬化后的钉套的真实应力-真实应变曲线如图 1 所示。

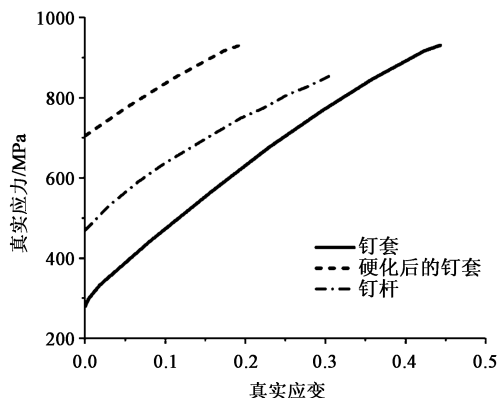


图 1 真实应力-真实应变曲线

Fig. 1 Curves of true stress-true strain

DEFORM-3D 具有强大的网格自动划分与重划分功能,采用完全四面体网格划分中的绝对网格划分形式对铆接模型中的变形体进行网格划分^[12]。对安装过程、拉伸过程、剪切过程分别进行网格划分,同时,在安装过程和抗拉过程的钉套鼓包部位、剪切过程的受剪切部位进行局部网格划分,划分网格后的几何模型如图 2 所示。网格数量达到一定值,能够使得载荷-位移曲线更为平滑,达到降噪的效果,同时网格数量不宜过大,以免计算时间过长,按照能够使所求抗拉力、抗剪力值稳定的原则,进行网格数量调整,得到较优的网格数量。

按照相对硬度设置主、从接触关系,根据实际情况,安装过程、拉伸过程、剪切过程均为冷变形过程,因此,将摩擦类型设置为库伦摩擦,摩擦因数均设置为 0.12。

在安装过程中,设定钉杆的运动速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,根据网格划分最小单元尺寸的 1/3 设定步长为 0.05 mm;在抗拉过程中,设置上夹层的运动速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,设定步长为 0.02 mm;在抗剪过程中,设置剪刀的运动速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,设定步长为 0.04 mm。

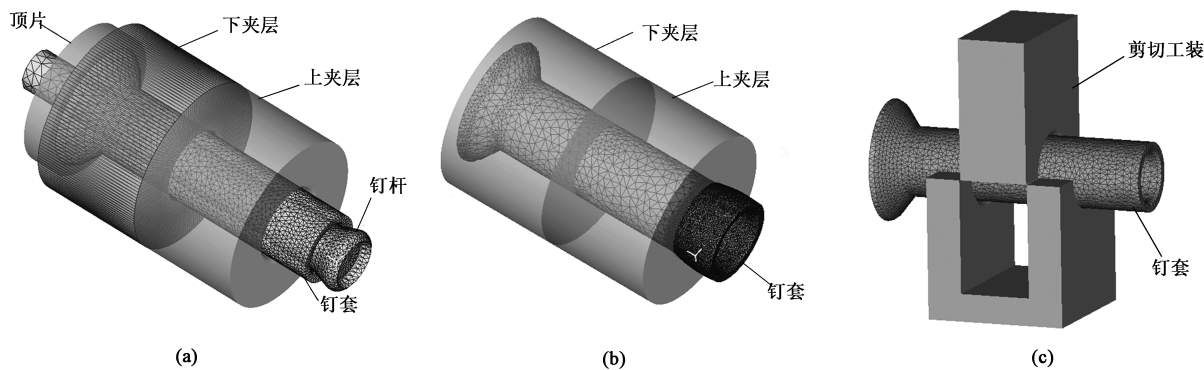


图 2 划分网格后的几何模型
(a) 安装过程 (b) 拉伸过程 (c) 剪切过程
Fig. 2 Geometric models after meshing
(a) Installation process (b) Tensile process (c) Shear process

