

特种成形

## 铝合金半空心铆钉压铆力及铆接强度

李宗刚<sup>1,2</sup>, 梁涛<sup>1,2</sup>, 焦建军<sup>1,2</sup>

(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 机器人研究所, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 以  $\Phi 2\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  规格的半空心铆钉为对象, 分析其压铆力值, 实现自动化铆接。通过轴对称旋转薄壳理论和塑性理论, 得到了压铆过程的几何参数及半空心铆钉的压铆力阈值公式。采用有限元法, 分析了铆接过程中铆钉的应力和形状变化, 将过程划分为5个阶段, 并得出了直径为  $\Phi 2$ 、 $\Phi 4$  和  $\Phi 6\text{ mm}$  铆钉的压铆力仿真值。利用机器人铆接系统进行了实验, 测量了不同规格铆钉的压铆力, 并将结果与仿真及理论计算结果进行对比, 发现误差均小于5%。最后, 利用有限元软件分析了压铆后连接件的拉伸强度, 结果显示, 直径为  $\Phi 2$ 、 $\Phi 4$  和  $\Phi 6\text{ mm}$  铆钉的拉伸剪切力分别为40、100和150 N, 表明连接件强度高且铆接质量良好。

**关键词:** 铝合金; 半空心铆钉; 压铆力; 铆接强度; 旋转薄壳理论; 拉伸剪切力

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.011

**中图分类号:** TP301

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 11-0077-10

## Riveting force and riveting strength for aluminum alloy semi-hollow rivets

Li Zonggang<sup>1,2</sup>, Liang Tao<sup>1,2</sup>, Jiao Jianjun<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Institute of Robotics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** For  $\Phi 2\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  semi-hollow rivets, the riveting force values were analyzed, and the automated riveting was achieved. Then, the geometric parameters of the riveting process and the threshold formula for the riveting force of semi-hollow rivets were derived by the theory of axisymmetric rotating thin shells and the plasticity theory, and the stress and shape changes of rivets during the riveting process were analyzed by finite element method (FEM). Furthermore, the riveting process was divided into five stages, and the riveting force simulation values for rivets with the diameters of  $\Phi 2$ ,  $\Phi 4$  and  $\Phi 6\text{ mm}$  were obtained. Finally, the experiments were conducted by the robotic riveting system to measure the riveting forces of rivets with different specifications, the results were compared with the simulation and theoretical calculation results. And it is found that the errors are all less than 5%. The tensile strength of the connected components were analyzed by finite element software after riveting, and the results show that the tensile-shear forces for rivets with the diameters of  $\Phi 2$ ,  $\Phi 4$  and  $\Phi 6\text{ mm}$  are 40, 100 and 150 N, respectively, indicating the high strength of the connected components and the good quality of riveting.

**Key words:** aluminum alloy; semi-hollow rivet; riveting force; riveting strength; theory of rotating thin shells; tensile-shear force

铆接技术作为机械零件的主要连接方式之一, 应用于零部件连接的各个方面, 包括飞机、汽车、铁路等行业<sup>[1]</sup>。

相同直径下, 半空心铆钉所需要的压铆力远小于实心铆钉, 并且可以一次成形, 在保证连接强度的前提下, 又可减少能量损耗<sup>[2]</sup>。随着轻量化设计要求的提出以及发展, 半空心铆钉在航空航天、军工装备等领域的应用也越来越广泛, 如飞机机身蒙

皮的连接、机翼和尾翼等部件的组装。因此, 实现半空心铆钉智能铆接也愈加重要<sup>[3]</sup>。由于半空心铆钉的发展迅速、体积小、铆接过程受力复杂等特点, 少有学者对于半空心铆钉的压铆力等参数进行研究。半空心铆钉铆接时需要确定压铆力、钉孔间隙、铆接材料、铆钉长度等参数, 其中, 以压铆力对质量的影响最大且计算困难。因此, 本文主要针对半空心铆钉铆接所需要的压铆力以及铆接质量等问题进行研究。

对于半空心铆钉的压铆过程, 主要与圆管外翻时的部分过程类似, 因此, 其压铆工艺可在一定程度上参考圆管外翻工艺。王巧玲等<sup>[4]</sup>采用有限元法研究了大直径薄壁铝管双扩口成形机理与工艺, 将

收稿日期: 2024-02-26; 修订日期: 2024-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61663020); 甘肃省教育厅项目 (2022CYZC-33); 国家重点实验室开放基金项目 (GZ22119)

作者简介: 李宗刚 (1975-), 男, 博士, 教授

E-mail: lizongg@126.com

铝管成形划分为不同阶段,研究表明,翻管过程中,不同翻管模均有其最佳的形状,可以产生较好的翻管效果。Qiu X M 等<sup>[5]</sup>和 Yu X H<sup>[6]</sup>通过建立圆管曲率变化模型,从理论上研究了自由倒置下管道的变形机理,考虑了弯曲和张力的相互作用,通过有限元模拟验证了变曲率圆管外翻的理论。罗云华<sup>[7]</sup>采用轴对称旋转壳体的薄壳理论对圆管内翻及外翻变形过程进行了力学分析,并研究翻管轴对称失稳变形,建立了翻管临界失稳力的计算公式、轴对称翻管问题的有限元分析模型。

以上研究均以圆管外翻过程为研究对象,提出了很多方法,将半空心铆钉压铆过程近似视为圆管外翻过程的一部分,可以总结出半空心铆钉压铆力计算的理论方法。

针对于铆接过程分析方面,杨程等<sup>[8]</sup>采用多种方法分析了半空心厚壁铆钉的制作及压铆的全过程,对整个过程中铆钉的硬度和金属显微组织变化进行了研究,揭示了 304 不锈钢扁平头半空心厚壁铆钉在翻铆过程中各类缺陷产生的原因。宋丹龙等<sup>[9]</sup>对碳纤维复合材料 (Carbon Fibre Reinforced Plastics, CFRP)/Al 复合构件的无头实心铆钉压铆过程进行研究,采用主应力法和体积不变假设建立了实心铆钉压铆力理论公式。朱亚蓉等<sup>[10]</sup>对典型 GFRP/铝合金叠层实心铆钉压铆进行有限元分析,得到了实现低损伤压铆的预制孔大小及压铆力范围。

由于半空心铆钉壁厚较薄且为轴对称结构,因此,本文采用轴对称旋转薄壳理论对压铆力进行分析。梁治国等<sup>[11]</sup>对轴对称载荷作用下的旋转薄壳类零件进行应力分析,指出了几种常见形状薄壳容器的应力分布特点。Jiang H 等<sup>[12]</sup>利用灰色关联理论对 CFRP/Al 和钢/Al 结构的铆钉接头的力学性能进行了分析,结果表明,不同铆钉类型的接头力学性能差异较大,获得了 CFRP/Al 和钢/Al 结构连接中最佳的半空心自冲铆钉参数。

