

不同湍流模型在旋风分离器三维数值模拟中的应用和比较

王海刚, 刘 石

(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘要: 采用标准 $\kappa-\epsilon$ 模型、RNG $\kappa-\epsilon$ 模型和 RSM (SSG) 模型, 对气-固旋风分离器中的单相湍流流场进行数值模拟计算。旋风分离器网格划分采用分块划分技术, 每一块采用贴体坐标划分网格, 计算结果同试验比较, 三种模型中以 RSM 模型的预报结果最为合理, 对切向速度分布的涡结构给出了合理的预报结果, 同时给出了雷诺应力的各向异性特性, 但同实验值仍有一定的差别, 分析认为同湍流模型本身的原因外, 与入口边界条件的选取和网格划分的多少有一定的关系。

关键词: 旋风分离器; 湍流模型; 数值模拟

中图分类号: O241 文献标识码: A

1 前言

旋风分离器中气相强旋流湍流数值模拟, 大都采用基于涡粘性假设下的湍流模型, 如标准 $\kappa-\epsilon$ 模型^[1]、代数应力模型^[2]等, 计算结果表明上述模型都不同程度地存在缺陷, 不能给出涡的合理结构。针对这一问题而开发的多种模型修正形式^[3~5], 虽在一定程度上改善了预报结果, 但改进是有限的。严格来说解决上述模型缺陷的根本途径在于完全抛弃基于各向同性涡粘性假设的湍流模型, 采用雷诺应力运输模型。近几年来有不少人采用了雷诺应力

运输模型计算液液分离器^[6]和气固分离器中湍流流动^[7~9]的计算, 但上述雷诺应力模型中压力应变项没有考虑壁面作用, 并且往往将计算简化为二维流动, 这必将会对计算结果带来一定的误差。本文首次采用 RSM 中 SSG^[10] 模型对旋风分离器中三维气相流场进行了数值模拟计算, 该模型压力应变项中考虑了壁面效应。本文采用标准 $\kappa-\epsilon$ 模型、RNG $\kappa-\epsilon$ 模型和雷诺应力三种湍流模型计算旋风分离器中气相流场并同试验结果比较, 选取一种最佳的湍流模型, 为今后旋风分离器中气固两相湍流模拟打下基础。

2 湍流方程

2.1 标准 $\kappa-\epsilon$ 模型

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \rho (C_{\epsilon 1} G_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}) \quad (2)$$

收稿日期: 2003-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50076045)

作者简介: 王海刚(1971-), 男, 辽宁阜新, 中国科学院工程热物理研究所助理研究员。

参考文献:

- [1] NAKANO A, SHIRAISHI M, NISHIO M, *et al.* An experimental study of heat transfer characteristics of a two-phase nitrogen thermosyphon over a large dynamic range operation [J]. *Cryogenics*, 1998, **38**: 1259-1266.
- [2] YU YAN JIANG, MASASHIRO SHOJI, MASASHI NARUSE. Boundary condition effects on the flow stability in a toroidal thermosyphon [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2002, **23**: 81-91.
- [3] AMBROSINI W, FERRERI J C. Stability analysis of single phase thermosyphons by finite-difference numerical methods [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2000, **201**: 11-23.
- [4] 昂雪野. 热虹吸管中间歇沸腾频率的研究 [J]. 齐齐哈尔轻工业学院学报, 1994, **10**(3): 9-16.
- [5] 昂雪野. 热虹吸管内脉冲沸腾强度的研究 [J]. 齐齐哈尔轻工业学院学报, 1995, **11**(1): 16-19.
- [6] 唐志伟. 重力热管弹状流工况的简化分析 [J]. 工程热物理学报, 2002, **23**(3): 345-347.
- [7] 庄 骏, 张 红. 热管技术及其工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

(何静芳 编辑)

式中: G_k 为湍能体积生成率, 表达式为:

$$G_k = 2\mu_t \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}, \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right);$$

μ_{eff} 为有粘性系数: $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$;

方程中其余系数为: $C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_{\epsilon_1} = 1.44, C_{\epsilon_2} = 1.92$.

