

基于有限元分析的活塞型面设计

孙琛媛^{1,2}, 封晓晶^{1,2}, 原文涛^{1,2}, 顾鼎峰³

1. 滨州渤海活塞有限公司, 山东 滨州 256602; 2. 山东省先进发动机活塞组件重点实验室(筹), 山东 滨州 256602;
3. 北汽福田康明斯发动机有限公司, 北京 102206

摘要:针对某柴油机铝活塞裙部型面及销孔型面接触压力分布不均匀问题,采用拓扑优化设计方法对活塞裙部横向截面椭圆度与销孔型线轮廓通过有限元分析进行协同优化,经优化迭代后重新进行数值仿真计算。仿真结果表明:当活塞裙部横向截面采用叠加修正椭圆,同时基于销孔内外侧直线段长度调控与直径收缩量优化构建双喇叭形销孔结构时,活塞裙部接触压力及销孔接触压力峰值比优化前下降约 6%,同时接触区域面积增大。经台架试验验证,优化后活塞裙部和销孔接触等关键配合部位接触良好,循环载荷作用下活塞表面未出现剥落等异常磨损现象,满足发动机耐久性要求。

关键词:活塞;型线;椭圆度;接触压力;有限元分析

中图分类号:TK423.2

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)04-0075-06

引用格式:孙琛媛,封晓晶,原文涛,等.基于有限元分析的活塞型面设计[J].内燃机与动力装置,2025,42(4):75-80.

SUN Chenyuan, FENG Xiaojing, YUAN Wentao, et al. Design of a piston profile based on finite element analysis[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(4): 75-80.

0 引言

活塞是内燃机的核心功能部件,其工作特性直接影响整机的动力性能、排放性能、燃油经济性能等关键参数^[1]。随着发动机强化指标的持续提高,活塞组件承受的机械应力载荷与热力学负荷呈现显著递增趋势,极端工况下,其失效概率呈指数增长^[2-3],活塞部件的可靠性已成为制约内燃机使用寿命的关键因素。现阶段活塞使用寿命评估主要依赖台架耐久性试验与数值仿真分析两类技术手段^[4]。台架试验方法存在周期冗长、资源消耗大等固有缺陷,与当前制造业倡导的精益生产理念、成本控制战略及一次性开发成功率提高的目标存在显著矛盾。相较而言,数值仿真技术可在原型样件制造前完成活塞疲劳系数计算、接触压力分布预测等关键参数分析,对于优化研发流程和降低试验成本具有重要工程应用价值。

与传统试验方法相比,有限元分析法具有显著的技术优势,广泛应用于内燃机关键零部件研究^[5-8]。随着高性能计算工作站的迭代升级,特别是三维实体建模技术体系与有限元分析方法的深度融合,活塞温度场与应力场的数值模拟已形成标准化研究范式。该方法不仅能够系统评估活塞结构的力学合理性,还可预测温度梯度分布和应力集中区域,为活塞拓扑优化设计提供理论依据,显著降低了试验成本,有效缩短了产品开发周期^[9]。

本文中针对活塞裙部型面和销孔型面接触压力分布不均匀的问题,采用有限元分析方法对活塞进行系统研究,对某柴油机活塞的裙部型面和销孔型面进行优化设计,重点考察其温度场及接触压力等关键参数,并对优化后活塞进行耐久试验验证。

收稿日期:2025-04-21

基金项目:山东省先进发动机活塞组件重点实验室开放课题(BH202501)

第一作者简介:孙琛媛(1986—),女,山东滨州人,工程硕士,高级工程师,主要研究方向为内燃机活塞的设计,E-mail: chenyan. sun@bhpiston.com。

