

旋转条件下长尾喷管发动机三维两相流场数值模拟

严 聪, 何国强, 刘 洋

(西北工业大学 燃烧、流动和热结构国家级重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要:针对旋转条件下长尾喷管发动机的三维两相流场开展了一体化数值模拟,进行了旋转速度为 0、100 r/min、300 r/min、500 r/min 和 1 000 r/min,颗粒直径为 10 μm 、40 μm 、70 μm 和 100 μm 条件下颗粒运动轨迹和聚集浓度分布影响的研究。研究表明:①与无旋转条件下的颗粒运动轨迹以及聚集分布规律相比,在本旋转条件下,颗粒的运动历程增加,滞留时间增加,颗粒的聚集部位发生改变;②随着旋转速度增大,颗粒加入主流后首先贴着壁面作周向环绕运动,旋转速度越大,颗粒的旋转环绕轨迹越长,颗粒环绕运动的区域也随着旋转速度的增大而增大;颗粒所滞留的时间总体上是增大的;③随着颗粒直径的增大,由于颗粒本身运动惯性的增大,随流性变弱,受旋转作用影响的程度变差,滞留时间减小;④随着旋转速度的增大,锥台型装药壁面和后封头处的颗粒聚集浓度呈现增加趋势,翼槽表面的颗粒聚集带由翼槽顶部向根部移去,轴线处的颗粒聚集浓度随旋转速度增大而逐渐减弱。

关键词:固体火箭发动机;长尾喷管;两相流;数值模拟;旋转条件

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.05.003

中图分类号: V279 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)05-0010-06

由旋转产生的加速度对固体火箭发动机的工作过程会产生较大影响。由于离心力的作用,两相流的流动特性将发生变化,引起推进剂燃速显著增大、燃烧室压力升高、熔渣滞留、发动机壳体过热以及绝热层热负载增加等问题,从而使得固体火箭发动机环境更为恶劣,性能也发生重大变化^[1]。国内外在开展旋转发动机地面热试车时均出现过事故。高波等人^[2-3]对某大型固体火箭发动机在旋转条件下的内流场进行了数值模拟。张为华等人^[4]建立了星孔药柱发动机在旋转状态下工作过程仿真的物理模型和计算模型,采用全尺寸发动机进行了试验验证。张志峰等人^[5]建立了旋转条件下固体火箭发动机内三维两相流的数值模型,研究了不同的旋转加速度对固体火箭发动机中粒子运动轨迹以及聚集浓度的影响。王革等人^[6]计算了某管状装药旋转固体火箭发动机在不同旋转速度下的燃烧室喷管统一流场。

对于具有长尾喷管结构的发动机来说,旋转条件下的三维两相流动研究尚无文献报道,由于发动机内部的流动速度变化大,含铝复合推进剂燃烧产生的凝相颗粒在旋转条件下对发动机流动以及热防护的影响规律是不同的。本文基于 Euler-Lagrange 模型方程,开展了旋转条件下某长尾管发动机的三维两相流场计算,研究了不同旋转速度、不同颗粒直径对颗粒聚集浓度以及运动规律的影响。

1 计算模型

本文的数值模拟采用了 Fluent 软件,计算区域网格由 Gambit 软件生成。本文研究主要关注的是颗粒的运动和分布规律,因此将计算模型做适当的简化,不考虑化学反应,不考虑颗粒相的燃烧、蒸发、破碎过程,

* 收稿日期:2009-04-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50776073)

作者简介:严 聪(1962-),女,福建福州人,副教授,博士生,主要从事航空宇航推进理论与工程研究;

E-mail:yancong192@sohu.com

何国强(1962-),男,浙江慈溪人,教授,博士生导师,主要从事航空宇航推进理论与工程研究。

假设过程为定常流动,颗粒全部为 Al_2O_3 ,粒径为单一分布。

1.1 控制方程

气相控制采用雷诺平均 N-S 方程,加入湍流模型来封闭。控制方程可以写成如下的形式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{\rho} \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p - \nabla \left(\frac{2}{3} \rho k \right) + \nabla \cdot \sigma + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho I \mathbf{u}) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{J} + \rho \epsilon + \dot{Q} \quad (3)$$

