

# 某发动机气缸套穴蚀分析及改进

郑昊鹏<sup>1</sup>, 张广峰<sup>2\*</sup>, 张翠云<sup>2</sup>, 张振胜<sup>2</sup>, 张新月<sup>2</sup>, 王瑞丽<sup>2</sup>

1. 中国船舶集团第七〇八研究所舰船综合保障事业部, 山东 青岛 266071;  
2. 中国石油集团济柴动力有限公司, 山东 济南 250306

**摘要:**为解决某新型发动机在耐久试验时出现的气缸套穴蚀故障,分析气缸套刚度、发动机扭振及其他可能导致气缸套穴蚀的原因,并提出改进措施;对改进后的气缸套装机进行500 h发动机耐久试验。结果表明:气缸套刚度不足且整机振动过大是导致该发动机气缸套发生穴蚀的主要因素,且二者相互耦合,加剧了穴蚀进程;增加气缸套壁厚、对气缸套外壁及凸肩表面实施滚压工艺、调整气缸垫位置等可以提高缸套刚度;优化飞轮转动惯量可以消除发动机主要振动激励源,减小发动机振动;发动机耐久试验后,气缸套外壁光滑,内壁未出现异常磨损,气缸套穴蚀故障得到解决。

**关键词:**柴油发动机设计;气缸套穴蚀;刚度分析;滚压技术;发动机振动;结构改进

**中图分类号:**TK423

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2026)01-0099-06

**引用格式:**郑昊鹏,张广峰,张翠云,等.某发动机气缸套穴蚀分析及改进[J].内燃机与动力装置,2026,43(1):99-104.

ZHENG Haopeng, ZHANG Guangfeng, ZHANG Cuiyun, et al. Analysis of cavitation in cylinder liner of an engine and its improvement[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2026,43(1):99-104.

## 0 引言

近年来,随着渔船、运输船、工程船等船舶行业逐渐向大型化发展,对动力设备功率的需求逐渐增加,发动机功率密度也越来越大。生产企业通常采用高压共轨喷射系统、提高喷射压力、强化关键零部件、增大缸径等技术提高发动机功率。为了降低开发成本,提高标准化设计和零部件的通用性,生产企业通过提高零部件的可靠性和强化程度提高发动机的功率。

基于某成熟机型,通过优化燃烧室结构和扩大气缸直径,开发了一款新型发动机,该机型在动力输出、燃油经济性、排放控制等方面均优于原系列产品,各项指标均达到预期设计目标。但发动机在完成500 h持续耐久试验,系统性拆解后发现,该发动机气缸套出现了穴蚀故障。

发动机工作过程中,气缸套与气缸盖、活塞形成工作循环空间,受机械应力、热应力、侧压力、滑动摩擦、化学、电化学、空穴等作用,工作工况恶劣,在产品开发设计过程中,如何提高气缸套的可靠性和使用寿命是需要重点解决的关键技术之一<sup>[1]</sup>。气缸套作为发动机的核心易损部件,其内侧承受的爆发压力高达20 MPa,瞬态高温达500 °C,以及较大的活塞组件侧向推力;外侧受到冷却液空化效应、电化学腐蚀等复杂因素的共同作用,易发生穴蚀故障。研究表明:穴蚀主要是由于冷却液在缸套表面产生空泡并瞬时溃灭,产生冲击压力所致<sup>[2-3]</sup>。

**收稿日期:**2025-11-19

**基金项目:**中国石油天然气集团公司研发项目(F-G60023LE)

**第一作者简介:**郑昊鹏(2000—),男,山东青岛人,主要研究方向为舰船保障,E-mail:13687677280@163.com。

\* **通信作者简介:**张广峰(1981—),男,山东菏泽人,高级工程师,主要研究方向为海洋工程内燃机整机性能开发、发动机结构设计、发电机组配套应用等,E-mail:zhangguangfeng@cnpc.com.cn。

