

纳米铁基金属燃料发动机喷管两相流特性数值模拟

王金云

(河北省双介质动力技术重点实验室, 河北 邯郸 056017)

摘 要: 针对纳米铁基金属燃料发动机技术, 建立颗粒燃烧模型与喷管两相流动控制模型, 基于 VC++ 软件自主编程, 对纳米铁基金属燃料发动机喷管内颗粒相速度、颗粒温度、颗粒粒径、质量传递速率、颗粒速度滞后、温度滞后、流体密度、压强、雷诺数、马赫数、气相速度、气相温度等参数进行模拟仿真, 重点研究了 $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 颗粒粒径和 $10\% \sim 40\%$ 凝相含量铁氧化物颗粒对发动机两相流损失的重要影响。结果表明, 凝相含量、颗粒粒径变化对颗粒温度滞后和速度滞后具有显著影响, 在凝相含量约为 30% 的情况下, 纳米铁粉金属燃料发动机达到了最佳的比冲性能。该研究可为新一代纳米铁基金属燃料发动机优化设计提供理论参考。

关键词: 纳米铁基金属燃料发动机; 喷管两相流特性; 数值模拟

中图分类号: V238 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2022)05-0029-09

Numerical simulation of two phase flow characteristics in nozzle of nano-iron-based metal fuel engine

WANG Jinyun

(Hebei Key Laboratory of Dual Medium Power Technology, Handan 056017, China)

Abstract: In view of the technology of nano-iron-based metal fuel engine, the particle combustion model and the nozzle two-phase flow control model were established in this study. Based on VC++ independent programming, the parameters in the nozzle of nano-iron-based metal fuel engine were analyzed, such as the particle phase velocity, particle temperature, particle size, mass transfer rate, particle velocity lag, temperature lag, fluid density, pressure, Reynolds number, Mach number, gas phase velocity, particle velocity, particle velocity lag and temperature lag. The important effects of $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ particle size and $10\% \sim 40\%$ iron oxide particles during the condensed phase on the two-phase flow loss of engine were mainly investigated. The results show that the changes of condensed phase content and particle size have significant effects on particle temperature lag and velocity lag. When the condensed phase content is approximately 30% , the nano-iron-based metal fuel engine achieves the best specific impulse perform-

收稿日期: 2021-06-12; 修回日期: 2021-11-05

基金项目: 中央引导地方科技发展资金(216Z4601G); 河北省科技厅重大科研支撑项目(16211013D); 河北省重点研发计划项目高端装备制造技术创新专项(21313501D)

作者简介: 王金云(1978—), 男, 博士, 研究员, 研究领域为金属燃料发动机技术。

ance. This study can provide a theoretical reference for the optimal design of a new generation of nano-iron-based metal fuel engine.

Keywords: nano-iron-based metal fuel engine; two phase flow characteristics of nozzle; numerical simulation

0 引言

纳米铁粉^[1-3]由于活性强、点火温度低、燃烧热值高、铁氧化物可还原重复再利用等优点,在未来可替代石油、天然气、煤炭等不可再生石化能源,可用于船舶、空间飞行器的能源动力,也可用于边远山区能源发电,是一种很有发展前景的新型燃料,近年来备受关注。

未来作为空间飞行器的能源替代品,纳米金属铁粉是一种较为理想的选择。但是当前的大多数研究成果集中在铝粉、镁粉和铝镁合金推进剂研究,对纳米铁粉金属燃料发动机技术研究尚属空白。根据先前的报道,国内外学者以及国内少数院校专注于金属铁粉的燃烧特性研究^[4-9]。尽管文献[1-3]预言未来汽车的燃油必将被金属铁粉所取代,但还存在一些关键技术亟待解决,如发动机燃料燃速控制技术、颗粒尺寸最优控制、金属燃料供给技术和燃烧产物回收技术等需要考虑。纳米铁粉由于其特殊的优势,可用于未来跨介质飞行器空间高速推进系统,尤其是高金属含量的纳米铁粉金属燃料发动机,具有更高的能量密度和比冲性能,其颗粒稳态燃烧技术及发动机喷管两相流损失控制对开展发动机优化设计和提高发动机性能具有极其的重要意义。

开展发动机喷管两相流动特性研究是其优化设计的理论基础和当前研究的热点课题之一^[10-16]。如 Hwang 等基于欧拉和拉格朗日方法对固体火箭发动机两相流进行了数值分析,与现有的方法相比,该方法较好地解决了两相流控制模型复杂边界问题^[10]。Sachdev 等研究了基于并行自适应网格技术的固体火箭发动机气固两相流控制方程,结果表明,该方法有效提高了模型解算精度^[11]。Ali 等基于欧拉数值方法研究了发动机喷管两相流收缩率,并通过改进喷管几何形状,提高了发动机的工作效率^[16]。从当前的研究成果来看,对于纳米铁基金属燃料发动机喷管两相流动特性的研究尚未见到相

关的报道。鉴于此,本文针对高金属含量(金属含量 80%以上)纳米铁基氧反应金属燃料发动机系统优化设计问题,重点讨论纳米铁基金属燃料燃烧性能及发动机喷管两相流动特性。

1 两相流控制模型

金属燃料燃烧和发动机两相流动情况是十分复杂的^[16-17],特别是在燃烧室中,产物的流动与金属燃料的燃烧过程密切相关,当推进剂在燃烧室燃烧时,燃烧产物在通道中的流动具有加质流动、非定常、非一维、耦合、两相流动及化学反应等显著特征。两相间不但存在质量传递、热量传递和动量传递,而且颗粒表面上各点的传质、传热和动量传递均不相同;气流绕颗粒流动,在每个颗粒表面都有附面层,而且附面层有从层流变为湍流的转捩和分离,颗粒后面还有尾流,属于非常复杂的三维运动;另外,不同尺寸颗粒附近的气流流动均不相同,而且颗粒间还有碰撞、聚合和破碎等现象。

