

# 基于钉杆变形均匀性的锥形半圆头铆钉 优化设计研究

杨威<sup>1</sup>, 崔俊佳<sup>1</sup>, 张旭<sup>2</sup>, 李光耀<sup>1</sup>, 蒋浩<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082;

2. 长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 长沙 410114)

**摘要:** **目的** 针对铆接过程中铆钉钉杆发生镦粗变形, 其变形的均匀性影响连接接头力学性能的问题, 提出一种钉杆带有锥度的变径铆钉, 以改善钉杆变形的均匀性。**方法** 基于三维有限元仿真方法, 对准静态铆接过程进行仿真, 获取锥形与常规半圆头铆钉在铆接后钉杆变形情况, 同时对比分析板材残余应力变化情况。最后建立由钉杆变形均匀度与铆钉尺寸以及铆头高度组成的灰色系统, 并通过对该系统进行关联度计算分析, 确定铆钉尺寸及铆头高度对均匀度的影响。**结果** 锥形铆钉铆接后钉杆均匀性优于常规铆钉。使用不同铆钉进行铆接, 板材残余应力有着相同变化趋势。铆钉尺寸、铆头高度对钉杆变形均匀度的关联度计算结果分别为 0.608 和 0.596, 铆钉尺寸变化对均匀度的影响大于铆头高度变化。**结论** 锥形铆钉对钉杆变形均匀性的改善有良好效果。

**关键词:** 铆接; 有限元模型; 干涉量; 灰色关联分析

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.012

**中图分类号:** TG306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)04-0085-07

## Research on the Optimum Design of Tapered Semi-Circular Head Rivet Based on the Uniformity of Rod Deformation

YANG Wei<sup>1</sup>, CUI Jun-jia<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>2</sup>, LI Guang-yao<sup>1</sup>, JIANG Hao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University,

Changsha 410082, China; 2. College of Automotive and Mechanical Engineering,

Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**ABSTRACT:** In order to solve the problem that the rivet rod had upsetting deformation in the process of riveting and the uniformity of rod deformation affected the mechanical properties of the riveted joints, a type of variable diameter rivet with taper on rivet rod is proposed to improve the uniformity of deformation of the rivet rod. Based on three-dimensional finite element simulation, the quasi-static riveting processes were simulated, and the deformations of rivet rod of tapered rivet and conventional rivet were obtained. Furthermore, the changes of residual stress of plates were compared and analyzed. Finally, a gray system composed of deformation uniformity of rivet rod, rivet size and pier head height was established. Through correlation calculation and analysis of the system, the influences of rivet size and pier head height on uniformity were determined. After deformation, the tapered rivet has better uniformity of rivet rod than the conventional rivet. After riveting with different rivets, the changes of residual stress of plates have the same trend. The gray correlation analysis of evenness shows that evenness is highly correlated with rivet size and pier head height. The correlation calculation results of rivet size and pier head height on the

收稿日期: 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金 (52005173); 博士后创新人才支持计划 (BX20200123); 长沙市自然科学基金 (kq2014047)

作者简介: 杨威 (1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向为电磁铆接。

通讯作者: 蒋浩 (1992—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为汽车轻量化制造技术。

deformation uniformity of rod were 0.608 and 0.596 respectively. The influence of rivet size on uniformity is greater than that of the upset head height. The tapered type rivet has a good effect on improving the deformation uniformity of rivet rod.

**KEY WORDS:** riveting; finite element model; interference; grey correlation analysis

随着全球各国对节能减排以及改善环境质量的重视,汽车行业加大了对轻量化研究,轻量化材料在汽车行业中的使用日益增长<sup>[1]</sup>。由于大多数的失效发生在连接接头,连接技术对轻量化材料在汽车上的广泛运用有着重要影响<sup>[2-3]</sup>。焊接<sup>[4]</sup>、螺栓连接<sup>[5-6]</sup>以及铆接<sup>[7]</sup>是被广泛运用的连接技术,热影响和应力集中引起的焊接缺陷会大大降低焊接接头的可靠性<sup>[8]</sup>,螺栓连接容易松动<sup>[9]</sup>。相比之下,铆接工艺具有接头质量稳定、工艺简单、效率高、密封好<sup>[10]</sup>等特点。

