

# 利用 STAR-CD 模拟优化柴油机排气管隔热方案\*

## Optimization on thermal insulating project of the exhaust of pip of engine with STAR-CD

吕继组 白敏丽 薛莹莹

(1 大连理工大学 能源与动力学院, 大连 116023)

**摘 要:** 本文通过对排气管隔热方案的分析,自行设计了隔热材料,理论预测其导热系数,采用 STAR-CD 软件,对排气管真实的流固耦合模型进行了大量的数值模拟实验;分析了隔热结构中隔热材料导热系数、厚度、表面发射率、隔热方式等因素对排气管隔热效果的影响;通过隔热材料与真空层的匹配,得到了即满足紧凑性要求,又能高效隔热的隔热方案。

**关键词:** 排气管隔热; 隔热度; STAR-CD

**Abstract:** Commercial software STAR-CD is employed to simulate the thermal conductivity of  $ZrO_2$  hollow sphere by the analysis of the thermal insulating scheme of exhaust pipe and much numerical simulation is proceeded to the coupling model of exhaust pipe. The influence of the thickness of thermal insulating materials, the emissivity and the fashion of thermal insulation on the insulating effect is analyzed. A scheme is obtained by the cooperation of thermal insulating materials and vacuum which can meet the compact command and insulate effectively.

**Key words:** Exhaust pipe thermal insulating; Efficiency of thermal insulation; STAR-CD

## 1 前 言

随着发动机强度的不断提高,燃烧废气的温度也在不断增加,从而导致排气管外表面温度上升。发动机全负荷工作时,排气管外表面温度在 500 - 600 ,特种车辆温度更高。对于特种车辆,排气管的强烈散热会导致发动机附近的顶甲板和侧甲板温度显著升高,呈现较强的红外辐射,成为现代侦察和制导技术发现、识别和跟踪目标的重要依据,对特种车辆在战场中的生存造成日益严重的威胁。改进和完善特种车辆发动机排气管的隔热技术,将有助于降低目标被发现和被识别的概率,可以解决因动力舱温度升高致使进气效率降低、发动机效率下降等问题,同时还可以改善操作环境,提高作战能力<sup>[1]</sup>;减少排气热损失,提高废气热量的利用率,且具有一定的节能作用。

针对隔热方式及发动机排气管隔热问题,本文采用导热系数较小的氧化锆空心球作为隔热材料的基体<sup>[2]</sup>,耐高温金属薄壳包覆并抽真空,处理后的隔热材料能有效的控制固体和气体导热,通过选择合适的空心球尺寸和气孔率可以使隔热层总体导热系数达到最小。利用大型 CFD 软件 STAR-CD 模拟方法对排气管隔热中的各种因素对隔热效果的影响进行系统分析,为更为苛刻的隔热环境提供理论支持。

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276007 和 50576008)

辽宁省自然科学基金资助项目(20062180 和 20042156)

## 2 排气管隔热的数值模拟

将氧化锆空心球隔热材料应用到发动机排气管的隔热中,用 STAR-CD 软件分析隔热材料厚度、发射率、隔热方式等对隔热效果的影响。

### 2.1 数学物理模型

排气管内的传热主要包括:管内烟气与排气管内壁强迫对流换热、隔热层内导热、真空层内辐射传热、管外表面同空气的自然对流和辐射换热。采用稳态计算,各部分的传热处理如下<sup>[3]</sup>:

排气管内强迫对流换热:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = s_m \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + s_i \quad (2)$$

采用标准  $k-\varepsilon$  紊流模型,其  $k$  方程和  $\varepsilon$  方程分别为:

湍能能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \tilde{u}_j k - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \quad (3)$$

$$\mu_t (P + P_B) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \mu_t P_{NL}$$

湍能耗散率方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \tilde{u}_j \varepsilon - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = \quad (4)$$

$$C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[ \mu_t P - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B$$

$$- C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_{NL}$$

$$\text{本构方程: } P_{NL} = -\frac{\rho}{\mu_t} \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \left[ P - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \quad (5)$$