2.2 RNG $\kappa - \epsilon$ 模型

Yakhot 和 Orszag^[11-12] 把重整化群(Renormalization Group RNG) 方法引入到湍流研究中建立了一个新的湍流模型, 其方程如下:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \rho (C_{\epsilon_1} G_k - C_{\epsilon_2} \frac{\epsilon^2}{k}) \tag{4}$$

耗散方程中:

$$C_{\epsilon_1} = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}, \eta = Sk/\epsilon,$$

$$S = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}},$$

$$\eta_0 = 4.28, \beta = 0.015, C_\mu = 0.085,$$

$$C_{\epsilon_2} = 1.68, \sigma_k = 0.7179, \sigma_\epsilon = 0.7179$$

此模型与标准湍流模型主要区别: (1) 方程中的常数是用理论推导得出的, 并非用实验方法确定; (2) 耗散方程系数 C_{ϵ_1} 体现了平均应变率对耗散项的影响。

2.3 雷诺应力模型

基本的雷诺应力微分模型(RSM)即线性的RSM模型, 压力应变项的模拟采用线性代数式, 耗散项用标量耗散率。本文采用的RSM模型为Spezial-Sarka-Gatski的SSG^[10]模型。SSG模型如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u_i u_j u_k}) = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} - \epsilon_{ij} \tag{5}$$

方程中 $D_{ij}, P_{ij}, \Pi_{ij}, \epsilon_{ij}$ 分别为扩散项、产生项、压力应变项和耗散项, 分别表示如下:

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} \right) \tag{6}$$

$$P_{ij} = - \left(\overline{u_i u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \overline{u_j u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right) \tag{7}$$

$$\Pi_{ij} = - C_1 \epsilon \alpha_{ij} + C_2 \epsilon (\alpha_{ik} \alpha_{kj} - \frac{1}{3} \alpha_{kl} \alpha_{kl} \hat{q}_{ij}) +$$

$$C_3 k S_{ij} + C_4 k (\alpha_{ik} S_{jk} + \alpha_{jk} S_{ik} - \frac{2}{3} \alpha_{kl} \alpha_{kl} \hat{q}_{ij}) + C_5 (\alpha_{ik} W_{jk}$$

$$+ \alpha_{jk} W_{ik}) \tag{8}$$

压力应变项包括了雷诺应力的各向异性张量的二次方项, 式中:

$$C_1 = 3.4 + 1.8 P_{kk}/\epsilon; C_2 = 4.2,$$

$$C_3 = \frac{4}{5} - 1.3 \Pi_\alpha^{1/2}, C_4 = 1.35,$$

$$C_5 = 0.4$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\overline{u_i u_j}}{2k} - \frac{1}{3} \hat{q}_{ij}$$

$$\Pi_\alpha = \alpha_{ij} \alpha_{ij}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

SSG模型中压力应变项的系数依赖于雷诺应力的变化和湍能的产生, 而雷诺应力的变化和湍能产生又与壁面作用密切相关, 因此SSG模型体现了壁面效应对雷诺应力分布的影响。

耗散过程主要发生在小尺度涡区。较长时间以来人们一直认为在高雷诺数下, 小尺度涡团结构趋于各向同性, 因而可以忽略各向异性的耗散, 即认为湍流的切应力耗散趋于零, 而粘性作用只引起湍流正应力即湍能的耗散。这样耗散张量 ϵ_{ij} 就可以化为标量形式, 即:

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \rho \epsilon \hat{q}_{ij} \tag{9}$$

目前最为广泛采用的 ϵ 模型为:

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right) - C_{\epsilon_1} \frac{k}{\epsilon} \rho \overline{u_i u_j} \times \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon_2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{10}$$

式中右端分别为扩散项、产生项、耗散项。式中的系数为:

$$C_{\epsilon_1} = 1.44, C_{\epsilon_2} = 1.92, C_{\epsilon_3} = -1, C_\epsilon = 1.33$$

与双方程 $\kappa - \epsilon$ 模型比较, 雷诺应力方程湍能的模拟不需要任何输运方程求解, 而是通过雷诺应力得到:

$$k = 1/2 \cdot \overline{u_i u_j}$$

3 网格生成方法

网格质量的好坏将影响计算结果, 因此许多人都在研究流体力学计算方法的同时, 也在研究网格的生成技术。为了准确描述边界条件, 常用的方法是形成贴体坐标网格。贴体网格基本思路是将物理平

面上的微分方程通过坐标变换, 转换到规则形状区域上, 在此区域对微分方程进行离散求解。贴体网格与计算域的几何形状一致, 能很好地给出边界信息。作者采用 Thompson^[13] 等人的椭圆微分方程法生成分离器的三维网格。在此方法中物理坐标通过变换可表示为泊松方程的形式:

