

文章编号:1000-8055(2011)06-1209-06

不同湍流模型对旋涡流动的数值模拟

冯喜平, 赵胜海, 李进贤, 曹 琪

(西北工业大学 航天学院 燃烧、流动与热结构国家级重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 针对某型旋流器, 基于 Navier-Stokes 方程, 湍流模型分别选择 renormalization group(RNG) $k-\epsilon$ 模型和 Reynolds stress model(RSM)模型, 采用计算流体力学方法对旋流器内部旋流流场进行数值模拟, 通过对计算结果的分析以及与试验结果的比较, 进行了旋涡流动数值模拟中湍流模型的适应性研究. 研究表明: 由于 RNG $k-\epsilon$ 模型建立于 Boussinesq 涡旋黏性假设基础上, 无法考虑涡旋黏性的各向异性, 也无法描述湍流能量转化为平均运动能量的传递过程, 因此涡旋流动模拟结果与试验结果差别较大; 而 RSM 模型能够克服上述问题, 涡旋流动模拟结果与试验结果较为接近, 模拟结果能反映出旋流的基本特征. RSM 模型适用于旋涡流场的数值计算.

关 键 词: 旋流流动; 湍流模型; 数值模拟; 适应性研究; 粒子图像测速仪测量

中图分类号: TK224

文献标志码: A

Numerical simulation of swirling flow with different turbulent models

FENG Xi-ping, ZHAO Sheng-hai, LI Jin-xian, CAO Qi

(National Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermostructure,
School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To certain type swirl setting, the swirling flow field of swirl setting interior was simulated based on Navier-Stokes equations by using computational fluid dynamics (CFD) method with renormalization group (RNG) $k-\epsilon$ and Reynolds stress model (RSM) turbulence model, respectively. By analyzing the simulation results and comparing them with the experiment results, the turbulence model's applicability research in swirling flow numerical simulation was performed. Research shows that: the results of swirling flow simulation differ a lot from the experiment results, because RNG $k-\epsilon$ turbulence model is based on the Boussinesq eddy-viscosity hypothesis, which couldn't consider the anisotropy of eddy-viscosity nor describe the transport process of turbulence energy transformation to average movement energy. Thus, RSM turbulence model could conquer the problems and consist with the experiment results, and the simulation results reflect the characteristics of swirling flow. RSM turbulence model is applicable to swirling flow numerical simulation.

Key words: swirling flow; turbulence model; numerical simulation;
applicability study; particle image velocimetry measurement

旋涡流动是最常见的流体运动形式, 许多工程装置, 如旋流燃烧室、旋风燃烧炉、旋风分离器、旋流喷注器等内部燃气流动均为湍流涡旋流动,

由于其本身的复杂性, 对旋涡流动的研究已成为流体力学中重要的研究课题^[1]. 目前, 数值模拟方法是研究旋涡流动规律的有效途径. 在对旋涡流

收稿日期: 2010-05-10; 修订日期: 2010-11-26

基金项目: 航天科技创新基金(重点支持项目)

作者简介: 冯喜平(1963—), 男, 陕西渭南人, 副教授, 博士, 主要从事火箭发动机燃烧和流动方面的研究.

场进行数值模拟时,湍流模型的选择是研究者经常遇到的难题.不同的湍流模型将反应不同流动特征,其选择的是否合理将直接影响旋涡流场计算结果的准确性与精度^[2].为解决湍流模型选择的困难,有必要对旋涡流动中湍流模型的适用性进行研究.

古红霞和周力行^[3-4]提出了一种非线性 $k-\epsilon-k_p$ 两相湍流模型,可以合理地模拟各向异性较强的旋流、浮力流等两相流动,该模型保持了二阶矩模型(USM)的优点,同时比二阶矩模型简单.孙锐等人^[5]开展了旋流燃烧器的单相冷态试验,并采用 $k-\epsilon$ 双方程模型和二阶矩雷诺应力模型(DSM)对旋流器出口的强旋流场进行了比较分析,结果显示 DSM 模型可准确体现出湍流雷诺应力非均匀各向异性的特点.陆耀军等人^[6-8]的研究结果表明 DSM 模型的预报结果最为合理,不仅对切向速度分布的兰金组合涡结构和轴向速度分布的近轴回流区做出了较合理的预报,而且揭示了雷诺应力各向异性的特性,DSM 模型在计算突扩流动分离区和湍流输运各向异性较强的流动时具有很好的模拟能力.

