

发动机进气歧管支架疲劳开裂分析与优化

王振 张育春 李文辉 贺礼

(宁波吉利罗佑发动机零部件有限公司, 宁波 315336)

【摘要】针对某 1.5 L 自然吸气发动机在台架试验过程中出现进气歧管固定支架开裂的问题,开展了原因分析及设计优化。电镜分析结果表明,开裂支架断口处存在疲劳辉纹,经发动机台架振动测试及试验边界排查发现进气歧管远端振动大导致共振是支架开裂的主要原因,将支架材料由 SUH409L 调整为 QT500,并进行了仿真及试验验证,进气歧管支架均未发生开裂现象,确定了方案的有效性。

关键词: 进气歧管支架 疲劳开裂 失效分析

中图分类号: U464.149

文献标志码: A

DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20220115

Analysis of Engine Intake Manifold Support Fracture and Optimization

Wang Zhen, Zhang Yuchun, Li Wenhui, He Li

(Ningbo Geely Royal Engine Components Co., Ltd., Ningbo 315336)

【Abstract】This paper analyzed the cause of a 1.5 L naturally aspirated engine's intake manifold mounting support cracking in bench test and design was optimized. The electron microscope analysis results show that fatigue cracks exist on the fracture surface of the failed support, and the main cause of the support cracking is found to be the resonance caused by the large vibration at the far end of the intake manifold through engine bench vibration test and test boundary checking. The material of the support was adjusted from SUH409L to QT500, simulation calculations and experimental verification were conducted on the new support, and no cracking was found on the new support.

Key words: Intake manifold bracket, Fatigue cracking, Failure analysis

【引用格式】王振,张育春,李文辉,等. 发动机进气歧管支架疲劳开裂分析与优化[J]. 汽车工程师, 2024(2): 34-38.

WANG Z, ZHANG Y C, LI W H, et al. Analysis of Engine Intake Manifold Support Fracture and Optimization[J]. Automotive Engineer, 2024(2): 34-38.

1 前言

汽车在使用过程中会出现零部件失效的情况,发动机零部件的失效占比高达 41%,如锻造夹杂异物导致曲轴油道内壁扭转疲劳开裂^[1]、排气管支架焊接螺母疲劳开裂^[2]等。疲劳断裂导致的发动机零部件失效已成为汽车零部件失效的主要类型。

进气歧管是发动机的重要零部件,基于轻量化的设计理念,进气歧管普遍采用尼龙材料,同时,尼龙进气歧管还具有改善热起动性能、减小空气流动阻力等优点。但受其稳压分流作用及成型工艺影响,尼龙进气歧管的体积较大,进气歧管及附属零件在设计及应用过程中需考虑振动模态,避免出现

振动导致的疲劳失效。

某 1.5 L 自然吸气发动机在开发阶段进行台架耐久试验时,进气歧管固定支架多次出现开裂现象。针对此问题,本文结合 CAE 仿真计算及实物验证等措施确定故障原因,提出解决方案并通过仿真计算和多样本量台架实物测试验证了方案的有效性。

2 系统结构及故障描述

该发动机进气歧管为尼龙材料,通过螺栓固定在发动机气缸盖上,其固定采用悬臂梁结构,为提高可靠性,在进气歧管下端增加固定支架并与气缸体连接,如图 1 所示。

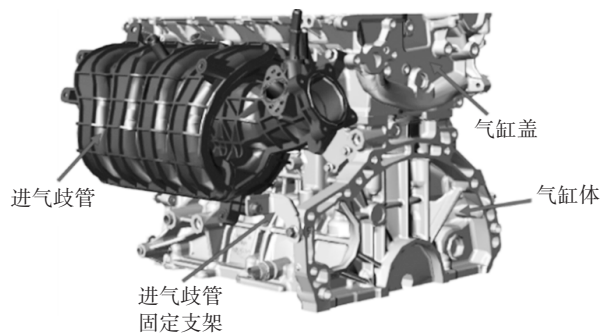


图1 进气歧管支架布置

该机型在发动机可靠性测试台架上运行174 h后,进行台架日常巡检时发现进气歧管固定支架开裂,如图2所示,其他正在进行同类型试验的发动机同一支架也出现了开裂的问题,如图3所示,且裂纹在同一区域,属同类问题。

