

某汽车排气系统支架应力分析及改进

张鹏¹, 王哲², 李俊芳¹, 徐文进¹

1. 克康(上海)排气控制系统有限公司, 上海 200123;

2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200123

摘要:为解决某汽车排气系统支架的开裂失效故障,通过断口电镜扫描分析、焊接质量检测、晶度分析等方法,确定支架失效原因为发动机振动引起的高周疲劳失效。设计加宽支架的2个支角并做圆角过渡和将支架的2个支角连成一体2种支架优化方案。对2种优化方案进行有限元振动激励响应分析,根据分析结果选择较优方案进行台架整体耐久振动试验验证。仿真结果表明:优化方案二支架的应力显著降低,在最大共振频率为193 Hz时的应力为48.4 MPa,较原支架应力降低了11.9 MPa;台架试验结果表明,优化方案二支架在2倍寿命循环后无明显损伤,满足耐久性考核目标。

关键词:排气系统;支架结构失效;高周疲劳;应力

中图分类号:TK413.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)03-0050-06

引用格式:张鹏,王哲,李俊芳,等. 某汽车排气系统支架应力分析及改进[J]. 内燃机与动力装置,2023,40(3):50-55.

ZHANG Peng, WANG Zhe, LI Junfang, et al. Stress analysis and improvement of an exhaust system bracket[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(3):50-55.

0 引言

汽车排气系统支架一端连接排气管,另一端连接变速箱、发动机或车架,是决定排气系统耐久性和可靠性的关键零件。排气系统的工作环境恶劣^[1-3],由于排气系统与发动机缸体为刚性连接,发动机工作状态下的振动能量直接传递到排气系统上,在发动机全负荷工况下,排气系统承受的振动加速度均方根可达到10g(g 为自由落体加速度),同时排气系统还承受温度为1 000 °C左右的高温废气冲击,这对排气系统的可靠性提出了极高的要求^[4-5]。

发动机耐久性试验过程中,排气系统支架失效是一种常见的失效形式,众多学者为解决这一问题进行了研究。文献[6]对某大型液压挖掘机排气系统支架进行模态分析、谐响应分析和排气系统外部激励的测试分析,发现排气系统与外部激励存在共振是支架开裂的根本原因,通过对支架进行结构优化解决了排气系统共振问题;文献[7]利用Workbench软件对整个排气后处理系统进行模态及结构应力分析,通过在SCR催化消声器前200 mm处增加固定支架或波纹管可有效解决支架断裂故障;文献[8]利用Hyperworks软件对整个排气系统进行模态分析和频率响应分析,确定发动机端 x 方向激励引起的振动是排气管支架失效的主要原因,为排气管支架的后续分析和设计改进提供了理论基础。

设计一套排气系统支架,既能承受高振动能量所带来的高周疲劳载荷,又不能过于强硬地约束排气系统,从而降低由热冲击带来的低周疲劳载荷,是解决排气系统支架失效的关键^[9-10]。本文中通过电镜扫描分析等方法对某失效的发动机排气系统支架进行分析,确定失效原因,采用计算机辅助工程

收稿日期:2023-04-20

基金项目:国防科技重点实验室基金项目(9140C330207150C33148)

第一作者简介:张鹏(1980—),男,山东潍坊人,工程师,主要研究方向为车辆排气系统设计与优化,E-mail: davidzhang_sh@163.com。

(computer aided engineering, CAE)、有限元分析方法,对原支架和优化支架的设计方案进行频响分析,验证优化方案的有效性,为支架的设计优化提供依据。

1 支架失效原因分析

1.1 断口分析

某款匹配 1.5T 4 缸汽油机的排气系统支架在发动机振动耐久试验中开裂失效。该支架为冲压件,材料为 409L 不锈钢,厚度为 4 mm,通过熔化极活性气体保护焊方法焊接到排气系统本体上。支架结构和开裂失效照片如图 1 所示。