在铆接拉伸强度方面,Chen C 等<sup>[13]</sup>提出了一种平底铆接的连接方式。铆接接头下表面平整光滑、无凸起。对铆钉的几何参数进行了仿真优化。获得了合适的铆钉长度和铆钉直径。通过有限元模拟和正交实验,发现坡口内径是影响接头拉伸载荷的最重要因素。Yang Z 等<sup>[14]</sup>开发了一种用于 CFRP/CFRP 接头的垫圈铆接方法。对铆接损伤行为进行了评估,对准静态载荷下的拉伸剪切和拔出性能进行了评估,同时讨论了其失效模式。结果表明,铆接损伤主要发生在铆钉变形头附近的 CFRP 层,这

是由于铆钉尾部沿铆钉径向和轴向的过度变形造成的。采用合适的垫片连接 CFRP/CFRP 结构,可以明显减少铆接损伤,提高复合材料试件的连接强度。

以上研究主要研究了圆管外翻过程中出现的撕裂和失稳等问题、半空心铆钉从生产到铆接过程中产生的缺陷、实心铆钉的压铆力等工艺参数的计算和有限元分析,但未直接研究半空心铆钉压铆力等参数;在铆接强度分析方面,主要针对自冲铆接和抽芯铆钉的研究较多,对半空心铆钉的铆接质量的分析较少。为此,本文针对半空心铆钉的压铆力,采用旋转薄壳理论、塑性理论等方法进行分析,为半空心铆钉铆接实现智能化、提高铆接质量提供理论依据。

## 1 半空心铆钉变形力学分析

### 1.1 轴对称旋转壳体的薄膜理论

#### 1.1.1 轴对称旋转壳体单元

旋转壳体指以任意直线或平面曲线作母线绕其共同平面内的轴线旋转一周而成的旋转曲面。这条平面曲线称为经线 (或子午线),与旋转轴正交的任意一个圆称为纬线。

图 1 为旋转壳单元示意图,用经线截面  $AA'D'D$  和  $BB'C'C$  及两条相邻的纬线,切得垂直于经线的截面  $ABB'A'$  和  $DCC'D'$ ,得到单元体  $ABCD-A'B'C'D'$ 。其中  $d\alpha$  为截面  $ABB'A'$  和  $DCC'D'$  之间的夹角,  $d\beta$  为截面  $AA'D'D$  和  $BB'C'C$  之间的夹角,  $d\theta$  为截面  $A'B'C'D'$  和截面  $ABCD$  之间的夹角,  $R_\rho$  为通过 A 点的经线曲率半径 (曲率中心为  $K_1$ ),  $R_\theta$  为过 B 点垂直于的经线截面的另一主曲率半径 (曲率中心为  $K_2$ ),  $\alpha$  为曲率半径  $R_\theta$  与旋转轴  $OO'$  之间的夹角,  $\rho$  为过 A 点的平行圆半径 (圆心为  $O_1$ ),  $d\gamma$  为弧线

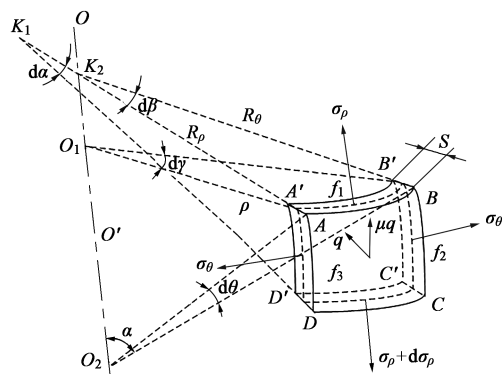


图 1 旋转薄壳单元

Fig. 1 Rotating thin shell element

$AB$  之间的夹角, 因此,  $AB$  的弧长为  $\rho d\gamma$ 。

如图 1 所示, 单元体的厚度为  $S$ , 作用在曲面单元体上的薄膜内力有: 沿经线方向的径向应力  $\sigma_\rho$ , 沿纬线方向的周向应力  $\sigma_\theta$ , 这两个应力沿单元体厚度均匀分布。单元体所受外力有: 接触面正压力  $q$  及摩擦应力  $\mu q$  ( $\mu$  为摩擦因数)。面积  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  分别表示曲面  $ABB'A'$ 、 $BCC'B'$  及  $ABCD$  的面积。

### 1.1.2 轴对称旋转壳体平衡方程

将上述单元体所受各应力平移至单元体的中心, 即可以得到如式 (1) 所示薄壳单元力平衡方程。

$$-2\sigma_\rho \frac{d\alpha}{2} f_1 - 2\sigma_\theta \frac{d\beta}{2} f_2 + q f_3 = 0 \quad (1)$$

将力投影到径向截面中曲面的切线上, 则有:

$$d(\sigma_\rho f_1) - 2\sigma_\theta \frac{d\theta}{2} f_2 - \mu q f_3 = 0 \quad (2)$$

根据单元体参数,  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  的表达式为:

$$\begin{cases} f_1 = SR_\theta d\beta = \rho d\gamma \\ f_2 = SR_\rho d\alpha \\ f_3 = R_\rho R_\theta d\alpha d\beta \end{cases} \quad (3)$$

将  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  代入式 (1), 得到经典拉普拉斯公式:

$$\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} - \frac{q}{S} = 0 \quad (4)$$

由旋转曲面的性质可知, 其满足高斯-科达齐-迈因纳尔迪 (Gauss-Codazzi-Mainardi) 公式, 即:

$$R_\rho d\alpha = \frac{d\rho}{\sin\alpha} \quad (5)$$

有以下关系:

$$l_{AB} = \rho d\gamma = R_\theta d\beta = \frac{\rho}{\cos\alpha} d\beta = \frac{\rho}{\sin\alpha} d\theta \quad (6)$$

式中:  $l_{AB}$  为弧线  $AB$  的长度。

于是有:

$$d\gamma = \frac{d\beta}{\cos\alpha} = \frac{d\theta}{\sin\alpha} \quad (7)$$

$$d(\sigma_\rho f_1) = f_1 d\sigma_\rho + \sigma_\rho df_1 = S\rho d\gamma d\sigma_\rho + S\sigma_\rho d\rho d\gamma \quad (8)$$

将式 (7)、式 (8) 代入式 (1), 经整理、化简可得:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu\rho}{\sin\alpha} \frac{q}{S} = 0 \quad (9)$$

