

基于正交试验的分体式铆钉铆接成形优化

徐 敏¹, 邢芳芳², 姜海林³

(1. 苏州工业职业技术学院 智能装备学院, 江苏 苏州 215104; 2. 徐州工业职业技术学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221004;
3. 淮阴工学院 机械与材料工程学院, 江苏 淮安 223003)

摘要: 基于快速制造样件以及铆接防水的需求, 设计了一种分体式铆钉。以 2 层 1.5 mm 厚度的 Al6016-T4 铝板的铆接成形为研究对象, 选择铆钉本体头部高度和内径、铆钉本体腿部内径以及压边力为影响因素, 将互锁长度作为评价指标。基于 4 因素 3 水平的正交试验及 Deform-2D 软件对分体式铆钉铆接成形工艺参数进行优化。通过极差分析得到工艺参数对互锁长度影响的主次顺序为: 铆钉本体腿部内径>铆钉本体头部高度>铆钉本体头部内径>压边力。基于正交试验结果分析得到最优铆接成形参数, 并对优化方案进行试验验证, 仿真值与试验值之间的相对误差为 8.69%, 证明了模拟结果的准确性, 研究结论对实际生产具有指导意义。

关键词: 分体式铆钉; 6016 铝合金; 铆接; 互锁长度; 压边力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.07.020

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 07-0160-05

Optimization on riveting forming for split rivet based on orthogonal experiment

Xu Min¹, Xing Fangfang², Jiang Hailin³

(1. School of Intelligent Equipment, Suzhou Vocational Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221004, China;
3. Faculty of Mechanical & Material Engineering, Huaian Institute of Technology, Huai'an 223003, China)

Abstract: Based on the needs of rapid manufacturing of sample piece and waterproofing of riveting, a split rivet was designed. Then, for the riveting forming of two layers of Al6016-T4 aluminum sheet with the thickness of 1.5 mm, taking the height and inner diameter of rivet head, inner diameter of rivet leg and blank holder force as the influence factors, and taking the interlocking length as the evaluation index, the riveting forming process parameters of split rivet were optimized by the orthogonal test of four factors and three levels and the software Deform-2D. Range analysis show that the influence order of process parameters on the interlock length is inner diameter of rivet leg>height of rivet head> inner diameter of rivet head > blank holder force. Then the optimal riveting parameters were obtained based on the analysis result of orthogonal test, and the optimization scheme was verified by experiments. The relative error between the simulated and experimental values is 8.69%, indicating the accuracy of the simulation results, which has guiding implications for the actual production.

Key words: split rivet; 6016 aluminum alloy; riveting; interlock length; blank holder force

随着汽车行业的快速发展, 对汽车的轻量化以及板料连接后的密封防水功能的要求也日益突出。此外, 企业为了在激烈的市场竞争中具有优势, 需要不断开发出新产品并且为客户快速提供样品进行试验验证^[1-3]。传统的自冲铆接对双层铝板进行铆接后, 第 1 层板料会被刺穿而引起板料铆接成形后的气密性问题。基于 2 层 Al6016-T4 铝板的铆接为

研究对象, 本文提出如图 1 所示的分体式结构的铆钉, 该铆钉由铆钉本体和中间的芯棒组成, 铆钉本体采用碳钢制造, 芯棒采用碳钢或者铝合金制造, 并且芯棒的长度可以根据铆接板材的厚度进行设计, 将不同长度的芯棒与铆接本体进行组装便可以快速实现不同方案的分体式铆钉, 从而完成快速制造样件进行铆接试验的需求。通过调整芯棒的长度可以实现铆钉本体不刺穿第 1 层板料的目的, 进而实现板料铆接成形后的密封效果。本文选择 1.5 mm 厚度的 Al6016-T4 铝合金板料的双层板铆接成形过程作为分析对象, 基于正交试验设计与 Deform 有限元软件对板料铆接成形工艺参数进行优化, 以期获得最优的铆接质量, 并且为企业的实际生产提供参考指导。

收稿日期: 2024-07-15; **修订日期:** 2024-10-23

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目 (21KJB460027); 苏州工业职业技术学院 2024 年在岗攻读博士人才项目 (20241hbs004)

作者简介: 徐 敏 (1982-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: 375926248@qq.com

