

# 粉末燃料供应装置中增设扰流 锥体数值模拟研究

孔龙飞, 夏智勋, 胡建新, 王德全

(国防科技大学 高超声速冲压发动机国防科技重点实验室, 长沙 410073)

**摘 要:** 在粉末燃料冲压发动机的粉末燃料供应装置流化喷管处增设扰流锥体, 并针对扰流锥体不同结构外形和位置对流场中离散相颗粒浓度的影响进行了计算分析, 总结出了冷态下扰流锥体对外流场颗粒浓度分布的影响规律。

**关键词:** 粉末燃料冲压发动机; 燃料供应; 扰流锥体; 两相流

**中图分类号:** V435-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 02-0056-07

## Numerical investigation of fluid disturbing cone added in powdered fuel feeding system

KONG Long-fei, XIA Zhi-xun, HU Jian-xin, WANG De-quan

(Laboratory of Scramjet Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A fluid disturbing cone was set behind the nozzle of the powdered fuel feeding system in powdered fuel ramjet. A numerical simulation method was adopted to analyze the effects of its structures and position on the discrete phase particle concentration in cold flow field. The law that the fluid disturbing cone in cold state affects the particle concentration distribution in external flow field is presented.

**Keywords:** powdered fuel ramjet; fuel feeding; fluid disturbing cone; two-phase flow

## 0 引言

粉末燃料冲压发动机以高能量金属或非金属材料为燃料, 兼具有液体燃料冲压发动机燃烧效率高、能量高及燃料流量调节容易实现和固体火箭冲压发动机结构简单、可靠性高、维护使用方便

和适合机载发射的优点, 在航空航天领域有着广泛的应用前景。国外已经开展了相关方面的研究<sup>[1-2]</sup>, 国内关于粉末燃料冲压发动机的研究正处于起步状态<sup>[3-6]</sup>。粉末燃料供应系统作为其关键部分, 具有重要的研究意义。

粉末燃料的流化掺混效果直接影响在燃烧室中的点火和燃烧, 供应装置应尽可能地实现粉末

收稿日期: 2011-11-10; 修回日期: 2011-12-19

基金项目: 总装预研项目 (2008AA7050406)

作者简介: 孔龙飞 (1988—), 男, 硕士, 研究领域为航空宇航推进理论与工程

燃料在燃烧室中的均匀分布。S.Goroshin 等<sup>[2]</sup>提出了一种粉末燃料供应装置, 如图 1 所示。

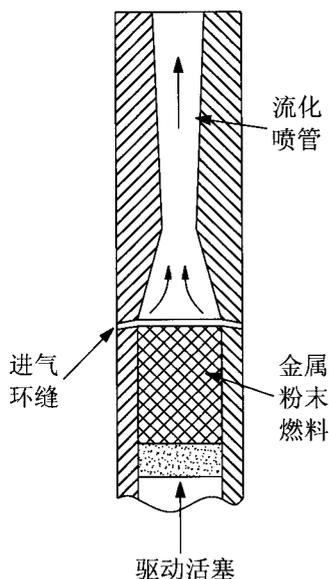


图 1 粉末燃料供应装置<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Powdered fuel feeding system<sup>[2]</sup>

该装置基本工作原理为: 流化气从头部的进气环缝中吹入, 高速掠过金属粉末燃料表面, 储箱内的金属粉末燃料在气相拖曳力的作用下被卷起并喷出, 实现粉末燃料流化。储箱尾部的驱动活塞将粉末燃料不断向前推动, 保证粉末燃料的连续供应, 粉末燃料流量可以依靠驱动活塞的运动速度控制。国防科技大学韩超<sup>[4-5]</sup>对图 1 的供应装置进行了重新设计和研究, 指出了实现粉末燃料流量调节的几种方式并对各种调节方式下的内部流场进行了数值模拟, 总结了各调节方式下粉末燃料供应装置出口截面处粉末燃料的离散相浓度分布的影响规律。

本文在现有的粉末燃料供应系统<sup>[5]</sup>基础上, 在粉末流化喷管出口轴部增设扰流锥体来影响外流场中粉末燃料的浓度分布, 流场模型如图 2 所示。通过对不同类型的扰流锥体下的冷态流场进行数值模拟研究, 总结了不同扰流锥体对外流场内粉末燃料浓度分布的影响规律。