将式 (4) 求得的  $q$  代入式 (9) 可得轴对称等

厚单元体的平衡方程式为:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu\rho}{\sin\alpha} \left( \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0 \quad (10)$$

因此, 想求得薄壳单元变形区应力  $\sigma_\rho$ 、 $\sigma_\theta$  的分布和数值, 就要代入塑性条件、铆钉变形区的形状尺寸。

### 1.2 半空心铆钉力学模型

铆钉在压铆力的作用下镦头成形, 图 2 为铆接变形的力学模型,  $AL$  部分为变形区。铆钉在轴向压力  $P$  的作用下, 沿着冲头凹槽外翻, 最终达到如图 2 所示的变形状态。设铆钉空心壁的厚度为  $S$ , 平均半径为  $R$ , 翻铆半径为  $R_\rho$ , 铆接后镦头半径为  $d$ 。假设翻铆半径  $R_\rho$  为不变值, 曲率中心与铆钉中线的距离为  $b$ 。

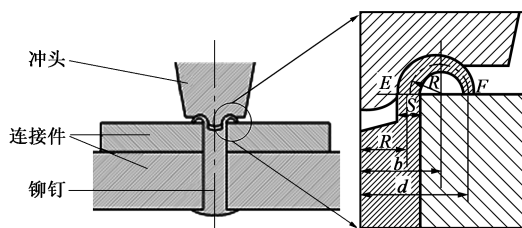


图 2 铆接模型和尺寸示意图

Fig. 2 Riveting model and schematic diagram of size

针对铆接模型分析过程, 作以下假设。

(1) 一般认为薄壁件厚度与长度或宽度的比值保持在 10% 以下可作平面应力假设。由于半空心铆钉的空心壁厚度与长度或宽度的比值一般在 7% 左右, 满足平面应力假设要求, 铆钉变形区厚度方向的应力  $\sigma_t$  与周向应力  $\sigma_\theta$ 、径向应力  $\sigma_\rho$  相比很小, 为了便于分析和计算金属的行为和应力分布, 可以认为  $\sigma_t = 0$ , 将铆钉变形区视为平面应力状态。

(2) 不考虑材料的加工硬化和包申格效应。

(3) 压铆过程中, 铆钉变形区的壁厚相较于外翻变形很小, 可以认为铆钉壁厚不变。

根据变形区尺寸, 有:

$$\begin{cases} R = b - R_\rho \\ \rho = R_\theta \cos\alpha = b - R_\rho \cos\alpha \\ d\rho = R_\rho \sin\alpha d\alpha \\ R_\theta = \frac{b}{\cos\alpha} - R_\rho \end{cases} \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10), 得半空心铆钉压铆的平衡方程为:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \left( 1 - \frac{\mu\rho}{R_\rho \sin\alpha} \right) \sigma_\rho - (1 + \mu \cot\alpha) \sigma_\theta = 0 \quad (12)$$

铆接时, 冲头被轴向压力  $P$  压向铆钉半空心处, 所以在铆钉空心处产生压应力  $\sigma_\rho$ , 而周向扩张

形成镦头,因此,周向应力 $\sigma_\theta$ 为拉应力。当铆钉空心壁稳定向外翻边时,满足塑性条件:

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = R_{eL} \quad (13)$$

式中: $R_{eL}$ 为屈服强度,由材料的性质决定,本文铆钉材料为铝合金,取为 200 MPa。

联立式(12)及式(13),即可求得 $\sigma_\rho$ 和 $\sigma_\theta$ 的值。

塑性变形理论认为,当材料的形状产生变化时,要消耗附加的变形功,这个附加变形功会使得径向应力增大,在铆钉开始变形的点(E点),由于空心壁的径向曲率半径从 $\infty$ 变为 $R_\rho$ ,因此,其径向应力增大,其增大值 $\Delta\sigma_\rho$ 可由式(14)确定:

$$\Delta\sigma_\rho = \frac{\beta R_{eL} S}{4R_\rho} \quad (14)$$

式中: $\beta$ 为材料塑性变形系数,本文取值为 1。

假设变形区 EF 段的摩擦力为 0,将 $\mu=0$ 代入式(12),可得:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} = R_{eL} \quad (15)$$

将式(15)积分,得:

$$\sigma_\rho = R_{eL} \ln \rho + C \quad (16)$$

式中: $C$ 为常数。

利用边界条件,在变形末端点( $\rho=d$ ), $\sigma_\rho=0$ ,代入式(16),可得式(17):

$$\sigma_\rho = -R_{eL} \ln \frac{d}{\rho} \quad (17)$$

考虑附加变形功,由于点 E、点 F 处( $\alpha=0^\circ$ )的径向曲率发生了突变,该点最大径向压应力应为

$\sigma_{\max} = \|\sigma_\rho\| + 2\Delta\sigma_\rho$  ( $\beta=1$ ),即:

$$\sigma_{\max} = R_{eL} \left( \ln \frac{R + 2R_\rho}{R} + \frac{S}{2R_\rho} \right) \quad (18)$$

由于压铆过程存在摩擦,因此,会产生附加的摩擦应力 $\sigma_f$ ,该应力产生的影响可以用原来的应力乘以 $e^{\pi\mu}$ (摩擦长度为半圆时)得到,即:

$$\sigma_f = R_{eL} \left( \ln \frac{R + 2R_\rho}{R} + \frac{S}{2R_\rho} \right) e^{\pi\mu} \quad (19)$$

E 点的径向应力即为压铆时铆钉空心壁所受的压应力,由此可得到半空心铆钉所需要的压铆力 $P=2\pi RS\sigma_f$ ,整理得:

$$P = 2\pi RS R_{eL} \left( \ln \frac{R + 2R_\rho}{R} + \frac{S}{2R_\rho} \right) e^{\pi\mu} \quad (20)$$

设 $\mu=0$ ,式(20)可改写为:

$$\begin{cases} p = p_m + p_w \\ p_m = R_{eL} \ln \left( 1 + \frac{2R_\rho}{R} \right) \\ p_w = \frac{SR_{eL}}{2R_\rho} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $p$ 为单位面积上的压铆力,即 $p=P/(2\pi RS)$ ;  $p_m$ 为薄膜力; $p_w$ 为弯曲力。

当 $R_\rho \rightarrow 0$ 时, $p_m \rightarrow 0$ ,而 $p_w \rightarrow \infty$ ;反之,当 $R_\rho \rightarrow \infty$ 时, $p_w \rightarrow 0$ ,而 $p_m \rightarrow \infty$ 。因此, $p_m$ 、 $p_w$ 与 $R_\rho$ 的关系是相反的。为了控制变量,弯曲力和薄膜力同时除以屈服强度。因此,压铆力与 $R_\rho$ 的关系存在极值,如图 3 所示。