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = P \tag{11}$$

$$\zeta_{xx} + \zeta_{yy} = Q \tag{12}$$

式(11)和式(12)中, P 与 Q 是源项, 控制网格疏密程度, 当 $P = Q = 0$ 时, 上述方程变成拉普拉斯方程, 网格为均匀网格。式(11)和式(12)通过坐标反变换, 表示为:

$$\alpha_{\xi\xi} - 2\beta_{\xi\zeta} + \gamma_{\zeta\zeta} = -J^2(Px_{\xi} + Qy_{\zeta}) \tag{13}$$

$$\alpha_{\zeta\zeta} - 2\beta_{\xi\zeta} + \gamma_{\xi\xi} = -J^2(Py_{\zeta} + Qx_{\xi}) \tag{14}$$

式(13)和式(14)中各系数分别为:

$$\alpha = x_{\xi}^2 + y_{\zeta}^2, \beta = x_{\xi}y_{\zeta} + x_{\zeta}y_{\xi},$$

$$\gamma = x_{\zeta}^2 + y_{\xi}^2,$$

$$J = \frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \zeta)} = x_{\xi}y_{\zeta} - x_{\zeta}y_{\xi},$$

在划分网格时, 将分离器划分成三个子区域, 每一个区域采用上面的微分方程法生成各自的网格, 然后通过拼接技术将各分区网格结合在一起。由于网格是分块生成的, 每一区域有各自的逻辑坐标 i, j, k , 将其拼接在一起后, 各逻辑坐标不再存在, 网格之间的关系通过间接寻址方法实现^[14]。

4 旋风分离器内流场计算

旋风分离器内的流动是极为复杂的, 流动伴随这强烈的旋转, 因此, 湍流模型的选取是否恰当是计算的关键。本节将以上三种湍流模型应用于旋风分离器的三维流场模拟, 比较几种模型的预报结果, 选取最佳的湍流模型。

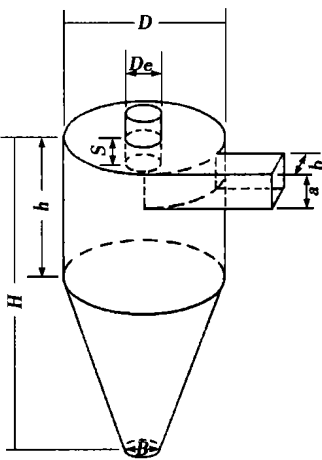


图 1 分离器几何结构

4.1 计算网格和边界条件

本文计算采用的物理模型和结构尺寸与文献[3]中的旋风分离器试验模型相同, 基本结构如图 1

所示, 其中的几何参数如下:

$$a = 95 \text{ mm}, b = 38 \text{ mm}, h = 285 \text{ mm}, B = 72.5 \text{ mm}, D = 190 \text{ mm}, De = 64 \text{ mm}, H = 760 \text{ mm}, S = 95 \text{ mm}$$

计算网格的划分采用第三节所述方法, 图 2 为分离器三维网格。

计算边界条件如下:

- (1) 入口边界: 取入口为常温下的空气, 入口速度为 7.5 m/s, 湍能 $k_{inlet} = 3/2 \cdot T_i^2 \cdot V_{inlet}^2$, T_i 为入口湍流强度 $T_i = 5.5\%$, $eps_{in} = k_{in}^{1.5} \times 0.005 \times Dia$, Dia 为入口当量直径, 雷诺应力入口条件: $\overline{u_i u_j} = 2/3 \cdot k_{inlet}$, $\overline{u_i u_j} = 0 (i \neq j)$;

- (2) 出口边界: 取出口压力零为外界大气压;

- (3) 颗粒收集出口: 取气体流量为零, 即无气流从此口流出;

