

梁绍青,王铨健. 旋风分离器流场数值模拟及其涡结构识别[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S1): 262-266. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0637

Liang Shaoqing, Wang Chengjian. Numerical simulation of the flow field in a cyclone separator and vortex identification [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 262-266. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0637

## 旋风分离器流场数值模拟及其涡结构识别

梁绍青<sup>1</sup>, 王铨健<sup>2</sup>

(1. 东南大学 总务处, 江苏 南京 210000; 2. 中国矿业大学 电力工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘 要:** 采用计算流体力学软件 Fluent, 基于非稳态雷诺应力湍流模型对旋风分离器流场进行了模拟, 得到了旋风分离器内部切向速度和轴向速度分布, 并与实验值进行对比; 同时将  $Q$  判据应用于旋风分离器内漩涡结构的识别, 比较了切向进口处两种不同网格结构对涡结构的影响。结果表明: 非稳态的雷诺应力湍流模型模拟结果对切向速度进行很好的预测, 几乎与实验一致; 轴向速度与实验结果趋势一致, 能够很好的预测轴向速度的“驼峰”结构; 切向进口处的网格质量由于伪扩散对模拟结果有影响, 需要进行优化; 利用  $Q$  判据能够将旋风分离器内部的旋进涡及环形空间二次涡进行准确识别, 在旋风分离器中心轴线附近及环形空间存在漩涡。

**关键词:** 旋风分离器; RSM 模型; 伪扩散;  $Q$  判据

中图分类号: TH237.5 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2014)S1-0262-05

### Numerical simulation of the flow field in a cyclone separator and vortex identification

LIANG Shao-qing<sup>1</sup>, WANG Cheng-jian<sup>2</sup>

(1. Office of General Services, Southeast University, Nanjing 210000, China; 2. School of Electric Power Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The flow field in a cyclone separator was simulated with the unsteady RSM turbulence model by using the CFD software Fluent. The tangential and axial velocity distributions inside the cyclone separator was got and compared with the experiment results. Vortex identifications was employed to distinguish the actual various vortices in cyclone separator with the consideration of two kinds of meshing structures at the tangential inlet zone. It was found that the unsteady RSM model has a good performance in the simulation of the cyclone separator. The tangential velocity consistent well with the experimental result and the ‘Hump structure’ of axial velocity is predicted. to the false diffusion. The mesh at the tangential inlet of cyclone separator has a great effect on the simulation result by analyzing the false diffusion. The  $Q$  vortex identification can be employed to distinguish the swirling flow around the axis and the secondary eddies in the annular space of cyclone separator.

**Key words:** cyclone separator; RSM model; numerical diffusion;  $Q$  criterion

旋风分离器由于其结构简单、低价的优点, 在电力、冶金等工业被广泛的使用。虽然它的几何结构简

单, 但是描述其内部的三维强旋流动却比较困难。随着 CFD 技术的发展, 计算流体力学已经被广泛地应

用到分离器的研究中。Ma 等<sup>[1]</sup>用 RNG  $\kappa-\varepsilon$  模型模拟了分离器的三维流动。赵新学等<sup>[2]</sup>用 RSM 和 DPM 模型模拟了旋风分离器壁面的磨损情况。

由于旋流器内部为非稳态强旋流, 所以用稳态模型无法对其流场进行很好的模拟。Sujeet Kumar Shukla<sup>[3]</sup>的研究表明, 如果用稳态求解器进行模拟, 残差曲线无法得到收敛解, 残差水平呈周期波动, 所以本文采用非稳态方法模拟其内流场。由于旋风分离器进口与筒体相切, 绝大部分论文中都采用分区划分网格方法, 这样能避免相切处尖锐网格的出现, 提高了网格质量, 但还没有对切向进口处网格的划分引起的伪扩散对模拟结果影响的研究, 前人已经对切圆锅炉模拟中伪扩散的问题做了深入的研究<sup>[4-7]</sup>, 指出由网格引起的伪扩散对模拟结果的影响无法忽略, 因此本文将对伪扩散对旋风分离器模拟结果的影响进行探讨。此外, 本文还将对旋风分离器内涡结构进行研究, 有学者指出旋风分离器中存在旋进涡<sup>[8]</sup>及环形空间存在二次涡<sup>[9]</sup>, 但以往对旋风分离器中涡结构的研究方法都是通过观察某一截面的速度矢量图, 即在二维空间中进行分析, 本文将采用  $Q$  判据在旋风分离器三维空间中对其涡结构进行识别。

