

文章编号: 1000-8055(2009)02-0445-05

铝镁贫氧推进剂固冲发动机沉积数值模拟

王德全, 夏智勋, 胡建新, 郭 健

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 基于随机轨道模型和 Mundo 沉积模型, 对固冲发动机三维两相流场进行了数值模拟, 讨论了不同进气道进气角度、燃气发生器出口构型以及颗粒相入口边界处粒子粒径分布、燃烧生成的三氧化二铝的重附率等参数对发动机沉积的影响。结果表明, 进气角度变化对沉积分布位置影响不大, 随着进气角度的增加, 进气道附近沉积分布逐渐不均匀; 增加燃气发生器出口喷孔数量, 不利于减少沉积; 重附率变化对沉积分布影响不大; 在忽略大粒子颗粒沉积情况下, 随着粒径的增大, 沉积量存在一个极大值。

关 键 词: 固体火箭冲压发动机; 沉积; 数值模拟; 两相流

中图分类号: V438

文献标识码: A

Numerical simulation of deposition for aluminum/magnesium loaded fuel-rich propellant ducted rockets

WANG De-quan, XIA Zhi-xun, HU Jian-xin, GUO Jian

(Institution of Aerospace and Material Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on stochastic trajectory model and Mundo deposition model, the 3D two-phase flow field in solid rocket ramjet was numerically simulated. The influences of the inlet angle, the burner exit configuration, particle size distribution at particle boundary and condensing fraction of Al_2O_3 on the deposition were discussed. The results indicate that the change of inlet angle has a little effect on the depositing position, and with the increase of inlet angle, the deposition around inlet will be distributed irregularly. We can also find that increasing the gas generator nozzle numbers is adverse to reduction of deposition. The change of condensing fraction has a little effect on the depositing position, and with the increase of particle diameter, the total deposition mass has a maximum value if deposition from big particle is neglected.

Key words: ducted rocket motor; deposition; numerical simulation; two phase flow

粒子沉积是火箭发动机中的重要问题, 对于发动机内壁面, 尤其是喷管沉积的形成原因, 尚存在争议, 一种理论认为发动机内存在“粒子真空”区, 沉积层是上游沉积物流动的结果; 另一种理论认为沉积是粒子撞壁的结果。

张唯^[1]归纳了固体火箭发动机点火试验中喉部沉积的一些现象和规律, 分析了喉部沉积对发动机内弹道性能的影响, 探讨了喉部沉积的机理、主要影响因素及消除措施等。王松柏^[2]从理论上分析了固体火箭发动机喷管喉部沉积层的形成规

收稿日期: 2008-01-21; 修订日期: 2008-07-01

作者简介: 王德全(1979-), 男, 辽宁普兰店人, 博士生, 主要从事固体火箭冲压发动机流场仿真的研究。

E-mail: wdq0607@163.com

律. 相对于固体火箭发动机, 固冲发动机内压力与燃气流速相对不大, 因此本文计算中认为沉积物由颗粒撞击壁面形成.

在对粒子撞壁后状态确定的研究中^[3-8], Mundo^[5-6]等人考虑了液滴撞壁后沉积和飞溅两种情况, 提出了以 Sommerfeld 数 $k = We^{0.5} \cdot Re^{0.25}$ 作为判定准则的液滴撞壁模型; 国内成晓北等^[7-8]人对柴油机内喷雾撞壁过程的众多模型进行了分析比较, 应用 Mundo 建立的液滴撞壁模型作了数值模拟, 并将计算与试验结果作了对比分析. 对于固体火箭发动机内的沉积问题, 国内外已做了大量的研究, 但固体火箭冲压发动机内的沉积问题国内还未见相关研究报道.

本文基于以 Sommerfeld 数为判定准则的沉积模型, 对固冲发动机内壁面的沉积分布进行了分析, 讨论了发动机不同结构以及流场参数对沉积分布的影响.

1 数学模型

固体火箭冲压发动机三维燃烧室的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi) =$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) + S_\phi \quad (1)$$

上式中各项的具体含义详见文献 [9].