式中: ρ 、 \mathbf{u} 、 p 、 I 分别为气体的密度、速度、压强和比内能; σ 为粘性应力张量; \mathbf{J} 是热通量项,包括热传导项和焓扩散项; $\dot{\rho}$ 、 \mathbf{F} 和 \dot{Q} 分别为由离散相造成的质量、动量和能量源项; k 、 ϵ 分别为湍动能和耗散率。

完全气体状态方程用能量形式表示为:

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho (\mathbf{u}^2 + v^2) \quad (4)$$

式中 γ 为气体的比热比。混合气体的比焓、比热比和比内能都是温度的函数。

1.2 湍流模型

采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, k 方程和 ϵ 方程为:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial (x_i)} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial (x_i)} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}^*}{k} \epsilon G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

1.3 物理模型

发动机结构形状和网格剖分见图1,计算区域包括整个流道,前段流道($0-1/4L$)为锥台型,中段($1/4L-2/5L$)为复杂翼槽,后段为长尾喷管,整个计算网格为17万左右。

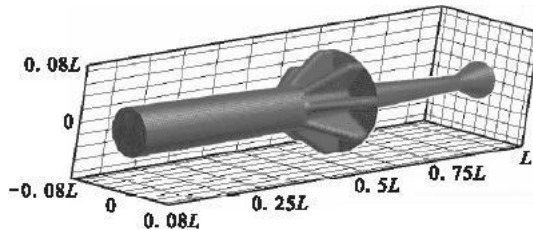


图1 发动机结构形状和网格剖分示意图

Fig. 1 SRM structure and mesh

1.4 边界条件

计算中喷管入口为亚音速入口条件,在边界上给定了流动的总压、总温、流动方向、颗粒的属性参数及湍流参数。压强出口边界用于定义出口的静压强。对于亚音速出口,边界压强用于确定出口压强;当流动出口是超音速时,边界条件确定的压强将忽略,而直接由内部求解结果外插得到。固体壁面采用绝热无滑移壁面边界条件,颗粒碰撞的切向和法向恢复系数均为0.8。计算中旋转加速度对颗粒的影响是通过对运动参考系来实现的。

1.5 有效性验证

利用上述计算模型,针对文献[7]中高过载地面模拟试验装置的绝热层烧蚀试验结果进行了比较,结果发现:高浓度粒子的冲蚀在试件表面形成了一个明显的凹坑,与两相流场数值计算对比发现,凹坑与高浓度颗粒聚集位置比较吻合,验证了计算方法的有效性。

1.6 网格相关性研究

本文针对网格和计算结果的相关性进行了研究,计算构型选取文献[7]中的地面实验装置作为研究对象,分别考察了不同网格类型和不同数量对计算结果的影响,图2给出了部分计算结果,计算结果表明:通道内部的流动对网格依赖性较低,颗粒轨迹保持不变,但是在壁面附近,粒子轨迹发生改变,说明壁面层网格对流动影响很大,在加密网格后得到改善。

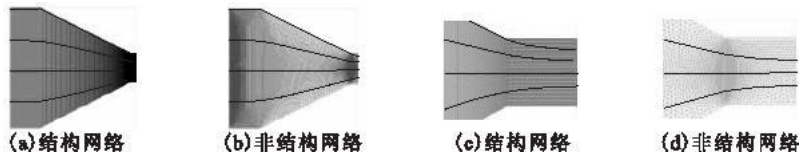


图2 不同网格条件颗粒运动轨迹

Fig. 2 Particle track under different mesh condition

2 计算结果及分析

本文针对长尾喷管发动机开展了一体化三维两相数值模拟,计算中旋转速度分别为 100 r/min、300 r/min、500 r/min 和 1000 r/min,颗粒大小分别为 10 μm 、40 μm 、70 μm 和 100 μm 。