1 活塞设计方案

根据发动机技术参数,活塞设计为铝活塞,结构设计方案为:1)活塞环组。采用3道环设计,第一道环为梯形桶面环,第二道环为扭曲锥面环,第三道环为螺旋撑簧油环。2)裙部纵向形线为中凸筒形,大点位置位于裙部偏下方位置,为了改善裙部与气缸套的贴合状态,活塞裙部横向截面一般采用修正椭圆设计^[10-11]。3)销孔结构。不同销孔形貌特征对销孔表面及燃烧室喉口区域应力分布特性具有显著差异化影响。研究表明,采用异形销孔结构有利于避免采用较大直径的销孔-活塞销来承载高负荷^[12],通过优化接触应力分布提高发动机机械效率。进一步分析表明,销孔双曲线形线设计能够与活塞销的弹性变形场及热变形场形成几何适配效应,该耦合作用可促进楔形动力润滑油膜的形成^[13]。工程实践中,活塞销孔结构普遍采用内外侧双喇叭形设计方案,该型面在改善应力集中效应与润滑特性方面展现出显著采用优势。

椭圆长轴的半径收缩量

$$\Delta R_1 = G_1 [(1 - \cos 2\alpha_1) + \beta_1 (1 - \cos 4\alpha_1)] / 4, \quad (1)$$

式中: G_1 为椭圆度,mm; β_1 为修正因数; α_1 为椭圆上某点与椭圆中心的连线与椭圆长轴的夹角,°。

本文中 $G_1 = 0.4 \text{ mm}$, $\beta_1 = -0.10$ 。活塞结构如图 1 所示。

2 活塞有限元分析

2.1 有限元模型建立和边界条件

基于三维建模软件 UG 构建了活塞组(含活塞、连杆及活塞销)的实体几何模型,并通过标准数据接口将该模型导入有限元分析软件 ANSYS 进行数值模拟^[14-16]。鉴于活塞结构具有显著的几何对称性特征,为降低计算成本并提高计算效率,本文中采用二分之一活塞组简化模型作为有限元分析对象。在网格划分过程中,针对温度梯度变化显著区域实施局部网格加密策略,在温度场分布相对平缓区域采用自适应网格优化技术。活塞与连杆组件采用二阶四面体 10 节点单元,活塞销部件选用二阶六面体 20 节点单元进行网格划分,最终建立的活塞有限元网格模型如图 2 所示。

发动机稳态工况下,活塞的热交换系统已达到热力学平衡状态。当采用有限元方法进行活塞温度场数值模拟时,通常采用第三类边界条件进行建模,即通过定义换热系数与环境介质温度参数实现温度分布的数值重构。鉴于该热传导过程为稳态导热特性且研究对象不包含内热源生成项,数值模型通过设置环境温度参数与换热系数完成边界条件的数学表征。

2.2 有限元分析结果及分析

2.2.1 温度场

活塞温度场分布如图 3 所示。由图 3 可知:活塞温度场呈自头部至裙部的梯度递减分布特征;额定工况条件下,最高温度为 $340.1 \text{ }^\circ\text{C}$,位于燃烧室喉口区域;第一环槽区域温

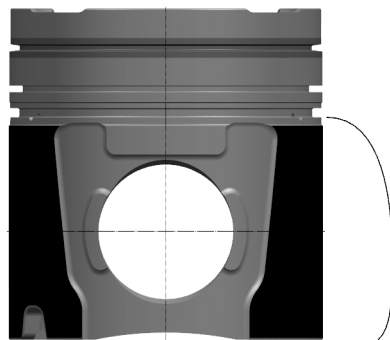


图 1 活塞结构

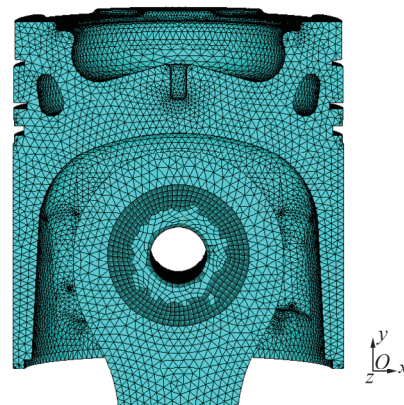


图 2 活塞网格模型

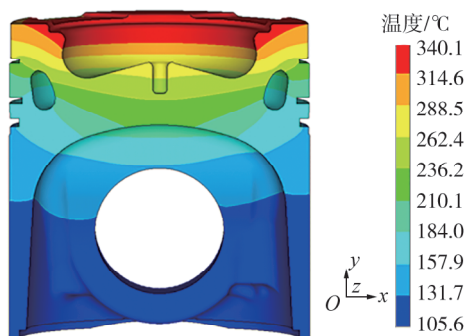


图 3 活塞温度场分布

度约为 235.8 °C;活塞裙部区域温度降至最低,为 155.1 °C。该温度分布特征符合典型活塞热传导规律,喉口部位由于直接接触高温燃气呈现显著热积聚现象,其中活塞裙部因冷却介质作用及热传导路径延长形成相对低温区。

