

柴油机气缸套穴蚀分析及预防措施

李玉强^{1,2}, 戴雨华^{1,2}, 朱永杰^{1,2}, 周涛^{1,2}

1. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为解决某市场验证返回的六缸柴油机气缸套外壁出现的穴蚀问题,参考AVL评估方法,采用Abaqus软件和Joukowsky模型仿真分析气缸套主推力侧12个测点的穴蚀情况;在此基础上对活塞型线以及水泵性能进行优化,并对优化方案进行仿真和市场验证。结果表明:测点4~12的冷却液瞬时压力均小于饱和蒸气压,气缸套主推力侧存在穴蚀风险,风险位置与实际穴蚀位置基本吻合;优化活塞型线后,活塞对气缸套的敲击速度最大波动由0.202 m/s降低到0.151 m/s,有效减小了气缸套振动;提高水泵性能后,气缸套外壁冷却液压力升高了46 kPa;优化后的方案通过了市场试验。针对气缸套穴蚀问题,除了传统方法外,还可从优化活塞裙部型线以抑制缸套振动、提高水泵性能以增大冷却液压力两方面入手,两者共同作用可有效降低气缸套穴蚀风险。

关键词:气缸套;振动;穴蚀;改进措施

中图分类号: Tk428

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2026)01-0093-06

引用格式:李玉强,戴雨华,朱永杰,等. 柴油机气缸套穴蚀分析及预防措施[J]. 内燃机与动力装置, 2026, 43(1): 93-98.

LI Yuqiang, DAI Yuhua, ZHU Yongjie, et al. Analysis of cavitation in diesel engine cylinder liners and its preventive measures[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2026, 43(1): 93-98.

0 引言

在柴油机运行过程中,气缸套承受由缸内爆发压力和活塞侧向力共同施加的冲击载荷,工作环境极为恶劣。随着发动机向大功率、高功率密度方向发展,增大缸孔内径、缩小缸心距已成为柴油机普遍采用的设计方案。这一设计趋势导致抑制气缸套振动更加困难,增加了气缸套穴蚀的风险。因此,深入研究抑制气缸套振动和解决气缸套穴蚀问题的方法,对于提高柴油机的可靠性具有重要现实意义。

关于气缸套穴蚀,已有较多研究:文献[1-3]通过仿真手段分析了气缸套穴蚀的形成机理;文献[4-5]的研究结果表明,冷却水腔宽度及冷却液温度是造成气缸套穴蚀的重要影响因素;文献[6-10]通过优化气缸套结构强度、活塞与气缸套配合间隙、冷却液水质、冷却水腔结构等措施,有效解决了气缸套穴蚀问题。然而,现有研究中针对通过优化活塞结构及调整水套压力来抑制穴蚀的研究较少。为此,本文中针对某柴油机拆检中发现的气缸套表面穴蚀问题开展仿真分析,确定故障原因,并从活塞型线设计和水泵性能两方面提出改进措施,同时对优化方案进行验证。

1 故障描述及原因

某六缸柴油机经市场验证后返厂拆检,发现气缸套发生穴蚀故障,表现为主推力面(主推力侧)中、下部出现连续蜂窝状凹坑,故障现象如图1所示。

气缸套的强烈振动是导致穴蚀发生的直接原因。高速往复运动的活塞持续冲击气缸套内壁,引起气

收稿日期: 2025-09-29

第一作者简介: 李玉强(1993—),男,山东潍坊人,工学硕士,工程师,主要研究方向为内燃机设计, E-mail: liyuqiang@weichai.com。

缸套高频振动,进而导致周围冷却液压力剧烈波动。当冷却液瞬时压力低于冷却液饱和蒸气压时,冷却液析出气泡;当瞬时压力回升至饱和蒸气压以上时,气泡迅速溃灭。气泡溃灭过程中产生的高压冲击波持续作用于气缸套表面,最终导致其金属表面疲劳剥落,形成穴蚀,表现为连续的蜂窝状凹坑^[11]。

在气缸套主推力侧接触冷却液的外壁上选取 12 个测点,根据该柴油机原设计方案和实际运行常用工况,参考 AVL 评估方法,采用 Abaqus 软件和 Joukowsky 模型对气缸套穴蚀进行仿真分析。气缸套表面测点位置如图 2 所示。