为便于理论研究,根据颗粒连续方程、动量守恒和能量守恒气固两相流基本方程,对复杂流动现象进行简化,并作如下假设:①推进剂的燃烧和新生成的燃烧产物的加入均在瞬时完成;②燃烧产物均为理想气体,它们之间无摩擦、无黏性,化学组分和热力学性质完全一致,新燃烧产物沿燃面的外法线方向加入主流;③主流燃烧产物的流动是一维流动;④忽略或简化燃速与压强和流速的耦合作用。

考虑到颗粒在喷管内产生破碎、蒸发、团聚,其质量、大小、温度是不断变化的,应充分考虑这些因素对发动机比冲的影响,计算模型为^[18-19]

$$\begin{cases} v_m = 2\pi r_p Sh \rho_\infty D \ln(1+B) \\ \frac{d(d_p^2)}{dt} = -\frac{4Nu\lambda}{\rho_p c_p} \ln(1+B) \\ m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \pi d_p Nu \lambda (T_g - T_p) \ln(1+B)/B - G_m q_e \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_m 为颗粒燃速 (即质量传递速率); m_p 为颗粒质量; D 为扩散系数; r_p 为颗粒半径; ρ_g 为气相密度; λ 和 c_p 分别为气相热传导系数和气体定压比热; Sh 为沙伍德数; q_e 为热流量; B 为斯波尔丁质量传递数, 表达式为

$$B = \frac{Y_{p,s} - Y_{p,\infty}}{1 - Y_{p,s}} \quad (2)$$

式中: $Y_{p,s}$ 为颗粒表面的燃料质量分数; $Y_{p,\infty}$ 为无限远处燃料质量分数。

根据 Ranz-Marshall 公式, 有

$$\begin{aligned} Nu &= 2 + 0.6Re^{0.5}Pr^{0.33} \\ Sh &= 2 + 0.6Re^{0.5}Sc^{0.33} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_g \frac{dv_g}{dx} + V_g \frac{d\rho_g}{dx} &= -\frac{\rho_g v_g}{A} \frac{dA}{dx} + \rho_g W_{bg} \frac{S_b}{A \cos \theta} + \sum_{k=1}^n \rho_{pk} \omega_k \\ \rho_g v_g \frac{dv_g}{dx} + \frac{dp}{dx} &= (W_{bg} \sin \theta - v_g) \rho_g W_{bg} \frac{S_b}{A \cos \theta} - \sum_{k=1}^n \rho_{pk} (v_g - v_{pk}) \omega_k - \frac{\rho_g v_g^2 f S}{2A} - \sum_{k=1}^n \rho_{pk} A_{pk} (v_g - v_{pk}) + \rho_g \mathbf{g}_i \cdot \mathbf{i} \\ v_g \frac{dv_g}{dx} + C_{pf} \frac{dT_g}{dx} &= \frac{1}{\rho_g v_g} \left\{ (H_{gs} - h_g - \frac{v_g^2}{2}) \rho_g W_{bg} \frac{S_b}{A \cos \theta} + q_s \frac{S_b}{A \cos \theta} + \sum_{k=1}^n \left[(h_{pk} - h_g - \frac{v_g^2}{2} + \frac{v_{pk}^2}{2}) \rho_{pk} \omega_k - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \rho_{pk} B_{pk} (T_g - T_{pk}) - \rho_{pk} A_{pk} v_{pk} (v_g - v_{pk}) + \rho_{pk} q_k^{(g)} \omega_k \right] + \rho_g v_g \mathbf{g}_i \cdot \mathbf{i} \right\} - \sum_{k=1}^n \frac{h_k \sigma_k}{\rho_g v_g} \\ \rho_{pk} \frac{dv_{pk}}{dx} + v_{pk} \frac{d\rho_{pk}}{dx} &= -\frac{\rho_{pk} v_{pk}}{A} \frac{dA}{dx} + \rho_{pk} W_{bpk} \frac{S_b}{A \cos \theta} - \rho_{pk} \omega_k \\ v_{pk} \frac{dv_{pk}}{dx} &= (W_{bpk} \sin \theta - v_{pk}) W_{bpk} \frac{S_b}{A \cos \theta} + A_{pk} (v_g - v_{pk}) + \mathbf{g}_{pk} \cdot \mathbf{i} \\ v_{pk} \frac{dh_{pk}}{dx} &= (H_{ps} - h_{pk} - \frac{v_{pk}^2}{2} - v_{pk} W_{bpk} \sin \theta) W_{bpk} \frac{S_b}{A \cos \theta} + q_k^{(p)} \omega_k + B_{pk} (T_g - T_{pk}) \\ T_{pk} &= f(h_{pk}) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中: A 为喷管通道截面积; S_b 为通道周长; θ 为喷管侧面与轴向夹角; ω_k 为颗粒质量释放速率; f 为喷管壁面摩擦因数; \mathbf{i} 为喷管轴向单位矢量; C_{pf} 为气相冻结定压比热; A_{pk} 和 B_{pk} 为颗粒流控制参数, $A_{pk} = \frac{9}{2} \frac{\mu}{\rho_{mp} r_p^2} f_p$, $B_{pk} = \frac{3\mu C_{pg}}{\rho_{mp} r_p^2 Pr} g_p$; v_p 、 ρ_p 、 v_g 、 ρ_g 分别为颗粒相速度、颗粒密度、气相速度、气相密度; μ 和 C_{pg} 分别为气相黏性系数和定压比热; h_{pk} 为单位质量颗粒物质焓; T_{pk} 、 T_g 、 p 分别为颗粒温度、气体温度、压强; ρ_{mp} 和 r_p 分别为颗粒物质密度和颗粒半径; f_p 和 g_p 分别为颗粒阻力系数和对流传热系数函数。