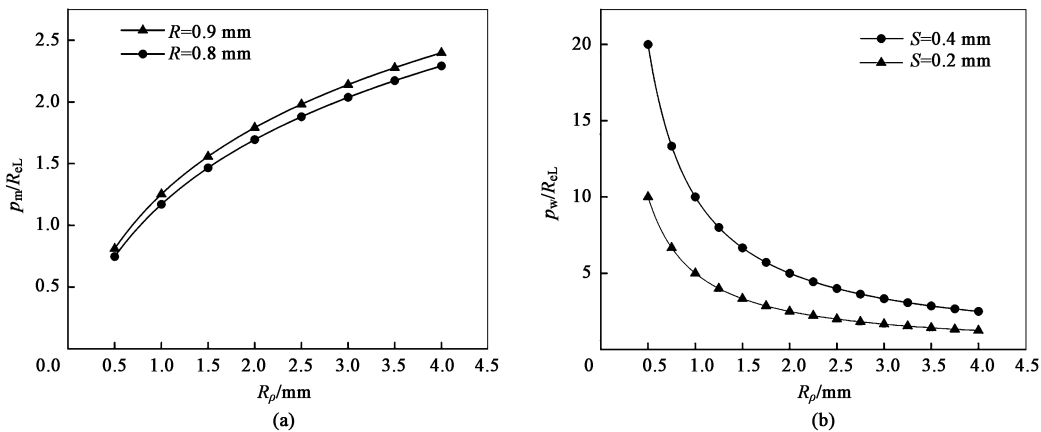


图 3 翻边半径对弯曲力 (a) 与薄膜力 (b) 的影响

Fig. 3 Effect of flanging radius on bending force (a) and membrane force (b)

令 $dP/dR_\rho=0$ ,得理论计算的翻边半径 $R_z$ :

$$R_z = \frac{\sqrt{4SR + S^2} + S}{4} \quad (22)$$

则冲头最佳圆角半径 $R_i=R_z+S/2$ ,即:

$$R_i = \frac{\sqrt{4SR + S^2} + 3S}{4} \quad (23)$$

将式 (23) 代入式 (20), 可以得到半空心铆钉完成压铆的最小压铆力为:

$$P_{\min} = 2\pi R S R_{\text{eL}} \left[ \ln \left( 1 + \frac{\sqrt{4RS + S^2} + S}{R} \right) \right] e^{\pi\mu} + \frac{2S}{\sqrt{4RS + S^2} + S} \quad (24)$$

对于尺寸为  $\Phi 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的半空心铆钉, 壁厚  $S$  为  $0.2 \text{ mm}$ , 取  $R_{\text{eL}} = 200 \text{ MPa}$ , 摩擦因数  $\mu = 0.1$ , 计算出翻边半径为  $0.27 \text{ mm}$ , 此时压铆力达到最小值, 为  $353.34 \text{ N}$ 。

图 4 为不同摩擦因数下压铆力与翻边半径的关系曲线。

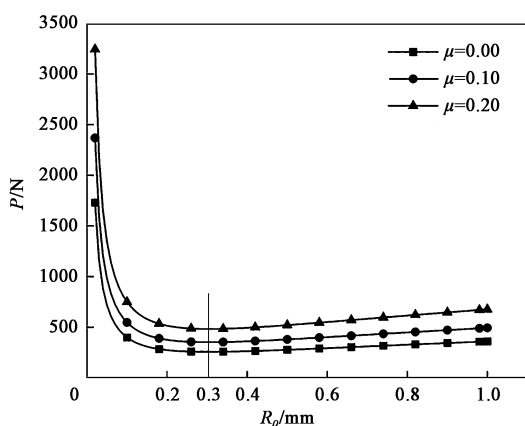


图 4 不同摩擦因数下压铆力与翻边半径的关系曲线  
Fig. 4 Relation curves of riveting force and  $R_p$  under different friction factors

由式 (20) 可知, 摩擦因数  $\mu$  与压铆力成正比, 因此铆接时, 可采取一定的工艺来降低所需的压铆力, 如降低模具的粗糙度、适当润滑等。

由图 4 可知, 同一规格的铆钉在不同摩擦因数时对应的压铆力各不相同, 但是要得到最小压铆力所对应的翻边半径是相同的。

## 2 半空心铆钉压铆分析

### 2.1 半空心铆钉压铆有限元分析

半空心铆钉压铆变形是一个较短时间的过程, 它是一次性成形, 整个过程的金属流动和材料变形情况不易观察, 因此, 采用有限元法进行分析, 从每一步材料的形状、应力变化情况分析半空心铆钉铆接参数的正确性, 以及铆接完成之后铆接件的强度。

#### 2.1.1 半空心铆钉有限元分析参数设置

半空心铆钉翻边问题为连续介质有限变形中的

几何与材料的非线性问题, 因此, 采用动力显示算法, 该算法可避免迭代计算和因非线性引起的收敛问题, 计算速度快、精度高。

网格类型采用六面体网格单元, 相较于四面体网格, 六面体网格的精度更高, 可以准确描述梯度变化区域。网格数量采用自适应加密网格, 对于变形较剧烈的半空心壁处, 网格密集, 而平直的实心部分网格稀疏, 有利于提高计算精度和速度。

以尺寸为  $\Phi 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的半空心铆钉为例进行建模和有限元分析, 铆钉的几何参数如图 5 所示。

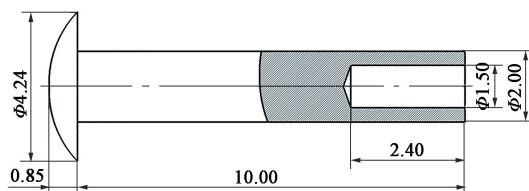


图 5 半空心铆钉几何尺寸  
Fig. 5 Geometric dimensions of semi-hollow rivets

接触类型选择通用接触, 设置切向行为的摩擦方式为罚摩擦, 摩擦因数为  $0.1$ ; 铆钉材料为铝合金, 材料属性见表 1。

表 1 半空心铆钉材料属性

Table 1 Material properties of semi-hollow rivets

参数	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ )	杨氏模量/ MPa	泊松比	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
数值	$2.8 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^4$	0.33	250	500

#### 2.1.2 半空心铆钉铆接有限元分析结果

采用有限元软件对翻铆过程进行模拟, 得到如图 6 所示的翻铆过程中的应力分布。

根据图 6, 将半空心铆钉翻铆过程分为 5 个阶段。

(1) 第 1 阶段: 冲头自由下降阶段, 此时冲头与铆钉还未接触, 因此, 二者均不受力, 也无应力产生, 如图 6a 所示。

(2) 第 2 阶段: 冲头与铆钉开始接触, 此时冲头开始向铆钉施加载荷, 但此时载荷产生的应力并未超过铆钉的屈服极限, 因此, 铆钉内部有应力产生, 但铆钉并未变形, 如图 6b 所示。

