

结构与可靠性

基于有限元仿真的船用单缸柴油机
排气管开裂分析及改进苗伟驰¹, 陈黎俊², 张华兵¹, 李丽婷¹, 汤义虎¹

(1. 七一一研究所, 上海 201108; 2. 海军装备部动力装备局, 北京 100037)

摘要: 针对某船用单缸柴油机排气管在试验过程中出现开裂的问题, 采用有限元方法, 考虑材料的非线性因素, 对排气管部件进行约束模态计算及热机耦合和振动疲劳计算, 分析引起排气管开裂的主要原因。结果表明: 排气管开裂位置受温度梯度影响, 处于应力集中的薄弱区域, 当振动幅度较大时, 安全系数过小, 易发生疲劳破坏。通过在管接部件上增加支撑提高刚度, 减小排气管振动, 避免了排气管疲劳开裂。后续试验验证了改进措施有效。

关键词: 单缸机; 排气管; 开裂; 有限元分析

中图分类号: TK423.4⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)01-0023-04

FEA Analysis and Optimization Method of the Cracking on Exhaust
Pipes of a Single-Cylinder Diesel EngineMiao Weichi¹, Chen Lijun², Zhang Huabing¹, Li Liting¹, Tang Yihu¹

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;

2. Power Equipment Bureau, Naval Equipment Department, Beijing 100037)

Abstract: A single-cylinder diesel engine met with cracking problem in its exhaust pipes during endurance test. To solve this problem, taking material nonlinear factors into considerations, FEA simulation method was employed to carry out constraint modal analysis, thermal mechanical co-simulation and vibration fatigue calculation on exhaust pipes, in order to find out the causes of those cracks. The calculation result shows that the crack position is influenced by the temperature gradient, which is the stress concentrative area. With the increase of vibration amplitude, the safety factor is too small, and it's easier to cause fatigue failure. Adding a support bracket on the pipe is efficient to improve the stiffness and reduce vibration, thus could avoid fatigue cracks on exhaust pipes. The follow-up test verified the effectivity of this improvement method.

Key words: single-cylinder engine; exhaust pipe; cracking; FEA

0 引言

排气管是发动机的主要受热零部件, 承受高温废气作用, 工作环境恶劣, 容易发生破坏。车用发动机由于空间有限, 排气歧管结构形状较为复杂, 同时热负荷很高, 通常采用大量仿真计算进行可靠性分析; 而针对船用排气管的相关分析相对较少。

本文针对某船用单缸柴油机排气管在耐久试验

过程中多次出现开裂故障, 通过热机耦合仿真方法, 考虑材料随温度变化的非线性因素, 结合实际工作状态对故障原因进行分析, 并针对性地提出了改进措施。

1 排气管开裂问题分析

该单缸机排气系统主要包括排气管、排气弯管、波纹管等部件。排气系统结构和开裂位置见图1。

收稿日期: 2017-05-03; 修回日期: 2017-08-10

作者简介: 苗伟驰(1988-), 女, 工程师, 主要研究方向为发动机仿真分析, E-mail: miaosdu@163.com。

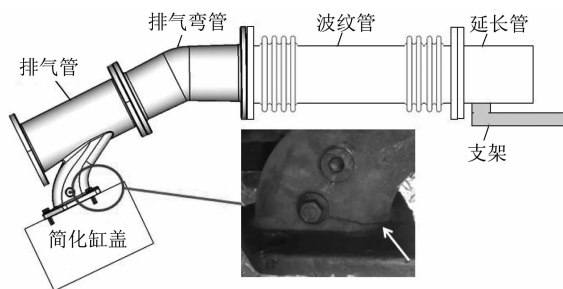


图1 排气系统结构及开裂位置

试验过程中共有三根排气管开裂，裂纹均发生在靠近缸盖法兰的圆角处，并扩展贯穿至排气管侧面及法兰盘底面。其中有两根排气管裂纹发生在左侧，另一根发生在右侧。通过对断口的初步分析，发现疲劳破坏特征。

单缸机排气管开裂可能由以下原因造成。

(1) 排气管设计、加工、制造问题

据排查：此结构型式的排气管在其他相同机型单缸机上已长时间使用，并未出现问题；试验用排气管均经过质量检验，产品材料强度达到要求；圆角表面光滑，无划痕和凹坑，开裂位置附近未发现铸造缺陷。