本文以冷态下旋流器中的气流流动为研究对象,基于计算流体动力学(CFD)方法对其内部流场进行数值模拟,湍流模型分别选择 RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ 模型和 Reynolds 应力模型(RSM)^[9-10],通过对计算结果和试验结果的分析比较,开展旋涡流场数值模拟中湍流模型的适用性研究,为旋涡流动分析提供依据.

1 旋流器试验装置与测量方法

旋流器试验装置为底端封闭上端开口的圆柱形结构,材料选用透光的有机玻璃,其结构见图 1 所示.靠近出口处开有 12 个环形切向空气入口,如图 2 所示.试验中,选择烟雾空气为工作介质,

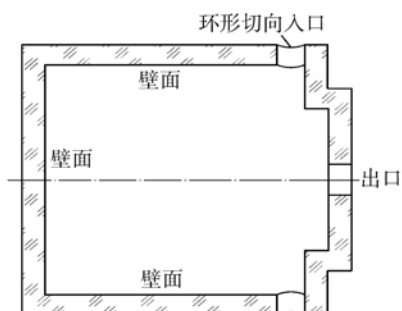


图 1 旋流器结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of swirl setting

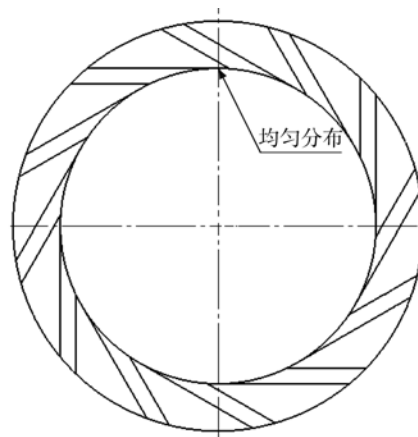


图 2 环形切向入口示意图

Fig. 2 Sketch of annular tangential entrance

烟雾空气由环形切向入口喷入试验器,在试验器中形成典型的旋涡流动.

旋流器内部流动通过粒子图像测速仪 (particle image velocimetry, 简称 PIV) 测量^[11-12], 试验测量系统如图 3 所示. PIV 方法是近年来迅速发展起来的一种非接触、瞬时、动态、全场的速度场测量技术,是流动显示技术的一种发展. PIV 方法主要用于各种流场的全场速度矢量测量,测量时在流动介质中加入跟踪粒子,跟随流动介质一起运动,PIV 通过测得跟踪粒子的速度矢量来定量显示整个流场的流动特征,并利用成像设备记录下时间间隔为 Δt 的两幅图像,测量两幅图像中同一粒子的位移,进而得出速度信息. 试验测量中,位移要求足够小,使得 $\Delta x/\Delta t$ 是速度 U 很好的近似,即粒子运动轨迹应该接近直线,并且沿着轨迹的速度应近似恒定. 然后采用照相机直接将片光源截面的流场图像输入到计算机图像处理系统中,通过相应的图像处理方法,从而测量出具体的速度分布.