2.1 有、无旋转条件下颗粒运动轨迹和聚集浓度分布比较

图3给出了无旋转条件和旋转条件下的典型颗粒运动轨迹比较。在无旋转条件下,颗粒从推进剂表面加入流道后,在燃气的作用下迅速向发动机轴线方向靠近,与壁面几乎不发生碰撞,在长尾喷管段加速后从喷管流出;在有旋转条件下,颗粒离开燃面后,在旋转作用下贴着推进剂表面作周向环绕运动,随着粒子速度的增大,旋转半径逐渐减小继续作螺旋运动,进入长尾段后由于颗粒速度很高,旋转对颗粒的作用已经变得很不明显。与无旋转条件对比,颗粒在整个流道中的运动增加,而且穿越了轴线,与壁面的碰撞增加,这对发动机的性能会有很大影响。



图3 颗粒运动轨迹

Fig. 3 Particle movement track

图4为无旋转和有旋转条件下翼槽以及后封头处颗粒聚集浓度分布的比较。无论有无旋转,颗粒在锥台处的聚集浓度分布是比较均匀的,长尾喷管段壁面上的颗粒聚集都不是很明显。在无旋转条件下,颗粒主要聚集在翼槽顶部和锥台型推进剂与翼槽根部的结合处;在有旋转条件下,颗粒聚集带的分布具有明显特征,沿着旋转方向聚集在翼槽面的一侧,而相对面则几乎没有沉积。从后封头处的聚集分布可以看出,无旋转条件时,在翼槽相对的位置,后封头上形成8个对称的颗粒聚集带;而在有旋转条件下,对称的颗粒聚集点向翼槽顶部偏移,形成了浓度较高的沉积带。

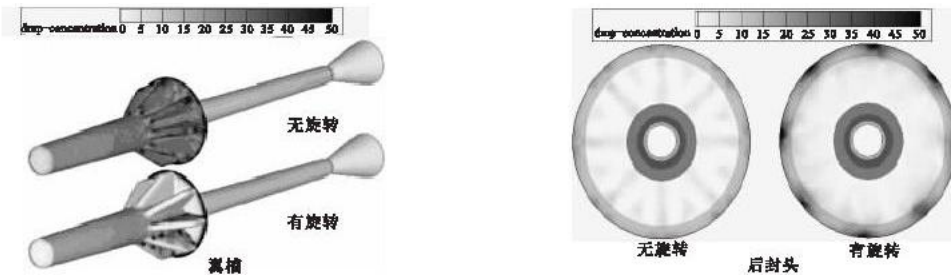


图4 颗粒聚集浓度分布

Fig. 4 Particle concentration distribution

2.2 不同旋转速度对颗粒运动轨迹的影响

图5和图6分别给出了颗粒直径为 10 μm 和 70 μm ,旋转速度分别为 100 r/min、300 r/min、500 r/min 和 1000 r/min 条件下颗粒的运动轨迹。从计算结果可以看出,无论颗粒直径大小,旋转速度不同时,颗粒的运动轨迹有着明显的差异;在旋转速度较低时,颗粒从燃面加入主流后轨迹受影响较小,刚加入时在旋转作用下作周向环绕运动,然后迅速沿轴线方向运动,且位置越靠上游的颗粒受影响程度越明显;随着旋转速度增大,颗粒加入主流后首先贴着壁面作周向环绕运动,旋转速度越大,颗粒的旋转环绕轨迹越长。颗粒环绕运动的区域也随着旋转速度的增加而增加。

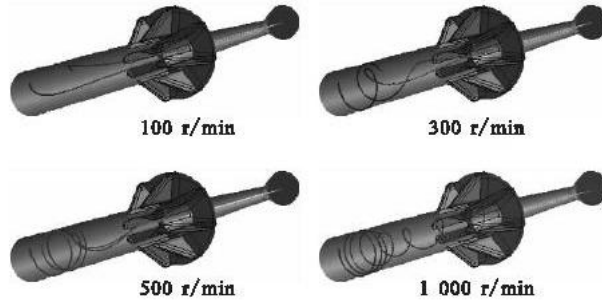


图5 不同旋转速度条件下的颗粒运动轨迹(颗粒直径 10 μm)

g.5 Particle movement track under different spinning velocity (particle diameter 10 μm)

