

性能与排放

基于 Fluent 的排气火花熄灭消声器 性能仿真分析

徐琛, 柏祥华

(海军驻南京地区航天机电系统军事代表室, 江苏 南京 210006)

摘要: 为掌握火花熄灭消声器内部流动特性, 采用湍流模型和离散相(DPM)模型对双级膨胀腔消声器内气固两相流动情况进行了数值模拟研究。通过建立的模型和边界条件模拟气体流动, 利用双向耦合拉格朗日法追踪颗粒运动轨迹; 讨论了不同颗粒粒径、入口颗粒浓度以及不同排气流速对火花熄灭效率和压力损失的影响。数值计算结果表明: 随着颗粒粒径、入口颗粒浓度及排气流速的增加, 火花熄灭效率逐渐增大, 特别是颗粒粒径和排气流速对火花熄灭效率影响比较明显。

关键词: 火花熄灭消声器; 气固两相流; 火花熄灭效率; 仿真

中图分类号: TK421+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)05-0012-04

Performance Analysis of Exhaust Sparks Muffler Based on Fluent

Xu Chen, Bai Xianghua

(Naval Deputy Office of Aerospace Mechanical and Electrical System in Nanjing District,
Jiangsu Nanjing 210006)

Abstract: To master the internal flow characteristics of the exhaust sparks muffler, the standard model and DPM model in Fluent was used to investigate the gas-granule two-phase flowability in the silencer, and to calculate the gas-phase flow as well as to comprehensively analyze gas-phase flow filed with the existing model and boundary conditions. Moreover, the Lagrange method of bidirectional coupling method is used to track particle trajectory. The influence of varied particle diameter, inlet particle concentration, and exhaust velocity on sparks out efficiency and pressure loss are discussed. The simulation results shows that the sparks out efficiency is increased with the increase of particle diameter, inlet particle concentration and exhaust velocity, and that influence of the particle diameter and exhaust velocity are especially obvious.

Keywords: exhaust sparks muffler; gas-granule two-phase flowability; sparks out efficiency; simulation

0 引言

排气噪声是内燃机主要噪声源, 安装排气消声器是降低排气噪声的有效措施。火花熄灭消声器是一种安装在内燃机排气管路中, 允许排气流通过又能消声, 且阻止排气流内的火焰和火花喷出的安全

装置。柴油机排放的废气中含有大量微粒, 其微粒排放量高出汽油机 30 ~ 60 倍^[1-2]。火花熄灭消声器不仅可以阻止排气火花喷出, 对柴油机排气微粒的控制也能起到很好的作用。

本文使用 Fluent 软件对某类型的火花熄灭消声器内气固两相流场进行数值模拟研究, 用煤粉颗粒

收稿日期: 2013-01-07; 修回日期: 2013-06-21

作者简介: 徐琛(1981-), 男, 工程师, 主要研究方向为内燃机振动噪声控制, E-mail: playxch@gmail.com。

近似代替火花颗粒, 分析其实际流场分布和火花熄灭效率。

1 物理模型及控制方程

1.1 火花熄灭消声器结构及网格划分

图1为双级膨胀腔双内插管消声器结构示意图, 经过大量模型计算比较后证明: 计算域网格划分得太稀疏, 不能准确描述流场的特征, 计算误差大; 网格数目达到一定程度时, 已经能够较好地反映出实际情况, 而继续增大网格数目, 几乎不再能够提高计算精度, 却增加了计算所耗资源, 降低了计算速度。本文整个计算域采用非结构化四面体网格, 网格步长为 11 mm, 网格数为 150 万左右。

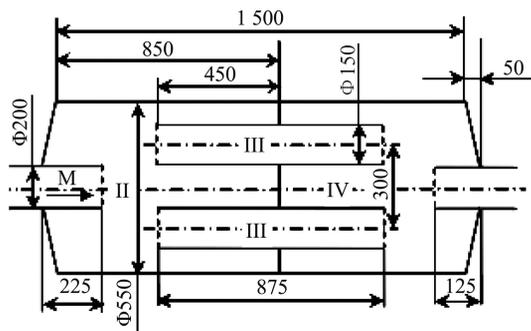


图1 带两个中间连接管的双级膨胀腔消声器结构及尺寸

1.2 数学模型

1.2.1 连续相控制方程

火花熄灭消声器内的连续相流动是三维高 Re 湍流, 消声器中的连续相流动过程可以用连续性方程和动量方程来表述:

连续性方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + S_i \quad (2)$$

目前常用的湍流模型有两大类: Reynolds 应力模型和涡粘模型。本文采用的是涡粘模型, 涡粘模型包括零方程模型、一方程模型和两方程模型。目前两方程模型在工程中使用最为广泛, 最基本的两方程模型是标准 $k-\varepsilon$ 模型, 本文采用的就是该模型^[3]。标准 $k-\varepsilon$ 模型是典型的两方程模型, 该模型是目前使用最为广泛的湍流模型, 它是在关于湍动能 k 的方程的基础上, 再引入一个关于湍动耗散率 ε 的方程, 形成标准 $k-\varepsilon$ 模型。在标准 $k-\varepsilon$ 模型中, k 和 ε 是两个基本未知量, 与之相对应的输

运方程为:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (3)$$

采用标准 $k-\varepsilon$ 模型求解流动及换热问题时, 控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程、 k 方程和 ε 方程。若不考虑热交换的单纯流场计算问题, 则不需要包含能量方程。本文所给出的 $k-\varepsilon$ 模型, 是针对湍流发展非常充分的湍流流动来建立的, 也就是说, 它是一种针对高 Re 的湍流计算模型。

阻力损失^[4]是指气流通过消声器, 在消声器进口端与出口端之间气体的全压有一定程度的降低。当进口端与出口端的端面面积相同、气流的平均速度相同时, 阻力损失就等于消声器进口端与出口端之间气体静压的降低量。

消声器的阻力损失一般与流速的平方成正比, 根据阻力损失的机理可将阻力损失分为两类: 一是摩擦阻力损失; 一是局部阻力损失。本文所研究的消声器是抗性消声器, 以局部阻力损失为主。

1.2.2 离散相控制方程

离散相(DPM)模型假定第二相(分散相)非常稀薄, 这种假定意味着分散相的体积分数必然很低, 一般说来要小于 10% ~ 12%, 属于稀相流。因此本文可以采用基于拉格朗日坐标系的离散相模型来进行求解。

本文计算时, 气体是连续相, 煤粉颗粒是离散相。首先通过连续相的计算获得流场的速度、湍流动能等信息, 然后在拉格朗日坐标下考虑煤粉颗粒在连续相场中的受力和湍流扩散等物理过程后, 计算得到煤粉颗粒的轨迹。离散相模型就是通过大量煤粉颗粒的计算来模拟其运动情况。

在 Fluent 离散相模型中既可以通过在一个固定的流场中(非耦合方法)来预测离散相的分布, 也可以在考虑离散相对连续相有影响的流场(相间耦合方法)中考察颗粒的分布。本文的流场计算都是采用相间耦合方法。相间耦合计算中, 离散相的存在影响了连续相的流场, 而连续相的流场反过来又影响了离散相的分布。可以交替计算连续相和离散相直到两相的计算结果都达到收敛标准^[5]。

稳态离散相问题的设定、求解的一般过程如下:

- (1) 求解连续相流场;
- (2) 创建离散相喷射源(射流源);
- (3) 求解耦合流动(如果希望计算的话);

(4)用 PLOT 或 REPORT 图形界面来跟踪离散相。

1.3 连续相及离散相边界条件

所谓边界条件,是指在求解域的边界上所求解的变量或其一阶导数随地点及时间变化的规律。

连续相的边界条件设置比较简单:

- (1)进口:速度进口(velocity inlet);
- (2)出口:压力出口(pressure outlet);
- (3)壁面:壁面函数法,无滑移壁面。

由于是气固两相流,边界条件与单相流有明显的区别,主要表现在对颗粒相的设置上。

离散相的边界条件:

(1)由于在气固混合流进入消声器入口面之前有一水平加速段,若该水平段足够长,可以认为在消声器入口处固体颗粒与气相速度相同。即认为颗粒在进入消声器时已具有良好的跟随性,与气相间不存在相对速度滑移,设置为 escape;

(2)当颗粒运动到壁面时,认为颗粒与外壁面碰撞时即动量全部损失,设置壁面的法向反射系数为 0,即 normal reflect=0;

(3)当颗粒运动到排气口边界时,从出口逃逸,此时停止对颗粒的跟踪,设置为 escape。

1.4 随机颗粒轨道跟踪

随机轨道模型是一种彻底的拉格朗日处理法,它直接由轨道形式的颗粒瞬时方程组出发,考虑气体湍流对颗粒的作用,计算颗粒的随机轨道及沿轨道的变化经历^[6]。但是,由于颗粒被完全考虑成离散的体系,颗粒运动方程和颗粒数目相同,计算量也随着颗粒数目的增加而增大,并且当颗粒相的质量分数增大时,颗粒对流体的影响也逐渐增大,这种影响将会导致收敛困难。此外,颗粒轨道计算结果在复杂的流场内很难给出连续的颗粒速度和浓度的空间分布。

