

发动机铸铝件气密检测方法的可靠性研究

肖培发^{1,2}, 李正现^{1,2}, 郭永强^{1,2}, 王志磊^{1,2}, 魏红玲^{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:为提高发动机铸铝零部件气密检测的可靠性并降低试车泄漏故障率,设计试验方案,通过试验分析水检法与差压测试法协同气密检测、高温水检法的可靠性。结果表明:合格铸铝件的首测压差范围为336~354 Pa,复测压差范围为260~281 Pa,二者差异较大;根据压差判断的泄漏结果与观察结果存在不一致的情况,水检法与差压测试法协同气密检测的可靠性较低,不适用于铸铝件气密检测;水温升高后,铸铝件的泄漏现象加剧,并识别出新漏点,高温水检法有效提高了铸铝件气密检测的可靠性。

关键词:铸铝件;水检法;差压测试法;可靠性

中图分类号:TK406

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2026)01-0056-06

引用格式:肖培发,李正现,郭永强,等.发动机铸铝件气密检测方法的可靠性研究[J].内燃机与动力装置,2026,43(1):56-61.

XIAO Peifa, LI Zhengxian, GUO Yongqiang, et al. Reliability study on airtightness testing methods in cast aluminum engine components[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2026, 43(1): 56-61.

0 引言

汽车行业的快速发展对发动机轻量化提出了更高要求^[1]。铝合金凭借较高的比强度和比刚度,广泛应用于发动机零部件,如进气管、进水管、出水管等^[2-3]。由于铝合金溶液易氧化、易吸氢,在铝质零部件铸造过程中,易出现缩松、针孔等铸造缺陷^[4-5],为满足发动机工作过程中的密封要求,铸铝件出厂前必须进行气密检测^[6]。目前,铸铝件常用的气密检测方法有水检法和差压测试法两种。水检法将密闭铸铝件浸入水中,充入一定压力的气体,观测有无气泡产生。此方法可识别漏点,但是检测精度较低(仅为 $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ^[7]),且由于缩松、针孔的孔径微小,在漏点处难以形成连续气泡,观测难度较大,错判率较高,后续发动机试车过程中泄漏故障时有发生。差压测试法利用压差传感器连接标准件与被试件,通过检测稳压后两者的压力差判断是否泄漏^[8]。该方法操作简单且检测精度高(高达 $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ^[9]),但无法识别漏点,不利于铸铝件的后期修复再利用。为提高铸铝件气密检测可靠性和降低发动机试车泄漏故障率,本文中从两种技术路线入手,研究提高铸铝件气密检测有效方法:1)为克服水检法精度低但漏点直观、差压测试法精度高但无法识别漏点的缺点,试验分析水检法与差压测试法协同气密检测的可靠性;2)针对当前水检法使用的常温水与发动机试车时的冷却液温度($75 \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[10])差异较大的问题,试验分析高温水检法气密检测的可靠性。

1 水检法与差压测试法协同气密检测的可靠性分析

1.1 试验原理

水检法与差压测试法协同气密检测试验原理及检测过程如图1所示。储气罐内空气经调压阀调整

收稿日期:2025-11-10

基金项目:山东省重点研发计划项目(2024CXPT067)

第一作者简介:肖培发(1994—),男,山东新泰人,工学硕士,工程师,主要研究方向为发动机结构分析,E-mail:xiaopeifa@weichai.com。

至设定压力,通过控制阀 1 进入标准件与铸铝件,其中铸铝件应全程浸入水中,待两者压力平衡后关闭控制阀 1,保压 30 s,若压差传感器输出的压差不在允许范围内,则判定铸铝件出现泄漏,再针对性观察水池中气泡以确定漏点位置,最后通过控制阀 2 执行放气操作。检测过程中,该方法既能利用传感器提高检测准确性,又能识别漏点便于后续对铸铝件的修复再利用,缩短检测时间,保证生产节拍。

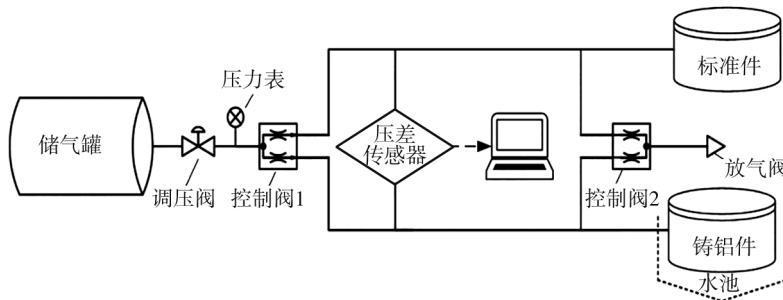


图 1 水检法与差压测试法协同气密检测试验原理及检测过程

试验采用 AL-900 系列差压式空气泄漏测试仪(简称差压测试仪),其内部集成控制阀、压差传感器、标准件,测量范围为 0~0.9 MPa,分辨率为 0.1 Pa。

