

结构与可靠性

某船用柴油机排气管路流-固耦合计算 与保温效果研究

彭 军, 王 磊, 周 军, 孙炉钢

(七一一研究所, 上海 200090)

摘 要: 对某船用柴油机排气管路的流动与传热过程开展流-固耦合仿真分析。结果表明:受排气管路结构影响,管内流动方向和流速发生变化,局部区域产生明显的回流现象;排气管路外表面温度分布差异较大,平均温度高达 534 ℃。为达到柴油机安全设计要求,在排气管路外壁敷设保温材料。分析结果表明:气凝胶纳米材料的保温效果优于硅酸铝纤维材料,在相同的运行条件和使用要求下,气凝胶纳米材料的敷设厚度更薄。

关键词: 船用柴油机;排气管路;流-固耦合分析;保温材料

中图分类号: TK423.4⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)06-0029-07

The Fluid-Solid Coupled Calculation and Analysis of the Heat Preservation Effect of the Exhaust Piping System on a Marine Diesel Engine

Peng Jun, Wang Lei, Zhou Jun, Sun Lugang

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: The fluid-solid coupled simulation analysis was carried out to study the the flow and heat-transfer process of the exhaust piping system of a marine diesel engine. The results showed that the flow direction and velocity changed due to the influence of piping structure and significant backflow occurred in part of the areas. There were obvious temperature differences among external surfaces of the exhaust piping system and the average temperature was up to 534 ℃. To meet with safety requirements of the diesel engine design, heat preservation material was used to cover the out-wall the piping system. The analysis results show that the heat preservation effect of aerogel nanometer material is superior to aluminum silicate fiber, which resulted in the installation thickness of Aerogel nanometer material being thinner under the same operation conditions and requirements.

Key words: marine diesel engine; exhaust piping system; fluid-solid coupled analysis; heat preservation material

0 引言

在柴油机燃烧、冷却和排放系统中,流体介质与固体零部件直接接触,其流动与传热问题相当突出。这不仅会影响柴油机的能量分配与回收利用,还直接关乎关键零部件(如气缸盖、气缸套、活

塞和排气管路等)的热可靠性^[1-4]。在早期的研究中,大多忽略了流体介质(冷却水、高温燃气等)与固体零部件之间的相互影响,仅通过求解经验公式或使用经验数据获取流体与固体交界面处的换热边界,往往精度不高且应用范围受限^[1-6]。流-固耦合仿真分析法直接将原本难以确定的外部边界转化为耦合系统的内部边界,并在内部边界上通过求解

收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2019-08-05

作者简介: 彭军(1992—), 助理工程师, 主要研究方向为动力工程及工程热物理, pengjemail@163.com。

能量方程获取流体与固体间的热量传递值,极大程度降低了计算难度,并提高了仿真精度,使其更接近于实际过程^[3,5-6]。

排气管路是船用柴油机排气系统的重要组成部分,一般而言,柴油机燃烧废气温度可达 300 ~ 700 ℃,致使排气管路表面温度较高,极易烫伤操作人员。本文以某船用柴油机排气管路为研究对象,通过 Fluent 软件建立流-固耦合仿真模型,对排气管路内的稳态流动与传热过程进行分析,获得管内燃烧废气的流场分布特征和金属管壁的温度分布规律。同时,基于仿真计算结果选取合适的保温材料,确保排气管路的表面温度控制在安全范围内。

1 排气工作过程

某船用柴油机排气管路结构组成及连接形式如图 1 所示。其主要尺寸和相关材料参数见表 1 和表 2。其中,排气管路 I、II 及连接法兰的内径和材质均保持一致;波纹管 I、II 的厚度和材质均保持一致。

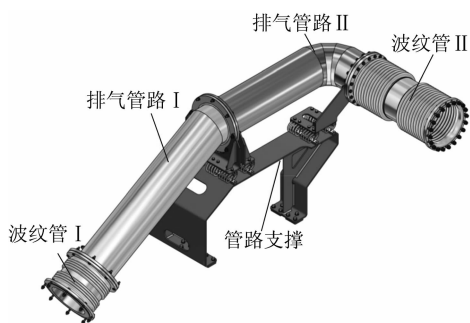


图 1 排气管路组成与连接形式示意图

表 1 排气管路尺寸和材质

排气管路内径/mm	250
排气管路厚度/mm	2
管路 I 长度/mm	1 269
管路 II 长度/mm	966
波纹管 I 长度/mm	276
波纹管 II 长度/mm	705
波纹管厚度/mm	2
排气管路材料	316 不锈钢
波纹管材料	316L 不锈钢