2 仿真结果及规律探索

2.1 仿真结果

安装仿真后形成的钉套鼓包形状可以通过钉套鼓包直径与伸出长度来观察其特征, 仿真结果表明, 钉套鼓包直径为 $\Phi 2.85$ mm, 钉套伸出长度为 1.46 mm。在抗拉仿真中, 仿真后钉套的长度为 9.88 mm, 而初始长度为 9.66 mm, 变化长度为原长度的 2.28%。抗拉仿真得到的抗拉力为 1220 N, 剪切仿真得到的剪切力为 2290 N, 抗拉仿真与剪切仿真的载荷-位移曲线如图 3 所示。

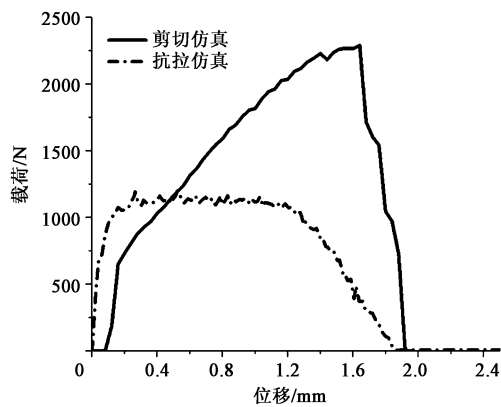


图 3 抗拉仿真与剪切仿真的载荷-位移曲线
Fig. 3 Curves of load-displacement for tensile simulation and shear simulation

2.2 结构尺寸的影响规律

为了给生产提供一定的指导, 从结构方面对铆钉进行影响规律探索。对于剪切力, 铆钉结构方面的影响因素主要为钉套壁厚, 其影响规律较为简单, 对此不做分析。主要从铆钉结构方面对抗拉力的影

响规律进行分析, 改变铆钉的钉套伸出长度、钉套内径和钉杆头部直径, 分别仿真后得到其抗拉力, 如表 2、表 3 和表 4 所示, 技术指标规定拉伸最小破坏载荷为 745 N。

表 2 钉套伸出长度与抗拉力的关系
Table 2 Relation between extension length of rivet sleeve and tensile resistance force

| 钉套伸出长度/mm | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 0.85 | 1.00 |
|-----------|------|------|------|------|------|
| 抗拉力/N | 653 | 726 | 791 | 861 | 1180 |
| 钉套伸出长度/mm | 1.15 | 1.30 | 1.45 | 1.60 | 1.66 |
| 抗拉力/N | 1010 | 975 | 1090 | 1200 | 1110 |

表 3 钉套内径与抗拉力的关系
Table 3 Relation between inner diameter of rivet sleeve and tensile resistance force

| 钉套内径/mm | $\Phi 1.60$ | $\Phi 1.70$ | $\Phi 1.80$ | $\Phi 1.85$ | $\Phi 1.90$ |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 抗拉力/N | 1280 | 1210 | 903 | 743 | 370 |

表 4 钉杆头部直径与抗拉力的关系
Table 4 Relation between diameter of rivet rod head and tensile resistance force

| 钉杆头部直径/mm | $\Phi 2.1$ | $\Phi 2.2$ | $\Phi 2.3$ | $\Phi 2.4$ | $\Phi 2.5$ | $\Phi 2.6$ |
|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 抗拉力/N | 449 | 814 | 905 | 1290 | 1310 | 1400 |

从表 2 可以得出, 最小钉套伸出长度为 0.70 mm, 而且伸出长度 ≥ 1.00 mm 时, 铆钉的抗拉力值在 1100 N 附近变化。由此得出结论: 当某一种型号的托板螺母用抽芯铆钉其余尺寸均确定后, 钉套伸出长度超过一定值后铆钉的抗拉力便趋于稳定。钉套最优伸出长度可以结合铆接板最大厚度尺寸来确定。

从表 3 和表 4 可以得出, 最大钉套内径为 $\Phi 1.80$ mm, 最小钉杆头部直径为 $\Phi 2.2$ mm, 铆钉抗拉力与钉套内径成反比、与钉杆头部直径成正比。