被测铸铝件为某发动机进气歧管,其材料牌号为 ZL107-GB/T1173,采用重力铸造工艺浇铸而成。检测时将铸铝件浸入水中,端口采用橡胶块封堵以保证密封,橡胶块连接气管,实现充、放气功能。铸铝件模型及其检测时的安装状态如图 2 所示。



图 2 铸铝件模型及其检测时的安装状态

1.2 试验方案

1) 选取 7 件水检法检测合格的铸铝件,分别编号 1~7,按编号依次进行协同气密检测,测试合格铸铝件的压差。

2) 选取 1~4 号铸铝件复测,对比首测压差,验证协同气密检测稳定性。

3) 选取 3 件水检法检测不合格的铸铝件,分别编号 8~10,测试其压差并与合格铸铝件的压差进行对比,结合漏点处的气泡大小、生成速率验证检测方法的可靠性。

1.3 试验结果分析

1.3.1 合格铸铝件压差范围分析

经协同气密检测,1~7 号合格铸铝件输出的压差如图 3 所示。由图 3 可知:合格铸铝件的压差范围为 336~354 Pa,且总体呈下降趋势。

理想气体定律为:

$$pV = nRT, \quad (1)$$

式中: p 为气体压力,Pa; V 为气腔体积, m^3 ; n 为气体物质的量,mol; R 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为气体热力学温度,K。

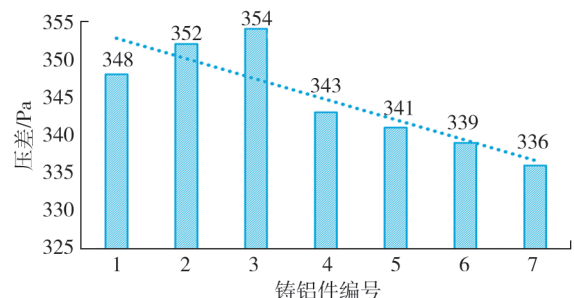


图 3 合格铸铝件压差

当 V 、 n 不变时, p 与 T 的比不变, 即

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \frac{p_2 - p_1}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta p}{\Delta T}, \quad (2)$$

式中: Δp 为气体压差, ΔT 为气体温差。

检测过程中, 由于铸铝件始终浸于水中且水温低于铸铝件本体的温度, 因而铸铝件内部气体温度逐渐降低, 结合式(2)可知, 铸铝件内部气体压力也逐渐降低。但标准件集成在差压测试仪内部, 始终处于室温环境下, 其内部气体无压降损失, 所以合格铸铝件与标准件之间存在较大的压差。随着检测的进行, 与铸铝件连接的气管浸入水中的时间增加, 进入待测铸铝件的气体温度较先前进入被测铸铝件的气体温度低, 使得气体温差减小, 所以压差呈下降趋势。

1.3.2 协同气密检测稳定性分析

为验证协同气密检测稳定性, 10 min 后复测 1~4 号铸铝件, 检测结果如图 4 所示。由图 4 可知: 1~4 号铸铝件复测压差范围为 260~281 Pa, 低于首测压差。原因为: 铸铝件首测浸水后的本体温度降低, 复测时其内部气体温度低于首测时温度, 所以复测压差低于首测压差。

1.3.3 压差与泄漏现象匹配分析

8~10 号不合格铸铝件的协同气密检测输出压差分别为: 622、339、328 Pa。8~10 号不合格铸铝件协同

气密检测的泄漏现象如图 5 所示, 图 5b) 中 t_1 、 t_2 、 t_3 为连续时刻。由压差结果和图 5 可知: 1) 8 号件的压差为 622 Pa, 远超出合格铸铝件首测压差范围, 根据压差可判定为不合格; 实际检测中观察到连续气泡, 气泡速率快、数量多, 漏点明显。2) 9 号件的压差为 339 Pa, 在首测合格铸铝件压差范围内, 根据压差可判定为合格; 但实际存在泄漏现象, 为单一连续气泡。3) 10 号件的压差为 328 Pa, 低于合格铸铝件首测压差范围, 可判定合格; 但实际存在渗漏现象, 气体在漏点处慢慢聚积形成气泡, 气泡不连续。

