

无头铆钉的数值模拟分析

沙庆涛, 刘 淼, 曹 健, 张奇野, 李 昂

首都航天机械有限公司, 北京
Email: machinejiu@163.com

收稿日期: 2021年4月29日; 录用日期: 2021年5月30日; 发布日期: 2021年6月8日

摘 要

为分析无头铆钉的铆接变形过程, 采用ABAQUS软件建立仿真模型, 从金属流动角度分析铆接变形过程的五个阶段: 初始放置阶段、铆钉压缩阶段、填充阶段、镢头成形阶段、弹性回复阶段。铆钉越长, 镢粗现象越明显, 干涉量越大。钉孔直径增大, 干涉量减小。相同尺寸的无头铆钉的干涉量大于有头铆钉。

关键词

无头铆钉, 铆接变形过程, 干涉量, 双面鼓形镢头

Numerical Simulation Analysis of Headless Rivet

Qingtao Sha, Miao Liu, Jian Cao, Qiye Zhang, Ang Li

Department Capital Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing
Email: machinejiu@163.com

Received: Apr. 29th, 2021; accepted: May 30th, 2021; published: Jun. 8th, 2021

Abstract

In order to analyze the riveting deformation process of headless rivets, the simulation model is established by ABAQUS software. Five stages of the riveting deformation process are analyzed from the perspective of metal flow: initial placement stage, rivet compression stage, filling stage, spade-head forming stage and elastic recovery stage. The longer the rivet, the more obvious phenomenon of the sensitivity and coarse, the greater the interference. When the diameter of the nail hole increases, the amount of interference decreases. The interference of headless rivets of the same size is greater than that of ordinary rivets.

Keywords

Headless Rivet, Rivet Deformation Process, Interference Value, Double Drum Upsetting Head

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 机械化、自动化是航空航天铆接装配制造技术发展的必然趋势, 自动化铆接不仅大大提高了生产效率, 减轻工人的劳动强度, 而且保证了产品质量的一致性[1] [2]。有头铆钉手工铆接工艺技术成熟, 但与自动钻铆设备匹配性差, 当送钉杆直径较大时, 会出现送钉杆与桁条立筋干涉的现象, 根本原因是铆钉钉头尺寸大于钉杆。无头铆钉的出现恰可解决这一难题, 无头铆钉是一种没有铆钉头的实心圆杆干涉铆钉, 它具有以下优点: 1) 铆接后沿铆钉杆全长可形成较均匀的干涉配合, 成倍地提高连接结构的疲劳寿命; 2) 采用无头铆钉干涉配合的铆接, 能够可靠地保证铆钉自身的密封性[3]。

无头铆钉一般用于自动钻铆设备, 当装配件下架后往往还需要二次上架补铆一定数量的铆钉。尽管补铆的铆钉数量很少, 但二次上数控托架、定位等却要花费很多时间, 影响整个自动钻铆设备的高效利用, 从而增加产品制造成本。因此有必要展开无头铆钉架下铆接的工艺参数研究。本文以 ABAQUS 软件为基础, 分析无头铆钉铆接变形的过程, 以双面鼓形镦头为例, 进行了以下分析: 不同铆钉长度对镦头尺寸和干涉量的影响, 不同钉孔直径对干涉量的影响, 有头铆钉和无头铆钉的性能对比。

2. 仿真模型的建立

铆接过程中铆钉各点位移、应变和应力对称于铆钉轴线, 而夹层材料在铆接过程中塑性影响区材料各点位移、应变和应力也对称于铆钉的中心轴, 因此在数值模拟中的集合模型采用轴对称模型。模型中只取中轴面的 1/2。铆钉和夹层网格均采用轴对称应力单元 CAX4R, 有限元模型及网格划分如图 1 所示。

