

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2023.04.039

发动机排气歧管热流固耦合分析*

镇 梁¹, 王晓雷¹, 潘家保^{1,2}

(1.南京航空航天大学 直升机传动技术重点实验室,江苏 南京 210016; 2.安徽工程大学 机械工程学院,安徽 芜湖 241000)

摘要:发动机在正常工作时所产生的高温废气直接与排气歧管内壁管道接触,因而会对排气歧管造成较大的热变形,严重时甚至导致破坏。该文重点对某四缸发动机排气歧管受热情况进行了分析,通过采用有限元法设定了边界条件和外部环境参数,模拟了排气歧管的正常工作情况。为了探究影响排气歧管温度变化的因素,改变内部流体温度和速度以及对流换热系数的数值,观察排气歧管温度变化的情况,并对可能影响排气歧管受热的因素进行了分析与比较。

关键词:排气歧管;流固耦合;有限元分析;温度变化

中图分类号:V464.134.4

文献标识码:A

文章编号:1007-4414(2023)04-0145-04

Thermal Fluid-Structure Coupling Analysis of Engine Exhaust Manifold

ZHEN Liang¹, WANG Xiao-lei¹, PAN Jia-bao^{1,2}

(1.National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2.School of Mechanical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: When the engine is working normally, the high temperature exhaust gas is directly in contact with the inner wall pipe of the exhaust manifold, causing large thermal deformation to the exhaust manifold and even leading to damage. In this paper, the heating condition of exhaust manifold of a four-cylinder engine is analyzed. The finite element method is used to simulate the normal operation of exhaust manifold by setting the boundary conditions and the external environment parameters. In order to explore the factors affecting the change of exhaust manifold temperature, the change of exhaust manifold temperature is observed through changing the internal fluid temperature and velocity, as well as the value of convective heat transfer coefficient. The factors that may affect the heating of exhaust manifold are analyzed and compared.

Key words: exhaust manifold; fluid-structure coupling; finite element analysis; temperature variation

0 引言

排气歧管作为发动机的主要部件,是发动机和排气管的连接桥梁,在工作过程中首先会受到高温废气的冲击^[1-2]。

发动机的工况在实际工作情况下是不断变化的,这就导致排气歧管在工作时承受的压力冲击与内部气体温度在不断变化。而内部气体高温所造成的热胀冷缩极易使排气歧管产生裂纹,长此以往会导致歧管产生疲劳断裂失效^[3-4]。国内相关学者在这方面做了大量的研究,如黄泽好等^[5]发现改变排气歧管的结构,可以缓解热应力集中。陈馨等^[6]发现若排气歧管的结构或材料不合理,很容易产生裂纹和变形,进而导致漏气。发生漏气一方面可能引燃汽车,威胁车内人员安全,另一方面也严重影响发动机的经济性和动力性。陈曦等^[7]通过观察排气歧管机油泄漏的程度以及排缸缸盖排气口机油泄漏的来源,以此指导相关零件的设计改进。

笔者采用有限元分析法对发动机排气歧管进行热流固的耦合分析^[3-5,8],通过改变外部环境条件,得到不同情况下排气歧管的温度变化,然后根据结果分析图对影响排气歧管温度变化的因素进行分析。

1 控制方程和湍流模型

正常工作条件下,高温废气未接触排气歧管内壁之前会形成一个一个层流边界层。在这段时间内,流体流动预测可通过稳态 N-S 方程求解而得到^[9]。随着气体靠近壁面,气体开始出现振动。同时随着雷诺数^[10]的增加,流体流动不平稳。在靠近壁面处出现小涡流,这个时候层流就转变成湍流。在此流型中,选择使用雷诺平均 N-S 方程(RANS)进行数值模拟,公式如下。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

