

铆接机气缸支座可靠性分析及优化设计

张原赫, 李明昊*, 杨浩然, 张鑫禄, 安俊达, 吴光杰

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年6月22日; 发布日期: 2026年6月29日

摘要

铆接机气缸支座是设备承受支撑力与安装定位的关键部件, 受到气缸推力和冲击载荷的作用, 易发生应力集中、疲劳开裂与刚度不足等问题, 直接影响铆接精度与整机设备可靠性。为提升气缸支座的工作性能与使用寿命, 本文以某型铆接机气缸支座为研究对象, 开展可靠性分析与结构优化设计。对气缸支座进行载荷分析, 得到其受力载荷。建立支座三维模型并完成有限元模型的简化与网格划分, 通过静力学分析获取支座应力与变形分布, 得到薄弱部位。基于应力-强度干涉理论与蒙特卡洛方法, 对支座进行可靠性分析。发现支座的可靠性不足, 需要对其进行优化。采用布局优化的方式, 以降低最大应力、提高可靠度为目标, 完成结构优化设计。结果表明: 优化后支座最大等效应力降低15.9%, 最大变形减小18.4%, 强度可靠度由0.9567提升至0.9998, 显著提升了气缸支座的可靠性与稳定性, 可为铆接机同类部件的设计与优化提供参考。

关键词

铆接机, 气缸支座, 有限元分析, 可靠性, 结构优化

Reliability Analysis and Optimization Design of the Cylinder Support for Riveting Machine

Yuanhe Zhang, Minghao Li*, Haoran Yang, Xinlu Zhang, Junda An, Guangjie Wu

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: May 29, 2026; accepted: June 22, 2026; published: June 29, 2026

Abstract

The cylinder support of a riveting machine is a critical component for load-bearing and mounting positioning. During long-term operation, it is subjected to cylinder thrust, riveting impact, and alternating loads, making it susceptible to stress concentration, fatigue cracking, and insufficient stiffness, which

*通讯作者。

文章引用: 张原赫, 李明昊, 杨浩然, 张鑫禄, 安俊达, 吴光杰. 铆接机气缸支座可靠性分析及优化设计[J]. 建模与仿真, 2026, 15(6): 146-153. DOI: 10.12677/mos.2026.156101

directly compromise riveting precision and equipment reliability. To enhance the operational performance and service life of the support, this paper conducts a reliability analysis and structural optimization design for a specific type of riveting machine cylinder support. Firstly, a load analysis is performed to define the action forms of self-weight, cylinder thrust, and impact loads. Secondly, a three-dimensional (3D) model is established, followed by the simplification and meshing of the finite element model. Subsequently, static finite element analysis (FEA) is conducted to obtain the stress and deformation distribution, thereby identifying structural weak points. Based on the stress-strength interference theory and the Monte Carlo method, the reliability analysis is executed to calculate the strength reliability of the support. Finally, taking wall thickness, reinforcement rib dimensions, and transition fillets as design variables, the structural optimization is completed using an optimization algorithm, aiming to minimize maximum stress and maximize reliability. The results indicate that after optimization, the maximum equivalent stress is reduced by 15.9%, and the maximum deformation is decreased by 18.4%. The strength reliability is improved from 0.9567 to 0.9998. This study significantly enhances the reliability and stability of the cylinder support and provides a valuable reference for the design and optimization of similar components in riveting machinery.

Keywords

Riveting Machine, Cylinder Support, Finite Element Analysis, Reliability, Structure Optimization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铆接机是工程机械领域的核心装配设备，气缸支座作为气缸与机架的关键连接部件，不仅承担气缸输出的推力，还传递铆接过程中的冲击载荷，对设备铆接精度与运行可靠性具有决定性影响。在长期连续工作工况下，气缸支座常因结构设计不合理出现失效问题，导致铆接位置偏移、设备振动加剧，甚至引发安全事故[1]。

铆接机气缸支座的设计缺乏理论的分析与支撑，难以满足设备高可靠性的发展需求。随着有限元仿真技术与可靠性工程理论的发展，基于有限元分析的结构可靠性优化已成为机械部件性能提升的重要手段[2][3]。

本文以某型铆接机气缸支座为研究对象，通过载荷分析、有限元建模、可靠性计算与结构优化，实现气缸支座的可靠性提升与性能优化，为铆接机气缸支座的设计与改进提供理论依据与工程参考。

