

装备与成套技术

## 铆接设备 C 型框架设计及优化分析

朱建雄<sup>1,2</sup>, 叶选林<sup>1</sup>, 张昊晗<sup>1</sup>, 刘纪元<sup>3</sup>, 徐 凡<sup>2</sup>, Imtiaz Ali Soomro<sup>4</sup>, 赵 伦<sup>3</sup>

(1. 云南开放大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 辽宁科技大学 机械与自动化学院, 辽宁 鞍山 114011;

3. 深圳职业技术大学 未来技术学院, 广东 深圳 518055; 4. 梅赫兰工程技术大学 冶金与材料工程系, 信德 贾姆绍罗 76062)

**摘要:** 为提高铆接设备 C 型框架的承载能力与动态稳定性, 基于形状优化理论与有限元方法, 对其结构进行优化设计。根据铆接工艺需求, 建立了 C 型框架的有限元模型, 设定最大工作载荷为 70 kN, 适用于板材组合厚度为 1.5~6.0 mm 的铆接场景。通过静力学分析发现, 原始框架在极限载荷下应力分布均匀, 但局部区域强度不足, 最大变形位移达 1.985 mm; 模态分析表明, 模型 a 的 1 阶与 2 阶固有频率分别为 132.26 和 133.57 Hz, 存在共振风险。针对上述问题, 提出以提升刚度、抑制变形为目标的综合优化策略, 融合拓扑优化与参数化水平集方法, 重构材料分布并调整框架几何形态。优化后, C 型框架安全系数提升至 1.74, 最大变形位移降至 0.605 mm, 基频提高至 222.12 Hz, 有效地规避了共振并改善了动态响应。结果表明, 优化设计在轻量化约束下显著提升了框架的力学性能与稳定性, 为铆接设备的高效设计与工程应用提供了理论支撑。

**关键词:** 铆接设备; C 型框架; 形状优化; 静力学分析; 模态分析

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.06.018

**中图分类号:** TH131.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2025) 06-0144-09

## Design and optimization analysis on C-type frame for riveting equipment

Zhu Jianxiong<sup>1,2</sup>, Ye Xuanlin<sup>1</sup>, Zhang Haohan<sup>1</sup>, Liu Jiyuan<sup>3</sup>, Xu Fan<sup>2</sup>, Imtiaz Ali Soomro<sup>4</sup>, Zhao Lun<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Open University, Kunming 650500, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114011, China;

3. Tech X Academy, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China;

4. Department of Metallurgy and Materials Engineering, Mehran University of Engineering and Technology, Jamshoro 76062, Pakistan)

**Abstract:** In order to improve the load-bearing capacity and dynamic stability of C-type frame for riveting equipment, its structure was optimized based on the shape optimization theory and finite element method. According to the riveting process requirements, the finite element model of C-type frame was established, and the maximum working load was set to be 70 kN, which was suitable for riveting scenarios where the combined thickness of plates ranged from 1.5 mm to 6.0 mm. Then, through the static analysis, it was found that the stress distribution of the original frame was uniform under the limit load, but the strength of the local area was insufficient, and the maximum deformation displacement reached 1.985 mm. The modal analysis shows that the 1st-order and 2nd-order natural frequencies of model a were 132.26 and 133.57 Hz, respectively, and there was a risk of resonance. Furthermore, aiming at the above problems, a comprehensive optimization strategy with the objectives of improving the stiffness and suppressing the deformation was proposed, which integrated topology optimization and parametrized level set method, reconstructed the material distribution and adjusted the frame geometry state. After the optimization, the safety coefficient of C-type frame was increased to 1.74, the maximum deformation displacement was reduced to 0.605 mm, and the fundamental frequency was increased to 222.12 Hz, which effectively avoided resonance and improved the dynamic response. The results show that the optimized design significantly improves the mechanical properties and stability of the frame under the constraint of lightweight, which provides theoretical support for the efficient design and engineering application of riveting equipment.

**Key words:** riveting equipment; C-type frame; shape optimization; static analysis; modal analysis

随着现代工业的快速发展, 铆接技术作为一种

重要的连接工艺, 在航空、汽车、机械制造等领域的应用日益广泛<sup>[1]</sup>。铆接设备作为实现铆接工艺的关键装备, 其性能与精度直接影响着铆接质量及生产效率。C 型框架作为铆接设备的重要组成部分, 其设计合理性及优化程度对于整个设备的稳定性、精度和寿命具有至关重要的影响<sup>[2-3]</sup>。

铆接作为一种常见的连接工艺, 根据不同的工艺特点和应用场景, 具有多种分类。传统上, 铆接可根据连接方式与材料特性进行分类。其中, 基于

收稿日期: 2024-11-11; 修订日期: 2025-02-15

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (12104324); 高层次人才科研启动项目 (6022310046k); 深职大-新栋力超声波焊接技术研发中心项目 (602331009PQ); 深圳职业技术大学博士后出站后期资助项目 (4103-6023271014K1); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2023J2093)

**作者简介:** 朱建雄 (1998-), 男, 硕士研究生

**E-mail:** zhujx102@163.com

**通信作者:** 赵 伦 (1988-), 男, 博士, 副研究员

**E-mail:** zhaolun\_ultrasonic@126.com

金属塑性变形或熔融状态的连接工艺(如自冲铆接、无铆连接及焊接等<sup>[4-6]</sup>)是通过金属形变或熔化实现材料接合,适用于纯金属或复合材料的连接需求。还有的铆接方式是通过一些非金属辅助材料来形成连接,如胶粘剂铆接和夹持铆接等<sup>[5,7-8]</sup>。而在利用金属变形的铆接中,铆接设备是至关重要的工具,铆接设备的类型和性能直接影响铆接接头质量和成形效率。常见的铆接设备包括气动铆枪、液压铆枪、手动铆钳等,这些设备在不同的应用场景中具有各自的优势和特点,可以满足不同工件材料、尺寸和形状的铆接需求<sup>[2]</sup>。C 型框架为其中一种,是常见的铆接设备结构,其设计考虑了结构强度、稳定性和操作便捷性等因素。然而,传统的 C 型框架结构存在一些问题,如结构刚度不足、质量过大、振动响应不佳等,限制了设备的性能和工作效率。优化设计 C 型框架可以提高铆接设备的性能和使用寿命,同时也可以提高铆接质量和生产效率<sup>[9-10]</sup>。