表 2 排气管路材料物性参数

材料名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$)
316 不锈钢	8 030	502.5	21.5
316L 不锈钢	8 030	502.5	21.5

燃烧废气经涡轮增压器膨胀做功后进入排气管路,经波纹管 I、排气管路 I 和 II,最后经与波纹管 II 连接的管路流出船舱。其中波纹管 I 内安装有套筒,燃烧废气沿套筒流动。排气管路固定安装在支撑平台上,各部分通过法兰连接,并由螺栓锁紧;在两段排气管路间设置垫片,强化密封效果。

燃烧废气温度高,流量大,在整个流通路径中呈现高温、高湍流的流动特性,其热量通过管壁导出。结合船舱内的自然对流和辐射换热条件,排气管路最终形成稳定的温度分布特征。整个流动与换热过程可简要由图 2 表征^[7-8]。

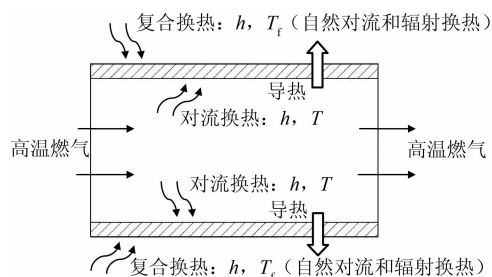


图 2 流动与传热过程示意图

2 流-固耦合模型

2.1 理论基础

本文借助计算流体力学软件 Fluent,采用流-固耦合分析法对排气管路内的流动与传热过程进行研究。该方法将流-固交界面作为计算区域内部边界,通过求解相关偏微分方程完成两种区域间的能量交换,无须进行反复迭代,节约计算资源,且计算结果更为合理。分析和求解的过程如图 3 所示。

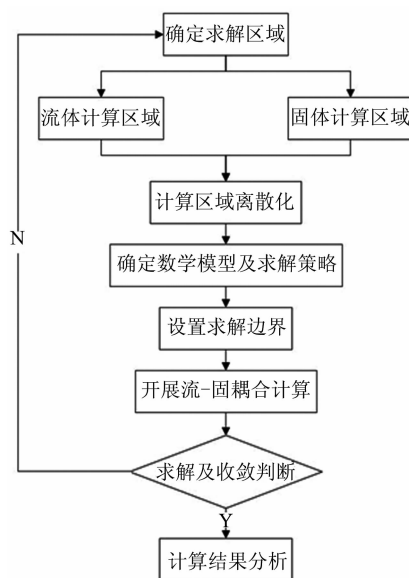


图 3 分析和求解过程示意图

(1) 根据工作过程的特点，确定求解区域。本次研究中包含流体区域和固体区域，流体区域指管内燃烧废气流动区域，固体区域指排气管路金属管壁。

(2) 对求解区域做离散化，同时选择能够合理、准确描述工作过程物理现象的数学模型。在本次研究中，各区域的计算均遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律，可采用表 3 内的控制方程进行表征。

(3) 确定求解策略和边界条件，完成数学表达式的离散和求解，并保证计算结果的收敛，最终获得多物理场（温度场、速度场等）的计算结果。

表 3 控制方程解释说明^[2,7-8]

序号	定律	表达式	意义
1	质量守恒定律	$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0$	表征控制体质量增加率与从外界进入控制体净质量流率间的关系
2	动量守恒定律	$\frac{d(\rho \vec{U})}{d\tau} = \rho \vec{F} - \nabla p + \mu \Delta \vec{U}$	表征控制体流体沿某一方向的动量增加率与该方向上动量净流入率和作用在其上的外力之和的关系
3	能量守恒定律	$\frac{d(\rho c_p T)}{d\tau} = \Phi + \lambda \nabla T + \rho q$	表征控制体流体内能量增加率与进入控制体的净热流量以及体积力等对控制体做功功率间的关系