图 1 气缸套主推力侧穴蚀现象

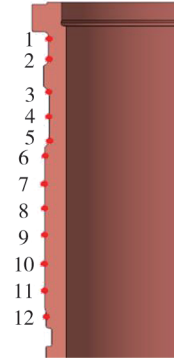


图 2 气缸套表面测点位置

根据 Joukowsky 模型,以 kPa 为单位的冷却液瞬时压力波动幅值 Δp 的数值

$$\{\Delta p\} = \{\Delta v\} \{\rho\} \{C\},$$

式中: $\{\Delta v\}$ 为以 m/s 为单位的冷却液受活塞敲击后的速度变化幅值 Δv 的数值; $\{\rho\}$ 为以 kg/m^3 为单位的冷却液密度 ρ 的数值; $\{C\}$ 为以 m/s 为单位的压力波传播速度 C 的数值。

冷却液瞬时压力

$$p_s = p - \Delta p,$$

式中: p 为冷却系统静压力,kPa。

若 p_s 小于冷却液饱和蒸汽压力 p_b ,冷却液析出气泡,产生穴蚀风险。

该型柴油机实际运行常用工况下,气缸套主推力侧 12 个测点穴蚀仿真结果如表 1 所示。

表 1 常用工况下气缸套主推力侧穴蚀仿真结果

部位	测点	$\Delta v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta p/\text{kPa}$	p/kPa	p_b/kPa	p_s/kPa	是否有 气泡析出	是否有 穴蚀风险
上部	1	0.165	1 023.3	1 836	300.0	351	34.4	51.0	否	否
	2	0.162	1 023.3	1 836	304.3	351	34.4	46.7	否	否
中部	3	0.158	1 023.3	1 836	296.8	351	34.4	54.2	否	否
	4	0.171	1 023.3	1 836	321.3	351	34.4	29.7	是	是
	5	0.180	1 023.3	1 836	338.2	351	34.4	12.8	是	是
	6	0.185	1 023.3	1 836	347.6	351	34.4	3.4	是	是
下部	7	0.193	1 023.3	1 836	362.6	351	34.4	-11.6	是	是
	8	0.202	1 023.3	1 836	379.5	351	34.4	-28.5	是	是
	9	0.197	1 023.3	1 836	370.1	351	34.4	-19.1	是	是
	10	0.183	1 023.3	1 836	343.8	351	34.4	7.2	是	是
	11	0.177	1 023.3	1 836	332.5	351	34.4	18.5	是	是
	12	0.169	1 023.3	1 836	317.5	351	34.4	33.5	是	是

由表1可知:测点4~12的冷却液瞬时压力均小于饱和蒸气压,气缸套主推力侧中、下部位置存在穴蚀风险,与实际拆检结果基本吻合。

2 活塞型线及水泵优化

2.1 活塞裙部型线

活塞裙部为上下往复运动的活塞提供导向,在爆压和偏心作用下,活塞裙部不断敲击气缸套,产生侧向力。合理的活塞裙部型线能够降低活塞对气缸套的敲击,减小气缸套振动^[12]。

为减小气缸套振动,在原活塞方案基础上优化活塞裙部型线,优化位置如图3所示。优化方案为:1)0°方向(活塞主推力侧),减小活塞高度小于10 mm以及大于45 mm区间的裙部直径;2)顺、逆时针30°和45°方向,保持活塞底部直径不变,增大活塞高度小于40 mm区间的裙部直径,并进一步减小活塞高度大于40 mm部分的裙部直径。活塞裙部型线优化方案如图4所示, Δd 为优化后活塞直径相对原方案的变化幅值,单位为mm。由图4可知:优化后的活塞型线更加平缓。