(3) 第 3 阶段: 铆钉空心壁处的应力持续增大, 达到了材料的屈服极限, 铆钉开始产生变形, 空心壁处开始随冲头凹槽形状弯曲, 如图 6c 所示。

(4) 第 4 阶段: 随着冲头继续向下移动, 铆钉空心壁弯曲  $180^\circ$  并与被连接件接触, 铆头成形, 被

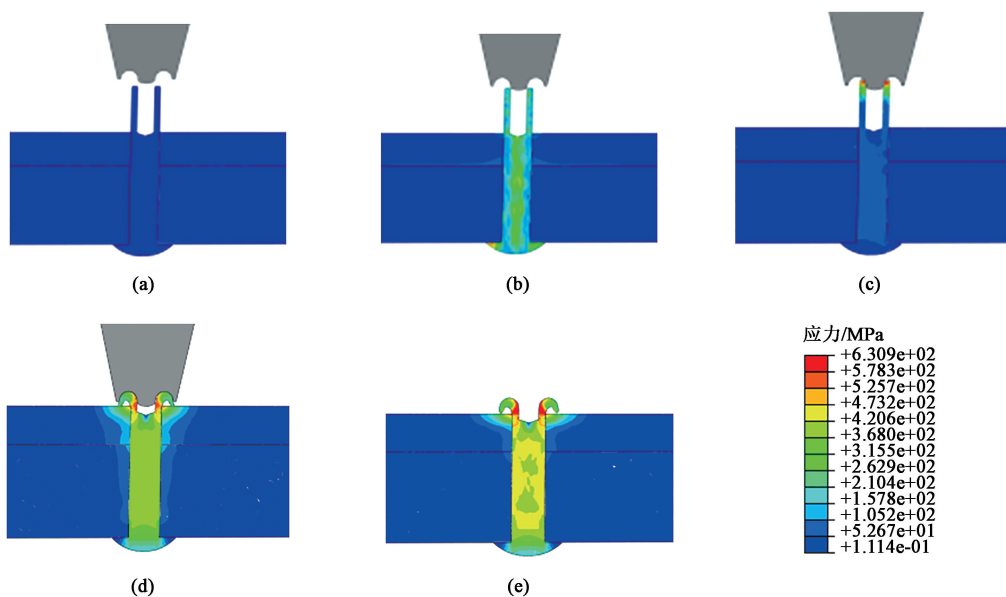


图 6 半空心铆钉翻铆过程中的应力分布

(a) 第 1 阶段 (b) 第 2 阶段 (c) 第 3 阶段 (d) 第 4 阶段 (e) 第 5 阶段

Fig. 6 Stress distributions of semi-hollow rivet during riveting process

(a) The first stage (b) The second stage (c) The third stage (d) The fourth stage (e) The fifth stage

连接件被成形后的镦头压紧, 铆钉在摩擦力的作用下被镦粗, 铆钉与被连接件孔之间由间隙配合转为过盈配合, 铆钉四周膨胀产生的力使得被连接件固定, 如图 6d 所示。

(5) 第 5 阶段: 铆接结束, 冲头移开, 不再对铆钉施加载荷, 铆钉和被连接件产生一定的弹性恢复, 如图 6e 所示。

由图 6 可知, 半空心铆钉翻铆完成后, 被连接件上表面处的空心壁应力最大, 这是由于铆钉弯曲时材料在此处堆叠, 与被连接件产生干涉, 导致空心壁上该截面处的应力增大。

对冲头设置不同的位移, 可以计算出相应的铆接力, 图 7 为冲头在不同行程时的载荷变化曲线。

由图 7 可以得出,  $\Phi 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的半空心铆钉翻铆所需要的压铆力为 330.46 N, 与式 (24) 的计算结果较为一致。

铆接过程时间设置为 0.5 s, 由图 7 可以看出: 0.475 s 之前, 不同行程对应的载荷变化曲线基本一致。冲头行程为 3.00 mm 时, 压铆力在 0.475 s 后也急剧增大, 这是由于行程不够, 铆钉变形过程不完善, 导致空心壁在被连接件上方产生堆叠, 使得冲头下压更加困难, 因此, 所需要的力突然变大, 翻铆效果如图 8a 所示。0.475 s 之后, 当冲头行程为 3.15 mm 时, 载荷平稳上升, 到 0.50 s 时, 铆接结束, 载荷为 330.46 N, 翻铆效果如图 8b 所示。冲头行程

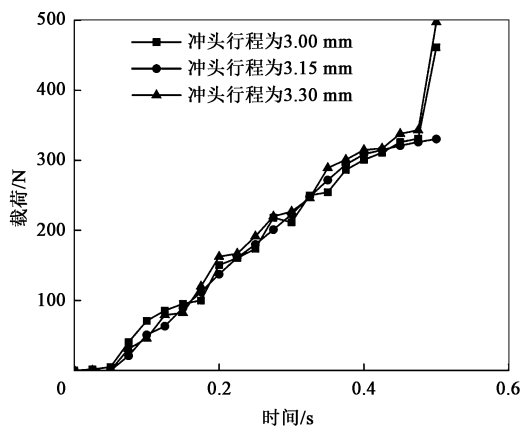


图 7 不同行程时冲头载荷变化曲线

Fig. 7 Load change curves of punch under different strokes

为 3.30 mm 时, 压铆力在 0.475 s 之后突然变大, 这是由于铆钉在 0.475 s 时已经与连接件表面接触, 冲头行程继续增大时, 由于连接件和冲头材料较硬, 铆钉被挤压向连接件表面延伸, 导致所需要的压铆力急剧上升, 翻铆效果如图 8c 所示。

将  $\Phi 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  和  $\Phi 6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  半空心铆钉的尺寸参数代入式 (24), 计算压铆力, 利用有限元软件对上述结果进行验证, 分别将式 (24) 的计算结果设置为  $\Phi 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  和  $\Phi 6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  半空心铆钉翻铆时的压铆力, 得到如图 9 所示的铆接结果。