基于两相流控制模型, 采用四阶龙格-库塔-基尔法, 应用 VC++ 软件自主编程, 方程迭代步长

式中 Nu 、 Pr 、 Re 、 Sc 分别为努塞尔数、普朗特数、雷诺数、斯密特数。

实际上颗粒尺寸在喷管内不断变化, 两相流与环境间存在传热现象, 颗粒与气体之间存在传热、传质情况, 气相中存在化学反应, 喷管壁面存在摩擦等, 在此基础上求解两相流动数学模型通常是数值的和复杂的。基于四阶龙格-库塔-吉尔法 VC++ 软件自主编程求解两相流微分方程组方法, 方程具有迭代精度高 (可达到商用软件同等计算水平)、收敛速度快、模型参数自由选取、快速获得喷管内流场参数等优点, 可满足当前金属燃料发动机工程设计需要。模拟颗粒燃烧的两相流控制方程为^[20]

0.000 1 m, 软件设计流程图如图 1 所示。

模型计算从发动机喷管入口一直计算到出口, 边界条件为在喷管入口处, $x=0$ 时, $T_{pk} = T_g$, $v_g = v_{pk}$, 根据质量守恒方程, $\dot{m}_g = \rho_g v_g A = \text{const}$, $\dot{m}_p = \rho_{pk} v_{pk} A = \text{const}$, 给定初始流量 (流量确定可根据金属燃料推进剂燃速、氧燃比而定), 求得喷管入口边处滞止压强、滞止密度等, 根据二相流控制模型, 利用四阶龙格-库塔-吉尔法求解, 具体解算流程如图 1 所示。

另外, 在方程求解过程中, 充分考虑了颗粒的相变, 由于温度的降低, 铁氧化物有可能从液相转变为固相, 相变阶段, 物质的密度也是不同的; 另外, 由于温度的影响, 颗粒的密度、粒径、质量传递速率、质量释放速率等参数均发生显著变化, 这些

参数的取值均不是固定的,在计算过程中是动态变化的,这样较为客观地反映铁氧化物颗粒在喷管内的真实流动情况。

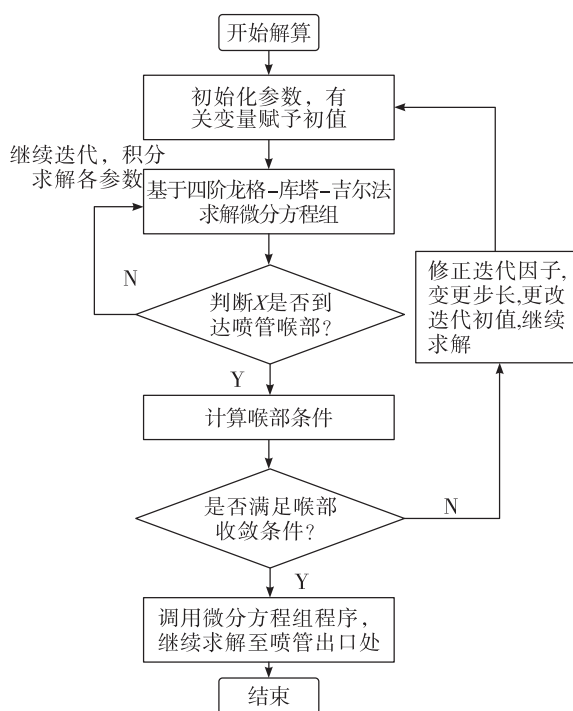


图1 VC++ 软件流程图

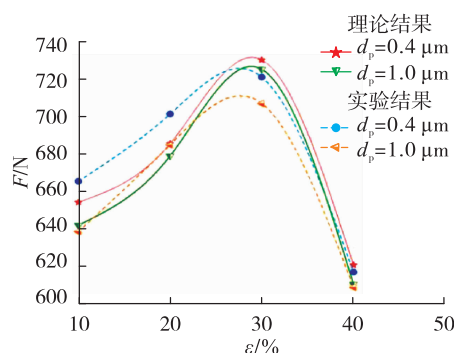
Fig.1 Flow chart of VC++ software

2 模拟仿真

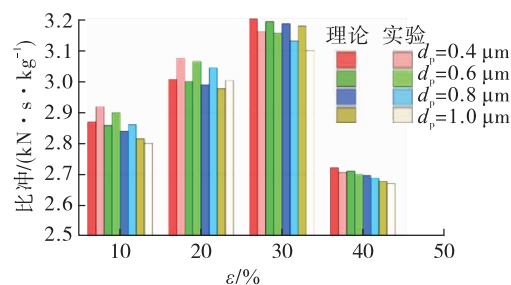
2.1 边界条件

通过数值模拟与实验研究的方法探索纳米铁粉氧反应金属燃料发动机喷管两相流比冲影响因素。发动机系统实验主要由点火装置、燃烧室(外径50 mm×300 mm,内径30 mm)、喷管、进气阀、温度传感器、压力传感器等部分组成;燃料主要包括纳米铁粉(粒径50 nm,由2~3 nm厚的碳层包覆,防止被氧化)、氧化剂高氯酸铵(AP)、黏合剂(HT-PB)、催化剂及其他成份,金属药柱尺寸为25 mm×150 mm,由特殊的工艺制备而成;点火装置由12 V电源组成,确保可靠点火。温度与压力传感器实时获取燃烧室温度和压力数据,同时保证压力维持在5 MPa;进气阀主要功能是实现供氧量的控制(氧燃比大约3.8,氧气流率约为0.244 kg/s),实验中氩气保证燃烧室压力维持在5 MPa。通过发动机推力实验与比冲测试,颗粒粒径变化范围为0.4~1.0 μm,颗粒质量流量分数约为30%时,发动机比