### 1 物理模型及网格生成

为了把模拟结果和实验数据进行对比, 旋风分离器的实验模型和文献 [10] 中的相同, 物理模型图 1 所示, 具体尺寸见表 1。

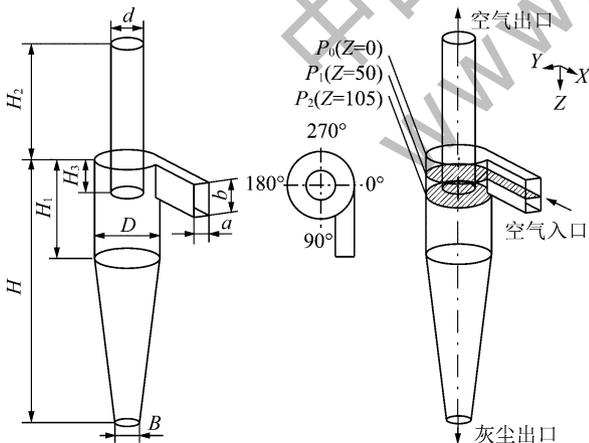


图 1 几何模型  
Fig. 1 Geometric model

模型全部采用六面体网格划分, 因为切向进口网格尖锐性的问题, 采用分区划分网格。为了讨论伪扩散的影响, 在对上半段网格进行划分时, 采用不同的划分策略, 下半段网格相同, 用 interface 链接两段网格, 网格数量约为 30 万, 两种网格如图 2 所示。

表 1 旋风分离器的尺寸  
Table 1 Dimensions of the cyclone separator

参数	参数值/mm
进口宽度 $a$	43
进口高度 $b$	85
筒体直径 $D$	170
升气管直径 $d$	85
集灰出口 $B$	64
主体高度 $H$	680
上段高度 $H_1$	255
升气管高度 $H_2$	300
升气管插入深度 $H_3$	85

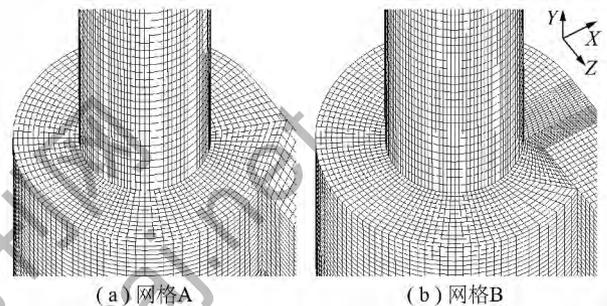


图 2 计算网格

Fig. 2 Computing mesh

边界条件: ① 进口。常温不可压缩气体, 进口速度参照文献 [8],  $v_{in} = 11.47 \text{ m/s}$ ; ② 出口。压力出口, 相对压力 0; ③ 壁面。无滑移壁面处理。

模拟介质为空气, 密度  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ , 黏度  $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

### 2 数学模型理论

#### 2.1 湍流模型

旋风分离器内部是一个强旋流场, 具有各向异性的特点。目前用改进的 RNG  $\kappa-\varepsilon$  模型, RSM 模型, LES 大涡模型这 3 种模型能得到较好的模拟效果。王江云等<sup>[11]</sup>在 RNG  $\kappa-\varepsilon$  模型的基础上, 对模型常数和近壁面处理方法加以改进, 此种方法虽然计算量较小, 但对模型方程内部参数进行改动, 较为繁琐。大涡模型模拟结果在 3 者中最精确, 但对网格要求高, 计算耗费大。RSM 模型被证明能很好地模拟旋风分离器内部流动<sup>[12]</sup>。所以, 本文采用非稳态 RSM 模型, 其中能量、湍动能、湍动能耗散、雷诺应力、压力离散的差分格式设置为 QUICK Scheme, RSM 模型的数学表达式可参照文献 [8]。

