

# 飞机薄壁件铆接残余应力分析

张惠柯, 朱永国, 胡元帆, 童杨帆

南昌航空大学航空制造与机械工程学院, 江西 南昌

收稿日期: 2025年3月21日; 录用日期: 2025年4月20日; 发布日期: 2025年4月30日

## 摘要

铆接作为飞机薄壁件的主要连接方式, 其工艺参数直接影响结构件残余应力的分布。为了研究工艺参数对残余应力的影响, 本文基于钉杆体积不变原理, 构建铆接干涉量模型, 运用主应力法构建铆接残余应力与干涉量的关系模型, 通过理论分析揭示了工艺参数与残余应力之间的关系。通过有限元分析, 验证干涉量对残余应力的影响, 并得到了工艺参数对薄壁件厚度方向的残余应力分布的影响规律。

## 关键词

铆接, 残余应力, 干涉量, 工艺参数, 有限元分析

# Riveting Residual Stress Analysis of Aircraft Thin-Walled Parts

Huike Zhang, Yongguo Zhu, Yuanfan Hu, Yangfan Tong

Faculty of Aviation Manufacturing and Mechanical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

Received: Mar. 21<sup>st</sup>, 2025; accepted: Apr. 20<sup>th</sup>, 2025; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Riveting is the main connection method of aircraft thin-walled parts, and its process parameters directly affect the distribution of residual stress in structural parts. In order to study the influence of process parameters on residual stress, this paper constructs the riveting interference model based on the principle of constant volume of nail rod, and constructs the relationship model between riveting residual stress and interference by using the principal stress method. The relationship between process parameters and residual stress is revealed by theoretical analysis. Through finite element analysis, the influence of interference on residual stress is verified, and the influence of process parameters on the residual stress distribution in the thickness direction of thin-walled

parts is obtained.

# Keywords

Riveting, Residual Stress, Interference Quantity, Process Parameters, Finite Element Analysis

Copyright © 2025 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

在飞机制造中,铆接是承载高载荷连接件的关键工艺[1] [2]。随着飞机服役时间的延长,对其长寿命、高可靠性和耐久性的要求越来越高,而优化铆接残余压应力的分布能够显著提升飞机连接件的疲劳寿命[3] [4]。

ADAM [5]利用有限元研究铆接残余应力时,发现板材内部的周向残余压应力的区域范围将决定疲劳裂纹的起始位置。郑清春等[6]研究了残余应力、粗糙度、最大应力以及三者交互作用下对疲劳寿命的作用,结果表明残余应力的影响最大。严鸿凯等[7]以单搭铆接接头为研究对象,利用有限元以及拉伸剪切实验发现,增大孔径会减小残余压应力的分布,导致给铆接接头的疲劳寿命带来不利影响,而适当增大铆接力会带来相反的结果。丁坤英等[8]针对铝合金壁板,通过有限元仿真以及实验的方式,研究铆接力、壁板厚度、铆钉材料等各工艺条件下对壁板内部残余应力的分布形式以及对铆接壁板疲劳性能的影响。Manes A 等[9]针对 Al8090-T81 铝合金壁板,研究铆钉长度、挤压力、夹紧角度等工艺参数对铆接完成后接头内部的残余应力分布。陈修强等[10]通过 20 kHz 超声疲劳试验结合有限元模拟分析了三种不同孔径对残余应力的影响。杨悦等[11]基于塑性力学铆钉变形特点,结合主应力法构建铆接变形受力模型,分析干涉量与残余应力之间的关系。

本文基于体积不变原理,构建铆接干涉量模型;运用主应力法构建铆接残余应力与干涉量的关系模型,揭示工艺参数与残余应力之间的关系,通过有限元方法分析了不同工艺参数对孔壁沿厚度方向的残余应力分布规律。