冲达到最优,约为3 100 N·s/kg,实验与理论比较结果如图2所示,本文通过对喷管内参数分布规律的研究,从理论上进行深入探讨。



(a) 颗粒质量流分数与发动机推力的关系



(b) 颗粒质量流分数与比冲的关系

图2 颗粒质量流分数与发动机推力、比冲间的关系

Fig.2 Relationship between particle mass flow fraction and engine thrust and specific impulse

数值模拟几何边界条件:喷管喉部半径 r_t 、收缩半角 α 、扩张半角 β_0 分别为7.51 mm、14.9°、44.2°,喷管侧面倾角 θ 为12°。物理边界条件:两相流混合比热 k_m 为1.32,气体定压比热 c_p 为1 864 J/(kg·K),滞止压强 p_0 和温度 T_{g0} 分别为5.0 MPa和3 850 K,颗粒粒径 d_p 范围为0.4~1.0 μm,凝相含量 ε 变化范围为10%~40%,喷管壁面摩擦系数 f 约为0.08,普朗特数 Pr 约为0.75。模型初始参数依据实验条件而定。

2.2 喷管内颗粒性能参数变化

由于温度的影响,颗粒在喷管内发生相变,颗粒的尺寸、质量传递速率、质量释放速率、颗粒的密度、颗粒速度等参数均发生显著变化,这些因素的变化需在发动机两相流控制方程中予以考虑,本文给出了喷管内颗粒粒径、质量传递速率、颗粒速度等主要性能参数的变化曲线,颗粒质量释放速率为颗粒传递速率与颗粒质量比值,变化趋势与质量传递速率类似,在此不再讨论,颗粒密度为变化值,在

式(4)解算过程中予以考虑。

图3显示了喷管内颗粒参数的分布,包括颗粒传质速率、尺寸和速度变化。如图3(a)所示,由于颗粒的凝结、破碎和聚集以及温度的降低,颗粒的质量传递速率在喷管的喉部有着显著变化,颗粒尺寸在整个喷管内由 $0.95\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。图3(b)给出了 $d_p=0.4\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$ 随不同凝相含量 ε 的速度分布。凝相含量变化对喷管内颗粒速度分布具有显著的影响;一定凝相含量下,颗粒尺寸变化对颗粒速度的影响较弱,对于不同凝相含量和颗粒粒径,颗粒速度在喷管喉部发生急剧变化,在喷管出口处,颗粒速度 v_p 具有明显的变化。当 $\varepsilon=30\%$ 时, $d_p=0.4\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$,颗粒出口速度 v_p 可达到 $3\text{ }200\text{ m/s}$; $\varepsilon=40\%$ 时,喷管出口处 v_p 反而骤然下降,只有 $2\text{ }400\text{ m/s}$ 左右,造成这种结果的主要原因是颗粒凝相含量过高,导致颗粒速度滞后非常严重。

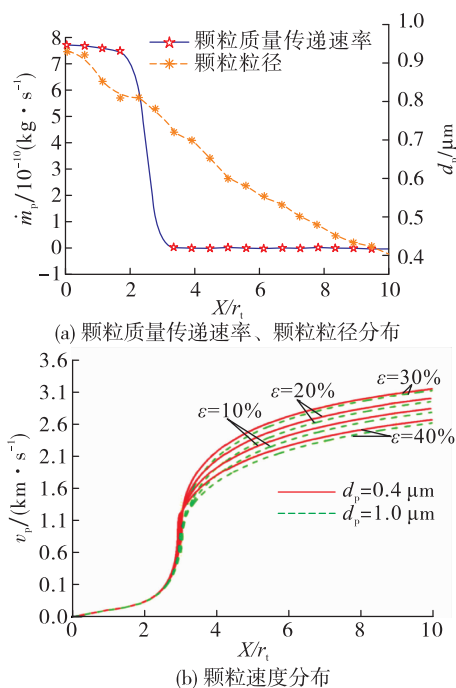


图3 喷管内颗粒参数分布

Fig. 3 Parameters distribution of particles in nozzle

2.3 颗粒尺寸与凝相含量对颗粒温度和速度滞后的影响

凝相含量的大小与金属燃料推进剂燃速、氧燃比有关,通过控制推进剂燃速,达到对燃烧产物凝相含量的优化控制。受温度影响,颗粒尺寸在不断变化,颗粒质量释放速率、质量传递速率、颗粒密度等参数均发生显著变化,在二相流控制方程中相关

参数取值将是动态变化的,而非恒定值,客观上反映了喷管内气固两相流真实流动情况。

图4给出了颗粒速度滞后分布与粒径及凝相含量的关系。结果表明,在凝相含量 $\varepsilon=10\%$, d_p 由 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 时,速度滞后的峰值增加了近50%;而当 $\varepsilon=30\%$ 时,速度滞后几乎增加了5倍。