本文中针对该发动机气缸套穴蚀问题,采用多学科协同分析方法,从结构动力学、流体力学、材料学等角度系统研究了穴蚀产生机理。通过有限元分析优化气缸套刚度分布,改进冷却水腔的流道设计以降低空化倾向,并通过调整发动机气缸套刚度抑制整机振动,为发动机的批量应用提供技术保障,也为类似工况下的零部件可靠性设计提供可借鉴的工程经验。

## 1 柴油发动机基本结构与问题描述

### 1.1 发动机基本结构

该发动机基于某成熟机型通过优化燃烧室结构和扩大气缸直径而开发。性能试验表明,该发动机性能参数与关键摩擦副状态均符合设计要求。

该发动机平均有效压力为 1.92 MPa,最高爆发压力为 18.5 MPa,为直列式柴油发动机,采用湿式缸套结构及高、低温双循环冷却系统。高温循环采用闭式循环,路径为:高温泵—发动机气缸套—热交换器。低温循环采用开式循环,利用海水泵驱动,流经中冷器、机油冷却器和热交换器。这种双循环设计旨在精确控制关键部件的温度,但同时增加了系统的复杂性,对气缸套的冷却均匀性提出了更高要求。

### 1.2 气缸套结构设计

为快速响应市场并控制成本,在原有发动机机体毛坯(水腔内壁直径保持不变)的基础上进行扩缸设计,发动机水腔结构如图 1 所示,图中: $\Phi_1$  为缸孔直径, $\Phi_2$  为水腔内壁直径, $\Phi_3$  为水腔外壁直径。为预留安装与加工空间以及保证水腔流量,气缸套外圆增加,气缸套壁厚相应减小,导致气缸套结构发生关键变化。气缸套厚度不满足文献[4]推荐的  $0.08D \sim 0.12D$  ( $D$  为缸径)。

为保证气缸套强度,选用高强度球墨铸铁材料,材料的抗拉强度比合金铸铁提高了 150 MPa,但未对因气缸套壁厚减小引发的刚度下降问题开展系统性评估。发动机机械振动导致冷却液压力的周期性波动,该波动促使冷却液内部空化气泡的生成与溃灭。在此过程中,若部件刚度不足,会显著加剧空化效应,进而导致穴蚀现象的发生。

### 1.3 样机试验与故障现象

在完成性能调试后,对样机进行 500 h 耐久试验,试验结束后拆检发动机,气缸套和油底壳故障现象如图 2 所示。

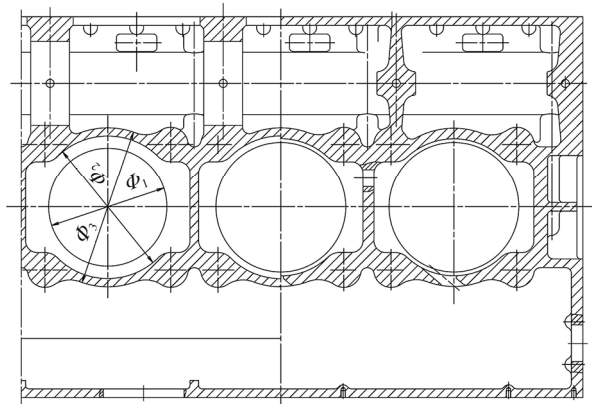


图 1 发动机水腔结构图



a) 气缸套外壁

b) 气缸套内壁

c) 油底壳

图 2 气缸套和油底壳故障现象

由图2可知:1)气缸套外壁穴蚀,每缸气缸套外壁进水口侧冷却表面出现片状坑穴,穴蚀现象显著;2)气缸套内壁异常磨损,内壁在活塞环摆动受力面上部出现梭型非正常划痕,磨损模式与气缸套的振动变形导致的活塞环-缸套接触压力异常分布有关;3)油底壳防泡板振裂,测功器紧固螺栓在试验中发生两次断裂。

初步分析产生气缸套和油底壳故障的成因:1)穴蚀由气缸套高频振动引起;2)上述现象共同表明,发动机存在显著的整机振动问题,且气缸套的结构完整性已受到实质性影响。穴蚀是机械振动、流体动力学与结构响应共同作用的复杂结果,因此从气缸套刚度、发动机振动等方面进行系统性排查和分析。