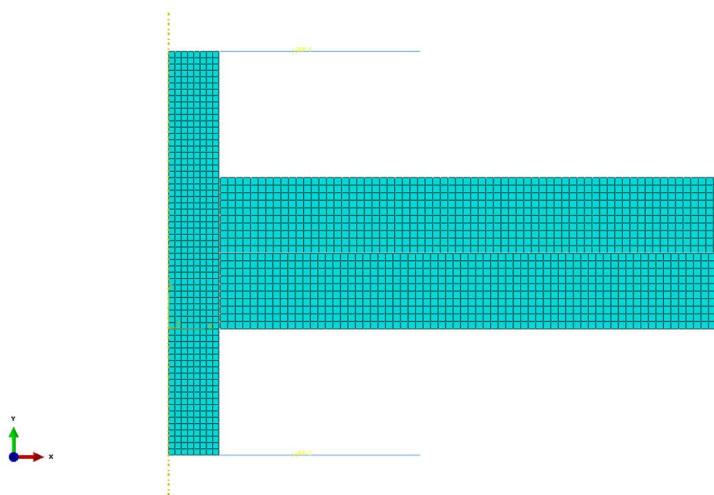


Figure 1. Finite element model and meshing

图 1. 有限元模型及网格划分

2.1. 材料选型及参数

本文仿真选用的无头铆钉材料为2A10, T4 状态, 其弹性模量为71 GPa, 泊松比0.31, 密度2800 Kg/m³, 其应力应变关系如图2所示。铆接件材料选2A12, T4 状态, 其弹性模量为72 GPa, 泊松比0.31, 密度2800 Kg/m³ [4]。铆接工具铆接时变形较小, 故仿真中以刚性平面代替。

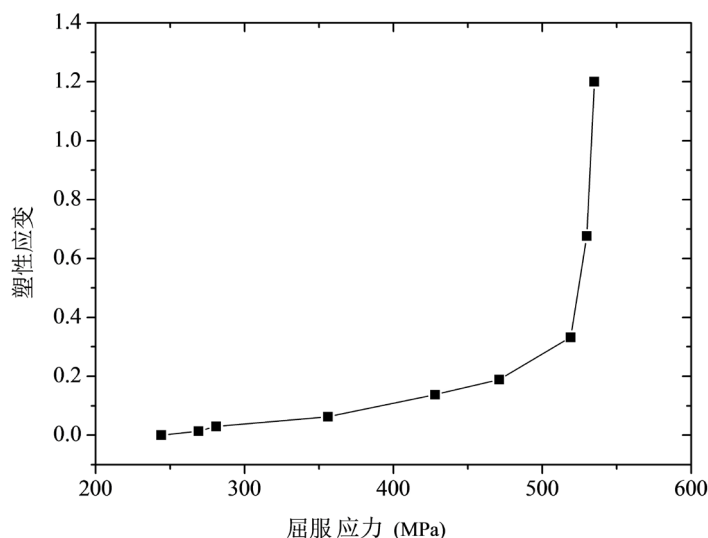


Figure 2. Stress-strain diagram of 2A12 aluminum alloy

图2. 2A10 铝合金材料应力 - 应变关系图

2.2. 接触和摩擦处理

相互作用的切向行为为罚函数, 摩擦系数为0.17。法向行为为硬接触, 为分析铆接后的残余应力, 允许接触后分离。

2.3. 载荷和边界条件

对上下方刚性平面施加完整约束, 模拟铆枪枪头和顶铁(或枪头)实际工况; 由于整个模型为轴对称建模, 所以在中轴线处对模型的横向位移进行约束。

铆接成形时间较短, 且整个过程中冲击力变化起伏较大, 以冲击力的方式施加载荷显然不能实现, 所以对上下方刚性平面施加纵向的位移约束, 模拟对铆钉的位移载荷。

3. 铆接变形过程模拟分析

按铆钉镦粗情况将铆接变形分五个阶段[5] [6]

1) 初始放置阶段: 将铆钉放置在预先开有孔的被连接件中, 用专用工装保证两边的外伸量一致, 如图3(a)所示。

2) 铆钉压缩阶段: 从压铆头和铆钉接触开始, 钉杆逐渐被镦粗, 随着压铆头位移的增大, 压铆力逐渐增大, 铆钉的钉杆从弹性变形逐渐转换到塑性变形。这一阶段中只有铆钉的挤压变形, 铆钉和钉孔之间还未接触, 如图3(b)所示。

3) 钉孔填充阶段: 压铆头继续移动, 铆钉和钉孔开始接触, 接触面积逐渐增大, 铆钉的径向变形受到约束, 对被铆接件形成横向挤压, 这一阶段铆钉中金属变形以向下流动为主, 直到钉杆在整个钉孔轴