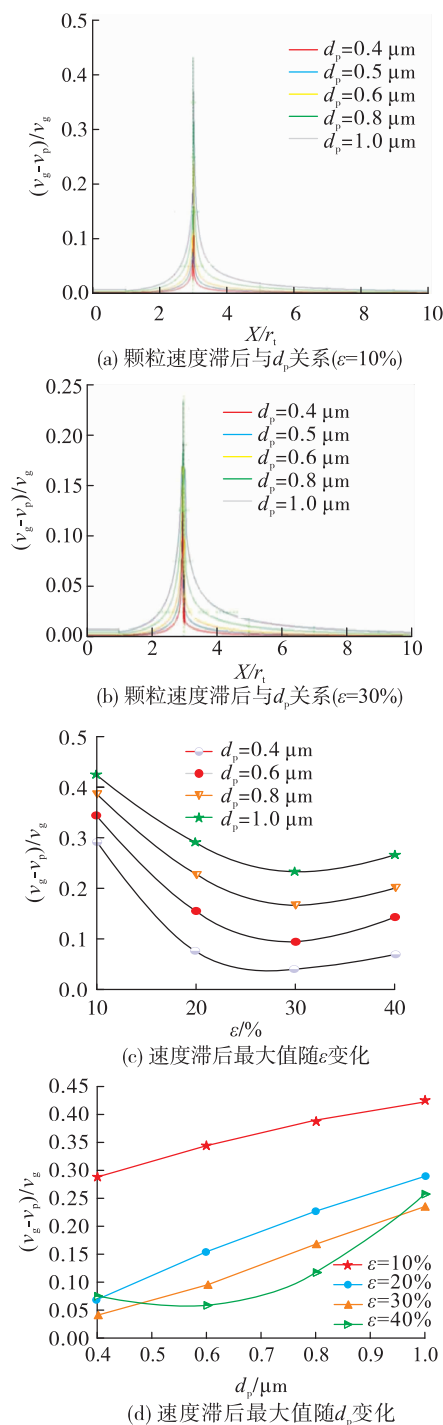


图4 颗粒速度滞后变化趋势

Fig. 4 Variation of particle velocity hysteresis

同样地,温度滞后峰值(如图 5 所示)在 $\varepsilon = 10\%$ 时增加 25.9%,在 $\varepsilon = 30\%$ 时增加 76%。在特定 ε 下, d_p 对速度滞后及温度滞后具有显著影响, d_p 越大,两相流速度与温度滞后越严重,两相流比冲损失越大。

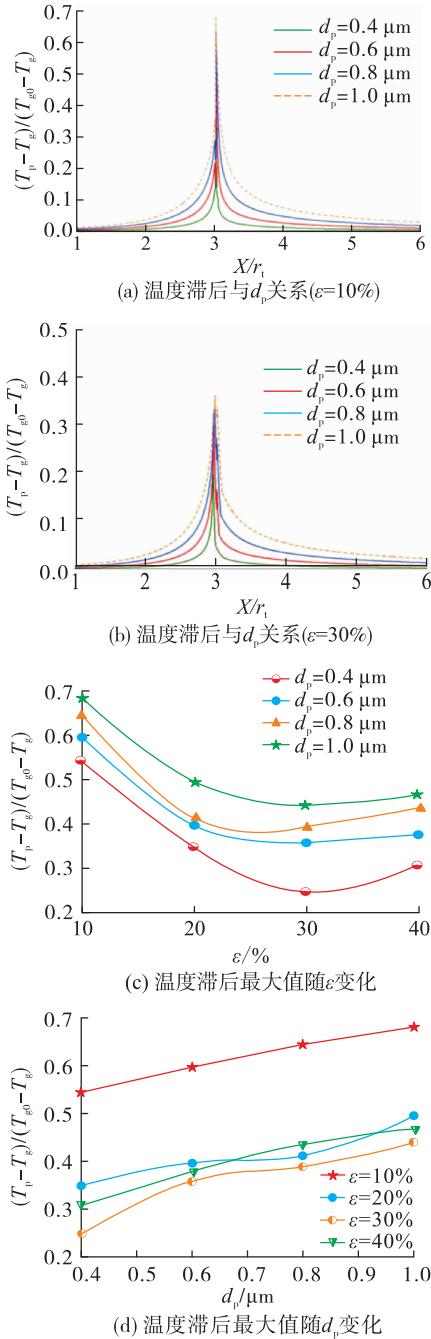


图 5 颗粒温度滞后变化趋势图

Fig. 5 Variation of particle temperature hysteresis

ε 的变化对颗粒速度滞后及温度滞后影响更为显著, d_p 一定时,随着 ε 增加,速度滞后与温度滞后

减少。然而,当 $\varepsilon = 40\%$ 时,速度滞后与温度滞后反而逐渐增大,主要原因是随着氧燃比的增加,燃烧室中的温度和压力都持续上升,从而导致喷管内颗粒的动能增加,此外,较小的颗粒也更有助于减少比冲损失。但随着氧燃比持续不断地增大,燃烧室温度和压强达到相对高的稳定值,过多的凝相含量导致喷管内颗粒严重停滞,造成颗粒速度与温度滞后增加,加剧了发动机比冲损失。

2.4 喷管内其他参数的变化

图 6 模拟了喷管内颗粒雷诺数的分布情况,从图 6(a) ~ 图 6(d) 可以看出在一定凝相含量下,颗粒粒径在 $0.40 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围变化时,颗粒雷诺数在喷管喉部变化非常明显,在 $\varepsilon = 20\%$, $d_p = 1.0 \mu\text{m}$ 时,最大颗粒雷诺数 Re 接近 8; $d_p = 0.40 \mu\text{m}$ 时,最大 Re 约为 1,随着 d_p 的增加, Re 依次增大。在喷管喉部之外其他部分, Re 均小于 1,可认为是 Stokes 流。相反地,在喷管喉部,由于氧化铁颗粒发生相变(基本上为液态, Fe_2O_3 熔点只有 1 839 K,相比较 Al_2O_3 熔点 2 315 K 低了很多)、团聚、阻塞等原因,颗粒与气体之间的速度滞后严重, Re 显著增加。随着 ε 增加, Re 在喷管喉部分布较为明显,整体上差异不明显。