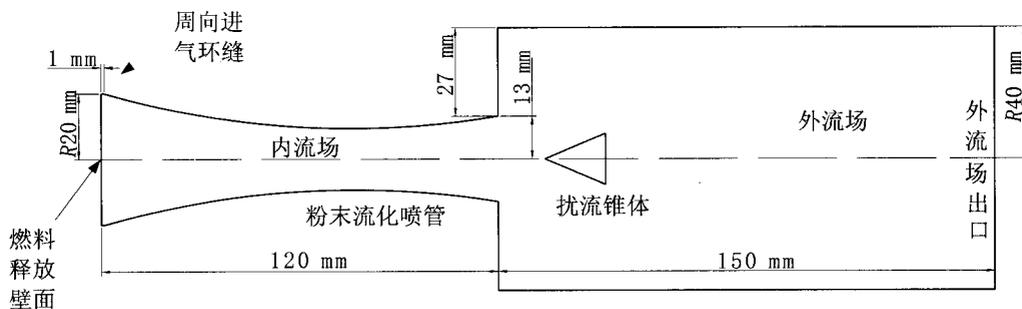


图 2 计算模型结构

Fig. 2 Structure of calculation model

## 1 计算模型

### 1.1 物理模型

计算模型结构如图 2 所示, 由三部分组成: 粉末流化喷管、扰流锥体和外流场, 扰流锥体位于外流场内并与粉末流化喷管同轴。粉末燃料在粉末流化喷管出口截面处的浓度分布如图 3<sup>[6]</sup>所示。本文分别采用图 4 中 A, B, C, D 4 种扰流锥体模型对外流场进行影响实现外流场离散相浓度的重新分布。A, B, C 3 种扰流锥体的底面半径和

高度相同, 锥面分别采用直线、外凸曲线、内凹曲线旋转而成; 扰流锥体 D 相似于扰流锥体 A, 底面半径和高度均放大 1/3。工作原理为: 流化空气由周向环缝喷入粉末流化喷管, 然后夹携粉末燃料由粉末流化喷管高速喷出, 部分燃料颗粒撞击在扰流锥曲面上, 实现颗粒轨道的偏离, 燃料被迁移到浓度相对较低的区域进而影响颗粒浓度的分布。

分别对 6 种冷态工况进行了数值模拟, 6 种冷态工况分别如下:

Model 1 外流场中心不加扰流锥体;

Model 2 外流场中心加扰流锥体模型 A,  $H=10$  mm;

Model 3 外流场中心加扰流锥体模型 B,  $H=10$  mm;

Model 4 外流场中心加扰流锥体模型 C,  $H=10$  mm;

Model 5 外流场中心加扰流锥体模型 A,  $H=0$  mm;

Model 6 外流场中心加扰流锥体模型 D,  $H=10$  mm。

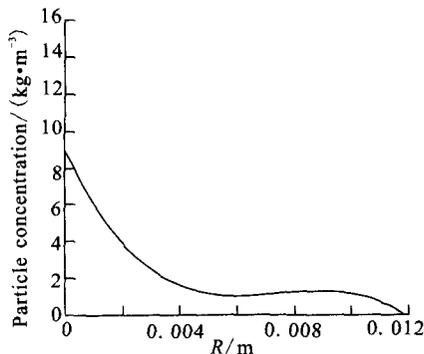


图3 粉末流化喷管出口径向颗粒相浓度分布<sup>[5]</sup>  
Fig. 3 Radial particle concentration distribution at the exit of powder fluidization nozzle<sup>[5]</sup>

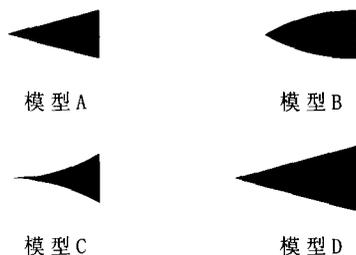


图4 四种扰流锥体模型

Fig. 4 Four types of fluid disturbing cone models

## 1.2 控制方程

粉末燃料供应装置流场内为三维、非定常气固多相流, 计算量大且收敛性差。为计算方便, 在不改变流场特征的前提下, 对流场实施如下简化:

- 1) 粉末流化喷管头部周向进气环缝均匀进气, 流场为二维轴对称结构;
- 2) 忽略流场参数随时间的变化, 流动定常;