当前,国内外对于铆接技术的研究大多集中在铆接工艺参数优化、新材料铆钉的开发等方面,而对于铆接设备本身,特别是其关键部件 C 型框架的设计及优化研究相对较少<sup>[11-12]</sup>。张永超等<sup>[13]</sup>设计了一种固定式多工位大喉深自冲铆接机 C 型框架装置,并申请了专利,但是由于多零件连接导致其稳定性降低。李永哲等<sup>[14]</sup>基于多机协同式增材制造(Multi-machine Collaborative Additive Manufacturing, MCAM)技术,对一体式轻量化大型金属构件的成形过程开展研究,结果表明,多机器人协同作业可显著提升制造效率与成形精度。通过多机器人协同控制,可精准实现复杂拓扑优化后的框架形态,同时降低加工残余应力,改善局部强度不足问题,从而在轻量化约束下提升框架刚度与动态稳定性。Großmann A 等<sup>[15]</sup>以激光熔覆工艺为研究对象,基于体积与质量变化对多种 C 型框架开展拓扑优化设计,构建了面向工程应用的系统性优化方法。目前市场上的 C 型框架铆接设备,如 ECKOLD 公司生产的 MZD 60/6C 型,采用模块化设计,最大铆接力为 60 kN,适用于高强度材料和多层板材连接,铆接速度最大可达  $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,定位精度达  $\pm 0.05 \text{ mm}$ ,喉深范围为 300~500 mm,广泛应用于汽车、航空等工业领域<sup>[16]</sup>。因此,开展铆接设备 C 型框架的结构设计及优化研究,不仅有助于提升铆接设备的整体性能,还能为相关领域的设备研发及改进提供有益的理论支持和实践指导。

本文旨在对铆接设备 C 型框架进行设计和优化分析,探讨其结构设计原理和优化方法,为提高铆接设备的性能和工艺水平提供参考和指导。通过对 C 型框架进行优化设计,可以实现铆接设备结构的合理化设计,提高其稳定性和可靠性,从而满足工程应用的需求。

## 1 C 型框架优化介绍

C 型框架作为铆接设备的核心支撑结构,其设计的合理性和可靠性直接关系到设备的整体性能和稳定性。因此,本设计将严格遵循设计要求,通过有限元分析等技术手段,确保设计方案的可行性和优化性。大量实验证明,在铆接成形中板材塑性变形所承受的力传递至铆接设备上,见图 1,针对铆接设备的承力机构设计,需重点确保成形接头具备优良的表面质量和尺寸精度,同时通过结构优化设计有效缓解多次成形累积损伤对设备寿命的影响。在实现设备轻量化设计的同时,应合理选择材料和制造工艺,降低制造成本,从而达成延长设备服役周期与提升经济效益的双重目标。

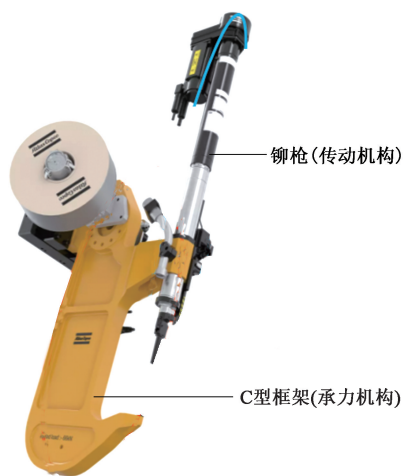


图 1 铆接设备

Fig. 1 Riveting equipment

实验中发现,承力机构 C 型框架在工作中发生位移偏差是无法避免的,如何在保证轻量化的前提下保证其强度并使位移挠度减小,成为现在设备结构优化的难题。为兼顾框架结构性能提升与成本优化,将常规的 35 钢换为 45 钢,并通过准静态拉伸实验实测了 45 钢拉伸力学性能,拉伸样件及工程应力-工程应变曲线如图 2 所示,实测得到 45 钢的力学参数见表 1。

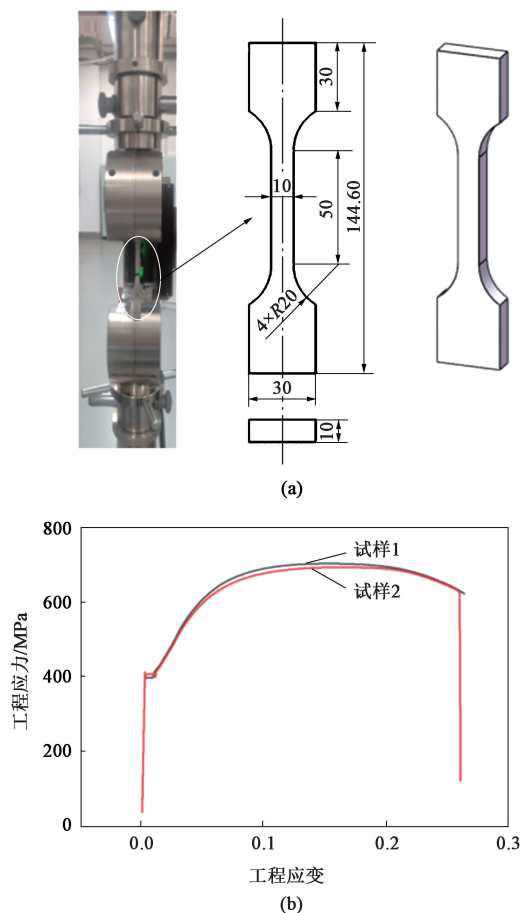


图2 拉伸样件 (a) 和工程应力-工程应变曲线 (b)  
Fig. 2 Tensile sample (a) and engineering stress-engineering strain curves (b)