## 2 穴蚀原因分析

### 2.1 气缸套刚度

气缸套材料的强度与刚度是2个独立的设计指标。尽管材料强度满足了抗拉需求,但较薄的气缸套壁直接导致结构刚度下降。在缸内爆发压力与活塞侧推力的周期性作用下,由于刚度不足,气缸套产生较大的弹性变形,这种变形扰动紧邻的冷却液流场,加剧空泡的形成与溃灭,穴蚀风险显著增大。研究表明:当气缸套的变形超过一定阈值时,显著扰乱周围冷却液的流动状态<sup>[5]</sup>。气缸套刚度与穴蚀风险关系分析如表1所示。因此,气缸套刚度不足是本次穴蚀的首要原因。即使材料强度足够,刚度不足仍可引发严重穴蚀问题。

表1 气缸套刚度与穴蚀风险关系分析表

刚度等级	变形特征	对冷却液场影响	穴蚀风险
高刚度	微米级变形,分布均匀	流场稳定,压力变化平缓	低
中等刚度	局部变形明显	流场扰动,局部低压区形成	中
低刚度(本案例)	变形量大,非均匀	强烈涡流,多重空泡生成	高

### 2.2 发动机振动分析

振动是穴蚀的激励源。油底壳裂纹、螺栓断裂等故障现象的原因是整机振动过大。为分析激励载荷对轴系扭振响应的影响规律,排查扭振故障根源,并排查飞轮、减振器等部件的匹配是否合理,搭建发动机轴系扭振模型如图3所示,飞轮转动惯量为 $14 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 时减振器端的扭振分析结果如图4所示。