铆接是一种干涉连接工艺,在铆接过程中,铆钉发生不均匀墩粗变形从而形成与孔的干涉连接。铆接后孔膨胀率(即干涉量)是影响接头性能的一个重要指标。在 Chakherlou 等<sup>[11]</sup>对铆接工艺的研究中,发现随着铆接干涉量在一定范围内的增加,接头强度以及疲劳寿命都得到了提高,此外,干涉量的均匀性对连接接头的力学性能同样有着重要影响<sup>[12]</sup>。目前,已有一些学者通过尝试不同方式以提高干涉量及其均匀性从而改善接头性能<sup>[13-18]</sup>。在铆接动力源方面,近些年发展起来的电磁铆接工艺,因运用电磁力作为加载动力,具有加载速率高、铆接质量稳定等优点,同时能够提高干涉量以提升接头性能<sup>[13-15]</sup>。在铆钉改进设计方面, Szymczyk 等<sup>[16-17]</sup>提出了一种带有补偿器的铆钉,通过仿真分析发现带有补偿器的铆钉相比常规铆钉能够获得更大的干涉量,由于补偿器的存在而获得更大的干涉量被认为是接头疲劳性能得到改善的主要原因。在铆模优化方面, Jiang 等<sup>[18]</sup>探究了不同铆模角度对干涉量的影响,发现特殊角度铆模能够提高干涉量,从而提升接头疲劳性能。上述研究通过不同方式实现了干涉量的提高以及均匀性的改善,但目前通过铆钉钉杆形状改进以改善干涉量均匀性的研究还很少。

针对上述情况,文中提出一种钉杆带有锥度的变径铆钉(锥形铆钉)以改善干涉量均匀性。基于三维有限元仿真方法,分别对常规铆钉与锥形铆钉准静态铆接后的铆钉尺寸参数进行测量,并分析锥形铆钉对干涉量均匀性的影响。同时分析铆接过程中锥形铆钉与常规铆钉钉杆的半径变化情况,以解释锥形铆钉改善干涉量均匀性的原因。接着比较不同尺寸类型的铆钉对铆接后板料残余应力的影响。最后,对钉杆变形均匀度与铆钉尺寸以及墩头高度共同组成的灰色系统进行灰色关联分析,并对结果进行分析和讨论。

## 1 锥形铆钉设计与有限元仿真

### 1.1 锥形铆钉设计

图1为文中设计的3种不同尺寸的锥形铆钉与常规铆钉尺寸对比情况,锥形铆钉钉杆根据体积与常规铆钉钉杆体积保持一致的原则进行设计,参照式(1):

$$\frac{1}{3}\pi h(R^2 + r^2 + Rr) = \pi R_0^2 h_0 \quad (1)$$

式中:  $h$ ,  $R$ ,  $r$  分别为锥形铆钉钉杆长度、下端直径、上端直径;  $h_0$  和  $R_0$  分别为常规铆钉钉杆长度和直径。3种不同尺寸的锥形铆钉分别以钉杆上端直径命名为4.8 mm 锥形铆钉、4.6 mm 锥形铆钉、4.4 mm 锥形铆钉。

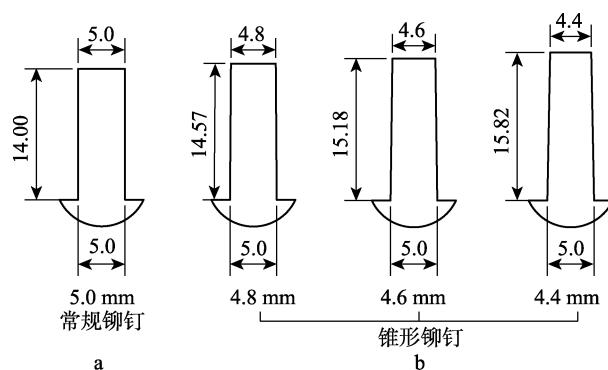


图1 锥形铆钉与常规铆钉尺寸对比

Fig.1 Comparison of dimensions between tapered rivet and conventional rivet

### 1.2 仿真模型

铆接有限元模型由2块带有预制孔的6082铝合金板、一个2A10铝合金铆钉以及一个冲头组成。每块铝合金板材厚度为4 mm,铝板预制孔直径根据QJ-782A-2005铆接标准设置为14.0 mm。为提升仿真效率,采用如图2所示的三维1/4对称模型。其中,板材、铆钉以及冲头都采用C3D8R六面体网格进行单元划分,最终有限元模型由232个冲头网格单元、11 456个铆钉网格单元和6840个铆接板材网格单元组成。由于铆接过程中冲头变形小,故将其设置为刚体。此外,模型中包含铆钉和薄板之间的接触、上下板之间的接触以及铆钉与冲头间的接触。接触分析采用Abaqus通用表面接触,通过此方式可以自动寻找接触对。文中使用之前的研究<sup>[19]</sup>建立了Johnson-Cook塑性材料模型(文中忽略温度影响)用于分析2A10铝合金铆钉变形行为,其表达式如下:

$$\sigma = (243 + 618 \varepsilon^{0.2}) \left( 1 + 0.01 \times \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (2)$$

式中： $\varepsilon$ ， $\dot{\varepsilon}$ ， $\dot{\varepsilon}_0$  分别代表等效塑性应变、应变率和参考应变率。由于铆接中板材的变形较小，文中采用幂律模型（仅考虑应变硬化和应变速率硬化效应）描述了 6082 铝合金板材的塑性行为，其表达式如下：

$$\sigma = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{6500} \right)^{0.25} \right] \times 260.64 (\varepsilon_{\text{eff}}^p + \varepsilon_c)^{0.085} \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_{\text{eff}}^p$  和  $\varepsilon_c$  分别代表有效应变和屈服应变。