- (4) 固壁边界: 壁面为无滑移边界条件, 湍流采用壁面函数法。

4.2 计算结果和分析

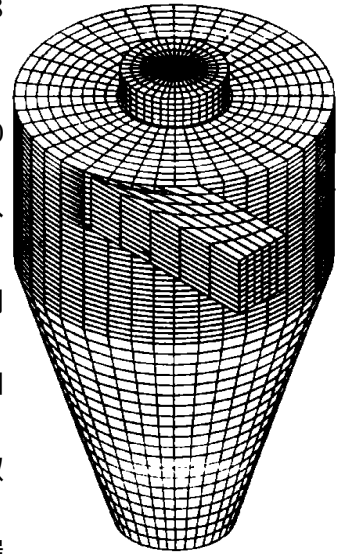
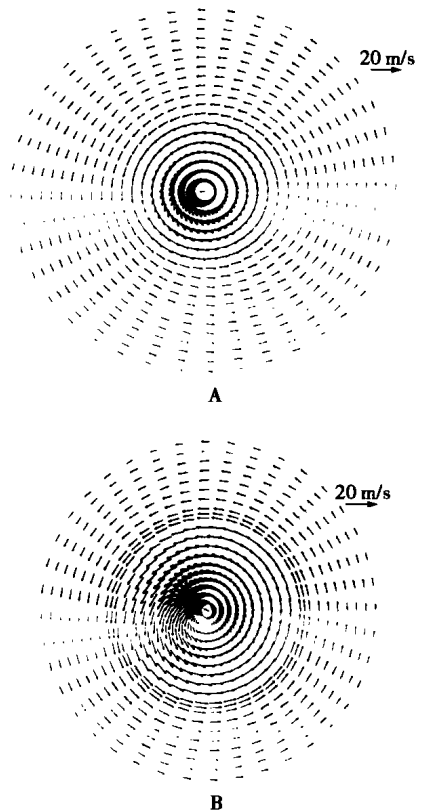


图 2 分离器计算网格



A: z = 645 mm, B: z = 360 mm

图 3 圆柱段旋转速度矢量图

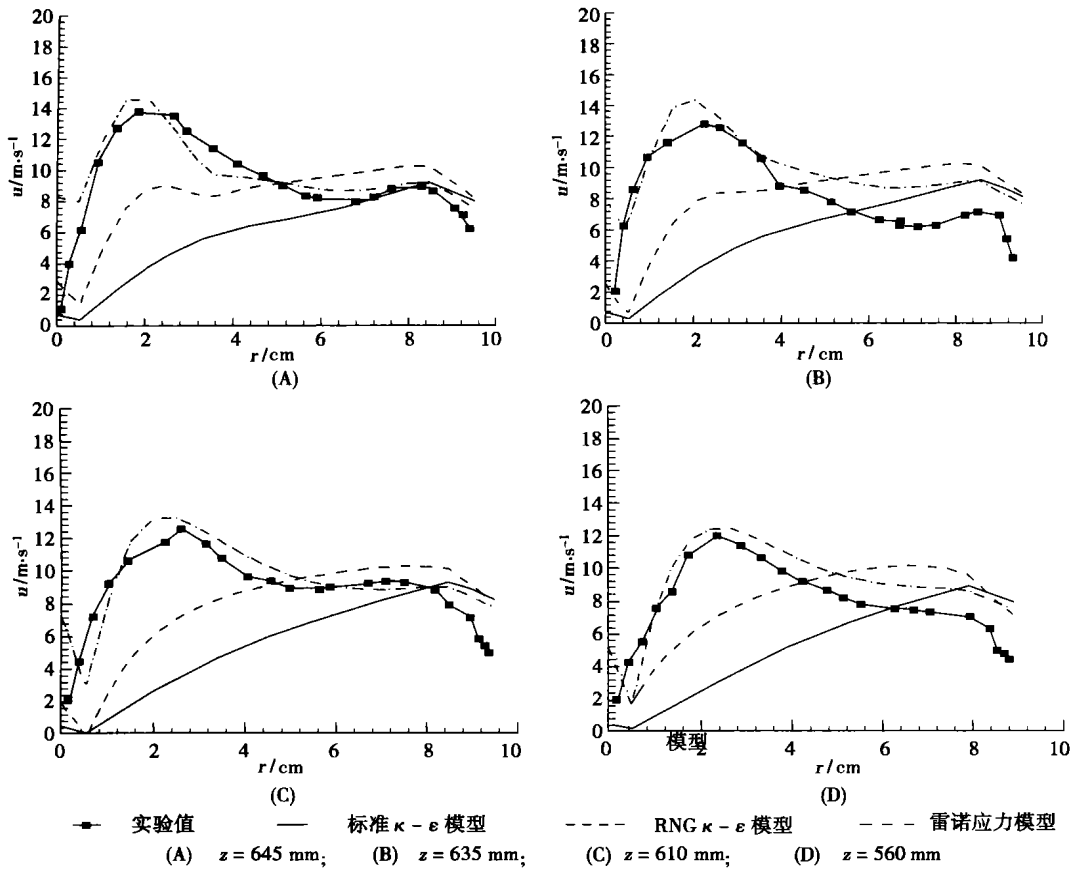
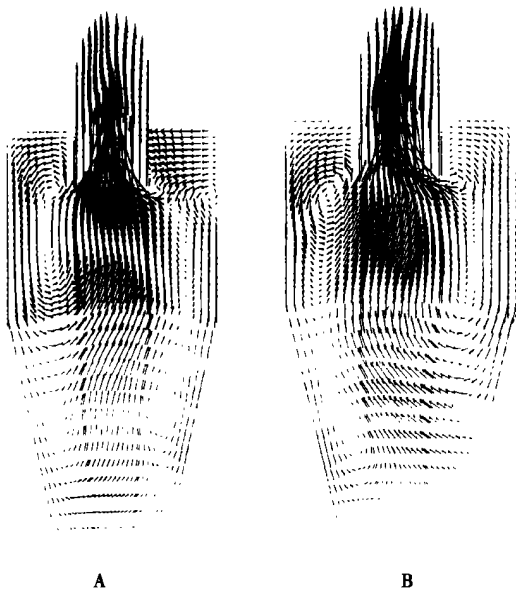


