

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.10.013

基于流固耦合的 EGR 冷却器失效 分析及优化研究*

洪 洋¹, 吕志超¹, 赵国江²

(1. 台州科技职业学院 汽车与信息工程学院, 浙江 台州 318020;
2. 浙江邦得利环保科技股份有限公司, 浙江 台州 317000)

摘要:针对某板翅式废气再循环(EGR)冷却器出现的开裂问题,对 EGR 冷却器进行了基于流固耦合的失效分析及结构优化。基于 Fluent 与 ABAQUS,建立了 EGR 冷却器流固耦合分析流程,对 EGR 冷却器内流场、固体部分进行了流体力学与有限元流固耦合计算,对流体温度、传热系数与固体温度、热应力、等效塑性应变、应力幅之间的联系进行了研究,得出了 EGR 冷却器失效形式为循环热载荷导致的高应力低周疲劳断裂;利用电镜扫描得到了微观断口形貌,对流固耦合分析结果进行了验证,并提出了在冷却管两侧加装副主片以减少单位面积受力的优化方案。研究表明:基于 Fluent 与 ABAQUS 的流固耦合计算,对于 EGR 冷却器的失效分析及优化是可行的。

关键词:流固耦合;废气再循环冷却器;失效分析;疲劳断裂

中图分类号:TH122;U463.234.93

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)10-1075-05

Failure analysis and optimization of EGR cooler based on fluid-solid coupling

HONG Yang¹, LV Zhi-chao¹, ZHAO Guo-jiang²

(1. School of Automotive and Information Engineering, Taizhou Vocational College of Science & Technology, Taizhou 318020, China; 2. Zhejiang Bondlye Environmental Technology Co., Ltd., Taizhou 317000, China)

Abstract: Aiming at the cracking problem of plate-fin exhaust gas recycling(EGR) cooler, the fatigue analysis based on fluid-solid coupling was investigated and the design improvement was taken. The fluid-solid coupling process was built up based on Fluent and ABAQUS. The computational fluid dynamics and finite element calculation were carried out to study the relation between fluid temperature, heat transfer coefficient and solid temperature, thermal stress and stress amplitude. The crack on EGR cooler was proved to be a high stress low cycle fatigue fracture caused by calculation and SEM data. A design improvement was presented that additional pieces were assembled on the each side of fins to reduce stress per unit area. The results indicate that the fluid-solid coupling thermal fatigue analysis is effective on fatigue analysis of EGR cooler.

Key words: fluid-solid coupling; exhaust gas recycling(EGR)cooler; failure analysis; fatigue crack

0 引 言

随着各国排放限值的不断加严与限值范围的扩大,各汽车厂家越来越多地将废气再循环(EGR)系统

应用到柴油机上以降低 NO_x 的排放^[1-2]。EGR 系统可以降低燃烧室氧浓度与最高温度,是 NO_x 排放控制的重要手段之一^[3-6]。EGR 冷却器是 EGR 系统中的关键部件,直接影响发动机的排放性能与工作状态^[7]。

收稿日期:2019-03-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0211201)

作者简介:洪洋(1987-),男,浙江台州人,硕士研究生,主要从事汽车零部件设计与分析方面的研究。E-mail:hy2136@163.com

通信联系人:赵国江,男,高级工程师。E-mail:zhgj1963@126.com

EGR 冷却器工作环境恶劣,循环温差产生的循环热载荷易形成累计塑性应变^[8-10],最终导致 EGR 冷却器开裂。路宝玺^[11]通过宏观分析和微观分析表明管子与管板连接的焊缝断裂是疲劳破坏所致。在国六排放阶段,EGR 率增大产生更大的流量与更高的温度^[12-14]。某柴油机在进行发动机台架耐久试验时发生 EGR 冷却器开裂,导致发动机水气相通。

本文以该 EGR 冷却器为研究对象,使用流固耦合的数值求解方法计算冷却器的温度场、应力场、等效塑性应变与应力幅,分析开裂原因,并通过加装副主片的方法解决 EGR 冷却器开裂问题。

1 EGR 冷却器失效

本文研究对象为某直列六缸四冲程柴油机,排量为 13 L,最高转速为 2 200 r/min,使用拥有高换热率的板翅式 EGR 冷却器,冷却芯体由 6 层翅片组成,长度为 530 mm,如图 1 所示。