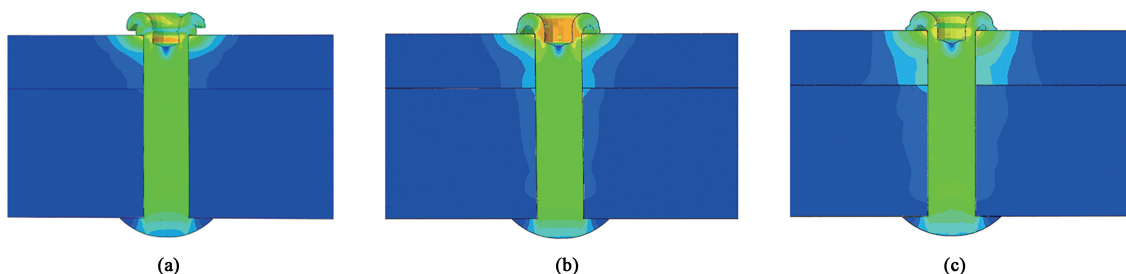


图 8 不同行程下的翻铆效果

(a) 3.0 mm (b) 3.15 mm (c) 3.30 mm

Fig. 8 Riveting effect under different strokes



图 9 不同规格半空心铆钉压铆结果

(a)  $\Phi 4$  mm (b)  $\Phi 6$  mm

Fig. 9 Riveting results of semi-hollow rivets with different specifications

由图 9 可以看出，式 (24) 计算的压铆力有很好的铆接效果，铆钉的铆头成形完善，空心壁厚度随着压铆过程的进行逐渐发生变化，并且越靠近端部厚度越小。

## 2.2 半空心铆钉压铆实验分析

利用图 10 所示的机器人智能铆接系统进行自动化压铆过程，系统包括六自由度铆接机器人、上位机、铆接机构、机器人控制柜、铆接件、力传感器等组件。

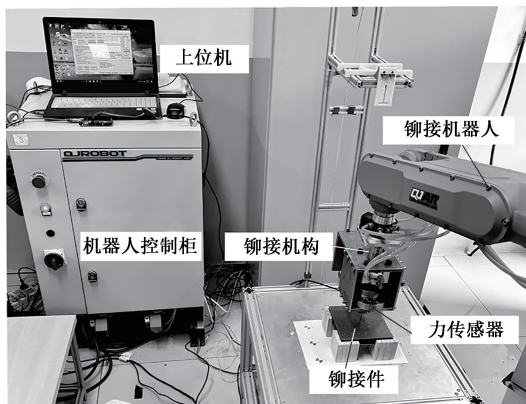


图 10 机器人铆接平台

Fig. 10 Robot riveting platform

如图 10 所示，力传感器布置在铆接机构上，通过惠斯通电桥测量传感器电信号并传入 HX711 模

块，该模块放大电信号并将其转换为数字信号，通过串口传输给上位机；通过控制柜控制机器人运动，到达指定位置后，机器人固定不动，冲头向下移动，动力由气缸提供。冲头移动一定距离，铆钉铆头成形，气缸关闭，机器人复位，铆接完成。结果如图 11 所示。

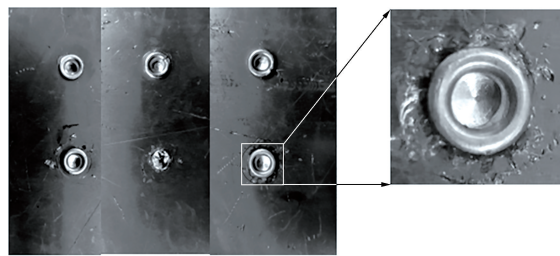


图 11 半空心铆钉压铆结果

Fig. 11 Riveting results of semi-hollow rivet

由图 11 可以看出，铆钉铆头成形完善，铆接结果较好，部分铆钉出现了铆接错位的缺陷，这是由于铆钉与冲头的定位误差导致的。

整个铆接过程由力传感器传输铆接力，传感器发送数据间隔为 0.01 s，采样总时长为 2 s，因此，每次采样共 200 组数据，同一规格铆钉做实验 10 组，对所得数据组作平均处理，得到  $\Phi 2$  mm 半空心铆钉压铆力曲线。由于铆接过程中金属材料直接接

触摩擦,系统会产生较为明显的抖动,导致传感器采集的数据产生波动,产生的波动最大时会达到 30 N 以上的误差,对压铆力计算结果的准确性有很大的影响,因此,采用傅里叶拟合对压铆力曲线进行拟合,结果如图 12 所示。

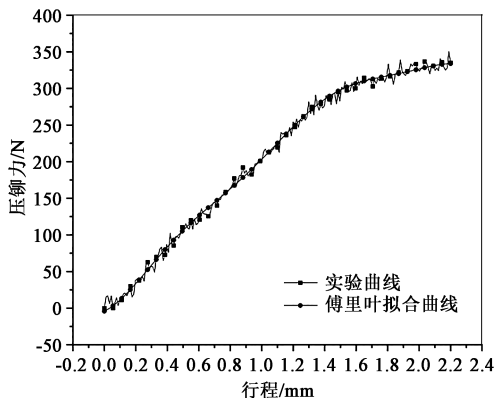


图 12 半空心铆钉压铆力变化曲线

Fig. 12 Variation curves of riveting force for semi-hollow rivet

由图 12 可知,整个压铆过程时间为 2 s,实际铆接过程中压铆力的增长并非线性,当铆接完成时压铆力达到最大值,即  $\Phi 2$  mm 半空心铆钉压铆所需的压铆力为 335.04 N。对  $\Phi 4$  和  $\Phi 6$  mm 半空心铆钉做相同的实验和处理,可以得到实际压铆力。将 3 种规格的半空心铆钉压铆力计算结果、仿真分析结果和实验结果进行对比,如表 2 所示。

表 2 3 种规格的半空心铆钉压铆力对比

Table 2 Comparison of riveting force for semi-hollow rivets with three kinds of specifications

铆钉直径/mm	压铆力/N		
	计算结果	仿真结果	实验结果
$\Phi 2$	353.3	330.46	335.04
$\Phi 4$	1991.0	1854.08	1861.59
$\Phi 6$	3764.4	3520.76	3554.71

由表 2 可以看出,半空心铆钉压铆力公式式 (24) 的计算结果与实验和仿真结果较为接近,误差均低于 8%。式 (24) 计算的压铆力结果稍大,根据对铆接过程的分析,产生该结果的原因为:式 (24) 的推导过程忽略了铆钉厚度变化,实际铆接过程中由于摩擦作用和金属延展,半空心铆钉的厚度会变小,使得所需要的压铆力略微减小,因此,式 (24) 的计算结果稍大。有限元分析结果和实验结果基本一致,数据细微差别是由传感器采样波动造成的。

### 3 铆接拉伸强度分析

铆接的强度是评价铆接质量的主要指标,由于半空心铆钉评价铆接质量的依据除了半空心铆钉镦头是否有裂纹、镦头成形是否完善等缺陷<sup>[15]</sup>之外,最重要的是铆接的强度。