式中:  $u_j$  为相对移动坐标系的相对速度;  $s_m$  为质量源;  $u_i$  为  $x_i$  方向上的绝对速度分量;

$\tau_{ij}$  为压力张量分量;  $s_i$  为动量源项的分量;  $P$  为测定压力;  $\mu_t$  为湍流黏性系数;  $k$  为湍流

动能;  $\varepsilon$  为湍流耗散率;  $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 $C_{\varepsilon 3}$ 、 $C_{\varepsilon 4}$  是经验系数;  $\rho$  为密度。

$$\text{隔热层内导热方程: } \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0$$

真空层内辐射的处理：

辐射面划分为邻近的不重叠的小区域，从区域中心 P 向周围区域辐射。

角系数  $F_{ij} = \sum_{k=1}^{N_{L,i}} \alpha_k f_{ij}$ ，其中  $f_{ij}$  为从区域中心 P 发射出的单束射线的角系数，当射线遇到另外区域时系数  $\alpha_k = 1$  否则为 0；

总辐射热流： $J_i = \epsilon_r E_{B,i} + \rho_r I_i$ ， $\epsilon_r + \rho_r = 1$ ， $\epsilon_r$  为发射率， $\rho_r$  为反射率；

黑体辐射热流  $E_{B,i} = \sigma T_i^4$ 。

入射热流： $I_i = \sum F_{ji} J_j$ ，如图 1

表面净辐射热流：

$q_r'' = I_i - J_i = \alpha_r I - \epsilon_r E_B$ ， $\alpha_r$  为吸收比，对于灰体， $\alpha_r = \epsilon_r$ 。

对流固耦合界面，总热流  $q_w'' = q_r'' + q_c'' + q_d''$ ， $T_w$  为壁温， $T_f$  为流体温度，

对流换热  $q_c'' = -h_t(T_w - T_f)$ ， $q_d''$  为内部温度场的传导热流。

护管外自然对流换热：在其控制方程中，动量方程加上由密度差引起的浮升力。

根据发动机排气管实际结构，将其简化成二维轴对称结构，忽略周向的不均匀性，如图 2 所示。整个排气管由：金属排气管、隔热层、隔热真空层和排气管护管四部分组成。

## 2.2 计算方法

计算采用流固耦合方法，即：将排气管内废气、排气管和排气管外空气作为一个整体，考虑各物理场的耦合关系，进行数值模拟。为了保证计算精度的前提下尽可能的减少计算量，靠近壁面处进行网格加密处理，如图 3 所示。计算模型中网格数量依几何模型不同而不同，大致范围为 10000 到 20000 之间。