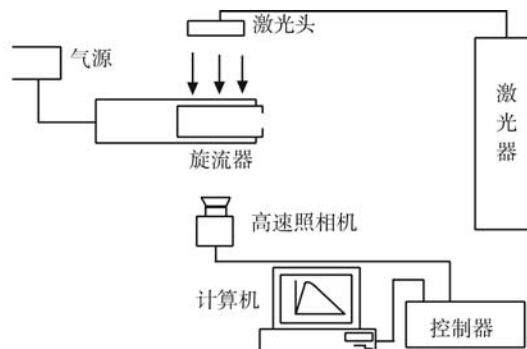


图 3 试验测量系统简图

Fig. 3 Diagram of test and measurement system

2 涡旋流动的数学描述

2.1 控制方程

本文将旋流器环形切向入口简化为环形切向缝,则旋流器几何结构呈二维轴对称分布,这样,气体的流动可简化为轴对称旋转流动,即气流没有周向梯度,但可能存在非零的周向速度.由于旋流器内气流速度相对较低,可假设燃气不可压,所建立的气体流动控制方程为^[13]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u v) = \\ & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ r \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right] \right\} + \\ & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right], \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v v) = \\ & -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] + \\ & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right] \right\} - \\ & 2 \mu \frac{v}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \rho \frac{v^2}{r}, \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho u \omega) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \omega) = \\ & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \frac{\partial \omega}{\partial x} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\omega}{r} \right) \right] - \rho \frac{v \omega}{r} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \underbrace{\frac{\partial(\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial t}}_{\text{瞬态项}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho \overline{u'_k u'_i u'_j})}{\partial x_j}}_{C_{ij}\text{-对流项}} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + \overline{p' u'_i \delta_{kj}} + \overline{p' u'_j \delta_{ik}})}_{D_{t,ij}\text{-湍流扩散项}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right]}_{D_{l,ij}\text{-分子扩散}} - \\ & \underbrace{\rho \left[\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right]}_{P_{ij}\text{-剪应力产生项}} - \underbrace{\rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta})}_{G_{ij}\text{-浮力产生项}} + \underbrace{\overline{p' \left[\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right]}}_{\Phi_{ij}\text{-压强应变项}} - \\ & \underbrace{2 \mu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k}}_{\epsilon_{ij}\text{-黏性耗散项}} - \underbrace{\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \epsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \epsilon_{jkm})}_{F_{ij}\text{-系统旋转产生项}} \end{aligned} \quad (4)$$

湍动能 k 和耗散率 ϵ 方程如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ & \frac{1}{2} (P_{ij} + G_{ij}) - \rho \epsilon (1 + 2 Ma_t^2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & C_{1\epsilon} \frac{1}{2} (P_{ij} + C_{3\epsilon} G_{ij}) \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 x 是坐标轴, r 是径向坐标, u 是轴向速度, v 是径向速度, ω 是旋涡速度.

2.2 湍流模型

RNG $k-\epsilon$ 模型来源于严格的统计技术,它与标准 $k-\epsilon$ 模型很相似,但是有一定的改进,使用 RNG $k-\epsilon$ 模型比标准 $k-\epsilon$ 模型在流动模拟中具有更高的精度和可信度.在忽略浮力的影响下,湍动能与耗散率方程如下^[14]:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon - Y_m \quad (2) \\ & \rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - \\ & C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中 G_k 表示由于平均速度梯度产生的湍流动能; Y_m 代表在总的耗散率中,可压缩流动中脉动膨胀所作的贡献; μ_{eff} 为有效黏度; α_k 和 α_ϵ 分别是湍动能 k 和耗散率 ϵ 的有效湍流普朗特数的倒数.

由于湍流旋流本身的复杂性,建立于 Boussinesq 涡旋黏性假设基础上的各种两方程模型无法考虑涡旋黏性的各向异性和无法描述湍流能量转化为平均运动能量的传递过程,难于考虑旋转流动及流动方向表面曲率变化的影响. Reynolds 应力模型克服了这些缺点,对 Reynolds 应力模型中的湍流脉动应力直接建立微分方程式并进行求解. Reynolds 应力输运方程如下所示^[14]:

式(4)~式(6)中 ϵ_{ijk} 是转换符号(alternating symbol)或者称为排列符号, P_{ij} 是剪应力产生项, G_{ij} 是浮力产生项, μ_t 是湍流动力黏度, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$, Ma_t 是湍流马赫数, $Ma_t = \sqrt{k/a^2}$.

2.3 网格划分

采用结构化网格进行计算.为消除出口边界的选取对旋流器内部流场的影响,在旋流器出口

外取一较大区域(附加区域)和旋流器内部共同构成计算区域.同时,由于靠近轴线的中心区域与压力、速度等剧烈变化的核心强迫涡的位置对应,因此,对中心区域的网格进行加密处理.旋流器内部网格划分如图4所示,旋流器内部区域网格总数为17852.