2. 铆接机气缸支座载荷分析

铆接机气缸支座在工作过程中承受多种载荷的耦合作用，主要包括自重载荷、气缸工作推力、铆接冲击载荷，各载荷的分析结果如下：

2.1. 自重载荷

气缸支座为焊接钢结构件，自身质量约 14.5 kg，在安装与工作状态下，自重会在支座底部区域产生持续的压力，是结构强度校核的基础载荷之一。在有限元分析中，自重载荷以重力加速度场(9.8 m/s²)的形式施加，作用于支座整体结构。

2.2. 气缸的冲击载荷

气缸作为铆接机的动力输出部件，工作时向支座传递作用力，是导致支座应力集中与疲劳失效的重

要因素，根据铆接机额定工作参数。

气缸压力为气缸活塞的截面积×单位截面积的压力，只和压缩空气的压力有关[4]。

结合实际需求，初始设计参数及计算结果如表 1 所示：

Table 1. Initial design parameters and calculation results

表 1. 初始设计参数及计算结果

序号	指标	初始设计参数	备注
1	气压缸内径	$r = 4 \text{ cm}$	
2	输入压缩空气的压力	取最小值 1 MPa	1 MPa~3 MPa
3	理论力	501.9 Kg = 4924 N	

气缸最大推力为 $F_{\max} = 5.019 \text{ kN}$ ，该载荷通过气缸安装面均匀传递至支座，是气缸的主要载荷。

3. 铆接机气缸支座有限元模型

3.1. 模型建立与简化

采用 SolidWorks 建立铆接机气缸支座的几何模型，结合有限元分析需求对模型进行合理简化，以平衡计算精度与求解效率[5] [6]：

- (1) 省略非承力的细小倒角、螺纹孔、定位凸台与工艺孔等结构；
- (2) 简化焊接过渡区域，消除模型中的尖角、窄面等易导致网格畸变的特征；
- (3) 保留支座主体承力结构、气缸安装面、底部固定法兰与加强筋等关键受力部位；
- (4) 将支座各部件的连接关系简化为绑定接触，模拟实际装配状态下的约束传递。

简化模型如图 1 所示，简化后的模型能够准确反映支座的受力传递路径与整体力学特性，满足后续静力学分析与可靠性分析的要求。

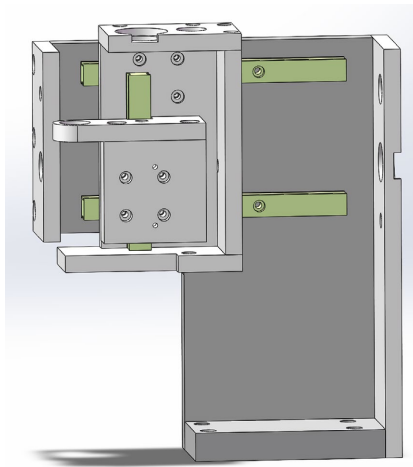


Figure 1. Simplified model

图 1. 简化模型

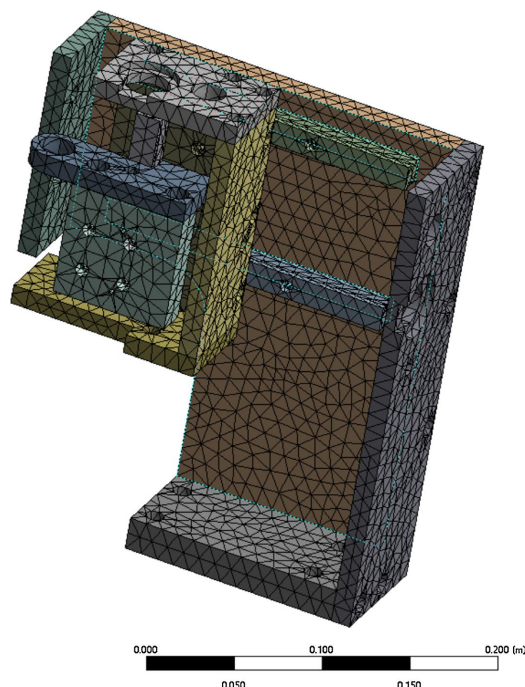
3.2. 网格划分

气缸支座的材料选用碳素结构钢，其材料属性参数如表 2 所示[7]：

Table 2. Material properties**表 2.** 材料属性

材料	密度	弹性模量	泊松比	屈服强度
Q235	$7.85 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^3$	$2.06 \times 10^5 \text{ GPa}$	0.3	235 MPa