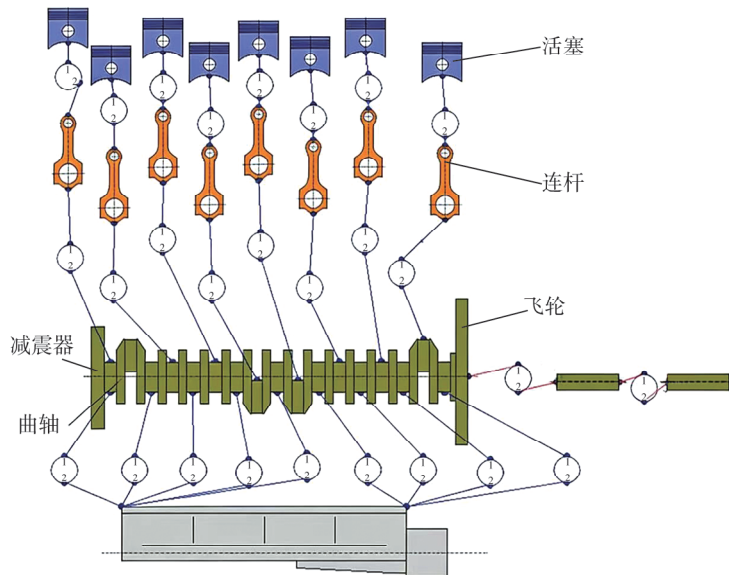


图3 轴系扭振模型

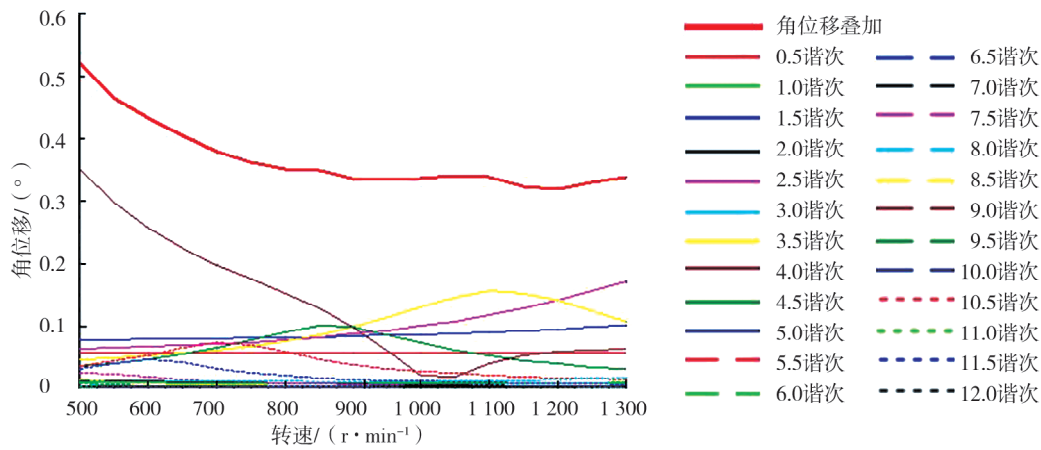


图4 飞轮转动惯量为  $14 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  时减振器端扭振分析结果

由图4可知:原机飞轮转动惯量选型不当,导致发动机在转速为  $500\sim 600 \text{ r/min}$  时,扭振振幅超过阈值( $0.45^\circ$ )。研究表明:重型发动机扭转减振器振幅阈值大于  $0.45^\circ$  后,曲轴轴系交变应力显著上升,裂纹萌生与扩展速率加快,疲劳寿命大幅缩短,极端工况下可能导致曲轴断裂<sup>[6]</sup>。这种强烈的扭转振动通过曲轴-连杆-活塞传递至气缸套,引发其高频径向抖动,为空泡的产生提供了充足的能量,加剧了气缸套穴蚀进程<sup>[7]</sup>。

旋转机械系统中的偏心问题显著破坏系统的周向均匀性<sup>[8]</sup>。飞轮的不平衡质量导致减振器的振幅增大,成为振动的主要激励源。当振动频率与气缸套的固有频率接近时,引发共振,进一步放大振动响应<sup>[9]</sup>。

### 2.3 其他原因分析

通过对安装方式、加工工艺、封水圈结构及冷却水流道(导向角度符合设计手册要求)的逐一排查,安装方式符合文献[4]中凸肩结构和圆角要求;加工工艺与公司原气缸套保持一致,封水圈结构符合文献[4]中结构要求,冷却水流道符合文献[4]中结构要求,确认这些因素均非本次穴蚀的主导原因。虽然船用发动机气缸套长期在高湿、高盐雾的海洋环境中运行,且受冷却水冲击易产生空泡腐蚀,但本试验是在受控的台架环境下进行,且使用标准冷却液,因此可排除环境腐蚀因素。

综上,气缸套刚度不足与整机振动过大是导致该发动机气缸套发生过快穴蚀的两个决定性因素,且二者相互耦合,加剧了破坏进程。当发动机振动传递到刚度不足的气缸套上时,引发更大幅度的变形,进而产生更强烈的空泡溃灭;而且空泡溃灭产生的冲击力又进一步激励气缸套振动,形成恶性循环,最终导致气缸套产生穴蚀故障。

## 3 改进措施

### 3.1 提高气缸套刚度

#### 3.1.1 优化壁厚设计

将气缸套壁厚增加至理论推荐厚度  $0.08D$ ,重新设计机体水腔以保证机体壁厚,优化后壁厚可以满足气缸套刚度要求。

#### 3.1.2 引入表面强化工艺

在加厚的基础上,对外圆表面实施滚压工艺,利用塑性变形引入压应力,进一步提高抗穴蚀能力。

#### 3.1.3 优化载荷传递路径

优化气缸盖通过气缸盖垫片作用的压紧力  $f_1$ ,与机体对气缸套凸肩的支撑力  $f_2$ ,使二者作用中心与气缸套受力面中心重合;调整气缸盖垫片的装配位置,确保气缸套凸肩受力均匀,避免应力集中。气缸套