2.2 模型确立

本次研究主要关注燃烧废气在排气管路内的流动行为特征，以及燃烧废气与排气管路间的传热过程。在流-固耦合模型的建立过程中作出如下假设：

(1) 由于工作过程中燃烧废气持续、稳定地流出机体，因此研究过程中不考虑外部条件对燃烧废气的影响，即假定燃烧废气温度和流量不变。

(2) 管路支撑直接安装在其他设备顶部且不与高温介质接触，其温度稳定并保持在较低水平，因此在研究过程中不考虑其与排气管路连接处的传热，即假定排气管路法兰仅与机舱内空气发生复合换热。

(3) 研究中不考虑波纹管 I 的结构（燃烧废气未直接流经波纹管 I）、各法兰连接处螺纹孔与螺栓的结构以及各连接部位的焊缝结构。排气管路外部固体计算区域和内部流体计算区域如图 4 所示。



图 4 计算区域示意图

基于上述假设，对计算区域进行离散化，即网格划分。由于计算区域较为复杂，本文采用非结构化网格对计算区域进行网格划分。划分策略如下：采用四面体网格进行划分，并选用相对较小的网格尺寸，对倒角、圆角和曲率较小的部位进行局部加密；采用六面体或四面体网格对结构平整、光滑的部位进行网格划分，网格尺寸可相对增大。最小网格尺寸为 0.15 mm，网格数量 559 万。划分结果如图 5 所示。



图 5 计算区域网格划分示意图

此外，本文的求解策略如下：不考虑时间的影响，即采用稳态迭代计算；选用 Couple 算法进行压力-速度耦合求解；采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型补充求解动量守恒方程。

2.3 边界条件

在确定了数学模型和相关求解策略后，须确定计算边界条件，以此获取多物理场耦合分布结果。本次计算中的边界条件分为流体区域入口边界、流体区域出口边界和固体区域壁面边界。

(1) 流体区域入口

流体计算区域入口如图 4 所示，其流动介质为燃烧废气，其流动与物性参数设置如表 4 所示。采用质量流量入口作为边界。

表 4 流动与物性参数设置

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
3.3	650	0.415	0.000 04	1 000

(2) 流体区域出口

流体计算区域出口如图 4 所示。其流动介质、流动参数和物性参数与入口保持一致；采用压力出口作为边界，压力值为标准大气压。

(3) 固体区域壁面

固体计算区域壁面分为外壁和连接壁面,如图4所示。

外壁采用传热学第三类边界条件,即给定壁面附近流体温度和对流换热系数。本次研究采用空气复合换热系数(考虑自然对流和辐射换热),取值 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;机舱内空气温度基本保持在 $5 \sim 45^\circ\text{C}$,并随季节变化存在差异;本次研究排气管路附近空气温度取 45°C 。

连接壁面采用传热学第二类边界条件,即给定边界热流密度。本文研究采用绝热边界,即热流密度取值为 $0 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

3 计算结果分析

基于流-固耦合分析模型开展仿真计算,为保证分析模型和计算结果的准确性,在计算过程中监测排气管路不同位置处的温度(K)和进、出口的质量流量差值(kg/s),确保各参数保持稳定后结束计算,并以此展开分析。

在排气管路Ⅰ、排气管路Ⅱ和波纹管Ⅱ处各选取一个监测点,获取监测点温度和进、出质量流量差值,如图6所示。各监测点温度及进、出口流量基本保持一致,误差在 0.1% 左右,认为计算收敛,因此开展后续分析。

