

文章编号: 1001-2486 (2002) 03-0009-04

# 气—固两相自由射流的粒子仿真方法\*

黄琳, 刘君

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 采用粒子仿真方法直接跟踪颗粒相运动轨迹, 采用 NND 格式求解 NS 方程, 数值模拟了气—固两相自由射流流场。计算结果表明, 将粒子仿真与 CFD 方法相结合是研究气—固两相流动问题的有效途径。颗粒相参数变化将对气体流场产生一定影响。

**关键词:** 粒子仿真; 两相流动; NS 方程; CFD 方法

**中图分类号:** V211.17 **文献标识码:** A

## Study of Gas-particle Free Jets with the Particle Simulation Method

HUANG Lin, LIU Jun

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** With the particle simulation method employed to trace the trajectory of solid particles and NS equation solved with NND scheme, the gas-particle free jets expanding from a high pressure stagnation chamber through a sonic orifice into a quiescent low pressure chamber is numerically simulated. The results demonstrate that combination of particle simulation method with CFD is an effective approach to the two phases problem. The existence of solid particle is of strong effects on gas flow property.

**Key words:** particle simulation; two-phase flow; NS equation; CFD method

存在于固体火箭发动机尾喷流场中的铝粒、三氧化二铝及其他金属氧化物颗粒不仅将造成能见度降低和光学制导信号及激光信号的严重衰减, 而且由于颗粒的速度滞后和热传递效应将影响尾喷流场的辐射特征, 并有可能沉积于飞行器表面从而对其重要部件造成污染, 影响使用寿命。因此开展尾喷流场气—固两相流动的研究, 确定流场中固体颗粒的浓度分布、尺寸及其对气体流动特性的影响是正确预测及预防尾喷流场信号特征效应的前提和基础, 是固体火箭推进技术得以发展的重要问题, 已经日益引起各国普遍关注。

### 1 研究方法简述

目前文献所述求解气—固两相流动的方法大致可分为“拟流体模型”和“颗粒轨道模型”。两种方法都是建立并求解某种形式的颗粒运动方程。“拟流体模型”虽然充分考虑了颗粒相的湍流输运过程, 但存在湍流封闭模型的选取是否合适以及较难实现对颗粒蒸发和异相反应现象的模拟等问题; “颗粒轨道模型”在拉格朗日坐标系下建立颗粒运动方程, 能够较容易地模拟颗粒相复杂的实际经历, 但是不能完全模拟颗粒脉动, 且对计算速度和内存都有较高要求。

为避免上述两种模型在建立颗粒运动方程时出现的近似和误差, 本文采用粒子仿真方法跟踪颗粒相运动轨迹。粒子仿真的思想来源于求解稀薄气体力学问题的直接仿真蒙特卡罗 (DSMC) 方法。它不是求解模型化的颗粒运动方程, 而是通过直接跟踪大量颗粒的实际运动状态实现对真实物理过程的模拟。具体做法如下: 用有限个颗粒团代替实际存在的大量固体颗粒, 对每个颗粒团通过随机抽样赋予初始的速度、位置、温度、尺寸等特征物理量。在每个时间步长  $\Delta t$  内, 首先认为颗粒团做匀速直线运动, 计算经过  $\Delta t$  后颗粒团新的位置坐标并判断其所在的网格编号, 遇到边界则进行相应处理。

\* 收稿日期: 2002-01-10

作者简介: 黄琳 (1975—), 女, 讲师, 博士。

然后根据选定的气—固作用模型计算气体对颗粒团的作用力和作用热，并据此得到颗粒团新的速度和温度值。对某一网格内所有颗粒团求和，得到该网格颗粒相对气体总的作用力和作用热，然后将其作为源项，数值求解描述气体运动的控制方程，直至收敛。该方法的关键在于通过随机抽样确定颗粒团的初始特征量、颗粒团与气体的相互作用以及颗粒团之间的碰撞，因而能够更为真实地模拟颗粒相的湍流脉动现象。此外，该方法不仅可以方便地修改气—固相互作用力和传热模型，而且可以计算颗粒燃烧等现象对流动的影响，对边界条件和颗粒源项的处理也更为方便。

作为研究固体火箭发动机尾喷流场的基础工作，并对上述方法进行验证，本文采用粒子仿真方法跟踪颗粒相运动轨迹，采用 CFD 方法求解 NS 方程，数值模拟了某轴对称气—固两相自由射流流场。结果表明上述研究途径是可行的，计算模型是合理的，能够较为准确地反映颗粒相存在对气体流动的影响。

## 2 气相处理方法

### 2.1 控制方程

采用守恒形式 NS 方程作为计算的控制方程。由于本文研究的是轴对称流场，取  $\zeta$  为流向， $\eta$  为径向， $\psi$  为周向。不考虑湍流脉动，无量纲化非定常守恒型 NS 方程的形式为：