由上文可知, 钉套伸出长度与铆钉的具体型号有关, 所以, 对钉套内径和钉杆头部直径两因素进行全析因实验设计, 设置钉套内径 d 为 1.70、1.75、1.80、1.85 和 1.90 mm, 钉杆头部直径 D 为 2.2、2.3、2.4、2.5 和 2.6 mm, 共 25 组仿真。保持钉杆头部直径不变, 以钉杆头部直径为 $\Phi 2.6$ mm 为例, 在后处理第 58 步处 (各组鼓包形成过程中最大主应力值较大处) 将钉套的鼓包位置选中, 观察钉套的最大主应力值。可以得出: 随着钉套内径的减小, 即钉套壁厚增大, 鼓包位置最大主应力值增大, 钉套发生开裂的风险增大, 因此, 在实际生

产中应该避免钉套壁厚过大。

钉套鼓包开裂风险可以结合鼓包成形过程进行分析, 如图 4 所示。从开始到第 12 步, 钉杆头部对钉套前端的作用力较大, 钉套的最大主应力从最前端向钉套内部逐渐减小, 钉套内表面比外表面的应力分布面积大; 从第 13 步到第 58 步, 钉杆头部逐渐全部伸入钉套, 钉套最大主应力的最大值从钉套前端面逐渐转为钉套内部, 这是钉套与钉杆的接触位置的应力集中现象, 且在该位置处钉套内部最大主应力明显大于钉套外部, 说明钉套开裂是由内而外发生的, 到达第 58 步处时鼓包基本形成, 整个鼓包成形过程中最大主应力达到最大值, 最容易发生开裂; 从第 59 步到第 74 步, 钉杆逐渐进入夹层孔内, 鼓包成形过程结束。