另外,从计算结果可以看出,相同的旋转速度,不同直径颗粒的运动轨迹也是有差别的,主要表现在:随着直径的增加,由于颗粒本身运动惯性的增加,随流性变差,受旋转作用影响的程度变差。

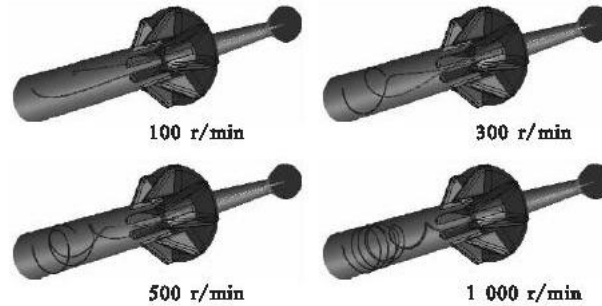


图6 不同旋转速度条件下的颗粒运动轨迹(颗粒直径 70 μm)

g.6 Particle movement track under different spinning velocity (particle diameter 70 μm)

表1给出了不同旋转速度、颗粒直径条件下的颗粒滞留时间,从表中可以看出,随着旋转速度的增加,颗粒的运动轨迹历程增加,所滞留的时间总体上是增加的;随着颗粒直径的增加,由于颗粒的随流性变差,颗粒受到旋转作用的影响没有小颗粒明显,因此滞留时间是减小的。

表1 不同旋转速度、颗粒直径条件下颗粒滞留时间

Tab. 1 Stagnation interval under different spinning velocity and particle diameter condition

旋转速度/(r · min ⁻¹)	滞留时间/s			
	10 μm	40 μm	70 μm	100 μm
100	0.043 2	0.043 4	0.034 7	0.027 9
300	0.047 9	0.045 8	0.035 9	0.028 6
500	0.048 4	0.047 6	0.036 8	0.029 5
1 000	0.049 0	0.048 7	0.038 2	0.029 9

2.3 不同旋转速度对颗粒聚集浓度的影响

图7给出了不同旋转速度条件下的颗粒聚集浓度分布云图。从计算结果可以看出,不同旋转速度条件下,发动机流道壁面上的颗粒聚集浓度分布是不同的;随着旋转速度的增加,翼槽侧面上的颗粒分布逐渐由翼槽顶部向根部移去,后封头上翼槽通道对应形成的高浓度聚集部位浓度逐渐增加,原来颗粒浓度最大聚集部位逐渐由翼槽侧面过渡到后封头位置。

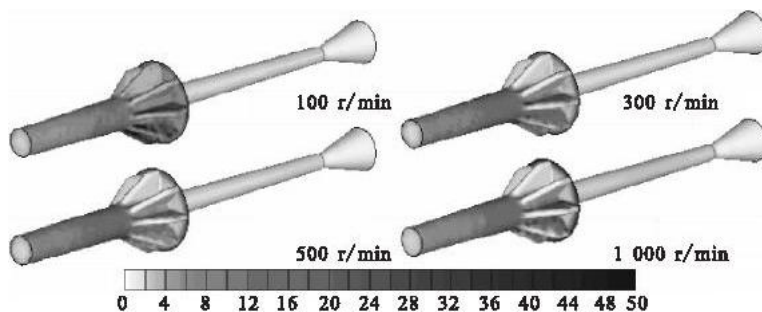


图7 不同转速条件下颗粒聚集浓度分布云图(10 μm)

ig.7 Particle concentration distribution under different spinning velocity (10 μm)

图8给出了不同旋转条件下流道对称面上的颗粒聚集浓度分布。从分布规律可以看出,颗粒主要在锥台型装药和翼槽型装药壁面、翼槽通道内和整个流道的轴线等3个部位形成了高浓度聚集带。随着旋转速度的增加,最明显的是流道轴线上颗粒聚集带的变化。在转速较低条件下(100 r/min),轴线上颗粒聚集浓度较大,分布较为明显,随着旋转速度的增加,颗粒受离心力的作用大,在轴线附近的运动趋势减弱,颗粒聚集浓度也减小,当旋转速度增加到一定程度时(1 000 r/min),长尾喷管段以前的流道中,颗粒几乎不在轴向方向运动,形成“无颗粒区”;另外,从计算结果可以看出,颗粒在进入长尾喷管时重新汇聚到轴向,但随着旋转速度的增加,汇聚点逐渐向下游方向移去。