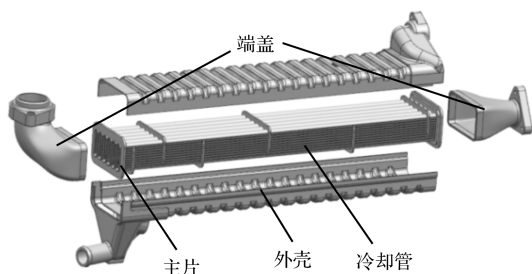


图 1 某 EGR 冷却器

EGR 冷却器在耐热冲击性能试验时,冷却管开裂导致水气相通,各冷却管断裂位置一致,均位于气体入口侧的冷却管钎焊圆角根部,切割发现冷却管母材发生断裂。

为了研究断裂原因,本文使用流固耦合的数值求解方法进行分析。

2 流固耦合原理与网格划分

2.1 流固耦合原理

本文首先根据几何模型使用 ANSA 软件建立有限元网格,并对 EGR 冷却器的内流场进行空腔提取,对计算流域进行网格划分,在冷却管区域进行加密处理,将流体网格导入 Fluent 软件中进行计算流体力学分析,再将冷却器有限元模型导入 Fluent 中,将流场分析结果中的表面温度、传热系数等热边界映射到有限元模型,导出 INP 文件,然后在 ABAQUS 中进行有限元计算的约束设置,并导入 INP 文件进行热边界的加载,并对 EGR 冷却器进行传热分析,最后将传热分析结果

导入有限元模型进行热应力分析。

流固耦合遵循基本物理守恒定律,包括质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律^[15-16]。对于 EGR 冷却器内部流体来说,质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中: t —时间; ρ_f —流体密度; \mathbf{v} —流体速度矢量。

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho_f \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}^2 \mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}_f) = \mathbf{f}_f \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\tau}_f$ —剪切力张量; \mathbf{f}_f —体积力矢量。

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial (\rho_f h_{\text{tot}})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v} h_{\text{tot}}) =$$

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{v} \cdot \rho_f \mathbf{f}_f + S_E \quad (3)$$

式中: h_{tot} —流体部分总焓; p —流体压力; λ —导热系数; S_E —能量源项。

固体部分守恒方程由牛顿第二定律得出:

$$\rho_s \ddot{\mathbf{d}}_s = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s \quad (4)$$

式中: ρ_s —固体密度; $\boldsymbol{\sigma}_s$ —柯西应力张量; \mathbf{f}_s —体积力矢量; $\ddot{\mathbf{d}}_s$ —固体域加速度矢量。

固体部分温度梯度引起的热变形 f_T 计算公式为:

$$f_T = \alpha_T \cdot \nabla T \quad (5)$$

式中: α_T —热膨胀系数。

2.2 网格划分

EGR 冷却器的计算流域从实体空腔中提取,并使用 ANSA 软件对计算流域进行网格划分,在冷却管区域进行加密处理。由于 EGR 冷却器内流场与固体部分的结构复杂,笔者使用非结构化四面体形成流固耦合分析所需的内流场网格与固体有限元网格,内流场面网格数为 2.18×10^5 、体网格数为 1.746×10^6 、固体有限元面网格数为 5.19×10^5 、体网格数为 5.1×10^5 。同时,为了增加计算准确性在冷却管与翅片处使用六面体网格,并进行加密处理。

3 EGR 冷却器流固耦合分析

3.1 EGR 冷却器流体分析

本文使用 Fluent 软件对 EGR 冷却器进行流体分析,冷却器气侧与液侧流动为三维定常湍流流动且流体流速较低,使用基于压力的定常求解器,选择 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型进行计算,采用 SIMPLE 算法进行压力与速度耦合;同时,为了得到高精度、稳定的计算结果,笔者采用二阶迎风格式进行耦合计算^[17]。假定液侧为液态

水,气侧为空气,比热、导热系数、湍流强度均随温度变化,由多项式函数计算得出,固体部分为不锈钢,计算时忽略重力影响。根据柴油机的台架试验数据确定分析边界。

本文以 EGR 率为 20% 时的进气、冷却液流量、温度作为流体分析边界条件,如表 1 所示。

表 1 流体边分析界条件

项目	参数
进气流量/(kg · h ⁻¹)	410
进气温度/(°C)	585
冷却液流量/(L · min ⁻¹)	90
冷却液温度/(°C)	80

经过流体仿真计算,在气体出口使用质量加权平均计算可得,出气温度为 228 °C,温差为 357 °C。使用 EGR 换热性能试验台,基于同一边界条件下的换热性能进行测试,可得出气温度为 220 °C,温差为 365 °C。其与仿真误差在 3% 以内,可见,该流体仿真结果准确,可作为传热分析输入。