图 4 各剖面上切向速度的分布



(A: $x = 0$ 剖面 B: $y = 0$ 剖面)

图 5 速度矢量图

4.2.1 切向速度分布

图 3 给出了由雷诺应力模型 (SSG) 计算得到的分离器内 $z = 645 \text{ mm}$ 和 $z = 360 \text{ mm}$ 两个断面上旋转速度矢量图。由图中可以看到分离器内部的气体流动不是完全对称的, 而且有很大的旋转曲率, 矢量图清楚地显示了中心气流的强烈旋转和壁面附近气流速度的快速降低。图 4 给出了由标准 $\kappa - \epsilon$ 模型, RNG $\kappa - \epsilon$ 模型和 RSM (SSG) 模型

计算结果同实验结果 (文献 [3]) 在不同断面的比较。由图可以看出三种模型中雷诺应力模型与实验结果最为接近, 清楚地给出了涡的结构: 中心附近的强制涡和外层的自由涡。标准模型不能给出这种涡结构, RNG $\kappa - \epsilon$ 模型在分离器圆柱段能给出这种涡结构, 但与实验差别很大, 到了圆锥段, 预报结果与标准模型差别不大, 远远偏离实验值。

4.2.2 轴向速度分布

图 5 给出了沿 $x = 0$ 和 $y = 0$ 两个断面的速度矢量分布图, 由图可以清楚看出分离内气体流动的不对称性。图 6 给出了三种模型的结算结果同实验数据在各断面上轴向速度的比较。由图可以看出, 在圆柱段, 模型和雷诺应力模型得到的结果与实验值基本吻合, 速度零点的位置基本相同, 最大速度值也基本吻合。在圆锥段, 三种模型的计算结果都与实验值有很大的偏差, 但雷诺应力模型与实验结果最为接近。