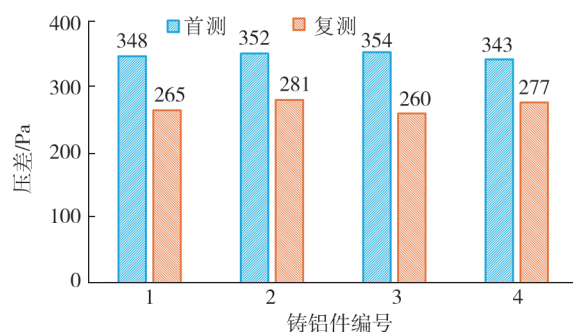


图 4 合格铸铝件首测、复测压差对比

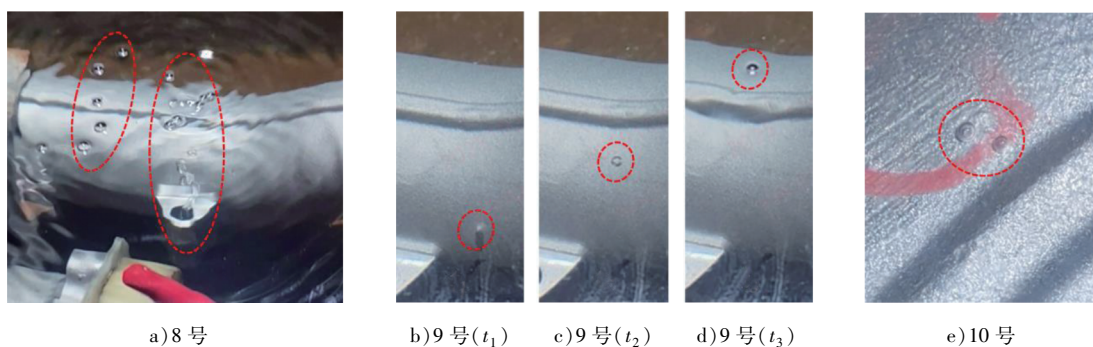


图 5 不合格铸铝件泄漏现象

水检法与差压测试法协同气密检测过程中, 出现根据压差判断的泄漏结果与观察结果不一致的情况, 因此该法的可靠性低, 不适合铸铝件的气密检测。

2 高温水检法气密检测可靠性分析

2.1 试验准备

以某发动机出水管为试验对象进行高温水检法气密检测。出水管为铸铝材质, 其牌号为 ZL107-GB/T1173, 采用重力铸造工艺浇铸而成, 其模型如图 6 所示。高温水检法气密检测装置如图 7 所示, 其内部安装有温控单元、加热装置, 水温可调, 具备高温与常温的气密检测能力。

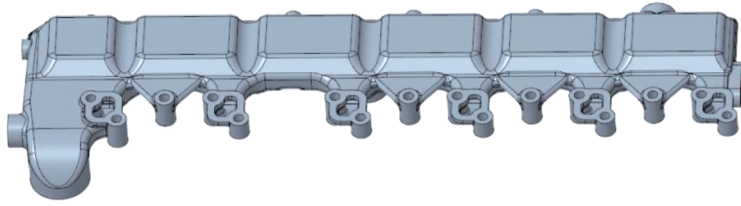


图6 铸铝件模型



图7 高温水检法气密检测装置

2.2 试验方案

1) 发动机试车时冷却液温度为 75~90 ℃。气密检测时,水温过高易导致沸腾影响观测,并且对气管、工装的耐温要求更高;水温过低则难与发动机试车水温契合。因此,高温水检法气密检测的水温设定为 75 ℃。

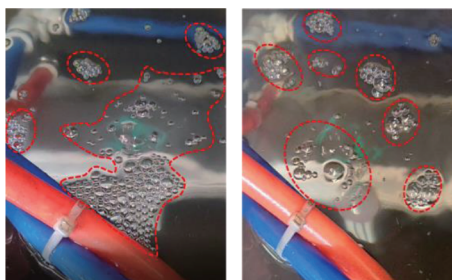
2) 选取 5 件不合格铸铝件,分别编号 11~15,观察其在常温水、高温水(75 ℃)中的泄漏现象,根据气泡大小、形状、生成速率验证升高水温是否有利于漏点识别。