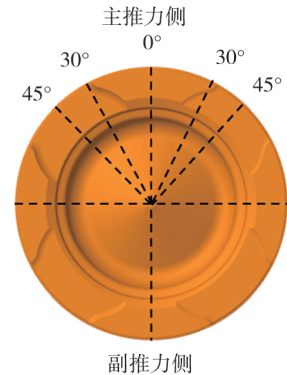


图3 活塞裙部型线优化位置

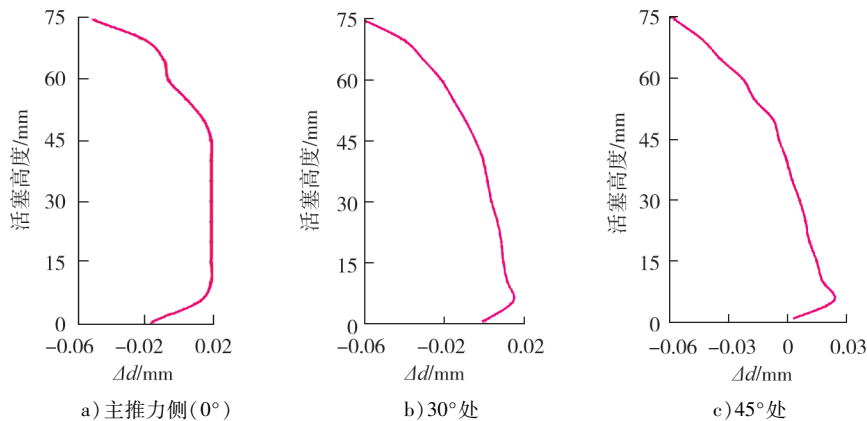


图4 活塞裙部型线优化

仿真对比原活塞和优化后活塞在气缸套测点8处的敲击速度,结果如图5所示。由图5可知:通过优化裙部型线,活塞对气缸套的敲击速度波动最大幅值由0.202 m/s降低到0.151 m/s,有效减小了气缸套振动。

2.2 水泵性能的影响

发动机冷却系统中,水泵对冷却液加压,驱动其在冷却系统中循环流动,对发动机进行降温,其冷却原理如图6所示。当发动机工作时,曲轴皮带轮带动水泵旋转,将冷却液泵入发动机内部。随后冷却液分为两路:一路流经机油冷却器,对机油进行冷却;另一路进入机体内部的冷却水道,对机体进行冷却,之后通过机体与缸盖的串水孔进入缸盖水腔,对缸盖实施冷却。完成对缸盖的冷却后,冷却液汇集到发动机出水管中,经过液力缓速器冷却器及相关水管,最终回流至节温器。节温器的另外两端分别连接水泵进水口和冷却水箱进水管,形成完整的冷却回路。

冷却系统中,冷却液温度由节温器自动调节,将水温控制在合适温度:小循环时,冷却液直接进入水泵进水口,使柴油机迅速升温,快速达到正常运行所需的热状态;大循环时,冷却液经过水箱散热器进行

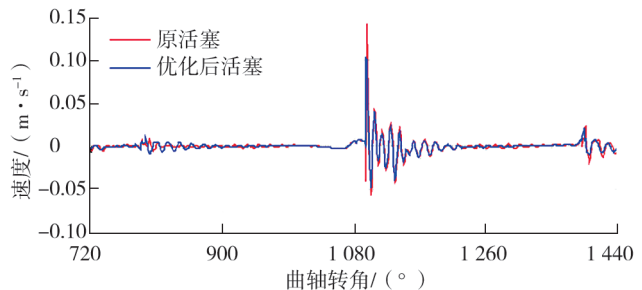


图5 原活塞和优化后活塞在测点8处的敲击速度

散热,维持整个发动机热平衡。

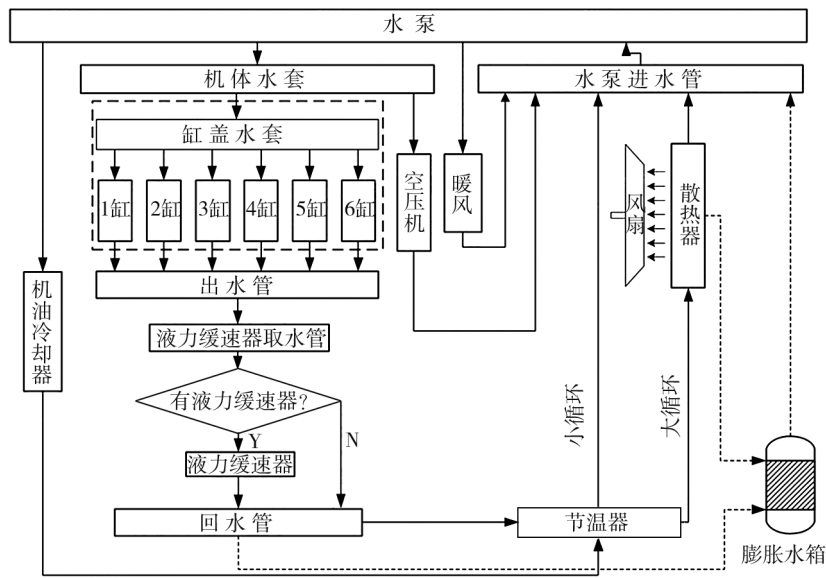


图6 发动机冷却系统原理图

机体-缸盖-出水管结构示意图如图7所示。由第1章分析可知,提高机体水套冷却液压力能直接减少气泡析出,进而降低气缸套穴蚀的风险。由图6、7可知:机体水套与水泵、缸盖水套相连通,缸盖水套进一步与出水管相接,因此通过提升水泵性能,可有效提高流经机体水套的冷却液压力。