2.2.2 裙部接触压力

侧向力导致活塞裙部与缸套接触产生接触压力。在最大侧向力工况条件下,活塞裙部接触压力分布特征如图 4 所示。由图 4 可知:活塞裙部最大接触压力为 9.3 MPa,集中分布于活塞裙部与面窗交界区域,且呈现离散型分布特征,有效接触面积相对较小。该接触特性易导致活塞-气缸系统润滑状态恶化,可能引发异常磨损、拉缸等失效模式。基于力学特性分析结果,建议对活塞裙部型面进行优化设计,改善接触压力分布状态并提高系统可靠性。

2.2.3 销孔接触压力

活塞销孔接触压力分布如图 5 所示。由图 5 可知:在爆发压力作用下,活塞销孔-活塞销配合界面形成的接触压力场呈现非均匀分布特性,接触压力峰值达到 102.6 MPa,且显著集中于销孔外侧区域。这种应力集中现象导致活塞销孔与活塞销配合面的有效接触面积显著减小,导致接触界面润滑油膜形成与维持条件恶化。在循环载荷作用下,接触界面润滑失效导致销孔异常磨损、粘连等潜在失效模式。基于接触力学分析,建议对活塞销孔型面进行优化设计,通过几何参数重构,实现接触压力分布合理,降低局部应力集中,提高界面润滑性能。

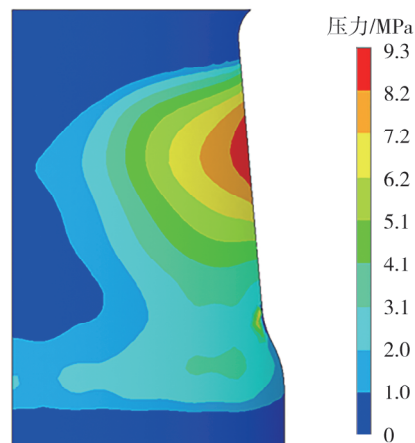


图 4 活塞裙部接触压力分布

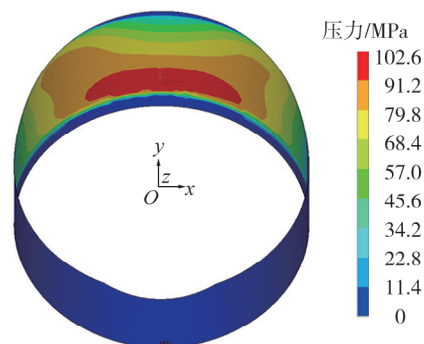


图 5 活塞销孔接触压力分布

3 活塞设计优化及有限元分析

3.1 活塞设计优化

3.1.1 裙部型面优化

为优化活塞裙部与气缸套的贴合性能,活塞裙部横向截面通常设计为修正椭圆结构。

修正椭圆半径收缩量

$$\Delta R_2 = G_2 [(1 - \cos 2\alpha_2) + \beta_2 (\cos 8\alpha_2 - \cos 4\alpha_2)] / 4, \quad (2)$$

式中: G_2 为修正椭圆的椭圆度,mm; α_2 为修正椭圆上某点与中心的连线与椭圆长轴的夹角,°; β_2 为修正因数。

基于对裙部接触压力分布的有限元仿真分析结果,在原有方案 F1 基础上设计改进型 F2 方案:将裙部横向截面设计为叠加修正椭圆结构,轮廓曲线如图 6 所示。由图 6 可知:相比方案 F1,方案 F2 在 0~30° 内收缩量减小,30°~90° 内收缩量增大,修正椭圆度 $G_2 = 0.4$ mm,修正因数 $\beta_2 = 0.10$ 。