采用 ANSYS Workbench 对简化后的模型进行网格划分, 选用二阶四面体单元进行离散化处理, 非关键部位采用较粗网格以减少计算量, 网格划分结果如图 2 所示。

**Figure 2.** Meshing results**图 2.** 网格划分结果

通过网格质量检查, 单元雅各比比率平均 0.90、单元质量平均为 0.61, 最终生成的有限元模型包含单元数约 34,748 个, 节点数 60,126 个, 满足计算精度要求。

4. 气缸支座可靠性分析

4.1. 气缸支座有限元分析

在完成网格划分的基础上, 对气缸支座施加边界条件与载荷: 底部固定法兰采用全约束, 限制支座的平动与转动; 在气缸安装面施加等效冲击载荷(5.019 kN), 模拟极限工作工况。求解后得到支座的等效应力分布与变形云图, 如图 3, 图 4 所示。

结果表明: 支座的最大等效应力出现在与四方形滑块, 滑轨座相连的滑轨固定孔处, 最大值为 134.72 MPa, 小于材料的屈服强度 235 MPa; 最大等效应变也出现在此处, 满足设备的刚度要求。但应力分布不均, 局部区域存在明显的应力集中现象, 存在疲劳失效的潜在风险。

4.2. 气缸支座可靠度计算

基于应力 - 强度干涉理论, 以支座的最大等效应力为应力变量, 材料的屈服强度为强度变量, 建立

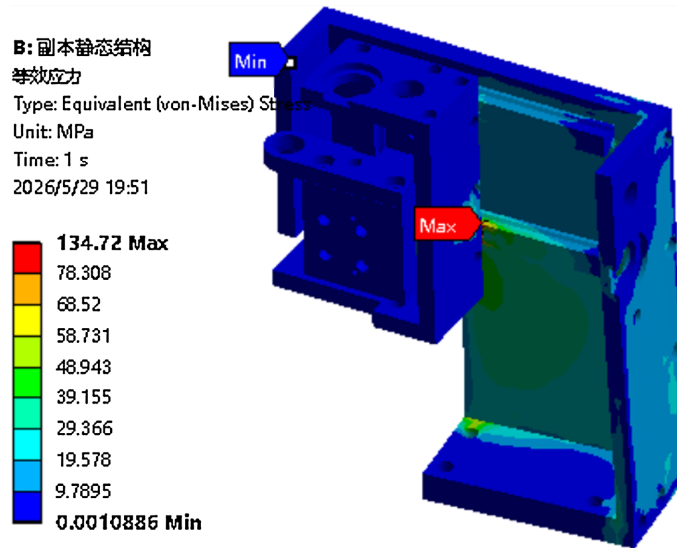


Figure 3. Equilibrium stress contour map
图 3. 等效应力云图

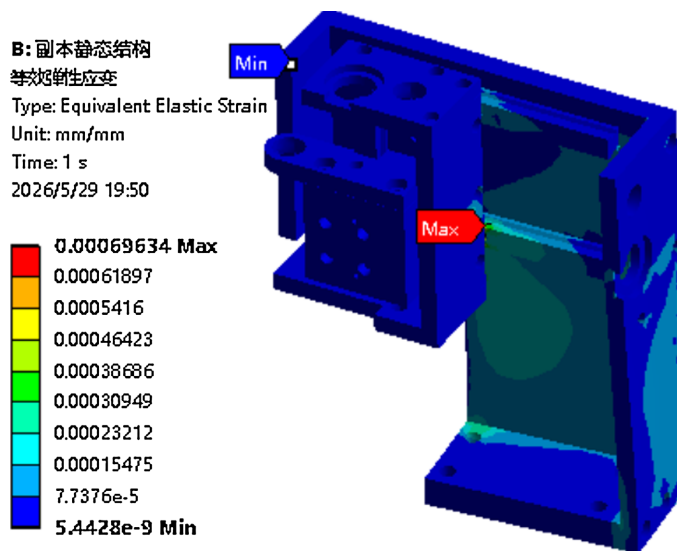


Figure 4. Equilibrium strain contour map
图 4. 等效应变云图

强度可靠性模型。根据全概率公式，可以得到强度大于应力的概率的可靠度计算公式为：

$$\begin{aligned}
 R &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(s) R(S) ds = \int_{-\infty}^{+\infty} h(s) \left[\int_s^{+\infty} f(S) dS \right] ds \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^s h(s) ds \right] f(S) dS
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