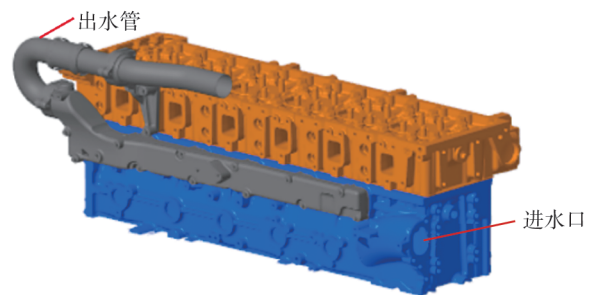


图7 机体-缸盖-出水管结构示意图

通过提高水泵速比,即提高水泵的扬程和流量,可提高出水管压力。在连通的封闭冷却循环系统中,机体水套内部的压力随水泵出口压力的增大而升高。

采取提高水泵速比和对出水管进行节流的方法提高出水管压力,并与原出水管压力进行仿真对比,结果如图8所示。

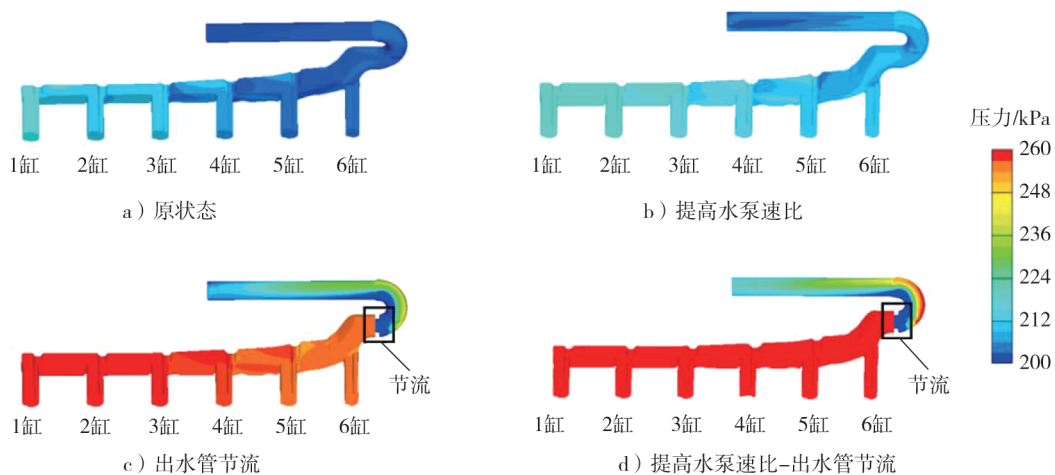


图8 出水管压力仿真对比

由图8可知:相比原状态,单独提高水泵速比或对出水管进行节流,都可以增大出水管压力;同时采取提高水泵速比和出水管节流两种措施后,出水管压力大幅提高,升幅大于46 kPa;且压力分布更加

均匀。

3 优化方案仿真及试验验证

基于该型柴油机实际运行的常用工况,对优化活塞裙部型线和水泵性能后的气缸套主推力侧穴蚀情况进行仿真验证,结果如表2所示。

表2 优化后气缸套主推力侧穴蚀仿真结果

部位	测点	$\Delta v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta p / \text{kPa}$	p / kPa	p_b / kPa	p_s / kPa	是否有 气泡析出	是否有 穴蚀风险
上部	1	0.122	1 023.3	1 836	229.2	400	34.4	170.8	否	否
	2	0.119	1 023.3	1 836	223.6	400	34.4	176.4	否	否
中部	3	0.117	1 023.3	1 836	219.8	400	34.4	180.2	否	否
	4	0.129	1 023.3	1 836	242.4	400	34.4	157.6	否	否
	5	0.139	1 023.3	1 836	261.2	400	34.4	138.8	否	否
	6	0.142	1 023.3	1 836	266.8	400	34.4	133.2	否	否
	7	0.147	1 023.3	1 836	276.2	400	34.4	123.8	否	否
	8	0.151	1 023.3	1 836	283.7	400	34.4	116.3	否	否
下部	9	0.148	1 023.3	1 836	278.1	400	34.4	121.9	否	否
	10	0.135	1 023.3	1 836	253.6	400	34.4	146.4	否	否
	11	0.129	1 023.3	1 836	242.4	400	34.4	157.6	否	否
	12	0.125	1 023.3	1 836	234.8	400	34.4	165.2	否	否