向完全填充，如图 3(c)所示。

4) 镢头成形阶段：在径向成形进一步受到约束时，在被连接件外的铆钉端开始局部镢粗，镢粗部分和被连接件表面相接触，在两者表面的摩擦力作用下，铆钉中金属流动方向由向下流动逐渐改变为向侧向流动，镢头逐渐增大，对被连接件形成轴向挤压，直到压铆头运动到指定的行程后，形成完整镢头，如图 3(d)所示。

5) 弹性回复阶段：在压铆头运动到指定的行程后开始逐渐远离墩头，镢头和压铆头逐渐分离。铆钉和被铆接板上的弹性变形逐渐回复，如图 3(e)所示。

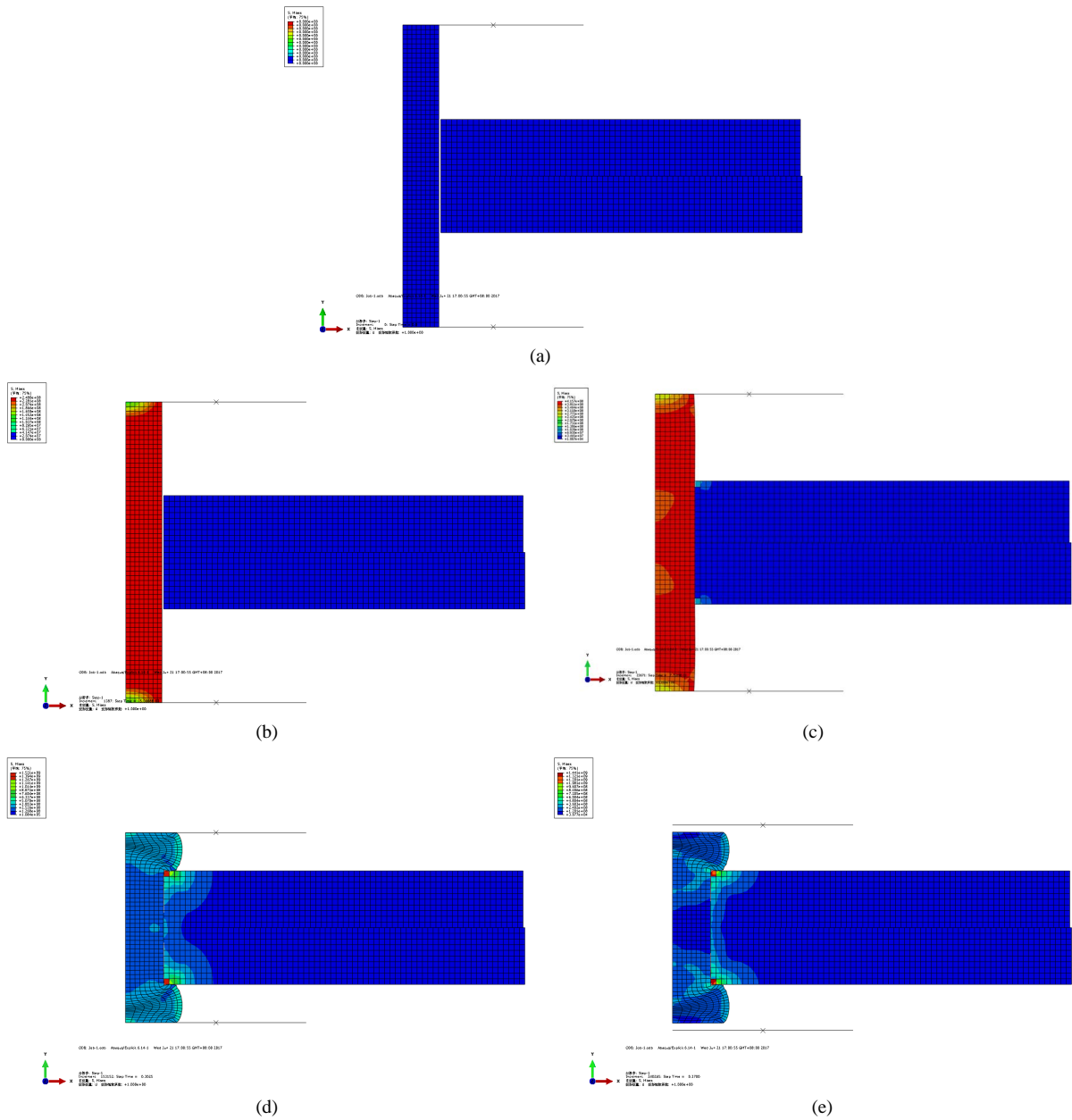


Figure 3. Rivet deformation process. (a) initial stage; (b) rivet compression stage; (c) filling stage; (d) forming stage elastic recovery stage; (e) spade-head forming stage