假设应力和强度服从正态分布规律时，可靠度计算公式可转化为：

$$R = 1 - \Phi \left(-\frac{\mu_S - \mu_s}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_s^2}} \right) = \Phi \left(\frac{\mu_S - \mu_s}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_s^2}} \right)
 \tag{2}$$

式中 μ_S 为强度的均值； μ_s 为应力的均值； σ_S 为强度的标准差； σ_s 为应力的标准差。

假设应力与强度均服从正态分布，取变差系数为 0.05 [8]，结合材料性能参数与有限元分析结果，采用蒙特卡洛方法进行抽样计算(抽样次数为 20,000 次)，应力 - 强度干涉模型如图 5 所示[9]，得到支座的强度可靠度为 0.9567，不满足设备长期高可靠性工作的要求(目标可靠度为 0.99 以上)，因此需要对支座结构进行优化设计。

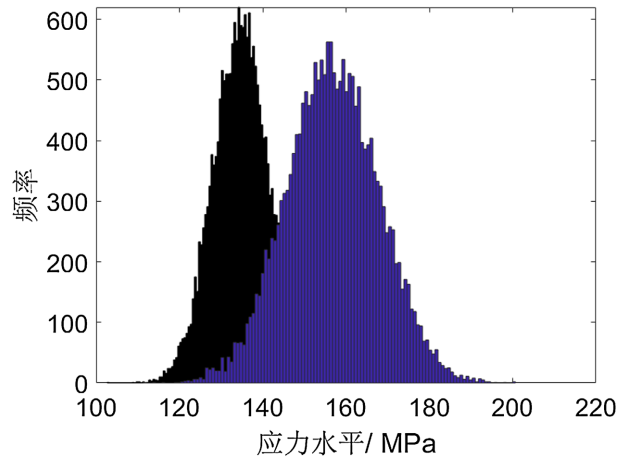


Figure 5. Stress-strength interference model
图 5. 应力 - 强度干涉模型

5. 气缸支座优化设计

针对原结构的孔处出现的应力集中现象，需要规避该位置的应力集中，并且通过双孔的方式可以增加结构的强度。所以通过将原有的单孔固定形式改进为双孔对称布局，优化后的结果如图 6，图 7 所示。