3.1.2 销孔型面优化

为优化活塞销孔与活塞销的贴合性能,基于对销孔接触压力分布的有限元模拟分析结果,在原有方案 S1 基础上设计改进方案 S2:增大销孔外侧收缩量,减小内侧收缩量,通过调整内侧、直段、外侧三段的长度和销孔直径收缩量优化销孔型线。方案 S1、S2 相关参数如表 1 所示,对销孔内、外侧利用幂函数拟合后的型线轮廓曲线如图 7 所示。

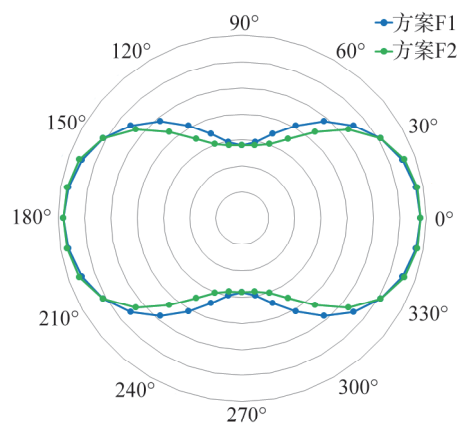


图 6 活塞横向型面轮廓曲线

表 1 活塞销孔型线方案对比

单位: mm

方案	内侧长度	内侧最大半径	直段长度	外侧长度	外侧最大半径
S1	10	0.011	10	14	0.012
S2	8	0.006	8	18	0.028

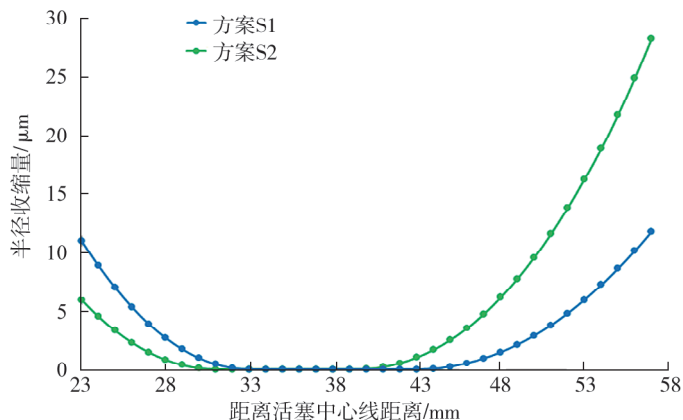


图 7 活塞销孔型线轮廓曲线对比

3.2 优化方案有限元分析及验证

3.2.1 活塞裙部接触压力

对活塞裙部型面优化方案开展数值模拟研究,获得活塞裙部和销孔接触压力分布特性,如图 8 所示。由图 8 可知:优化后活塞裙部最大接触压力为 8.7 MPa,相比原始方案降低了 6%。应力集中区域主要分布于活塞裙部中上部区域;同时接触面积扩大,压力分布均匀性提高,有效降低了应力集中现象。这种改进的接触特性有利于侧向力的均匀传递,通过降低表面接触应力梯度,显著改善了活塞裙部-气缸套系统的接触动力学特性。优化方案实现了接触状态与润滑性能的协同优化。

3.2.2 销孔接触压力

通过对销孔型面优化方案开展数值模拟研究,获得接触压力分布特性,结果如图 9 所示。由图 9 可知:优化后活塞销孔的最大接触压力为 96.3 MPa,比原始方案降低了 6%;接触面积在销孔表面呈现均匀扩展分布特征,压力分布均匀性得到显著提高,有效抑制了应力集中现象的产生。这种改进的接触特性通过降低表面接触应力梯度,使活塞销孔-活塞销的接触动力学特性得到明显改善。

3.3 试验验证

基于优化方案 F2-S2 的活塞装机后按照文献[16]开展台架试验,试验结束后拆检活塞,其关键部位状态如图 10 所示。由图 10 可知:活塞环岸区域存在轻微积碳,活塞裙部与销孔等关键配合部位呈现良好的接触状态,未发现典型异常磨损、裂纹等失效现象。