# 2. 薄壁件铆接力学模型构建

## 2.1. 薄壁件铆接干涉量分析

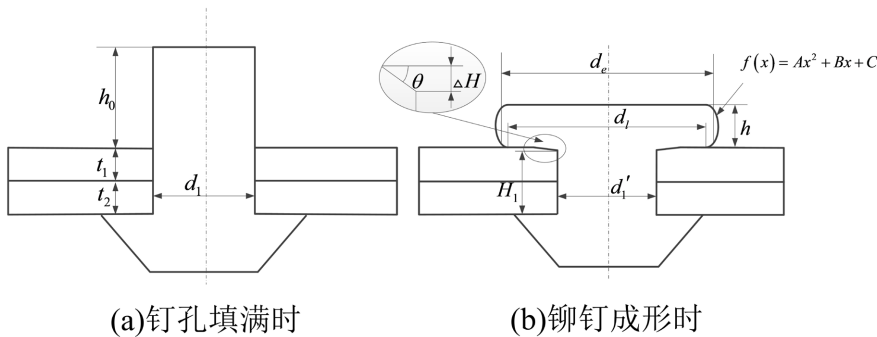


Figure 1. Schematic diagram of upsetting head forming process  
图 1. 铆头成形过程示意图

铆接是一种通过机械变形实现材料连接的工艺方法,主要通过冲头对铆钉施加铆接力,迫使钉杆镦粗膨胀并填满孔壁,形成永久性机械连接,如图1所示。当铆钉钉杆部分的材料填满铆钉孔后,可认为之后的铆接过程中不再会有更多的铆钉材料流动进入铆钉孔内,铆钉钉杆与铆钉孔之间的间隙被钉杆材料填满时,铆接状态如图1(a)所示。在冲压成形过程中,薄壁件在轴向压缩载荷作用下会产生塑性变形。如图1(b)所示,该变形机制主要表现为上壁板铆接孔周产生环状凹陷特征。本文假设压缩导致上薄壁件的径向扩展未发现墩头覆盖区域以外的厚度变化。

若铆接过程中,视下薄壁件的厚度不发生变化,根据钉杆体积不变原理,可以得到同等高度情况下,墩头的等效直径 $d_e$ 为[12]:

$$d_e = \sqrt{\frac{4A^2}{5}h^4 + 2ABh^3 + \frac{4(2AC + B^2)}{3}h^2 + 4ABh + 4C^2} \quad (1)$$

在铆钉与孔壁完全接触后,铆钉孔外的钉杆体积与成形后墩头的体积相等,因此可以得到:

$$\frac{\pi h_0 d_1^2}{4} = \frac{\pi h d_e^2}{4} + \frac{\pi \Delta H (d_1'^2 + d_1' d_l + d_l^2)}{12} \quad (2)$$

式中, $h_0$ 是墩头的高度, $h$ 是钉杆材料将铆钉孔填满时钉孔外钉杆的高度, $\Delta H$ 是上薄壁件凹陷的高度,薄壁件总厚度 $H = H_1 + \Delta H = t_1 + t_2$ , $d_1$ 是铆钉孔直径, $d_1'$ 是钉杆材料使铆钉孔扩展后钉孔的直径,墩头的底端直径为 $d_l$ 。

成形前后孔内材料体积不变可得:

$$\frac{\pi (H_1 + \Delta H) d_1^2}{4} = \frac{\pi H_1 d_1'^2}{4} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)联立可得:

$$\frac{d_1'^2 - d_1^2}{d_1'^2} (t_1 + t_2) = \frac{3(h_0 d_1^2 - h d_e^2)}{d_1'^2 + d_1' d_l + d_l^2} \quad (4)$$

根据航空制造工程手册[13]对铆接干涉量的定义,铆接绝对干涉量 $I$ 的表达式为:

$$I = d_1' - d_1 \quad (5)$$

铆接的相对干涉量 $\Delta$ 表示为:

$$\Delta = \frac{I}{d_1} \times 100\% = \frac{d_1' - d_1}{d_1} \times 100\% \quad (6)$$