支撑结构优化如图5所示。这一改进降低了因安装不当导致的附加弯矩,进一步提高了气缸套的实际工作刚度。

### 3.2 抑制发动机振动

对飞轮进行重新选型,在保持接口尺寸不变的前提下,通过增加飞轮厚度以增大飞轮的转动惯量。基于扭振模型重新计算并优化飞轮的转动惯量,飞轮转动惯量为  $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  时减振器端扭振分析结果如图6所示。由图6可知:新飞轮可将工作转速区间的扭振振幅成功抑制在  $0.45^\circ$  的范围以内,从根本上消除了主要的振动激励源。现代研究表明:采用先进的监测技术,如微机电系统加速度传感器,可以有效地检测结构性振动<sup>[10]</sup>,这为后续产品提供了振动监测的可能性。

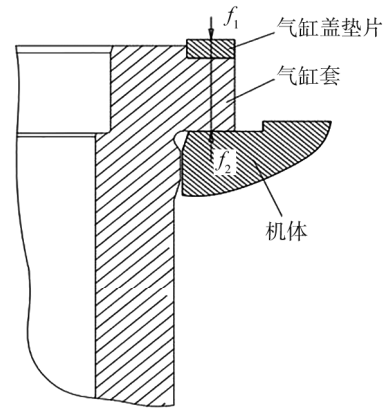


图5 气缸套支撑结构优化

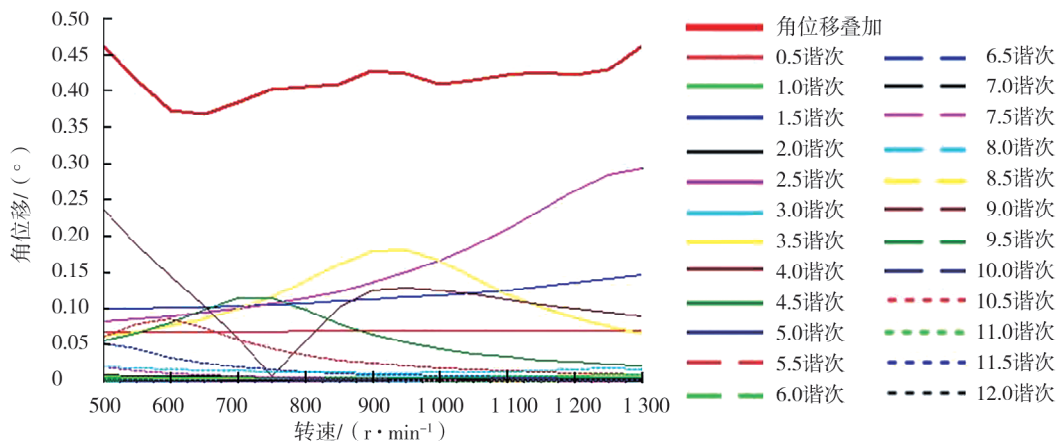


图6 飞轮转动惯量为  $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  时减振器端扭振分析结果

### 3.3 改进效果验证

根据新方案制造样件并完成装机,再次进行同等条件下的 500 h 耐久试验后,拆检结果如图7所示。

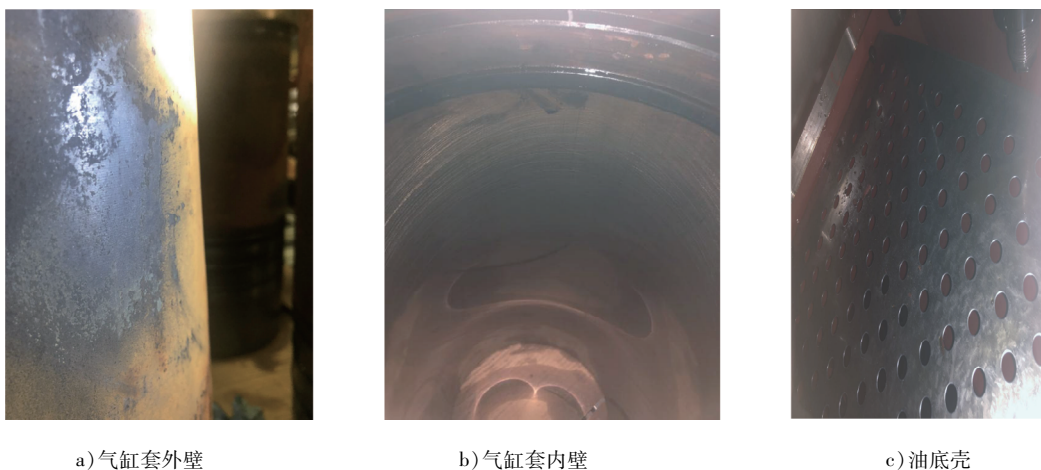


图7 改进后拆检结果图

由图7可知:1)气缸套外壁光滑,未见明显穴蚀痕迹,与改进前的严重穴蚀形成鲜明对比,证明增大刚度和控制振动的措施有效;2)气缸套内壁异常磨损现象消失,表明气缸套的整体工作环境得到改善,变形得到有效控制;3)油底壳、连接螺栓等部位均无裂纹产生,证明整机振动水平已恢复正常范围。

经过 500 h 台架试验后,改进后的气缸套穴蚀面积比改进前减少了 98% 以上,有效控制了穴蚀风险。

实验室测试结果表明:在模拟海洋环境中,采用先进防护涂料涂覆后的气缸套抗空泡腐蚀寿命可达12 000 h(传统涂料为6 000 h)。尽管本研究未采用镀铬涂层等技术,但基础结构的改进已产生显著效果,为后续进一步优化提供了基础。

通过增强气缸套刚度与降低整机振动的联合策略,解决了气缸套穴蚀问题,达到了预期效果。

