

装备与成套技术

## 摩擦铆压用交流伺服塑性连接设备结构可靠性研究

张 鹏<sup>1</sup>, 赵升吨<sup>1</sup>, 张佳莹<sup>1</sup>, 费亮瑜<sup>1</sup>, 王文文<sup>1</sup>, 卢孟康<sup>2</sup>, 陈 政<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 中国核动力研究设计院第一研究所, 四川 成都 610213;  
3. 西安物华巨能爆破器材有限责任公司, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 为了提高低塑性轻量化板材接头的连接质量、降低成形力、避免连接过程中产生裂纹缺陷, 提出了摩擦铆压塑性连接工艺, 并设计了交流伺服塑性连接设备。利用 ANSYS Workbench 软件对设备的机身进行了静力学分析, 校核了机身刚度和强度, 并通过模态分析研究了设备振动响应特性。结果表明: 该设备每个自由度的运动均由单独的交流伺服电机驱动控制, 传动链短、结构紧凑, 主轴可提供 120 kN 下压力。机身竖直方向的最大变形量为 0.074 mm, 最大累积变形量为 0.16 mm, 水平方向最大变形量为 0.011 mm, 最大累积变形量为 0.38 mm, 机身的强度与刚度均满足摩擦铆压塑性连接工艺需求。机身各低阶模态频率均避开了设备、电机和减速器的工作频率, 设备工作过程中振动稳定, 不会发生共振现象。最后, 在该设备上开展了铝合金板材的摩擦铆压连接试验, 所获铝合金板材的摩擦铆压连接接头, 背面光滑平整, 证明了所设计的交流伺服塑性连接设备的结构和功能均能满足摩擦铆压塑性连接工艺的需求。

**关键词:** 摩擦铆压; 塑性连接; 交流伺服; ANSYS Workbench; 静力学分析; 模态分析

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.022

**中图分类号:** TG439.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0145-07

## Research on structural reliability for AC servo plastic connection equipment used in friction assisted clinching

Zhang Peng<sup>1</sup>, Zhao Shengdun<sup>1</sup>, Zhang Jiaying<sup>1</sup>, Fei Liangyu<sup>1</sup>, Wang Wenwen<sup>1</sup>, Lu Mengkang<sup>2</sup>, Chen Zheng<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. First Institute, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China; 3. Xi'an Wuhua Juneng Blasting Equipment Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In order to improve the connection quality of low-plasticity and lightweight sheet joints, reduce the forming force and avoid causing crack defects during the connection process, the friction assisted clinching (FAC) plastic connection process was proposed, and the AC servo plastic connection equipment was designed. Then, the statics analysis of fuselage for the equipment was conducted by software ANSYS Workbench to check its stiffness and strength, and the vibration response characteristics of the equipment were studied by modal analysis. The results show that the movement of each degree of freedom for the equipment is driven and controlled by a separate AC servo motor, the transmission chain is short and the structure is compact, and the main shaft can provide 120 kN down force. For the fuselage, its maximum deformation amount in the vertical direction is 0.074 mm, and its maximum cumulative deformation amount is 0.16 mm, while its maximum deformation amount in the horizontal direction is 0.011 mm, and its maximum cumulative deformation amount is 0.38 mm, so the strength and stiffness of the fuselage meet the requirements of FAC plastic connection process. Furthermore, the low-order modal frequencies of the fuselage avoid the working frequencies of equipment, motor and reducer, the vibration is stable during the working process of the equipment, and no resonance phenomenon occurs. Finally, the FAC connection test of aluminum alloy sheet was conducted on the equipment. And the back surface of the joint obtained for aluminum alloy sheet by the FAC connection process is smooth and flat which proves the structure and function of the designed AC servo plastic connection equipment can meet the requirements of the FAC plastic connection process.

**Key words:** friction assisted clinching; plastic connection; AC servo; ANSYS Workbench; static analysis; modal analysis

随着航空航天、汽车工业、轨道交通、石油化工

等行业的飞速发展, 轻量化技术成为全球缓解能源危机和环境污染问题的研究焦点<sup>[1]</sup>。塑性变形的压力焊接被认为是铝合金、镁合金、钛合金以及高强钢板等轻量化板材的高效、可靠连接方式<sup>[2]</sup>。对于室温下低塑性轻量化材料, 传统的机械铆接和自冲铆接存在变形开裂、所需成形力大、接头可靠性不高及气密性差等不足<sup>[3-4]</sup>。搅拌摩擦点焊过程中需要对板材进行刚性装夹, 且存在匙孔缺陷和连接质

收稿日期: 2020-12-19; 修订日期: 2021-03-20

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (51675414); 陕西省自然科学基金基础研究计划企业联合基金 (2019JLP-06); 国家重点研发计划“智能农机装备”重点专项 (2017YFD0700200)

