

结构与可靠性

船用柴油机 SCR 反应器热-结构耦合分析及优化设计

沈飞翔, 肖 飞

(七一一研究所, 上海 200090)

摘 要: 针对船用柴油机 SCR 反应器工作过程中受排气温度影响发生变形的问题, 对反应器进行了热-结构耦合分析; 根据分析结果提出了反应器优化设计方案。优化前后的分析数据表明: 该优化方案可有效降低反应器变形, 同时可降低其等效应力。

关键词: SCR 反应器; 变形; 热-结构耦合分析; 优化设计

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)06-0016-03

Thermal-structural Coupling Analysis & Optimal Design for Marine Diesel Engine SCR Reactor

Shen Feixiang, Xiao Fei

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: In order to solve the deformation of marine diesel engine SCR reactor in operation due to the high temperature of exhaust gas, thermal-structural coupling analysis of the reactor was carried out. Based on the analysis results, the optimal design programme of this reactor was put forward. The results show that the optimal programme can effectively reduce the deformation of the reactor, and the equivalent stress has also been reduced.

Key words: SCR reactor; deformation; thermal-structure coupling analysis; optimal design

0 引 言

船用柴油机工作过程中产生的尾气中含有大量氮氧化物 (NO_x), 对环境造成污染。为减少污染, 相关机构制定了排放法规。随着排放法规的日益严格, 单纯采用机内控制技术已较难满足排放限值的要求, 可采用相应的后处理技术, 其中 SCR (Selective Catalytic Reduction, 选择性催化还原) 技术是降低 NO_x 排放的有效手段之一^[1]。

SCR 反应器是 SCR 系统中盛装催化剂及发生反应的场所, 是整个 SCR 系统的重要组成部件。柴油机的排气通过 SCR 反应器时的温度一般在 300℃ 以上, SCR 反应器在该温度条件下工作, 可能会导致结构发生变形, 严重时将直接影响催化效率和

使用寿命。

本文针对船用柴油机 SCR 反应器工作过程中, 受排气温度影响发生变形的问题, 进行了热-结构耦合分析; 并提出了反应器优化设计方案。

1 船用 SCR 反应器热-结构分析

SCR 反应器是 SCR 系统中的重要组成部分, 一般由不锈钢钢板焊接组成, 内部设有放置催化剂的框架结构以及优化烟气流场特性的分流器。反应器一般安装在柴油机排气管路上, 为了保证 SCR 反应的温度需求, 反应器通常置于消音器、余热锅炉等后端设备之前。

反应器前部是喷氨段管路、膨胀节、混合器等部件, 这些部件属于 SCR 系统中还原剂 (尿素水

收稿日期: 2015-08-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目, 编号 (2013BAG25B01)。

作者简介: 沈飞翔(1983-), 男, 工程师, 主要研究方向为柴油机排放后处理技术, E-mail: feixiang_shen@163.com。

溶液) 的计量喷射模块。在结构组成上, 该部分与反应器属于刚性连接, 因此在进行热-结构分析时, 须要考虑这部分的影响。

图 1 为 SCR 反应器及喷氨段管路、膨胀节、混合器等部件的结构及相对位置关系示意图。

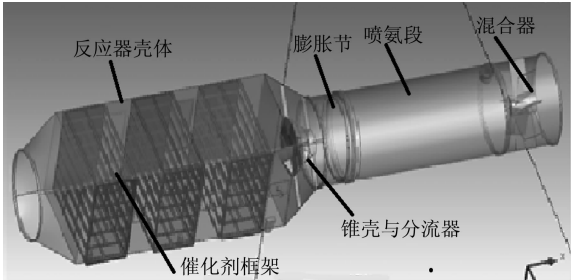


图 1 SCR 反应器等部件结构及相对位置示意图

柴油机排气温度通常在 300 ℃ 以上, SCR 反应器及上述安装于排气管路上的部件, 受热载荷影响会发生热变形, 对反应器的结构稳定性、密封性能等造成危害。因此有必要进行热-结构耦合分析, 并对反应器结构进行针对性的优化。