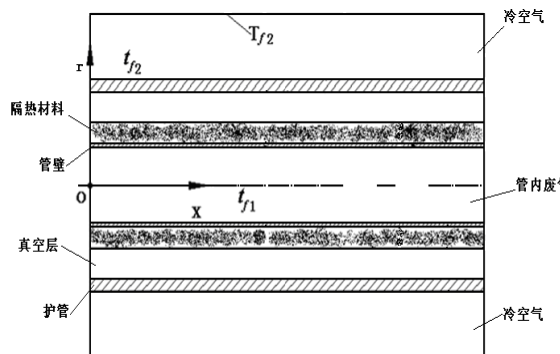


图 2 排气管几何模型

Fig.2 Geometrical model of exhaust pipe

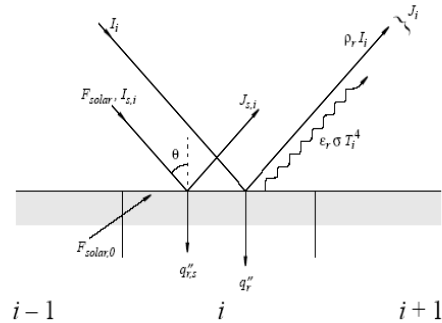


图 1 区域 i 上的辐射热传递

Fig.1 Radiative heat transfer at patch no.i

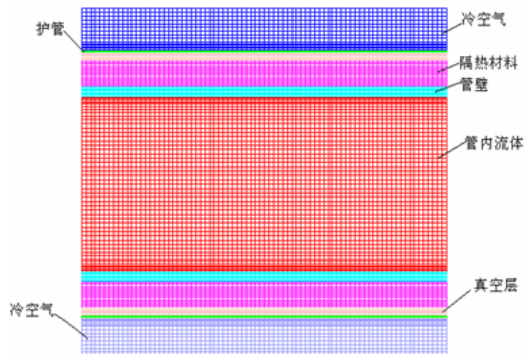


图 3 排气管计算网格

Fig.3 Computational mesh of exhaust pipe

### 2.3 边界条件的确定

采用第三类边界条件,以 6110 柴油机为计算背景,测得管内废气温度  $t_{f1} = 600$  ;管内废气流速经过计算得  $u_1 = 46\text{m/s}$  ;护管外部环境温度  $t_{f2} = 30$  。

### 2.4 计算结果分析

#### 2.4.1 隔热材料厚度对外壁温度的影响

在相同的边界条件下,分别计算不同厚度隔热材料的排气管传热,以此分析隔热材料厚度对排气管隔热效果的影响,如图 4 所示。从中可以看出,增加隔热材料厚度可以使外表面温度不断降低,但是考虑到隔热结构的紧凑性,不可能无限制的增加隔热材料尺寸,特别是在特种车辆空间内,排气管的隔热层厚度是有限的,通常允许的厚度在 5 毫米左右。因此为了满足紧凑性要求,除了进一步降低隔热材料导热系数外,还可以通过增加空气层或真空层等高效隔热方式来强化隔热。

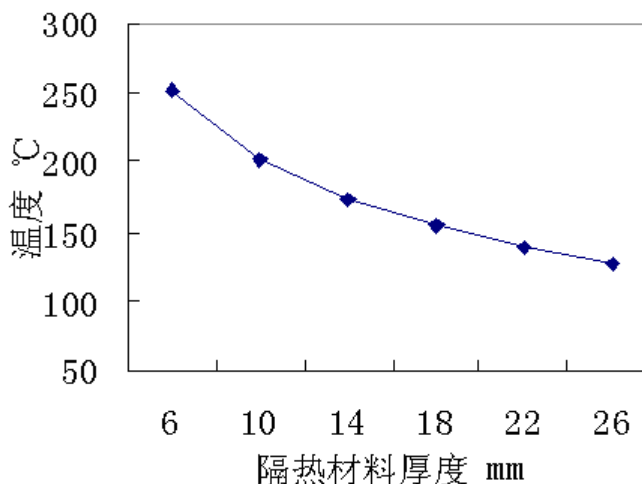


图 4 护管外表面温度随隔热材料厚度的变化

Fig.4 Variation of temperature of surface beside protective layer with the thickness of insulations

#### 2.4.2 护管外表面发射率对隔热效果的影响

取隔热材料厚度为 10mm,改变护管外表面发射率,对  $\epsilon = 0.05, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  和 0.95 进行计算,得到护管外表面的平均温度,结果如图 5 所示。分析可以得到排气管护管外表面温度随发射率的增大而减小,发射率从 0.05 增加到 0.95,外表面温度从 266.653 下降到 199.032,下降了 34%。增加外表面发射率可以加强辐射换热,可以进一步降低排气管温度。

#### 2.4.3 空气层与真空层的比较

当隔热材料本身无法达到更好的隔热效果时,加空气层或真空层可以进一步加强隔热的效果。选 10mm 隔热材料加不同厚度的空气层或真空层,计算得到护管外表面平均温度,如图 6。

加空气层时,由于辐射的存在,护管外表面温度随空气层的厚度增加有先减小后增加的趋势;而加真空层时,温度随真空层的厚度增加无显著变化,加真空层的温度明显低于加空气层的,而且加真空层只需 1mm 就能达到很好的效果,有利于使排气管隔热结构紧凑。