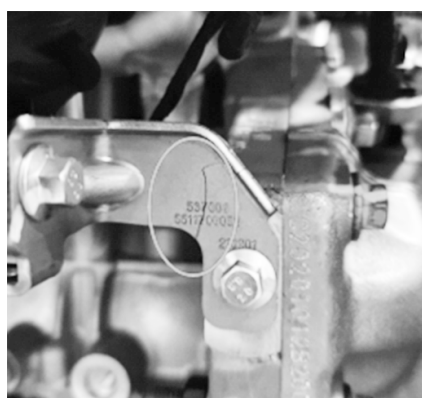


图2 首发支架开裂



图3 同类型试验支架开裂

3 故障分析

3.1 材料分析

失效件断裂位置均出现在支架折弯处,支架断口部位存在表面腐蚀,如图4所示,对支架断口进行电镜分析,如图5所示,由裂纹源头处的微观断口形貌可知,支架开裂始于折弯内边缘(“7”字型边缘),裂纹扩展区的微观形貌可见疲劳辉纹,为疲劳断裂特征。

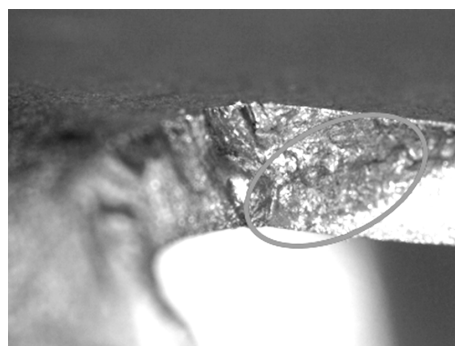


图4 支架断口表面锈蚀

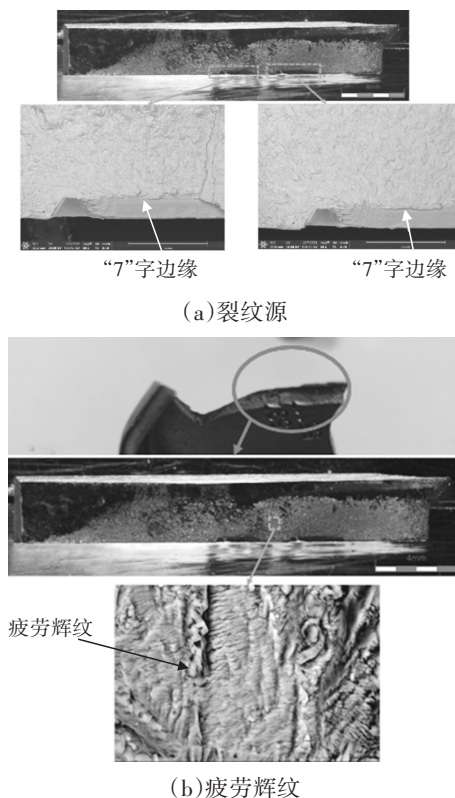


图5 支架断口电镜分析结果

支架材料为SUH409L,为排除失效件材料问题,对失效件进行材料成分检测,结果如表1所示,未发现异常。

表1 失效件材料检测结果

检测项目	标准	检测结果
C含量(质量分数)/%	≤0.03	0.01
Si含量(质量分数)/%	≤1.00	0.48
Mn含量(质量分数)/%	≤1.00	0.19
P含量(质量分数)/%	≤0.040	0.019
S含量(质量分数)/%	≤0.030	0.007
Cr含量(质量分数)/%	10.50~11.75	11.16
屈服强度/MPa	≥175	236
抗拉强度/MPa	≥360	426

3.2 设计确认

为确认支架设计是否合理,对支架方案进行CAE仿真计算,参考数据库信息,振动加速度按照15g带入1阶模态计算模型,结果显示,支架最薄弱位置与失效件断口分析结果相吻合,但薄弱处疲劳安全系数为1.21,大于1.10,符合设计要求,如图6所示。