图 3. 铆钉变形过程。(a) 初始阶段；(b) 压缩阶段；(c) 填充阶段；(d) 成形阶段；(e) 回复阶段

4. 无头铆钉干涉量影响因素分析

4.1. 干涉量计算方法

铆接干涉量有绝对干涉量和相对干涉量两种，绝对干涉量为铆后孔径或钉径减去铆前直径，相对干涉量还要除以铆前直径，相对干涉量更能反应干涉情况。计算干涉量，在杆径位置取四点求平均值，取点如图4所示。

相对干涉量计算公式为：

$$\delta = \frac{D - D_0}{D_0} \times 100\%$$

式中， D_0 —铆前直径， D —铆后孔径或钉径。

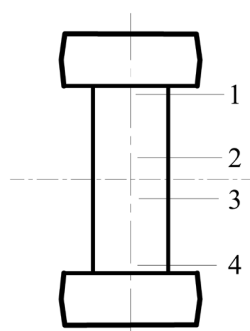


Figure 4. Schematic diagram of calculation value of interference quantity

图4. 干涉量计算取值示意图

4.2. 铆钉长度对铆接成形的影响

航空航天领用对产品重量要求严格，一个铆接成形的壳体上会有成千上万颗铆钉，铆钉长度较长则会使壳体产品重量增加，铆钉长度较短则连接强度不够[4]。本文的研究以常用的 $\Phi 4$ 铆钉为例，钉孔直径为 $\Phi 4.1$ ，连接件的夹层总厚 6 mm，选择铆钉长度为 15 mm、16 mm、17 mm、18 mm 来分析，保证成形时间一致，查看铆接成形后的镢头直径、镢头高度和干涉量。仿真结果如表1、图5所示。

Table 1. Data sheet of rivet interference of difference lengths

表1. 不同铆钉长度干涉量数据表

仿真序号	铆钉长度 (mm)	镢头直径 (mm)	镢头高度 (mm)	干涉量均值 (%)	直径1 (mm)	直径2 (mm)	直径3 (mm)	直径4 (mm)																										
1	15	6.0307	2.0376	0.44	4.1056	4.1056	4.1290	4.1056																										
		6.0247	2.0465						2	16	6.3608	2.0462	0.45	4.1298	4.1050	4.1056	4.1340	6.3744	2.0380	3	17	6.6888	2.0330	0.48	4.1356	4.1058	4.1052	4.1314	6.6884	2.0480	4	18	6.9871	2.0434
2	16	6.3608	2.0462	0.45	4.1298	4.1050	4.1056	4.1340																										
		6.3744	2.0380						3	17	6.6888	2.0330	0.48	4.1356	4.1058	4.1052	4.1314	6.6884	2.0480	4	18	6.9871	2.0434	0.50	4.1346	4.1060	4.1060	4.1350	6.9863	2.0432				
3	17	6.6888	2.0330	0.48	4.1356	4.1058	4.1052	4.1314																										
		6.6884	2.0480						4	18	6.9871	2.0434	0.50	4.1346	4.1060	4.1060	4.1350	6.9863	2.0432															
4	18	6.9871	2.0434	0.50	4.1346	4.1060	4.1060	4.1350																										
		6.9863	2.0432																															

