

某四缸柴油机排气歧管开裂故障分析

李湘华

(广西玉柴机器股份有限公司, 广西 玉林 537005)

摘要: 针对某四缸机排气歧管在可靠性试验中出现开裂故障, 从铸造缺陷、化学成分、硬度及金相组织等方面进行分析, 并提出了改进方案。用 ABAQUS 软件对原方案及改进方案进行了温度场和热应力计算分析, 分析结果表明: 排气歧管开裂故障系热应力过大造成。改进方案已得到试验验证。

关键词: 柴油机; 排气歧管; 改进设计; CFD

中图分类号: TK423.4⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)02-0031-03

Trouble Shooting on Exhaust Manifold Cracking of a 4-cylinder Diesel Engine

Li Xianghua

(Yuchai Machinery Co., Ltd., Guangxi Yulin 537005)

Abstract: The exhaust manifold of a 4-cylinder engine cracked during reliability test. To deal with this failure, analysis on casting faults, chemical composition, hardness and metallographic structure were carried out, and improvement program was given. Simulation of exhaust manifold temperature field and thermo stress using ABAQUS software was carried out. The results showed that the cracking of the exhaust manifold was due to a high level of thermo stress. Through comparing calculation results of several different designs, an optimum design was chosen and later verified by test.

Keywords: diesel engine; exhaust manifold; improvement design; Computational Fluid Dynamics (CFD)

0 引言

某四缸发动机 500 h 可靠性试验结束后发现: 排气歧管靠近增压器部位有裂纹, 如图 1 中箭头所示。为了查找排气管故障产生的原因进行了以下工作: 首先进行排气管断口形貌(图 2)分析, 从图中可以看出裂纹起源于管壁过渡圆角处, 断面未发现明显的铸造缺陷; 然后进行化学成分硬度及金相组织分析, 结果都符合设计要求的 RuTSi4Mo 材料。从该排气管开裂故障部位及模式来看, 不可能是由于排气管与发动机共振引起的。仔细观察开裂部位临近的四个过钉孔壁, 发现每个孔壁挤压痕迹都很明显, 如图 3 所示。由此初步判断该排气歧管热变

形量大, 且受到了螺栓的强力约束, 导致热应力过大。

为了降低排气歧管故障部位的热应力, 提出了两种改进方案: 一是在裂纹部位两缸之间增加加强筋(SF1), 二是将裂纹部位的圆角加大(SF2)。为了对方案进行验证, 本文对包括原管(base)在内的三个方案进行热应力计算对比。注意排气管最右边的口为 EGR 取气口, 位于发动机后端。

1 有限元模型和边界条件

1.1 有限元模型

三种方案的排气管三维模型见图 4。

收稿日期: 2012-08-14

作者简介: 李湘华(1978-), 男, 工程师, 主要研究方向为内燃机相关零部件 CAE 分析, E-mail: xhleezj@163.com。

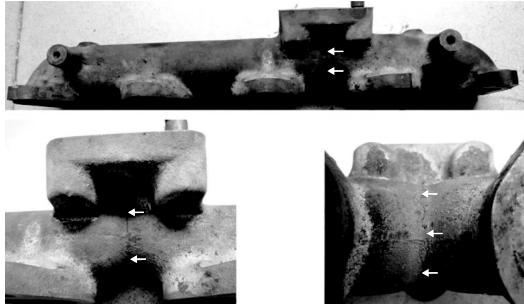


图 1 排气歧管故障照片



图 2 裂纹打开后断口宏观形貌

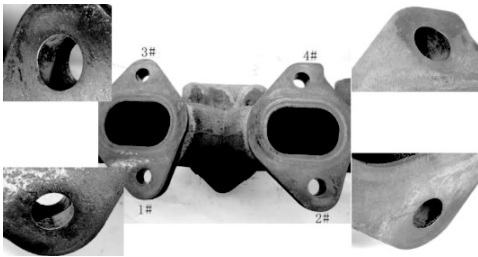


图 3 排气歧管螺栓孔壁被挤压痕迹

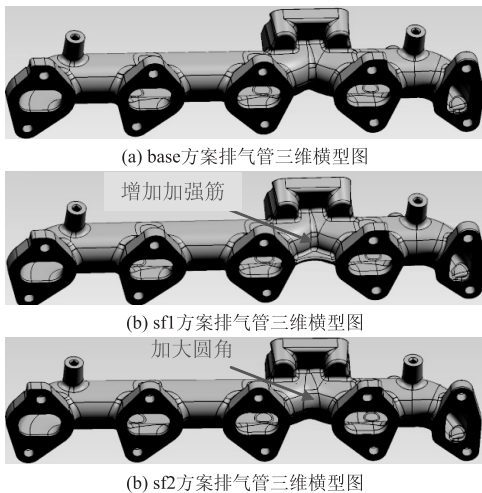


图 4 三种方案排气管三维模型图

排气管有限元模型采用 10 节点四面体单元，

计算模型信息见表 1；有限元网格用 Hypermesh 软件划分，在 Patran 里施加边界条件，最后用 Abaqus 求解。在划分网格时，为了保证计算精度，对故障部位附近的网格采用较小尺寸(1~2 mm)划分；为了降低计算规模，其余部位网格采用较大尺寸划分。base 方案计算网格装配模型如图 5 所示，由于另外两个方案网格模型装配图与 base 方案很相似，在此不重复描述。