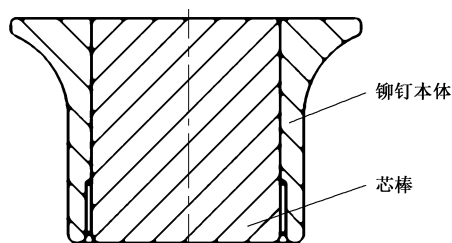


图1 分体式铆钉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of split rivet

1 分体式铆钉铆接成形的有限元模拟

1.1 几何模型的建立

图2为利用CREO软件建立的分体式铆钉铆接成形的轴对称几何模型,在分体式铆钉铆接成形的有限元模拟过程中,上层板料和下层板料均为1.5 mm厚度的Al6016-T4铝合金,铆钉本体和芯棒

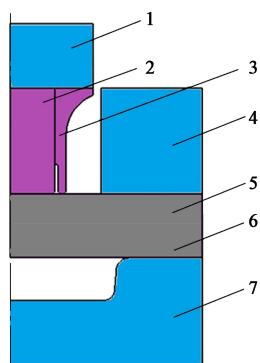


图2 分体式铆钉铆接的几何模型

1. 安装上模 2. 芯棒 3. 铆钉本体 4. 压边圈
5. 上层板料 6. 下层板料 7. 安装下模

Fig. 2 Geometric model of riveting for split rivet

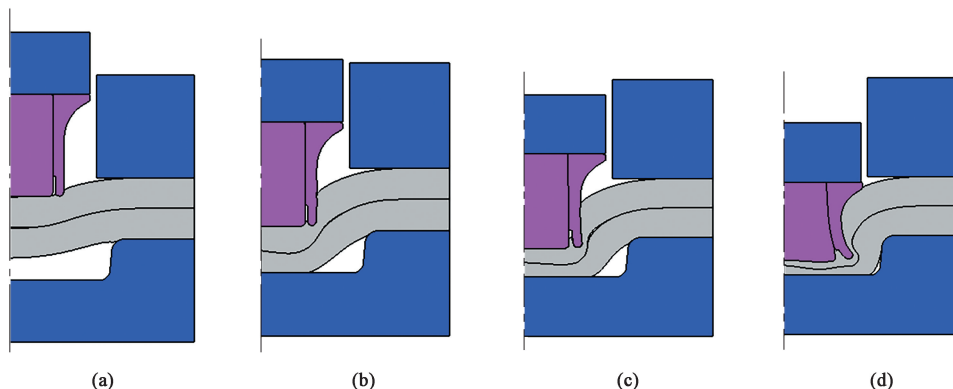


图4 分体式铆钉的铆接成形过程

- (a) Step 50 (b) Step 150 (c) Step 200 (d) Step 284

Fig. 4 Riveting forming process of split rivet

的材料均为10B33钢。上层与下层Al6016-T4铝合金板料、铆钉本体与芯棒均选择为弹塑性体,安装上模、安装下模和压边圈均选择为刚性体,作用于压边圈上的压边力选择为3500 N,安装上模的铆接速度选择为 $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,铆钉本体、芯棒、安装上模、压边圈以及安装下模与板料之间采用库伦摩擦,其摩擦因数的数值设置为0.1。此外,为了确保顺利完成分体式铆钉铆接成形过程的仿真,对分体式铆钉与上下层板料接触而产生的铆接变形区域设置局部网格细化,并且设置板料每5步完成一次网格的自动重新划分。

1.2 材料模型的建立

按照GB/T 228.1—2021^[4],利用拉伸试验机对Al6016-T4铝合金和10B33钢两种材料进行拉伸试验,得到如图3所示的材料真实应力-真实应变曲线。

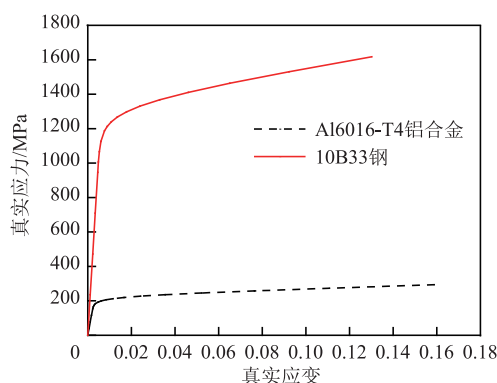


图3 Al6016-T4铝合金与10B33钢的真实应力-真实应变曲线

Fig. 3 True stress - true strain curves of Al6016-T4 aluminum alloy and 10B33 steel