由表2可知:所有测点的冷却液压力均显著大于饱和蒸汽压,冷却液中无气泡析出,气缸套无穴蚀风险,优化效果明显。

按优化方案实施改进后进行市场应用验证。对市场返回的柴油机进行拆检,发现气缸套主推力侧表面良好,无蜂窝状穴蚀凹坑,表明优化措施可行,有效解决了气缸套穴蚀问题。

4 结论

参考 AVL 评估方法,采用 Abaqus 软件和 Joukowsky 模型,对某柴油机气缸套主推力侧穴蚀情况进行仿真分析,得到以下结论。

1) 测点 4~12 的冷却液瞬时压力均小于饱和蒸气压,气缸套主推力侧存在穴蚀风险,风险位置与实际穴蚀位置基本吻合。

2) 优化活塞裙部型线后的仿真结果表明,活塞对气缸套的敲击速度的最大波动由 0.202 m/s 降低到 0.151 m/s,有效减小了缸套振动。采用提高水泵速比并对出水管进行节流以提高水泵性能,仿真结果表明出水管压力提高了 46 kPa,且压力分布更加均匀。优化活塞裙部型线和水泵性能后的气缸套主推力侧穴蚀仿真结果表明,所有测点的冷却液压力均显著大于饱和蒸气压,冷却液中无气泡析出,气缸套无穴蚀风险,且通过了市场验证。

3) 针对气缸套穴蚀问题,除了提高气缸套强度、减小活塞与气缸套配合间隙、提高冷却液水质、改善冷却液水腔结构等传统方法外,还可从优化活塞型线以抑制缸套振动、提高水泵性能以增大冷却液压力两方面入手。两者共同作用,可有效减少冷却液中气泡的析出,降低气缸套穴蚀风险。

参考文献:

- [1] 刘东,黄国龙,孙世磊,等.活塞敲击引起的缸套振动响应对缸套水侧空化的影响研究[J].车用发动机,2021(2):64-70.
- [2] 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.
- [3] 韩峰,刘泉,李宇寒,等.柴油机气缸套空泡溃灭现象与空蚀机理研究[J/OL].排灌机械工程学报.[2026-01-08].
<https://link.cnki.net/urlid/32.1814.TH.20230525.0734.002>.
- [4] 李宇寒.柴油机气缸套空蚀机理仿真研究[D].天津:天津大学,2021.
- [5] 刘东.重型柴油机湿式缸套穴蚀损伤的数值模拟研究[D].太原:太原理工大学,2021.
- [6] 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.
- [7] 胡达,仝世豪,周唯,等.船用柴油机气缸体密封位腐蚀修补工艺研究[J].设备管理与维修,2025(21):173-178.
- [8] 王必改.船舶发电柴油机缸套穴蚀的原因分析与探讨[J].内燃机,2021(4):31-34.
- [9] 李国兴,刘东,魏健龙,等.重型柴油机湿式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.
- [10] 孙永兴.筒形活塞柴油机气缸套穴蚀的力学分析[J].大众标准化,2020(17):189-190.
- [11] 李国兴,刘东,刘培毓,等.内燃机缸套穴蚀预测与抑制研究综述[J].重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(3):1-12.
- [12] 宋娇,赵忠诚,田新伟,等.柴油机活塞裙面型线设计分析[J].内燃机与动力装置,2020,37(5):65-71.

Analysis of cavitation in diesel engine cylinder liners and its preventive measures

LI Yuqiang^{1,2}, DAI Yuhua^{1,2}, ZHU Yongjie^{1,2}, ZHOU Tao^{1,2}

1. State Key Laboratory of Engine and Power System, Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: To address the cavitation issue on the outer wall of the six-cylinder diesel engine cylinder liner returned from market validation, the AVL evaluation method is referenced. Simulation analysis is conducted on the cavitation conditions of 12 measurement points on the main thrust side of the cylinder liner by using Abaqus software and the Joukowski model. On this basis, the piston skirt profile and water pump performance are optimized, and the resulting solutions are validated through simulation and market testing. The results show that the instantaneous coolant pressure at measurement points 4-12 are all below the saturation vapor pressure, indicating a risk of cavitation on the main thrust side of the cylinder liner, which matches the actual cavitation locations. Following the optimization of the piston skirt profile, the peak fluctuation in piston impact velocity on the cylinder liner is reduced from 0.202 m/s to 0.151 m/s, thereby effectively mitigating cylinder liner vibration. In addition, the improvement in water pump performance leads to a 46 kPa increase in coolant pressure on the outer wall of the cylinder liner. The optimized solution passes market testing. For cylinder liner cavitation issues, in addition to traditional methods, approaches such as optimizing the piston skirt profile to suppress cylinder liner vibration and enhancing water pump performance to increase coolant pressure can be adopted. These two methods working together can effectively mitigate cylinder liner cavitation risks.

Keywords: cylinder liner; vibration; cavitation; improvement measures

(责任编辑:臧发业)