(2) 排气管过热导致破坏

试验监测数据显示：各工况下的缸盖排气出口温度在正常范围内，且在稳定工况下温度波动很小，排气管裂纹处也未发现高温烧蚀迹象。

(3) 排气管受迫振动振幅较大或发生共振

排气管与缸盖连接，受柴油机激励影响可能会发生受迫振动。排气管部件为管接件，整体长度较长，仅在两端有约束，容易发生振动。

根据以上分析初步判断：排气管可能因振动过大导致疲劳破坏。以下采用仿真分析方法，考虑以上因素的影响，尽可能模拟实际情况下的载荷情况对排气管进行评估。

2 有限元仿真分析

2.1 计算模型及边界

有限元计算对象为整个排气管部件及简化的缸盖，缸盖仅保留和排气管法兰连接处，用于施加边界。波纹管一端与排气弯管连接，吸收排气管受热膨胀和振动产生的变形，另一端与延长管路连接并用支架固定。

计算时保留排气管与缸盖间的螺栓并施加预紧力；简化排气管与排气弯管间螺栓；法兰盘间采用绑定约束；约束缸盖底部节点以及波纹管自由端自由度作为计算的边界条件。

波纹管结构复杂，用施加了刚度的弹簧单元进行模拟简化，弹簧单元尺寸与实际波纹管长度一致。计算模型如图2所示，共有179 421个单元，69 210个节点。

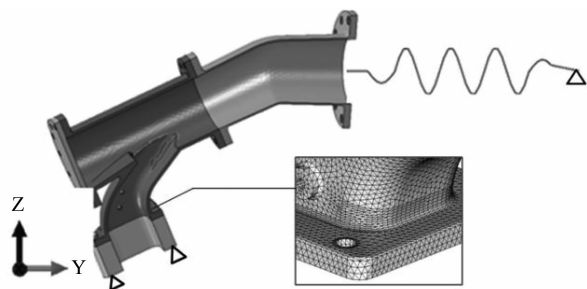


图2 排气管有限元计算模型

排气管材料为球墨铸铁，考虑材料弹性模量和应变随温度非线性变化，如图3所示。由于球墨铸铁的抗拉能力远远小于抗压能力，因此计算时将重点关注排气管的拉应力结果。

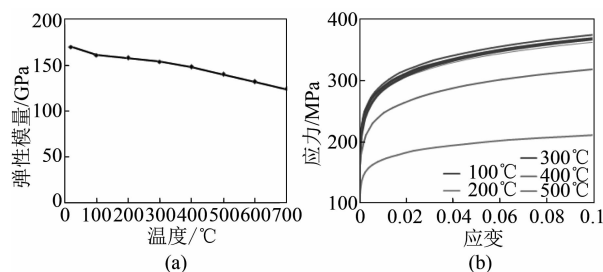


图3 随温度变化的非线性材料参数

2.2 热应力分析

通常，车用发动机的排气歧管结构复杂，布置紧凑，长期处于不断变化的工况下，有必要通过详细的流固耦合计算评估其在不同工况下的流动和温度分布，并进一步进行热疲劳分析。本文研究的船用单缸机排气管尺寸大，相比车机散热条件较好，且长期在稳定工况下运行，因而对排气管热边界进行简化。根据运行时间最久的额定工况实测数据，结合相似机型缸盖排气道流动情况，采用第三类换热边界（表1），计算获得排气管的温度场分布如图4所示。排气管管壁整体温度最高，靠近缸盖的开裂位置温度相对较低，但温度梯度很大。