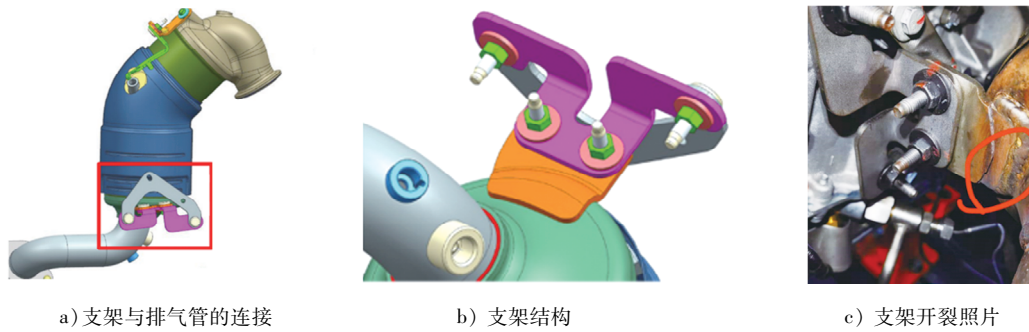


图 1 排气系统支架结构和失效照片

在电子显微镜下观察失效支架的形貌如图 2 所示,图 2a)红框区域为观测点。由图 2b)可知:断口表面呈粗糙的撕裂状,无明显疲劳辉纹,可确定红框区域为断裂的起始点,起始点具体位置如 2c)所示;起始点位置表面观察到一层氧化膜,可判定初始裂纹存在的时间较长;剩余部分断口是在振动载荷作用下撕裂断开。

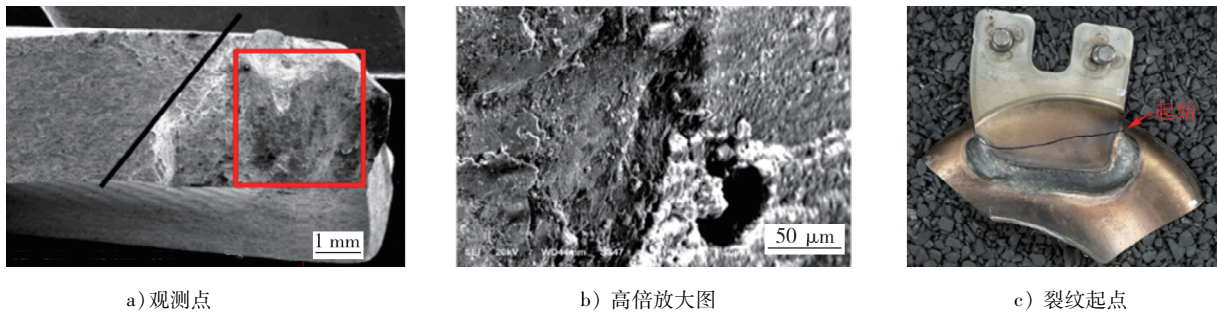


图 2 断口分析

裂纹由起始点向外延伸,在裂纹扩展处可以观察到明显的疲劳辉纹,如图 3 所示。由图 3 可知:引起支架开裂失效的主要原因为高周疲劳载荷失效,并可同时判断出裂纹延伸的方向。

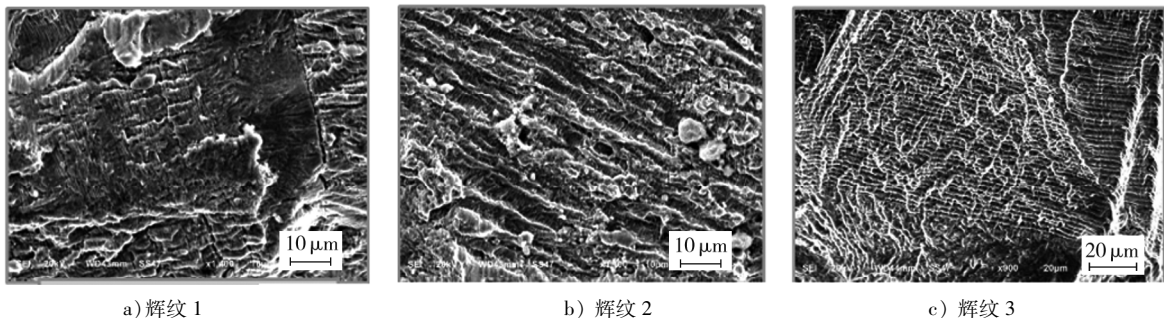


图 3 失效模式(扩展区疲劳辉纹)