## 4 结论

1)在发动机气缸套设计中,刚度是与强度同等重要的设计指标。对于高功率密度发动机,必须保证气缸套壁厚在理论推荐范围内,并可采用滚压等表面强化工艺进一步提高其抗穴蚀能力。

2)采用增强气缸套刚度与降低整机振动的联合策略,能够从根本上解决穴蚀问题。

3)结合某扩缸高功率密度发动机开发实践,采用理论分析与试验验证相结合的方法,系统分析气缸套穴蚀机理及防治策略,建立风险评估模型并形成改进方案验证流程,可为气缸套设计、选材及冷却系统优化提供理论支撑与工程借鉴,有助于提高发动机可靠性与市场竞争力。

### 参考文献:

- [1] 李宇寒. 柴油机气缸套穴蚀机理仿真研究[D]. 天津:天津大学,2021.
- [2] 韩峰,刘泉,李宇寒,等. 柴油机气缸套空化现象与空蚀机理分析[J]. 排灌机械工程学报,2024,42(1):49-56.
- [3] 王洪磊,宋鹤,田野. 某型柴油机气缸套穴蚀的原因及预防措施[J]. 广船科技,2023,43(4):62-64.
- [4] 林杰伦. 柴油机设计手册:上[M]. 北京:中国农业机械出版社,1984.
- [5] 李国兴,刘东,魏健龙,等. 重型柴油机湿式气缸套穴蚀损伤差异的数值模拟研究[J]. 内燃机工程,2021,42(6):103-112.
- [6] 赵振东,张英会. 重型发动机扭转振动与减震器设计[J]. 内燃机工程,2015,36(2):121-126.
- [7] 王勇智. 12V265型柴油机气缸套穴蚀问题研究[D]. 大连:大连交通大学,2023.
- [8] 赵西伟,徐小力,赵文祥,等. 旋转机械长历程偏心故障的数值与图形特征获取方法研究[J]. 北京理工大学学报,2016,36(9):893-898.
- [9] 林杰威,李宇寒,刘泉,等. 柴油机冷却水套空化两相流三维瞬态数值模拟研究[J]. 内燃机工程,2021,42(4):84-92.
- [10] CROGNALÉ M, RINALDI C, POTENZA F, et al. Developing and testing high-performance SHM sensors mounting low-noise MEMS accelerometers[J]. Sensors, 2024,24(8):2435.