3) 离散相简化为同一直径球形颗粒, 忽略颗粒粒径及形状对流场的影响。

至此, 将供应装置的流场简化为二维气固两相定常流。

对粉末燃料供应装置流场的描述采用欧拉-拉格朗日方法。流化气流作为连续相, 在欧拉坐标系中求解 N-S 方程, 湍流描述采用  $\kappa$ - $\epsilon$  双方程模型; 粉末燃料作为离散相, 采用拉格朗日方法跟踪描述其轨迹, 粉末燃料的湍流扩散采用离散相模型 (DPM) 来模拟, 其基本控制方程如下:

离散相运动方程

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u-u_p) + \frac{g_x(\rho_p-\rho)}{\rho_p} + F_x \quad (1)$$

式中:  $F_D(u-u_p)$  为离散相单位质量曳力, 且

$$F_D = \frac{3\mu C_D Re}{4\rho_p d_p^2} \quad (2)$$

式中:  $u$  和  $u_p$  分别为气相速度和离散相速度;  $\mu$  为气体动力粘度;  $\rho$  和  $\rho_p$  分别为气相密度和离散相密度;  $d_p$  为离散相直径;  $g_x$  为重力加速度;  $Re$  为相对雷诺数,  $Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}$ ;  $C_D$  为曳力系数;  $F_x$  为其他作用力, 包括附加质量力、热泳力、布朗力和 Saffman 升力等。

对方程 (1) 积分, 可以得到离散相轨道上每一位置的离散相速度, 离散相轨道可以通过再次积分获得

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (3)$$

沿着每个坐标方向求解此方程便可得到离散相轨迹。

气固两相采用耦合计算方法, 其过程如下: ① 计算连续相流场; ② 计算从喷射源开始的离散相轨道, 从而在计算域中引入离散相; ③ 使用已经得到的离散相计算结果中的相间动量、质量交换重新计算连续相流场; ④ 计算修正后的连续相流场中的离散相轨迹; ⑤ 重复③、④两步, 直到获得收敛解。

### 1.3 边界条件

气相工质为空气, 由周向进气环缝径向吹入, 采用质量入口边界条件, 流量为 0.01 kg/s, 静压为 500 kPa; 离散相工质为金属镁, 由燃料释放壁面以 10m/s 速度喷入, 流量为 0.01 kg/s, 燃料释放壁面采用壁面边界条件; 外流场出口采用压力出口边界条件, 压力为 101.325 kPa; 其余边界均设为弹性壁面; 各入口、出口均设为逃逸界面。计算中忽略重力、质量力、布朗力、Saffman 力等的影响, 只考虑相间拖曳力, 不计离散相磨损和沉积。

## 2 算例验证

为验证离散相模型 (DPM) 相间耦合计算方法, 数值模拟了文献 [7] 中所述实验: “用来自反射光的运动条纹的方法测量尺寸相同的大尺度颗粒的稀玻璃球-空气悬浮体湍流的速度和浓度实验”, 通过光学手段测量出了湍流中玻璃球相对于气流的速度滞后量。实验管道模型见图 5 所

示。实验条件: 常温、常压下, 直径为 5.18 cm 的垂直管道由底面通入空气, 空气流速为 5.7 m/s, 直径为 0.1 mm 的玻璃球由管道底面入口释放被吹入垂直管道, 玻璃球流量为 0.007 kg/s。

