

发动机内剩余推进剂排放 对卫星表面污染的研究^{*}

程晓丽 毛铭芳 阎喜勤

(北京空气动力研究所 100074)

摘 要

应用真空物理的相关理论,分析了在高空超高真空环境中,发动机二次启动前推进剂排放及其在空中迁移的物理过程,给出模型假设和模拟方程,并针对此真空环境及物理过程应用合适的计算方法对方程进行求解.最后计算了推进剂的排放对卫星造成的污染,给出计算域内浓度变化的非定常过程及卫星表面不同时刻的最大污染量,为推进剂排放方案的实施与否提供理论依据.

关键词 数值模拟—对流扩散—真空技术

1 引 言

CZ-4B 运载火箭具有发射地球同步卫星的能力,运载火箭的第一、二、三子级首先将卫星推至一个大的椭圆轨道——漂泊轨道,卫星在这个以地心为其一个焦点的椭圆轨道上运行一段时间,进行姿态调整,当卫星运行到远地点时,火箭的第三子级再次启动,供给动力,将卫星推到半径为 36 000 km 的地球同步圆形轨道.因此为满足发射地球同步轨道卫星的需要, CZ-4B 运载火箭第三子级必须具备两次启动的能力.发动机第二次启动时首先要解决的是“热泵启动”问题,即发动机在第一次长时间工作后,涡轮温度很高,在滑行阶段,由于涡轮与向推力室输送推进剂的泵是一体的,则涡轮余热向泵端传导,导致二次启动前泵腔温度过高,远高于当地压力所对应的推进剂饱和温度,因此二次充填泵腔的推进剂必然大量汽化,导致第二次启动时发动机无法正常工作.解决方法之一是在二次启动前通过推进剂的排放给泵壳降温.由此带来一个相关问题,即排放出的推进剂必然对卫星造成不同程度的污染^[1,2].污染沉积物会改变太阳能电池阵的透射率,降低功率输出;使各种光学镜面的反射率降低,图像失真畸变;使热控涂层表面反射率和发射率降低;局部气体密集会导致高压装置的电晕放电;星跟踪器会将自由场粒子误认为星粒,误导专用仪器包的输出等.航天飞机的飞行数据表明,分子间相互碰撞将促使分子散射至重要功能表面,推进剂等高分子量的物质容易激发,形成污染源.国外研究经验表明^[3-5],亚微米大小的粒子、固体火箭发动机关机时发动机壳体绝缘材料和燃烧不充分的产物、推进剂液滴与蒸气等都易对卫星造成污染.因此任何对卫星可能造成危害的操作方案,在实施前都要进行污染量的确定.如果污染可接受,则可以操作,否则必须采取必要的防护措施(如加挡板)后才可操作.

2000-04-05 收到原稿, 2000-11-15 收到修定稿

本文就是根据这一应用背景, 基于推进剂排放过程的理论分析, 给出了问题的基本假设, 建立了数学物理模型. 针对排放推进剂的影响域较大, 其浓度在场内呈大梯度变化等特点, 在控制方程对流项的差分离散中引入了二阶 NND 差分格式^[6], 而扩散项采用二阶中心差分离散, 时间方向以求解差分方程的二阶 Runge-Kutta 算法^[7] 推进求解, 最后按照现行的 CZ-4B 三级发动机的安装方式及其与有效载荷的对接尺寸, 计算在发动机排放过程中沿有效载荷侧表面的可能污染量.

2 物理模型

发动机停机时, 卫星的轨道高度为 $H = 600\text{ km}$, 其物理参数为: 压力 $P_{\infty} = 8.106 \times 10^{-8}\text{ Pa}$, 密度 $\rho_{\infty} = 1.137 \times 10^{-13}\text{ kg/m}^3$, 温度 $T_{\infty} = 1000\text{ K}$. 根据国标中对真空区域的划分标准, 此轨道的高空环境属于超高真空范畴, 因此环境密度同排放口密度相比为一个极小值, 可以忽略不计.