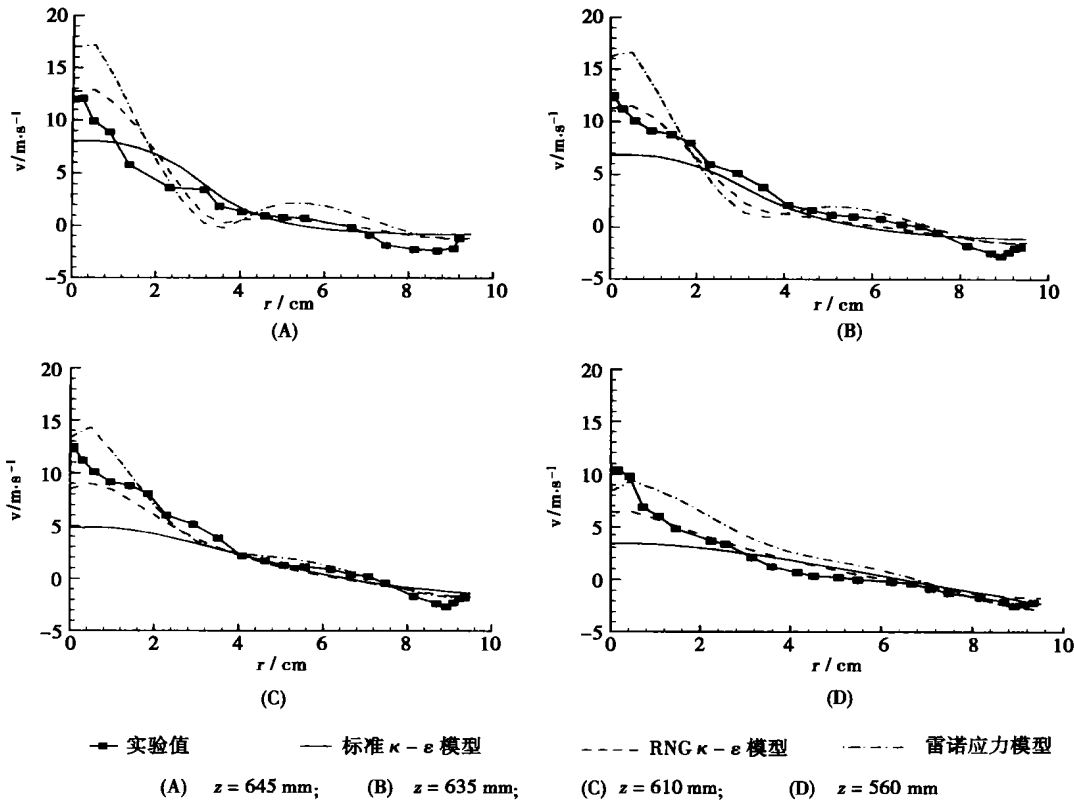


图 6 各剖面上切轴速度的分布

4.2.3 雷诺应力各向异性分析

图 7 给出了雷诺应力的六个分量在不同剖面的分布, 由图可以清楚看出分离器内湍流的各向异性特性: 雷诺应力的三个正应力分布不同, 但最大值的位置与切相速度最大值的位置接近。偏引力的分布与正应力的分布大致相同。