计算中的边界条件是根据发动机的实际工作状态而定的. 所模拟的发动机工作状态为: 飞行高度为 10 km, $Ma = 2.8$, 空气在进气道中通过 3 个斜激波和一个正激波进入补燃室. 4 个进气道空气流量相同, 分别为 2 kg/s (四进气道), 总温 573 K. 富燃燃气流量按空燃比为 15 来设计, 总温由热力计算所得为 2100 K.

本文采用“随机轨道模型”来模拟颗粒沿运动轨迹的燃烧、湍流扩散等过程.

由于计算量大, 为计算方便, 本文凝相入口边界颗粒尺寸取为 1.5 μm (讨论粒径分布影响时除外).

计算中对所建立的三维两相湍流燃烧 N-S 方程采用有限体积法进行差分离散, 扩散项采用中心差分格式离散, 为获得较好的稳定性, 对流项采用一阶迎风格式离散, 采用标准的压力插值格式, 应用 SIMPLE 算法对离散方程进行求解.

2 结果分析

2.1 进气道进气角度影响

进气道进气角度分别取为 45°, 60° 和 75°. 图 1 为不同进气角度下发动机壁面沉积分布云图; 图 2 为不同进气道进气角度下发动机壁面轴向二维沉积曲线. 其中纵坐标 V_s 为沉积速率与凝相颗粒总流量的比值, 下同. 由图 2 可见, 总体上角度变化对沉积分布位置影响不大, 沉积主要集中在

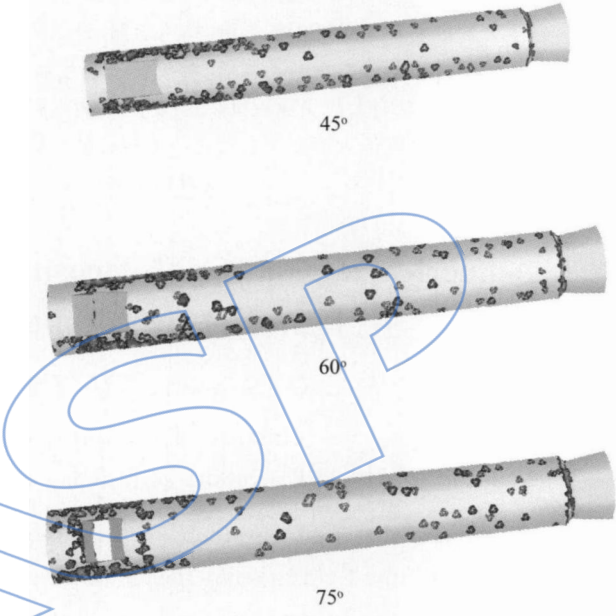


图 1 不同进气角度下发动机壁面沉积分布云图
Fig. 1 Contours of deposition distribution on the wall at different angle

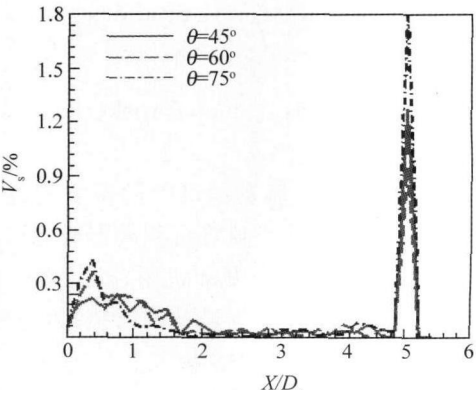


图 2 不同进气角度下发动机壁面轴向二维沉积曲线
Fig. 2 Planar axial deposition distribution at different angle

进气道附近以及冲压喷管收敛段. 另外还可以看出, 进气角度为 45° 时, 进气道两侧沉积分布比较均匀, 随着进气角度的增加, 这种均匀性逐渐减弱. 这主要是由于角度变小, 轴向上进气道两侧回流区旋涡作用区域变大, 燃气中被卷吸到壁面附近的凝相粒子分布更加广泛, 进气道附近沉积轴向变化比较均匀.