在模型约束设置方面，沿 2 个 1/4 模型对称面应用对称边界条件，铆钉半圆头处施加完全固定约束。此外，冲头被限制除了沿  $y$  方向移动外的所有自由度，并通过对冲头施加以 2 mm/min 的速度沿  $y$  方向向下的位移以完成接头的准静态压铆过程。

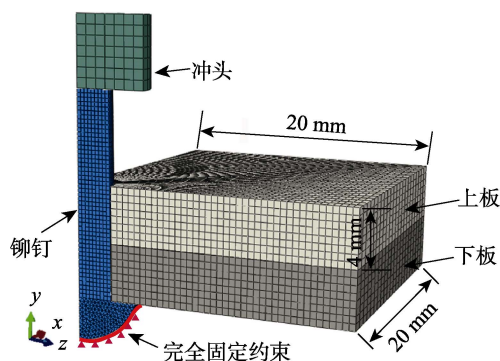


图 2 仿真模型  
Fig.2 Simulation model

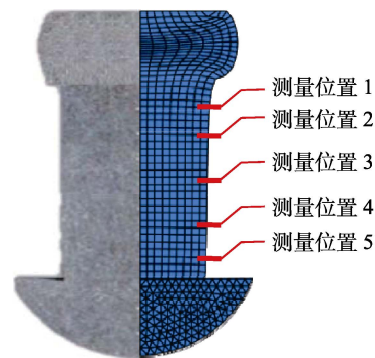
### 1.3 模型验证

为验证铆接有限元仿真模型的准确性，通过 Instron 5985 万能试验机以 2 mm/min 速度压缩铆钉的方式完成了常规铆钉准静态压铆实验。实验所得到的铆钉变形后形貌与对应仿真结果对比见图 3a。通过测量计算，仿真结果与实验变形后铆钉钉杆 5 个测量位置的半径偏差值分别为 0.59%，1.21%，0.63%，0.77%，0.15%，平均偏差值为 0.64%，说明仿真中铆钉变形情况与实验结果基本一致。图 3b 比较了通过实验和仿真所得到的冲头加载过程力位移曲线，可以清楚地观察到实验中获得冲头力位移曲线与仿真结果有相似的变化趋势，因此，有限元仿真方法是可靠和准确的。

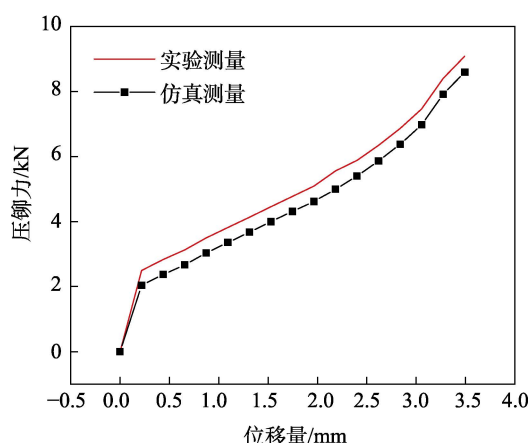
## 2 结果与分析

### 2.1 铆钉变形分析

图 4 为铆接前后接头几何尺寸变化情况，根据 QJ-782A—2005 铆接标准，常规铆钉铆接变形后，铆头直径  $D$  应控制在 7~8 mm，同时控制铆接完成后锥



a 铆钉变形对比



b 冲头加载过程力-位移曲线

图 3 实验与仿真对比

Fig.3 Comparison of experiment and simulation

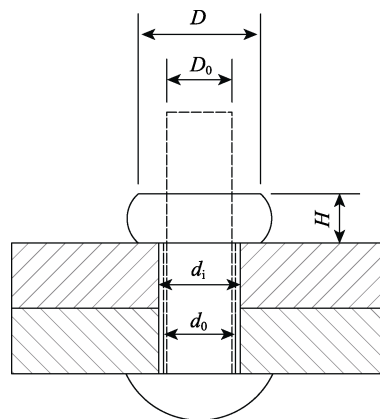


图 4 铆接前后接头几何尺寸示意

Fig.4 Geometric dimensions of riveted joints before and after riveting

形铆钉与常规铆钉铆头高度  $H$  接近相同（由于铆接完成后铆钉存在变形回弹，因此难以控制完全相同），以进行后续干涉量对比研究，并采用相对干涉量  $I$  来表示接头的干涉量，其计算公式为：

$$I = \frac{d_i - d_0}{d_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中： $d_i$  和  $d_0$  分别为铆钉变形后的直径和原始铆钉孔直径。表 1 为 3 种不同尺寸的锥形铆钉以及常规铆钉铆接后干涉量的对比情况。具体地，3 种不同尺