在随机轨道模型中,沿着颗粒轨道,FLUENT 在积分计算过程中,颗粒轨道方程中的流体速度为瞬时速 $\bar{u}+u'(t)$,这样,就可以考虑颗粒的湍流扩散。通过这种方法计算足够多的代表性颗粒的轨迹(即“number of tries”),湍流对颗粒的随机性影响就可以得到考虑。

2 计算结果及分析

2.1 连续相流场

本节所讨论的排气火花熄灭消声器结构为:进出口管长 100 mm、直径 200 mm,膨胀腔体长 1 600 mm、直径 550 mm,进出口内插管长分别为

225 mm 和 125 mm,两个中间连接管长 875 mm、直径 150 mm。排气温度 $T = 300 \text{ K}$,密度为 $\rho = 1.225 \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3})$,排气流速为 $10 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。

当气流通过消声器时,将遇到消声器壳内的截面突变以及气流和消声管道表面摩擦等情况,从而产生复杂的流动。图 2、图 3 为消声器内部的流场特性图,可以看到由于进气管与两中间连接管是相互错开的,气流需经转折才能进入中间连接管,部分气流需经的转折才能进入中间连接管。

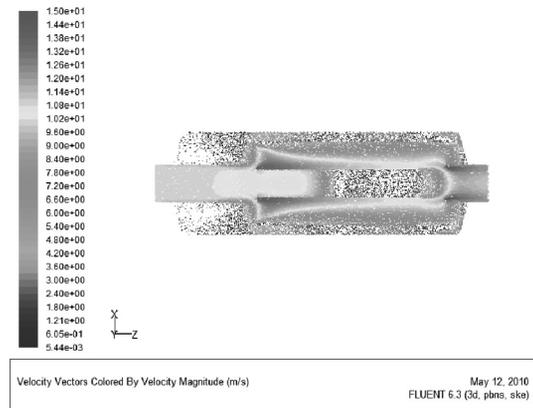


图 2 中心截面的速度矢量图

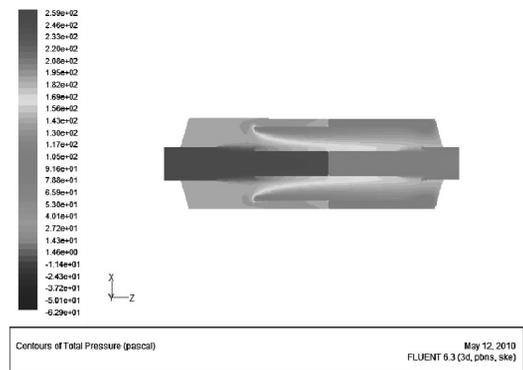


图 3 中心截面的总压云图

由图 2 可以看出,气流从进口内插管中进入第一腔后,一部分气流直接汇集到两个中连管,一部分气流则经过多次转折才进入中连管,并且在两个中连管的进口外边缘处形成了速度大小不一的涡流。大部分气流经过内插管流向第二腔,在出口内插管进口及腔内产生了杂乱的紊流,最后经出口管以较高的流速排入环境。速度最大值出现在两个中连管入口和出口内插管处,这说明此处的湍流相对剧烈。

根据对消声器内部流场的分析可知,气体和火花颗粒在消声器内部的流动是典型的气固两相流,两相流由进口管进入消声器后,随气流在消声器内部做较为复杂的三维湍流运动,部分火花颗粒在碰

撞、重力及离心力的作用下从气流中分离出来，存留在消声器的内部，而另一部分火花颗粒则随气流从排气管排出。

在速度变化大、产生涡流的区域，压力变化也较大，会产生较大的阻力损失。由图3可知，压力损失主要来自于两个中接管入口和出口内插管入口这两个截面发生突变的地方。

2.2 火花熄灭效率

颗粒材料是煤粉，密度 $\rho=2\ 000(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ ，温度 $T=300\text{ K}$ 。消声器进口煤粉颗粒的质量流量用 m_1 表示，消声器出口煤粉颗粒的质量流量用 m_2 表示，火花熄灭效率用 η 表示，则

$$\eta = m_1 - m_2 / m_1$$

2.2.1 不同颗粒粒径对火花熄灭效率的影响

研究消声器对不同直径颗粒的熄灭效率，能很好地说明消声器的火花熄灭性能。在流速为 $10(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、入口颗粒浓度为 $0.032(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ 时，考察粒径分别为 0.01 、 0.05 、 0.1 、 0.5 、 1 mm 下的火花熄灭效率，见图4。