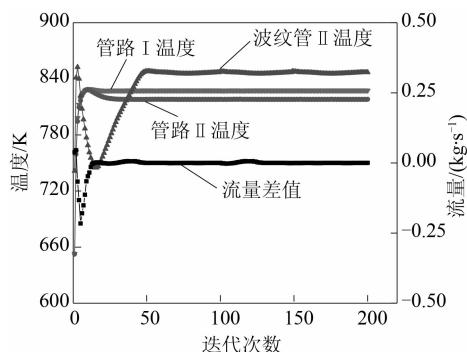


图6 监测参数收敛示意图

在后续分析过程中制定的分析截面如图7所示,分别为A面(排气管路Ⅰ横截面)和B面(排气管路Ⅱ和波纹管Ⅱ横截面)。

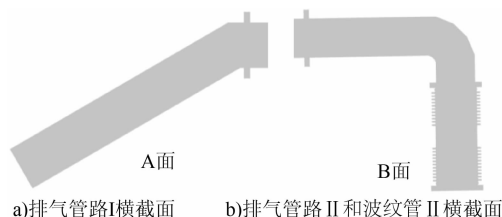


图7 分析截面示意图

3.1 流场分布

图8为不同截面流体(燃烧废气,下同)速度分布云图。受排气管路结构影响,流体流速分布呈现如下特点:在排气管路Ⅰ前段,管内流体流动较为平缓、均匀,流速基本呈现中心对称分布。流经支管折弯处,由于流动边界发生变化,流体流动不规则程度增大,流速也随之改变,即上部折弯处流速减小,下部折弯处流速增大。图9为折弯区域流线分布示意图。在折弯区域,并未形成漩涡或回流区域,仅存在流速改变和流动方向些许偏移(离心力作用),即下部流体向上偏移,致使在排气管路Ⅱ前段,流速呈现不对称分布,上部流速明显高于下部流速。同时,由于排气管路Ⅱ后段存在多处折弯区域,流体流动方向改变明显。图10显示流体脱离支管内侧折弯区域后,整体流动向外侧偏移(离心力作用),并在波纹管Ⅱ内侧区域产生多处较为明显的回流,且流速保持在较低水平,导致波纹管Ⅱ内流体流速分布差异明显。

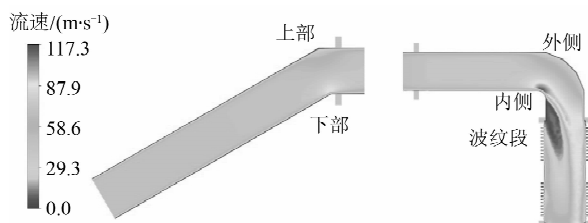


图8 不同截面速度分布云图

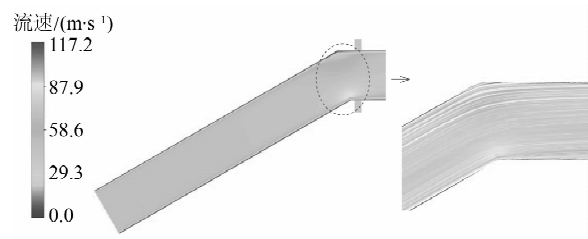


图9 A面局部流线分布示意图

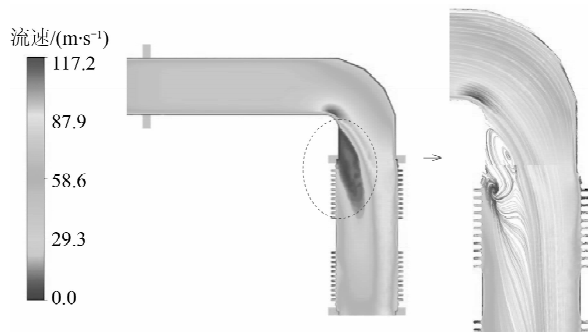


图10 B面局部流线分布示意图

3.2 温度场分布

图11和图12分别为不同截面温度分布云图和

排气管路外表面温度分布云图。由图可知：在排气管路Ⅰ和排气管路Ⅱ内部，流体温度分布较为均匀，基本保持在 640 ~ 650 ℃ (913.15 ~ 923.15 K)；受回流影响，在波纹管Ⅱ内侧区域，流体温度明显下降。在固体区域，温度由内至外逐渐增大，且存在较大的温度梯度。排气管路Ⅰ外表面温度分布沿径向具有良好的对称性，其入口部分受连接壁面的影响（绝热边界），温度较后部偏低；在排气管路Ⅰ和Ⅱ的法兰处，由于换热表面积增大，强化了传热过程，此处温度较低，在法兰顶部，温度达到最低值 387 ℃ (660.15 K)，在底部连接处，无任何圆角过渡，为尖角结构，其传热能力较低，温度高于法兰本体温度。由图 2 知：传热过程不仅与流体温度相关，还受到对流换热系数的影响，而流体流速直接影响其对流换热能力^[9]。在排气管路Ⅱ处，由于流体流速沿径向存在不对称性，其外表面温度也表现为上部温度高，下部温度偏低的分布特征；波纹管Ⅱ受到回流区域的影响，即此处流体温度和流速偏低，削弱了换热过程，致使波纹管Ⅱ整体温度分布差别较大，表现为内侧温度偏低，外侧温度偏高，且波纹段和两端法兰的温度低于直管段（包含两波纹片中间区域）温度。