结构温度场的分布不均会引起结构的热应力; 结构部件在高温环境中工作, 材料受到温度的影响会发生性能的改变, 这些都是进行结构分析时须要考虑的因素。为此须要先进行相应的热分析, 然后再进行结构分析。本文中利用 Workbench 软件先对 SCR 反应器进行稳态热分析, 在获取温度场的基础上, 对其进行结构分析, 从而找出反应器变形较大的部位。

1.1 稳态热分析

稳态热分析是对系统或者结构部件在稳态热载荷条件下的温度分布状态进行分析。稳态热分析作为热力学分析中的基础环节, 在进行其它热力学分析前一般都会先行进行^[2-3]。在实际工作条件下, SCR 反应器会长时间处于 300 ℃ 左右的稳态传热状态。

1.1.1 稳态热分析边界条件

稳态分析过程中, SCR 反应器入口与出口两端视为刚性连接, 所以在分析过程中采用固定约束, 同时六个支架也固定在船舱上。由于 SCR 反应器壳体外层包裹保温层, 可近似认为对外界绝热, 因此热分析过程中不考虑对外热辐射以及对流的影响。

热分析过程中, 反应器出入口的温度已知, 入口气体温度设为 350 ℃, 出口温度设为 230 ℃, 因此可以计算出其热流率大小, 如表 1 所示。

1.1.2 稳态热分析结果

稳态热分析的结果如图 2 所示。由分析结果可

知: 从入口到出口, 温度逐渐降低, 由于反应器外层有保温层, 可以认为对外绝热, 无对外热辐射和对流散热, 因此其温度呈现图 2 所示的梯度均匀降低。

表 1 仿真分析参数

入口温度/℃	出口温度/℃	混合器段热流率/ (W · m ⁻²)	壳体段热流率/ (W · m ⁻²)
350℃	230℃	0.8	1.2

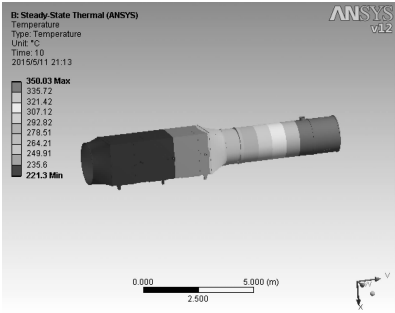


图 2 稳态热分析结果

1.2 热-结构耦合分析

热-结构耦合分析是分析结构整体在温度场下的响应情况, 这些响应包括应力、应变以及位移等。将稳态分析中的温度场作为体载荷施加到结构整体上, 由此可以得到温度场下结构整体的等效应力分布状况, 以及总变形情况^[4-6]。

1.2.1 热-结构耦合分析边界条件

在热-结构耦合分析过程中, 采用静态结构耦合分析法, 将稳态热分析时的热载荷加载至静态结构分析中, 进行耦合分析^[7]。在分析过程中, 不但须要考虑其自身的重力载荷影响, 还须要考虑柴油机排气压力的影响, 排气压力大约为 103 kPa; 其它固定约束、受力情况与稳态热分析时的相同。

1.2.2 热-结构耦合分析结果

热-结构耦合分析结果如图 3 与图 4 所示。

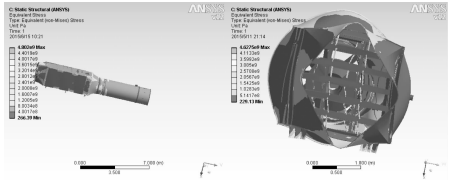


图 3 等效应力图

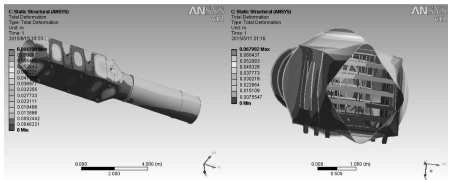


图 4 总变形图

从图中可以看出, SCR 反应器变形较大的部位主要位于反应器的锥壳部位以及锥壳与反应器壳体交界的部位。从而可知, SCR 反应器在施加热载荷的情况下, 其锥壳与壳体的刚度不足, 须要对其进行优化, 减小变形。