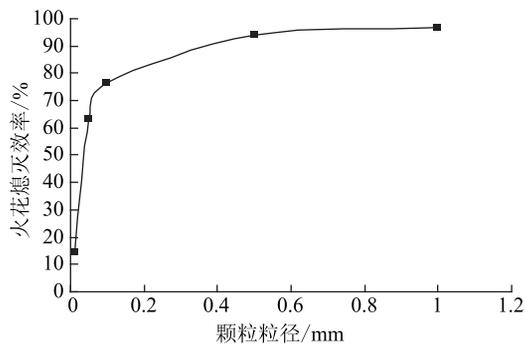


图4 颗粒粒径对火花熄灭效率的影响

由图4可以看出，随着颗粒粒径增大，火花熄灭效率逐渐增加，但是增长幅度逐渐减小。这主要是因为小颗粒由于所受到的气流阻力远大于离心力和重力，因此对气流的跟随性相当好，夹带比较严重不易被分离，大部分都在气流的卷吸作用下随气流飞离了消声器。随着颗粒尺度的增大，颗粒质量增大，颗粒所受的重力和离心力也逐渐增大，沉降作用较强分离性较好。同时颗粒在离心力的作用下被甩离气流，与壁面碰撞后大部分被捕集而分离，但仍有小部分被气流带离消声器。

2.2.2 不同入口颗粒浓度对火花熄灭效率的影响

入口颗粒浓度对火花熄灭效率的影响也较大。下面研究不同入口颗粒浓度下的熄灭效率，在流速为 $10(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 、颗粒粒径为 0.01 mm 时，考察入口颗粒浓度分别为 0.032 、 0.064 、 0.128 、 0.192 、 $0.256(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ 下的火花熄灭效率，如图5。

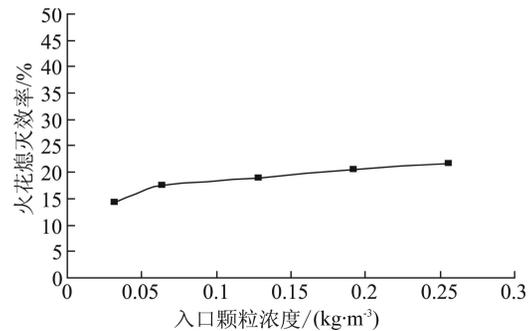


图5 颗粒浓度对火花熄灭效率的影响

由图5可以看出，随着气体中颗粒浓度的增大，火花熄灭效率有逐渐增大的趋势，但由于颗粒粒径较大，增大的幅度不明显。这是因为浓度较高时，气流对颗粒的携带作用更加明显，增加了颗粒与壁面碰撞的几率，所以熄灭效率有所提高；由于大颗粒对气流的跟随性较差，当浓度提高到一定值时，熄灭效率会趋于稳定。

2.2.3 不同流速对火花熄灭效率的影响

在粒径为 0.01 mm ，入口颗粒浓度为 $0.032(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ 时，考察流速分别为 10 、 20 、 30 、 40 、 $50(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 下的火花熄灭效率，如图6。

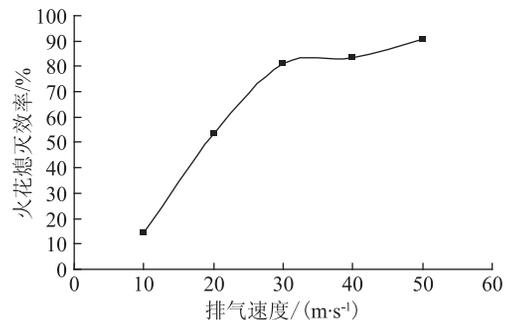


图6 排气速度对火花熄灭效率的影响

由图6可知，随入口气流速度增大，消声器的熄灭效率逐渐增加，这主要是因为颗粒粒径不变的情况下，流速越高，离心力越大，增加了颗粒与消声器内壁面的碰撞几率，从而会有更多的颗粒被捕集到。由此可见，流量越大越有利于颗粒的捕集，熄灭效率越高。但是流量不能太大，随着流量的增加，压力损失相应也增加了。