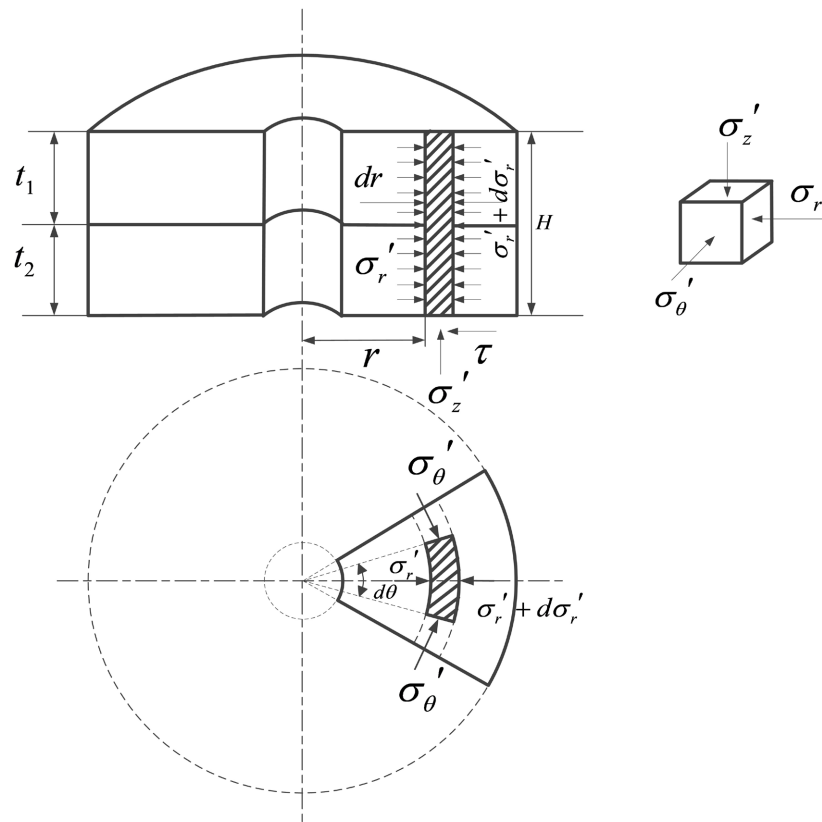
将式(6)代入式(4)中,可以得到:

$$\frac{(\Delta+1)^2 - 1}{(\Delta+1)^2} (t_1 + t_2) \left[ (\Delta+1)^2 d_1^2 + (\Delta+1) d_1' d_l + d_l^2 \right] = 3h d^2 - 3(t_1 + t_2) d_1^2 - 3h d_e^2 \quad (7)$$

由式(7)可知,铆接完成后铆接相对干涉量与墩头的尺寸、铆钉孔直径、铆钉直径等都有关系。

## 2.2. 薄壁件残余应力分析

以薄壁件为研究对象,在薄壁件上铆钉孔轴线距离为 $r$ 的位置沿薄壁件厚度方向取一扇形基元,基元的高度记为 $dr$ ,圆心角记为 $d\theta$ ,如图2所示。运用主应力法对铆接结束后钉孔边缘的残余应力分布状况进行分析计算。



**Figure 2.** Stress analysis diagram around the hole  
**图 2.** 孔周应力分析图

建立受力平衡方程得到薄壁件孔周残余应力表达式[11]:

$$\begin{cases} \sigma_r' = -\sigma_s' e^{-\frac{\mu}{H}I} - \sigma_s' \\ \sigma_\theta' = -\sigma_s' e^{-\frac{\mu}{H}I} + \sigma_s' \\ \sigma_z' = -\sigma_s' e^{-\frac{\mu}{H}I} \end{cases} \quad (8)$$

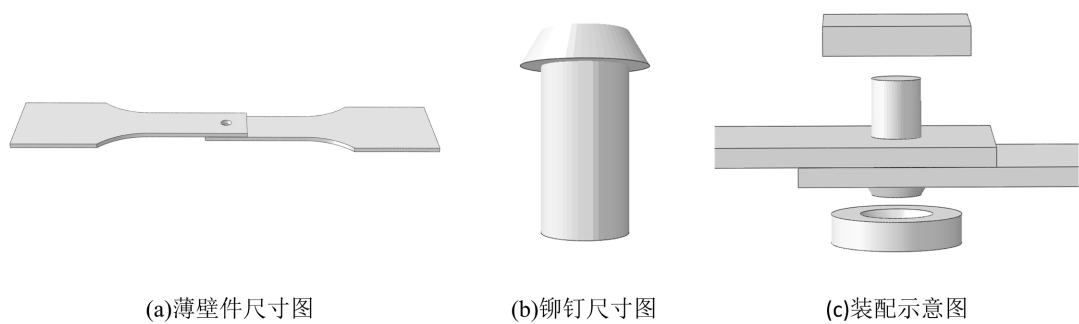
式中,  $\mu$  为摩擦系数,  $\sigma_s'$  是屈服应力,  $\sigma_r'$  是径向残余应力,  $\sigma_\theta'$  是周向残余应力,  $\sigma_z'$  是轴向残余应力。