推进剂自排放口流出后, 因外界环境压力极低, 在极短时间内迅速挥发为气体, 带走大量气化潜热, 又来不及从周围环境补充, 以致推进剂本身出现降温冷冻现象. 因此排放口附近气、固、液三相共存, 最外层为气体. 在非平衡系统中, 由于分子热运动, 气体分子将把不均匀量由高向低处迁移. 常压下气体的迁移包括黏性、热传导、扩散及热流逸等. 低压下, 当压力降到分子的平均自由程与特征尺寸相当时, 分子之间碰撞机会很少, 分子间不能有显著的动量和能量交换, 此时气体内部的速度和温度分布仍然是连续的, 但靠近壁面的气体和壁面之间速度和温度都存在突变, 有滑移. 压力越低, 分子的平均自由程越大, 打在壁面上的分子在离壁面越远的地方进行下一次碰撞, 而获得该处的速度和温度, 因而分子的速度和温度与壁面的相差越大. 通过上述分析, 针对推进剂排放的计算模型(图 1)可知, 排放口在 O 点, 直径仅几毫米, 远小于排放口到储箱 A 的横向距离(约 1.5 m), 因此粘性和热传导可忽略不计, 气化后的气体向外呈自扩散运动, 考虑初始排放速度后可由对流扩散方程对问题进行描述, 且对物理过程做以下几点假设: (1) 气化时间极短, 可忽略不计. 这是比较保守的假设, 最终计算结果与真实值相比略大; (2) 气体无内外摩擦, 整体运动速度不随时空变化. 这是由于外界压力极低, 处于超高真空状态, 且排放口离物面足够远, 假设同外界没有动量交换过程, 而气体本身的各部分运动速度相等, 速度梯度为零, 因此气体无内外摩擦; (3) 忽略太阳的辐射影响, 气体等温膨胀, 气

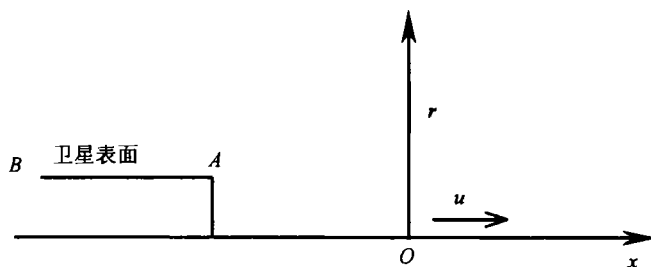


图 1 物理模型示意图

Fig.1 Schematic of physical model

体在对流扩散过程中, 温度不变, 即分子热运动速度不变, 计算时采用推进剂的排出温度.

3 数学模型

有单位污染浓度 c_0 输入时, 由基本假设, 导出柱坐标系 (x, r) 下对流/扩散方程为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + r^{-1} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad u = u_0, \quad (1)$$

其中, c 是单位体积内气体分子数. 扩散系数 D 为

$$D = \frac{1}{3\sqrt{2}\sigma c} \bar{v},$$

算术平均速度 $\bar{v} = \sqrt{8RT/\pi M}$. σ 是分子碰撞截面, R 是普适气体常数, T 是温度, M 是气体分子量.

初场给定 $c = 0$. 边界条件 $c(0, 0) = c_0$; 当 $x \rightarrow \infty$ 或 $r \rightarrow \infty$ 时, $c \rightarrow 0$.

4 数值解法

4.1 方程的无量纲化

取初始污染浓度为 $c_0/10^{14}$, 计算域长度 L , 算术平均速度 $\bar{v}$, 以及 $L/\bar{v}$ 依次为 $c, x(r), u, t$ 的无量纲参数, 得无量纲控制方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + a \frac{\partial c}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + r^{-1} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial c}{\partial r} \right), \\ D &= \frac{10^{14}}{3\sqrt{2}\sigma c L c_0}, \quad a = \frac{u_0}{\bar{v}}, \end{aligned} \quad (2)$$

边界条件: $c(0, 0) = 10^{14}$, 远场 $c = 0$.