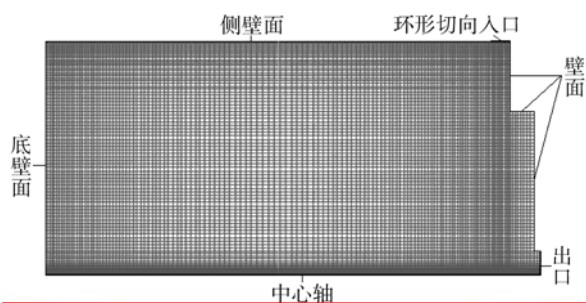


图4 旋流器内部网格划分

Fig. 4 Grids of physical model in swirl setting

2.4 边界条件

1) 环形切向入口边界:对旋涡流场进行冷态试验时,为了使流体能切向流入燃烧室,入流应有一定的径向速度.计算与试验中环切向入口速度为0.8 m/s,按照百分比输入切向分量0.8134,径向分量-0.1866,气体入口温度为环境温度.

2) 出口边界:即附加区域的边界,选择自由出流边界,出口流动符合完全发展条件.

3) 壁面选择无滑移壁面边界,采用标准壁面函数来简化处理近壁结点.

4) 轴线上选择轴对称边界条件.

3 计算结果及分析

旋流器中气体的运动规律为:气体从环形入口以一定切向和法向速度喷入后,从横截面来看,由于圆周表面的影响,气体围绕对称轴做圆周运动,形成涡流;从纵截面来看,由于出口壁面的阻挡,大部分气体将向容器底部运动,小部分气体则沿后部表面从出口流出.向后流动的气体受底部作用在容器后部转而向前流动,这股气体中的大部分将向前从出口流出,其余小部分则在压力作用下向后流动,这样气体在容器中部沿对称轴形成对称状涡流.在涡旋器底部中心区域,由于流动的对称性,形成对称的小涡.旋流器纵截面流场结构如图5所示.

通常情况下,实际的旋涡流场为:在旋涡运动中心为准强迫涡的涡核(切向速度随涡核半径线性增大),涡核外部则是准自由涡的组合涡运动形

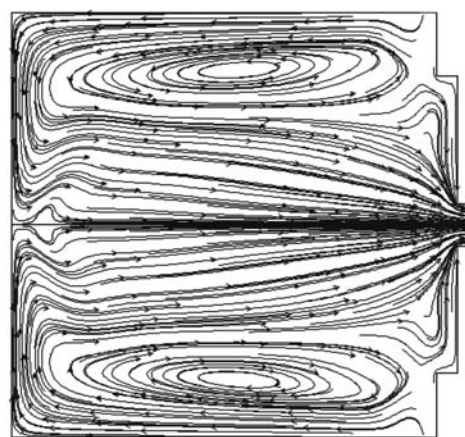


图5 采用RSM模型计算的流线图

Fig. 5 Chart of stream line using RSM model

态(切向速度随涡核半径的倒数线性增大),Rankine组合涡就是这种真实旋涡的一个简单又形象的近似.图6为组合涡的速度分布特征^[13].由于旋流器旋涡流场中的旋涡特征主要是由切向速度分布来体现,因此本文重点分析切向速度的变化规律.分别选择旋流器沿轴向0.25,0.50,0.75倍旋流器长度的截面为特征截面进行数值模拟,对应计算结果中的位置1~位置3.

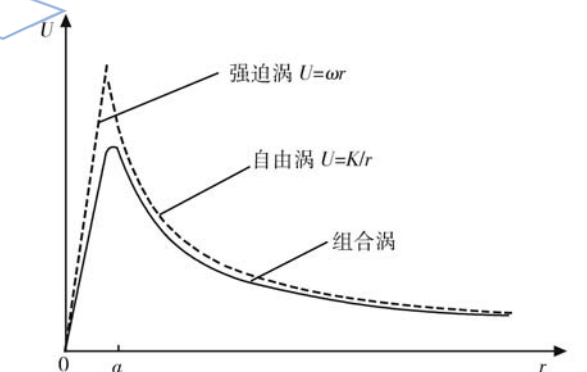


图6 组合涡的速度分布

Fig. 6 Velocity distribution of combined eddies

图7为采用RSM模型计算的不同截面上切向速度沿径向的分布情况.图8为采用RNG $k-\epsilon$ 模型时的计算结果.比较可知,采用RSM湍流模型计算出的切向速度分布,明显呈现出外层准自由涡、内层准强迫涡的Rankine组合涡分布,符合实际旋涡流动的理论分析;而采用RNG $k-\epsilon$ 模型时的计算结果中完全夸大了中心强迫涡的范围,也没有形成准自由涡形态,不呈现Rankine组合涡的特征.