寸的锥形铆钉在钉杆靠近铆头位置（即 1 和 2 位置）的干涉量小于常规铆钉。其中，在 1 位置，3 种不同尺寸锥形铆钉分别比常规铆钉小 5.76%，2.13%，7.94%；在 2 位置分别小 4.39%，2.2%，1.62%。然而，在钉杆中下部位置（即 3，4，5 位置），锥形铆钉干涉量相比常规铆钉有一定提升。其中，在 3 位置，分别提升 7.86%，0.39%，9.42%；在 4 位置，分别提升 20.17%，7.14%，20.38%；在 5 位置，分别提升 53.8%，50.29%，72.51%。因此，控制铆接后在铆钉铆头高度接近相同的情况下，尽管锥形铆钉在钉杆测量 1 和 2 位置的干涉量小于常规铆钉，由于锥形铆钉在钉杆中下部位置干涉量提升，最终铆接完成后锥形铆钉与常规铆钉平均干涉量接近相同。此外，形成不同铆钉铆接后，在铆头高度  $H$  接近相同的过程中，冲头加载过程的力-位移曲线如图 5 所示，可以看到，锥形铆钉在铆接过程中压铆位移更长。这是因为在铆接前，锥形铆钉处于钉孔内的钉杆体积小于常规铆钉，最终铆接完成后，锥形铆钉与常规铆钉形成了平均干涉量接近相同的接头（即接头形成后钉孔内钉杆体积相同），因此锥形铆钉所需压入钉孔内的体积比常规铆钉多，则锥形铆钉在铆接过程中压铆位移更长。

表 1 仿真干涉量测量结果

Tab.1 Simulation measurement results of interference

| 铆钉种类        | 铆头高度/mm | 干涉量   |       |       |       |        | 平均干涉量 |
|-------------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|             |         | 位置 1  | 位置 2  | 位置 3  | 位置 4  | 位置 5   |       |
| 常规铆钉        | 2.290   | 4.320 | 2.410 | 1.285 | 0.476 | -0.171 | 1.664 |
| 4.8 mm 锥形铆钉 | 2.294   | 4.071 | 2.309 | 1.386 | 0.572 | -0.079 | 1.652 |
| 4.6 mm 锥形铆钉 | 2.291   | 4.228 | 2.357 | 1.290 | 0.51  | -0.085 | 1.660 |
| 4.4 mm 锥形铆钉 | 2.293   | 3.977 | 2.371 | 1.406 | 0.573 | -0.047 | 1.656 |

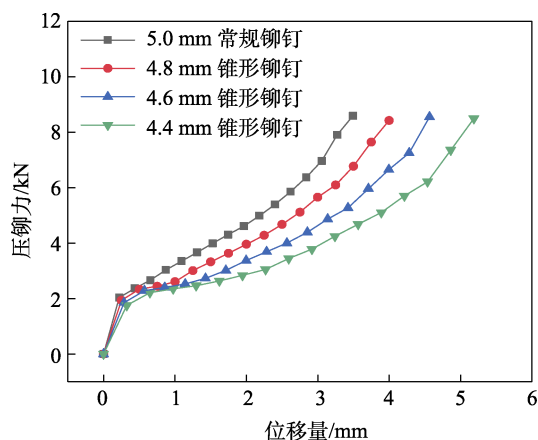


图 5 冲头加载过程对比

Fig.5 Punch loading process comparison

为了更好地量化分析干涉量的均匀性，钉杆变形均匀度  $I_s$  被用来描述干涉量的均匀程度，参照公

式如下：

$$I_a = \frac{I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5}{5} \quad (5)$$

$$I_s = \sum_{i=1}^5 (|I_i - I_a|) \quad (6)$$

式中： $I_i$  为各测量位置干涉量； $I_a$  为平均干涉量。常规铆钉与 4.4，4.6，4.8 mm 的锥形铆钉铆接后均匀度计算结果分别为 6.804，6.072，6.53，6.1528。可以看出，相比常规铆钉，3 种锥形铆钉的干涉量均匀性得到了改善。具体地，4.4 mm 与 4.8 mm 锥形铆钉对于干涉量均匀性的改善效果优于 4.6 mm 锥形铆钉。此外，文中通过改变冲头压铆过程沿  $y$  方向向下的位移量，仿真计算获取了铆接完成后不同铆头高度下锥形铆钉与常规铆钉的干涉量均匀程度。图 6 为 3 种锥形铆钉与常规铆钉铆接后钉杆均匀度随铆头高度变化的情况。可以看出，随着冲头加载过程沿  $y$  方向向下位移量的增加（即铆接形成铆头高度减小），锥形铆钉与常规铆钉均匀度呈现出相同的变化趋势。具体地，均匀度值随着铆头高度的减小而提高，表明随着铆接后所形成铆头高度的减小，锥形铆钉与常规铆钉钉杆均匀性降低。此外，随着铆头高度的减小，锥形铆钉均匀性仍然优于常规铆钉。