**作者简介:** 张 鹏 (1990-), 男, 博士研究生

**E-mail:** czzpzhang@163.com

**通信作者:** 赵升吨 (1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师

**E-mail:** sdzhao@mail.xjtu.edu.cn

量差等问题<sup>[5]</sup>。因此,摩擦辅热、激光辅热以及电阻辅热机械铆接技术得到了国内外众多专家学者的广泛关注。

为了提高低塑性轻量化板材接头的连接质量、降低成形力、避免连接过程中产生裂纹缺陷,韩晓兰等<sup>[6]</sup>提出了一种轻量化板材的激光加热平底无铆连接成形装置及工艺。韩善灵等<sup>[7]</sup>设计并验证了用于镁合金自冲铆接的激光辅热装置的可行性和有效性。Osten J 等<sup>[8-9]</sup>利用激光辅助加热无铆连接技术,获得了 22MnB5 高强钢板无裂纹缺陷的无铆连接接头,但是,过高的热输入量在一定程度上影响了接头连接强度。Zhang Y 等<sup>[10]</sup>提出了电阻铆焊技术并利用改造的电阻点焊机研究了表面氧化层对接头连接质量的影响规律。庄蔚敏等<sup>[11]</sup>对连接点处材料快速局部加热,利用无铆连接技术获得了 22MnB5 高强钢板和 7075 铝合金的热铆连接接头。杜越等<sup>[12]</sup>通过在自冲铆接设备上加装摩擦加热装置实现了镁合金板材的摩擦自冲铆接。经对比分析发现,激光辅热不便于控制热输入量且设备成本高,电阻辅热设备功率大、能耗高,摩擦辅热效率高、经济性好,但是摩擦自冲铆接需要单独配备摩擦装置,半杯型自冲铆钉不能用于摩擦加热,连接效率低,而且目前无专用的摩擦辅热机械铆接设备,这大大限制了摩擦辅热机械铆接技术的发展与推广应用。

因此,本文提出了一种新型摩擦铆压塑性连接

工艺及装置,依靠实心铆钉和压边圈的摩擦加热使待连接点处的材料塑化后进行机械铆压连接,兼顾了固相焊接和机械连接的技术优势。设计了交流伺服塑性连接设备,利用 ANSYS Workbench 软件对设计的交流伺服塑性连接设备的机身进行了静力学分析,校核了机身的刚度与强度,并通过模态分析研究了设备的振动响应特性。最后,在所设计的新型交流伺服塑性连接设备上开展了铝合金板材的摩擦铆压连接试验。

## 1 摩擦铆压连接工艺原理

摩擦铆压连接工艺主要包括定位、摩擦加热、成形和回撤 4 个步骤,具体工艺原理如图 1 所示。首先,依靠冲头将铆钉定位于板材待连接点并施加一定预紧力,冲头与铆钉之间通过带有锥度的内外六方间隙配合,同时,依靠压边圈将板材待连接点周围区域固定夹紧;然后,高速旋转的压边圈和铆钉对待连接点区域的材料进行持续摩擦加热,使材料逐渐达到塑化状态,上、下板材结合面之间形成部分冶金结合;摩擦加热阶段结束后,压边圈和铆钉停止转动,冲头下行,使得塑化的材料向上流动,且在下模具和压边圈型腔的限制作用下,上、下板材之间形成一个镶嵌的机械锁,塑化变形的材料将铆钉包裹镶嵌形成兼顾冶金结合与机械结合的摩擦铆压接头。

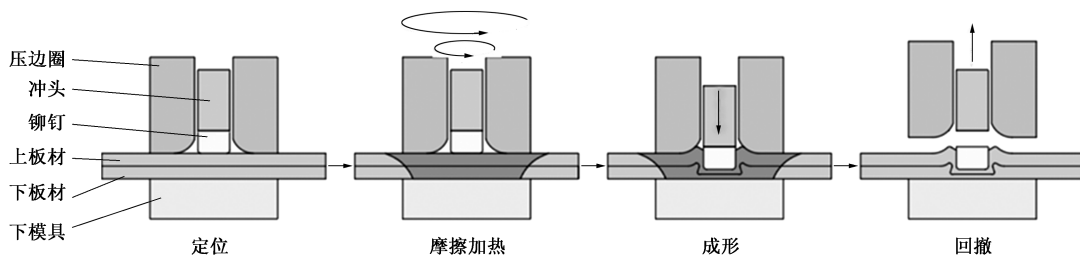


图 1 摩擦铆压工艺原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle for friction assisted clinching process