#### 2.2 伪扩散

在数值计算中, 当流动方向和网格点线成一倾斜

角,并在与流动方向相垂直的方向上存在非零的因变量梯度时,对大多数的差分格式,都会出现伪扩散现象<sup>[4]</sup>。De Vahl Davis 和 Mallinson 给出了二维直角坐标、矩形网格情况下,上风格式伪扩散系数<sup>[13]</sup>的表达式

$$\Gamma_f = \frac{U\Delta x\Delta y\sin 2\theta}{4(\Delta x\cos^3 2\theta + \Delta y\sin^3 2\theta)} \quad (1)$$

其中,  $\Gamma_f$  为伪扩散系数;  $\theta$  为网格线与合速度之间的夹角( $0^\circ \sim 90^\circ$ );  $U$  为合速度。当倾斜角  $\theta$  为  $45^\circ$  时,  $\Gamma_f$  最大; 当倾斜角  $\theta$  为  $0^\circ$  时, 伪扩散现象不存在。实际计算时, 由于流体流动方向的多样性, 无法避免伪扩散现象的发生, 但可以通过优化网格控制伪扩散的大小, 使其对结果影响减弱。

### 2.3 Q 判据

涡为一种典型的流体力学现象, 但目前仍然没有严格的数学定义, 涡判据是识别涡的重要途径<sup>[14]</sup>。Hunt<sup>[15]</sup> 等提出的  $Q$  判据是目前应用广泛的判据之一, 认为流体变形分解为涡张量  $S$  及应变张量  $\Omega$ , 当  $S > \Omega$  时, 即认为有涡存在, 定义如下

$$Q = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \quad (2)$$

其中  $\|\Omega\|$ ,  $\|S\|$  表示应变张量和涡张量的二范数, 且  $Q$  的值与坐标的选取无关,  $Q$  可简化为

$$Q = -\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (3)$$

## 3 模拟结果

### 3.1 网格划分与伪扩散

图 3 为用网格 A 和网格 B 计算得到的  $P_1$  截面的速度矢量。从图 3 的速度矢量可以发现, 网格 B 得到的结果中, 当气体进入筒体之后, 仍保持一定刚性, 在图 3(b) 中圆圈所示区域, 流场发生扭曲, 而中心区域与网格 A 得到的流场区别不大, 因为两者在中心区域都使用了 O 型网格, 这与文献 [4] 得到的结果一致。

由于进口相切处几何结构的特殊性, 及此处流场的情况, 即此处旋风分离器内环流与进口来流交汇, 所以既要保证网格角度、长宽比等几何上的网格质量, 同时也要考虑网格线与流线的角度引起的伪扩散问题, 所以有必要对此处的流场进行仔细研究。

### 3.2 速度分布

本文采用非稳态求解器, 考虑其体积、进口速度及进口面积, 气体的停留时间为 0.4 s 左右, 取计算时间为 2 s 的流场作为研究对象, 取  $P_1$  平面上  $0^\circ \sim 180^\circ$  方向, 将两种网格得到的模拟得到的切向速度与