1.3 有限元模拟结果的分析

图4为分体式铆钉铆接成形的过程。图4a为芯棒和铆钉本体与上层板料接触的初始阶段;图4b为

芯棒和铆钉本体逐渐压入上层板料中；随着铆接行程的逐渐增加，芯棒和铆钉本体压入板料的距离也随之增加，铆钉本体腿部发生变形，如图 4c 所示；图 4d 为分体式铆钉铆接的成形效果，芯棒与铆钉本体的底部发生变形，其与板料形成互锁，而且铆钉本体腿部未刺穿上层板料，因而可以实现分体式铆钉铆接成形后的密封效果。

对于分体式铆钉铆接两层 1.5 mm 厚度的 Al6016-T4 铝合金板料的成形过程而言，其主要通过铆接成形后的互锁长度、残余厚度以及钉头高度来综合评价铆接成形的质量。从图 5 中的分体式铆钉铆接成形的剖面可以看出，铆钉本体与上层板料之间的互锁长度为 0.579 mm，下层板料与上层板料之间的互锁长度为 0.343 mm，钉头高度为 0.202 mm，残余厚度为 0.291 mm。

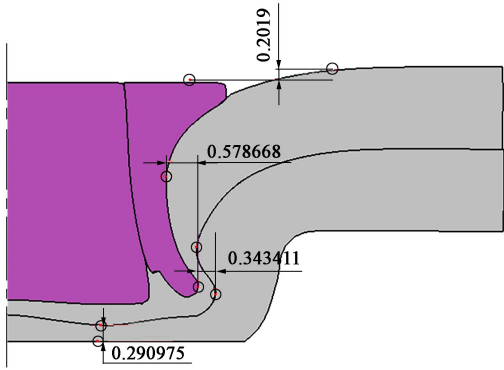


图 5 分体式铆钉铆接成形的剖面

Fig. 5 Cross-section of riveting forming for split rivet

2 基于正交试验的分体式铆钉铆接成形参数的优化

2.1 正交试验的设计

采用正交试验设计仿真方案，优化分体式铆钉铆接 1.5 mm 厚度的 Al6016-T4 铝合金双层板料的成形工艺参数，可以在较少的试验次数下获得较优的工艺参数组合方案。图 6 为分体式铆钉的铆钉本体示意图，以铆钉本体的头部高度 A 、铆钉本体腿部内径 B 、压边力 C 以及铆钉本体的头部内径 D 作为影响因素，由于铆接成形后的互锁长度对铆接性能具有直接的影响，因而将铆钉本体与板料形成的互锁长度作为评价指标。为了尽可能地减少分体式铆钉铆接成形的模拟次数，本文选择 4 素 3 水平 L_9 (3^4) 正交表。其中铆钉本体的头部高度选择为 3.6、4.0 与 4.4 mm 共 3 个水平，铆钉本体腿部内

径选择为 $\Phi 4.45$ 、 $\Phi 4.55$ 与 $\Phi 4.65$ mm 共 3 个水平，压边力选择 3000、4000 和 5000 N 共 3 个水平，铆钉本体的头部内径选择为 $\Phi 4.1$ 、 $\Phi 4.2$ 与 $\Phi 4.3$ mm 共 3 个水平。利用 Deform-2D 软件对不同的工艺参数组合方案进行有限元仿真，获得的模拟结果如表 1 所示。