## 2 交流伺服塑性连接设备设计方案

### 2.1 交流伺服塑性连接设备传动及控制方案

根据摩擦铆压连接工艺需求,交流伺服塑性连接设备需要具备冲头旋转、压边圈旋转、冲头轴向进给和电主轴升降等功能,按照智能锻压设备“分散多动力、伺服电直驱、集成一体化”的设计思想<sup>[13]</sup>,设计的交流伺服塑性连接设备的传动方案如图 2 所示,

冲头旋转依靠交流伺服电机经行星齿轮减速器直接驱动,压边圈依靠中空力矩电机驱动花键轴外侧的中空主轴实现旋转,冲头进给则通过交流伺服电机经蜗轮蜗杆减速器驱动花键轴外侧的中空滚珠丝杠实现,电主轴采用交流伺服电机经行星齿轮减速器驱动滚珠丝杠完成升降。采用多电机驱动可以精准地控制并调整每一个自由度的运动,更好地平衡塑性连接设备传动结构的受力,使设备整体运行高效、节能。采用滚珠丝杠直接传动有效地提高了传动效率,更能

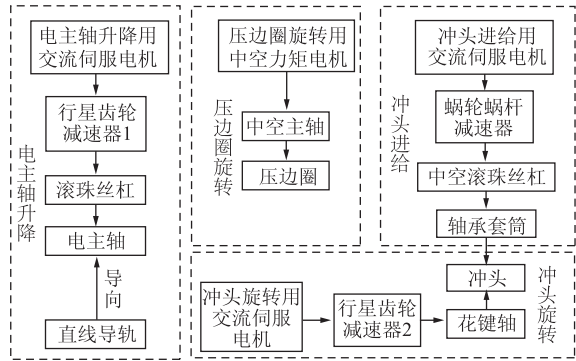


图 2 交流伺服塑性连接设备的传动系统图

Fig. 2 Transmission system diagram of AC servo plastic connection equipment

满足塑性连接设备频繁启停、高效加工的需求。

2.2 交流伺服塑性连接设备结构方案

交流伺服塑性连接设备组成如图 3a 所示，主要由机身、电主轴和传动系统 3 部分组成。其中，机身模块包括 C 型架与底座、夹具底座两部分，用于固定夹具和电主轴传动系统，C 型架结构用于保证摩擦铆压连接工艺的刚度需求。电主轴包括压边圈旋转部件、冲头旋转部件和冲头冲压部件 3 个部分。传动系统包括主轴升降系统、压边圈旋转系统、冲头旋转系统和冲头进给系统，如图 3b 所示。

3 交流伺服塑性连接设备有限元分析

3.1 有限元模型建立

如图 4a 所示，利用 SolidWorks 软件建立交流伺

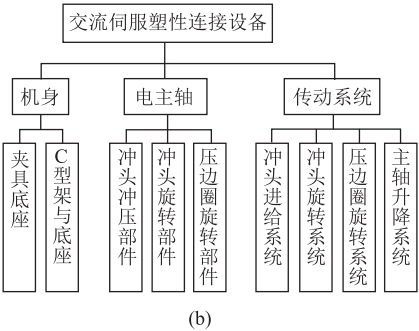
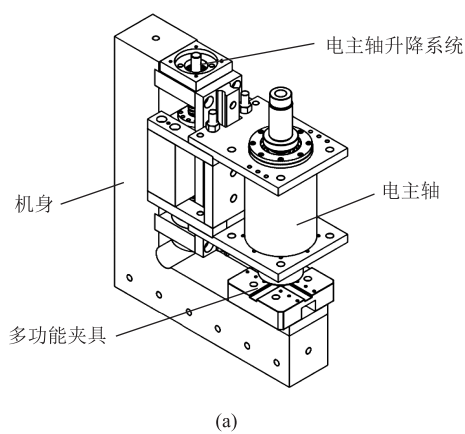