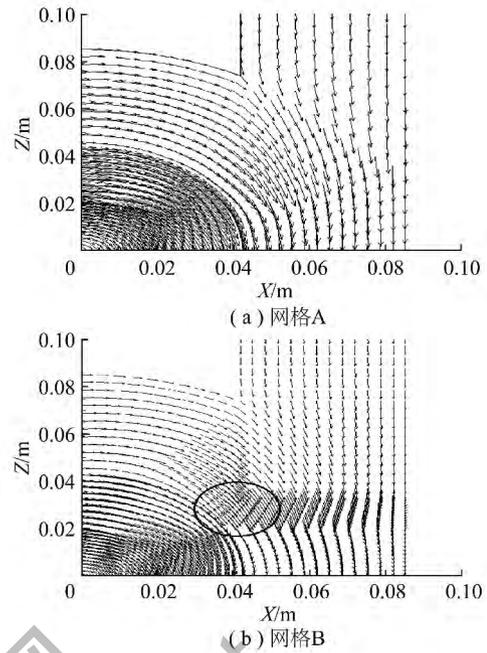


图 3  $P_1$  截面速度矢量

Fig. 3 Velocity vector of section  $P_1$

轴向速度分布分别与金有海等<sup>[10]</sup>的实验值比较。

从图 4 可以看出, 网格 A 和网格 B 得到的  $P_2$  截面  $0^\circ \sim 180^\circ$  方位的切向速度分布与实验值较吻合, 其中网格 A 的结果吻合程度更好, 特别是切向速度的几个峰值, 网格 A 的模拟结果与实验值更接近。从轴向速度分布来看, 两种网格得到的结果基本一致, 其中气流沿  $Y$  正方向的轴向速度极值与实验一样, 但沿  $Y$  负方向的轴向速度较实验值偏大, 这与金有海等<sup>[10]</sup>用 RSM 模型得到的计算结果类似, 说明雷诺应力模型在模拟旋风分离器时, 能对切向速度进行很好的预测, 几乎与实验一致, 但对轴向速度, 特别是中心轴附近的轴向速度不能很好的预测, 这也与数值计算中出口条件与实验时出口条件的差别有一定关系。

选取网格 A 的模拟结果观察速度分布云图, 图 5 为该模拟结果  $X=0$  剖面的静压、切向速度及轴向速度分布云图, 可以看出切向速度呈“驼峰”分布, 轴向速度也有类似分布, 这与王建军等<sup>[16]</sup>的 LDV 测量结果基本一致。

### 3.3 涡结构的识别

旋风分离器内存在旋进涡核现象<sup>[8]</sup>。旋风分离器内涡结构的变化必然会造成其内部压力场的变化, 这与壁面磨损及噪音的产生都有着紧密的联系, 所以有必要对旋风分离器内部涡结构进行分析。

选取网格 A 计算时间为 2 s 的模拟结果作为研究对象, 用  $Q$  判据对其进行涡结构的识别, 并利用 MIT 的流质特征提取库提取涡核位置。

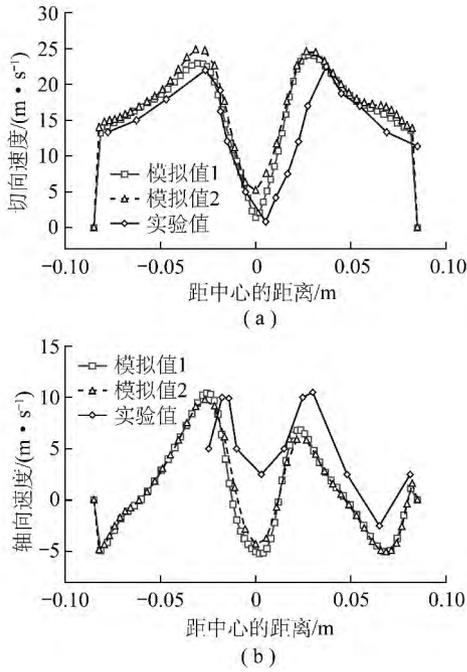


图4  $P_1$  截面上  $0^\circ \sim 180^\circ$  方向速度分布模拟值与实验值  
 Fig. 4 Simulation and experimental results of velocity distribution on  $P_1$ -section of  $0^\circ \sim 180^\circ$  direction