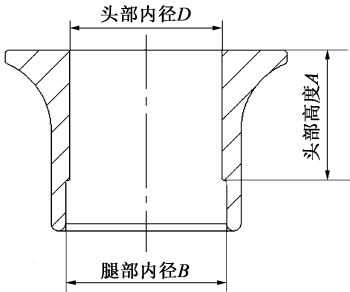


图 6 铆钉本体示意图

Fig. 6 Schematic diagram of rivet body

表 1 分体式铆钉铆接成形的模拟结果

Table 1 Simulation results of riveting forming for split rivet

试验号	铆钉本体 头部高度 A/mm	铆钉本体 腿部内径 B/mm	压边力 C/N	铆钉本体 头部内径 D/mm	互锁 长度/ mm
1	3.6	$\Phi 4.45$	3000	$\Phi 4.1$	0.447
2	3.6	$\Phi 4.55$	4000	$\Phi 4.2$	0.508
3	3.6	$\Phi 4.65$	5000	$\Phi 4.3$	0.513
4	4.0	$\Phi 4.45$	4000	$\Phi 4.3$	0.431
5	4.0	$\Phi 4.55$	5000	$\Phi 4.1$	0.463
6	4.0	$\Phi 4.65$	3000	$\Phi 4.2$	0.554
7	4.4	$\Phi 4.45$	5000	$\Phi 4.2$	0.396
8	4.4	$\Phi 4.55$	3000	$\Phi 4.3$	0.432
9	4.4	$\Phi 4.65$	4000	$\Phi 4.1$	0.454

2.2 正交试验的结果分析

为了研究分体式铆钉铆接两层 1.5 mm 厚度的 Al6016-T4 铝合金板料的成形工艺参数对互锁长度影响的先后顺序，借助极差分析法分析了表 1 中的正交试验仿真结果，得到如表 2 所示的分体式铆钉铆接成形正交试验的极差分析结果。其中， K_1 、 K_2 、 K_3 分别为各参数在 3 个水平的模拟试验结果之和。当极差 R 越大时，说明改变该影响因子的水平对模拟试验结果的影响越明显^[5-7]。通过对表 2 的极差数值的大小进行分析，能够获得分体式铆钉铆接成形工艺参数对互锁长度的影响程度的顺序为：铆钉本体腿部内径>铆钉本体头部高度>铆钉本体头部内径>压边力。

表 2 分体式铆钉铆接成形的正交试验的极差分析结果 (mm)

Table 2 Range analysis results of orthogonal experiment for riveting forming of split rivet (mm)

参数	铆钉本体 头部高度 A	铆钉本体 腿部内径 B	压边力 C	铆钉本体 头部内径 D
K_1	1.468	1.274	1.433	1.364
K_2	1.448	1.403	1.393	1.458
K_3	1.282	1.521	1.372	1.376
R	0.186	0.247	0.061	0.094

图 7 为分体式铆钉铆接成形的各影响因素与互锁长度之间的变化规律。从图 7 中可以看出,互锁长度随着铆钉本体头部高度和压边力的增加呈现不断减小的变化规律,随着铆钉本体腿部内径的逐渐增大而表现出不断增加的趋势,而随着铆钉本体头部内径的增加则呈现出先增大后减小的变化规律。分析其原因为:当铆钉本体头部高度增加时,铆钉本体的刚性会增强,导致铆钉本体不容易发生变形而使得互锁长度减小。当铆钉本体腿部内径增加时,其削弱了铆钉本体的刚性,使得铆钉腿部容易发生变形而嵌入到板料中,从而增加互锁长度。当压边力逐渐增加时,板料阻力增加而不容易发生流动,铆钉腿部不容易张开,与板料形成互锁,其使得互锁长度有一定减小。当铆钉本体的头部内径增加到一定程度时,铆钉头部的壁厚减小,使得铆钉本体头部区域的刚性得以降低,其导致铆钉本体头部区域发生一定的变形,不利于铆钉本体腿部向外扩展而嵌入板料中,进而减小了互锁长度。

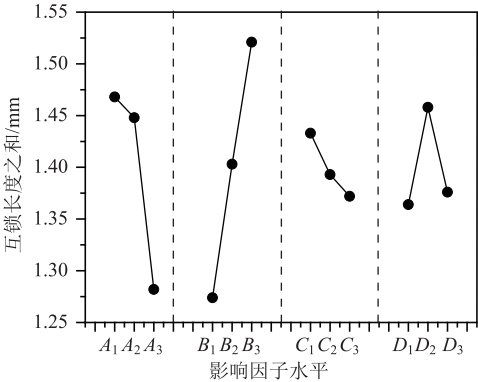


图 7 影响因素与互锁长度之间的变化规律

Fig. 7 Variation laws between influencing factors and interlock length

为了进一步分析分体式铆钉铆接成形的工艺参数对互锁长度影响的显著性,利用方差分析对表 1

中的分体式铆钉铆接成形的正交试验结果进行研究^[8-11]。由表 3 可以得知,铆钉本体的头部高度、铆钉本体腿部内径、压边力以及铆钉本体的头部内径对互锁长度的影响不显著。