* 收稿日期:2023-02-12

基金项目:安徽省重点研究与开发计划项目:车辆磁流变半主动悬架系统可靠服役关键技术研发与应用(编号:202104a05020002)。

作者简介:镇 梁(1997-),男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向:机械工程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial(-\rho u'_i u'_j)}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: u_i 表示雷诺平均速度分量; ρ 为密度; p 为压强; u'_i 为脉动速度; σ_{ij} 是应力张量分量。

SST k- ω 双方程模型^[11]适用于对流减压区及近壁面和远壁面的计算。该模型通过额外的湍流粘性项增加了 N-S 方程,并在近壁处采用 Wilcox k- ω 模型。k- ω 湍流模型主要求解湍动能和比耗散率 ω 的对流运输方程,对于 SST k- ω 双方程模型,其湍动能运输方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho k u_j - (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \tau_{ij} S_{ij} - \beta^* \rho \omega k \quad (3)$$

湍流比耗散率方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \omega u_j - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = P_\omega - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = 2\mu_t(S_{ij}\delta_{ij}/3) - 2\rho k \delta_{ij}/3 \quad (5)$$

$$P_\omega = 2\gamma\rho(\delta_{ij} - \omega S_{m}\delta_{ij}/3)S_{ij} \quad (6)$$

式中: $\mu_t = \rho k / \omega$ 是涡粘性; S_{ij} 是平均速度应变率的张量; δ_{ij} 为克罗内克算子; F_1 、 β^* 、 γ 、 σ_ω 、 σ_k 为模型参数, β^* 取 0.09。

2 排气歧管热流固耦合分析

2.1 热流固耦合分析理论

流固耦合分析法是指在流体与固态物质相互作用时同时考虑热交换。这种分析法适用于机械和热载荷共同产生的情况。在对固体域与流体域的交界表面进行耦合式数据的传输时,固体域可以利用气态流体域传输过来的气态温度与热传导系数作为排气歧管的边界条件,同时,从流体域和气体流体域传来的壁面温度可以作为边界条件^[12]。

2.2 三维模型建立与网格划分

通过建模软件建立排气歧管三维模型,如图 1 所示。为保证排气歧管网格划分的质量问题,将排气歧管法兰盘部件省略,得到排气歧管简化模型如图 2 所示。



图 1 排气歧管三维模型

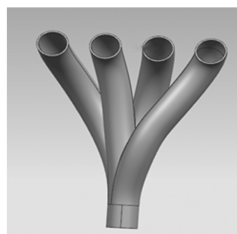


图 2 排气歧管三维模型简图

分析模型并对排气歧管进行网格划分,如图 3 所示。网格类型设置为六面体网格,不需要添加局部尺寸,按照最大尺寸 9.688 612 mm,最小尺寸 0.378 409 7 mm,增长率为 1.5,尺寸函数 Curvature & Prox,曲率法向角 18° 等条件生成表面网格。

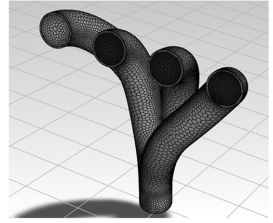


图 3 排气歧管网格划分

2.3 流体域仿真

在 fluent 中进行流场计算,假设排气歧管中的高温废气与烟气相同,烟气的基本性质如表 1 所列,烟气作为排气歧管流场的材料性质,壁面为无滑移速度条件,出口采用压力出口边界。采用流体网格模型得到了排气歧管内流场的温度分布。

表 1 烟气属性

参数	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.354
比热/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1 246
热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.085 1
黏度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)	4.14

2.4 固体域仿真

为了模拟固体区域的温度,需要将内部流场的温度分布映射到排气歧管的内表面,并以此得到的内表面温度作为确定固体区域的热边界条件。将 fluent 计算的内部流场模拟结果导入流-液耦合面之间进行数据传输,得到了排气歧管固体内壁表面的温度分布。外部环境温度设定为 300 K,对流换热系数为 $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,排气歧管的固体材料为灰铸铁,其材料性能如表 2 所列。