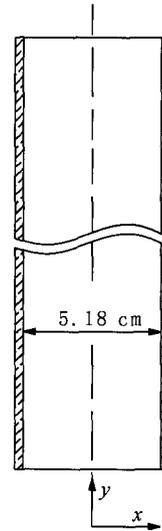


图 5 实验垂直管道模型<sup>[7]</sup>

Fig. 5 Standpipe model used in experiment<sup>[7]</sup>

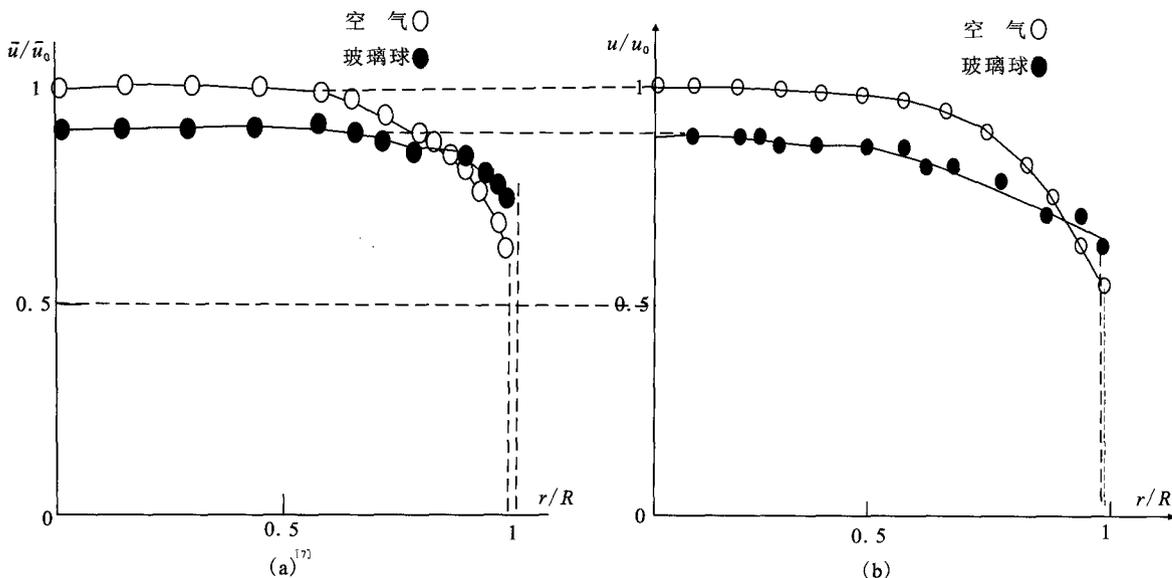


图 6 实验与数值模拟结果

Fig. 6 Experiment and numerical simulation results

图 6 (a) 所示为文献 [7] 给出的实验结果, 横坐标  $r/R$  表示测量点的相对位置, 纵坐标  $\bar{u}/\bar{u}_0$  表示垂直管道内向上湍流中以最大空气流速归一

化的空气 (○) 和玻璃球 (●) 的时间平均速度。图 6 (b) 给出了实验的数值模拟结果。

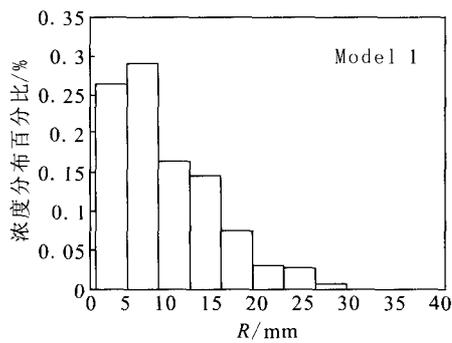
由图 6 中 (a) 和 (b) 两图对比可知, 数值

模拟的玻璃球速度相对滞后量与实验结果吻合，从而验证了离散相模型（DPM）相间耦合计算方法的正确性。

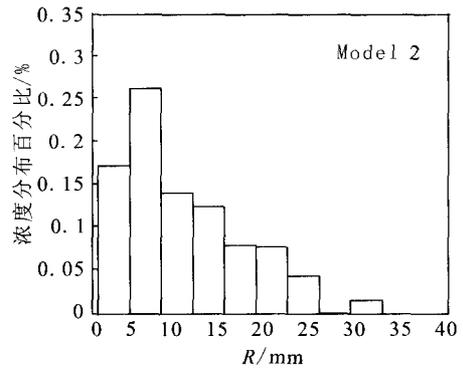
### 3 计算结果分析

图7给出了6种工况下外流场出口截面处离散相径向浓度分布百分比及轨迹。在粉末燃料供

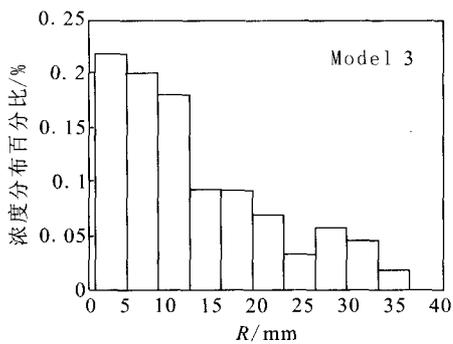
应系统的内流场中，浓度最高区域并不出现在轴线部分，离散相在轴线位置发生碰撞，使轴线处出现空白区域。这是由于考虑到流场的对称性，只进行了一半流场的模拟计算，节省了计算时间，但是在FIUENT中，默认离散相在轴对称边界上发生反弹，从而造成了轴线处出现空白区域。以下分析仅考虑扰流锥体对外流场离散相分布的影响。