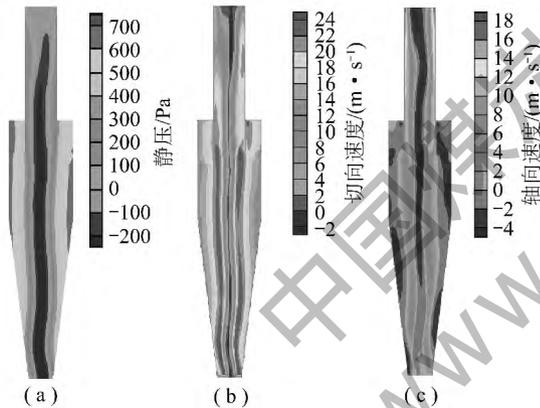


图5  $x=0$  的剖面数值模拟云图  
 Fig. 5 Simulation results on  $x=0$  section

从图 6 的 Y 方向截面上的矢量及在图 4 得到的速度分布结果来看, 旋风分离器中在中心轴位置存在一个半径与升气管半径相当的旋流, 如图 7 所示, 中心轴区域的涡结构被  $Q$  等值面标示出。图 6 (a) 显示的是环形空间中的  $Q$  等值面, 从  $0^\circ \sim 180^\circ$  截面的矢量图看出, 在环形空间的顶部和底部都有尺度较小的涡结构 (图中圈出部分),  $Q$  判据同样能够将他们识别出来。可以看出, 利用  $Q$  判据能够将旋风分离器内部的旋进涡及环形空间二次涡进行识别。

### 4 结 论

(1) 非稳态的 RSM 模型能较好地模拟旋风分离器流场, 其中切向速度分布与实验值几乎一

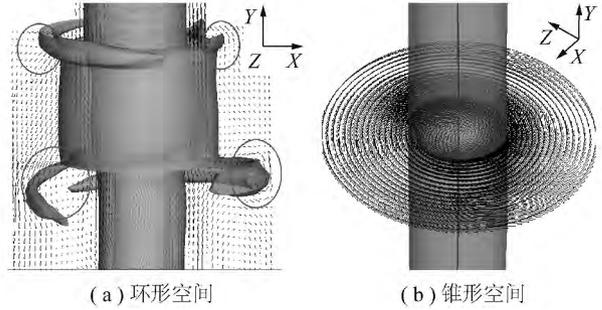


图 6 环形空间及锥形空间的涡判据等值面 ( $Q=4000$ )  
 Fig. 6 Contour of vortex identification at annular and conical space ( $Q=4000$ )

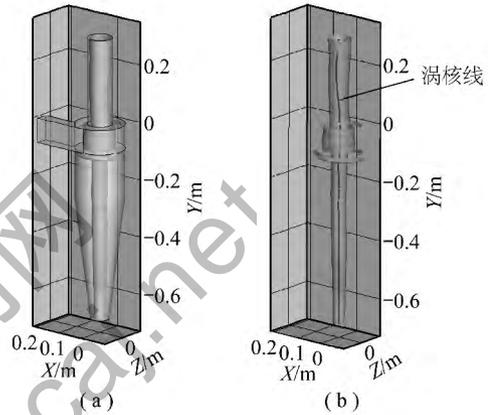


图 7 涡判据的等值面及涡核线 ( $Q=4000$ )  
 Fig. 7 Contour and vortex line of vortex identification ( $Q=4000$ )

致, 轴向速度分布于实验值趋势一致, 但靠近中心线的模拟结果与实验值有偏差。

(2) 旋流分离器切向进口网格对进口截面流场分布有较大影响, 由网格线与流线的角度引起的伪扩散问题所致, 因此网格的划分需要结合试验结果进行优化, 减小伪扩散对模拟结果的影响。

(3) 利用  $Q$  判据对旋风分离器内涡结构进行了识别, 结果显示在中心线附近有漩涡结构, 在环形空间存在二次涡。

### 参考文献:

[1] Mal Ingham D B, Wen X. Numerical modelling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones [J]. J. Aerosol Sci. 2000 31(9): 1097-1119.  
 [2] 赵新学, 金有海. 排尘口直径对旋风分离器壁面磨损影响的数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2012 48(6): 142-148.  
 Zhao Xinxue, Jin Youhai. Effect of dust discharge diameter on wall erosion in cyclone separator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012 48(6): 142-148.  
 [3] Sujeet Kumar Shukla, Prashant Shukla, Pradyumna Ghosh. Evaluation of numerical schemes using different simulation methods for the continuous phase modeling of cyclone separators [J]. Advanced Powder Technology 2011 22(2): 209-219.