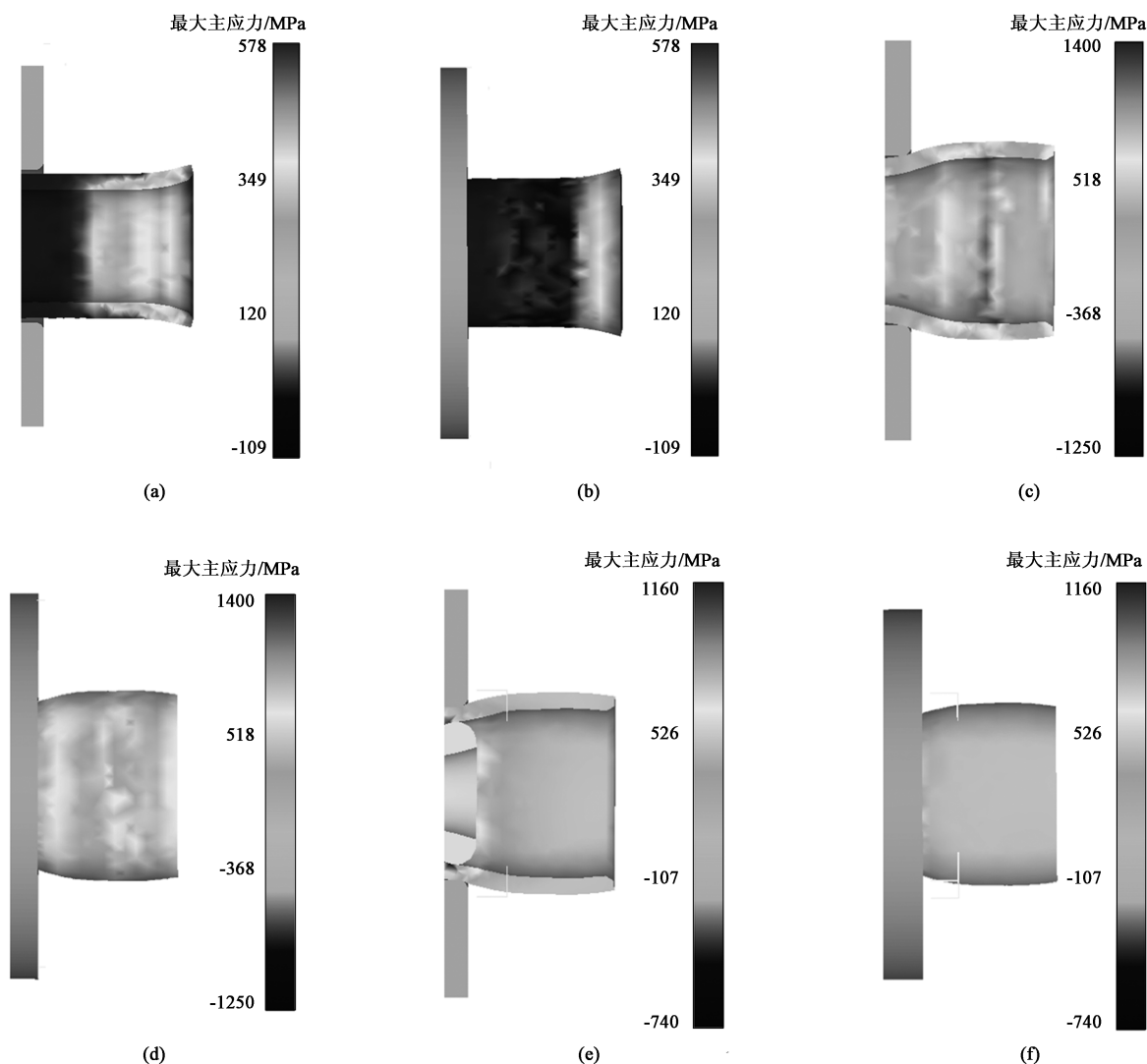


图 4 钉套鼓包位置的最大主应力云图

(a) 第 1 步 (b) 第 12 步 (c) 第 13 步 (d) 第 58 步 (e) 第 59 步 (f) 第 74 步

Fig. 4 Maximum principal stress nephograms of bulge position for rivet sleeve

(a) Step 1 (b) Step 12 (c) Step 13 (d) Step 58 (e) Step 59 (f) Step 74

3 托板螺母用抽芯铆钉实验验证

3.1 安装实验

安装实验过程为:将托板螺母用抽芯铆钉插入铆孔内,用铆枪夹持钉杆,然后抽拉钉杆,钉杆被完全抽出,钉套膨胀后形成盲端镦头,安装板获得夹紧力,铆接完成,如图5所示。铆接完成后,对盲端进行检查,实验结果表明,多组样件铆接全部正常,未出现开裂、裂纹等缺陷。对钉套鼓包直径与伸出长度进行测量,与仿真结果对比如表5所示,仿真尺寸均在实验尺寸范围内。

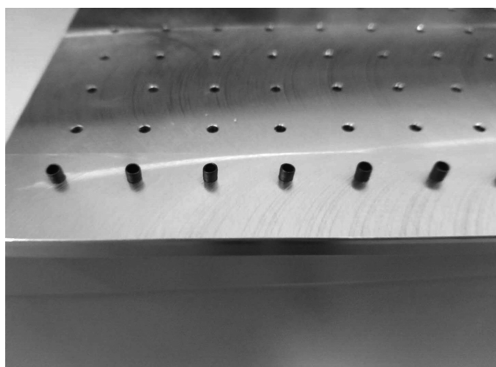


图5 安装实验

Fig. 5 Installation experiment

表5 钉套鼓包参数对比 (mm)

Table 5 Comparison of bulge parameters for rivet sleeve (mm)

| 参数 | 实验值 | 仿真值 |
|--------|-----------------------|-------------|
| 钉套鼓包直径 | $\Phi 2.83 \sim 2.91$ | $\Phi 2.85$ |
| 钉套伸出长度 | $1.19 \sim 1.49$ | 1.46 |

3.2 抗拉实验

抗拉实验的实验台为微机控制电子万能实验机。将铆钉铆接于抗拉工装后,通过程序控制实验台进行拉伸工装,经载荷传感器和引伸计将抗拉载荷与位移值传送至计算机,自动绘制载荷-位移曲线图,并与仿真曲线对比,如图6所示。

对实验后的钉套进行长度变化测试,相比于实验前的钉套,实验中增长百分比为1.43%~3.56%,仿真中增长百分比为2.28%,在实验的范围内;实验中的抗拉力值为1180 N,而仿真中的抗拉力值为1220 N,误差百分比为3.28%。同时,对比抗拉实验与抗拉仿真的载荷-位移曲线,曲线的整体趋势相同。可以得出:抗拉仿真结果与实验结果有较好的一致性。