为更直观地表征排气管路外表面的温度水平，本文选取外表面平均温度作为表征参数，并定义如下：

$$\frac{1}{A} \int \bar{T} dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n T_i A_i \quad (1)$$

式中：A 为表面积，m²； $\bar{T}$ 为平均温度，K； T_i 为控制单元温度，K； A_i 为控制单元面积，m²。

由式（1）可得：在流量为 3.3 m³/s，温度为 650 ℃ (923.15 K) 的废气排放条件下，排气管路外表面的平均温度为 534 ℃ (807.15 K)，最高温度为 590 ℃ (863.15 K)，最低温度为 387 ℃ (660.15 K)。

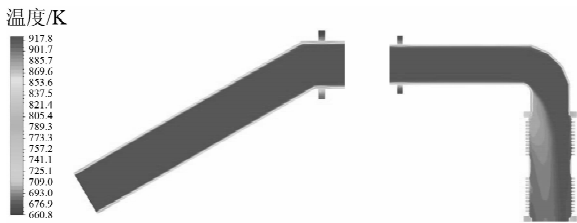


图 11 不同截面温度分布云图

3.3 保温效果分析

3.3.1 保温材料选择

上述计算结果表明：排气管路外壁温度整体保持在 500 ℃ 以上，大大超出了柴油机安全设计要

求，须通过在排气管路外壁敷设保温材料，严格控制金属零件表面温度，保证操作人员接触范围内的温度不超过 60 ℃。通过查阅相关文献，总结出各类保温材料的优缺点和应用范围，见表 5。综合考虑保温材料应用范围、使用年限和价格等因素，本文对气凝胶纳米材料和硅酸铝纤维材料的保温效果进行深入分析。二者物性参数见表 6。



图 12 排气管路外表面温度分布云图

表 5 各类保温材料优缺点与应用范围^[10-12]

名称		优点	缺点	应用范围
传统保温材料	复合硅酸盐	导热系数小，价格低	分解老化快，质地软，易下沉和塌陷	使用温度不超过 500 ℃
	岩棉	化学性质稳定，导热系数小，价格低	热稳定性差，靠粘结剂粘结，易下沉	使用温度不超过 350 ℃
	玻璃棉	化学性质稳定，价格低	导热系数较大，且材质不环保	使用温度不超过 300 ℃
	硅酸铝	热稳定性好，导热系数小	部分产品耐磨性能差，易破损	使用温度不超过 1 000 ℃
新型保温材料	CAS 铝镁	热稳定性好，寿命长	价格贵	使用温度不超过 1 000 ℃
	气凝胶纳米	不易腐烂、化学性质稳定，耐高温	价格贵，暂未广泛推广	使用温度不超过 1 000 ℃

表 6 保温材料物性参数设置^[12]

材料名称	密度/(kg · m ⁻³)	比热容/(J · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	不同温度下的导热系数/(W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)
气凝胶纳米材料	3	500	100 ℃：0.015；200 ℃：0.023 300 ℃：0.027；400 ℃：0.038 500 ℃：0.056；600 ℃：0.079
硅酸铝纤维材料	128	700	100 ℃：0.04；200 ℃：0.048 300 ℃：0.59；400 ℃：0.072 500 ℃：0.083；600 ℃：0.110