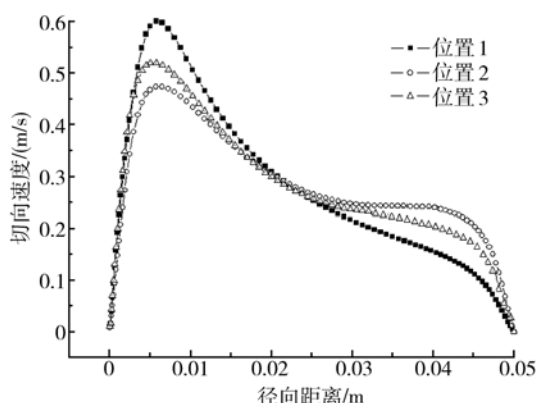
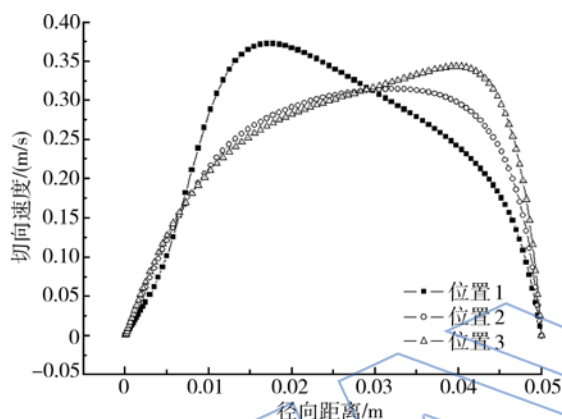


图7 采用RSM模型的计算结果

Fig. 7 Results of RSM model

图8 采用RNG $k-\epsilon$ 模型的计算结果Fig. 8 Results of RNG $k-\epsilon$ model

冷流试验中,针对距离旋流器底部0.25倍旋流器长度的特征截面(位置1)进行测量,图9是冷流PIV试验测量出的切向速度分布与计算结果的对比图。试验中,共采集了三组数据,由于不同时刻的湍流脉动效应,因此三组数据之间存在一定的差别。从图中可以看出,试验数据的分布反映出旋流呈现外层准自由涡、内层准强迫涡的Rankine组合涡分布特征。对比计算结果与试验结果可知,RSM模型计算结果与试验结果较为接近,也能反映出旋流的基本特征;而采用RNG $k-\epsilon$ 模型时的计算结果与试验结果差别较大。

应指出的是,尽管RSM模型有潜在的较好模拟旋涡流动的优势,但存在计算量远大于其他两方程模型的缺点,从提高旋涡模拟流动的精度出发,考虑计算机技术的发展,采用RSM模型模拟涡旋流动更为合适。

4 结论

本文针对旋流器开展了冷态下旋流器内流场

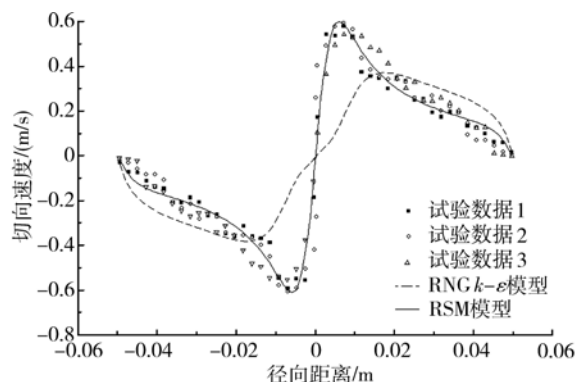


图9 试验结果与计算结果对比图

Fig. 9 Comparison of test and computation results

数值研究。通过不同湍流模型流场计算结果分析,以及与试验结果的对比分析,发现:由于RSM模型的Reynolds应力计算采用高阶的偏微分方程实现,克服了两方程湍流模型无法考虑涡旋黏性的各向异性和无法描述湍流能量转化为平均运动能量的传递过程的缺点,对复杂流动有更高预测的潜力,较RNG $k-\epsilon$ 模型能够更合理地描述旋涡流场特征,涡旋流动的模拟结果与试验结果也较为接近。研究对涡旋流动数值模拟中的湍流模型选择有一定参考。

致谢:

试验数据来自西北工业大学航天学院孙得川副教授开展的旋流器冷流试验,特在此说明并表示感谢!