3.2 EGR 冷却器传热分析

在进行 EGR 冷却器热应力分析之前需要进行固体传热分析,本文将固体有限元模型导入 Fluent 中,流体分析结果中将气侧、液侧表面温度、传热系数等热边界映射到有限元网格,并在 ABAQUS 中使用薄膜边界进行加载,同时设置冷却器的初始温度为 30 °C。根据 JB/T 11327 - 2013《内燃机废气再循环冷却器(EGRC)》中耐热冲击性能试验要求与实际工况,以 120 s 为循环通入高低温气体,即高温进气运行 60 s,然后常温运行 60 s,再在高温运行 60 s。本文进行两个循环的仿真计算,在 ABAQUS 中设置 3 个分析步,分别为加温、降温与第二次加温。

第二次加温后最高温度为 401 °C,位于进气端盖,出气端盖温度为 100 °C 到 200 °C 之间,外壳由于冷却液作用,温度小于 100 °C。

为研究冷却管的温度变化,在冷却管的前端、中端与末端各取一点,绘制冷却管各点温度变化,如图 2 所示。

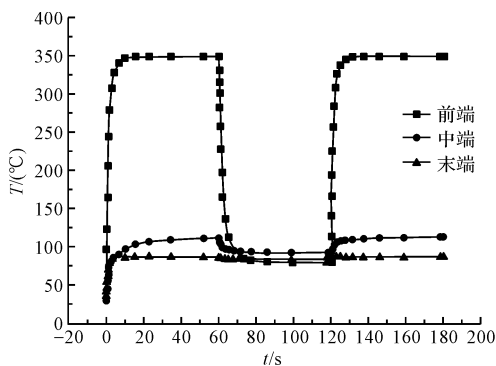


图 2 冷却管各点温度变化

由图 2 可知:冷却管前端温差最大,约 300 °C;中部温差次之,约 50 °C;末端温差最小,仅约 10 °C。

3.3 EGR 冷却器热应力分析

EGR 冷却器在耐热冲击性能试验的加温状态时,冷却管、端盖受到高温气体作用有向外膨胀的趋势;在降温时,冷却管、端盖受到低温气体作用有收缩的趋势,而外壳由于冷却液的作用保持稳定,冷却管、端盖与外壳膨胀与收缩的不一致,导致循环热应力的产生。

由于固体部分均为同型号不锈钢,钎焊残余应力较小,假设冷却器钎焊后不存在残余应力。在 ABAQUS 中导入有限元网格,固定两端法兰,与传热分析一致设置加温、降温与第二次加温 3 个分析步,加载传热分析的固体温度场,从而进行热应力计算。

第二次加温后冷却管热应力云图如图 3 所示。

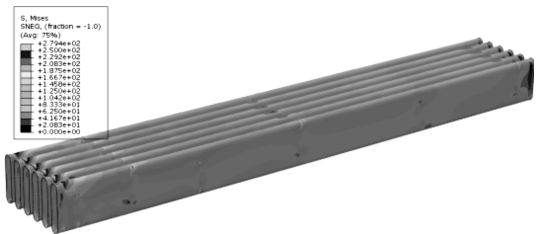


图 3 第二次加温后冷却管热应力云图

由图 3 可知:冷却管整体应力较低,约 120 MPa,但在冷却管靠近进气口侧应力值明显增大,最大值为 279 MPa。在 GB150.2《压力容器:材料》中规定,不锈钢材料在热态运行工况下选用 3 倍许用应力进行考核,为 246 MPa,可见应力值超过考核标准。

同时,提取第二次加温后冷却管等效塑性应变(PEEQ)云图,如图 4 所示。



图 4 第二次加温后冷却管等效塑性应变

由图 4 可知:大部分冷却管未发生塑性应变,但在冷却管靠近进气口侧出现塑性应变,最大值为 0.4%,与冷却管断裂位置一致。根据 JB 4732《钢制压力容器—分析设计标准》等效塑性应变应小于 0.1%,可见等效塑性应变超过设计标准。