表 3 分体式铆钉铆接成形的正交试验的方差分析结果

Table 3 Variance analysis results of orthogonal experiment for riveting forming of split rivet

方差来源	偏差平方和	自由度	F 值	临界值 F_{α}	显著性
铆钉本体头部高度 A	0.006	2	6	19	—
铆钉本体腿部内径 B	0.010	2	10	19	—
压边力 C	0.001	2	1	19	—
铆钉本体头部内径 D	0.002	2	2	19	—
误差项	0.004	2	—	—	—

2.3 分体式铆钉铆接工艺参数的优化与试验验证

从表 1 所示的分体式铆钉铆接成形的数值模拟结果可以看出:分体式铆钉与板料之间形成的互锁长度获得最大值时的成形工艺参数为 $A_2B_3C_1D_2$,其模拟值为 0.554 mm。然而从图 7 中可以看出,分体式铆钉铆接两层 1.5 mm 厚度的 Al6016-T4 铝合金板料成形的最优工艺参数方案为 $A_1B_3C_1D_2$,即铆钉本体的头部高度为 3.6 mm、铆钉本体腿部内径为 $\Phi 4.65$ mm、压边力为 3000 N 以及铆钉本体的头部内径为 $\Phi 4.2$ mm。借助 Deform-2D 模拟软件对优化后的分体式铆钉铆接成形工艺参数进行仿真,并且为了进一步验证分体式铆钉铆接两层 1.5 mm 厚度的 Al6016-T4 铝板成形模拟的准确性,利用安装模具和压铆设备对分体式铆钉铆接成形优化后的工艺参数进行试验,得出试验值与模拟值的结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出:轮廓线为分体式铆钉铆接成形的有限元模拟结果,模拟结果非常接近于试验结果,通过 Deform-2D 软件的后处理测量功能得到分体式铆钉铆接成形的互锁长度的仿真值为 0.587 mm,通过测量设备测出互锁长度的试验结果为 0.536 mm,有限元模拟结果与试验结果之间的相对误差数值为 8.69%,该误差数值在企业能够接受的范围内,因而可以将有限元模拟成果应用于分体式铆钉铆接板料成型的设计过程之中,可以减少反复的铆接成形试验,减少企业的试验成本。分析误差产生的原因为:原材料不同批次存在性能误差、安装模具加工制造过程存在一定的制造误差、压铆设备冷机与热机状态中存在的稳定性等问题,然而有限元仿真技术难以将分体式铆钉铆接成形试验中所遇到的上述因素全部综合考虑进去。

特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出

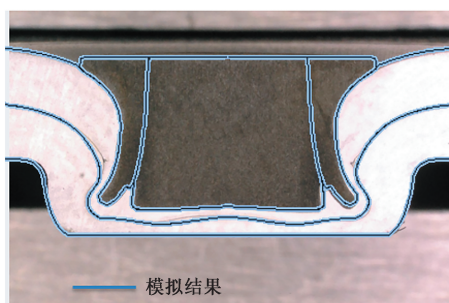


图 8 分体式铆钉铆接成形的模拟结果与试验结果对比

Fig. 8 Comparison between simulation and experimental results for riveting forming of split rivet

3 结论

(1) 通过正交试验的极差分析得出分体式铆钉铆接成形工艺参数对互锁长度影响的先后顺序分别为：铆钉本体腿部内径>铆钉本体头部高度>铆钉本体头部内径>压边力。通过方差分析得知，铆钉本体的头部高度、铆钉本体腿部内径、压边力以及铆钉本体头部内径对互锁长度的影响均不显著。

(2) 互锁长度随着铆钉本体头部高度和压边力的增加呈现不断减小的变化规律，随着铆钉本体腿部内径的逐渐增大表现出不断增加的趋势，随着铆钉本体头部内径的增加呈现出先增大后减小的变化规律。