为便于分析，在保温效果计算过程中不考虑波纹管Ⅰ和Ⅱ，仅在排气管路上敷设保温材料。图

13 为排气管路敷设 20 mm 厚保温材料时的内部剖面示意图,其网格划分策略不变。在研究过程中,假设保温材料与排气管路紧密贴合,不考虑二者间的传热热阻。

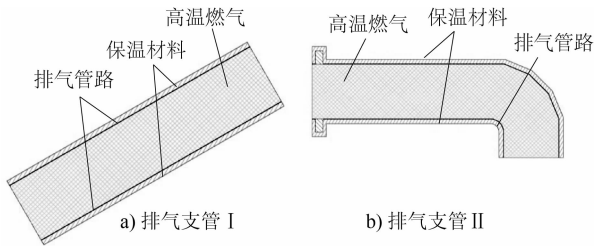


图 13 保温材料敷设结构剖面示意图

3.3.2 保温厚度分析

基于柴油机安全设计原则,在排气管路外壁上敷设气凝胶纳米材料或硅酸铝纤维材料。通过计算得到不同敷设厚度下保温层外表面平均温度变化曲线,如图 14 所示。

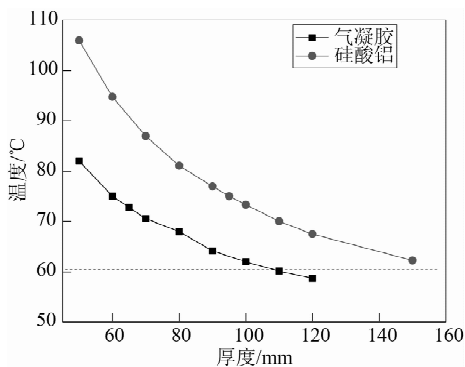


图 14 外表面平均温度随敷设厚度变化示意图

图中数据表明:敷设保温材料可显著降低外表面平均温度;但随着敷设厚度的增加,温度降低水平逐步减弱。对于气凝胶纳米材料和硅酸铝纤维材料,当其敷设厚度分别达到 60 mm 和 90 mm 后,厚度每增加 10 mm,外表面平均温度降低均不足 3 °C。

在相同排气条件下,气凝胶纳米材料的保温性能优于硅酸铝纤维材料,特别在敷设厚度较小时,其优越性越发明显,但随着敷设厚度的增大,二者差距逐步缩小。如,敷设厚度为 50 mm 时,两种保温材料外表面平均温差为 24 °C,当敷设厚度为 120 mm 时,二者表面平均温差降为 8.9 °C。因此,在安装尺寸受限时可优先选用气凝胶纳米材料进行保温。

此外,通过对比图 14 中数据发现:当气凝胶纳米材料的敷设厚度达到 100 mm 以上时,其外表面平均温度不超过 60 °C;而硅酸铝纤维材料,其

敷设厚度达到 150 mm 仍无法保证其外表面平均温度低于 60 °C。为简化计算,同时进一步探究两种材料敷设厚度与温度的关系,通过已有计算数据,获得经验公式如表 7。表中: t 为温度,°C; d 为厚度,mm。依据经验公式:当硅酸铝纤维材料的敷设厚度达到 162 mm 时,可保证外表面平均温度不超出 60 °C。

表 7 材料敷设厚度与温度关系的经验公式

材料	经验公式
气凝胶纳米材料	$t = -4.6 \times 10^{-5} d^3 + 0.015 d^2 - 1.9 d + 143.76$
硅酸铝纤维材料	$t = -5.1 \times 10^{-5} d^3 + 0.02 d^2 - 2.71 d + 198.08$

3.3.3 保温效果分析

基于上述分析,对两种材料的具体保温效果进行研究。

(1) 气凝胶纳米材料

对于气凝胶纳米材料,当敷设厚度达到 100 mm 时可保证保温层外表面平均温度不超过 60 °C (333.15 K),其温度分布如图 15、16 所示。可见:保温层内温度分布沿径向具有良好的对称性,但存在较大的温度梯度,自排气管路外表面至保温层外表面温降约 500 °C (773.15 K)。此外,通过观测其外表面温度分布发现:敷设于排气管路 I 和 II 处的保温材料,其温度基本保持一致且处于较低水平,但在排气管路 II 内侧折弯处,由于圆角半径过小,形成类尖角结构,传热能力急剧下降,出现局部高温,温度可达 87 °C (360.15 K);敷设于法兰连接处的保温材料,其底部尖角部位温度较高,可达 71 °C (344.15 K),顶部两端温度明显较低,顶部中心温度逐步上升,但均未超过 60 °C (333.15 K)。

当保温层敷设厚度为 100 mm 时,其外表面温度基本保持在 63 °C 以下,仅有局部小范围区域温度仍高于 63 °C。逐步增大保温层厚度,当敷设厚度为 110 mm 时,排气管路外表面温度基本不超过 60 °C,但仍存在小范围的高温区,如图 17 所示。综合考虑经济性和安全性,建议控制保温层厚度在 100 ~ 110 mm 内,且在操作过程中对上述存在局部高温的位置给出警示标识,确保人员安全。

(2) 硅酸铝纤维材料

基于柴油机安全设计原则,在排气管路外壁上敷设硅酸铝纤维材料,通过上文中分析可知:当敷设厚度达到 162 mm 时,保温层外表面平均温度不超过 60 °C,其温度分布规律与 (1) 中描述基本一致。