图 3 交流伺服塑性连接设备结构设计方案

(a) 设备关键部件 (b) 系统模块

Fig. 3 Structural design scheme of AC servo plastic connection equipment

(a) Key components of equipment (b) Systematic module

服塑性连接设备关键结构的三维模型，将其导入 ANSYS Workbench 软件进行有限元建模。由于机身零部件较多，为提高计算精度，采用网格差异化处

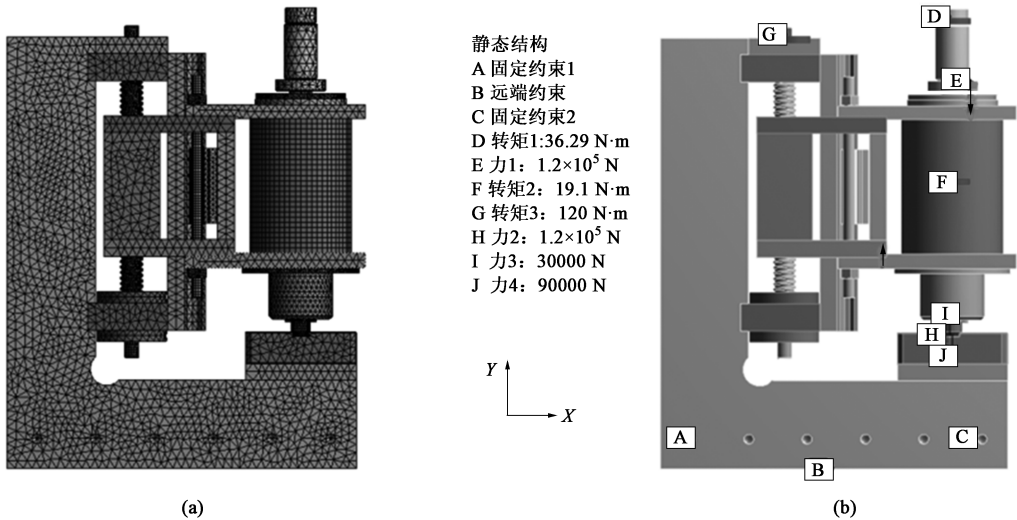


图 4 交流伺服塑性连接设备的有限元模型

(a) 网格划分 (b) 边界条件

Fig. 4 Finite element model of AC servo plastic connection equipment

(a) Grid division (b) Boundary conditions

理, 对各零部件分组进行网格划分。定义 C 型架网格大小为 30 mm、下模具与其他机身部件网格大小为 15 mm、电主轴壳体网格大小为 10 mm、其他复杂结构部件网格大小为 5 mm。最终划分网格节点数量为 368801、网格数量为 205218, 网格质量参数为 0.89, 符合使用要求。

根据摩擦铆压连接工艺需求, 参照陈超等<sup>[14-15]</sup>得出的成形力对铆压连接接头质量的影响机制, 在有限元分析过程中, 将主轴的下压力设定为 120 kN, 压边圈下端添加竖直向上的压力 30 kN, 冲头下端添加竖直向上的压力 90 kN, C 型架下表面添加竖直方向的位移约束, C 型架下螺纹孔设定为固定约束。按照 4 个驱动电机额定工作状态添加载荷: 丝杠输入轴转矩为 120 N·m; 压边圈旋转空心电机转子转矩为 19.1 N·m; 冲头旋转输入轴转矩为

36.29 N·m, 如图 4b 所示。

### 3.2 机身材料属性

考虑到 45 号优质碳素结构钢成本较低且经过热处理后具备较高的强度、韧性等综合性能, 被应用于 C 型架和主轴; 35CrMo 合金结构钢具有很高的静力强度、冲击韧性及较高的疲劳极限, 被应用于丝杠和螺母; H13 热作模具钢在摩擦铆压工作温度范围内综合性能好、热处理变形率低, 被应用于下模具; 为顺利完成摩擦铆压过程, 摩擦接触部分的材料需具备良好的红硬性, 4Cr5MoSiV 热作模具钢在摩擦铆压工作温度范围内具有很好的热疲劳性能和耐磨性, 被应用于冲头和压边圈。