图 7 模拟了喷管内气相密度的分布情况。结果表明,喷管内气相密度从喷管入口处一直到喷管出口处,处于递减趋势。随着喷管内温度、压强的降低,气体密度也逐渐减少。 d_p 变化对喷管内气相密度影响作用非常弱,在喷管喉部之前,流体密度变化非常剧烈,在通过喉部之后,流体密度变化趋于平缓。 $\varepsilon = 10\% \sim 40\%$ 时,气相密度有一定的变化。总体而言, d_p 与 ε 对气相密度影响作用较小。

图 8 模拟了喷管内气体压强的变化,从图中可以看出, d_p 变化对喷管内气体压强变化影响不明显,随着 ε 的变化,喷管内压强分布在喷管附近发生轻微变化,在喷管喉部之后,气体压强发生陡然下降,总体上压强从喷管入口处一直到喷管出口处逐渐减小,在喷管出口大约为 0.12 MPa 左右。与流体密度分布类似, d_p 与 ε 变化对喷管内压强影响作用不明显。

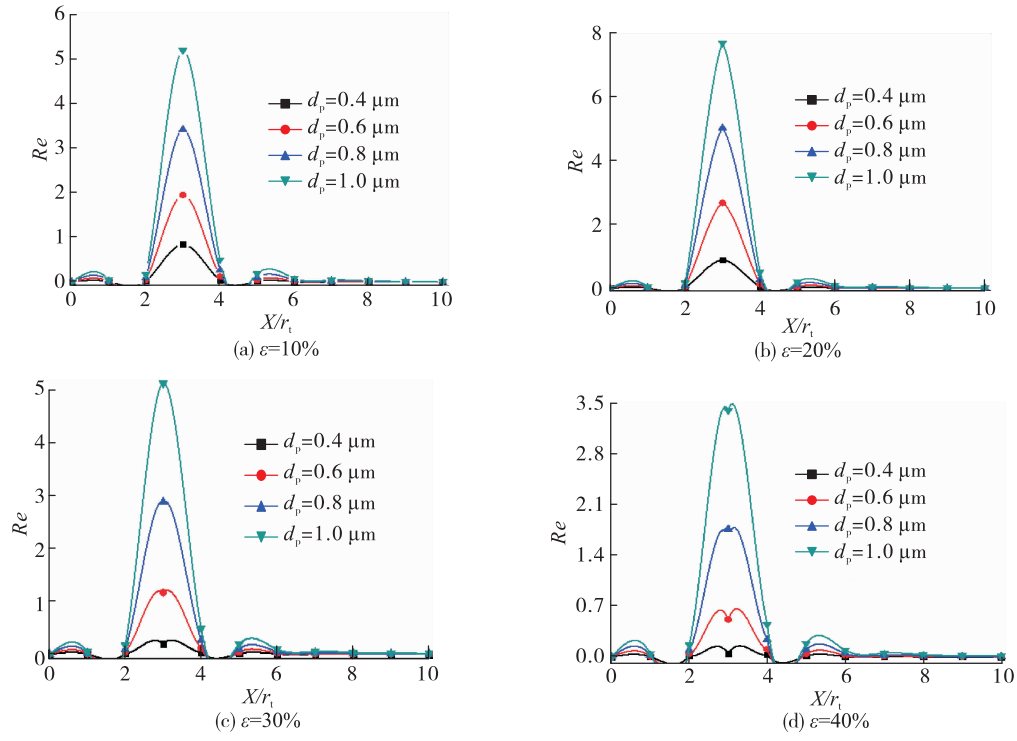


图6 喷管内颗粒雷诺数的分布
Fig.6 Distribution of Reynolds number of particles in nozzle

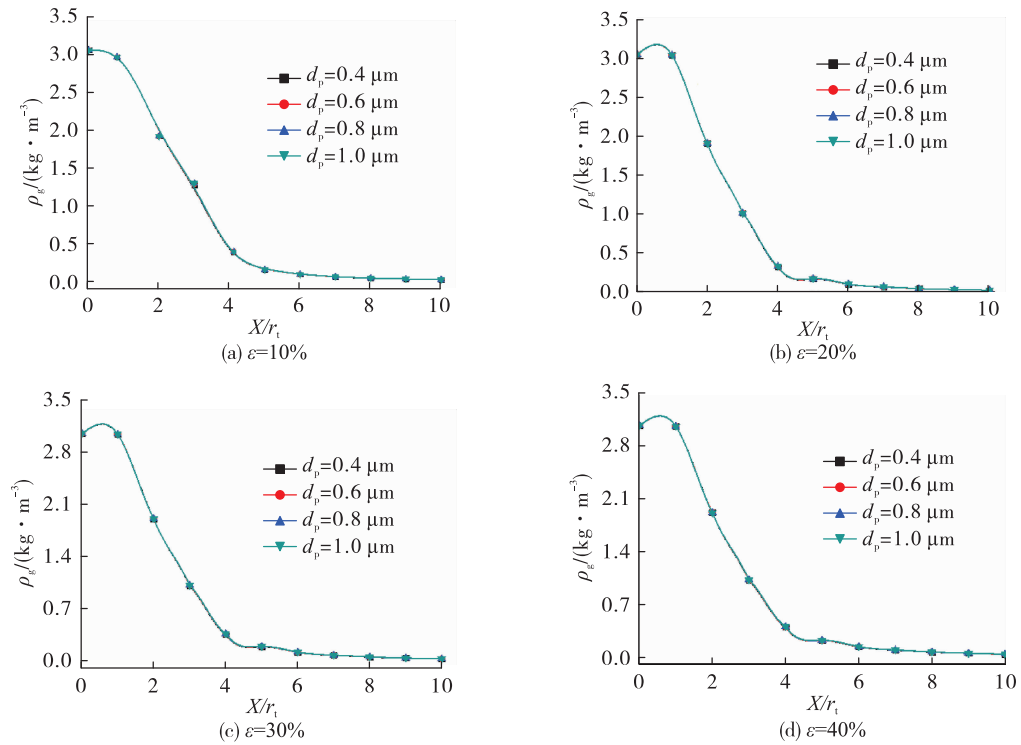


图7 喷管内气相密度的分布
Fig.7 Distribution of gas density in nozzle

图9模拟了喷管内流体马赫数 Ma 的分布情况, $d_p = 0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 对 Ma 影响较小, 而 ε 对喷管出口超音速段 Ma 影响较大, ε 为 10 % 时, 喷管