4.2 方程的变形

为了反应浓度场大梯度变化及将扩散系数提到积分号以外, 令 $\varphi = \ln c$, 方程进一步简化为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + a \frac{\partial \varphi}{\partial x} = D \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + r^{-1} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \right] \quad (a = u_0/\bar{v}), \quad (3)$$

此时, $D = 10^{14}/(3\sqrt{2}\sigma c_0 \cdot L \cdot e^\varphi)$. 边界条件 $\varphi(0, 0) = \ln(10^{14})$; 远场 $\varphi = -\infty$.

4.3 坐标变换

下面对方程 (3) 进行坐标变换:

$$\xi = \xi(x, r), \quad \eta = \eta(x, r),$$

$\xi(x, r), \eta(x, r)$ 由解椭圆型方程给出, 则在计算域内的模型方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + a \left(\xi_x \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right) &= D \left[\left(\xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left(\xi_x \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right) + \right. \\ &\quad \left. r^{-1} \left(\xi_r \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial}{\partial \eta} \right) r \left(\xi_r \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

边界条件 $\eta = 1$ 时, $\varphi = \ln(10^{14})$; $\eta = m_j$ 时, $\varphi = -\infty$, $\xi = 1$ 和 $\xi = m_i$ 时, $\frac{\partial \varphi}{\partial \xi} = 0$.

其中, m_i 和 m_j 分别为计算域内 ξ 和 η 方向的外边界坐标.

4.4 差分格式

模型方程 (4) 的扩散系数包含待定浓度场, 其变化范围有几十个量级, 使得方程在高浓度近场对流项占主导, 在低浓度远场扩散项占主导. 因此为了在有限网格分辨率下有效捕捉浓度大梯度区, 本文采用二阶 NND 格式差分离散对流项, 由 $a > 0$, 得

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -a \left\{ \left[\frac{\xi_x}{\Delta \xi} (h_{i+1/2}^n - h_{i-1/2}^n) + \frac{\eta_x}{\Delta \eta} (h_{j+1/2}^n - h_{j-1/2}^n) \right] \right\} + D_{\text{dif}}, \quad (5)$$

其中,

$$h_{i+1/2}^n = \varphi_i + 0.5 \cdot \min \text{mod} \{ \Delta \varphi_{i-1/2}, \Delta \varphi_{i+1/2} \},$$

$$h_{i-1/2}^n = \varphi_{i-1} + 0.5 \cdot \min \text{mod} \{ \Delta \varphi_{i-3/2}, \Delta \varphi_{i-1/2} \},$$

$$\Delta \varphi_{i+1/2} = \varphi_{i+1} - \varphi_i,$$

$$\min \text{mod} \{ a, b \} = 0.5 \cdot [\text{sgn} \{ a \} + \text{sgn} \{ b \}] \cdot \min \{ |a|, |b| \},$$

扩散项 D_{dif} 用二阶精度进行中心差分离散.

将空间导数差分离散变为 $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = f(\varphi)$ 形式后, 时间方向以求解差分方程的二阶显式 Runge-Kutta 算法推进求解.

$$\varphi^{n+1} = \varphi^n + \frac{2g_1[g_1, g_2] - g_3[g_1, g_1]}{[g_3, g_3]},$$

$$g_1 = \Delta t f(\varphi^n), \quad g_2 = \Delta t f(\varphi^n + c_2 g_1), \quad g_3 = b_1 g_1 + b_2 g_2,$$

$$b_1 = 2, \quad b_2 = -1, \quad c_2 = 0.5,$$

$[g_1, g_2]$ 表示向量内积, 一维方程的稳定条件是 $\frac{a \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq 1$, 二维方程的时间步长远小于此值, 计算中取它的 0.1. 边界条件 $\eta = 1$ 时, $\varphi = \ln(10^{14})$; $\eta = m_j$ 时, 外插处理 $\xi = 1$ 和 $\xi = m_i$ 时, $\frac{\partial \varphi}{\partial \xi} = 0$.