表 1 45 钢力学参数

Table 1 Mechanical parameters of 45 steel

参数	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	杨氏模量/ GPa	泊松比	伸长率/ %
数值	410	701	205	0.3	25

### 1.1 C 型框架建模分析流程

C 型框架结构的优化设计是一个多步骤的过程, 涉及建模、静力学分析、模态分析、拓扑优化及结构重构等多个环节。通过圣维南原理简化 C 型框架的结构模型, 并将该模型纳入有限元分析的框架中进行进一步的分析。简化的 C 型框架模型考虑了实际应用中可能遇到的各种细节, 如螺纹孔、倒角等特征, 这些特征对结构的稳定性和力学性能具有重要影响<sup>[17]</sup>。将简化后的 C 型框架模型导入有限元分析软件并划分网格, 赋予实验所得的材料数据, 包括加载方式、边界条件约束等, 计算并分析 C 型框架在静力学分析下的应力及挠度变化。再在此边界条件下进行模态分析, 以体积与应变比为优

化目标函数定义设计区域, 进行拓扑优化并再次分析其变化。利用优化结果对模型进行重构建模, 并查看优化结果, 与原有 C 型框架进行对比分析。查看得到的优化结果是否符合应力安全系数  $\xi = 1.5 \sim 2.5$  ( $\xi = \text{极限应力} / \text{许用应力} \geq 1$ )、应变挠度  $\leq 1 \text{ mm}$ , 在满足载荷及约束条件下, 目标函数优化下是否达到最优解。若不满足, 则再次进行拓扑优化并重构, 重复上述有限元分析。初始模型及优化流程见图 3。

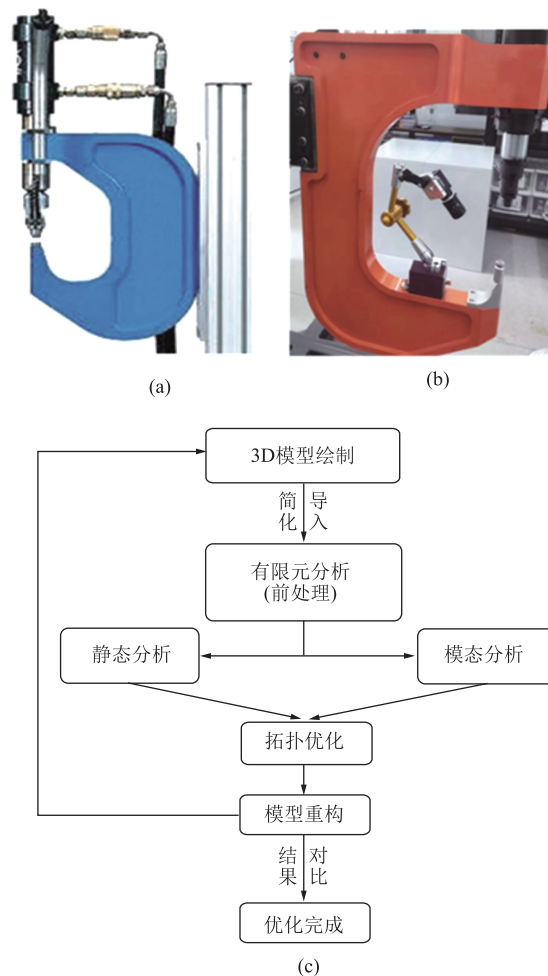


图3 初始模型及优化流程

(a) 模型 a (b) 模型 b (c) 优化流程

Fig. 3 Initial models and optimization flow

(a) Model a (b) Model b (c) Optimization flow

常规无铆连接与自冲铆连接的典型载荷范围为 10~50 kN, 基于此, 本研究选用 70 kN 作为最大工作载荷以确保安全冗余。通过建立的优化流程图 (图 3), 可系统呈现 C 型框架设计与优化的全流程: 从初始建模、静力学与模态有限元分析, 到基于结构固有特性 (如频率与振型) 的拓扑优化设计。通过分析动力学属性对框架受力过程的影响 (如低阶模态共振



风险与应力集中区域), 最终实现框架结构的优化重构, 显著提升刚度与稳定性, 同时满足轻量化需求。

## 1.2 有限元建模分析

基于铆接设备的工艺要求, 本研究设定最大工作载荷为 70 kN, 适用于板材组合厚度为 1.5 ~ 6.0 mm 的加工范围。该参数设计能够覆盖薄板 (厚度  $\leq 3.0$  mm) 至中厚板 (厚度为 3.0 ~ 6.0 mm) 的典型加工需求, 满足通用工业场景下铆接设备对结构强度与成形精度的综合要求。将通过三维软件绘制的 C 型框架模型导入有限元分析软件并进行前处理, 模型工况加载方式及主要结构参数如图 4 所

示。通用 C 型框架模型由上通孔铆枪安装位、下底座安装位、机体控制位 (Fix) 和基体组成, 主要优化基体部分, 其余部位固定约束或施加载荷。C 型框架设计基本原则如下。