出口处最大 $Ma = 3.0$, $\varepsilon = 20\%$ 时, $Ma = 2.7$, $\varepsilon = 30\%$ 时, $Ma = 2.55$ 。随着 ε 增加, 最大马赫数减小。

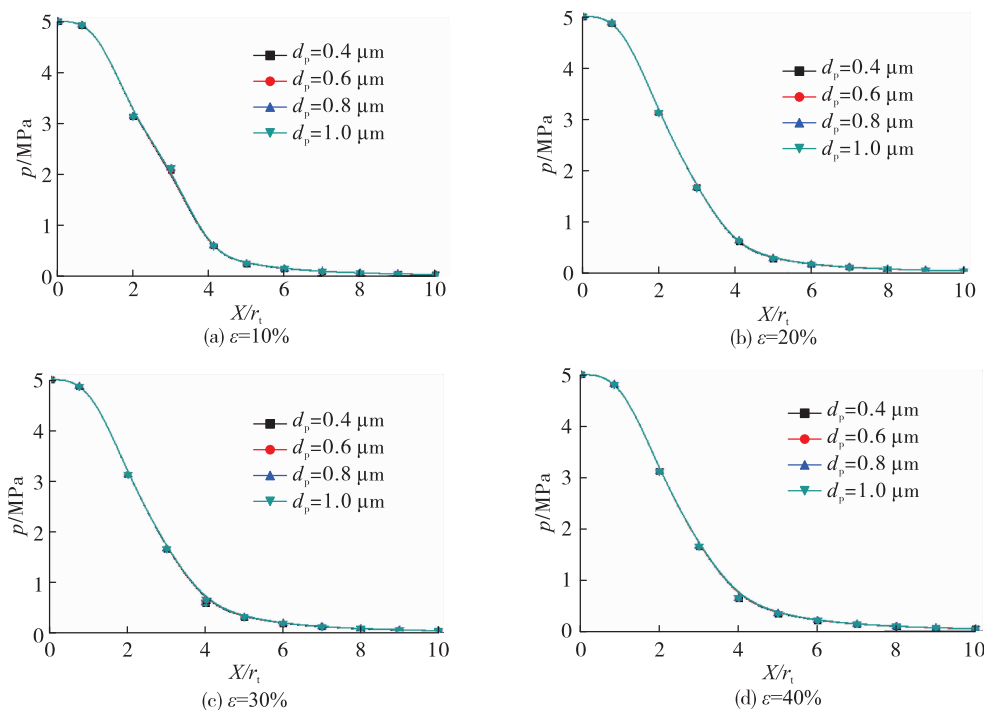


图8 喷管内压强的分布

Fig.8 Distribution of nozzle pressure

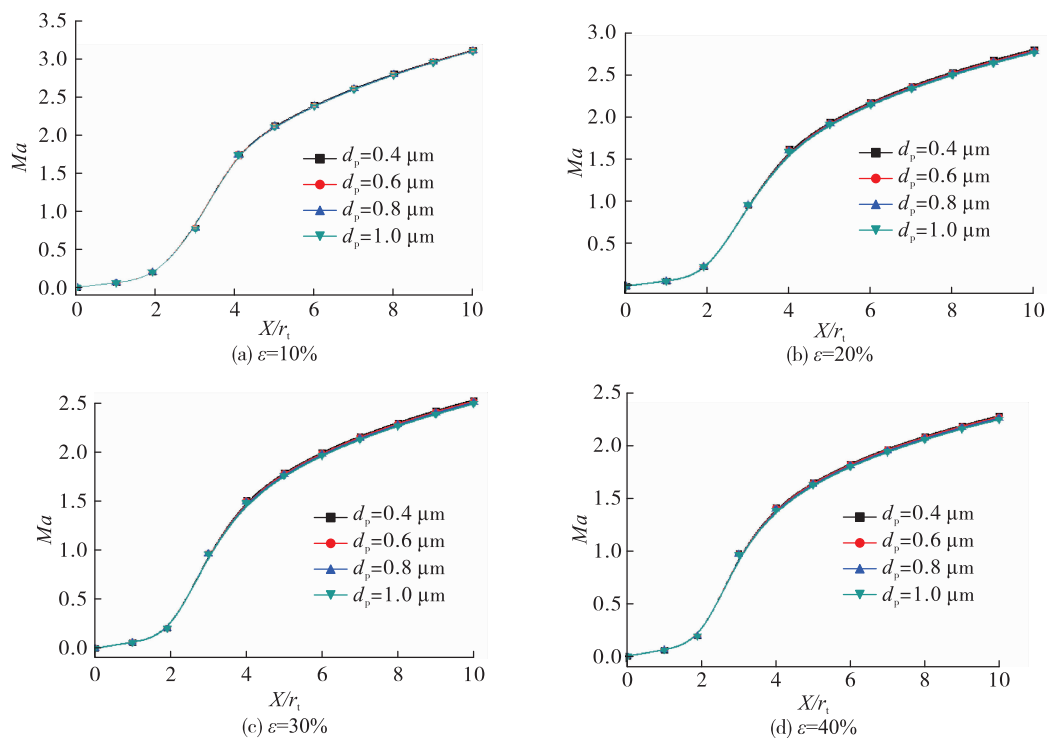


图9 喷管内马赫数变化

Fig.9 Mach number variation in nozzle

综上所述,氧反应纳米铁基金属燃料发动机喷管两相流动也受多种因素影响,如喷管内压强分布、流体密度分布、颗粒雷诺数分布、颗粒温度分布、气相温度分布、颗粒速度分布、气相速度分布、颗粒粒径分布、马赫数分布等,通过数值模拟仿真,结果表明,凝相含量、颗粒粒径变化对颗粒温度滞后和速度滞后的影响非常显著,对其他特性如喷管内压强分布、流体密度分布、颗粒雷诺数分布则不十分明显,可不予重点考虑。由于纳米铁粉颗粒复杂的化学反应和氧化铁颗粒相与气相间的传质传热过程,颗粒尺寸与凝相含量对颗粒速度和温度滞后的影响已不能忽略,它们是影响两相流损失的主要因素。

3 结论

1) 颗粒粒径对纳米铁基金属燃料发动机喷管两相流损失具有非常显著的影响,在一定凝相含量下($\varepsilon = 30\%$), d_p 从 $0.4\ \mu\text{m}$ 增加到 $1.0\ \mu\text{m}$ 时,速度滞后几乎增加了 5 倍,温度滞后峰值增加了 76%。

2) 颗粒凝相含量对纳米铁基金属燃料发动机喷管两相流损失影响显著,在一定粒径下($d_p = 0.4\ \mu\text{m}$), ε 在 $10\% \sim 40\%$ 范围内变化,颗粒速度滞后、温度滞后变化幅度分别为 83% 和 45%。

3) 喷管内颗粒雷诺数受颗粒尺寸、凝相含量变化的影响相对较大,在 $\varepsilon = 20\%$ 、 $d_p = 1.0\ \mu\text{m}$ 时,最大颗粒雷诺数 Re 接近 8; $d_p = 0.40\ \mu\text{m}$ 时,最大 Re 约为 1。

参考文献:

- [1] 史帝芬. 金属燃料[J]. 资源与人居环境, 2011(4): 40-41.
- [2] BEACH D, SUMPTER B G. Running on iron: Metal nanoparticles show promise as future fuels[J]. Oak Ridge National Laboratory Review, 2006, 39: 26.
- [3] BEACH D B, RONDINONE A J, SUMPTER B G, et al. Solid-state combustion of metallic nanoparticles: New possibilities for an alternative energy carrier[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2007, 129(1): 29-32.
- [4] JULIEN P, WHITELEY S, GOROSHIN S, et al. Flame structure and particle-combustion regimes in premixed methane-iron-air suspensions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 2431-2438.
- [5] WEN D S, SONG P X, ZHANG K, et al. Thermal oxidation of iron nanoparticles and its implication for chemical-looping combustion[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2011, 86(3): 375-380.
- [6] MANDILAS C, KARAGIANNAKIS G, KONSTANDOPOULOS A G, et al. Study of oxidation and combustion characteristics of iron nanoparticles under idealized and enginelike conditions[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(5): 4318-4330.
- [7] 杨丽, 朱燕群, 王智化, 等. 微纳米金属铁粉的燃烧特性试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(8): 1562-1566.