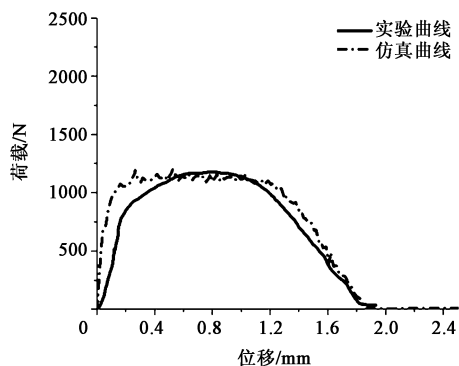


图6 铆钉拉伸载荷-位移曲线

Fig. 6 Curves of tensile load-displacement for rivet

3.3 剪切实验

剪切实验的实验台为微机控制电子万能实验机,通过程序控制剪切工装进行托板螺母用抽芯铆钉的剪切实验操作,将数据传到计算机后,自动绘制出载荷-位移曲线图,并与仿真曲线进行对比,如图7所示。

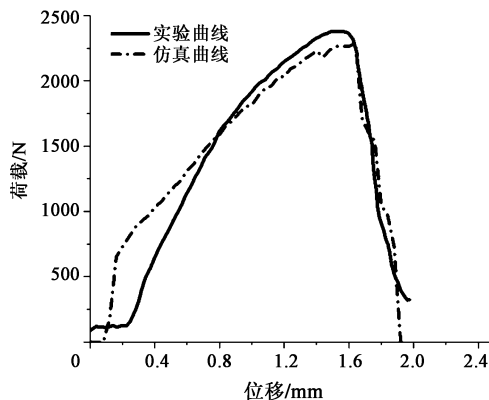


图7 钉套剪切载荷-位移曲线

Fig. 7 Curves of shear load-displacement of rivet sleeve

剪切实验得到的剪切力值为2420 N,而仿真中剪切力值为2290 N,误差百分比为5.37%。同时,对比剪切实验与剪切仿真的载荷-位移曲线,虽然开始由于实验中剪刀与钉套垂直的不确定性而出现曲线差异,但是曲线整体趋势相同。可以得出:剪切仿真结果与实验结果有较好的一致性。

4 结论

(1) 当钉套伸出长度以外的其余铆钉尺寸确定后,存在钉套最小伸出长度,且存在最优钉套伸出长度,达到最优钉套伸出长度后,抽芯铆钉抗拉力在某一力值附近稳定地上、下波动。

(2) 当钉套内径以外的其余铆钉尺寸确定后, 存在最大钉套内径, 且铆钉的抗拉力与钉套内径成反比。

(3) 当钉杆头部直径以外的其余铆钉尺寸确定后, 存在最小钉杆头部直径, 且铆钉的抗拉力与钉杆头部直径成正比。

(4) 钉套鼓包基本形成的某一时刻, 最大主应力值达到最大值, 最容易发生开裂, 且钉套的开裂是由内而外发生的; 随着钉套壁厚的增大, 钉套鼓包位置最大主应力值增大, 鼓包开裂风险增大, 在实际生产中应该避免钉套壁厚过大。

参考文献:

- [1] 夏新鑫. 抽芯铆钉的结构原理及应用介绍 [J]. 装备制造技术, 2017, (11): 145-146, 155.
Xia X X. Structure principle and application of core-pulling rivet [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017, (11): 145-146, 155.
- [2] 陈兴安. 机械锁紧鼓包型抽芯铆钉 [D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
Chen X A. Mechanical Locked Spindle and Bulbed Rivet [D]. Xi'an: Northwest University of Technology, 2002.
- [3] 庄水, 赵华. 螺纹铆钉铆接成形过程仿真分析 [J]. 应用数学和力学, 2014, 35 (S1): 246-251.
Zhuang S, Zhao H. Simulation of the riveting molding process for screw-rivets [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35 (S1): 246-251.
- [4] 张永强, 伊日贵, 付参, 等. 钢铝自冲铆接工艺过程仿真与实验研究 [J]. 电焊机, 2018, 48 (10): 26-29.
Zhang Y Q, Yi R G, Fu C, et al. Simulation and experiments on self piercing riveting process of steel and aluminum [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48 (10): 26-29.
- [5] 杨悦, 余路, 蒋红宇, 等. 铆接干涉量对疲劳寿命的影响分析 [J]. 机械制造与自动化, 2021, 50 (2): 87-90.
Yang Y, Yu L, Jang H Y, et al. The effects of interference-fit level on fatigue [J]. Machine Building & Automation, 2021, 50 (2): 87-90.
- [6] 张鸿羽, 余敏, 丁腾飞, 等. 不同材质航空用沉头铆钉装配数值模拟 [J]. 机械, 2019, 46 (8): 32-37.
Zhang H Y, Yu M, Ding T F, et al. Numerical simulation on the aviation countersunk rivet assembly using different aviation materials [J]. Machinery, 2019, 46 (8): 32-37.
- [7] 万书会, 刘涛, 吕晓敏, 等. 锥形铆模对铆钉成形质量的影响 [J]. 航空精密制造技术, 2020, 56 (1): 36-39.
Wan S H, Liu T, Lyu X M, et al. Effect of conical riveting die on rivet forming quality [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2020, 56 (1): 36-39.
- [8] 王海龙, 王华. 气动锤铆过程有限元仿真建模与实验研究 [J]. 机械设计与制造, 2020, (11): 154-157.
Wang H L, Wang H. Finite element simulation modeling and experimental study of pneumatic hammer riveting process [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020, (11): 154-157.
- [9] 徐学春, 胡广洪, 董万鹏. Deform 在航天航空工业中的应用 [J]. 精密成形工程, 2012, 4 (6): 53-55, 125.
Xu X C, Hu G H, Dong W P. Deform application in aeronautics and astronautics industry [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4 (6): 53-55, 125.
- [10] 李梁. 机电产品可拆卸性设计理论研究及实现 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2005.
Li L. Research and Framework on the Design for Disassembly of Machinery [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2005.
- [11] 夏志皋. 塑性力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1991.
Xia Z G. Plastic Mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1991.
- [12] 李文超, 钱炜, 闫强, 等. 基于 DEFORM-3D 的干涉配合铆接仿真研究 [J]. 上海理工大学学报, 2014, 36 (5): 479-482.
Li W C, Qian W, Yan Q, et al. Simulation of interference-fit riveting by using the software DEFORM-3D [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2014, 36 (5): 479-482.

“第十九届国际金属成形会议”将于 9 月 11-14 日在山西省太原市举办

由中国机械工程学会塑性工程分会主办的“第十九届国际金属成形会议 (The 19th International Conference on Metal Forming 2022)”将于 2022 年 9 月 11-14 日在山西省太原市举办。本次为该金属成形领域著名国际学术会议自 1974 年创办以来首次在中国举办。

会议组织机构:

● 联合主席: 黄庆学 (太原理工大学)、赵国群 (山东大学)、Danuta Szeliga (AGH University of Science and Technology)、Krzysztof Muszka (AGH University of Science and Technology)、Livan Fratini (University of Palermo)、Fabrizio Micari (University of Palermo)、Yohei Abe (Toyohashi University of Technology)、Tomoyoshi Maeno (Yokohama National University)

● 指导委员会、学术委员会及国内组织委员会 (详见会议报名网站: <https://metalfforming2022.acconf.org/index.html>)

重要时间节点:

● 论文提交截止时间: 2022 年 4 月 1 日 ● 通知论文接收结果: 2022 年 5 月 20 日 ● 提前缴费截止时间: 2022 年 7 月 1 日
会议主办方联系方式: 地址: 北京市海淀区学清路 18 号 中国机械工程学会塑性工程分会, 100083 电话: 010-62920654
秘书处邮箱: duanya@cmes.org 会议邮箱: metalfforming2022@cmes.org
联系人: 秦思晓 (15201461873)、周林 (13811919643)、金红

中国机械工程学会塑性工程分会