在铆接过程中,半空心铆钉实心部分置于连接件的孔内,外端空心部分被冲头镦粗形成镦头,从而压紧连接件。而镦头部分是铆接过程中的主要变形区,高速冲击经常会使镦头部分产生裂纹等缺陷,从而影响拉脱强度<sup>[16]</sup>。本文主要通过有限元仿真技术,研究不同规格半空心铆钉完成铆接后的抗拉强度,探究半空心铆钉铆接质量。选取单个铆钉进行仿真, $\Phi 2$  mm、 $\Phi 4$  mm、 $\Phi 6$  mm 半空心铆钉的拉伸剪切力如图 13 所示。

由图 13 可以看出,曲线呈现出明显的线性增长阶段、屈服阶段和破坏阶段特征,铆接件的屈服和失效主要由铆钉主导;单个  $\Phi 2$  mm、 $\Phi 4$  mm、 $\Phi 6$  mm 的半空心铆钉能承受的最大拉伸剪切力分别为 40、100 和 150 N 左右。

如图 14 所示,在拉伸过程中,连接件的整体强度较高,铆钉强度低于连接件的承载能力,最终铆钉剪切破裂,导致整个铆接失效,铆钉钉杆发生明显变形。

由图 14 可知,在拉伸过程中铆接件的应力集中位置发生了变化,铆钉被拉长,并与连接件之间产生空腔,这表明铆钉已经被破坏。在实际工程应用中,不仅要考虑铆钉被拉伸破坏的最终失效强度,还要考虑连接件铆接孔周围的表面损伤等因素。

### 4 结论

(1) 采用轴对称旋转薄壳理论对半空心铆钉翻铆过程进行分析,在不考虑材料加工硬化和金属厚度变化的条件下,求解了半空心铆钉的压铆力,该公式可用于不同规格半空心铆钉压铆力的预计算。

(2) 采用有限元软件对半空心铆钉翻铆过程进行模拟,对铆接过程进行阶段划分,将半空心铆接过程划分为 5 个阶段,展示了铆钉翻铆每个阶段的应力变化,利用有限元软件计算了  $\Phi 2$  mm 半空心铆钉的压铆力。仿真结果与公式计算结果的对比表明,该公式计算结果准确,误差较小。

(3) 进行半空心铆钉铆接实验,利用力传感器测

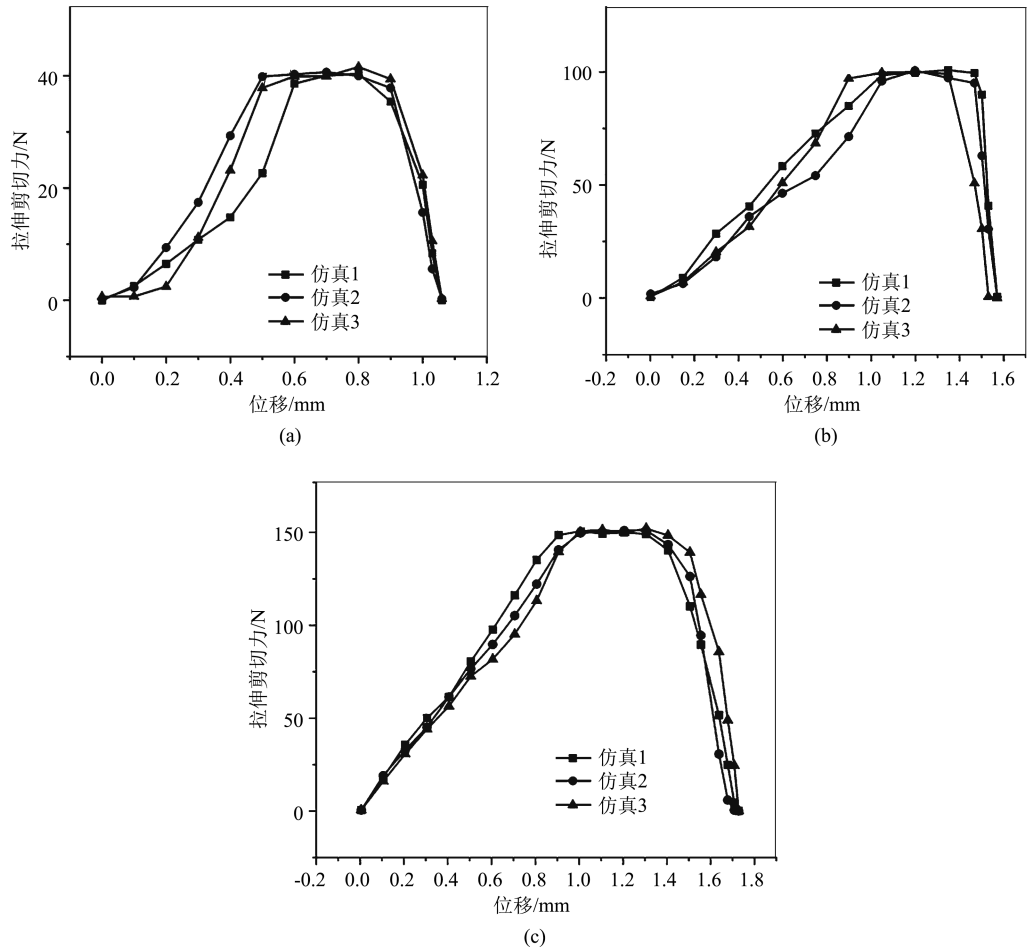


图 13 不同规格半空心铆钉拉伸剪切力仿真结果  
(a) Φ2 mm (b) Φ4 mm (c) Φ6 mm

Fig. 13 Simulation results of tensile-shear force for semi-hollow rivets with different specifications

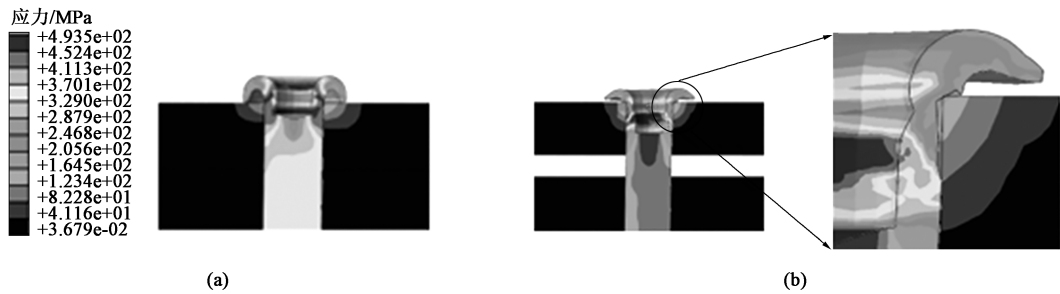


图 14 铆接件拉伸仿真结果  
(a) 拉伸前 (b) 拉伸后

Fig. 14 Tensile simulation results of riveted parts  
(a) Before tensile (b) After tensile