3) 随机选取 5 件常温水检法检测合格的铸铝件,分别编号 16~20,测试水温升高后能否检测出常温水检法测不出的漏点,验证高温水检法的可靠性。

2.3 试验结果及分析

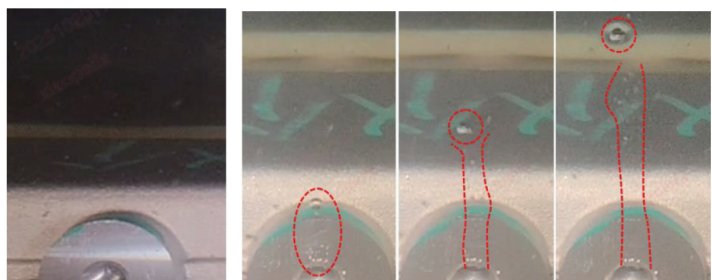
2.3.1 不合格铸铝件检测结果

11~15 号铸铝件水温升高前、后泄漏现象如图 8~12 所示。由图 8~12 可知:1) 水温升高后,11~15 号铸铝件的气体泄漏均有不同程度的加剧;2) 升温后,11 号件的气泡增大,泄漏中心无小气泡积聚;3) 12 号件在升温前无漏点(漏点小,常温水检复现率低),升温后观察到连续小气泡,但无气泡积聚;4) 13 号件由升温前的泄漏中心小气泡的小范围积聚变为升温后的大气泡大范围扩散,且检测出新漏点;5) 升温后,14 号与 15 号件泄漏中心的气泡均有不同程度的扩散。



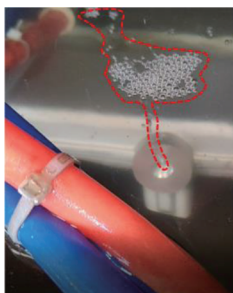
a) 常温 b) 高温

图8 11号件升温前、后泄漏对比



a) 常温 b) 高温(t₁) c) 高温(t₂) d) 高温(t₃)

图9 12号件升温前、后泄漏对比

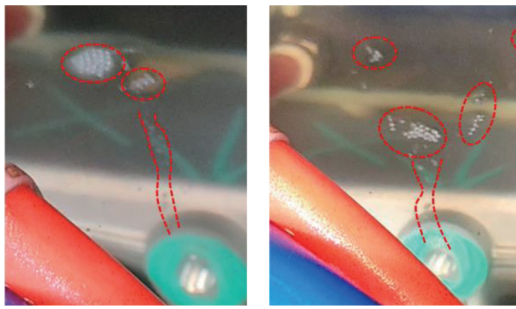


a) 常温

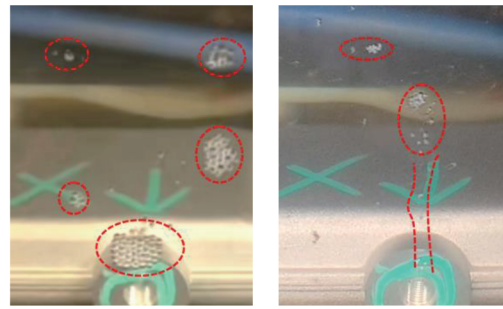


b) 高温

图10 13号件升温前、后泄漏对比



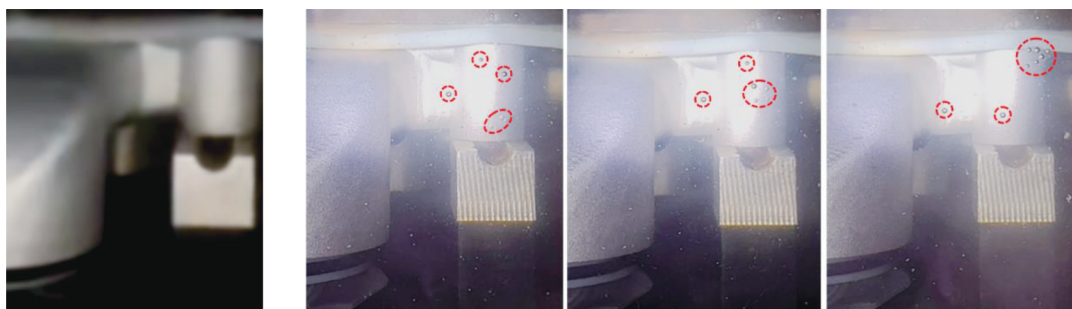
a) 常温
b) 高温
图 11 14号件升温前、后泄漏对比



a) 常温
b) 高温
图 12 15号件升温前、后泄漏对比

2.3.2 合格铸铝件检测结果

水温升高后, 16号、17号、18号、20号铸铝件均未发现漏点, 与常温水检法下合格件检测结果一致。但19号铸铝件在升温后出现漏点, 如图13所示。待水温降低后对19号铸铝件进行常温复测, 未出现漏点。