图 3 为不同进气道进气角度下发动机沉积总量变化曲线. 其中纵坐标 V_{st} 为总沉积速率与凝相颗粒总流量的比值, 下同. 由此可见, 随着进气道进气角度的增大, 总沉积量先是减小, 后增大, 存在一个最佳值. 由于只是为了说明沉积随角度的变化趋势, 这里只计算了 3 个算例, 实际上沉积随角度变化是非线性的. 这里之所以存在一个最佳值, 主要是因为空燃比及其他条件一定时, 发动机沉积主要受燃气与空气的掺混程度以及颗粒在发动机内的停留时间决定, 进气角度增大, 有利于充分掺混, 使颗粒充分燃烧, 减小沉积; 但同时燃气轴向速度分量减小, 增大了颗粒滞留时间, 这虽然可使颗粒充分燃烧, 但却使得颗粒与壁面碰撞的概率增加, 增大沉积. 因此, 这两种因素综合作用的结果, 使得随着进气角度的增大, 沉积总量存在一个最佳值. 这就要求我们在设计发动机时应合理设计发动机结构, 使得在增大燃气与空气掺混程度的同时, 尽量减小颗粒在发动机内的停留时间, 即在增大发动机燃烧效率的同时, 尽可能减少颗粒沉积.

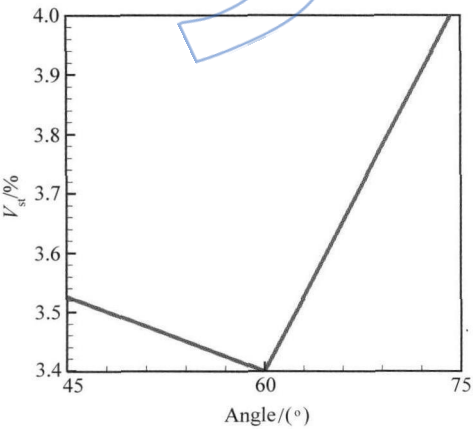


图 3 不同进气角度下发动机沉积总量变化曲线
Fig. 3 Total deposition distribution at different angle

2.2 燃气发生器喷管构型影响

燃气发生器出口构型如图 4 所示, 分别为单

喷孔、四喷孔和八喷孔. 不同的喷管构型对燃气的燃烧效率、颗粒在发动机内的轨迹以及沉积分布将产生很大影响. 在保证燃气发生器入口总流量不变以及进气道出口参数不变的情况下, 对燃气发生器出口分别采用单孔、四喷孔及八喷孔情况下的沉积问题进行研究.

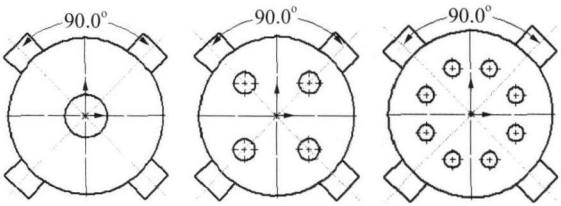


图 4 燃气发生器出口构型
Fig. 4 Burner exit configuration

图 5 为不同燃气发生器喷孔数量下发动机壁面轴向二维沉积曲线. 如图所示, 无论是进气道附近还是尾喷管收敛段, 沉积量都是随着喷孔数量的增加而增加. 当喷孔数量增加时, 由于燃气在整个燃烧室内更加分散, 有利于增加燃气的燃烧效率, 但同时也使得凝相颗粒分布更加广泛, 与壁面的碰撞概率也相应增加, 沉积量也有所增加, 当喷孔数量增加时, 进气道附近的沉积量甚至超过了尾喷管收敛段的沉积量. 由此可见, 增加喷孔数量对降低补燃室沉积是不利的, 为减小颗粒与壁面发生碰撞的概率, 减少沉积, 应尽量使燃气集中在补燃室中心轴线附近, 但这样势必会降低燃气与空气的掺混, 降低燃烧效率, 因此, 发动机设计时应合理设计构型, 在沉积与掺混中寻求最优.

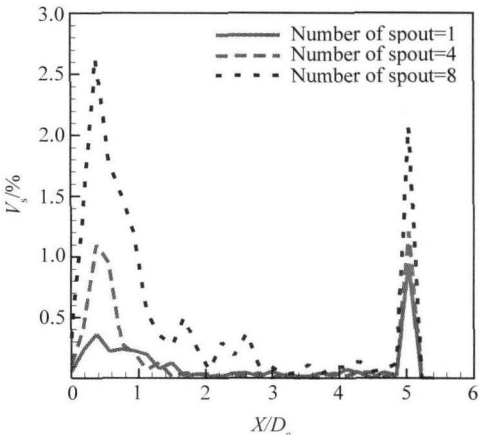


图 5 不同出口构型下发动机轴向二维沉积曲线
Fig. 5 Planar axial deposition distribution at different exit configuration