### 3.3 机身的静力学分析

经计算, 得到机身的静力学分析结果如图 5 所示。

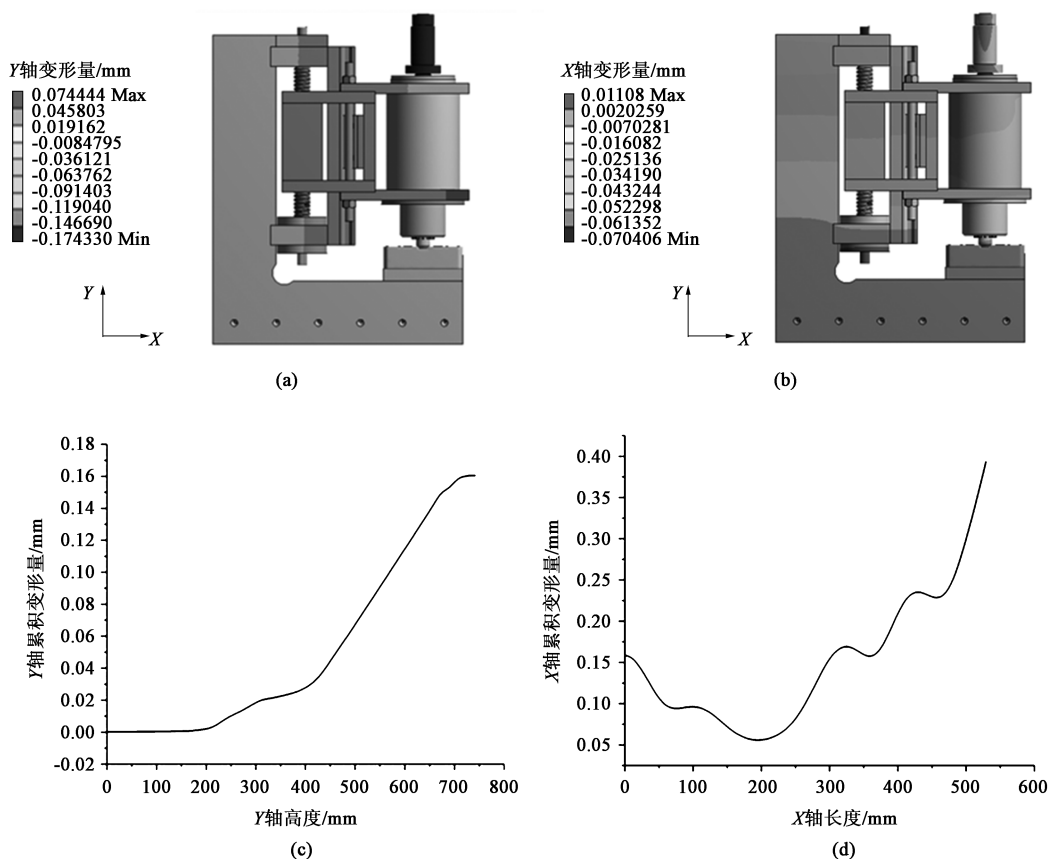


图 5 交流伺服塑性连接设备机身的静力学分析结果

(a) Y 轴变形云图 (b) X 轴变形云图 (c) Y 轴累积变形量曲线 (d) X 轴累积变形量曲线

Fig. 5 Static analysis results of fuselage for AC servo plastic connection equipment

(a) Deformation nephogram in Y-axis

(b) Deformation nephogram in X-axis

(c) Curve of accumulated deformation amount in Y-axis

(d) Curve of accumulated deformation amount in X-axis

图 5a 为机身 Y 轴变形云图, 最大变形量为 0.074 mm, 发生在主轴; 图 5b 为机身 X 轴变形云图, 最大变形量为 0.011 mm。沿主轴轴向建立竖直方向路

径, 沿 C 型架工作面建立水平方向路径。分析机身在 Y 轴与 X 轴的累积变形, 图 5c 为机身 Y 轴累积变形量曲线, 最大累积变形量为 0.16 mm; 图 5d 为机身

$X$  轴累积变形量曲线, 最大累积变形量为 0.38 mm。经测量, 机身变形的有效高度为 830 mm、有效宽度为 630 mm, 计算出机身  $X$  轴挠度为  $1.75\times10^{-5}$  mm、 $Y$  轴挠度为  $8.92\times10^{-5}$  mm, 由于交流伺服塑性连接设备在使用时底座上装有模具, 所以, 实际挠度比