表 1 计算模型信息

名称	方案	单元数	节点数
排气管	base 方案	150 356	253 514
	sf1 方案	149 777	252 204
	sf2 方案	162 531	271 952
缸盖	简化模型	53 583	86 147
螺栓	简化模型	27 380	47 750



图 5 计算装配模型网格图

1.2 材料特性

表 2 所示有关材料及材料特性。

表 2 计算模型材料特性数据

名称	材料	弹性模量/MPa	泊松比	线膨胀系数/K
排气管	RuTSi4Mo (参考球铁)	173 000	0.26	1.32E-005
缸盖	合金铸铝	70 000	0.32	2.2E-005
螺栓	钢	206 000	0.26	1.35E-005

1.3 边界条件

排气歧管热应力计算的边界条件比较复杂，需要通过流固耦合的方法来计算。

首先用 BOOST 软件进行该发动机的热力学计算，用试验数据标定模型，得到标定点下该排气歧管进出口的流量、压力和温度；然后将得到的数据作为边界条件，用 FIRE 软件计算排气歧管瞬态内流场，计算湍流模型为 $k-\epsilon$ 模型，壁面采用壁面函数处理，计算为可压缩流。得到排气管内壁面的 720 °C A 下的时均温度和对流换热系数，如图 6、7 所示。



图 6 排气管内壁面温度分布



图7 排气管内壁面对流换热系统分布



图9 排气管外壁面对流换热系统分布

再用 FIRE 软件进行发动机机舱的计算，由此得到排气歧管外壁面的温度和对流换热系数，如图 8、9 所示。

将排气歧管内外壁的温度和对流换热系数插值到有限元网格上，然后用非线性结构分析软件 ABAQUS 计算排气管的温度场，再计算排气管热应力。



图8 排气管外壁面温度分布

计算中，每个螺栓预紧力设定为 12 500 N，排气管与缸盖摩擦系数为 0.2，螺栓与排气管摩擦系数为 0.15，排气管螺栓温度 300 ℃，缸盖温度 150 ℃。

2 计算结果及分析

2.1 温度场计算结果

图 10 是三个方案排气管温度场分布计算结果，从图中可以看出：排气管发生开裂故障部位的温度很高，三个方案下排气管温度场分布非常相似，最高温度(约 625 ℃)也非常接近。

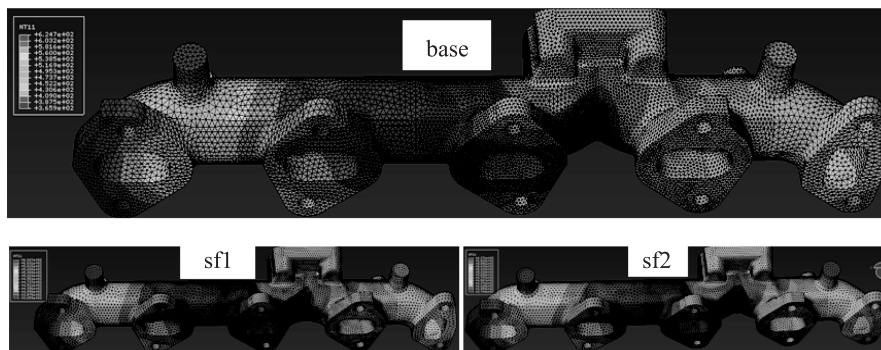


图10 排气管温度场分布图

2.2 热应力计算结果

图 11 是排气管 base 方案热应力分布图，从图中可以看出：排气管最大应力位置与发生裂纹故障的部位吻合，最大热应力为 324 MPa。

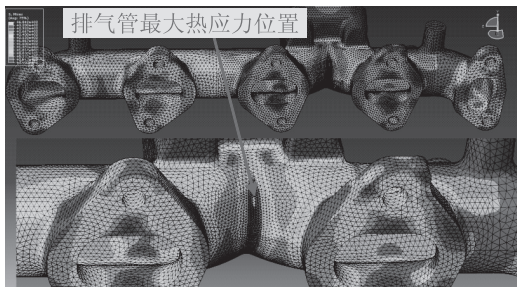


图11 base 方案热应力分布图

图 12 是 SF1 方案热应力分布图，从图中可以看出，相对 base 方案，排气管故障部位附近热应力降低约 50% (160 MPa)。考虑到该方案不用改内模，同时不影响排气流动，因此建议采用该改进方案。