分析上式可以得出, 铆接完成后薄壁件孔周铆接残余应力与铆接形成的绝对干涉量  $I$  密切相关。上文铆接干涉量分析中指出, 铆接干涉量的形成受铆头的尺寸、铆钉孔直径、铆钉直径等直接影响。因此通过控制铆头尺寸或者改变工艺参数均会影响干涉铆接中孔周残余应力的分布和大小。

### 3. 有限元建模

#### 3.1. 几何模型

利用 ABAQUS 软件进行铆接有限元仿真, 由于模型简单, 因此直接在 ABAQUS 软件中进行三维建模。薄壁件的尺寸为长 110 mm, 夹持端宽 40 mm, 板厚 2 mm, 孔直径  $\phi 5.08 \text{ mm}$ ; 平锥头铆钉尺寸为直径  $\phi 5 \text{ mm}$ , 铆钉长度 10 mm, 平锥头顶面直径  $\phi 5.1 \text{ mm}$ , 底面直径  $\phi 7.5 \text{ mm}$ , 墩头最小高度 2 mm。搭接区域长、宽均为 20 mm, 结果如图 3 所示。



**Figure 3.** Riveting assembly diagram of thin-walled parts  
**图 3.** 薄壁件铆接装配示意图

### 3.2. 材料属性

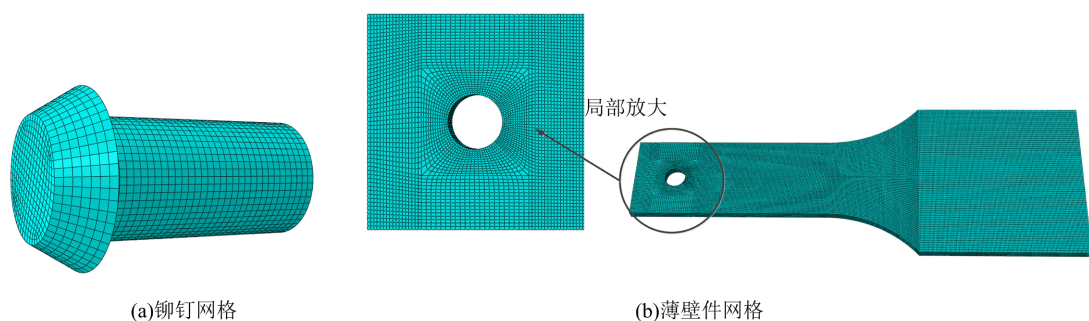
材料的属性参数是铆接后残余应力的主要影响因素，材料属性对建立有限元模型的准确性有至关重要的作用，为了准确模拟铆接过程，正确赋予各部件的材料属性十分重要。本文所研究的薄壁件材料为 7075 铝合金，铆钉材料为 LY10 铝合金。表 1 为两种材料的基本力学性能参数。

**Table 1.** Material parameter  
**表 1.** 材料参数

| 零件                      | 薄壁件      | 铆钉       |
|-------------------------|----------|----------|
| 材料                      | 7075 铝合金 | LY10 铝合金 |
| 弹性模量(GPa)               | 71.2     | 72.6     |
| 密度(kg/mm <sup>3</sup> ) | 2.77 e-6 | 2.80 e-6 |
| 泊松比                     | 0.33     | 0.33     |
| 屈服强度(MPa)               | 504.3    | 246.7    |

### 3.3. 网格划分

考虑到铆接过程中存在大变形的产生，因此获得较高计算的精度，对建立的三维模型使用六面体 C3D8R 缩减积分单元进行网格划分。铆钉孔周处的变形与残余应力是我们的关注重点，为保证铆接质量，对被连接件的铆钉孔周区域进行网格细分。铆钉与薄壁件的网格划分如图 4 所示。冲头与铆模刚度较高，变形可忽略，因此采用刚性单元。



**Figure 4.** Assembly grid division  
**图 4.** 装配体网格划分

### 3.4. 分析步设置

针对铆接变形过程,采用显式动力分析步,默认有一个初始分析步 initial,此外,设置两个分析步 step-1 和 step-2 分别用于模拟冲头下压和冲头上升过程。后续载荷与边界条件在各个分析步中进行设置。此外,还需在分析步中设置场输出和历史输出,用于后续分析阶段结果的输出。