通过对旋风分离器的模

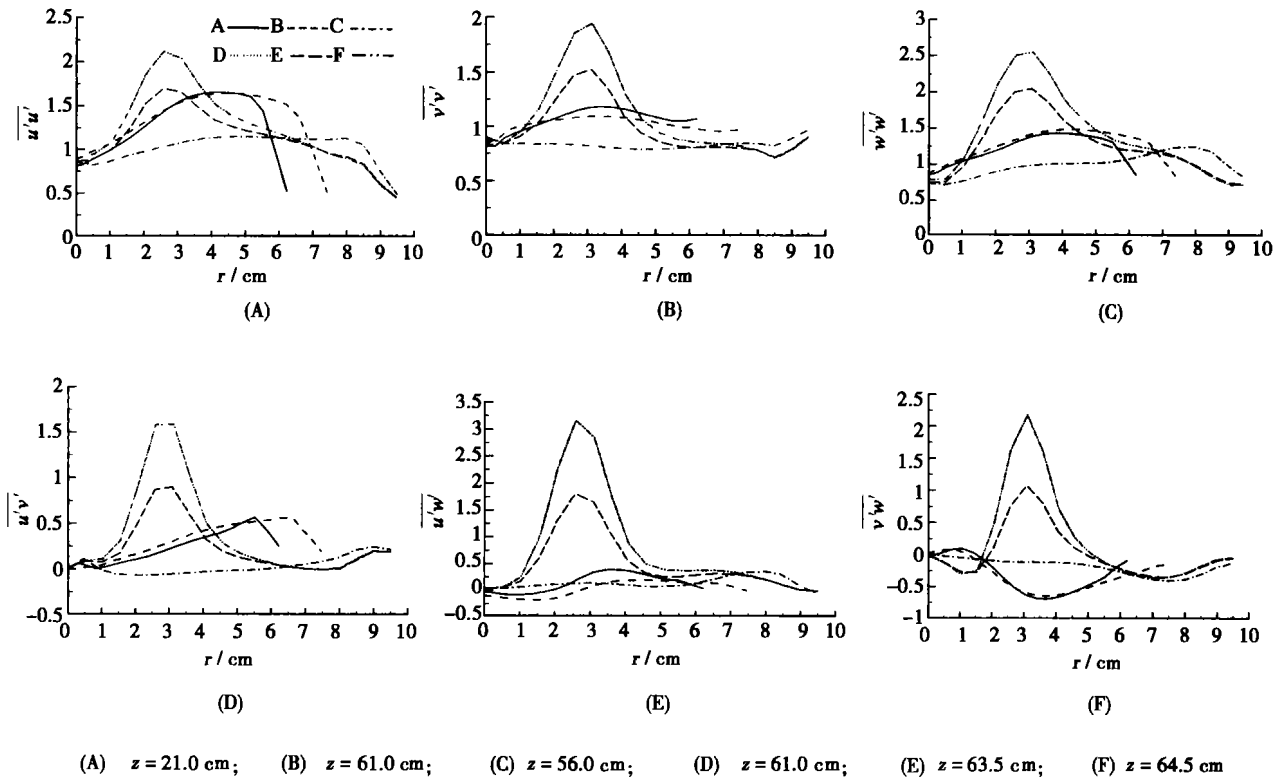


图 7 各剖面上雷诺应力的分布

拟计算与实验结果比较,可以看出:对于分离器中的这种具有很强的各向异性特点的旋流流动,必须抛弃基于各向同性假设基础之上的湍流模型,而采用雷诺应力输运模型,但采用此模型的代价是增加了计算量。

5 结 论

通过三种模型的计算结果与实验数据的比较可以看出:

(1) 标准模型无论对轴向速度还是切向速度的数值预报均存在明显的缺陷,表明该模型不适于模拟计算旋风分离器的旋流流动;

(2) RNG $\kappa-\epsilon$ 模型相对于标准 $\kappa-\epsilon$ 模型有所改进,但这种改进仍然没有抛弃基于涡粘性假设的基础,因此其预报结果是有限的;

(3) 雷诺应力 (SSG) 模型完全抛弃了涡粘性假设,完全求解雷诺应力的微分输运方程,并且考虑了壁面对雷诺应力分布的影响,因此具有较其它两种模型更强的模拟能力;

(4) 采用雷诺应力模型计算结果精度提高了,同时计算量增加,但在现有的计算机条件下,完全能满足计算要求。

参考文献:

- [1] HSIEH K T, RAJAMANI R K., Mathematical model of the hydrocyclone based on physics of fluid flow [J]. *AIChE Journal*, 1991, 37(5): 735-746.
- [2] MALHOTRA A, BRANION R M R, HAUPTMANN E G. Modeling the flow in a hydrocyclone [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1994, 72: 953-960.
- [3] FRASER S M, ABDEL RAZEK A M, ABDULLAH M Z. Computational

and experimental investigations in a cyclone dust separator [J]. *Proc Instn Mech Engrs*, 1997, 22: 247-257.

- [4] CHRISTIAN FREDRIKSSON. Exploratory experimental and theoretical studies of cyclone gasification of wood powder [D]. Doctoral Thesis, Lulea Tekniska Universitet, 1999.
- [5] 魏志军, 张平. 旋风分离器气相流场的数值模拟 [J]. 北京理工大学学报, 2000, 20(5): 261-264.
- [6] 陆耀军, 周力行, 沈熊. 液-液旋流分离管中强旋湍流的应力 Reynold 输运方程数值模拟 [J]. 中国科学(E辑), 2000, 30(1): 47-53.
- [7] BOYSAN F, SWITHEBANK J. A fundamental mathematical modeling approach to cyclone design [J]. *Trans Ichem E*, 1982, 60: 222-230.
- [8] ZHOU L X. Theory and modeling of turbulent gas-particle flows and combustion [M]. Beijing: science Press, Florida: CRC Press, 1993.
- [9] 林玮, 王乃宁. 用应力模型计算旋风分离器的流场 [J]. 华东工业大学学报, 1996, 18(3): 8-13.
- [10] CHARLES SPEZIALE G, SUTANANU SARKAR, THOMAS GATSKI B. Modelling the pressure-strain correlation of turbulent: an invariant dynamical systems approach [J]. *J Fluid Mech*, 1991, 227: 245-272.
- [11] CHARLES SPEZIALE G, THOMAS GATSKI B, NEASSAN FITZMAURICE. An analysis of RNG-base turbulent models for homogeneous shear flow [J]. *Phys Fluids* 1991, 3(9): 2278-2281.
- [12] VAKHOT V, ORSZAG S A. Development of turbulent models for shear flows by a double expansion technique [J]. *Phys Fluids* 1992, 4(7): 1510-1520.
- [13] JOE THOMPSON F, FRANK THAMES C, WAYNE MASTIN C. Automatic numerical generation of body-fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two-dimensional bodies [J]. *Journal of computational physics*, 1974, 15: 299-319.
- [14] 王海刚, 陈石, 刘石. 内燃机进气道和缸内三维流场数值模拟 [J]. 工程热物理学报, 2002, 23(3): 312-314.
- [15] HUNG L Z, PARVIZ MOIN, JOHN KIM. Simulation of turbulent flow over a backward-facing step [J]. *Fluid Mech*, 1997, 330: 349-374.