2.3 压力损失

2.3.1 不同流速对压力损失的影响

图7为不同排气流速对压力损失的影响。

由图7可以看出，压力损失值大概与气流速度的平方成正比，即气流速度愈大、压力损失也愈大，致使消声器空气动力性能变坏，因此，设计消声器时，在条件许可情况下，应尽量采用低流速。

(下转第40页)

用伺服电机驱动。铣头主轴和镗头主轴均采用变频电机驱动。移动滑台采用伺服电机驱动。为了避免干扰,模块之间用光缆连接,设有工位坐标检测超差报警装置。

4.9 液压系统

采用外置式单独液压站,叠加阀结构。液压站至机床采用空中走管。

4.10 止口深度控制仪

为了有效控制缸孔的止口加工深度 $11_0^{+0.05}$ mm,采用马波斯(MARPOSS)量仪由 $11_0^{+0.05}$ mm 尺寸发令控制。去掉镗头与工件的死挡铁机械定位装置。

4.11 冷却、排屑、润滑系统

为了保证加工中切削热的影响,机床采用大流量冷却液进行铁屑排除。冷却箱与自动排屑为一体结构。铁屑被冲到排屑器后,被提升到排屑小车。冷却液通过过滤,又被水泵打到冲屑管路中。

为了延长机床的精度及寿命,采用自动集中润滑系统进行导轨、滚珠丝杠和夹具润滑。

5 结 论

12 V 柴油机机体精铣缸面、精镗气缸孔数控

专机的设计,基于对目标工件工序要求的仔细分析,得出对机床动作及功能的要求,找出其设计要点和难点,通过对这些问题以及机床整体结构、功能部件结构设计进行分析和探讨,采用了来自生产一线的实际经验以及一系列新技术、新方法、新结构,使设计目标得以合理充分地实现。本专用机床通过近两年的实际应用验证,其产品质量稳定性好,工作效率高。

该专机的成功开发,为发动机制造企业开拓新产品预留了很大的发展空间。

参考文献

- [1] 梁瑞锋,李宇艳.缸筒类零件专用数控车床的设计[J].制造技术与机床,2011(12):127-130.
- [2] 袁小平.浅谈德国许勒公司组合机床功能部件—DSS 精镗头[J].洛阳大学学报,1996(6):61-64.
- [3] 成大先.机械设计手册,5 版[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [4] 现代实用机床设计手册编委会.现代实用机床设计手册[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [5] 赵如福.金属切削工艺人员手册,4 版[M].上海:上海科学技术出版社,2006.

(上接第 15 页)

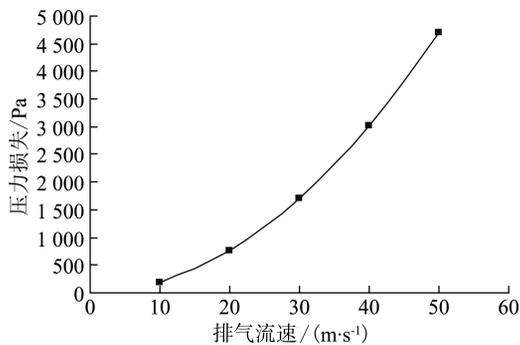


图 7 排气流速对压力损失的影响

3 结 论

(1)气固两相流在消声器内部做较为复杂的三维湍流运动,部分火花颗粒在碰撞、重力及离心力的作用下从气流中分离出来。速度最大值和压力损失均来自于两个中接管入口和出口内插管入口这些截面发生突变的地方。

(2)小颗粒对气流的跟随性较好,而大颗粒所受的重力和离心力较大,随着颗粒粒径增大,火花

熄灭效率增加十分明显;浓度较高时,气流对颗粒的携带作用越大,会有更多的颗粒被捕集下,随入口气流速度增大,火花熄灭效率逐渐增加。

(3)在排气阻力可接受的前提下,适当提高消声器内部气流的离心速度,可以增加火花熄灭效率。

参考文献

- [1] 刘巽俊.内燃机的排放与控制[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [2] Heywood J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York, McGraw-Hill, 1988.
- [3] 王福军.计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [4] 潘仲麟,翟国庆.噪声控制技术[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [5] Sinclair, Jackson. Gas-particle flow in a vertical pipe with particle-particle interactions[M]. AICHE, 1989.
- [6] 车得福,李会雄.多相流及其应用[M].西安:西安交通大学出版社,2007.