### 3.5. 接触、载荷、边界条件设置

#### (1) 接触设置

接触关系设置。设置薄壁件和薄壁件、铆钉和冲头以及铆钉和薄壁件之间的接触关系,在相互作用属性管理器中定义两个接触,法向接触属性为硬接触,切向摩擦模型为罚函数摩擦模型,摩擦系数为 0.15。

#### (2) 边界条件设置

在 initial 分析步中,设置上薄壁件的左端面以及下薄壁件的右端面完全固定。在下铆模中心处设定参考点 RP1,并设置完全固定,模拟下铆模对铆钉平锥头部分的固定作用。

#### (3) 载荷设置

边界条件设置完成后,在动力显示分析步 step-1 中定义位移,在冲头中心处设置参考点 RP2,对参考点 RP2 设置位移载荷以模拟冲头压铆的过程。本文冲头的下压位移设置为 4 mm,即完成压铆后,墩头高度为 2 mm。在压铆完成后,对冲头设置速度为 0 并保持一段时间以模拟保压的过程。在 step-2 中,设置参考点 RP1、RP2 方向相反的 3 mm 位移,模拟冲头和下铆模离开的卸载过程。如图 5 所示。

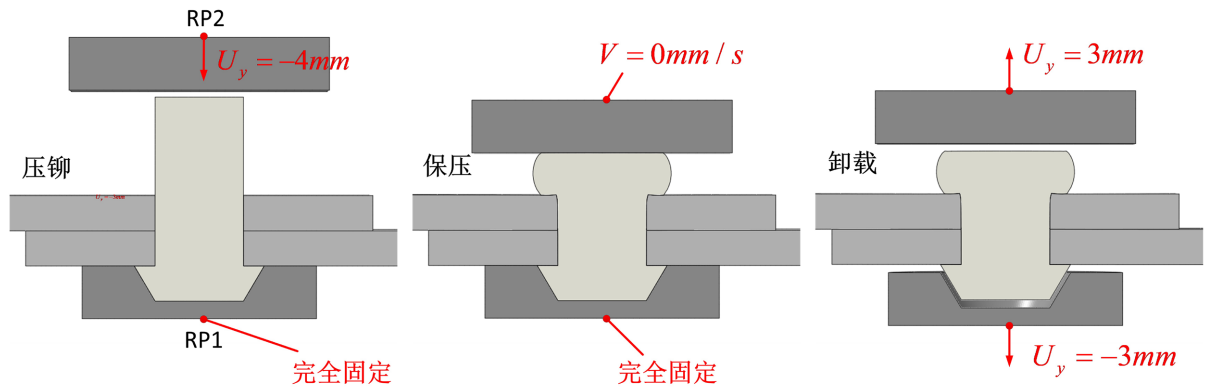


Figure 5. Riveting process diagram

图 5. 压铆过程图

## 4. 薄壁件铆接残余应力结果分析

周向残余应力是影响结构疲劳寿命的主要因素,铆钉孔附近的周向应力区域对延长裂纹成核和降低裂纹扩展速率有着积极影响,当周向应力为压应力时能有效降低孔边应力幅值,延缓裂纹萌生,提高铆接疲劳寿命。因此本文接下来将着重对沿着薄壁件厚度方向孔壁路径上的周向残余应力进行研究。

从上文可知,墩头尺寸、铆钉孔直径、铆钉直径等工艺参数均会影响干涉铆接中薄壁件孔周残余应力的分布。因此,选定铆钉长度、铆钉孔径和墩头高度三个铆接工艺参数作为本文研究的主要参数。根据《航空制造工程手册》[13]中关于干涉铆接的铆钉长度、铆钉孔径和墩头高度的要求如表 2 所示。