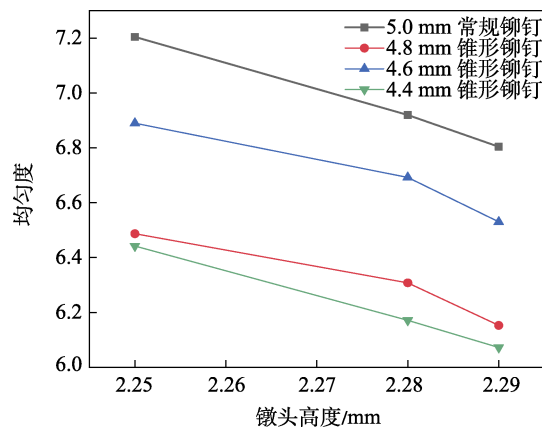


图 6 均匀度-铆头高度曲线

Fig.6 Uniformity-upset head height curves

## 2.2 铆接过程分析

为了解锥形铆钉改善干涉量均匀性的原因，在铆接后 4.8 mm 锥形铆钉与常规铆钉形成铆头高度接近相同的情况下，文中对测量位置 2—4 的半径在铆接过程中的变化情况进行对比分析。图 7 和 8 分别为仿真模拟铆接过程以及铆接过程中铆钉对应测量位置半径变化情况。从图 7 和 8 可以看出，铆接过程中铆钉变形分为 2 个阶段：第 1 个阶段对应铆钉的整体自由铆粗阶段（即铆钉开始铆粗至钉杆铆粗受到钉孔限制前）；第 2 个阶段对应局部受限铆粗阶段。由于锥形铆钉在铆接前相比常规铆钉在钉孔内体积小，因此

从图 8 中曲线变化可以看出锥形铆钉整体自由镦粗阶段对应冲头位移量范围大于常规铆钉。在局部受限镦粗阶段,锥形铆钉各位置半径增长速率(即曲线切线斜率)都小于常规铆钉的对应位置,此外锥形铆钉各位置之间的半径增长速率差距小于常规半圆头铆

钉,因此最终铆接完成后锥形铆钉干涉量更为均匀。同时从图 8 可以看到,在铆接过程中锥形铆钉与常规铆钉随着冲头位移量的增加,2—4 这 3 个测量位置之间的半径差值都呈现增加的趋势,与 2.1 节所分析的随着镦头高度的减小,铆钉钉杆均匀性降低相符合。

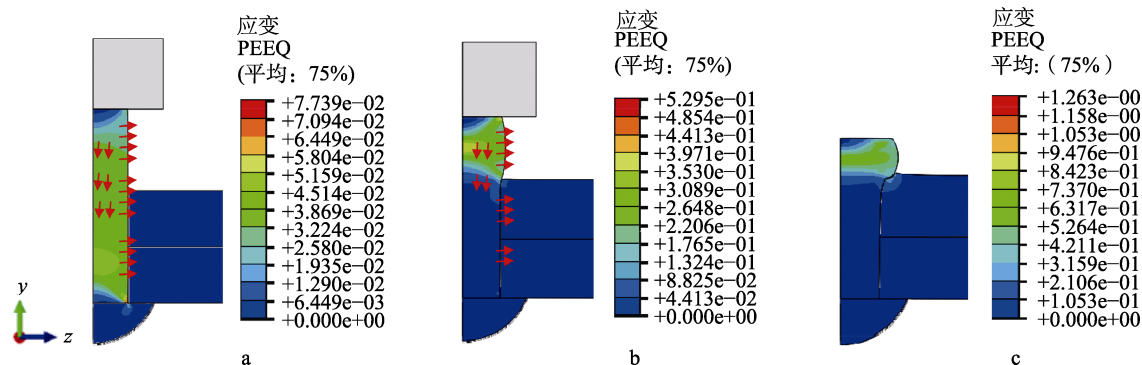


图 7 仿真模拟铆接过程(红色箭头代表材料流动)

Fig.7 Simulation of riveting process (red arrow represents material flow)

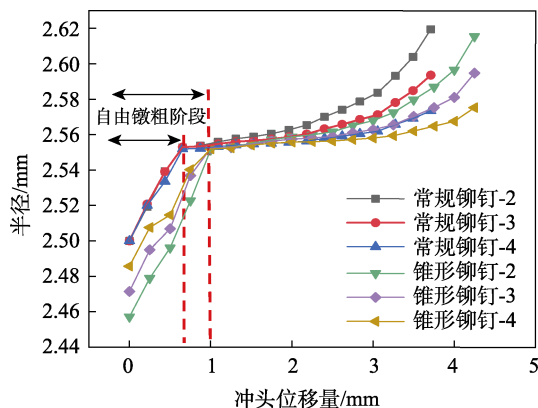


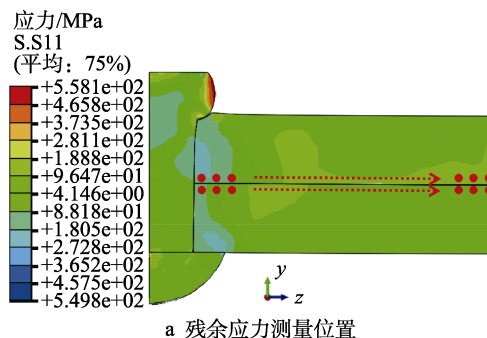
图 8 铆接过程铆钉各位置半径变化曲线

Fig.8 The radius change curves of each position of the rivet during the riveting process