在冷却管前端、中端与末端各取一点绘制的冷却管各点应力变化曲线如图 5 所示。

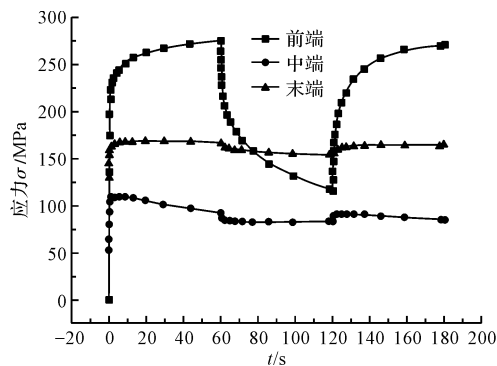


图 5 冷却管各点应力变化

由图 5 可知:冷却管前端应力幅最大,约达 160 MPa;末端应力值较大,但应力幅与中端接近,约 50 MPa。

综上,在耐热冲击性能试验过程中,冷却管的最大应力、等效塑性应变均超过许用标准,同时应力幅较大,因此可断定 EGR 冷却的失效属于高应力低周疲劳断裂。

4 分析验证与设计优化

4.1 分析验证

为验证 EGR 冷却器流固耦合分析的准确性,本研究对开裂断口进行电镜扫描,得到的微观断口形貌如图 6 所示。

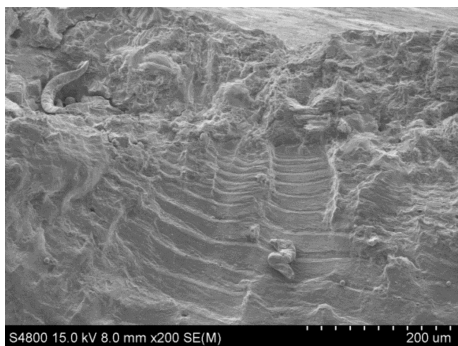


图 6 微观断口形貌

由图 6 可知:断口处存在明显的疲劳辉纹,辉纹宽度逐渐增大,与陈伟婧^[18]发现的断口形貌一致,为疲劳断裂所特有的特征,说明该 EGR 冷却器的失效形式为循环热载荷导致的高应力低周疲劳断裂^[19],与上文流固耦合分析结果一致。

4.2 设计优化

流固耦合分析结果与 EGR 冷却器电镜扫描均显示失效形式为高应力低周疲劳断裂,在优化设计时需对高应力区域进行局部加强,因此,优化方案是在冷却管两侧加装副主片,增加高应力区域受力面积,减少单位面积受力。

经流固耦合计算,在同一边界下优化方案第二次加温后冷却管最大应力下降至 241 MPa,最大应力下降 13.6%,满足 GB150.2《压力容器:材料》的考核要求。此外,冷却管等效塑性应变小于 0.1%,冷却管前端应力幅约 100 MPa。经实际耐热冲击性能试验,改进后的 EGR 冷却器不再出现开裂现象。

5 结束语

(1) 本文采用流固耦合的方法,对某 EGR 冷却器开裂进行分析,流体分析结果与换热性能试验结果接近,热应力分析潜在失效点与冷却器实际断口位置相同,分析失效形式与断口电镜扫描结果吻合,说明该流固耦合方法在实际工程应用中是可行的;

(2) 针对 EGR 冷却器存在的高应力低周疲劳断裂,提出在冷却管两侧加装副主片的优化方案,减少了冷却管热应力、等效塑性应变与应力幅。经过流固耦合分析与实验实证,改进方案满足使用要求。

参考文献 (References):

- [1] ABD-ELHADY M S, ZORNEK T, MALAYERI M R, et al. Influence of gas velocity on particulate fouling of exhaust gas recirculation coolers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(4):838-846.
- [2] 曾 契,沈 凯,刘新续,等. 低压 EGR 对 GDI 增压汽油机外特性下性能和排放影响[J]. *内燃机工程*, 2018, 39(2):43-47.
- [3] 鹿盈盈,于文斌,裴毅强,等. EGR 与喷油定时对柴油机预混燃烧颗粒排放的影响[J]. *内燃机学报*, 2017, 35(3):193-199.
- [4] 陈贵升,马帅营,毛 斌,等. 基于 EGR 技术的低排放重型柴油机燃烧系统开发[J]. *内燃机学报*, 2013, 31(4):309-317.

(下转第 1093 页)

本文引用格式:

洪 洋,吕志超,赵国江. 基于流固耦合的 EGR 冷却器失效分析及优化研究[J]. *机电工程*, 2019, 36(10):1075-1078, 1093.

HONG Yang, LV Zhi-chao, ZHAO Guo-jiang. Failure analysis and optimization of EGR cooler based on fluid-solid coupling[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(10):1075-1078, 1093.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>