**Table 2.** Interference fit flat cone head rivet size value level  
**表 2.** 干涉配合平锥头铆钉尺寸取值水平

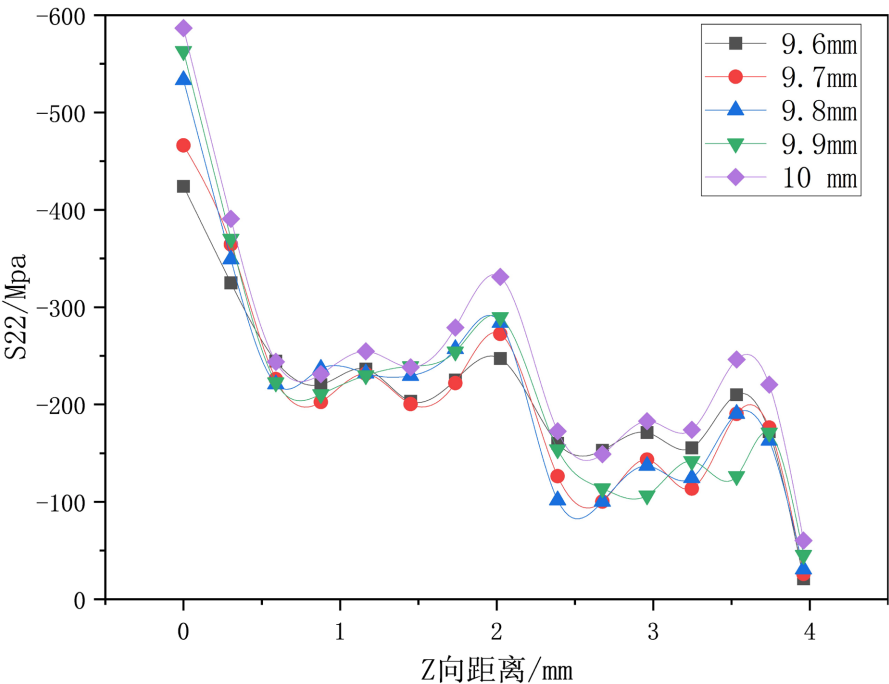
| 工艺参数        | 取值范围/mm                   |
|-------------|---------------------------|
| 铆钉直径 $d$    | 5                         |
| 铆钉孔直径 $d_1$ | 5.08~5.12                 |
| 铆钉长度 $l$    | $l = H + (1.1 \sim 1.2)d$ |
| 墩头高度 $h$    | $h_{\min} = 0.4d$         |

其中,  $H$  为被连接件的总板厚。

#### 4.1. 铆钉长度对残余应力的影响

铆钉长度是铆接工艺中影响铆接质量的重要参数之一, 其选择关系到铆接结构件整体的稳定性与疲劳强度。在控制墩头高度与孔径的情况下, 铆钉钉杆过长会致使挤入铆钉孔内材料过多, 薄壁件变形量增加, 导致装配时产生扭曲影响装配精度。但钉杆长度过小会导致干涉量不足, 使得铆接头连接强度不足, 影响结构的疲劳寿命。合适的铆钉长度能够优化残余应力分布从而减少裂纹的产生。

根据表 2 中《航空制造工程手册》对干涉铆接平锥头铆钉的铆钉长度选取要求, 针对被连接件总厚度为 4 mm, 铆钉直径为 5 mm 时, 选取铆钉长度分别为 9.6 mm、9.7 mm、9.8 mm、9.9 mm、10 mm 进行研究。



**Figure 6.** The influence of different rivet lengths on the residual stress of the hole wall  
**图 6.** 不同铆钉长度对孔壁残余应力影响规律

图 6 所示为不同铆钉长度的铆接装配仿真时, 沿着薄壁件厚度方向孔壁路径上的残余应力测量输出结果。由图可知, 残余压应力由墩头到钉头方向逐渐降低, 两薄壁件的残余压应力变化趋势相同, 且在两薄壁件的接合面处发生残余应力突然增大现象。

## 4.2. 铆钉孔径对残余应力的影响

改变铆接孔径即控制铆接前钉与孔之间的间隙，其大小主要影响干涉量大小，从而造成孔周附近残余应力分布情况。当孔径过小，会导致钉杆材料难以流入孔中，造成残余应力分布不均，影响铆接件的疲劳寿命；孔径过大，填充孔内的材料不够而干涉量过小，影响密封性的同时还降低整体的连接强度。

以单钉铆接结构研究薄壁件铆钉孔径对残余应力的影响。根据表 2 中《航空制造工程手册》对干涉铆接平锥头的铆钉孔径选取要求，针对 5 mm 直径的平锥头铆钉，铆钉孔径的取值范围为 5.08~5.12 mm。因此选取 5.08 mm、5.09 mm、5.10 mm、5.11 mm、5.12 mm 分别为研究目标。