量了实际铆接过程中力的变化，并对测量值进行拟合去噪。利用有限元软件分析了不同规格铆钉的拉伸剪切力，对半空心铆钉的连接强度进行了仿真计算，采用公式计算后的压铆力可以完成高强度、高质量的铆接。

参考文献：

[1] 曹增强，张铭豪，谭学才，等. 航空复合材料结构铆接技术

综述 [J]. 航空制造技术, 2023, 66 (Z1): 26–37.  
Cao Z Q, Zhang M H, Tan X C, et al. Overview of riveting technology for aviation composite structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66 (Z1): 26–37.  
[2] 赵旭哲. 多层板高性能冲铆连接及铆钉形状合理性探讨 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (4): 21–36.  
Zhao X Z. Investigation on multi-layer plates by high performance self-piercing riveting and rationality of rivet profile [J]. Forging &

- Stamping Technology, 2022, 47 (4): 21-36.
- [3] 程晓祥. 浅谈铆接过程中的工艺技术 [A]. 《科技与企业》编辑部. 决策论坛——企业管理模式创新学术研讨会论文集 (上) [C]. 北京, 2017.
- Cheng X X. A brief discussion on the process technology of riveting [A]. Editorial Board of Technology and Business. Proceedings of the Decision Forum-Academic Seminar on Innovation in Enterprise Management Models (Volume I) [C]. Beijing, 2017.
- [4] 王巧玲, 詹梅, 李宏伟, 等. 大直径薄壁管双扩口成形机理与工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (3): 104-112.
- Wang Q L, Zhan M, Li H W, et al. Research on forming mechanism and process of double flaring tubes with large diameter and thin wall [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (3): 104-112.
- [5] Qiu X M, Yu X H, Li Y L, et al. The deformation mechanism analysis of a circular tube under free inversion [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 107: 49-56.
- [6] Yu X H. Theoretical model of a metal tube under inversion over circular dies [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 108-109: 23-28.
- [7] 罗云华. 翻管变形机理及翻管成形极限的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- Luo Y H. Research on Deformation Mechanism and Forming Limits of Tube Inversion [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [8] 杨程, 牛艳, 王瑞静, 等. 304 不锈钢扁平头半空心厚壁铆钉翻铆缺陷分析 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (3): 65-71.
- Yang C, Niu Y, Wang R J, et al. Analysis of riveting defects of 304 stainless steel flat head semi-hollow thick-walled rivets [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (3): 65-71.
- [9] 宋丹龙, 李原, 骆彬, 等. CFRP/Al 复合构件无头铆钉压铆力建模与仿真分析 [J]. 西北工业大学学报, 2012, 30 (4): 558-564.
- Song D L, Li Y, Luo B, et al. An effective mathematical modeling for and simulation analysis of flush rivet pressing force of CFRP/Al components [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30 (4): 558-564.
- [10] 朱亚蓉, 马兴海, 刘东平, 等. CFRP 与铝合金叠层低损伤压铆工艺参数研究 [J]. 宇航材料工艺, 2020, 50 (3): 23-27.
- Zhu Y R, Ma X H, Liu D P, et al. Low damage riveting process parameters of multi-layer consisting of CFRP composite and aluminum alloy [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50 (3): 23-27.
- [11] 梁治国, 吴春英, 王宁侠. 轴对称载荷作用下的旋转薄壳类零件的应力分析 [J]. 机械传动, 2004 (5): 59-61.
- Liang Z G, Wu C Y, Wang N X. Stress analysis of rotating thin shell parts under axisymmetric load [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2004 (5): 59-61.
- [12] Jiang H, Gao S, Li G Y, et al. Structural design of half hollow rivet for electromagnetic self-piercing riveting process of dissimilar materials [J]. Materials & Design, 2019, 183: 108141.
- [13] Chen C, Wu J L, Li H J. Optimization design of cylindrical rivet in flat bottom riveting [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 168 (21): 108292.
- [14] Yang Z, Jiang R S, Zuo Y J. Riveting damage behavior and mechanical performance assessments of CFRP/CFRP single-lap gasket-riveted joints [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 149: 1-17.
- [15] 宋秋凡, 杜亚江, 李宗刚, 等. 基于机器视觉的箱体类金属工件铆接质量检测方法研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2022 (11): 75-81.
- Song Q F, Du Y J, Li Z G, et al. Research on riveting quality detection method of box-like metal work-pieces based on machine vision [J]. Instrument Technique and Sensor, 2022 (11): 75-81.
- [16] 胡鑫, 谭圆安, 段超琪, 等. ML10 钢铆钉电磁铆接头力学性能研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (3): 92-97.
- Hu X, Tan Y A, Duan C Q, et al. Study on mechanical properties of electromagnetic riveted joints with ML10 steel rivets [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (3): 92-97.
- +++++
- (上接第 76 页)
- [16] Da F P, Song W Z. Fuzzy neural networks for direct adaptive control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50 (3): 507-513.
- [17] 张秀玲. 神经网络模型参考自适应控制及其在带材板形控制系统中的应用 [J]. 机械工程学报, 2001, 37 (9): 83-87.
- Zhang X L. Neural network model reference adaptive control and its application in the strip shape control system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37 (9): 83-87.
- [18] 楼顺天, 胡昌华, 张伟, 等. 基于 Matlab 的系统分析与设计——模糊系统 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- Lou S T, Hu C H, Zhang W, et al. System Analysis and Design Based on Matlab—Fuzzy System [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001.
- [19] 孟劼, 胡亚洲, 陈晓. 基于自适应模糊神经网络控制器的网络控制系统 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51 (18): 90-93, 208.
- Meng J, Hu Y Z, Chen X. Network control system based on adaptive fuzzy neural network controller [J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51 (18): 90-93, 208.
- [20] 陈伯芳, 尹平林, 马龙. 基于模糊神经网络的温度控制系统研究 [J]. 计算机与数字工程, 2010, 38 (7): 54-57.
- Chen B F, Yin P L, Ma L. Research on fuzzy neural networks for temperature control system [J]. Computer & Digital Engineering, 2010, 38 (7): 54-57.
- [21] 徐国凯, 张涛, 王娟, 等. 自动控制原理 [M]. 第 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- Xiu G K, Zhang T, Wang J, et al. Principles of Automatic Control [M]. Third Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- [22] HB 5936—2011, 零部件标记 [S].
- HB 5936—2011, Marking of parts and assemble [S].