计算挠度小, 而机身刚度符合压力机的设计要求。

### 3.4 机身模态分析

对 C 型架下螺纹孔添加固定约束, 计算结果取前 6 阶模态振型。图 6 为交流伺服塑性连接设备的机身的模态分析结果。

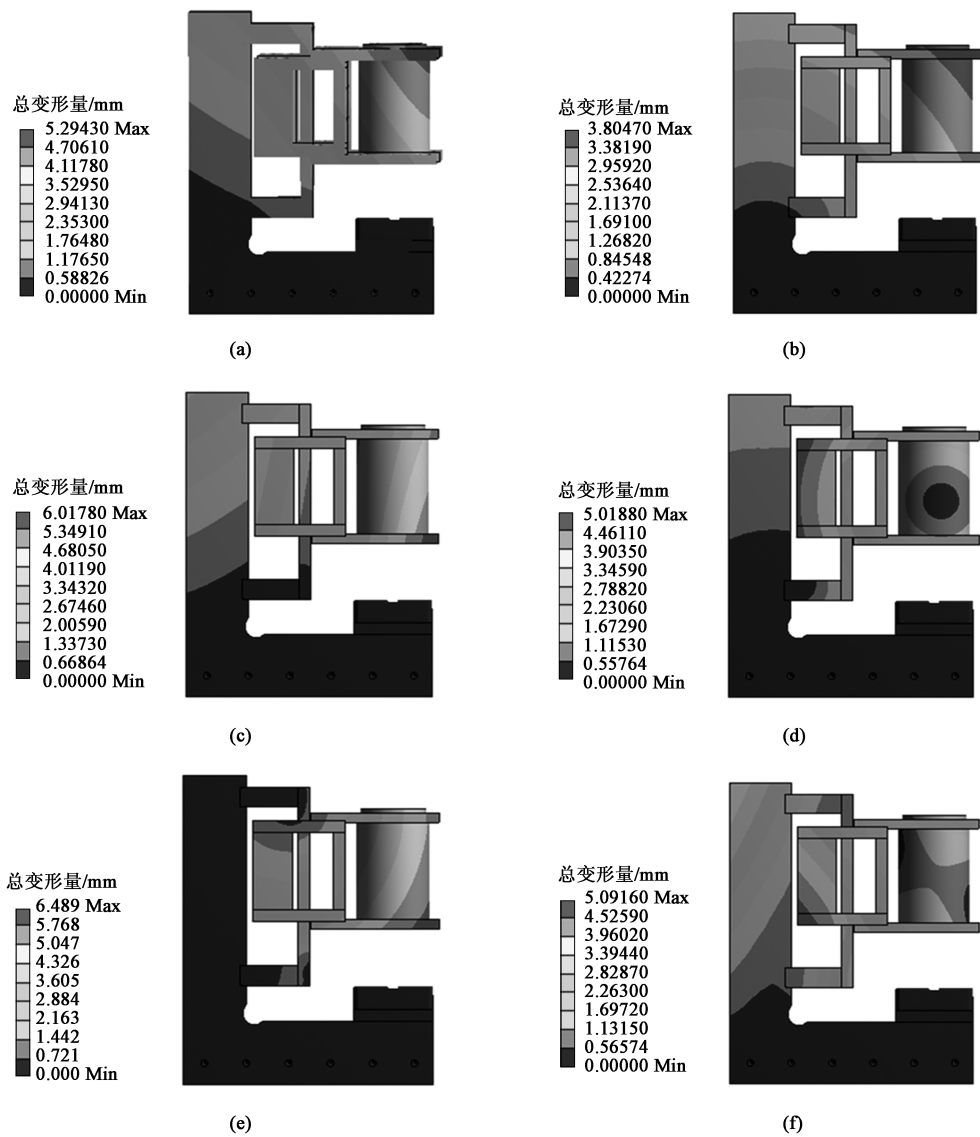


图 6 交流伺服塑性连接设备的机身的模态分析结果

(a) 1 阶模态振型图 (b) 2 阶模态振型图 (c) 3 阶模态振型图 (d) 4 阶模态振型图 (e) 5 阶模态振型图 (f) 6 阶模态振型图

Fig. 6 Modal analysis results of fuselage for AC servo plastic connection equipment

(a) Diagram of the first-order modal shape (b) Diagram of the second-order modal shape (c) Diagram of the third-order modal shape  
(d) Diagram of the fourth-order modal shape (e) Diagram of the fifth-order modal shape (f) Diagram of the sixth-order modal shape

机身振动源中, 电主轴升降用交流伺服电机的额定转速为  $3000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 转动频率为 50 Hz; 行星齿轮减速器 1 输出转速为  $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 转动频率为 5 Hz; 压边圈旋转用中空力矩电机的工作转速为  $800\sim1250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 转动频率为 13.33~20.00 Hz; 冲头旋转用交流伺服电机的额定转速为  $3000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,

转动频率为 50 Hz; 行星齿轮减速器 2 输出转速为  $1000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 转动频率为 16.67 Hz; 冲头进给用交流伺服电机的额定转速为  $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 转动频率为 8.33 Hz; 蜗轮蜗杆减速器输出转速为  $10\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 转动频率为 0.17 Hz。

表 1 为交流伺服塑性连接设备机身前 6 阶模态

频率,通过与机身振动频率对比可知:在塑性连接设备运行时,其 1 阶固有频率显著高于机身的振动源工作频率,1 阶固有频率为 109.03 Hz,该设备在工作中振动稳定,不会发生共振。

表 1 交流伺服塑性连接设备机身的前 6 阶模态频率 (Hz)

Table 1 Modal frequencies for the first six orders of fuselage for AC servo plastic connection equipment (Hz)						
状态	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
频率	109.03	137.48	181.73	296.73	319.44	418.26

4 摩擦铆压塑性连接试验

根据摩擦铆压塑性连接工艺需求,结合交流伺服塑性连接设备结构可靠性数值分析结果,对电主轴、传动系统及机身等关键零部件进行了优化设计及加工,完成了交流伺服塑性连接设备的装配与调试,如图 7 所示。