4.5 碰撞累计量 Q 的计算

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} D \nabla c dt,$$

其中, $D \nabla c$ 为单位时间通过一单位面积的分子数. t_1, t_2 为计算累计量的开始时间和终止时间.

5 计算结果及分析

首先分析两种推进剂 (燃料和氧化剂) 的扩散系数 D , 发现在相同浓度场内, 相同温度下, 氧化剂的扩散系数相对较大, 因此首先对氧化剂进行了计算. 计算网格用椭圆型方程生成, 为适应浓度场内粒子分布特点, 采用排放口附近网格密, 远处网格稀的分布方式, 在物面和边界处保证了网格的正交性 (如图 2 所示). 由于拐角处物形变化比较大, 因此网格变形很厉害, 网格分布较密, 这刚好符合在浓度梯度大的区域网格分布密集的要求. 图 3 为粒子的浓度等值线, 从图中可见, 随着时间的增加, 粒子在计算域内的分布呈现一系

列有规则的变化. 图 3(a) 表明扩散刚开始时由于排放口以外区域粒子浓度为零, 粒子扩散系数远远大于对流速度, 所以整个浓度场大体呈现球面扩散性质, 但在储箱的拐角处, 由于粒子扩散被阻挡而出现堆积. 随着时间的推移在图 3(b), (c), (d) 中, 粒子在拐角处的堆积越来越严重, 从图像上来看好像在拐角处又出现了一个扩散源, 因此扩散表现出方向性, 卫星所处一方的浓度增加得比另一方快. 当时间发展到图 3(e) 的 0.66 s 时, 由于扩散性质是由浓度高向浓度低处进行的, 所以拐角处的浓度峰值渐渐被抹平, 拐角处假想扩散源的位置逐渐下移, 与排放口的扩散源逐渐融合成一个大的扩散源, 只是这个扩散源的位置不在原点, 而是向 x 负轴上有一个偏移量. 当排放时间继续延长时, 排放口附近的粒子浓度升高到一定数值, 扩散系数下降到可以与对流速度相比时, 初始排放的方向性开始表现出来, 这时卫星所处位置的浓度比反方向的同一位置的浓度要低, 如图 3(f), (g), (h) 所示, 自此以后, 整个浓度场基本稳定, 其整体分布图画不会再有很大的改变. 图 4 为四个不同时刻卫星表面的碰撞累计量沿轴线的变化, 从图中可见, 随着距离的增加累计量 Q 的衰减很快. 这说明储箱放在卫星与扩散源之间, 对防止卫星污染很有利, 除上述流动特点外, 还有一个原因是在排放推进剂的过程中, 储箱对粒子的阻挡作用, 使粒子不能直接到达卫星表面, 而拐过这个拐角要多走很长一段距离的路, 无形中延长了排放口到卫星表面的距离, 并使粒子开始到达卫星表面的时间比无储箱时延后. 关于卫星表面的碰撞累计量与相反方向同一 x 位置的碰撞累计量的对比见图 5 燃料排放的计算, 从图中可见, 燃料的遭遇累计量比氧化剂小得多, 原因之一是相同温度、相同浓度下, 其扩散系数小于氧化剂的扩散系数, 另一个重要原因是由于排放口到储箱的径向距离增大导致的, 上面已经提到储箱的存在相当于增大了排放口到卫星的距离, 储箱的半径越大此距离越大, 而距离的增大则导致碰撞累计量快速衰减. 将相同时刻相反方向的遭遇累计量对比可见, 由于有储箱的阻挡作用及初始排放速度的影响, 卫星表面的碰撞累计量远远小于同它方向相反的同距离处的累计量, 且随着时间的增大, 这一差异越来越大.