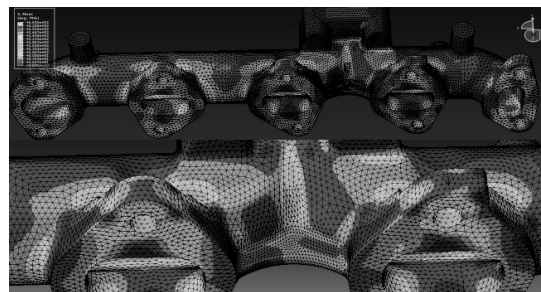


图12 SF1 方案热应力分布图

图 13 是 SF2 方案热应力分布图，从图中可以看出，相对 base 方案，排气管故障部位附近热应力降低约 30% (214 MPa)。考虑到该方案需要改内模，同时排气管内气流对冲加剧，影响增压器性能，因此不建议采用该方案。

SF1 方案在后来的可靠性试验中没有再出现开裂故障。

(下转第 48 页)

从表 1 可看出，两种方案的优缺点较为明显，新方案较旧方案在效率上和加工质量上都有质的飞跃，从而实现加工成本的大幅下降，因此新方案取代了旧方案，成为新连杆该工序的批量生产方案。

4 新方案宏程序编写

新方案的宏程序如下。

```

O0000
O2101
  #501=Sin [#18] * #3      X 轴坐标值赋值
  #502=Cos [#18] * #3      Z 轴坐标值赋值
M99
#3=86.2                    粗加工
#4=82                      精加工
#7=1000 (S)                粗铣转速值
#8=700 (F)                 粗铣进给值
N1 IF [#3 LT#4] GOTO2      加工完成条件语句
  IF [#3 LT82.2] THEN      精加工条件语句
    #7=1500 (S)             精铣转速值
    #8=500 (F)              精铣进给值
    #18=19                  B 轴起始角度
    #3=82
    G65 P2101 R#18 C#3      主程序段
    G65 P9002 X#501Z#502 W-50 I55J59R#18
    M65 G90 B#18
    G90 G0 G55 G43 X0 Y0 W0 Z100 H119 S#

```

```

7M3 Z2#18=#18+1
G65 P2101 R#18 C#3
G65 P9002 X#501 Z#502 W-50 I55J59R#18
G1 G55 X0 Z0 B#18 F#8
#18=#18-0.1
N3 IF [#18 LT [-20]] GOTO4 B轴控制程序
G65 P2101 R#18 C#3
G65 P9002 X#501 Z#502 W-50 Z-55
I55 J59 R#18
G1 G55 X0 Z0 B#18 F#8
#18=#18-0.1
GOTO3
N4 G90 G0 Z300.           粗加工程序段
#3=#3-1
GOTO1
N2 M55                   程序收尾
G91 G28 Z0 W0 M19
M30

```

5 结 论

通过分析研究连杆小头球面加工新旧方法的技术原理和实际加工效果，以及两种方案的最终技术比较，最终新方案由于高质量、高效率而胜出。该方案为球面加工提出了一种新的解决思路，有效地利用了工厂现有的设备，不至于造成重复投入，节约了生产成本。

(上接第 33 页)

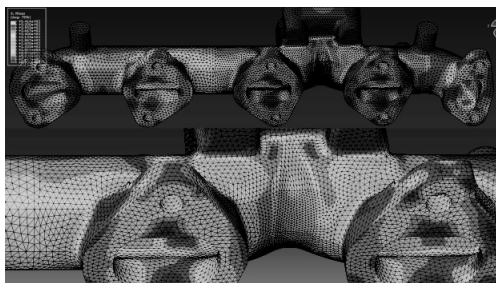


图 13 SF2 方案热应力分布图

3 结论及建议

(1) 排气歧管开裂故障可能的原因很多，需要分析铸造缺陷、材料化学成分、硬度及金相组织等是否符合设计要求；同时也要分析排气管温度、热

应力以及是否与发动机发生共振等。

(2) 三个方案下排气管温度场分布相似，最高温度非常接近(约 625 ℃)，低于排气管材料许用温度(760 ℃)。

(3) 该排气歧管开裂是由于排气歧管热应力过大(324 MPa)所致。改进后 sf1 方案排气歧管故障相应部位的热应力为 160 MPa，降低约 50%；该方案不需改内模，不改变管内排气流动，建议采用。SF2 方案排气歧管故障相应部位的热应力为 214 MPa，降低约 30%，但该方案需改内模，且会使气流对冲加剧，影响增压器性能，因此不建议采用。

目前，sf1 方案已经成功得到可靠性试验验证。