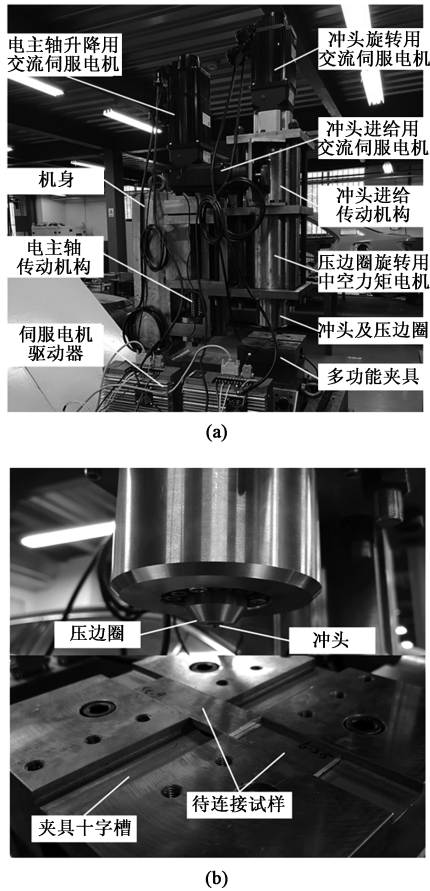


图 7 交流伺服塑性连接设备  
(a) 设备结构组成 (b) 摩擦铆压部件及夹具

Fig. 7 AC servo plastic connection equipment  
(a) Equipment structure (b) Friction assisted clinching parts and fixture

为了验证所设计的交流伺服塑性连接设备的功能性及结构可靠性,选用厚度为 1.5 和 2.5 mm 的铝合金 6061-T6 板材,试样尺寸为 25 mm×100 mm,连接形式为搭接,搭接宽度为 30 mm,进行铝合金板材摩擦铆压连接可行性试验,并将所得接头试样与铆压接头进行对比,如图 8 所示。

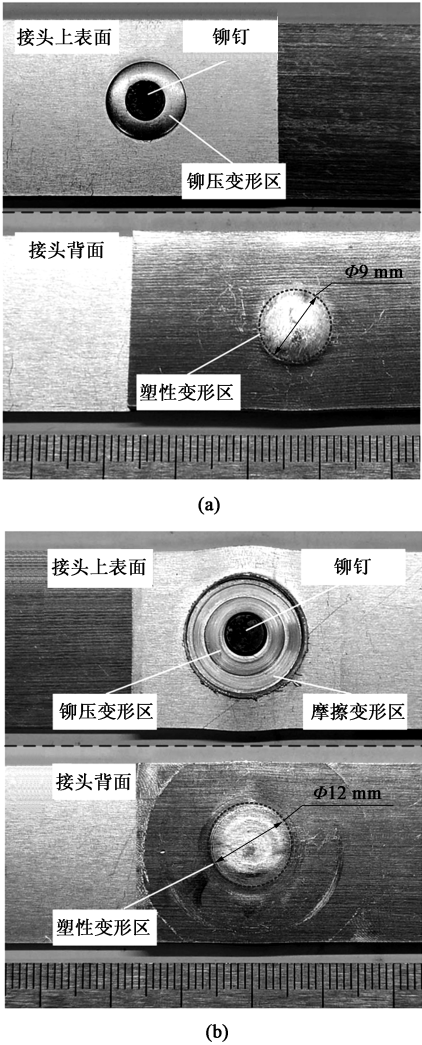


图 8 传统铆压接头 (a) 及摩擦铆压接头 (b) 的试样宏观形貌对比

Fig. 8 Comparison of macromorphologies of samples between traditional clinching joint (a) and friction assisted clinching joint (b)

从图 8a 中可以看出,铝合金板材铆压塑性连接过程中,上板材发生塑性变形,形成与压边圈型腔相近的圆形凸点(铆压变形区),下板材受平底模具的约束,虽发生了一定的塑性变形,但塑性变形区域较小,直径约为  $\phi 9$  mm。从图 8b 则可以观察到,铝合金板材摩擦铆压接头上表面包括摩擦变形区和铆压变形区两个区域,受压边圈的摩擦挤压作用,接头连接区域的材料发生了更为强烈的塑性变

形,接头背面光滑平整,塑性变形区域直径约为 $\Phi 12$  mm。可见,摩擦铆压接头有效连接区域较传统铆压接头的大。因此,传统铆压和摩擦铆压塑性连接机理及接头宏、微观性能对比研究可作为进一步研究重点。综上所述,本文设计的新型交流伺服塑性连接设备的结构设计和功能均满足摩擦铆压塑性连接工艺的需求。

## 5 结论

(1) 新型交流伺服塑性连接设备主要包括机身、电主轴和传动系统3部分,具备冲头旋转、压边圈旋转、冲头轴向进给和电主轴升降等功能,且每个自由度的运动均由单独的交流伺服电机驱动控制,传动链短、结构紧凑,主轴可提供120 kN下压力,满足摩擦铆压塑性连接工艺需求。