参考文献:

- [1] 张涵信. 分离流与旋涡运动的结构分析[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [2] 张楠,沈泓萃,姚惠之. 用雷诺应力模型预报不同雷诺数下的潜艇绕流[J]. 船舶力学,2009,13(5):688-695.
ZHANG Nan, SHEN Hongcui, YAO Huizhi. Prediction of flow around submarine at different Reynolds numbers with Reynolds stress model[J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(5): 688-695. (in Chinese)
- [3] 古红霞,周力行. 两相湍流的非线性 $k-\epsilon-k_p$ 模型[J]. 航空动力学报,2001,16(3):267-272.
GU Hongxia, ZHOU Lixing. A non-linear $k-\epsilon-k_p$ two-phase turbulence model[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(3): 267-272. (in Chinese)
- [4] 周力行,古红霞. 用非线性 $k-\epsilon-k_p$ 两相湍流模型模拟旋流两相流动[J]. 空气动力学学报,2001,19(3):288-295.
ZHOU Lixing, GU Hongxia. Simulation of swirling gas-particle flows using a non-linear $k-\epsilon-k_p$ two-phase turbulence model[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2001, 19(3): 288-295. (in Chinese)
- [5] 孙锐,李争起,吴少华,等. 不同湍流模型对强旋流动的数

- 值模拟[J]. 动力工程, 2002, 22(3): 1750-1757.
- SUN Rui, LI Zhengqi, WU Shaohua, et al. Numerical simulation of strong swirling jet with different turbulent model [J]. Power Engineering, 2002, 22(3): 1750-1757. (in Chinese)
- [6] 陆耀军, 周力行, 沈熊. 不同湍流模型在液-液旋流分离管流场计算中的应用及比较[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(2): 105-109.
- LU Yaojun, ZHOU Lixing, SHEN Xiong. Different turbulence models for simulating a liquid-liquid hydrocyclone [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(2): 105-109. (in Chinese)
- [7] 陆耀军, 周力行, 沈熊. 液-液旋流分离管中强旋湍流的 $k-\epsilon$ 数值模拟[J]. 计算力学学报, 2000, 17(3): 267-272.
- LU Yaojun, ZHOU Lixing, SHEN Xiong. Numerical simulation of strongly swirling turbulent flows in liquid-liquid hydrocyclones using $k-\epsilon$ model [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2000, 17(3): 267-272. (in Chinese)
- [8] 陆耀军, 周力行, 沈熊. 液-液旋流分离管中强旋湍流的 Reynold 应力输运方程数值模拟[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 30(1): 47-54.
- LU Yaojun, ZHOU Lixing, SHEN Xiong. Numerical simulation of strongly swirling turbulent flows in liquid-liquid hydrocyclone using DSM turbulence model[J]. Science in China (Series E), 2000, 30(1): 47-54. (in Chinese)
- [9] Gibson M M, Younis B A. Calculation of swirling jets with a Reynolds stress closure[J]. Phys. Fluids, 1986, 29(1): 38-48.
- [10] Leschziner M A, Hogg S. Computation of highly swirling confined flow with Reynolds stress turbulence model[J]. AIAA Journal, 1989, 27(1): 57-63.
- [11] 党新宪, 赵坚行, 张欣, 等. 应用 PIV 技术测试模型环形燃烧室流场[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1470-1475.
- DANG Xinxian, ZHAO Jianxing, ZHANG Xin, et al. Measurements of the flow fields in a model annular combustor using particle image velocimetry[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1470-1475. (in Chinese)
- [12] 程勇, 汪军. 旋流燃烧室内湍流流动的 PIV 试验研究[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(5): 454-456.
- CHENG Yong, WANG Jun. Experiment study on the turbulent flow in a swirl combustion chamber by using particle image velocimetry[J]. J. University of Shanghai for Science and Technology, 2004, 26(5): 454-456. (in Chinese)
- [13] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [14] Choudhury D. Introduction to the renormalization group method and turbulence modeling[R]. Fluent Inc. Technical Memorandum, TM-107, 1993.