1.2 失效件材质和焊接质量检查

对失效支架材料成分进行分析,结果表明材料符合标准。对失效支架与本体的焊接部分进行切片分析,沿焊缝长度方向取3个点切片,切片的测量结果如表1所示。由表1可知,焊缝厚度、宽度、焊高和熔深占比均符合标准要求^[11],焊接质量合格。

表1 3个焊缝切片的测量结果

切片	实际测量结果							标准要求			
	壁厚/mm	缝隙/mm	焊缝厚度/mm	熔深/mm	焊缝宽度/mm	焊高/mm	熔深占比/%	焊缝厚度/mm	焊缝宽度/mm	焊高/mm	熔深占比/%
1	2.602	0.715	3.238	0.267	2.759	5.297	10	≥1.821 4	≥2.341 8	≥2.341 8	
2	2.562	0.959	3.477	0.508	6.634	4.215	20	≥1.793 4	≥2.305 8	≥2.305 8	≥10
3	2.573	1.099	2.871	0.601	7.030	4.302	23	≥1.801 1	≥2.315 7	≥2.315 7	

失效支架断口检测点示意和周围及母材的晶粒度分析结果如图4所示。由图4可知:断口起始点、中间点、终断点及母材的晶粒度分别为2.5、4.0、3.5、4.0级;晶粒存在因焊接造成的长大现象,但没有异常的晶粒缺陷,可以排除失效是样件质量缺陷引起。

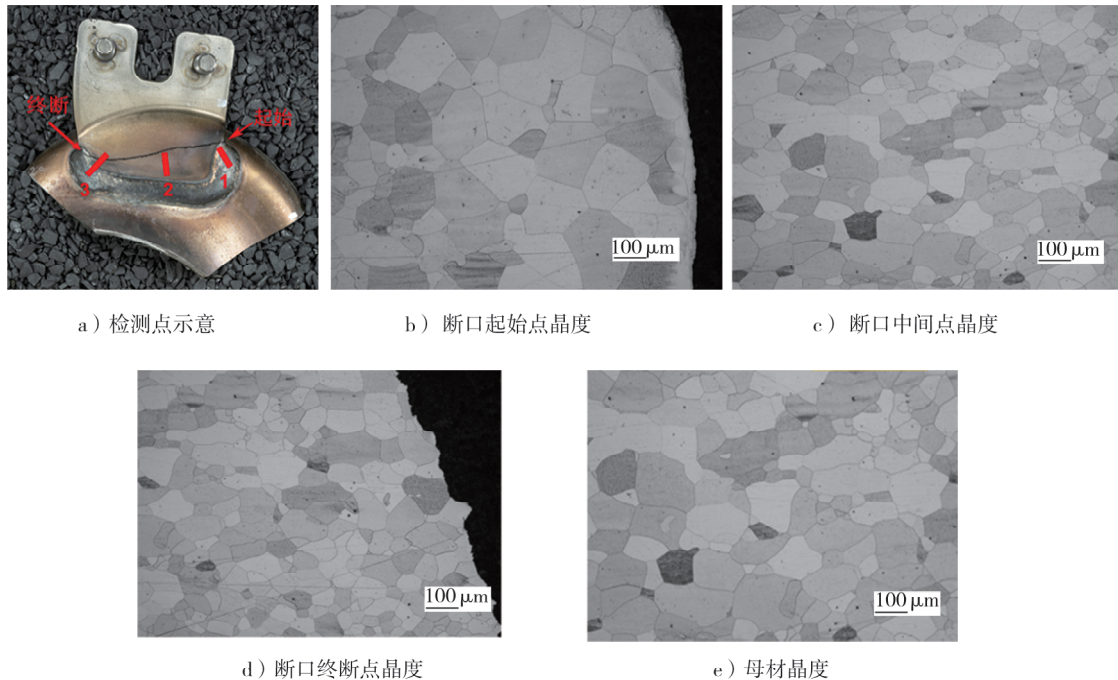


图4 支架断口及母材的晶粒度检测结果

综上所述,可以确定排气系统支架在发动机振动时承受的振动载荷过高而导致开裂失效,由于排除了材料和焊接质量导致断裂的可能性,所以需要提高支架系统承受振动载荷能力。本文中通过优化支架结构,将振动能量分摊到整个排气系统的结构上,降低局部的应力集中,避免失效。