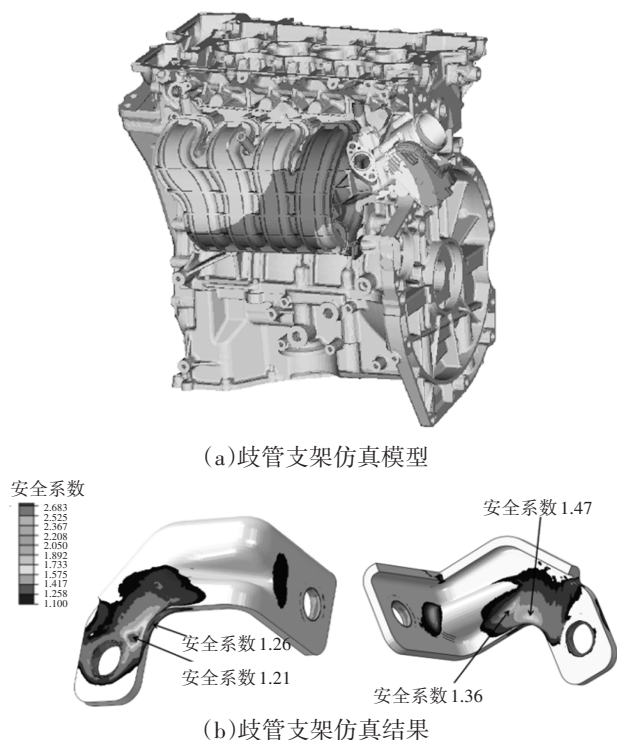


图6 支架疲劳安全系数仿真计算结果

对比相同制造商其他发动机产品进气歧管模态计算结果,失效发动机进气歧管模态频率为142 Hz,处于中等水平,如表2所示。

机型	模态频率
失效发动机(本文研究发动机)	142
A机型	122
B机型	233
C机型	184
D机型	103
E机型	181

3.3 试验边界排查

对失效发动机的试验边界进行排查以确认边界环境是否存在异常。由于失效形式为疲劳开裂,考虑到试验时台架的振动作用,测试台架的振动加速度,结果如表3所示,实测结果高于仿真计算结果(15g),初步说明试验边界与仿真计算边界不符。

测试项目	振动加速度/g
进气歧管支架X向	16.07
进气歧管支架Y向	18.73
进气歧管支架Z向	14.16

为进一步确认台架振动的影响,对其他台架进行共振测试,确认发动机进气歧管共振情况,结果如图7所示,进气歧管在发动机转速为5960 r/min时的振动加速度为36.35g,远高于仿真计算结果(15g),故可确认发动机高转速条件下存在明显的共振现象。

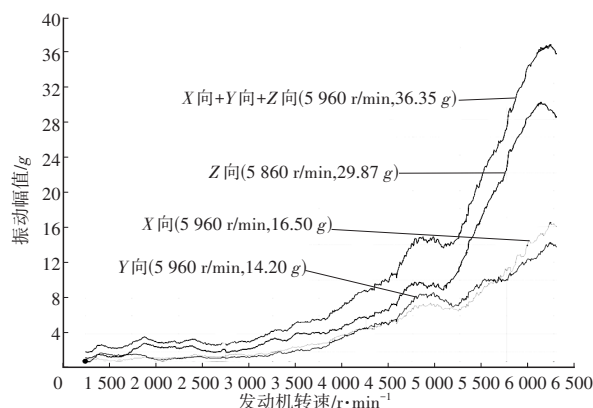


图7 台架振动测试结果

按照台架实测结果重新计算CAE仿真模型的振动边界,结果显示,支架折弯处最小疲劳安全系数为0.82,不满足设计要求,与失效件故障吻合,如图8所示。因此,可以确定支架开裂的原因是试验台架在发动机高速工作条件下产生的共振超过零件设计要求。

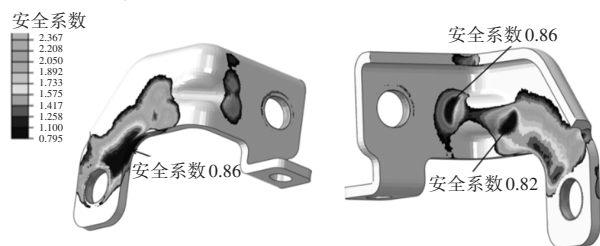


图8 试验边界更新后疲劳安全系数计算结果

3.4 设计方案优化

经确认,试验用台架自身的振动符合要求,且搭载其他类型发动机时未出现异常共振,因此,对支架进行设计优化。

在不更改结构设计的前提下,将支架材料更换为Q235B进行仿真计算,仿真振动边界更新为台架实测结果,计算结果如表4所示。折弯处的平均应力高于Q235B的疲劳应力极限(175.5 MPa),存在疲劳断裂风险。

表4 更换材料前、后疲劳安全系数和应力计算结果

计算项目	SUH409L 支架	Q235B 支架
疲劳安全系数	0.82	1.31
最小平均应力/MPa	107	195

继续对支架进行优化设计,沿用原设计方案的材料,支架结构由单翻边更改为双翻边,如图9所示,分别对翻边高度为3 mm、5 mm的状态进行模态分析,结果显示,翻边高度为5 mm时各阶次模态频率仿真结果均优于翻边高度为3 mm时的结果,其中3阶模态频率提升4 Hz,如表5所示。