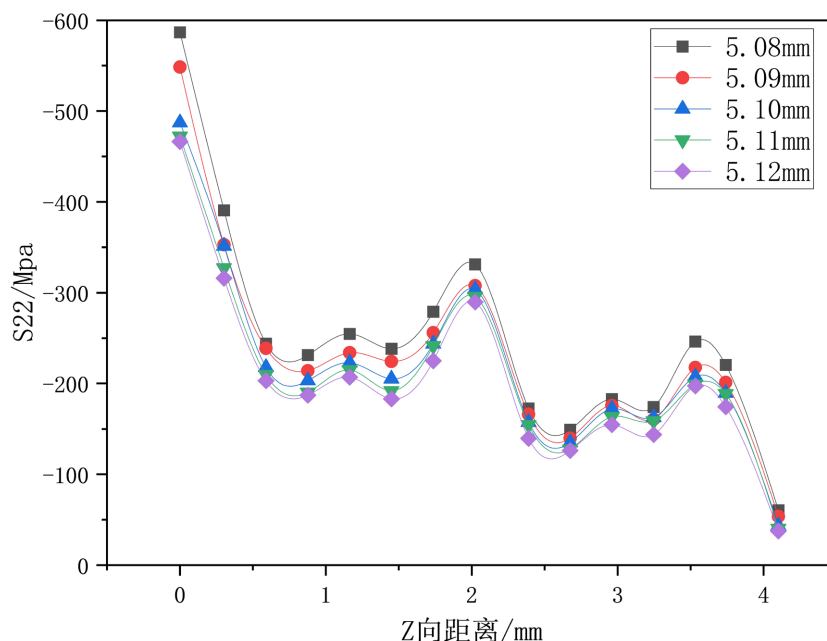


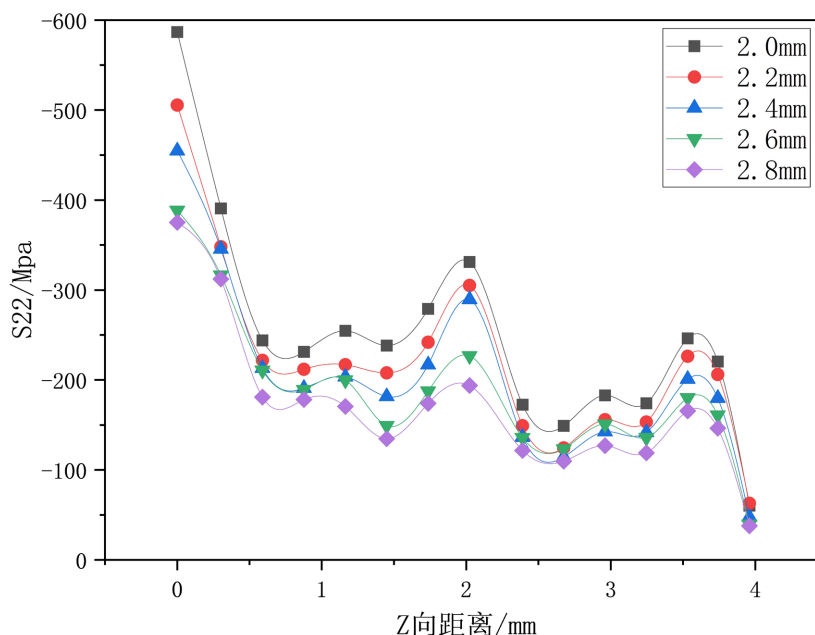
Figure 7. The influence of different rivet apertures on the residual stress of the hole wall  
图 7. 不同铆钉孔径对孔壁残余应力影响规律

图 7 所示为不同铆钉孔径的铆接装配仿真时，沿着薄壁件厚度方向孔壁路径上的残余应力测量输出结果。结合曲线分析可知，在相同墩头高度与铆钉长度的情况下，随着孔径的增大，由于径向干涉量的减小，导致孔壁处的残余压应力随着孔径的增大而减小，当孔径小于 5.10 mm 时，孔径的变化对沿着薄壁件厚度方向的残余压应力影响较大，而当孔径在 5.10~5.12 mm 范围时，残余压应力值相差不大。

## 4.3. 墩头高度对残余应力的影响

在实际铆接过程中，一般通过压铆机冲头轴向的运动控制墩头高度来达到对墩头尺寸控制的目的。通过加大铆接力或者加长冲头位移的方式均可降低墩头成形后的高度，形成更大的干涉量，但是过大的干涉量容易降低连接件的疲劳寿命。相反，过高的墩头高度，又容易致使铆接接头不够稳固。因此合理控制墩头高度对铆接强度和疲劳寿命具有重大研究价值。