2 SCR 反应器结构优化

2.1 优化目标及方案

优化设计的思路是: 通过加大反应器壳体与锥壳的壁厚, 以提高其刚度, 从而改善变形情况。从分析结果可以看出, 外壳变形较大部位主要集中在锥壳以及锥壳和 SCR 反应器壳体交界部位, 因此加大其壁厚可以有效提高其刚度, 减小变形。同时, 在分析过程中还发现分流器支架变形较为明显, 所以通过加大支架厚度, 改善其截面形状以减小变形。优化前后的锥壳和分流器模型对比如图 5 所示。分流器的支架间增加了一根梁来提高其刚度, 改善变形情况; 同时锥壳与分流器的支架厚度均增加了 5 mm。具体优化参数如表 2 所示。

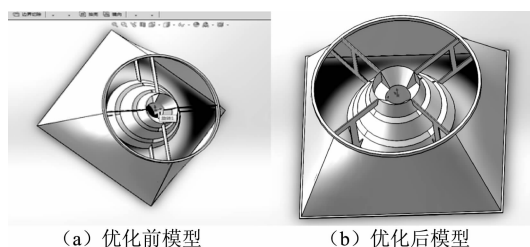


图 5 优化前后的锥壳与分流器

表 2 优化参数

项目	锥壳	反应器壳体	分流器	
	壁厚/mm	壁厚/mm	支架厚度/mm	支架形状
优化前模型	5	5	5	直条状
优化后模型	10	10	10	H 形

2.2 优化方案的验证

对优化后的模型再次进行热-结构分析, 结果如图 6 与图 7 所示。优化前后的应力及变形情况对比如表 3 所示。

表 3 优化前后的应力及变形数据

项目	等效应力最大值/MPa		总变形最大值/mm	
	锥壳入口	锥壳与壳体交界处	锥壳入口	锥壳与壳体交界处
优化前	120.1	160	37.0	46.2
优化后	80.0	120	14.9	35.0

从表 3 中的数据可以看出, 经优化后, 反应器的变形情况得到了改善。同时, 整体等效应力也有一定下降。

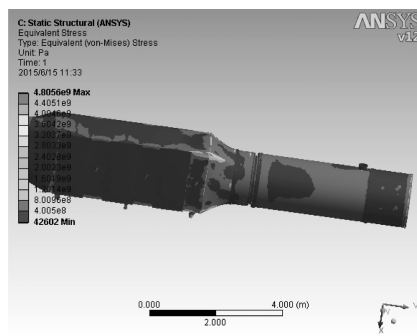


图 6 等效应力图

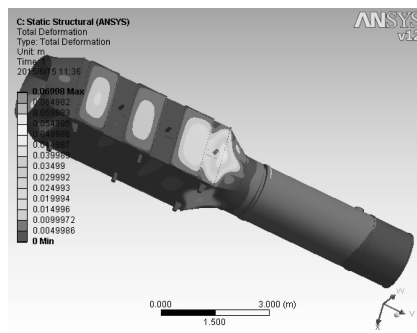


图 7 总变形图

3 结束语

针对船用柴油机 SCR 反应器工作过程中受排气温度影响发生变形的问题, 进行了热-结构耦合分析, 并提出了反应器优化设计方案。优化前后的对比分析结果表明: 该优化方案可有效降低反应器变形, 同时可降低等效应力。

参考文献

- [1] 肖青云, 吕庭豪. SCR——一种新型环保装置 [J]. 船海工程, 2002 (2): 32-34.
- [2] 刘平健. 船舶柴油机的 NO_x 排放 [J]. 上海海事大学学报, 2000, 21 (3): 70-74.
- [3] 曲虹霞, 钟秦. NH₃ 选择性催化还原 NO_x 的实验研究 [J]. 南京理工大学学报, 2002, 26 (1): 68-71.
- [4] Liu H, Guo T, Yang Y, et al. Optimization and numerical simulation of the flow characteristics in SCR system [J]. Energy Procedia, 2012, 17 (Part A): 801-812.
- [5] Gao Y, Liu Q, Bian L. Numerical simulation and optimization of flow field in the SCR denitrification system on a 600 MW capacity units [J]. Energy Procedia, 2012, 14 (18): 370-375.
- [6] 杜振, 钱徐悦, 何胜, 等. 燃煤电厂烟气 SCR 脱硝成本分析与优化 [J]. 中国电力, 2013, 46 (10): 124-128.
- [7] 董建勋. 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝试验研究及数学模型建立 [D]. 北京: 华北电力大学, 2007.