(1) 强度原则。确保 C 型框架在承受最大工作载荷时, 不发生破坏或塑性变形。

(2) 刚度原则。保证 C 型框架在受到外力作用时, 其变形量在允许范围内, 确保铆接精度和稳定性。

(3) 稳定性原则。防止 C 型框架在受到侧向力或倾覆力矩时发生失稳。

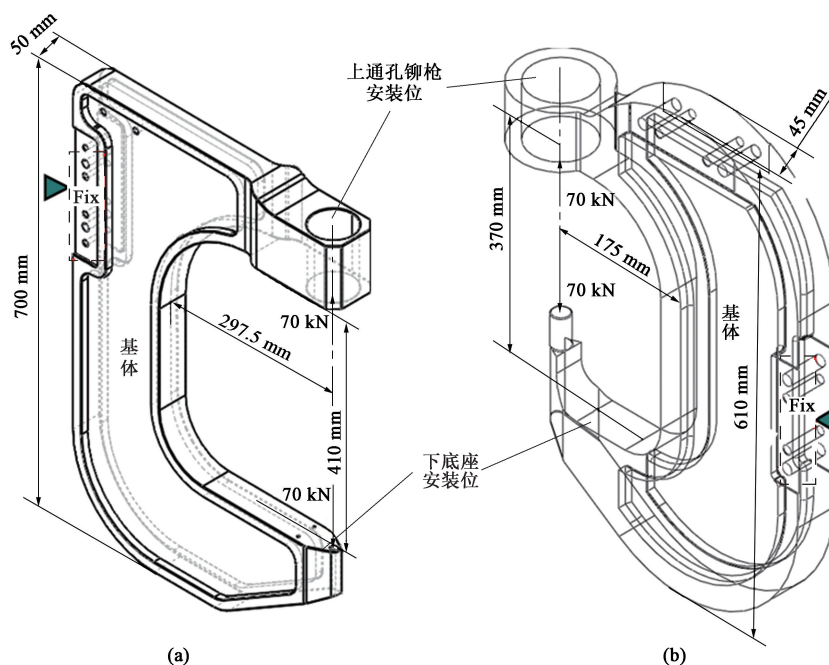


图4 模型工况加载方式及主要结构参数

(a) 模型 a (b) 模型 b

Fig. 4 Model working condition loading mode and main structural parameters

(a) Model a (b) Model b

## 2 静态与模态分析

### 2.1 静态分析

静态分析在工程设计和结构分析中具有广泛的应用, 是设计工程结构的基础和前提。通过静态分析, 可以评估结构在静态载荷下的受力情况, 为结构的安全性、稳定性和可靠性提供重要的参考依据。

根据模型工况加载方式对 C 型框架进行前处理, 静态仿真结果见图 5, 在整个基体部分受到的应力和位移均为最小, 可以对此进行合适的拓扑优

化。由图 5 可以看出, 在原模型下, 模型 a 和模型 b 均未达到安全系数以内, 而且模型 b 的底座位置位移高达 1.985 mm, 所以结构强度和稳定性需要进一步提升以满足工程应用的要求。

### 2.2 模态分析

模态分析是用来研究结构振动特性的一种方法, 通常使用有限元方法进行计算。在有限元模态分析中, 求解结构的振动特征值 (自然频率) 和振型 (模态形态) 为主要任务。模态分析的数学表达如式 (1) 所示。

$$K\varphi = \omega^2 M\varphi \quad (1)$$

式中:  $K$  为结构刚度矩阵, 描述了结构的刚度特性;



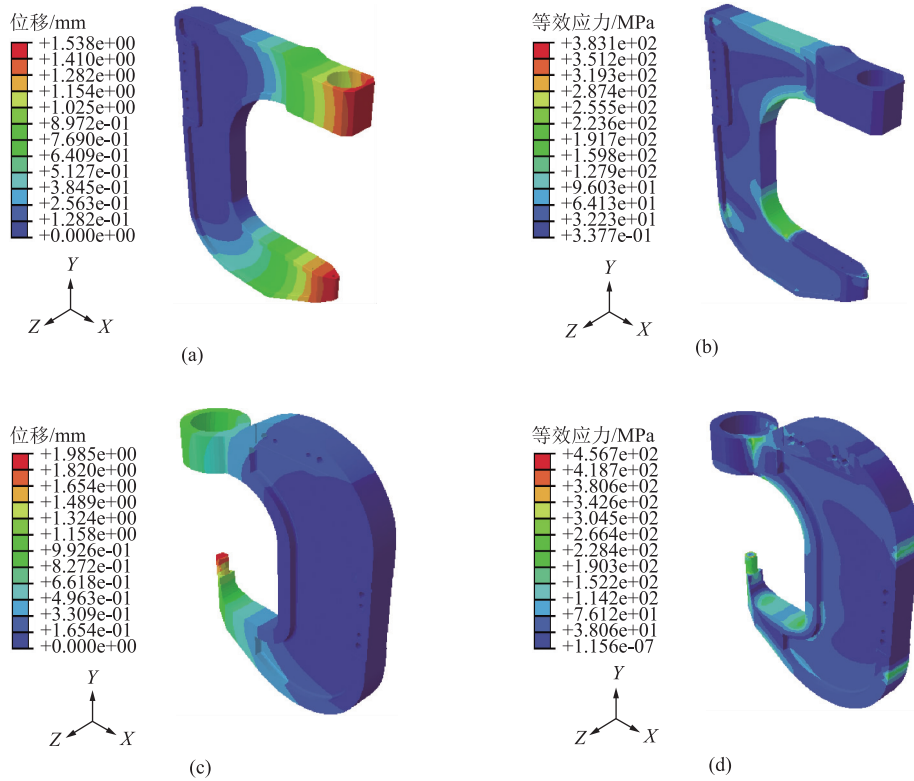


图 5 原模型下 C 型框架的位移、等效应力云图

(a) 模型 a, 位移 (b) 模型 a, 等效应力 (c) 模型 b, 位移 (d) 模型 b, 等效应力

Fig. 5 Cloud diagrams of displacement and equivalent stress for C-type frame under original model