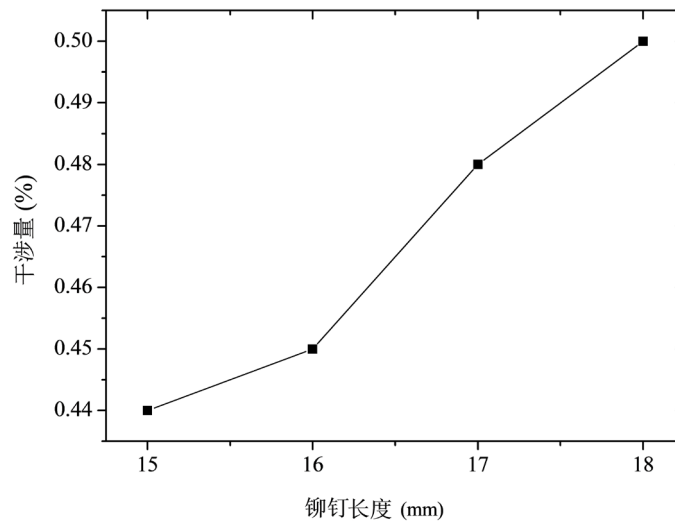


Figure 5. River length interference diagram

图 5. 铆钉长度干涉量关系图

由仿真结果知, 随着铆钉长度的增加, 干涉量逐渐增大。因仿真中设置不同长度的铆钉成形后的镢头高度基本一致, 故铆钉长度越长, 成形后的铆钉镢头直径越大, 镢头直径大, 说明在镢头成形阶段铆钉镢粗现象明显, 铆钉对连接件的轴向及侧向挤压越明显, 干涉量就大。由测量的四处直径知, 离镢头越近的干涉量越大, 此处的镢粗现象更明显。

4.3. 钉孔直径对铆接成形的影响

铆钉直径 4 mm, 铆钉长度 16 mm, 设置不同的钉孔直径 $\Phi 4.1$ 、 $\Phi 4.2$ 、 $\Phi 4.3$, 铆钉在钉孔直径成形过程中, 由于钉杆存在镢粗的情况, 钉孔直径的增大使得钉杆镢粗阶段时间延长、铆钉对连接件的轴向及侧向挤压越小, 使得上下干涉量相较于小钉孔更加均匀, 但相对干涉量逐渐减小, 如表 2 所示。

Table 2. Interference data table of difference nail hole diameters

表 2. 不同钉孔直径干涉量数据表

试验序号	钉孔直径 (mm)	镢头直径 (mm)	镢头高度 (mm)	干涉量均值 (%)	直径 1 (mm)	直径 2 (mm)	直径 3 (mm)	直径 4 (mm)															
1	4.1	6.3608	2.0462	0.45	4.1298	4.1050	4.1056	4.1340															
		6.3744	2.0380						2	4.2	6.2566	2.0414	0.31	4.2208	4.2040	4.2044	4.2224	6.2552	2.0453	3	4.3	6.1861	2.0420
2	4.2	6.2566	2.0414	0.31	4.2208	4.2040	4.2044	4.2224															
		6.2552	2.0453						3	4.3	6.1861	2.0420	0.22	4.3188	4.3009	4.3006	4.3172	6.1581	2.0417				
3	4.3	6.1861	2.0420	0.22	4.3188	4.3009	4.3006	4.3172															
		6.1581	2.0417																				

5. 有头铆钉和无头铆钉的对比

航空航天常用铆钉为半圆头铆钉、 90° 或者 120° 沉头铆钉, 为分析有头铆钉和无头铆钉的铆接性能优劣, 以直径 $\Phi 4$ 为例做仿真试验。设置钉孔直径 $\Phi 4.1$, 连接件的夹层总厚 6 mm。选用的无头铆钉长度为 16 mm, 有头铆钉的长度为 11 mm, 保证铆钉外伸量一致。得到的仿真数据表如表 3、图 6 所示。

Table 3. Interference data sheet for ordinary and headless rivets
表 3. 有头铆钉和无头铆钉干涉量数据表

试验序号	铆钉形式	镢头直径 (mm)	镢头高度 (mm)	干涉量均值 (%)	直径 1 (mm)	直径 2 (mm)	直径 3 (mm)	直径 4 (mm)
1	有头铆钉	6.1891	2.0618	0.24	4.1036	4.1029	4.1039	4.1289
2	无头铆钉	6.3608	2.0462	0.45	4.1298	4.1050	4.1056	4.1340
		6.3744	2.0380					