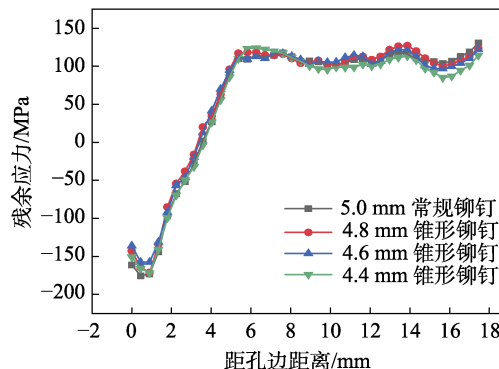
## 2.3 残余应力分析

在铆接完成并去除冲头挤压载荷后,板块材料的弹性回弹会挤压其塑性变形区从而产生残余应力<sup>[20]</sup>。此外,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<sup>[21]</sup>。同时,两板材接触表面在接头拉伸加载条件下最易受微动和拉伸二次弯曲应力的不利影响,从而使其成为裂纹萌生的可能位置<sup>[16]</sup>,因此,了解两板材接触表面的周向残余应力分布是有必要的。在有限元模型中观察到的残余周向应力沿内、外板接触面情况如图 9 所示。

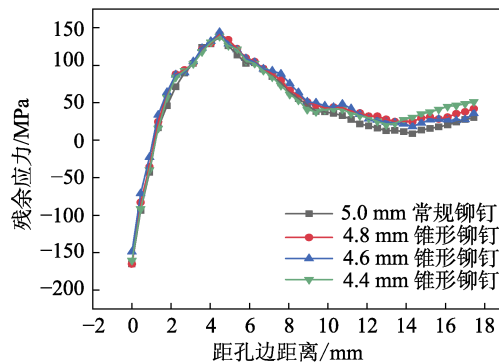
有限元结果表明,3 种锥形铆钉与常规铆钉在板材接触面周向残余应力变化趋势上基本一致,但其大小有一定的差异。尽管锥形铆钉带来了铆接接头中下部干涉量的改善,但干涉量的改善还不足以影响残余应力的变化,因此,3 种锥形铆钉与常规铆钉在板材接触面残余应力差异较小。



a 残余应力测量位置



b 上板周向残余应力对比



c 下板周向残余应力对比

图 9 残余应力对比情况

Fig.9 Comparison of residual stresses

## 2.4 均匀度灰色关联分析

灰色系统是指因素和指标相关但其相关性规律性不明确的不确定系统。灰色关联度分析是一种利用灰色系统中各因素与指标间的关联程度大小,从而判断其关联强弱的分析方法。文中铆接后钉杆均匀度与铆钉尺寸以及铆头高度共同组成一个灰色系统,通过对该系统中的钉杆均匀度与铆钉尺寸及铆头高度的关联性分析,从而确定铆钉尺寸及铆头高度与均匀度的关联强弱。文中建立了均匀度分析灰色系统,并定义因素为不同铆钉尺寸以及铆头高度。具体参数见表2。

表2 均匀度灰色系统参数  
Tab.2 Uniformity gray system parameters table

| 仿真组号 | 均匀度    | 铆钉尺寸/mm | 铆头高度/mm |
|------|--------|---------|---------|
| 1    | 6.8040 | 5.0     | 2.290   |
| 2    | 6.9196 | 5.0     | 2.281   |
| 3    | 7.2044 | 5.0     | 2.253   |
| 4    | 6.1528 | 4.8     | 2.294   |
| 5    | 6.3080 | 4.8     | 2.282   |
| 6    | 6.4872 | 4.8     | 2.253   |
| 7    | 6.5300 | 4.6     | 2.291   |
| 8    | 6.6924 | 4.6     | 2.280   |
| 9    | 6.8900 | 4.6     | 2.254   |
| 10   | 6.0720 | 4.4     | 2.293   |
| 11   | 6.1716 | 4.4     | 2.281   |
| 12   | 6.4420 | 4.4     | 2.252   |

由于系统中各因素以及指标的物理意义不同,造成各因素以及指标之间的参数值差别比较大且量纲不同,无法进行对比,因此对各因素以及指标进行无量纲化处理是必要的,文中采用离差标准化方法对参数进行无量纲处理,参照式(7),得到去量纲后各因素与指标参数值,如表3所示。

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}}, \quad i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 12 \quad (7)$$