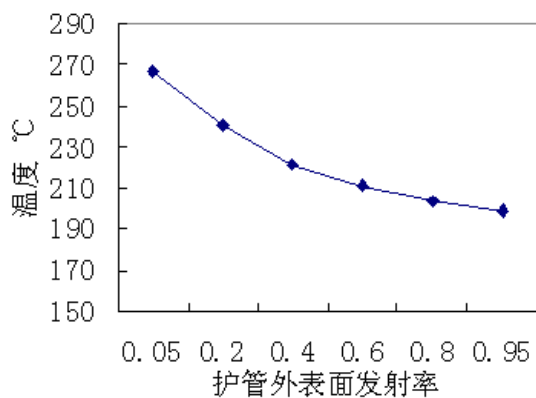


图 5 护管外表面温度随发射率的变化

Fig. 5 Variation of temperature of surface beside protective layer with emissivity

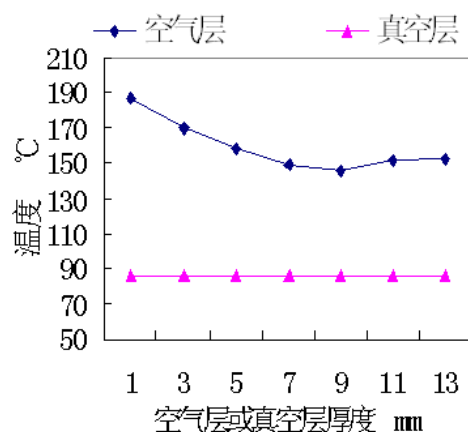


图 6 温度随真空层和空气层厚度的变化

Fig. 6 Variation of temperature with the thickness of vacuum and air

#### 2.4.4 隔热方式对隔热效果的影响

在工程设计中,为了达到最佳隔热效果,通常需要增加隔热层,凡是有冷面和热面两种。冷面隔热即将优质高效的隔热层设置在冷面,反之热面隔热即将优质高效隔热层布置在热面。本文选择真空层作为优质高效隔热层,对比两种隔热方式计算结果如图 7 所示。从中可以看出,冷面隔热的外表面温度明显低于热面隔热,这就说明其隔热效果明显优于热面隔热,进而说明优质高效隔热层布置在冷面有利于隔热效果的提高。

#### 2.4.5 真空层真空度对隔热效果的影响

图 8 是真空度从 10000Pa 减小到 0.001Pa 时,对应的排气管外表面温度。从中可以看出,随着真空度的减小,护管外表面温度有所降低;当压力降低到 10Pa 时,温度达到最小值,继续增大真空度,温度降低的趋势越来越缓慢,但抽真空所需的时间和维持真空的难度都将大大增加;当真空度降低到 1Pa 以下时,温度下降变得非常缓慢,到一定程度将不再变化。所以真空度一般在 1~10Pa 的左右的压力即可<sup>[4]</sup>。

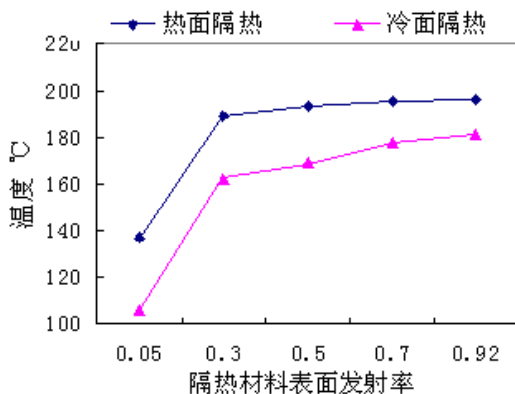


图 7 热面与冷面隔热温度随发射率的变化

Fig.7 Variation of temperature with the emissivity

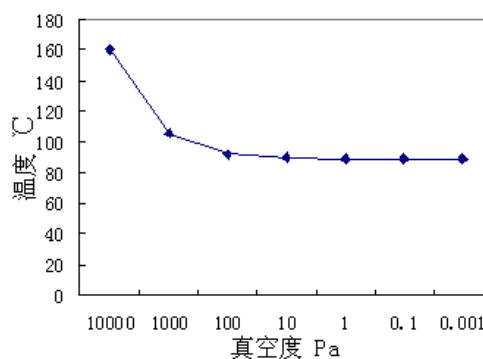


图 8 温度随真空度的变化

Fig.8 Variation of temperature with the vacuum

#### 2.5 各种隔热方案的比较

对采用隔热与无隔热层结构的排气管传热进行计算分析,选用隔热结构为 10mm 隔热材

料层加 1mm 真空层。图 9 为没有加任何隔热结构的排气管温度分布,图 10 为增加隔热结构后的排气管温度分布。对比分析可以明显的看出,加隔热结构的排气管外部环境温度明显低于不加隔热结构的。