(何静芳 编辑)

新系列的燃气轮机过滤器

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2002年6月号报道,燃气轮机空气过滤装置专业制造者——德国 Weinheim 的 Freudenberg 集团已提供新系列的空气过滤器滤芯。TFP 95 型过滤器更适用于航改型燃气轮机。它能有效地滞留微粒,效率高达 92%。

具有合适的压降特性和长的使用寿命, Viledon 深加载过滤器滤芯能够显著提高涡轮机械的使用效果。TFP95 深加载过滤器滤芯高的过滤能力、低的压降和其它优良特性均得益于其三层渐进配置的高性能非织造过滤介质。

Freudenberg 生产的非织造介质由合成有机纤维和微纤维组成,并且其特征是渐进的结构,滤层向着介质的清洁空气一侧变得更致密。

滤芯被设计成能提供过滤面积、叠合深度和折页数之间优化的关系。介质是十分坚固的,即使在高压差下也能防止折页破裂。

(吉桂明 供稿)

火力发电机组锅炉控制技术的新进展 = **New Advances in the Development of Boiler Control Technologies for Thermal Power Plants** [刊, 汉] / LUAN Xiu-chun, LI Shi-yong (Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 329 ~ 333

The development both at home and abroad of boiler control technologies for thermal power plants during the past five years has shown that the precise mathematical model-based traditional control techniques suffer from great limitations. This comes about because of the presence of numerous unfavorable factors, such as non-linearity, uncertainty and great inertia, etc, especially in the case of a steady increase in unit capacity of power generating units and highly frequent wide-range load fluctuations in electric networks. However, control techniques not fully dependent on precise mathematical models, such as fuzzy control, neural control, self-adaptive and predictive control, etc have provided new approaches for the control of boilers. In this connection, intelligent control based on the simulation of human reasoning and decision-making has become a trend of future development. From the scientific perspective of non-linear behavior the authors have addressed the boiler control issue as an integral part of the whole power plant, which is conducive to enhancing the performance of the control system of both the boiler and the power plant as a whole. **Key words:** utility boiler control, fuzzy control, neural control, self-adaptive control, predictive control

重力热管传热波动特性研究及抑制方法探讨 = **An Investigation of the Heat-transfer Fluctuation Characteristics in Gravity Heat Pipes and an Exploration of Methods for Their Restraint** [刊, 汉] / CHEN Yan-ze, ZHOU Yi-hui, DING Xin-wei (Chemical Engineering Institute under the Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 334 ~ 336

Pulse boiling and temperature fluctuations will occur in gravity heat pipes during their startup and in case of a change in their stable operating conditions. This will have a negative effect on the heat transfer efficiency and the service life of heat pipes. The use of a simple spring-loaded bubble-suppression device may restrain the generation of gas bubbles from working media in heat pipes and absorb the heat energy in gas bubbles, thereby making the working-medium temperatures tend to assume a uniform distribution. Meanwhile, this is also conducive to intensifying the convection heat transfer between the working media and pipe walls. Tests have shown that the heat-transfer intensification effectiveness of gravity heat pipes is very conspicuous thanks to the use of the above-mentioned bubble-suppression device. **Key words:** gravity heat pipe, bubble suppression, pulse characteristics, periodic geyser phenomenon

不同湍流模型在旋风分离器三维数值模拟中的应用和比较 = **Application and Comparison of Different Turbulence Models in the Three-dimensional Numerical Simulation of Cyclone Separators** [刊, 汉] / WANG Hai-gang, LIU Shi (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 337 ~ 342

Numerical simulation calculations were conducted of single-phase turbulence flow fields in a gas-solid cyclone separator with the use of a standard $k-\epsilon$ model, RNG $k-\epsilon$ model and a Reynolds stress model (RSM). A bloc division technique was employed for the mesh division of the cyclone separator with each bloc using curvilinear coordinates for mesh division. The results of calculation were compared with those of experiments. Among the three models the prediction results of the RSM model have been found to be the most rational, which gave rational forecast results for a vortex structure with a tangential speed distribution. At the same time, the anisotropic behavior of Reynolds stresses was also presented. However, some discrepancy still exists between the simulation results and the experimental ones. An analysis has shown that apart from the feature of the turbulence model itself this can somehow be attributed to the selected inlet boundary conditions and the adopted mesh division. **Key words:** cyclone separator, turbulence model, numerical simulation