(3) 基于正交试验的设计与有限元模拟结果的分析获得分体式铆钉铆接两层 1.5 mm 厚度的 Al6016-T4 铝合金板料成形的优化工艺参数为：铆钉本体的头部高度为 3.6 mm，铆钉本体腿部内径为 $\Phi 4.65$ mm，压边力为 3000 N 以及铆钉本体的头部内径为 $\Phi 4.2$ mm。

(4) 分体式铆钉与板料之间形成的互锁长度的仿真值与试验值分别为 0.587 与 0.536 mm，有限元模拟结果与试验结果之间的相对误差数值为 8.69%，验证了有限元模拟结果的准确性，研究所获得的结论对于企业的实际生产具有非常重要的参考价值。

参考文献：

- [1] 陈贵坤, 曾凯, 邢保英, 等. 自冲铆接铆钉材料流场的数值模拟研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 96-102.
Chen G K, Zeng K, Xing B Y, et al. Numerical simulation study on rivet material flow field in self-pierce riveting [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 96-102.
- [2] 林森, 赵伦, 肖钢, 等. 航空铝合金自冲铆接头微观失效研

究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 121-127.

Lin S, Zhao L, Xiao G, et al. Microscopic failure study on self-piercing riveting joints for aviation aluminum alloys [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 121-127.

- [3] 张永超, 黄志超, 贾颖莲. B1500HS 高强度钢与 AA5052 铝合金自冲铆接成形与力学性能分析 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (10): 122-129.

Zhang Y C, Huang Z C, Jia Y L. Forming and mechanical properties analysis of self-piercing riveted joints of B1500HS high strength steel and AA5052 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (10): 122-129.

- [4] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].

GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].

- [5] 毛晓东, 刘庆永, 李利, 等. 5182-O 铝合金板材自冲铆接工艺参数对接头组织和性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31 (5): 1239-1252.

Mao X D, Liu Q Y, Li L, et al. Effects of technological parameters on microstructure and properties of self-piercing riveting joints of 5182-O aluminum alloy sheets [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31 (5): 1239-1252.

- [6] 宋承裕, 何晓聪, 魏文杰, 等. 金属夹层对自冲铆接头强度和失效形式的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2021, 29 (2): 72-77.

Song C Y, He X C, Wei W J, et al. Effect of metal interlayer on strength and failure mode of self-piercing riveting joint [J]. Materials Science and Technology, 2021, 29 (2): 72-77.

- [7] 孙晓婷, 曾凯, 何晓聪, 等. 基于响应面法的铝合金自冲铆接头强度预测模型 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (8): 199-204.

Sun X T, Zeng K, He X C, et al. Strength prediction model of self-piercing riveted joints of aluminum alloy based on response surface method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (8): 199-204.

- [8] 杨艳芬, 邢保英, 曾凯, 等. 基于响应面法的钢铝压印-粘接复合接头强度预测 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (8): 76-82.

Yang Y F, Xing B Y, Zeng K, et al. Strength prediction of steel-aluminum clinch-adhesive hybrid joints based on response surface methodology [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (8): 76-82.

- [9] 马兴海, 陈文亮, 齐振超, 等. 基于有限元模拟的铆接工艺参数优化 [J]. 宇航材料工艺, 2024, 54 (4): 23-29.

Ma X H, Chen W L, Qi Z C, et al. Optimization of riveting process parameters based on finite element simulation [J]. Aerospace Materials & Technology, 2024, 54 (4): 23-29.

- [10] 刘伟军, 王琳, 苑泽伟, 等. 铆接压力预测与复合工艺参数下铆钉接头尺寸稳定性 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (10): 112-121.

Liu W J, Wang L, Yuan Z W, et al. Prediction of riveting pressure and dimensional stability of rivet joints under composite process parameters [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (10): 112-121.

- [11] 赵存利, 焦云雷, 王小然, 等. 铝合金薄板类易变形工件加工要点 [J]. 金属加工 (冷加工), 2024 (4): 42-44.

Zhao C L, Jiao Y L, Wang X R, et al. Key points in machining thin aluminum alloy sheet workpieces prone to deformation [J]. Metal Working (Metal Cutting), 2024 (4): 42-44.