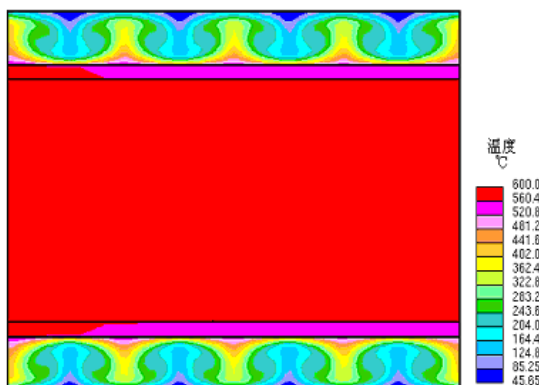


图 9 不加隔热层时排气管温度分布

Fig.9 Temperature distribution of exhaust pipe without insulations

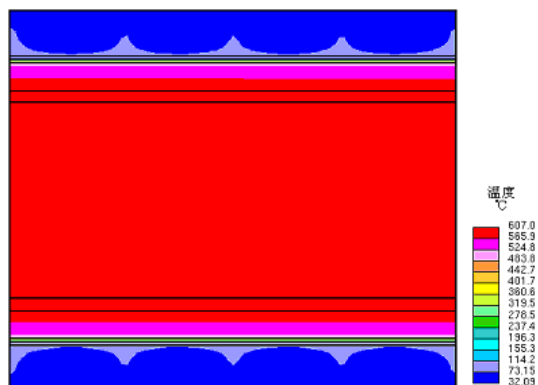


图 10 10mm 隔热材料加 1mm 真空层排气管温度分布

Fig.10 Temperature distribution of exhaust pipe with 10mm insulations and 1mm vacuum

表 1 给出光管、无机聚合物陶瓷、氧化锆空心球及氧化锆空心球加真空层四种隔热方案的隔热度比较。中可以看出,氧化锆空心球加真空层(冷面)隔热方案的隔热度最大,起到最佳的隔热效果,用这种隔热方案对发动机排气管进行隔热,可以使热损失减少 91.4%,这部分热量如通过回收再利用能够大大提高发动机效率,起到很大的节能作用。

表 1 三种隔热方案的隔热度

Tab.1 The efficiency of three thermal insulating methods

隔热方式	光管	无机聚合物陶瓷	氧化锆空心球	氧化锆空心球加真空层(冷面)
外壁面热流/W/m <sup>2</sup>	3689.03	2213.56	1126.53	316.216
外壁面温度/	548.164	336.843	194.902	90.4563
隔热度	0	0.4	0.694	0.914

### 3 结论

- (1) 通过数值模拟可以知道,提高排气管隔热效果的方法有降低材料的导热系数、增加材料厚度、在冷面布置真空层、降低隔热材料表面发射率等方式。
- (2) 真空层与隔热材料配合可以显著减少隔热层厚度,提高隔热结构的紧凑性,为更高温度的隔热奠定理论基础。

### 参考文献

[1] 马向平, 陈威等, 特种车辆发动机排气管隔热方法研究, 车用发动机, 2004, N06, 37-40.  
 [2] 高性能氧化锆连续纤维的制备方法及设备, 山东大学, 专利申请号 03112408.9  
 [3] Methodology of STAR-CD v3.15, Computational Dynamics Limited, 2002  
 [5] 张强, 郑友建等, 常温用无公害隔热材料——真空粉末隔热技术, 西安建筑科技大学学报, 1997, 9, 326-330