2 应力分析及改进

2.1 改进思路

对原方案和优化方案分别进行CAE仿真计算,分析各方案在发动机激励下的振动应力分布,通过比

较原方案和优化方案的应力,选出最优方案并进行试验验证。

2.2 有限元模型和振动激励响应分析

建立排气系统的有限元模型^[12-15],排气系统有限元模型如图5所示。模拟整个排气系统在发动机安装状态下的约束状态;模型在工作状态下的温度由前期计算流体力学分析和流固耦合分析得到;模型的振动加速度输入为试验状态下采集到的发动机实际振动加速度。通过仿真计算整个有限元模型在发动机激励下的动态响应,输出有限元模型在发动机激励下的位移、应力、应变等。由于支架失效形式是振动失效,所以重点分析其在振动激励下的应力分布。

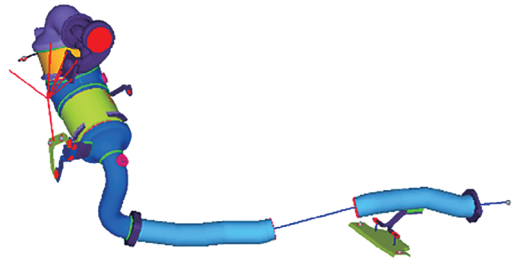


图5 排气系统有限元模型

原支架应力分布及应力随频率变化曲线如图6所示。

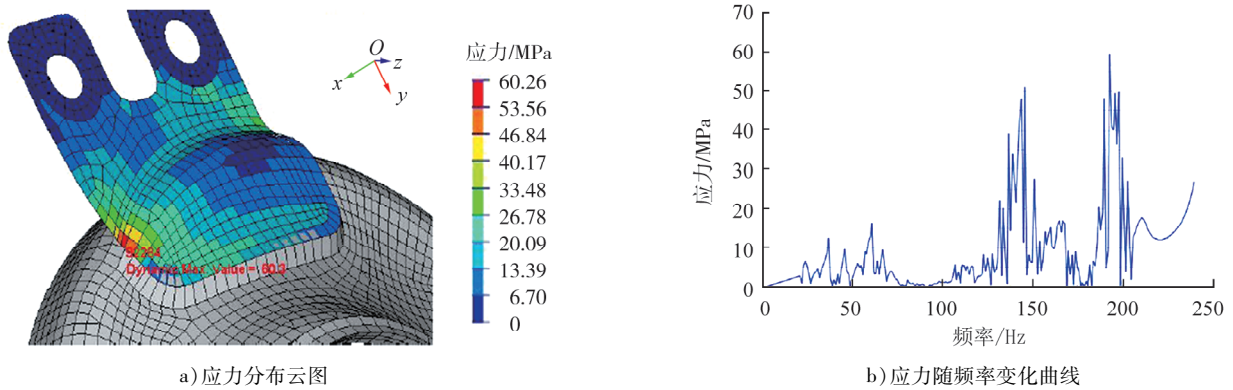


图6 原支架应力分布及应力随频率变化曲线

由图6可知:在发动机振动激励下,排气系统本体与原支架焊接处应力较大,出现应力集中现象;频率不同,应力集中的程度不同,原因为排气系统与发动机共振时,振动能量较高,应力水平随之较高;原支架与发动机的共振频率为193 Hz,支架与排气管连接处的振动应力达到60.3 MPa,支架工作时的温度为500 ℃,所受应力偏大;应力集中处与支架断裂位置相吻合,模型正确有效。为解决支架开裂问题,对原支架的连接刚度进行改进优化,降低支架与排气管连接处的应力水平减弱应力集中现象。