表1 排气管热边界条件

区域	温度/°C	换热系数/(W · (m ² · K) ⁻¹)
管外	50	20
管内	500	750

根据温度场计算热应力分布，如图5所示。排气管左右两侧均有应力集中现象，最大拉应力达到188 MPa，但低于材料的屈服强度，不足以直接导

致开裂。

应力分析结果表明：开裂位置受较大温度梯影响产生应力集中现象，且主要为拉应力；温度最高的管壁热应力水平整体较低。

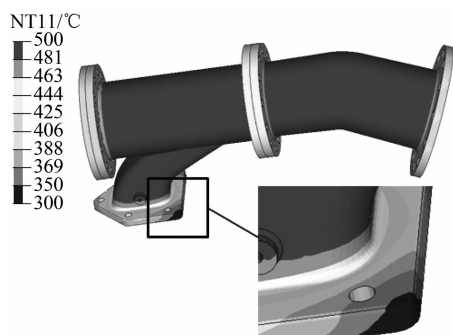


图4 排气管温度场分布

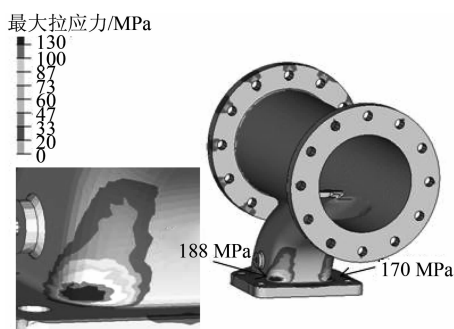


图5 排气管热工况下拉应力分布

2.3 振动应力计算

2.3.1 载荷等效加载

在单缸机试验过程中，排气弯管的振动测试传感器被振落，未得到测试结果；而排气管底部的测试结果显示振动水平正常，表明排气管自身发生了较大振动。为确定排气管的振动形态和方向，对排气管部件进行模态计算。结果显示：排气管前四阶均呈现摆动形态，其中第一、三阶为 Z 向竖直摆动，第二、四阶为 X 向横向晃动，如图6所示。

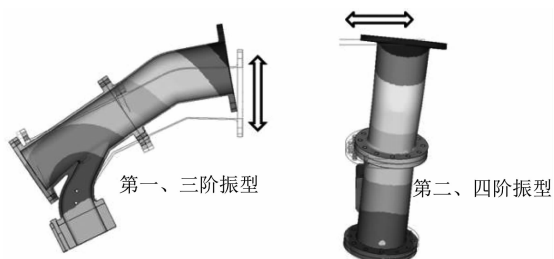


图6 排气管模态振型

根据以上两种振动形态，基于高温状态的热应力结果，分别在波纹管端施加 X 向和 Z 向的等效振动载荷，模拟振动情况。

2.3.2 振动应力结果

图7为不同振动情况下的应力分布计算结果。等效振动工况下的应力集中区域与开裂区域吻合，均出现在排气管根部与缸盖连接部位，且呈左右对称分布。

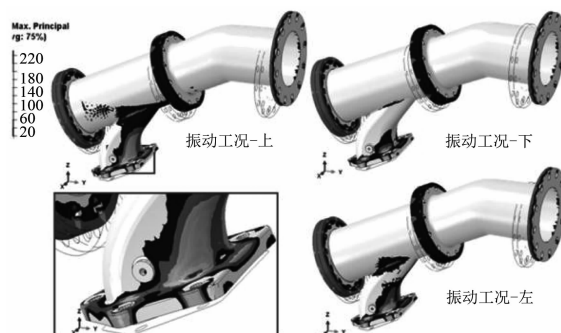


图7 各等效振动工况应力分布

排气管一侧应力集中区域节点随工况变化的拉应力曲线见图8。可见：几种工况下的拉应力值均低于材料的屈服强度。排气管受热时拉应力水平较高，为188 MPa； Z 向竖直振动产生的应力幅较大，最大约为140 MPa，而 X 向水平振动产生最大应力幅低于10 MPa，表明竖直振动远比横向振动剧烈。

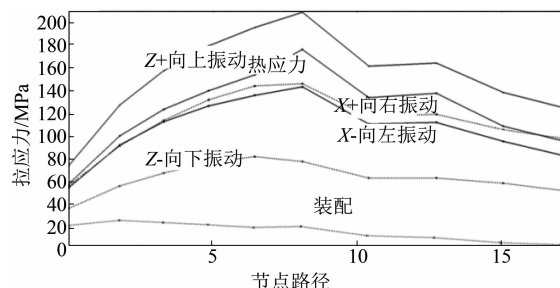


图8 不同工况应力对比

2.3.3 振动疲劳结果

排气管最恶劣工况下的拉应力仍低于材料的屈服强度，有必要进一步分析其疲劳强度。基于FEMFAT软件对排气管的热应力、等效振动工况下的应力进行多轴疲劳强度分析；考虑材料的表面粗糙度、材料离散度、存活率和修正海格图的影响。排气管材料海格图如图9所示。

分别考虑水平振动和竖直振动2种情况，得到疲劳安全系数分布如图10所示。结果表明：竖直振动工况安全系数明显小于水平振动工况，但两种情况疲劳安全系数最小的区域均在靠近缸盖法兰的圆角处，即该处为排气管最危险的区域。竖直振动时，两侧圆角区域的最小疲劳安全系数较接近，分别为1.1、1.06，均不满足评价要求。仿真计算得