2.3 氧化铝重附率影响

氧化铝的重附率是指铝颗粒燃烧生成的三氧化二铝重新附着在铝颗粒上的比率. 重附率越大, 说明燃烧生成的三氧化二铝沉积附着在铝颗粒上的比率越大. 本文对重附率为 0. 2, 0. 4 和 0. 6 三种情况下的颗粒沉积问题进行研究. 图 6 为不同重附率下发动机内沉积变化二维曲线.

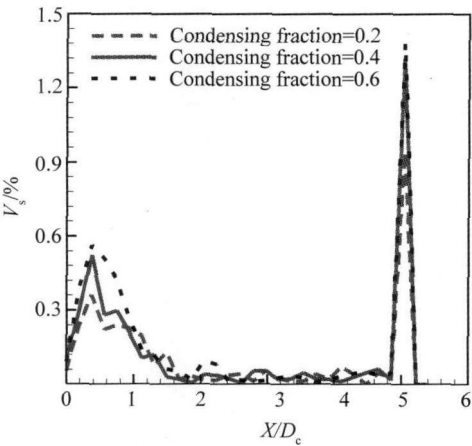


图 6 不同重附率下发动机轴向二维沉积曲线
Fig. 6 Planar axial deposition distribution at different condensing fraction

由此图可见, 不同重附率下, 发动机内沉积的分布规律几乎不变, 都是进气道附近及喷管收敛段沉积严重, 二者之间沉积较轻. 且随着重附率的增大, 沉积总量也相应的增加, 这主要是因为更多的氧化铝由连续相凝结到铝颗粒上, 被归为凝相处理, 因而增加了控制体内凝相粒子总的质量, 沉积总量相应的增加.

2.4 粒径分布影响

凝相粒子粒径分布规律对发动机内粒子的运动轨迹产生较大影响. 由国外 QPCB 测量结果可知, 发动机一次燃烧产物中的粒径分布多为双峰分布或对数正态分布, 这里对粒子直径为 1. 5, 3, 5, 7, 9, 12, 16 μm 以及对数正态分布(平均直径为 1. 5 μm 、标准差为 $\lg 0. 2$) 等几种加注条件下的沉积问题进行分析. 对于大颗粒引起的沉积这里暂不考虑.

图 7 为不同粒径分布下发动机壁面沉积分布云图. 图 8 为发动机总沉积量随粒径分布变化. 由图 7 知, 粒子尺寸较小时, 壁面沉积比较均匀, 发动机轴向沉积量相差不大; 随着颗粒尺寸的增大, 颗粒在壁面的沉积分布越来越不均匀, 沉积越来

越集中在进气道两侧以及尾喷管收敛段, 而进气道下游补燃室壳体上的沉积则相对较少. 从图 8 可见, 随着粒子尺寸的增大, 沉积总量先是增大, 然后略有降低. 采用对数正态分布的沉积情况与小粒径时的差不多.

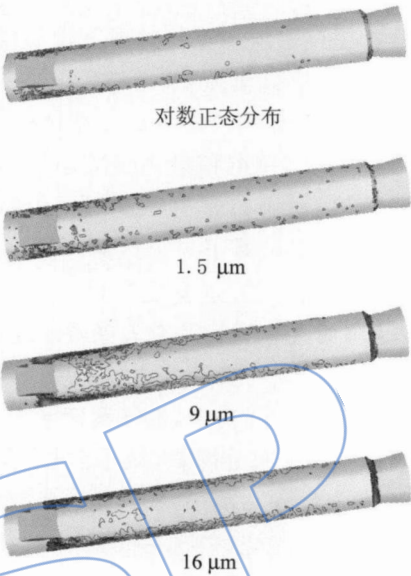


图 7 不同粒径分布下发动机壁面沉积分布云图
Fig. 7 Contours of deposition distribution on the wall at different particle diameter distribution