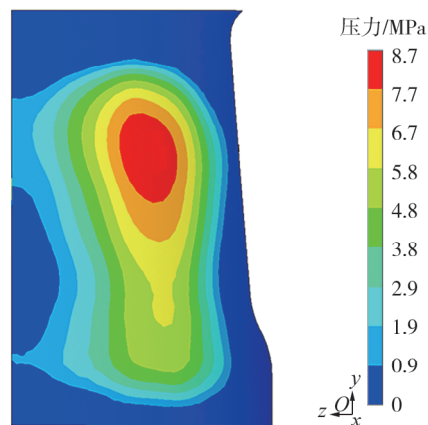


图 8 活塞裙部接触压力分布

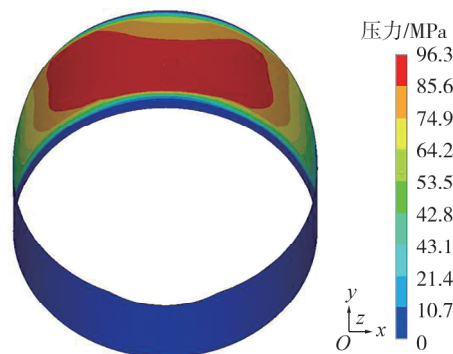


图 9 活塞销孔接触压力分布

经系统评估,该活塞满足发动机标定工况下的可靠性要求,顺利通过试验验证。

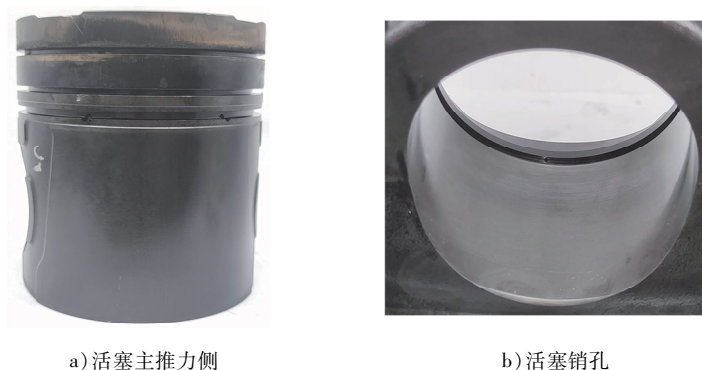


图10 试验后活塞关键部位状态

4 结论

1) 基于有限元分析方法,将活塞裙部横向截面设计为叠加修正椭圆结构,通过系统调整销孔型线内外侧、直段长度及直径收缩量等参数,设计为双喇叭形结构,可有效改善接触面积,显著提高接触压力分布的均匀性。

2) 对优化后的活塞装机开展可靠性试验,结果表明:活塞裙部与销孔等关键部分接触良好,活塞未出现裂纹和异常磨损现象,优化措施有效。

3) 数值仿真技术的应用可显著降低产品研发成本并缩短开发周期,研究过程中建立了试验验证与数值模拟的协同工作机制,通过试验结果与仿真计算结果的对比分析,验证了数值模拟方法的有效性。

参考文献:

- [1] 林贵堃,陈细妹,闲家明,等. 基于有限元分析的发动机活塞轻量化设计[J]. 机械制造与自动化,2024,53(3): 239-242.
- [2] 邓立君,熊培友,张学禄,等. 冷却方式对柴油机活塞温度及二阶运动的影响[J]. 机械科学与技术,2022,41(11): 1773-1779.
- [3] 雷基林,申立中,杨永忠,等. 4100QBZ型增压柴油机活塞温度场试验研究及有限元分析[J]. 内燃机学报,2007(5): 445-450.
- [4] 郑永刚,马学军,马呈新,等. 有限元分析与疲劳评价在活塞开发中的应用[J]. 柴油机,2005(3): 21-23.
- [5] 马春燕. 柴油机活塞的有限元分析[D]. 天津:河北工业大学,2013.
- [6] 陈霄. 船用柴油机活塞瞬态温度场与应力场三维有限元分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [7] 刘猛. 柴油机活塞温度场和应力场的有限元分析[D]. 大连:大连理工大学,2017.
- [8] 邓立君,刘永启,熊培友,等. 内冷油腔对高强度内燃机活塞2阶运动的影响[J]. 汽车工程,2017,39(3): 269-274.
- [9] 刘召伟,孙琛媛,郭金朋,等. 船用柴油机活塞销孔开裂失效分析及优化[J]. 内燃机与动力装置,2020,37(2): 80-86.
- [10] 李倩,王志龙,张俊青,等. 高强度柴油机铝活塞销孔开裂分析及改进[J]. 内燃机与动力装置,2024,41(1): 64-70.
- [11] 陈丽,李剑光,赵文斌,等. 基于摩擦磨损的柴油机活塞裙部型面设计[J]. 车用发动机,2018(4): 27-32.
- [12] 刘世英,林风华,秦有志,等. 销孔结构设计对活塞可靠性影响的研究[J]. 内燃机工程,2007(1): 46-50.
- [13] 邓立君,陈丽,穆振仟,等. 柴油机活塞销孔润滑特性的数值和试验研究[J]. 车用发动机,2023(3): 8-16.
- [14] 张俊青,李猛猛,赵旭东,等. 基于有限元方法的柴油机锻钢活塞热分析[J]. 内燃机与动力装置,2018,35(2): 77-81.
- [15] 石小明. 高强度柴油机锻钢活塞设计[D]. 济南:山东大学,2017.
- [16] 孟栋栋. 天然气发动机钢活塞设计与开发[D]. 济南:山东大学,2020.
- [17] 工业和信息化部. 汽车发动机可靠性试验方法:BT/T 19055—2024[S]. 北京:中国标准出版社,2024.

Design of a piston profile based on finite element analysis

SUN Chenyuan^{1,2}, FENG Xiaojing^{1,2}, YUAN Wentao^{1,2}, GU Dingfeng³

1. Binzhou Bohai Piston Co., Ltd., Binzhou 256602, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Advanced Engine Piston Components (Under Preparation), Binzhou 256602, China;

3. Beijing Foton Cummins Engine Company Limited, Beijing 102206, China

Abstract: To address the uneven contact pressure distribution on the skirt and pin bore profiles of an aluminum piston in a diesel engine, a topology optimization design method is employed to collaboratively optimize the oval parameters of the skirt's transverse cross-section and the pin bore contour. Numerical simulations are conducted after iterative optimization. The results show that when the skirt's transverse cross-section adopts a superimposed corrected ellipse, combined with a double tapered pin bore structure optimized by adjusting the length of inner and outer linear segments and diameter recess, the contact pressure of the piston skirt and the peak contact pressure of the pin hole both decrease by 6%, and the contact area increases. After bench testing verification, the optimized key mating parts such as the piston skirt and pin hole have good contact, and there are no abnormal wear phenomena such as peeling on the piston surface under cyclic loading. The piston meets the durability requirements of the engine.

Keywords: piston; profile; ovality; contact pressure; finite element analysis

(责任编辑:刘丽君)

.....
(上接第 74 页)

and economic performance of fuel cell hybrid commercial vehicles are evaluated. Starting from the dynamics of the entire vehicle, the dynamic relationship between driving force, resistance, and vehicle motion state is analyzed, and the characteristics of fuel cells, power batteries, and motors are combined to establish accurate longitudinal dynamics models of the entire vehicle and multi-level models of the powertrain. A rule-based energy management strategies are designed to achieve dynamic power allocation between fuel cells and power cells. The comparison between the simulation results of actual road spectrum conditions and experimental data shows that the relative errors of the model in terms of vehicle speed, motor power, fuel cell power, power battery power, etc. are less than 5%. The model has high accuracy and effective energy management strategies. The research results can provide reference for the performance optimization and energy management strategy development of fuel cell hybrid commercial vehicles. In the future, we will further explore data-driven power system strategies to enhance the system's adaptability to complex operating conditions.

Keywords: commercial vehicle; hydrogen fuel cell hybrid power system; simulation model; energy management strategy; power

(责任编辑:臧发业)