式中:  $X_{ij}$  为无量纲化后参数值;  $x_{ij}$  为第  $i$  列因素或指标第  $j$  组的参数值。定义均匀度指标为参考序列  $Y$ :

$$Y = \{Y(j) | j = 1, 2, \dots, 12\} \quad (8)$$

根据式(9)计算因素(铆钉尺寸、铆头高度)对指标的关联度系数:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_j \min_i |Y(j) - X_i(j)| + \rho \max_j \max_i |Y(j) - X_i(j)|}{|Y(j) - X_i(j)| + \rho \max_j \max_i |Y(j) - X_i(j)|} \quad (9)$$

记  $\Delta_{ij} = |Y(j) - X_i(j)|$ , 则:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_j \min_i \Delta_{ij} + \rho \max_j \max_i \Delta_{ij}}{\Delta_{ij} + \rho \max_j \max_i \Delta_{ij}} \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为分辨率,通常取值 0.5;  $\min_i \min_j \Delta_{ij}$  和  $\max_i \max_j \Delta_{ij}$  分别为因素对指标各时刻下差值的最小差与最大差。根据式(10)求得第  $i$  个因素在  $j$  时刻与指标参考值的关联度系数,对因素  $i$  所有时刻的关联度系数求平均值即可求得该因素对于指标参考值的关联度,即式(11):

$$r_i = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} \xi_i(k) \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

根据式(11)求得铆钉尺寸、铆头高度对均匀度的关联度分别为 0.608 和 0.596。关联度越高表明因素与指标关联性越好,由计算结果可知铆钉尺寸以及铆头高度的变化对铆接后钉杆均匀度有影响,同时从计算结果的比较可以看出,铆钉尺寸变化对均匀度带来的影响大于铆头高度的变化,但两者的影响差距较小。

表3 参数无量纲化结果  
Tab.3 Dimensionless results of parameters

| 仿真组号 | 均匀度   | 铆钉尺寸  | 铆头高度  |
|------|-------|-------|-------|
| 1    | 0.646 | 1.000 | 0.905 |
| 2    | 0.748 | 1.000 | 0.690 |
| 3    | 1.000 | 1.000 | 0.024 |
| 4    | 0.071 | 0.667 | 1.000 |
| 5    | 0.208 | 0.667 | 0.714 |
| 6    | 0.367 | 0.667 | 0.024 |
| 7    | 0.404 | 0.333 | 0.929 |
| 8    | 0.548 | 0.333 | 0.667 |
| 9    | 0.722 | 0.333 | 0.048 |
| 10   | 0.000 | 0.000 | 0.976 |
| 11   | 0.088 | 0.000 | 0.690 |
| 12   | 0.327 | 0.000 | 0.000 |

## 3 结语

为了改善铆接后干涉量均匀性,基于钉杆体积相同原则设计了3种不同尺寸的钉杆带有锥度的变径铆钉。通过三维有限元仿真,研究了锥形铆钉与常规铆钉的准静态铆接过程。基于有限元仿真的结果,可以得出以下结论。

1) 形成铆头高度  $H$  接近相同的铆接接头时,锥形铆钉与常规铆钉平均干涉量接近相同。3种不同尺寸的锥形铆钉对比常规铆钉,能够改善干涉量均匀性。其中 4.4 mm 与 4.8 mm 锥形铆钉对于干涉量均匀性的改善效果优于 4.6 mm 锥形铆钉。铆接过程中锥形铆钉钉杆各位置之间的半径增长速率差距小于常规铆钉是锥形铆钉干涉量均匀性改善的主要原因。

2) 通过仿真获取了铆接完成后不同铆头高度下铆钉的钉杆均匀度。结果表明均匀度值随着铆头高度的减小而提高,即随着铆头高度的减小,钉杆均匀性

也随之降低。

3) 铆接后钉杆均匀度与铆钉尺寸以及铆头高度共同组成一个灰色系统, 通过对该系统中的钉杆均匀度与铆钉尺寸及铆头高度的关联性计算分析, 得到铆钉尺寸、铆头高度对均匀度的关联度分别为 0.608 和 0.596。结果表明均匀度与铆钉尺寸以及铆头高度关联性好, 且铆钉尺寸变化对均匀度带来的影响大于铆头高度的变化。