(a) Model a, displacement (b) Model a, equivalent stress (c) Model b, displacement (d) Model b, equivalent stress

$M$  为结构的质量矩阵, 描述了结构的质量特性;  $\varphi$  为特征向量, 表示模态形态 (振型);  $\omega$  为振动的角频率, 与自然频率相关。

图 6 为 C 型框架的模态分析结果。研究表明, 该铆接设备框架存在多阶固有模态, 需针对不同阶次振型特征 (如节点位移分布与能量集中区域) 及其对应固有频率进行针对性优化, 以抑制动态失稳风险并提升服役性能。具体而言, 模型 a 的 1 阶与 2 阶固有频率分别为 132.26 和 133.57 Hz, 频差仅为 1.31 Hz, 易引发密集模态耦合效应, 导致结构在宽频激励下发生共振疲劳损伤; 模型 b 的 4 阶固有频率分布于 192.84、242.71、731.25 和 785.21 Hz, 虽可规避典型工作频段 (<200 Hz) 的共振风险, 但其高阶模态 (3 阶及以上) 应变能密度显著升高, 局部应力集中现象加剧。进一步结合刚度计算公式 (式 (2)) 对各模型进行量化分析, 发现模型 b 的等效刚度系数较模型 a 降低 22.5%, 表明其抗变形能力需通过结构优化予以强化。

$$k' = P/\varepsilon \quad (2)$$

式中:  $k'$  为等效刚度系数;  $P$  为作用于结构的恒力;

$\varepsilon$  为由力产生的形变。

### 3 拓扑优化

拓扑优化是一种通过调整结构形状和材料分布, 在满足边界条件和约束的前提下实现设计目标的方法, 参数化水平集方法是其中常用的一种技术<sup>[18]</sup>, 它通过计算水平集函数来精确和稳定地确定物体的边界曲线, 这些曲线在拓扑优化过程中不断演化和迭代, 以达到最佳的结构性能。其表达式如下:

$$\psi(x, t) \begin{cases} > 0, x \in W \\ = 0, x \in W' \\ < 0, x \notin W \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\psi$  为水平集函数, 其控制着物体边界的演化;  $t$  为时间;  $x$  为水平集函数自变量, 表示设计区域的空间坐标;  $W$  为实体设计区域;  $W'$  为设计区域边界, 目标是在最大体积分数  $V_{\max}$  的约束下优化实体设计区域  $W$  的结构。在此优化过程中, 数学模型可以表达为:

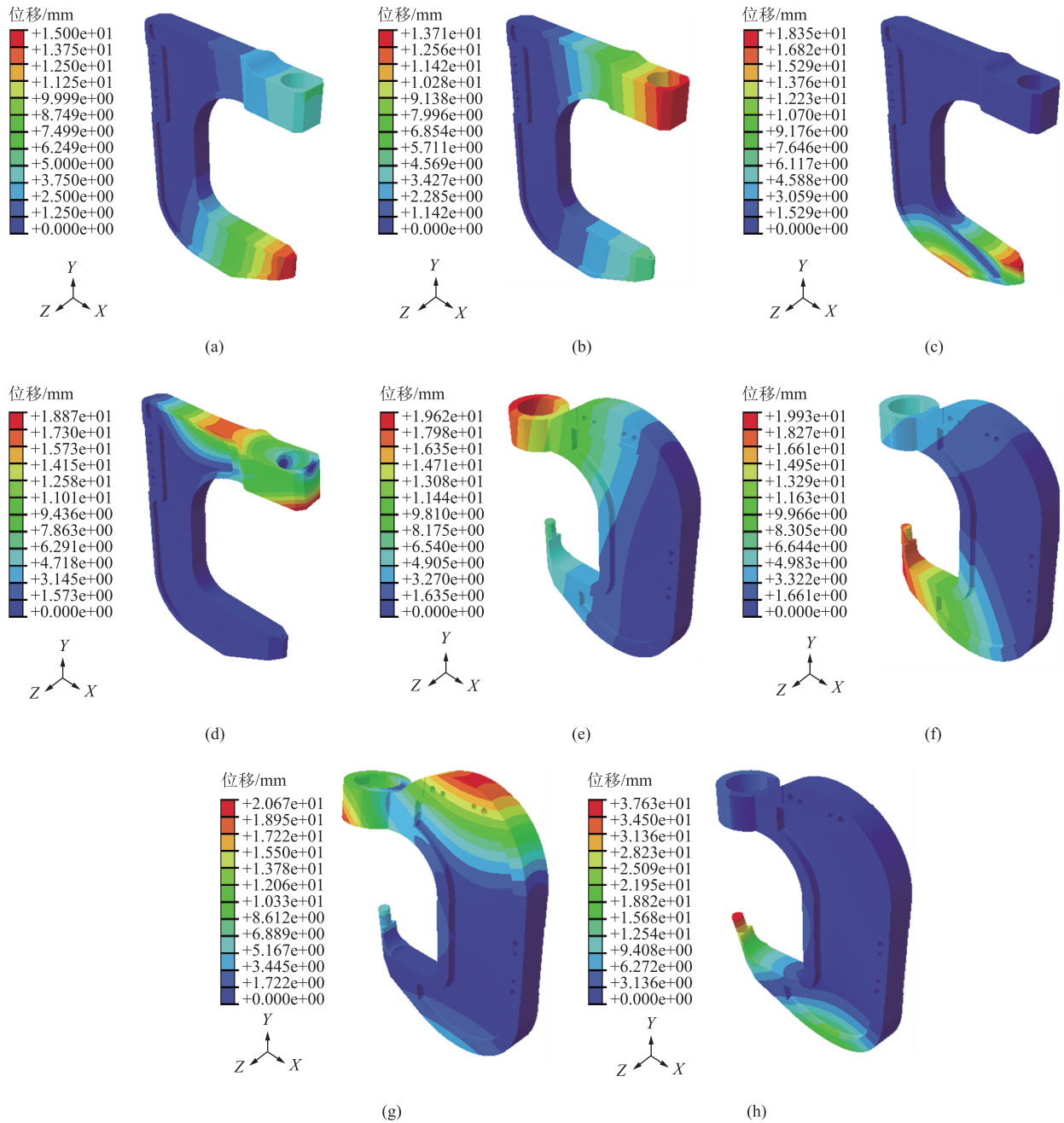


图6 C型框架模态分析结果

(a) 模型 a, 1 阶 (b) 模型 a, 2 阶 (c) 模型 a, 3 阶 (d) 模型 a, 4 阶 (e) 模型 b, 1 阶  
(f) 模型 b, 2 阶 (g) 模型 b, 3 阶 (h) 模型 b, 4 阶

Fig. 6 Modal analysis results of C-type frame

(a) Model a, the first order (b) Model a, the second order (c) Model a, the third order (d) Model a, the fourth order  
(e) Model b, the first order (f) Model b, the second order (g) Model b, the third order (h) Model b, the fourth order

$$\begin{cases} \text{Find: } x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in W \\ \text{Min: } J(x) = \{H^T\} [f(E)] \{H\} \\ \text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^n V_{ix} \leq \frac{V_{\max}}{V_0} \\ L(x) \leq J(x) + \alpha(V_{ix} - V_{\max}) + \frac{1}{2\beta}(V_{ix} - V_{\max})^2 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $J(x)$  为目标函数(柔度), 与应变能密度相关;  $f(E)$  为等效弹性模量  $E$  的矩阵;  $H$  为结构位移矩阵;  $x_i$  为第  $i$  个空间点坐标;  $V_{ix}$  为第  $i$  个空间点坐标的体积分,  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $n$  为空间点数量;  $V_0$  为初始体积分;  $L(x)$  为拉格朗日函数;  $\alpha$ 、 $\beta$  为常数。

以上述有限元分析结果对模型 a 和模型 b 拓扑结构优化,通过调整结构参数、形状和拓扑结构可以实现结构的稳定性和性能优化,确定 C 型框架的最佳材料分布方式,保证其稳定性

和刚度,分析其应力、应变是否达到目标要求。通过 3D 建模软件对原模型进行重构迭代,得到的最终 C 型框架优化模型(模型 c)如图 7 所示。

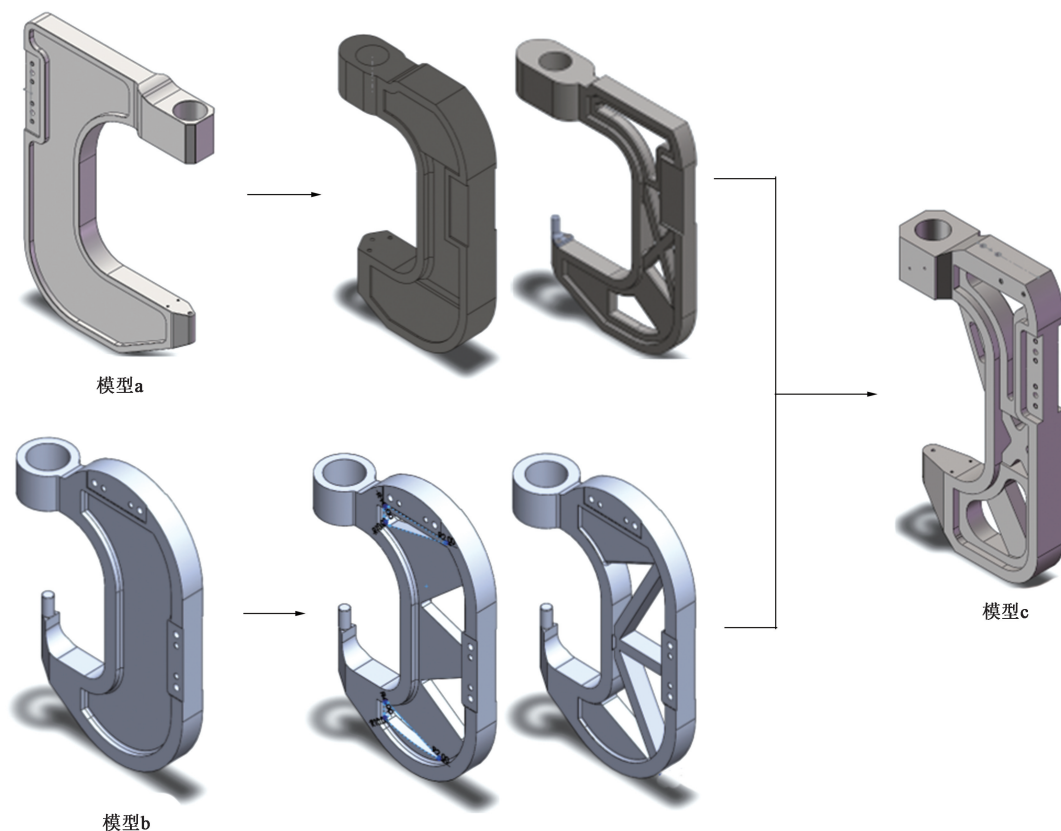


图 7 迭代重构优化模型

Fig. 7 Iterative reconfiguration optimization model

## 4 结果对比

通过采用上述的设计方法和技术手段,设计出了满足使用要求的 C 型框架,为自冲铆接设备的整体性能提供了有力保障。对 C 型框架原始模型进行结构优化后,进行仿真验证并加工,加工实物如图 8 所示,仿真结果如图 9 所示,数据对比如表 2 所示,其中,  $\sigma_{\max}$  为最大应力,  $\varepsilon_{\max}$  为最大应变。可以看出,优化前后从振型(模态形态)、安全系数、最大变形挠度和刚度均有不同程度的提升。由表 2 可以得到,优化后的 C 型框架模型 c 安全系数为 1.74,刚度较未优化模型(模型 a 和模型 b)有所提升且在合理范围内,结果表明优化后的 C 型框架在轻量化约束下实现了强度、刚度与动态稳定性的协同提升,满足铆接设备高精度、高可靠性的工程应用需求。