表 2 材料属性

参数	数值	参数	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 100	热膨胀系数/K	13.2×10^{-6}
热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	54.4	杨氏模量/MPa	1.5×10^5
泊松比	0.25		

2.5 流固耦合仿真结果分析

设定流体域和固体域的边界条件,定义监控器变量,包括入口,出口,以及入口和出口的比率关系,可以获得在一定时间下的仿真结果。并将模拟标准初始化,控制仿真参数迭代速度与报告时间,可得到如图 4 所示的残差图。

从残差图中可以看出各条曲线趋于平缓,其仿真结果正常有效。图 5 为迹线图,通过观察高温废气的

轨迹线图,我们可以发现在排气歧管入口处所排放高温废气温度最高,沿排气管壁温度逐渐降低,温度最低点出现在排气歧管内废气汇入总管处。当高温废气在排气歧管总管处汇合时,管壁温度又随之上升。

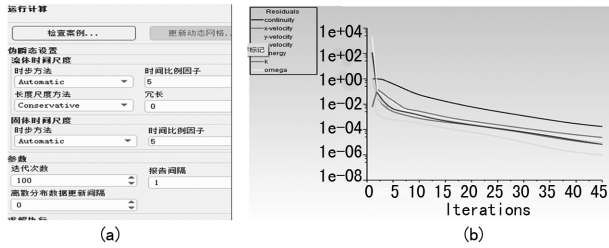


图4 残差图分析

图6为仿真轨迹图。可以看出,在四根排气歧管支管内废气的矢量分散有序,而当四根排气歧管废气汇入总管时,废气的矢量密集同时显得杂乱无章。这就表明废气汇入总管时对排气歧管的内壁产生较大的压力冲击,从而造成排气歧管的损坏。

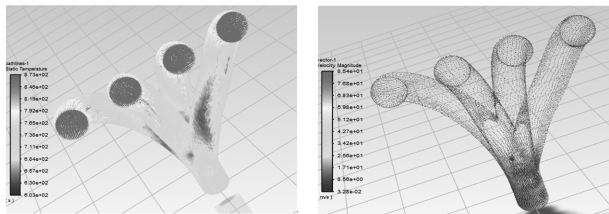


图5 迹线图

图6 轨迹矢量图

3 对影响排气歧管温度变化因素的研究

3.1 固体域温度场变化的影响因素

排气歧管在不同的工作条件下,其温度场会发生变化。其主要的影响条件可能包括两方面。首先,在不同内流温度和内流速度下,排气歧管整体温度可能会发生变化。其次,外界工作环境的变化也可能导致对流换热系数发生变化,从而导致排气歧管温度场发生变化。文中主要从这两个可能影响发动机排气歧管的因素进行研究。

3.2 排气歧管在入口条件下温度场的变化

为探究排气歧管在不同内流速度^[13]和内流温度下的排气歧管温度变化的情况,现选取四组条件进行研究。表3为四组不同的入口条件。

组别	内流速度 /(m·s ⁻¹)	内流温度 /K
1	20	873
2	30	973
3	40	1 073
4	50	1 173

图7为不同进气边界条件下排气歧管固体区域的温度分布,表4为不同入口速度和温度下温度场和温差的分布范围。结果表明,内部流体的速度对排气歧管的温度分布影响效果不明显。排气歧管的温度随着废气温度的增加而不断上升,控制气体流速在20~50 m·s⁻¹的范围内增加,排气歧管总体温差虽有略微上升,但是总体温差控制在270~300 K之间。由此可见废气流速对于排气歧管温度的影响不大。