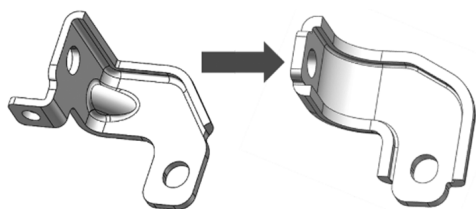


图9 支架结构优化

表5 双翻边支架模态仿真结果

支架翻边高度/mm	模态频率/Hz			
	1阶	2阶	3阶	4阶
3	143	158	220	337
5	144	159	224	338

将发动机更换双翻边支架样件并搭载到原台架上进行振动测试。测试结果如图10所示,进气歧管振动加速度最大值减小为30.52 g,但共振仍然偏大,支架存在开裂风险。

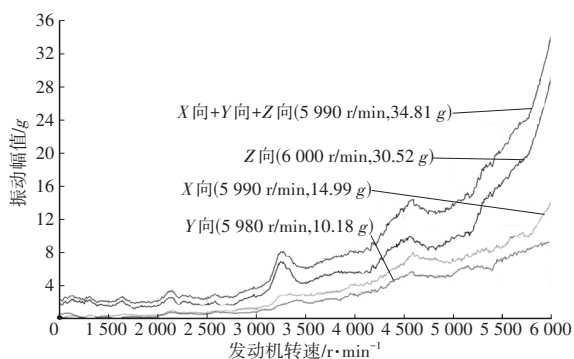


图10 双翻边支架台架振动测试结果

由于以上方案均无法满足设计要求,对支架采用QT500铸造工艺方案进行评估,其模态仿真结果均优于双翻边方案,如表6所示。

表6 QT500铸造支架模态分析结果 Hz

材料	模态频率			
	1阶	2阶	3阶	4阶
QT500	144	161	233	338

采用QT500铸造工艺方案制作支架快速样件,搭载于整机进行台架振动测试,结果如图11所示,

进气歧管振动加速度最大值减小至15.75 g,接近15 g正常设计水平,满足设计要求。

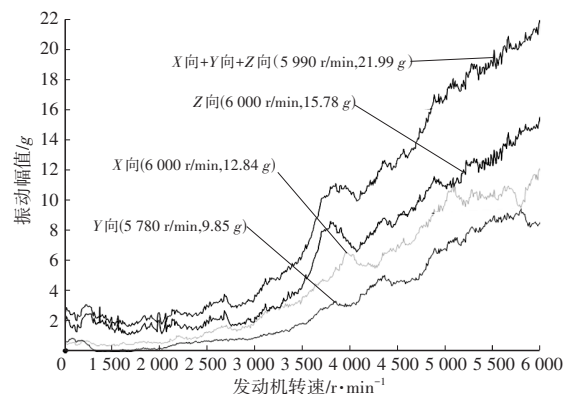


图11 QT500铸造支架台架振动测试结果

将原状态的支架样件和QT500铸造工艺方案的支架样件在NVH专用台架上进行全负荷加速工况专项测试,对比结果如图12所示。

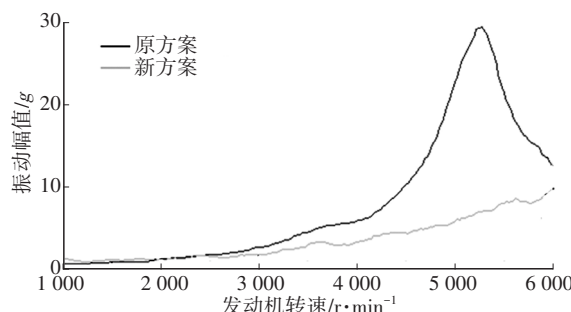


图12 铸铁支架与原方案振动测试结果对比

继续测试进气歧管近端振动加速度,结果如表7所示,可知歧管近端振动处于正常水平,满足设计要求。

表7 进气歧管近端与远端振动测试结果 g

方案	远端最大振动加速度			近端最大振动加速度		
	X向	Y向	Z向	X向	Y向	Z向
原支架	16.79	27.24	36.35	14.04	9.75	14.00
铸铁支架	9.55	12.54	15.75	6.38	8.20	12.99

对QT500铸造工艺方案的进气歧管支架进行5轮次台架耐久验证,试验后均未发生支架开裂现象,如图13所示,改善措施有效。



图13 铸铁支架台架耐久测试后状态

4 结束语

本文针对进气歧管固定支架开裂问题进行了分析及优化。首先,对失效支架的理化特性、断口金相进行确认,排除了材料及零部件质量问题。然后,在设计改动量最小的前提下,分别对更改材料、双翻边的方案进行了仿真计算及样件快速验证。最后,在确认支架断裂主要原因为进气歧管远端振动大导致的固定支架共振断裂后,采用QT500铸造工艺制作样件并安装于整机进行台架耐久测试,通过验证。

参考文献

[1] 颜婧,冯继军,余政宏,等.曲轴开裂拉瓦失效分析[J].失

效分析与预防,2019,14(4):275-279.