图 8 加工实物

Fig. 8 Processing object



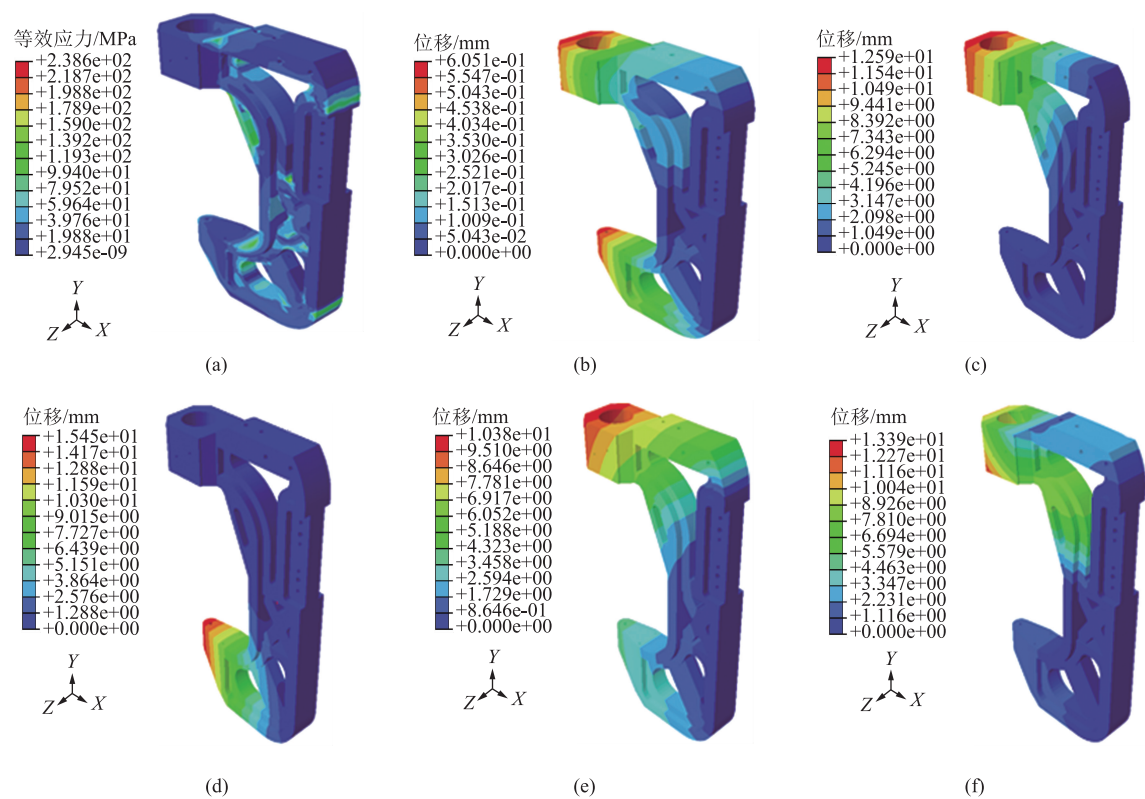


图 9 优化模型仿真结果

(a) 等效应力 (b) 位移 (c) 1 阶模态 (d) 2 阶模态 (e) 3 阶模态 (f) 4 阶模态

Fig. 9 Simulation results of optimal model

(a) Equivalent stress (b) Displacement (c) The first order modal (d) The second order modal (e) The third order modal (f) The fourth order modal

表 2 不同模型性能参数

Table 2 Performance parameters of different models

模型	质量评估/kg	静态分析		模态分析/Hz				刚度分析/( $\times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ )
		$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{\max}/\text{mm}$	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	
a	53.00	383.1	1.538	132.26	133.57	486.02	710.52	4.56
b	37.43	456.7	1.985	192.84	242.71	731.25	785.21	3.53
c	56.33	238.6	0.605	222.12	300.98	917.86	1081.6	1.17

5 结论和展望

(1) C 型框架在受力情况下表现出良好的稳定性和刚度，设计满足了工程要求。但仍有进一步优化的空间，可以提高其性能和使用寿命。

(2) 优化后的模型的 1 阶固有频率由原模型的 132.26 Hz 提升至 222.12 Hz，增幅为 67.9%，远高于设备工作频率，有效地规避了共振风险。

(3) 通过调整结构的拓扑结构可以实现结构的稳定性和性能优化，为铆接设备的设计和制造提供了新的思路和方法，并加工出了优化后的 C 型框

架，且应用于实践生产中。

(4) 在未来的研究中，可以进一步深入探讨铆接设备 C 型框架结构参数的设计和优化问题，探索新的方法和技术在不同加载力下的稳定性及设备轻量化需求，并在后续工艺中添加实验验证，为铆接设备的发展和应用提供更好的支持。

参考文献：

[1] Sartisson V, Meschut G. Self-locking self-pierce riveting: A new self-pierce riveting technology for multi-material applications in lightweight car body structures [J]. Welding in the World, 2017, 61 (5): 1049–1056.