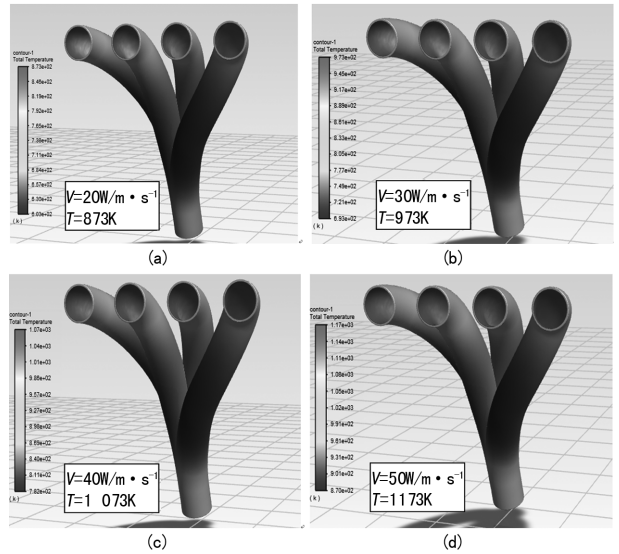


图7 排气歧管温度场分布

表4 不同入口速度、温度下的仿真结果

组别	入口速度 /(m·s ⁻¹)	入口温度 /K	最高温度 /K	最低温度 /K	温差 /K
1	20	873	873	603	270
2	30	973	973	693	280
3	40	1 073	1 073	782	291
5	50	1 173	1 173	870	303

3.3 不同换热系数对排气歧管温度场的影响研究

对流换热^[14]是指流体流经固体表面时,流体和固体进行热量传递的现象。它的大小表示热量传递的强弱情况。在不同的传热系数下,排气歧管的温度会发生变化。在正常条件下,气体强制对流换热系数在20~300 W/(m²·K)范围内。

当车辆以正常的高速行驶时,排气歧管表面的热交换就不再是自然对流换热了。外部空气快速流过排气歧管表面并带走热量,这实际上是一种强制对流现象。为了研究对流换热对排气歧管散热情况的影响,该文研究了不同传热系数对排气歧管壁温分布的影响,以及这种情况下的散热分布。在研究中,选取外壁传热系数h分别为40、60、80、100 W/(m²·K),对排气歧管的散热情况进行探究,并计算排气歧管温

度场的分布。选取排气歧管的入口速度为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、入口温度为 875 K 为初始条件,排气歧管在不同换热系数下的温度场的分布情况如图 8 所示。