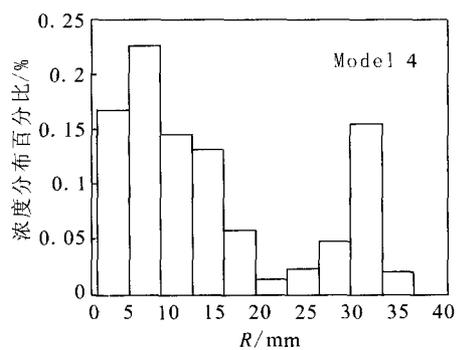
(a) Model 1



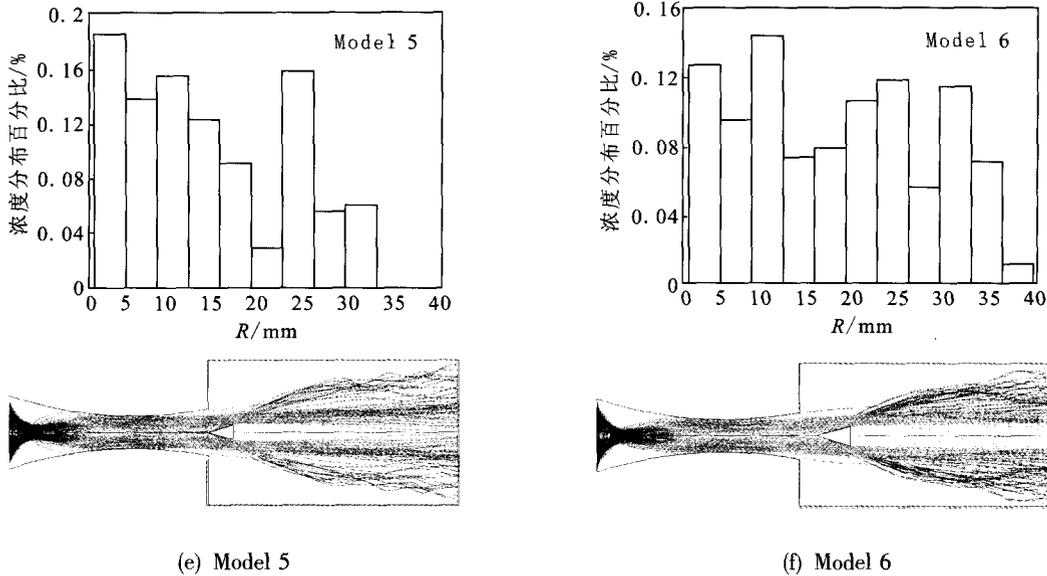
(b) Model 2



(c) Model 3



(d) Model 4



(e) Model 5 (f) Model 6  
 图 7 不同工况外流场出口截面处离散相径向浓度分布百分比及轨迹  
 Fig. 7 Radial distribution of dispersed phase particle concentration and tracks at exit of external flow field in different operating modes

3.1 扰流锥体型面对离散相分布的影响

由图 7 (a) Model 1 可以看出, 不加扰流锥体的情况下, 在外流场出口截面处, 离散相径向浓度分布百分比沿半径向外逐渐减小, 在半径较大区域处几乎为零, 但在轴线处离散相径向浓度分布百分比有所降低。这与韩超<sup>[4]</sup>所得的结论相似。

由图 7 (b) Model 2 可以看出, 在加入扰流锥体 A 的情况下, 离散相径向浓度分布百分比与 model 1 的情形类似, 但是离散相分布区域较 model 1 更加宽广, 离散相径向浓度分布百分比沿半径向外减小幅度降低, 在半径较大区域处离散相径向浓度分布百分比有所提高, 但在轴线处降低幅度增大。这是由于增加扰流锥体后, 轴部气流偏转, 轴部浓度较高的离散相颗粒撞击在扰流锥体斜面上改变了运动方向, 在气流的携带作用下迁移到离散相浓度较低的流场区域, 从而使离散相浓度趋于均匀; 由于湍流扩散和扰流锥体尾部回流区气流卷吸的作用, 部分离散相颗粒向轴部迁移, 使轴部离散相得到了补充。

由图 7 (c) Model 3 可以看出, 在加入扰流锥体 B 的情况下, 在外流场出口截面处, 远离轴部

流场区域的离散相径向浓度分布百分比均匀性较 model 2 的情况有所提高, 且分布区域增大, 但是靠近轴部区域离散相径向浓度分布百分比比较高, 整体离散相浓度分布均匀程度不如 model 2。这是由于具有流线外形的扰流锥体 B 使离散相轨道偏转角度不同, 在其头部撞击的离散相浓度高且轨道偏转角度较大, 离散相被播撒到远离轴部流场区域; 扰流锥体 B 的流线外形使轴部气流的偏转角度相对较小, 气流偏转对轴部离散相浓度分布影响较小。