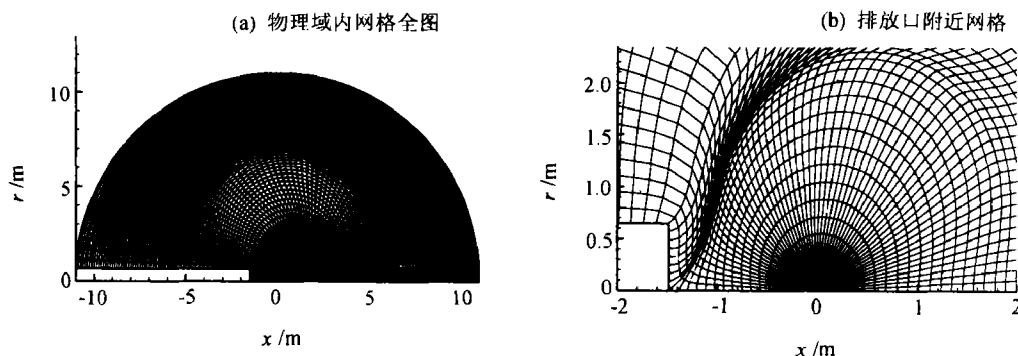


图 2 物理域内网格

Fig.2 Grid in physical domain

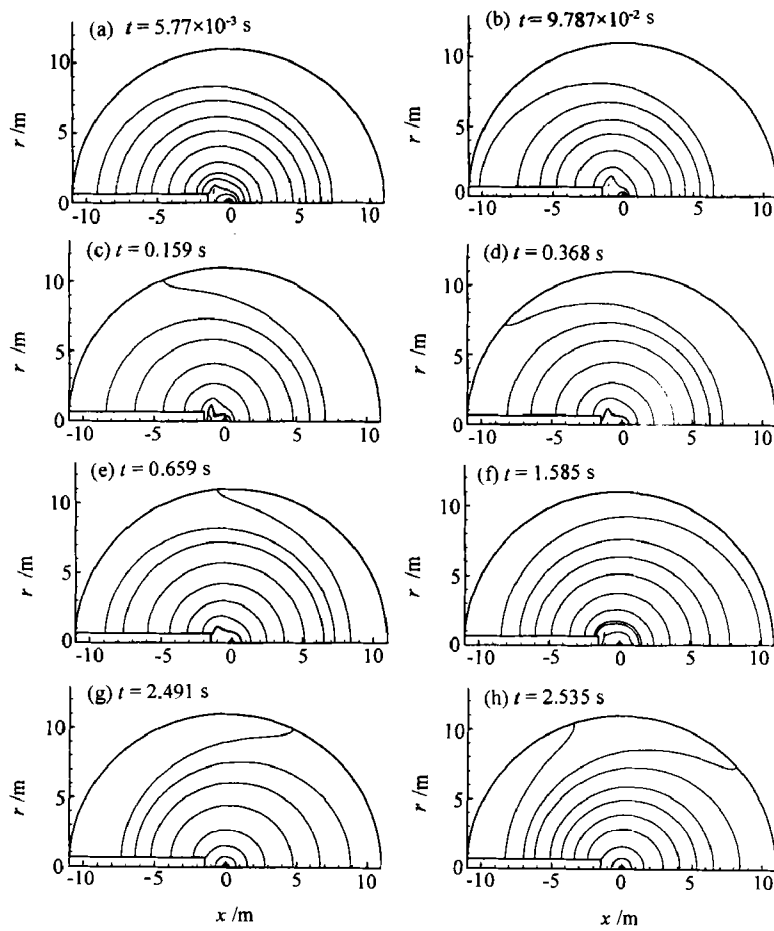


图 3 不同时刻浓度场的等值线

Fig.3 Concentration contours at different times

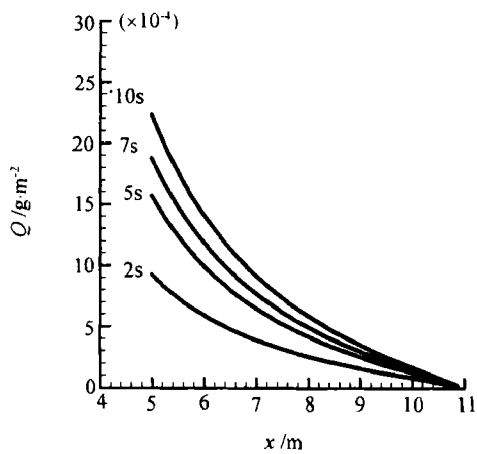


图 4 碰撞累计量沿轴线的变化

Fig.4 Collision accumulation at axial direction

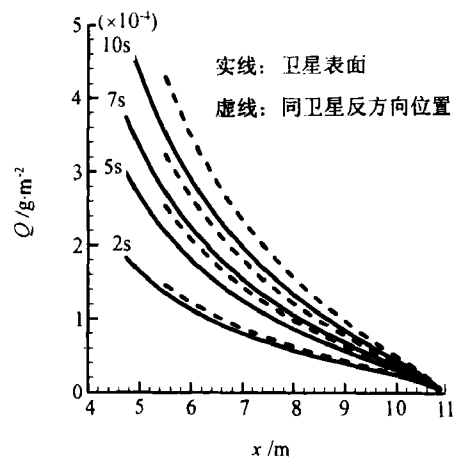


图 5 卫星表面碰撞累计量沿轴线的变化

Fig.5 Collision accumulation on satellite surface

本文在轴对称模型基础上通过分析和计算, 给出了推进剂排放的理论分析、计算方法及卫星表面污染量的计算. 为推进剂排放方案的论证提供理论依据.

参 考 文 献

- [1] Chirivella J E *et al.* Hydrazine Engine Plume Contamination Mapping. AD A018729, 1975
- [2] Boraas S. Spacecraft Contamination From Rocket Exhausts. AIAA, 81-1385
- [3] Didier F, Rault G. Spacecraft Contamination Investigation by Direct Simulation Monte Carlo Contamination on Uars/Haloe. AIAA, 93-0724
- [4] Taylor J C *et al.* Early-Time Water Vapor Outgassing from MSX: Assessment Using the DSMC Method. AIAA, 97-0838
- [5] Silver D M. Midcourse Space Experiment: Early Flight Molecular Contamination Modeling Predictions. AIAA, 97-0839
- [6] 张涵信. 无波动、无自由参数的耗散差分格式. 空气动力学学报, 1988, 6(2):143—165
- [7] Satofuka N, Nishida Y. Numerical solution of viscous compressible flows past an airfoil using unconditionally stable explicit method. In: Special Publication of National Aerospace Laboratory, Tokyo: Proceeding of the Second Aircraft Computation Aerodynamics Symposium, 1984. 201—211

STUDY OF SATALLITE SURFACE COMTAMINATION OF REMAINDER PROPELLANT EXHAUSTED FROM AN ENGINE

CHENG Xiaoli MAO Mingfang YAN Xiqin

(Beijing Institute of Aerodynamics, 100074)

Abstract

The physical processes of exhausting propellant and its migrating in space before the secondary startup of an engine in the high altitude and super-vacuum environment have been analyzed by using the vacuum physical theory. The assumptions used in the model and equations are given. An appropriate numerical method is developed to solve the equations and to conduct the computer simulation related to the physical process at the condition of vacuum. The contamination on satellite caused by the exhausting propellant is calculated. The unsteady process of concentration variation as well as the maximum contamination on satellite surface at different time is obtained. The theoretical criterion is provided for performing the propellant exhausting scheme desired.

Key words Numerical simulation, Convection-diffusion, Vacuum technique