YAN J, FENG J J, YU Z H, et al. Analysis of Cracking and Locking of Crankshaft[J]. Failure Analysis and Prevention, 2019, 14(4): 275-279.

[2] 徐成民,连志斌,李天兵.考虑焊接螺母的排气管支架疲劳优化研究[J].汽车工程学报,2019,9(1):73-78.

XU C M, LIAN Z B, LI T B. Fatigue Life Optimization of the Exhaust Pipe Support Bracket Based on Projection Weld Nuts[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(1): 73-78.

(责任编辑 弦歌)

修改稿收到日期为2022年12月19日。

《汽车文摘》征文

《汽车文摘》(月刊)于1963年7月3日创刊,由国有资产监督管理委员会主管、中国第一汽车集团有限公司主办,为中国汽车工程学会会刊。《汽车文摘》以“览全球汽车技术文献,指中国汽车技术之道”为使命,以打造“中国汽车前沿与创新技术传播与交流的重要平台”为愿景,致力于成为汽车领域最具影响力的综述类期刊。

2022年11月,《汽车文摘》复合影响因子达1.066,首个影响因子突破“1”,这反映出《汽车文摘》自2019年启动转型升级以来,期刊学术影响力稳步提升。

《汽车文摘》坚信“他山之石,可以攻玉”,深耕电动化、智能化、网联化、共享化和智能制造5大方向和10大领域,聚焦新能源与混合动力汽车、智能网联汽车、燃料电池、低碳与氨等零碳燃料、汽车安全、健康与舒适、碳达峰与碳中和、生命周期评价(LCA)与技术经济分析、智能制造、材料轻量化与一体化压铸、飞行汽车前沿与创新技术综述论文,揭示相关领域的新动态、新趋势、新技术和新进展,为广大科研和工程技术人员进一步发展这一领域提供新突破口、新出发点和新基准。

欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员,充分发挥专业领域优势,深度挖掘国内外高影响力学术期刊与其他文献,形成某个技术领域的前沿综述。

《汽车文摘》2023年选题范围:

电动化:混合动力关键技术;动力电池关键技术;先进充电技术;电驱动系统及电力电子技术;底盘及子系统线控关键技术;燃料电池动力系统设计与优化

智能化:新型电子电气架构;自动驾驶感知、决策与运动控制;智能新能源汽车测试评价方法与工具链;车辆智能安全技术

网联化:智能网联云控技术;车用通信及网络技术;车路协同技术;汽车人因、人机交互与智慧座舱;信息安全与功能安全;车网融合(V2G)及应用

低碳化:汽车节能与排放技术;清洁能源动力系统技术;碳达峰、碳中和;氢燃料制储运加及安全管控技术;生命周期评价(LCA)、标准法规与技术经济分析;低碳与氨等零碳燃料

轻量化:新能源汽车新材料技术;混合材料轻量化设计;一体化压铸

共享化:区块链技术与移动出行;车辆大数据挖掘方法与应用案例

燃料电池:电池堆、电池系统与基础设施

智能制造:机器人与自动化控制、四大工艺、物流技术、设计-制造-服务

颠覆式出行:飞行汽车;未来低空智能交通体系及其关键技术

汽车安全:主被动安全与融合、智能安全、健康与舒适

《汽车文摘》发表论文的独特优势:

《汽车文摘》是国家级刊物、中国汽车工程学会的会刊、汽车领域唯一的综述期刊。《汽车文摘》不收版面费,4个月内即可发稿。

投稿要求:

1. 综述篇幅在10 000~15 000字(6~10页),图文并茂,图、表和公式非原创要求引用;
2. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数在200±10字;
3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的、高影响力出版物作为参考文献,一般要求参考文献在20篇以上,一半左右为外文参考文献,且在文中标注文献引用出处;
4. 来稿保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
5. 切勿一稿多投。

《汽车文摘》投稿网址: <http://www.qcqw.cbpt.cnki.net>

邮箱: autodigest@faw.com.cn

《汽车文摘》编辑部