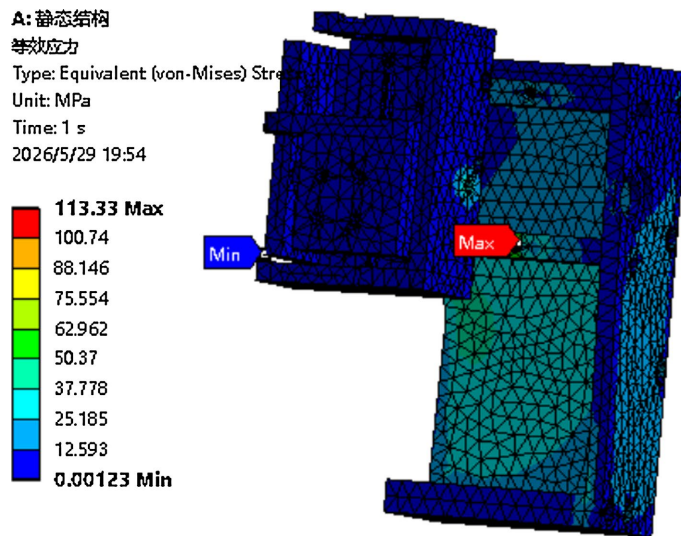


Figure 6. Optimized equivalent stress contour map
图 6. 优化后等效应力云图

仿真结果表明，该优化方法显著降低了连接处的最大等效应力，提升了结构的整体疲劳寿命与可靠性。

如表 3 所示，优化前后对比结果如下：

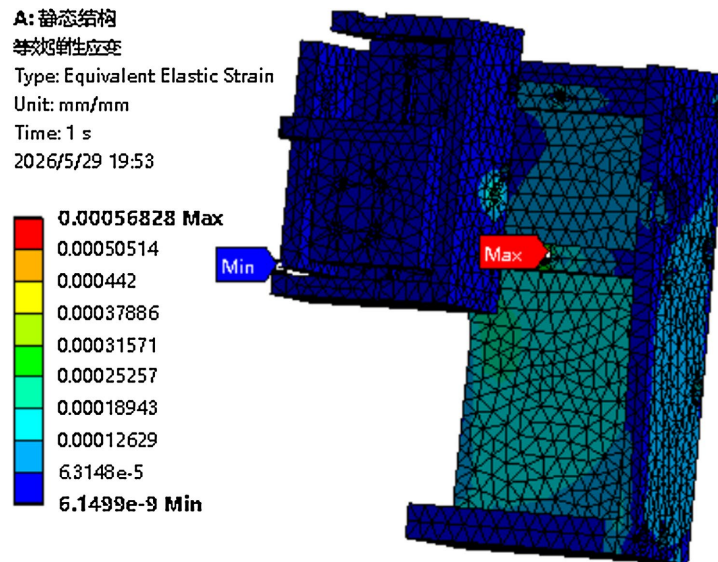


Figure 7. Optimized equivalent strain contour map
图 7. 优化后等效应变云图

Table 3. Comparison before and after optimization
表 3. 优化前后对比

	优化前	优化后
最大等效应力/MPa	134.72	113.33
最大等效应变/mm	0.00069634	0.00056828

优化后对气缸支座重新进行有限元分析与可靠性计算, 结果表明: 支座最大等效应力降低至 113.33 MPa, 降低了 15.9%; 最大等效应变减小至 0.00056828 mm, 减小了 18.4%; 强度可靠度提升至 0.9998, 满足设备的高可靠性工作要求。

6. 结论

1) 通过载荷分析明确了铆接机气缸支座的主要载荷类型与作用形式, 建立了气缸支座的三维模型与有限元模型, 完成了网格划分与质量检查, 为后续分析奠定了基础。

2) 静力学有限元分析结果表明, 气缸支座的初始设计最大等效应力为 134.72 MPa, 最大等效应变为 0.00069634 mm, 虽满足静强度要求, 但存在明显的应力集中现象, 强度可靠度仅为 0.9567, 不满足长期高可靠性工作要求。

3) 将原有的单孔固定形式改进为双孔对称布局进行结构优化, 优化后最大等效应力降低 15.9%, 最大等效应变减小 18.4%, 强度可靠度提升至 0.9998, 显著提升了气缸支座的可靠性与稳定性。

本文的研究方法与优化结果可为铆接机气缸支座及同类承力部件的设计与优化提供参考, 对提升设备整体可靠性具有工程应用价值。

基金项目

辽宁省科技计划联合计划面上项目(2025-MSLH-589); 辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金资助(LJ212410144076, LJ232410144074)。

参考文献

- [1] 殷宇舰. 基于视觉伺服的铆接机器人轨迹跟踪方法研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2025.
- [2] 聂永增. 自动铆接机的机械结构设计[J]. 新技术新工艺, 2018(6): 17-20.
- [3] 刘建坤, 南江红, 王光辉, 等. 基于平行四边形机构的天线举升装置设计[J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50(5): 33-38.
- [4] 聂永增. 自动铆接机构及其控制系统的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州工业大学, 2017.
- [5] 赵兴兴. 基于有限元的反应釜受压结构强度分析[J]. 中国机械, 2026(6): 41-44.
- [6] 刘炎, 张力斌, 贾爽, 等. 基于有限元的内啮合行星传动系统模态分析[J]. 新技术新工艺, 2026(2): 35-43.
- [7] 方昆凡. 机械工程材料实用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022: 60-75.
- [8] 李炳蔚, 祝学军, 卜奎晨, 等. 航天器结构可靠性安全系数设计方法研究[J]. 强度与环境, 2018, 45(4): 23-30.
- [9] 陈星, 段斐翊. 改进威布尔分布模型的航空发动机关键机械部件可靠性寿命预测[J]. 自动化与仪器仪表, 2026(4): 135-140.