- [4] 王志刚, 褚玉群, 陈昌和, 等. 四角切圆锅炉流场伪扩散效应网格的研究[J]. 中国机电工程学报, 2007, 27(5): 22-28.  
Wang Zhigang, Zhou Yuqun, Chen Changhe, et al. Mesh investigation about crossflow diffusion of computational flow dynamics in tangential combustion flow field [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(5): 22-28.
- [5] 刘向军, 徐旭常. 采用不同网格比较伪扩散对四角切圆型炉膛流场计算的影响[J]. 燃烧科学与技术, 1997, 3(2): 113-119.  
Liu Xiangjun, Xu Xuchang. Comparison of the influence of pseudo diffusion on the numerical simulation of flow field in a tangential firing furnace with different grid systems [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1997, 3(2): 113-119.
- [6] 吴阿峰, 谭灿燊. 切圆锅炉空气动力场三维模拟伪扩散的研究[J]. 现代电力, 2008, 25(1): 58-62.  
Wu Afeng, Tan Canshen. Pseudo-diffusion of 3-D simulation of aerodynamic flow field in tangentially-fired boiler [J]. Modern Electric Power, 2008, 25(1): 58-62.
- [7] 李彦鹏, 张强, 徐益谦. 四角切圆炉三维流动模拟中减小伪扩散的新方法[J]. 能源研究与利用, 2001(2): 30-33.  
Li Yanpeng, Zhang Qiang, Xu Yiqian. A new method of reducing pseudo-diffusion in three-dimensional flow simulation in a tangential fired furnace [J]. Energy Research and Utilization, 2001(2): 30-33.
- [8] 吴小林, 熊至宜, 姬忠礼, 等. 旋风分离器旋进涡核的数值模拟[J]. 化工学报, 2007, 58(2): 383-390.  
Wu Xiaolin, Xiong Zhiyi, Ji Zhongli, et al. Numerical simulation of processing vortex core in cyclone separator [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(2): 383-390.
- [9] 薛晓虎, 魏耀东, 孙国刚, 等. 旋风分离器上部空间各种二次涡的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2): 243-245.  
Xue Xiaohu, Wei Yaodong, Sun Guogang, et al. Numerical simulation on the secondary eddies in the upper space of a cyclone separator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(2): 243-245.
- [10] 金有海, 姬广勤, 曹晴云, 等. 旋风分离器排气管内气相流场的数值模拟[J]. 中国石油大学学报, 2008, 32(6): 109-124.  
Jin Youhai, Ji Guangqin, Cao Qingyun, et al. Numerical simulation of gas-phase flow field in vortex finder of cyclone separator [J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(6): 109-124.
- [11] 王江云, 毛羽, 刘美丽, 等. 用改进的 RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型模拟旋风分离器内的强旋流动[J]. 石油学报, 2010, 26(1): 8-13.  
Wang Jiangyun, Mao Yu, Liu Meili, et al. Numerical simulation of strongly swirling flow in cyclone separator by using an advanced RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  model [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 26(1): 8-13.
- [12] 张雅, 刘淑艳, 王保国. 使用 RSM 模型对旋风除尘器内湍流各向异性的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(S1): 41-44.  
Zhang Ya, Liu Shuyan, Wang Baoguo. Numerical simulation of the turbulence anisotropic behavior using the reynolds stress model in cyclone dust catcher [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(S1): 41-44.
- [13] Vahl D, Mallinson G D. Falsed diffusion in numerical fluid mechanics [R]. New South Wales, Australia: University of New South Wales, School of Mech. and Ind. Eng. Dept., 1972.
- [14] 胡子俊, 张楠, 姚惠之, 等. 涡判据在孔腔涡旋流动拓扑结构分析中的应用[J]. 船舶力学, 2012, 12(8): 839-846.  
Hu Zijun, Zhang Nan, Yao Huizhi, et al. Vortex identification in the analysis on the topology structure of vortical flow in cavity [J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 12(8): 839-846.
- [15] Hunt J C R, Wray A A, Moin P. Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows [R]. Center for Turbulence Research Report CTR-S88, 1988: 193-208.
- [16] 王建军, 王连泽, 刘成文. 带有阻杆的旋风分离器内气体流动分析[J]. 化工学报, 2005, 56(6): 989-994.  
Wang Jianjun, Wang Lianze, Liu Chengwen. Gas flow analysis in cyclone separator with a stick [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005, 56(6): 989-994.