(2) 新型交流伺服塑性连接设备机身的Y轴最大变形量为0.074 mm,最大累积变形量为0.16 mm,X轴最大变形量为0.011 mm,最大累积变形量为0.38 mm。机身的X轴挠度为 $1.75 \times 10^{-5}$  mm、Y轴挠度为 $8.92 \times 10^{-5}$  mm,机身的强度与刚度满足摩擦铆压塑性连接工艺需求,且机身的前6阶模态频率均避开了设备、电机和减速器的工作频率,设备工作过程中振动稳定,不会发生共振现象。

(3) 在设计新型交流伺服塑性连接设备上成功获得了铝合金板材的摩擦铆压连接接头,接头上表面包括摩擦变形区和铆压变形区,背面光滑平整。新型交流伺服塑性连接设备的结构设计和功能均满足摩擦铆压塑性连接工艺需求。

### 参考文献:

- [1] 韩晓兰,陈超,刘辰,等. 双层板材平底无铆塑性连接的抗拉强度预测模型[J]. 机械工程学报,2018,54(24):75-82.  
Han X L, Chen C, Liu C, et al. Predictive model of tensile strength in flat clinching [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (24): 75-82.
- [2] Xing B Y, He X C, Wang Y Q, et al. Study of mechanical properties for copper alloy H62 sheets joined by self-piercing riveting and clinching [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216 (1): 28-36.
- [3] 王志勇,韩善灵,卢翔. 汽车车身轻量化材料无铆冲压连接技术的研究进展[J]. 热加工工艺,2019,48(17):5-10,4.  
Wang Z Y, Han S L, Lu X. Research progress of clinching technology for lightweight automobile body materials [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (17): 5-10, 4.
- [4] Peng H, Chen C, Zhang H Y, et al. Recent development of improved clinching process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110 (11-12): 1-31.
- [5] 王希靖,张亚州,张忠科,等. 铝/钢无匙孔搅拌摩擦点焊焊接性分析[J]. 焊接学报,2015,36(1):1-4.  
Wang X J, Zhang Y Z, Zhang Z K, et al. Welding analyses of friction stir spot welding without keyhole between aluminum alloy and zinc-coated steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36 (1): 1-4.
- [6] 韩晓兰,赵升吨,徐凡,等. 一种轻量化板材的激光加热平底无铆连接成形装置及工艺[P]. 中国:CN201710927245.2,2018-02-15.  
Han X L, Zhao S D, Xu F, et al. A laser assisted clinching device and process for lightweight metal sheet [P]. China: CN201710927245.2, 2018-02-15.
- [7] 韩善灵,吴义伟,林超,等. 基于TRIZ理论的镁合金自冲铆接加热装置虚拟设计[J]. 机械科学与技术,2014,33(4):610-613.  
Han S L, Wu Y W, Lin C, et al. The virtual design of self-pierce riveting device for magnesium alloy based on TRIZ [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33 (4): 610-613.
- [8] Osten J, Söllig P, Reich M, et al. Softening of high-strength steel for laser assisted clinching [J]. Advanced Materials Research, 2014, 966-967: 617-627.
- [9] Reich M, Osten J, Milkereit B, et al. Short-time heat treatment of press hardened steel for laser assisted clinching [J]. Materials Science and Technology, 2014, 30 (11): 1287-1296.
- [10] Zhang Y, Shan H, Li Y, et al. Effects of the oxide film on the spot joining of aluminum alloy sheets: A comparative study between resistance spot welding and resistance spot clinching [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92 (9-12): 4231-4240.
- [11] 庄蔚敏,赵文增,解东旋,等. 22MnB5高强度钢/7075铝合金热铆接冷模具淬火无铆钉铆接研究[J]. 机械工程学报,2017,53(20):106-112.  
Zhuang W M, Zhao W Z, Xie D X, et al. Research on hot riveting quenching clinching of the high strength steel 22MnB5 and aluminum alloy 7075 [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (20): 106-112.
- [12] 杜越,王明星,刘忠侠,等. 摩擦加热AZ31镁合金板材的自冲铆接[J]. 热加工工艺,2011,40(15):152-156.  
Du Y, Wang M X, Liu Z X, et al. Self-piercing riveting of friction-heated AZ31 alloy sheet [J]. Hot Working Technology, 2011, 40 (15): 152-156.
- [13] 赵升吨,贾先. 智能制造及其核心信息设备的研究进展及趋势[J]. 机械科学与技术,2017,36(1):1-16.  
Zhao S D, Jia X. Research progress and development trend of intelligent manufacturing and its core information equipment [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36 (1): 1-16.
- [14] Chen C, Zhao S D, Han X L, et al. Investigation of flat clinching process combined with material forming technology for aluminum alloy [J]. Materials, 2017, 10 (12): 1433.
- [15] Chen C, Zhao S D, Cui M C, et al. An experimental study on the compressing process for joining Al6061 sheets [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 108: 56-63.