## Analysis of cavitation in cylinder liner of an engine and its improvement

ZHENG Haopeng<sup>1</sup>, ZHANG Guangfeng<sup>2\*</sup>, ZHANG Cuiyun<sup>2</sup>, ZHANG Zhensheng<sup>2</sup>,  
ZHANG Xinyue<sup>2</sup>, WANG Ruili<sup>2</sup>

1. Marine Comprehensive Support Division, No. 708 Research Institute, China State Shipbuilding Co.,Ltd., Qingdao 266071, China;

2. CNPC Jichai Power Company Limited, Jinan 250306, China

**Abstract:** To address the cavitation failure of cylinder liners occurring during the endurance test of a new-type engine, the causes potentially leading to cylinder liner cavitation are analyzed, including cylinder liner stiffness, engine torsional vibration and other related factors, and corresponding improvement measures are proposed. Subsequently, the improved cylinder liners are assembled on the engine for a 500 h endurance test. The results show that insufficient cylinder liner stiffness and excessive overall engine vibration are the primary factors causing

(下转第111页)

- [11] 韩妮丹,赵阳,董现春,等.矿用自卸车车厢轻量化与有限元模拟[J].机械工程与自动化,2018(3):77-78.
- [12] 肖扬国,张召春,唐笑.某宽体自卸车驾驶室白车身的仿真分析[J].汽车与新动力,2022,5(3):54-56.
- [13] 肖亮,张德坤,周蓓蓓.重型自卸车推力杆支座仿真分析与优化[J].汽车工艺师,2021(12):57-59.
- [14] 王军,沈颖杰,于月琴,等.某纯电动低速车的电池箱设计与分析[J].电池工业,2019,23(6):298-304.
- [15] 戴海燕.锂离子动力电池散热及电池包箱体优化研究[D].广州:华南农业大学,2021.

## Vibration analysis of the carbody for a fixed-body mining truck

ZHANG Yidan<sup>1</sup>, ZHONG Bing<sup>2\*</sup>

1. Qihu Technology (Jinan) Co., Ltd., Jinan 250000, China;

2. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

**Abstract:** To analyze the dynamic characteristics of the carbody for a certain fixed-body mining truck, SolidWorks software is used to establish the geometric model of the carbody. Three typical working conditions, namely full-load bending, full-load extreme torsion and full-load braking, are selected for finite element modal simulation, and the simulation results are compared and analyzed with the road excitation frequency to verify the rationality of the dynamic performance of the carbody. The results show that under the three working conditions of full-load bending, full-load extreme torsion and full-load braking, the maximum deformations of the carbody are about 0.079 mm, 2.968 mm and 2.493 mm respectively, all meeting the requirements of the maximum deformation limit; corresponding to the three working conditions, the maximum stresses of the carbody are 14.996 MPa, 86.108 MPa and 45.663 MPa respectively, all meet the limit regulation that the maximum stress shall not exceed 168 MPa. The road excitation frequency is 14.985 Hz, and the first-order natural frequency of the carbody is 19.161 Hz. The natural vibration frequency of the carbody successfully avoids the external excitation frequency, effectively reducing the occurrence of coupling resonance and ensuring good operational stability of the mining truck carbody.

**Keywords:** mining truck carbody; finite element analysis; modal simulation; deformation; resonance

(责任编辑:胡晓燕)

(上接第104页)

cylinder liner cavitation, and the coupling effect between the two further accelerates the cavitation process. Increasing the cylinder wall thickness, adopting rolling process on the outer wall and shoulder surface of the cylinder liner, and adjusting the position of cylinder gaskets can effectively improve the cylinder liner stiffness. Optimizing the flywheel moment of inertia can eliminate the main vibration excitation source of the engine and reduce engine vibration. After the engine endurance test, the outer walls of the cylinder liners remain smooth and no abnormal wear is found on the inner walls, indicating that the cylinder liner cavitation failure has been completely resolved.

**Keywords:** diesel engine design; cylinder liner cavitation; stiffness analysis; rolling technology; engine vibration; structure improvement

(责任编辑:刘丽君)