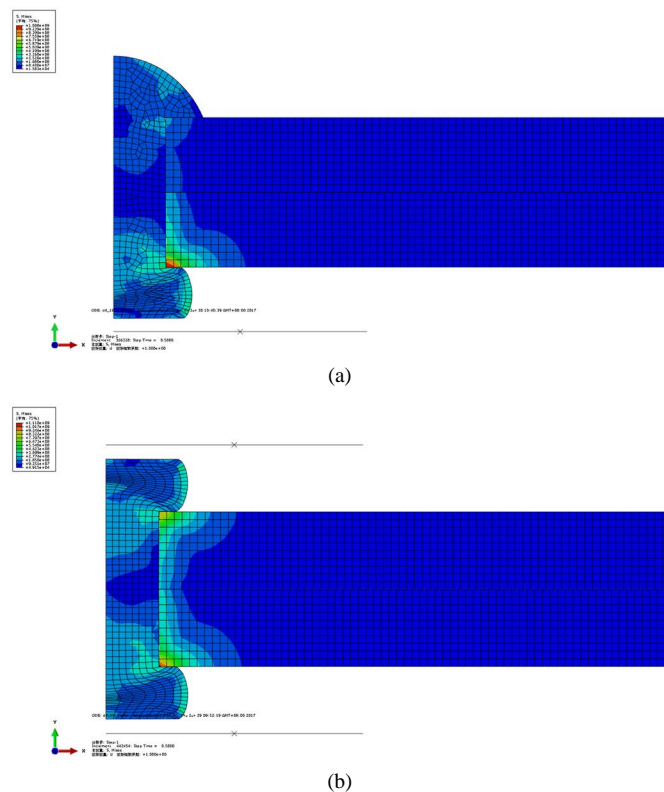


Figure 6. Stress nephogram after rivet forming. (a) ordinary rivets; (b) headless rivets
图 6. 铆接成形后的应力云图。(a) 普通铆钉；(b) 无头铆钉

在初始放置阶段，有头铆钉的镢头侧外伸量为 3 mm，无头铆钉的两侧外伸量均为 3 mm。在铆钉压缩阶段，有头铆钉进行单侧压缩，无头铆钉是双侧压缩。在钉孔填充阶段，有头铆钉对被铆接件单向横向挤压，无头铆钉对被铆接件是双向横向挤压。在镢头成形阶段，有头铆钉单侧形成双面镢头，无头铆钉双侧形成双面鼓形镢头。

无头铆钉因双面挤压，故靠近镢头两侧干涉量均较大。有头铆钉单面成形镢头，离镢头越远，干涉量越小，整体干涉量均值小于无头铆钉。同样外伸量下，有头铆钉的镢头直径小于无头铆钉，因有头铆钉要填充两个连接件的钉孔间隙，故在无头铆钉的外伸量及长度选择时，可适当小于有头铆钉。由应力云图可知，应力最大均集中在镢头附近，无头铆钉的应力分布相比有头铆钉更均匀。

6. 结论

通过 ABAQUS 仿真模型，分析铆接成形时金属流动情况，铆钉先进行径向向下镢粗，直至与钉孔接

触开始横向挤压, 然后铆钉侧向流动形成镢头。铆钉越长, 镢粗现象越明显, 干涉量越大。钉孔直径的增大, 钉杆镢粗时间长, 干涉量有所减小。相同条件下无头铆钉的干涉量大于有头铆钉。

本文仅定性分析参数不同干涉量变化趋势, 铆接真实干涉量还需做试验研究, 实际铆接有很多因素不可控, 如不能保证两边伸出量完全对称, 需进一步进行试验研究来验证仿真模型、探究铆接规律。

参考文献

- [1] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用[J]. 航空制造技术, 2005(6): 50-52.
- [2] 费军. 自动钻铆技术在波音 737 尾段项目中的应用[J]. 航空制造技术, 2007(9): 85-89.
- [3] 刘恩洋, 范治松, 黄伍平, 邓将华. 外伸量对无头铆钉电磁铆接变形的影响[J]. 精密成形工程, 2017, 9(1): 96-102.
- [4] 李念奎, 凌泉, 聂波, 刘静安. 铝合金材料及其热处理技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 96-97.
- [5] 刘平, 张开富, 李原. 铆钉变形及其有限元分析[J]. 航空制造技术, 2008(22): 94-97.
- [6] 刘连喜, 李西宁, 王仲奇, 李卫平. 无头铆钉自动钻铆工艺试验研究[J]. 西北工业大学学报, 2012, 31(1): 77-82.