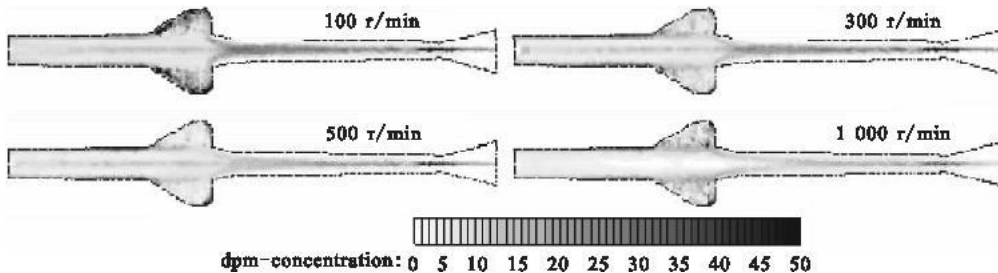


图8 不同转速条件下对称面颗粒聚集浓度分布云图(10 μm)

Fig. 8 Particle concentration distribution under different spinning velocity (10 μm)

图9和图10分别给出了不同旋转速度、不同颗粒直径条件下壁面聚集浓度曲线。从计算结果可以看出,在颗粒直径大小不变的条件下,随着旋转速度的增加,锥台型装药壁面的颗粒聚集浓度也是增加的,但增加幅度不大;后封头处的颗粒聚集浓度也是逐渐增加;在长尾喷管段,旋转速度为1 000 r/min条件下,喷管壁面的颗粒聚集浓度显著增加。在旋转速度不变的条件下,随着颗粒直径的增加,壁面上的颗粒聚集浓度呈现出减少的趋势。

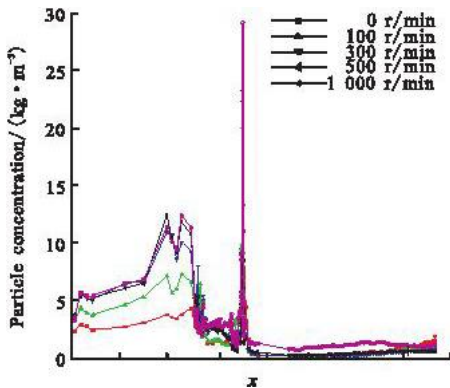


图9 不同旋转速度条件下壁面聚集浓度(40 μm)

Fig. 9 Particle concentration distribution along RM wall under different spinning velocity (40 μm)

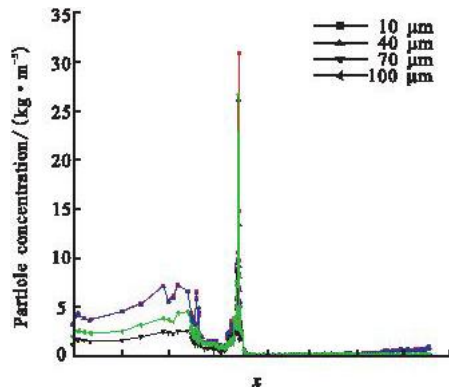


图10 不同颗粒直径条件下壁面聚集浓度(100 r/min)

Fig. 10 Particle concentration distribution along SRM all under different particle diameter condition (100 r/min)

3 结论

1)与无旋转条件下的颗粒运动轨迹以及聚集分布规律相比,在有旋转条件下,颗粒的运动历程增加,滞留时间增加,颗粒的聚集部位发生改变;

2)随着旋转速度增大,颗粒加入主流后首先贴着壁面作周向环绕运动,旋转速度越大,颗粒的旋转环绕轨迹越长;颗粒环绕运动的区域也随着旋转速度的增加而增大;颗粒所滞留的时间总体上是增大的;

3)随着颗粒直径的增大,由于颗粒本身运动惯性的增大,随流性变弱,受旋转作用影响的程度变差,滞留时间减小;