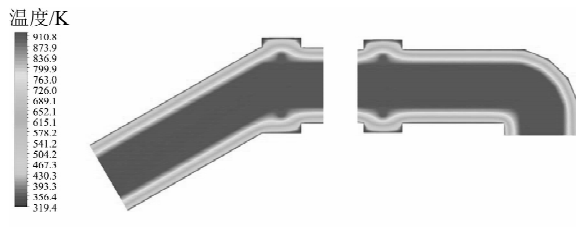


图 15 不同截面温度分布云图 (100 mm)

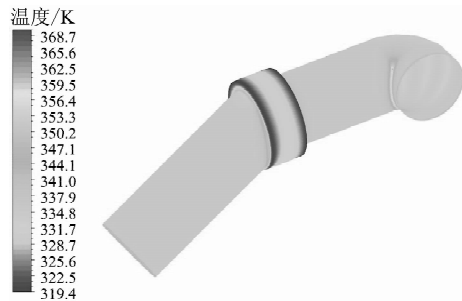


图 16 保温层外表面温度分布云图 (100 mm)

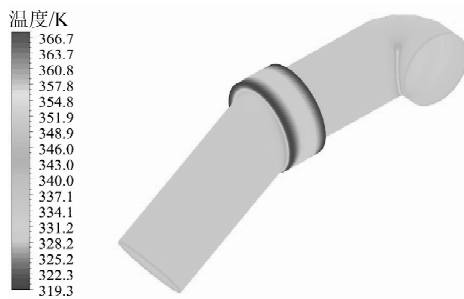


图 17 保温层外表面温度分布云图 (110 mm)

图 18 和 19 为不同敷设厚度下排气管路外表面温度分布云图, 由图可知: 当敷设厚度为 150 mm 时, 外表面温度基本不超过 63 °C, 仅有局部区域温度高于 63 °C; 而当敷设厚度达到 165 mm 时, 虽仍存在局部高温区域, 但整体温度基本控制在 60 °C 范围内。综合考虑经济性和安全性, 建议控制保温层厚度在 150 ~ 165 mm。

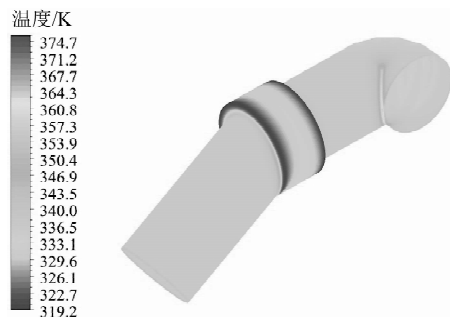


图 18 保温层外表面温度分布云图 (150 mm)

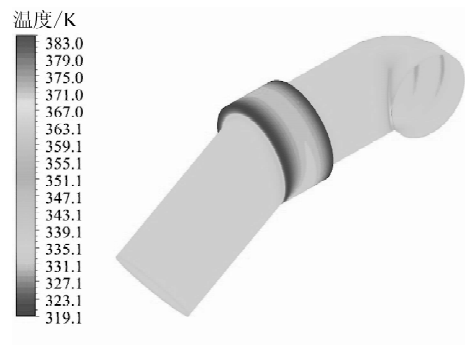


图 19 保温层外表面温度分布云图 (165 mm)

4 结论

本文通过对某船用柴油机排气管路的流动与传热过程开展流-固耦合仿真分析, 获得了排气管路内多物理场耦合分布特征; 并探究了不同材料的保温效果, 得到以下结论:

(1) 在特定排气条件下, 受排气管路结构影响, 流体流动方向和流速发生变化, 特别在进入波纹管 II 后, 流体整体向外侧偏移, 并在内侧区域形成多处明显的回流。