2.3 优化方案

通过改变支架的料厚、料宽和连接结构,改变整个支架系统的连接刚度,设计2种不同的支架优化方案,优化方案结构如图7所示。

优化方案一:加宽支架的2个支角,并圆角过渡。

优化方案二:将支架的2个支角连成一体,提高支架的刚度。

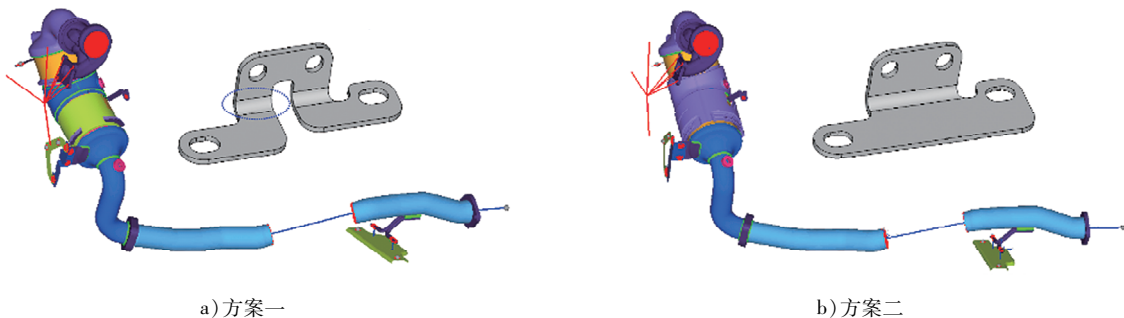


图7 支架优化方案

对优化方案在相同发动机激励下的应力情况进行仿真分析,结果如图8所示。由图8可知:优化方案一在频率为59、144、193 Hz时出现应力峰值,分别为39.9、52.4、52.4 MPa;优化方案二在46、59、146、193 Hz时出现应力峰值,分别为40.5、34.8、48.8、48.4 MPa;在最大共振频率(193 Hz)时,优化方案一、二在应力集中点(即开裂位置)的应力相比原支架应力分别降低了2.9和11.9 MPa;方案二效果较好。

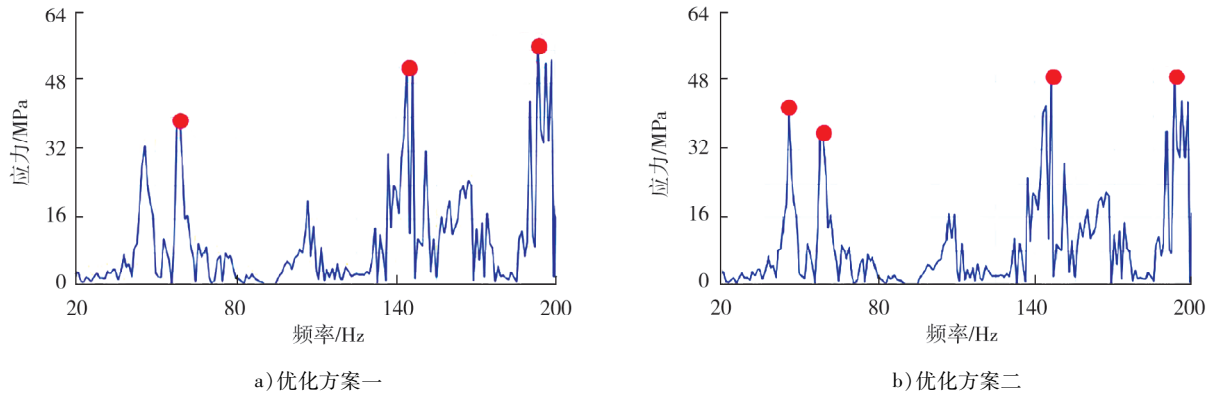


图8 优化方案支架应力随频率变化曲线

2.4 试验验证

制作优化方案二的样件,对分别安装原支架和优化方案二支架的发动机在台架上进行整体耐久(general engine durability, GED)振动试验。原支架在第236个GED振动循环时发生开裂,未达到314个GED振动循环的设计目标;优化方案二支架完成了314个耐久循环后继续试验,到2倍寿命循环后支架仍未见明显损伤,试验后照片如图9所示。对试验后的优化支架进行拆解和探伤分析,优化后支架状态良好,无裂纹,满足耐久性考核要求。