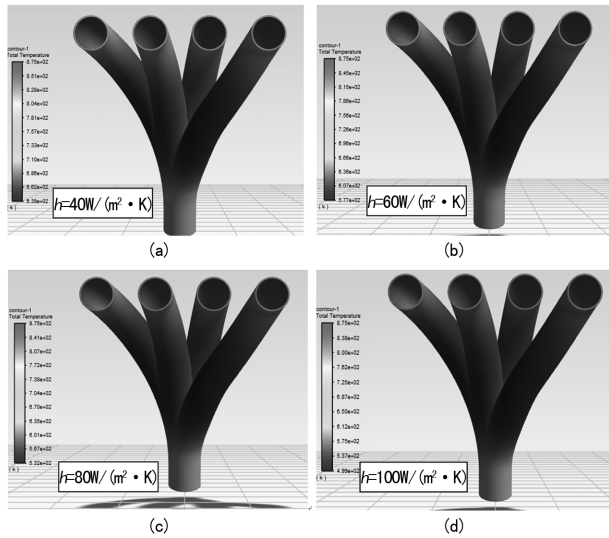


图 8 不同换热系数时排气歧管外壁面温度分布

比较四组不同对流换热系数的温度分布结果发现,换热系数对排气歧管整体温度场影响较大。排气歧管最大和最小节点温度的变化曲线如图 9 所示。

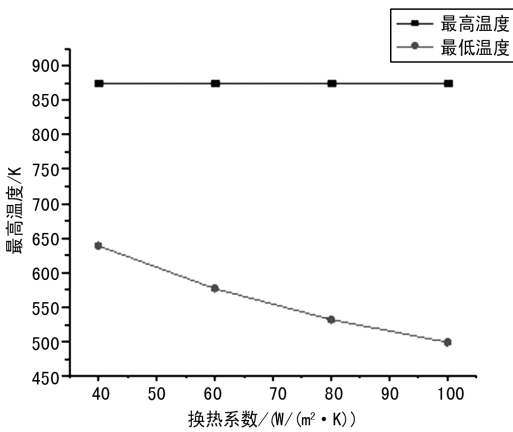


图 9 排气歧管在不同换热系数下温度场变化

从图 9 可以看出在这四种情况下,排气歧管最低温度点出现在排气歧管外壁面的交叉处,最高温度点出现在排气歧管内壁处。节点温度与外壁传热系数呈负相关,最低温度随着换热系数的增大而减小。排气歧管最低温度从 640 K 下降到 500 K ,因此,考虑散热方式对降低排气歧管的温度具有重要意义。为了降低排气歧管的整体温度分布和温度值,必须考虑采取强制对流散热方式,设计安装合理的散热装置使外壁传热更加高效。

4 结论

文中采用有限元法对某四缸发动机排气歧管受热情况进行热流固的耦合分析。通过改变影响排气歧管的因素,得出以下结论。

(1) 排气歧管在正常工作时入口和出口处温度最高,在支管汇入总管的交叉处温度最低。同时,排气歧管在正常工作时总管会受到废气的严重冲击。

(2) 废气的流速对排气歧管管壁温度的影响不大,相反外部环境条件对排气歧管外壁温度至关重要。通过改变散热方式可以增大对流换热系数,降低排气歧管整体的温度,从而有效保护排气歧管,延长其使用寿命。此次研究结果为发动机的经济性和动力性研究提供相关参考。

参考文献:

- [1] 吕清波,张生洋.发动机排气歧管加工工艺研究[J].内燃机与配件,2020(21):89-90.
- [2] 金明,赵昌鹏,方劲松,等.某轻型柴油机排气歧管优化设计[C]//上海:2020中国汽车工程学会年会论文集(3),2020.
- [3] Yogesh K, Ananthsha, Babu N C M. Assessment of Thermo-Mechanical Fatigue Performance of an Exhaust Manifold through Simulation[J]. Indian journal of science and technology, 2017(10):1-6.
- [4] 王乐.缸盖集成排气歧管的低周疲劳分析方法研究[J].内燃机,2021(1):60-62.
- [5] 黄泽好,黄荆荣,唐先龙.排气歧管流固耦合热仿真分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2020,45(6):107-112.
- [6] 陈馨.排气歧管热机械强度分析[J].时代汽车,2019(9):116-117.
- [7] 陈曦,唐巨惠,杨俊,等.柴油发动机排气歧管滴油试验方法研究与应用[J].内燃机与配件,2021(12):61-62.
- [8] 李子旺.发动机集成排气歧管气缸盖设计及流固耦合传热分析[D].沈阳:沈阳理工大学,2020.
- [9] 李修昌.基于流体 N-S 方程的烟雾仿真技术研究[D].长春:长春理工大学,2017.
- [10] XIN S, WANG W, ZHANG C, et al. Effects of rock-airflow conjugated heat transfer in development headings: A numerical study [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022 (172): 107301.
- [11] 焦守华,王金雨,曾未,等.基于雷诺时均模型的高温空气流动传热数值研究[J].核科学与工程,2020,40(6):965-973.
- [12] 董非,蔡忆昔,范秦寅,等.内燃机排气歧管瞬态热流体-热应力耦合仿真的研究[J].汽车工程,2010,32(10):854-859.
- [13] 柳博瀚,陈正寿,鲍健,等.管道内流对海洋弹性管振动影响的数值仿真研究[J].振动与冲击,2020,39(17):177-185+202.
- [14] 姜新波,郭晨昊,于丹丹.单板干燥机喷箱外流场仿真及换热特性研究[J].森林工程,2021,37(5):82-89.