[2] 王佳栋. 铆接设备 C 型框架优化设计方法研究 [D]. 上海：

- 上海交通大学, 2020.
- Wang J D. Design Optimization of C-frame of Riveting Equipment [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [3] 崔俊佳, 张军, 芮茹茹, 等. 基于深度学习的自冲铆接偏柳缺陷检测算法研究 [J]. 航空制造技术, 2023, 66 (6): 22-30.
- Cui J J, Zhang J, Xiao R R, et al. Research on detection algorithm of partial riveting defects in self-piercing riveting based on deep learning [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66 (6): 22-30.
- [4] Xie C, Wang D F, Kong D W, et al. Material-structure-process-performance integrated optimization method of steel/aluminum self-piercing riveted joint [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132 (3-4): 2045-2059.
- [5] Ma Y W, Akita R, Abe Y, et al. Mechanical performance evaluation of multi-point clinch-adhesive joints of aluminum alloy A5052-H34 and high-strength steel JSC780 [J]. Automotive Innovation, 2023, 6 (3): 340-351.
- [6] 邢建国. 焊接设备自动化及其对提高生产效率的影响研究 [J]. 中国设备工程, 2024 (8): 109-111.
- Xing J G. Research on the automation of welding equipment and its impact on improving productivity [J]. China Plant Engineering, 2024 (8): 109-111.
- [7] 杨贵秋, 邢保英, 曾凯, 等. 钢/铝压印-胶接复合接头腐蚀环境下的静力学性能研究 [J]. 工程设计学报, 2024, 31 (5): 663-669.
- Yang G Q, Xing B Y, Zeng K, et al. Study on statics properties of steel/aluminum clinch-bonded composite joint under corrosive environment [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2024, 31 (5): 663-669.
- [8] 唐臣升, 孙朝海, 孙进, 等. 铝合金导管扩口柔性夹持工装技术 [J]. 工具技术, 2023, 57 (10): 118-122.
- Tang C S, Sun C H, Sun J, et al. Process equipment for flexibly hoding in flaring aluminum-alloy pipe [J]. Tool Engineering, 2023, 57 (10): 118-122.
- [9] 李阳. 预制 ULICC 板加固既有 RC 型框架结构抗震性能有限元分析 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
- Li Y. Finite Element Analysis on Seismic Performance of Precast Ulice Plates Retrofitted Existing RC Frame Structure [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023.
- [10] 徐利利, 汪彬, 施卓奇, 等. 自冲铆接设备 C 型架的轻量化设计研究 [J]. 机械工程与自动化, 2019 (3): 66-68.
- Xu L L, Wang B, Shi Z Q, et al. Research on lightweight design of C-frame of self-piercing riveting equipment [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019 (3): 66-68.
- [11] 聂文忠, 陈晓东, 李欧洋. 飞行汽车轻量化板材自冲铆接工艺参数优化 [J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42 (6): 75-78.
- Nie W Z, Chen X D, Li O Y. Parameter optimization of self-piercing riveting process for lightweight sheet metal of flying vehicle [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42 (6): 75-78.
- [12] 徐菲, 陆一安, 周绪红, 等. 高强度环槽铆钉 ML40Cr 材料单轴拉伸及低周疲劳性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2024 (10): 217-228.
- Xu F, Lu Y A, Zhou X H, et al. Uniaxial tensile and low-cycle fatigue performance of high-strength lockbolt ML40Cr materials [J]. Journal of Building Structures, 2024 (10): 217-228.
- [13] 张永超, 黄志超, 陈嘉伟, 等. 一种固定式多工位大喉深自冲铆接机 C 型框架装置 [P]. 中国: CN202110725959.1, 2021-09-21.
- Zhang Y C, Huang Z C, Chen J W, et al. A kind of fixed multi-station large throat depth self-punching riveting machine C-type frame device [P]. China: CN202110725959.1, 2021-09-21.
- [14] 李永哲, 李晨鹏, 周怡君, 等. 大型金属构件多机协同增材制造前沿进展 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (5): 664-678.
- Li Y Z, Li C P, Zhou Y J, et al. Progresses in multi-robot cooperative additive manufacturing of large-scale metal parts [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47 (5): 664-678.
- [15] Großmann A, Weis P, Clemen C, et al. Optimization and redesign of a metallic riveting tool for selective laser melting-A case study [J]. Additive Manufacturing, 2019, 31: 100892.
- [16] ECKOLD. MZD 60/6 self-piercing riveting system [Z]. <https://www.eckold.de>.
- [17] 李丽兰. 运用圣维南等效原理简化边界条件的验证及分析 [J]. 红水河, 2019, 38 (1): 35-37.
- Li L L. Verification and analysis of simplified boundary condition by Stint-Venant equivalence principle [J]. Hongshui River, 2019, 38 (1): 35-37.
- [18] Wang M Y, Wang X M, Guo D M. A level set method for structural topology optimization [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2003, 192 (1-2): 227-246.

# (上接第 143 页)

- [10] 张国进, 孟阳. 异形环轧件表面线状缺陷分析与仿真优化研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56 (6): 83-88.
- Zhang G J, Meng Y. Research on analysis and simulation optimization of linear defects on the surface of special-shaped ring rolled parts [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2021, 56 (6): 83-88.
- [11] 华林, 钱东升. 轴承精密轧制理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- Hua L, Qian D S. Precision Rolling Theory and Technology for Bearing [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [12] 胡正寰, 华林. 零件轧制成形技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- Hu Z H, Hua L. Technology of Rotary Metal Forming [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [13] 华林, 黄兴高, 朱春东. 环件轧制理论与技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- Hua L, Huang X G, Zhu C D. Ring Rolling Theory and Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.