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\alpha(\bar{E} - \bar{E}_v)}{\alpha \xi} + \frac{\alpha(\bar{F} - \bar{F}_v)}{\alpha \eta} + \frac{\alpha(\bar{G} - \bar{G}_v)}{\alpha \Psi} = H \quad (1)$$

$H$  为源项，对于两相流动问题， $H$  的形式为  $H = (0 \quad -F_{px} \quad -F_{py} \quad -F_{pz} \quad -Q_p)$ ， $F_{px}$ 、 $F_{py}$ 、 $F_{pz}$ 、 $Q_p$  分别是颗粒相对气体三个方向的作用力和热流量，其余各物理量意义见文献 [1]。

### 2.2 差分格式

由于计算对象是含有激波、膨胀波、旋涡及其相互干扰的高度非线性流场，必须选择计算高效率、空间高分辨率的差分格式。本文采用能够较好捕捉激波并获得广泛应用的 NND 格式（无波动、无自由参数的耗散差分格式）进行差分离散。具体表达式见文献 [1]。

### 2.3 边界条件及其处理

(1) 物面边界：根据附面层理论和无滑移等温壁条件，得到

$$u = 0, v = 0, w = 0, T = T_w, \partial p / \partial \eta = 0$$

(2) 轴线边界： $v = w = 0$ ，其余量用外推得到： $\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial \rho}{\partial \eta} = \frac{\partial w}{\partial \eta} = 0$ 。

(3) 进口边界：固定为喷流参数。

(4) 出口边界：超音速流动中下游不影响上游，采用线性外推。

(5) 对称边界：对于轴对称问题可以仅选一个子午平面进行计算，其轴线两侧的流动参数由轴对称条件得到。

### 2.4 网格划分

采用代数方法生成计算网格，并应用伸缩因子在轴线及喷管出口附近将网格加密。

## 3 颗粒相仿真

### 3.1 气—固作用力模型

假设考虑“稀疏悬浮颗粒”，忽略颗粒团之间的相互作用，则每个颗粒团受到的作用力可视为气体流过其产生的阻力，如果将颗粒团近似视为球体，则阻力系数  $C_{Dk}$  具有如下形式（式(2)），式中  $Re_k$  是雷诺数。

$$C_{Dk} = \begin{cases} 0.44 & Re_k > 1000 \\ \frac{24.0}{Re_k} [1.0 + (1/6)Re_k^{2/3}] & 1 < Re_k < 1000, \quad Re_k = D_k |\mathbf{u} - \mathbf{u}_k| / v \\ 24/Re_k & Re_k < 1 \end{cases} \quad (2)$$

### 3.2 传热模型

热传导方程的形式为

$$\frac{dT_k}{dt} = 6\mu \cdot \frac{c_p}{c} \cdot \frac{1}{\rho_k D_k^2} \cdot \frac{Nu_k}{Pr} \cdot (T - T_k) \quad (3)$$

$c_p$ 、 $c$  分别是气体和颗粒的比热容， $Pr$  为 Prandtl 数， $Nu$  为 Nusselt 数，

$$Nu_k = 2 + 0.6 Re_k^{1/2} Pr^{1/3}, \quad Pr = 0.75$$

### 3.3 颗粒源项的计算

某一网格内颗粒微团对气体总的作用力和作用热可写为

$$\mathbf{F}_p = \frac{\pi}{8} \frac{\rho}{V_{i,j}} \sum_k [D_k^2 N_k (\mathbf{u} - \mathbf{u}_k) |\mathbf{u} - \mathbf{u}_k| \cdot C_{Dk}] \quad (4)$$

$$Q_p = \frac{\pi}{V_{i,j}} \cdot \frac{\mu c_p}{Pr} \sum_k N_k N_k D_k (T - T_k)$$

其中  $V_{i,j}$  为第  $(i, j)$  个网格的体积， $D_k$ 、 $N_k$  分别代表第  $k$  个颗粒微团的直径及其包含的真实固体颗粒数目。

### 3.4 时间步长的选取

时间步长首先应当满足差分格式的稳定性条件。此外由于颗粒团的自由运动和气—固相互作用被解耦处理，时间步长应小于颗粒团越过一个网格所需的最小时间，即

$$\Delta t = \min(\Delta t_g, \alpha \cdot \min(|\Delta X / u_k|)) (\alpha < 1)$$

### 3.5 边界条件处理

入口边界：正确处理颗粒入口边界是保证仿真结果合理性的决定性因素。处理入口边界需要给定  $\Delta t$  内进入计算区域的颗粒团数目  $N_{p,j}$  以及每个颗粒团的位置、速度、温度、尺寸等物理量。通常  $N_{p,j}$  根据颗粒相质量流量公式得到，而确定其他物理量则需要按照一定分布随机抽样。