4)随着旋转速度的增大,锥台型装药壁面和后封头处的颗粒聚集浓度呈现增加趋势,翼槽表面的颗粒聚集带由翼槽顶部向根部移去;轴线处的颗粒聚集浓度随旋转速度增加而逐渐减弱。

参考文献:

- [1] 蔡国飙,田 辉.旋转对固体火箭发动机的影响[J].推进技术,1999,20(1):11—15.
CAI Guobiao, TIAN Hui. Spinning Effect on Solid Rocket Motor. [J] Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(1): 11—15. (in Chinese)
- [2] 高 波,叶定友,侯 晓.旋转固体发动机燃烧室燃气湍流流动数值模拟[J].推进技术,1999,20(6):23—28.
GAO Bo, YE Dingyou, HOU Xiao. Numerical Simulation of Turbulent Flow in the Combustion Chamber of A Spinning Solid Rocket Motor [J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(6): 23—28. (in Chinese)
- [3] 高 波,叶定友,侯 晓.旋转条件下固体火箭发动机燃烧室气—固两相湍流流动数值模拟[J].固体火箭技术,1999,22(3):6—10
GAO Bo, YE Dingyou, HOU Xiao. Numerical Simulation of Gas Particle Two Phase Turbulent Flows in the Combustion Chamber of A Spinning Solid Rocket Motor [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1999, 22(3): 6—10. (in Chinese)
- [4] 张为华,曹泰岳,冯海涛,等.星孔药柱旋转发动机工作过程数值模拟[J].航空动力学报,1996,11(1):72—74.
ZHANG Weihua, CAO Taiyue, FENG Haitao, et al. Numerical Simulation of Working Process in Star Grain Swirling Solid Rocket Motor [J]. Journal of Aerospace Power, 1996, 11(1): 72—74. (in Chinese)
- [5] 张志峰,蔡时敏.旋转条件下固体火箭发动机三维内流场数值模拟[J].固体火箭技术,2007,30(4):302—305.
ZHANG Zhifeng, CAI Timin. Numerical Simulation on 3D Internal Flow Field of SRM under Spinning Condition [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2007, 30(4): 302—305. (in Chinese)
- [6] 王 革,陈 亮,郜 冶,等.旋转对固体火箭发动机燃烧室燃气流动的影响[J].空气动力学学报,2008,26(2):208—212.
WANG Ge, CHEN Liang, GAO Ye, et al. Spinning Effect on the Flow of Exhaust Gas in Combustion Chamber of A Solid Rocket Motor [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(2): 208—212. (in Chinese)
- [7] 刘 洋.高过载固体发动机内流场模拟试验技术[D].西安:西北工业大学,2004.
LIU Yang. The Experimental Simulation Technique of Flow Field under High Acceleration Condition [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)

(编辑:姚树峰,徐敏)

Three Dimension Two Phase Flow Field Numerical Simulation on Tail—Pipe Nozzle SRM under Spinning Condition

YAN Cong, HE Guo—qiang, LIU Yang

(National Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermo—Structure, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Numerical simulations of three dimensions two—phase flow field of tail—pipe SRM under spinning condition are carried out. The differences of the particle trace and particle concentration along the wall of tail—pipe nozzle between the different diameters $10\ \mu\text{m}$, $40\ \mu\text{m}$, $70\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$ and different spinning velocities 0, 100 r/min, 300 r/min, 500 r/min, 1 000 r/min are studied. The results show that: ① In comparison with the particle movement trace and particle concentration distributing rule under the no—spinning condition, the particle movement path and time are increased and the change of particle movement rule is obvious under the spinning condition; ② With the increase of the spinning velocity, the movement path and area of particles and residence time are increased; ③ With the increase of the particle diameter, the particle residence time is shortened because the particle inertia has more effects than the trend to revolving effect; ④ With the increase of the spinning velocity, the particle concentration in surface of conocyl grain is increased, and the particle congregation area is transferred from the fin top to the root of finocyl grain. The particle concentration is reduced in axis of flow path with the increase of spinning velocity.

Key words: solid rocket motor; tail—pipe nozzle; two phase; numerical simulation; spinning condition