#### 参考文献:

- [1] 洪腾蛟, 董福龙, 丁凤娟, 等. 铝合金在汽车轻量化领域的应用研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(4): 1—6.  
HONG Teng-jiao, DONG Fu-long, DING Feng-juan, et al. Application of Aluminum Alloy in Automotive Lightweight[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(4): 1—6.
- [2] SKORUPA M, MACHNIEWICZ T, SKORUPA A, et al. Effect of Load Transfer by Friction on the Fatigue Behaviour of Riveted Lap Joints[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 90: 1—11.
- [3] JIANG H, SUN L Q, LIANG J S, et al. Shear Failure Behavior of CFRP/Al and Steel/Al Electromagnetic Self-Piercing Riveted Joints Subject to High-Speed Loading[J]. Composite Structures, 2019, 230: 111500.
- [4] 刘腊腊, 刘翥寰, 史涛, 等. 异种铝合金电阻点焊接头的组织及性能[J]. 焊接, 2020(5): 53—56.  
LIU La-la, LIU Zhu-huan, SHI Tao, et al. Microstructure and Properties of Resistance Spot Welded Joint of Dissimilar Aluminum Alloys[J]. Welding and Joining, 2020(5): 53—56.
- [5] 王强, 贾普荣, 张龙, 等. 碳纤维增强复合材料沉头螺栓连接失效分析[J]. 航空材料学报, 2020, 40(6): 59—70.  
WANG Qiang, JIA Pu-rong, ZHANG Long, et al. Failure Analysis of Carbon Fiber Reinforced Composite Countersunk Bolt Joint[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(6): 59—70.
- [6] 杨强, 惠旭龙, 白春玉, 等. 高锁螺栓连接件动态拉伸响应与失效机理[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(10): 56—65.  
YANG Qiang, HUI Xu-long, BAI Chun-yu, et al. Dynamic Tensile Response and Failure Mechanism of Hi-Lock Bolt Joint[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(10): 56—65.
- [7] 龚成鹏, 章陈浩, 马天宇, 等. 2A10 铝合金铆钉电磁铆接铆头变形过程研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(7): 94—102.  
GONG Cheng-peng, ZHANG Chen-hao, MA Tian-yu, et al. Research on Deformation Process of 2A10 Aluminum Alloy Rivet Head in Electromagnetic Riveting[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(7): 94—102.
- [8] 陈宇豪, 薛松柏, 王博, 等. 汽车轻量化焊接技术发展现状与未来[J]. 材料导报, 2019, 33(S2): 431—440.  
CHEN Yu-hao, XUE Song-bai, WANG Bo, et al. Development Status and Future Direction of Welding Technology in the Automotive Lightweight[J]. Materials Reports, 2019, 33(S2): 431—440.
- [9] 张岐良, 曹增强. 复合材料螺栓性能的影响因素研究[J]. 航空学报, 2012, 33(4): 755—762.  
ZHANG Qi-liang, CAO Zeng-qiang. Study on Factors Influencing the Performance of Composite Bolted Connections[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(4): 755—762.
- [10] 胡鑫, 谭圆安, 段超琪, 等. ML10 钢铆钉电磁铆接接头力学性能研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(3): 92—97.  
HU Xin, TAN Yuan-an, DUAN Chao-qi, et al. Study on Mechanical Properties of Electromagnetic Riveted Joints with ML10 Steel Rivets[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(3): 92—97.
- [11] CHAKHERLOU T N, MIRZAJANZADEH M, ABAZADEH B, et al. An Investigation about Interference Fit Effect on Improving Fatigue Life of a Holed Single Plate in Joints[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2010, 29(4): 675—682.
- [12] JIANG H, ZENG C C, LI G Y, et al. Effect of Locking Mode on Mechanical Properties and Failure Behavior of CFRP/Al Electromagnetic Riveted Joint[J]. Composite Structures, 2021, 257: 113162.
- [13] 曹增强, 刘洪. 电磁铆接技术[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(1): 120—123.  
CAO Zeng-qiang, LIU Hong. Electromagnetic Riveting Technology[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(1): 120—123.
- [14] 冯东格, 曹增强. 电磁铆接和锤铆铆接质量对比分析[J]. 锻压技术, 2012, 37(3): 123—126.  
FENG Dong-ge, CAO Zeng-qiang. Quality Comparing Analysis of Electromagnetic Riveting and Pneumatic Riveting[J]. Forging and Stamping Technology, 2012, 37(3): 123—126.
- [15] DENG J H, YU H P, LI C F. Numerical and Experimental Investigation of Electromagnetic Riveting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 499(1/2): 242—247.
- [16] SZYMCZYK E, JACHIMOWICZ J, SŁAWINSKI G, et al. Influence of Technological Imperfections on Residual Stress Fields in Riveted Joints[J]. Procedia Engineering, 2009, 1(1): 59—62.
- [17] SKORUPA M, SKORUPA A, MACHNIEWICZ T, et al. Effect of Production Variables on the Fatigue Behaviour of Riveted Lap Joints[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(7): 996—1003.
- [18] JIANG H, CONG Y J, ZHANG J S, et al. Fatigue Response of Electromagnetic Riveted Joints with Different Rivet Dies Subjected to Pull-out Loading[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129: 105238.
- [19] CUI J J, ZENG C C, JIANG H, et al. Flat Spiral Coil Design for Higher Riveting Force and Energy Saving in the Electromagnetic Riveting Process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2019, 141(10): 101014.
- [20] ZENG C, LIAO W H, TIAN W. Influence of Initial Fit Tolerance and Squeeze Force on the Residual Stress in a Riveted Lap Joint[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9/10/11/12): 1643—1656.
- [21] RANS C, STRAZNICKY P V, ALDERLIESTEN R. Riveting Process Induced Residual Stresses Around Solid Rivets in Mechanical Joints[J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(1): 323—329.