(2) 受流动过程的影响, 排气管路外表面温度分布差异明显, 其平均温度达到 534 °C, 最高处温度为 590 °C。

(3) 相较于硅酸铝纤维材料, 气凝胶纳米材料的保温性能更为优越; 在相同运行条件下, 气凝胶纳米材料的敷设厚度可更薄。

在本研究条件下, 当气凝胶纳米材料和硅酸铝纤维材料的敷设厚度分别为 100 ~ 110 mm 和 150 ~ 165 mm 时, 可基本满足安全性操作要求。

参考文献

- [1] 高翔, 薛冬新, 孟浩, 等. 某 8 缸中速柴油机冷却系统三相流固耦合传热分析 [J]. 柴油机, 2016, 38 (4): 24-30.
- [2] 方强, 祖炳锋, 徐玉梁, 等. 基于流固耦合的国-V 柴油机缸盖稳态传热研究 [J]. 内燃机工程, 2014, 35 (6): 90-95.
- [3] 董非, 胡国梁, 郭晨海. 基于热流固直接耦合的柴油机冷却水腔结构优化分析 [J]. 内燃机工程, 2015, 36 (3): 77-84.
- [4] MASJUKI H. H. Determination of time variant 1D-3D temperature and heat transfer distribution inside the cooling jacket of a SI engine cooling system after key off [C]. SAE, 2012-01-0642, 2012.

(下转第 40 页)

将检验合格的 24 件推杆样件装配在该柴油机上,参考 GJB 1069.2-91 水面舰艇用高速柴油机台架试验方法中,6.2.1 主机和辅机每个循环的运转工况和时间的规定,累计完成 5 个 8 h 循环(共 40 h)验证试验。

验证试验后将全部推杆样件拆检,经磁粉探伤未发现裂纹显示磁痕;推杆球头、推杆球座过盈安装位置无松动;推杆全长尺寸、跳动数据均满足图纸要求。

在 24 件推杆样件中随机挑选 1 件,切割着色,可以看出:推杆过盈压装部位无松脱滑移现象;推杆杆身内表面无裂纹,见图 19。

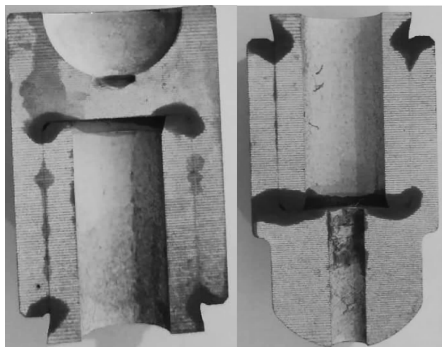


图 19 推杆球座、球头着色检查

4 结论

(1) 本文焊接式推杆断裂属于疲劳断裂,裂纹源为头部和杆身的焊接内侧,焊缝的马氏体组织对缺口较敏感,且焊缝上还存在着一些气孔缺陷,在工作应力、组织应力、淬火残余应力和应力集中共同作用下,推杆从裂纹源处发生开裂。

(2) 优化改进的过盈压装式推杆经有限元分析软件校核,满足设计要求。推杆样件经试验平台疲劳试验、装机验证试验后,磁粉探伤、全长尺寸检查、跳动检查均满足图纸要求;过盈压装部位无松脱滑移现象。上述情况表明过盈压装式推杆可满足柴油机使用要求。

参考文献

- [1] 柴油机设计手册编辑委员会. 柴油机设计手册 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1984.
- [2] 邱宣怀, 郭可谦, 吴宗泽, 等. 机械设计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [5] XIAO G Q. Investigation of fluid-solid conjugate heat transfers for a sedan exhaust system [C] //International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE 2011), Wuhan: IEEE, 2011: 5076-5079.
- [6] 司东亚, 骆清国, 许晋豪, 等. 基于流固耦合的气缸盖温度场仿真研究 [J]. 柴油机, 2017, 39 (2): 38-41.
- [7] 赵旭东, 邓平, 刘文霄, 等. 基于流固耦合的水下采油树输油管道传热与保温三维数值模拟 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24 (3): 521-526.
- [8] 杨晶, 赵兴民, 卢静, 等. 热油管道停输温降过程的数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11 (16): 3797-3800.
- [9] 肖国权, 张征. 汽车排气系统脉动强化传热机理研究 [J]. 汽车技术, 2014 (10): 28-31.
- [10] 唐芳, 刘阳平, 黄建华. 传统保温材料与新型保温材料对比及选用原则 [J]. 应用能工技术, 2018, 25 (11): 10-13.
- [11] 张鑫, 王毓薇, 白志鸿, 等. 纳米气凝胶与常用管道保温材料的性能对比 [J]. 油气储运, 2015, 34 (1): 77-80.
- [12] 高翔. 纳米复合保温材料传热特性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.

(上接第 35 页)