到的薄弱区域与实际开裂位置一致。

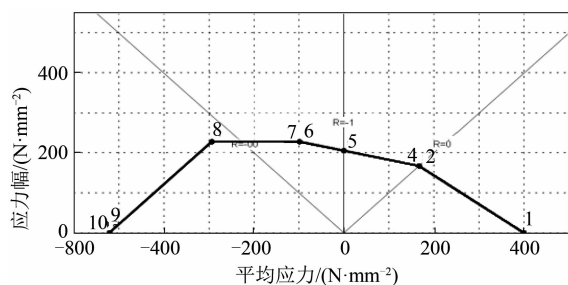


图9 排气管材料 (QT-400) 海格图

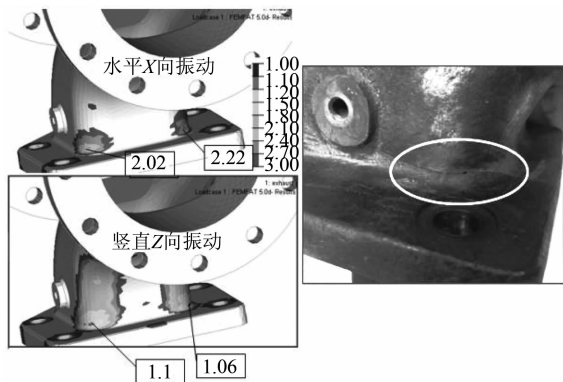


图10 原方案疲劳安全系数分布

3 改进方案与验证

以上分析表明：排气管圆角处在受热状态下，存在左右对称的应力集中，拉应力水平较高但未达到屈服程度；当发生振动时，尤其是竖直振动会致应力幅过大，导致安全系数不满足要求，发生疲劳破坏，这与试验中多根排气管发生开裂且左右两侧均有发生的现象一致。由此判断：排气管竖直方向支撑刚度较弱，须要采取措施加以改善。

3.1 改进措施

针对以上计算结果，可从以下方向加以改进：

(1) 减轻排气管热负荷。但一般而言，排气管无单独冷却设计，如果工况不变，热负荷无法降低，此项不切合实际。

(2) 缓解排气管与波纹管连接端振动，增加竖排气管支撑刚度。该方案改造实现快，成本低。采用此方法，将固定支架延长，然后在排气弯管处增加钢圈（图11）以减小排气管部件的周向振动。

3.2 改进后的验证

改进方案的疲劳仿真结果如图12所示。上下振动情况下，圆角处的最小安全系数在1.5左右，达到使用要求。计算表明：增加周向支撑可显著减小振动位移，从而减小振动应力幅，提高排气管的