根据表 2 中《航空制造工程手册》对干涉铆接平锥头铆钉的墩头高度选取要求，针对直径为 5 mm 的平锥头铆钉，墩头高度不可低于 2 mm。因此，研究时选取墩头高度分别为 2.0 mm、2.2 mm、2.4 mm、2.6 mm、2.8 mm。在有限元仿真中，通过对冲头施加位移载荷来模拟压铆过程中对墩头高度的控制。



**Figure 8.** The influence of different pier head heights on the residual stress of the hole wall  
**图 8.** 不同墩头高度对孔壁残余应力影响规律

图 8 所示为不同墩头高度的铆接装配仿真时, 沿着薄壁件厚度方向孔壁路径上的残余应力测量输出结果。墩头高度的变化对残余应力的影响最大, 在铆钉长度与铆钉孔径不变的情况下, 当墩头高度的减小时, 流入钉孔中的金属材料会增多, 致使钉杆对薄壁件孔壁的径向压力增大, 从而干涉量增大, 因此孔壁处的残余压应力也相应增大。且在上薄壁件中, 墩头高度的影响尤为显著。

## 5. 小结

(1) 基于钉杆体积不变原理, 构建铆接干涉量模型, 运用主应力法构建铆接残余应力与干涉量的关系模型, 通过理论分析揭示工艺参数与残余应力之间的关系。

(2) 通过有限元仿真分析工艺参数对残余应力的影响, 周向残余应力整体呈压应力的状态, 上、下薄壁件的残余应力分布规律一致, 且在两薄壁件的接合面处发生残余应力突然增大现象。

(3) 随着铆钉长度的增加, 残余应力水平提高; 孔径的变化对残余应力的影响最小, 随着孔径的增大, 残余应力整体呈下降趋势; 墩头高度对残余应力的影响最大, 随着墩头高度的下降, 残余应力呈快速上升的状态, 且在上薄壁件处的变化尤为显著。

## 基金项目

国家自然科学基金 (52465060); 航空科学基金 (2024M050056002); 江西省重点研究计划 (20243BBG71004)。

## 参考文献

- [1] Wu, J., Chen, C., Ouyang, Y., Qin, D. and Li, H. (2021) Recent Development of the Novel Riveting Processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **117**, 19-47. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07689-w>
- [2] Šedek, J. and Růžek, R. (2019) Magna-Lok Rivet Joint and the Stiffness-Equivalent FE Model. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **91**, 834-842. <https://doi.org/10.1108/aeat-07-2018-0188>

- 
- [3] 王燕礼, 朱有利, 曹强, 等. 孔挤压强化技术研究进展与展望[J]. 航空学报, 2018, 39(2): 6-22.
- [4] 侯红玲, 黄涛, 胡海滨, 等. 基于锥形孔的干涉配合铆接应力特性研究[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(1): 112-121.
- [5] Korbel, A. (2022) Effect of Aircraft Rivet Installation Process and Production Variables on Residual Stress, Clamping Force and Fatigue Behaviour of Thin Sheet Riveted Lap Joints. *Thin-Walled Structures*, **181**, Article ID: 110041. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110041>
- [6] 郑清春, 王乃鑫, 朱培浩, 等. 铝合金薄板自冲铆接疲劳寿命仿真与分析[J]. 锻压技术, 2020, 45(9): 93-98.
- [7] 严鸿凯, 余立, 潘泽民, 等. 孔径与铆接力对单铆搭接接头残余应力与剪切性能的影响[J]. 现代制造工程, 2024(9): 12-19.
- [8] 丁坤英, 杨翼飞, 张涛, 等. 铝锂合金压铆薄壁件残余应力与疲劳性能分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(2): 474-482.
- [9] Manes, A., Giglio, M. and Viganò, F. (2011) Effect of Riveting Process Parameters on the Local Stress Field of a T-Joint. *International Journal of Mechanical Sciences*, **53**, 1039-1049. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.07.013>
- [10] 陈修强, 薛红前, 高涛, 等. 孔径尺寸对干涉配合铆接件超高周疲劳性能的影响[J]. 实验力学, 2017, 32(2): 170-178.
- [11] 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.
- [12] 黄涛, 侯红玲, 吴浪, 等. 干涉配合铆接镦头尺寸与干涉量关系[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(12): 113-120.
- [13] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册. 飞机装配[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.