- [8] 何丹丹, 金晶, 路遥, 等. 纳米铁粉燃烧特性研究[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(1): 88-92.
- [9] 高文静, 金晶, 曾武勇. 纳米铁粉的燃烧动力学模型研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(33): 9808-9812.
- [10] HWANG C J, CHANG G C. Numerical study of gas-particle flow in a solid rocket nozzle[J]. AIAA Journal, 1988, 26(6): 682-689.
- [11] SACHDEV J, GROTH C, GOTTLIEB J. Parallel solution-adaptive scheme for multi-phase core flows in rocket motors[C]//16th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2003: 4106.
- [12] TSURU W, UENO S, KINOUE Y, et al. Comparison of one-dimensional analysis with experiment for CO_2 two-phase nozzle flow[J]. Open Journal of Fluid Dynamics, 2014, 4(5): 415-424.
- [13] PIROOZIAN A, HEMMATI M, ISMAIL I, et al. An experimental study of flow patterns pertinent to waxy crude oil-water two-phase flows[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 164: 313-332.
- [14] PELUCHON S, GALLICE G, MIEUSSENS L. A robust implicit-explicit acoustic-transport splitting scheme for two-phase flows[J]. Journal of Computational Physics, 2017, 339: 328-355.
- [15] TEIXEIRA R G D, SECCHI A R, BISCAIA E C. Differential-Algebraic numerical approach to the one-dimensional Drift-Flux Model applied to a multicomponent hydrocarbon two-phase flow[J]. Computers & Chemical Engineering, 2017, 101: 125-137.
- [16] ALI H, KIM K W, KIM J S, et al. Numerical study on the effects of contraction ratio in a two-phase flow injection nozzle[J]. Open Journal of Fluid Dynamics, 2016, 6(1): 1-10.
- [17] RISHA G A, CONNELL T L, YETTER R A, et al. Combustion of frozen nanoaluminum and water mixtures[J]. Journal of Propulsion and Power, 2013, 30(1): 133-142.
- [18] LI J, ZHANG J. Analytical study on char combustion of spheroidal particles under forced convection[J]. Powder Technology, 2017, 313: 210-217.
- [19] SAHA M, DALLY B B, MEDWELL P R, et al. Effect of particle size on the MILD combustion characteristics of pulverised brown coal[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 155: 74-87.
- [20] 方丁酉. 两相流动力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1988.