可靠性。

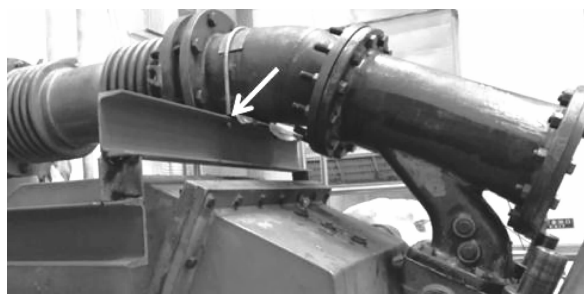


图11 增加排气管支架

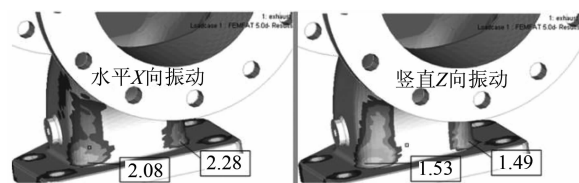


图12 改进方案的排气管安全系数分布

开裂区域两侧圆角改进前后的最小安全系数对比见图13。可以看出减小竖直振动对安全系数影响较大，改善振动能够使排气管安全系数提高36%。

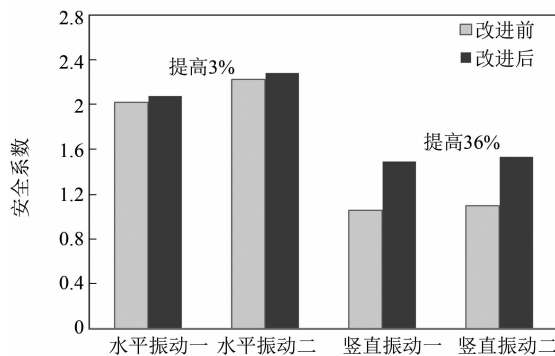


图13 改进前后最小安全系数对比

采用排气管支撑方案后，后续单缸机试验未再出现排气管开裂故障，目前试验已进行超过100 h，改进措施效果明显。

4 结论

(1) 通过建立排气管部件仿真模型，采用计算方法对单缸机排气管故障进行了复现，仿真结果表明：排气管开裂位置安全系数不足。

(2) 排气管开裂区域在受热状态时温度梯度较大，存在应力集中；在振动情况下，开裂处应力大幅变化，极易发生疲劳破坏。仿真预测结果表明：采取对排气管增加支撑的改进措施后，开裂处最小安全系数提高36%。

(下转第37页)

性参数;然后将参数带入详细扭振模型,按需要对参数进行调整,以达到最佳的减振效果。结构设计完成后,须要从计算和试验两方面对设计结果进行检验,以检验设计合理性、参数复现情况以及扭振控制效果。

将该设计方法应用到 HND 622V20CR 柴油机的扭振控制设计中,配机试验测试结果表明:扭振固有频率和振幅相对误差均在 5% 以内,扭振减振器的减振参数与设计值较为一致。安装扭振减振器后,该型柴油机扭振性能较原来采用硅油型扭振减振器时有明显改善。在同样安装空间和重量要求的条件下,A46×75 簧片滑油型扭振减振器较原减振器有明显优势。

参考文献

- [1] 张志华. 动力装置振动数值计算 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2007.

- [2] 中国国家标准化管理委员会. 扭转振动减振器特性描述: GB/T 13437-2009 [S]. 中国标准出版社, 2009.
- [3] 周炎. 卷簧扭振减振器优化设计研究 [C]. 中国内燃机学会大功率柴油机分会成立 20 周年年会, 2001.
- [4] 全国船用机械标准化技术委员会柴油机分技术委员会. 扭转振动减振器: GB/T 16305-2009 [S]. 中国标准出版社, 2009.
- [5] RAO S S. Mechanical Vibration [M]. U. S. A: Prentice Hall, 2009.
- [6] 中国船舶工业总公司. 舰艇柴油机轴系扭转振动计算: CB/Z 214-85 [S]. 中国船舶工业总公司, 1985.
- [7] 中国国家标准化管理委员会. 弹性阻尼簧片减振器: GB/T 14654-2008 [S]. 中国标准出版社, 2008.
- [8] 严济宽. 机械振动隔离技术 [M]. 上海: 上海科技文献出版社, 1986.
- [9] POTTER M C. Engineering fluid mechanics [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.

(上接第 17 页)

4 结 语

本系统研制完毕后经多次静态、动态试验,以及实机长时间运行验证,表明:控制系统动作灵敏,工作安全可靠;整套系统设计符合要求,适用于相继增压的控制及快速转换;性能与国外同类产品基本相当,但具有结构简单、工作可靠、价格低廉等优点,为国内相继增压系统的推广应用及试验研究提供了基础。

参考文献

- [1] 黄建华,王银燕,王贺春. 某船用 V 型高速柴油机相继增压计算分析 [J]. 船舶工程, 2005, 27 (2): 92-96.
- [2] 张永洋,杨彦涛,王禹华. 相继增压技术的应用研究 [J]. 柴油机, 2009, 31 (4): 23-27.
- [3] 陈在平,刘文芳. 西门子 S7-200PLC 系统设计与应用实例 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [4] Siemens A G. SIMATIC S7-200 PLC System Manual [R]. 2008.

(上接第 26 页)

(3) 改进后进行试验,故障未再发生。表明该仿真方法能够模拟并预测排气管结构薄弱区域;也可为存在振动可能的受热零部件可靠性设计提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] 易台连,吴杰长,刁爱民,等. 基于有限元和 FE-SAFE 的柴油机排烟管振动下的疲劳寿命 [J]. 内燃

- 机工程, 2008, 29 (3): 76-80.
- [2] 骆旭薇,石勇,李斌,等. 应用 FEA-CFD 耦合方法对某增压柴油机排气歧管的开裂失效分析及设计改进 [J]. 内燃机工程, 2015, 36 (6): 144-150.
- [3] 李民,王站成,皮振新,等. 排气歧管热应力模拟计算及缸盖边界条件影响的分析 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2014, 43 (3): 57-60.