a) 常温
b) 高温 t_1
c) 高温 t_2
d) 高温 t_3

图 13 19号件升温前、后泄漏对比

2.4 高温水检法的可靠性

由第2.3节试验现象可知: 水温升高后, 铸铝件泄漏现象加剧, 可检测出常温水检法测不出的漏点。原因为: 1) 铝的热膨胀系数($2.79 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$)远高于普通铸铁($1.1 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$)^[11-12], 水温升高后, 铸铝件中的缩松、针孔等微小缺陷扩大; 2) 升温使铸铝件内部气体压力增大, 并使水分子动能增加, 均有利于气泡的产生, 有效提高了铸铝件气密检测可靠性。

3 结束语

1) 水检法与差压测试法协同气密检测过程中, 由于铸铝件全程浸于水中, 内部气体温度降低引起压差远大于微小泄漏引起的压差, 且压差传感器灵敏度高、受外界环境影响大、错判率高, 因此协同检测可靠性低, 不适用于铸铝件气密检测。

2) 水温升高使得铸铝件的缩松、针孔等缺陷扩大, 且其内部压力增大, 水分子动能增加, 微小漏点引起的泄漏现象加剧, 漏点识别率高, 可有效提高铸铝件气密检测可靠性, 从而降低发动机试车泄漏故障率。

参考文献:

- [1] 赵文彬, 齐伟, 胡琦山, 等. 发动机机体加强板轻量化设计[J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(1): 47-52.

- [2] 赵伟卫. 汽车零部件的轻量化设计与制造工艺[J]. 时代汽车, 2025(2): 163-165.
- [3] 王晓秋. 进气歧管铸造过程模拟及工艺优化的研究[D]. 上海: 上海大学, 2006.
- [4] 罗传彪, 杜旭初, 樊振中, 等. 铸造工艺对ZL114A铝合金铸件性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(6): 652-656.
- [5] 张云峰, 丛培军, 张鹏, 等. 重力倾转铸造工艺在铝合金底盘结构件上的应用[J]. 铸造, 2021, 70(8): 980-985.
- [6] 杨松, 于爱兵, 孙磊. 汽车发动机EGR冷却器气密性检测设备设计[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(6): 168-172.
- [7] 张万雷. 复杂零件腔体气密性检测关键技术研究及系统开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [8] 葛锐, 许春进. 某发动机冷却系统高温故障分析及改进研究[J]. 内燃机, 2022, 38(3): 58-62.
- [9] 齐宝丹, 侯帅, 蒋剑雄, 等. 某艇用发动机冷却系统分析及优化[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(5): 62-67.
- [10] 葛锐, 张傲, 许春进. 某国六发动机高温故障的分析与研究[J]. 柴油机设计与制造, 2025, 31(2): 48-53.
- [11] JOHNSON M, ERIKSSON L. Thermal expansion of Al and TiB₂ in the temperature range 300 to 900 K and calculated lattice fit at the melting temperature for Al[J]. International Journal of Materials Research, 1998, 89: 478-480.
- [12] 伍启华, 李娜娜, 王健, 等. 发动机缸盖用蠕墨铸铁高温性能研究[J]. 铸造, 2025, 74(1): 33-37.

Reliability study on airtightness testing methods in cast aluminum engine components

XIAO Peifa^{1,2}, LI Zhengxian^{1,2}, GUO Yongqiang^{1,2},
WANG Zhilei^{1,2}, WEI Hongling^{1,2}

1. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China; 2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to enhance the reliability of airtightness testing for engine cast aluminum components and reduce the leakage failure rate during test runs, a test plan is designed to analyze the reliability of collaborative airtightness testing using water inspection and differential pressure testing methods, as well as high-temperature water inspection method. The results show that the initial pressure difference range for qualified cast aluminum parts is 336-354 Pa, and the retest pressure difference range is 260-281 Pa, with a significant difference. There are inconsistencies between the leakage results determined based on pressure difference and the observed results. The collaborative airtightness testing using water inspection and differential pressure testing methods had low reliability and is not suitable for airtightness testing of cast aluminum parts. As the water temperature increased, the leakage phenomenon of cast aluminum parts intensified, and new leakage points are identified, effectively improving the reliability of airtightness testing for cast aluminum parts.

Keywords: cast aluminum components; water immersion method; differential pressure testing method; reliability

(责任编辑: 臧发业)