图9 优化方案二支架GED试验后状态

3 结论

采用电镜扫描、晶相分析等方法,对某排气系统支架在试验过程中出现的断裂失效故障进行分析,确定原因为高周疲劳失效。提出了2个支架优化方案,并对2个优化方案进行有限元频响分析,结果表明优化方案二(将支架的2个支角连成一体)的应力显著降低,在最大共振频率下的应力比原支架下降了19.7%;台架振动耐久试验表明,优化方案二满足耐久性考核目标。

参考文献:

- [1] 王桂群,白俊伟,李庆成. 支架在车辆排气系统中的应用[C]//河南省汽车工程学会. 第九届河南省汽车工程技术研讨会论文集. 郑州:河南省汽车工程学会,2012:129-130.
- [2] 邢建,高志彬,杨科彪,等. 某商用车排气系统模态及支架刚度分析[J]. 汽车零部件,2019(7):6-9.
- [3] TURANO M, CIVERA F, FIGUEIREDO G, et al. Road simulation bench as a tool to reduce time and costs in comparison with proving ground testing-correlation study [C]//SAE 2013 world congress and Exhibition. Detroit, USA: SAE International, 2013.
- [4] PERUMAL S, KUMAR A, MAHAJAN A, et al. Field failure resolution of a tractor engine exhaust system using constrained single objective optimization and stochastic analysis [J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 10(1): 411-422.

- [5] 王慧玲,刘耀东. 排气系统支架及实体焊缝热振动疲劳评估研究[J]. 上海汽车,2022(1):43-50.
- [6] 刘兴鑫,赵卫东,张少波. 挖掘机排气系统支架断裂原因分析与改进[J]. 建筑机械,2022(2):124-128.
- [7] 耿磊,袁志玲,刘正锐,等. 基于 Workbench 排气系统固定支架有限元分析[J]. 内燃机与动力装置,2018,35(5):33-37.
- [8] 王娜,崔震,王乾勋,等. 基于频率响应的商用车排气管支架失效问题研究[J]. 汽车工艺师,2022(10):57-61.
- [9] 侯献军,卢俊宇,何喆,等. 摩托车排气系统耐久性分析及结构优化[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(2):212-217.
- [10] 黄政,李云涛,蓝军,等. 排气系统热端支架低周疲劳开裂分析与优化[J]. 内燃机与动力装置,2021,38(5):88-95.
- [11] General Motors Company. Weld acceptance criteria and repair methods: arc welded and arc brazed joints: GMW 14058—2005[S]. Detroit, USA:General Motors Company,2005.
- [12] 赵俊男,于洋,董有昌,等. 基于有限元技术的铸铝支架结构性能研究[J]. 汽车实用技术,2020,45(19):169-173.
- [13] 周新,刘海波,代智军,等. 汽车排气系统消声器支架拓扑优化设计[C]//中国力学学会. 结构及多学科优化工程应用与理论研讨会'2009(CSMO-2009)论文集. 北京:中国力学学会,2009:89-92.
- [14] 金一炜. 某商用皮卡排气系统力学性能仿真研究[J]. 汽车实用技术,2020,45(20):121-123.
- [15] 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.

Stress analysis and improvement of an exhaust system bracket

ZHANG Peng¹, WANG Zhe², LI Junfang¹, XU Wenjin¹

1. KATCON(Shanghai) Emission Control System Co., Ltd., Shanghai 200123, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: In order to solve the cracking failure of the automotive exhaust system bracket, the high cycle failure cause of the bracket is investigated by engine vibration through fracture scanning electron microscope analysis, welding quality inspection, crystallinity analysis and other methods. The two support angles of the widened bracket with rounded transition are designed, and connected the two support angles of the bracket into one. Two optimization schemes for the bracket are proposed. Finite element vibration excitation corresponding analysis is performed on two optimization schemes, and experimental verification based on the analysis results is also carried out. The simulation results show that the stress of optimization scheme 2 is significantly reduced, with a stress of 48.4 MPa at a maximum resonance frequency of 193 Hz, which is 11.9 MPa lower than the original support stress. The bench vibration durability test shows that the optimized scheme has no significant damage after 2 times the life cycle, meeting the durability assessment goal.

Keywords: exhaust system; bracket system failure; high cycle fatigue; stress

(责任编辑:郎伟锋)