由图 7 (d) Model 4 可以看出, 在加入扰流锥体 C 的情况下, 在外流场出口截面处, 离散相径向浓度分布百分比出现了沿轴部半径向外先降又升再降的情况。这是由于内凹的扰流锥体弧面使轴部气流和离散相偏转角度更大, 有些离散相颗粒甚至在扰流锥体上发生多次碰撞转向, 这使得离散相被转移到更远离轴线的区域, 从而造成在大半径区域的颗粒集中。

3.2 扰流锥体位置对离散相分布的影响

由图 7 (e) Model 5 和图 7 (b) Model 2 对比可以看出, 扰流锥体 A 向粉末流化喷管出口移动会促进外流场出口处半径较大区域处的颗粒浓

度提高。这是由于扰流锥体的前移会使更多的颗粒撞击扰流锥体,同时靠近粉末流化喷管出口处的混合气体速度高,这都有效地促进更多的离散相颗粒转移到半径较大的区域。但是扰流锥体的前移也会增大喷管的堵塞程度,对流场产生不利影响。

### 3.3 扰流锥体尺寸对离散相分布的影响

由图 7 (f) Model 6 和图 7 (b) Model 2 对比可以看出,加入扰流锥体 D 的情况下,在外流场出口截面处,离散相浓度分布更加均匀。这是由于扰流锥体尺寸的增大,使得在轴部碰撞扰流锥体的离散相颗粒增多,更多的离散相颗粒被转移到了离散相浓度较低区域,而在扰流锥体下游轴部,由于湍流和回流区的作用,被转移的离散相颗粒也可以得到补充。但是可以肯定,湍流和回流区的作用是有限的,随着扰流锥体尺寸的增大,必然会出现轴部颗粒浓度低于外围流场的颗粒浓度的情况。因此,对于特定的工况,在相应的轴部位置扰流锥体存在一个最佳尺寸,此尺寸与工况的关系还需深入研究。

## 4 结论

粉末燃料冲压发动机燃料供应装置设计的最终目的是实现粉末燃料的稳定、高效供应。粉末燃料在燃烧室内的掺混效果直接影响到后继的燃烧效果。本文通过数值模拟探讨了 4 种扰流锥体对粉末燃料离散相浓度场的影响效果,所得结论如下:

1) 在冲压发动机粉末燃料供应装置的粉末流化喷管的出口外流场增设扰流锥体,可以有效地改变外流场内离散相浓度分布特征,使气固两相在短距离内实现高效掺混;

2) 具有外凸曲面的扰流锥体有利于促进远离轴部区域离散相浓度的均匀分布;

3) 扰流锥体靠近流化喷管可以促进离散相浓度的均匀分布,但是要综合考虑对喷管阻塞和外流场的影响;

4) 对于特定的工况,在相应的轴部位置,扰流锥体存在一个最佳尺寸,合理的设计将有助于提高流场品质。

扰流锥体的设计要充分考虑其型面、位置、尾部回流区域和工况等因素对离散相浓度分布的影响。根据外流场对粉末燃料浓度场的要求可以设计相应的扰流锥体,控制外流场离散相浓度分布以实现粉末燃料稳定、高效地燃烧,提高发动机性能。

### 参考文献:

- [1] GOROSHIN S, HIGGINS A J. Powdered magnesium carbondioxide propulsion concepts for Mars mission, AIAA-99-2408[R]. USA: AIAA, 1999.
- [2] GOROSHIN S, HIGGINS A J, KAMEL M. Powdered metals as fuel for hypersonic ramjets, AIAA-2001-3919[R]. USA: AIAA, 2001.
- [3] 缪万波,夏智勋,郭健. 金属/水反应冲压发动机理论性能计算分析[J]. 推进技术, 2005, 26(6): 563-566.
- [4] 韩超,夏智勋,缪万波,等. 粉末冲压发动机燃料供应系统研究 [C]//中国航空学会航空动力分会火箭发动机专业委员会. 火箭推进技术学术会议文集. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [5] 韩超. 粉末冲压发动机燃料供应系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [6] 申慧君. 粉末燃料冲压发动机关键技术探索与研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [7] 李绍林. 两相悬浮体剪切流的理论和实验[M]. 北京: 科学出版社, 1985.

(编辑: 陈红霞)