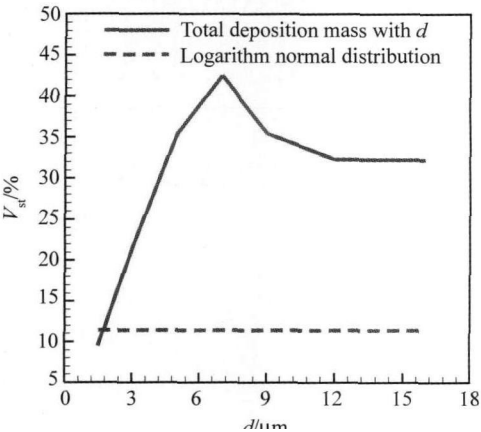


图 8 不同粒径分布下发动机沉积总量变化曲线
Fig. 8 Total deposition distribution at different particle diameter distribution

综上所述, 粒径较小的粒子由于受到燃气湍流扩散的作用, 颗粒分布广泛, 沉积分布比较均匀. 采用对数正态分布的粒子加注条件虽然更加符合实际情况, 但由于数值模拟时计算量所限, 并且采用小粒径时沉积的分布规律与总量都与对数

正态分布时的差不多, 因此在研究较小颗粒的沉积问题时, 用单一的小粒径颗粒也可以反映发动机内的沉积分布规律.

另外, 由于本文没有考虑大颗粒沉积以及沉积物受燃气的吹除作用在壁面流动的影响, 数值模拟结果中进气道下游壳体上沉积较少, 而发动机试验结果显示, 在此处也会存在一定沉积, 因此, 还需要进一步的理论与数值模拟工作对以上的简化进行修正.

3 结 论

- 1) 进气角度变化对沉积分布位置影响不大, 随着进气角度的增加, 进气道附近沉积分布越来越不均匀.
- 2) 增加燃气发生器喷孔数量虽然可以增强掺混, 却不利于降低沉积, 发动机设计时应合理设计构型, 在沉积与掺混中寻求最优点.
- 3) 燃烧生成的三氧化二铝重附率的变化对沉积影响不大, 沉积与重复率成正比.
- 4) 在忽略大粒子颗粒沉积情况下, 随着粒径的增大, 沉积量先增大, 后减小, 存在一个极大值, 最后趋于稳定.

沉积问题呈现出明显的非定常特性, 在定常情况下计算稳态颗粒的沉积问题, 只能定性得到沉积分布规律, 为了进一步研究发动机初始沉积过程以及随时间的变化规律, 在后续工作中需要进行非定常数值分析.

参考文献:

[1] 张唯. 固体火箭发动机喷管喉部沉积问题的探讨[J]. 应用科技, 1979, (2): 1-11.
ZHANG Wei. Discuss on deposition of the condensed

phase particles on the throat in solid rocket motor[J]. Applied Science and Technology, 1979, (2): 1-11. (in Chinese)
[2] 王松柏. 喷管喉部沉积层的初始沉积速度预估[J]. 推进技术, 1989, (5): 25-30.
WANG Songbai. Prediction on initial deposit velocity of the condensed phase particles on the throat surface[J]. Journal of Propulsion Technology, 1989, (5): 25-30. (in Chinese)
[3] Wang D M, Watkins A P. Numerical modeling of diesel spray wall impact phenomena[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1993, 14(3): 301-312.
[4] Bai C, Gossman A D. Development of methodology for spray impingement simulation[R]. America: SAE Paper, 950283, 1995.
[5] Mundo C, Sommerfeld M. Droplet wall collisions: Experimental studies of deformation and breakup process[J]. Int. J. Multiphase Flow, 1995, 21(2): 151-173.
[6] Mundo C, Tropea C, Sommerfeld M. Numerical and experimental investigation of spray characteristic in the vicinity of a rigid wall[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1997, 15: 228-237.
[7] 万吉安, 黄荣华, 成晓北. 喷雾撞壁模型的发展[J]. 柴油机设计与制造, 2004, (2): 28-32.
WAN Jian, HUANG Ronghua, CHENG Xiaobei. The development of spray wall interaction models[J]. Design & Manufacture of Diesel Engine, 2004, (2): 28-32. (in Chinese)
[8] 成晓北. 柴油机燃油喷射雾化过程的机理与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2002.
CHENG Xiaobei. Mechanism and experimental study on fuel injection spray of diesel engine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2002. (in Chinese)
[9] 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1995.