出口边界：如果通过判断确定某颗粒团运动至计算区域外，则在代表颗粒团的数组中删除该颗粒团。

物面及对称边界：如果颗粒团运动至轴线或是物面，均按照镜面反射处理。

### 3.6 颗粒团尺寸分布

假设  $N_{p,k}$  代表每个颗粒团内包含的真实颗粒个数， $g(D_k)$  为颗粒团的尺寸分布函数，则

$$\begin{cases} N_{p,k} = m_{p,j} / N_{p,j} (\pi/6) \rho_k D_k^3 \\ g(D_k) = N_{p,k} \cdot f(D_k) \end{cases} \quad (5)$$

$f(D_k)$  代表真实颗粒的尺寸分布函数，可用高斯分布函数进行描述，

$$f(D_k) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma^2 D_k}} \exp\left[-\frac{(\ln D_k - \ln D_m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (6)$$

根据式 (5) (6) 按照“拒绝—接受”方法即可抽样颗粒团的尺寸。

## 4 计算结果及分析

研究对象选取从高压驻室中经音速孔喷向环境大气的气—固两相射流流场。计算区域见图 1。AB 为壁面，OD 为轴线，OA 为喷流边界，CD 为出口边界。图 1、图 2 是不同压力比、不同颗粒直径下颗粒团分布，从中看出颗粒尺寸越小，受气体影响越大，散射角度也越大；随着压力比逐渐增加，颗粒的散射角度逐渐减小，这是因为气体和颗粒的速度随压力比增加不断增大，导致颗粒惯性增大，更倾向于保持原来的运动状态。

图 3 分别是不同颗粒质量百分比条件下气体沿轴线速度的变化曲线，从中可以分析颗粒相对气体运动状态的影响。气体从喷口喷出后首先加速，由于与颗粒的相互作用，在到达马赫盘时速度有所下降。穿过激波，气体速度迅速下降，此时颗粒由于具有较高的速度而对气体有加速作用。随着颗粒质

量百分比的增加，气体所能达到的最大速度将下降，这是因为更多的气体能量将被用来克服颗粒阻力。增加颗粒质量百分比将使激波强度降低。

图4、图5是两种计算条件下气体的等密度曲线。二者虽然在定性上基本相同，但是图中明显反映出颗粒相参数变化对流场结构造成的影响。图6是气体的等温线，其基本变化趋势以及膨胀波、激波和马赫盘的存在与物理分析是一致的，由此表明了本文计算方法的有效性和计算结果的合理性。

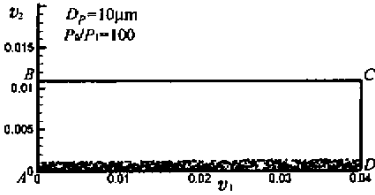


图1 颗粒分布

Fig.1 Distribution of particle

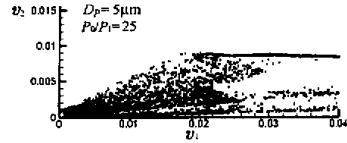


图2 颗粒分布

Fig.2 Distribution of particle

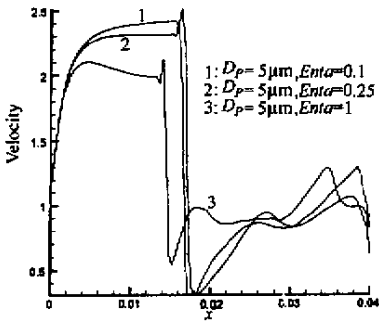


图3 沿轴线速度分布

Fig.3 Velocity distribution along axis

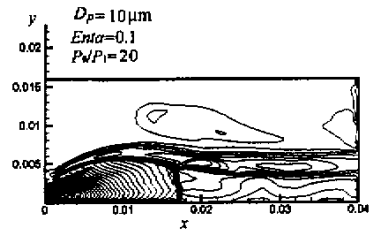


图4 密度等值线

Fig.4 Density contour

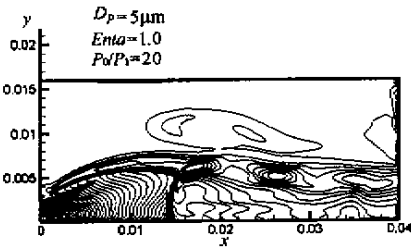


图5 密度等值线

Fig.5 Density contour



图6 温度等值线

Fig.6 Temperature contour

参考文献：

[1] 刘君. 超音速完全气体和 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 燃烧非平衡气体的复杂喷流流场数值拟 [D]. 中国空气动力研究与发展中心博士论文, 1993.  
 [2] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.  
 [3] Bird. Gas Molecular Dynamics [M]. Oxford Press, 1992.



