

底部加直管旋风分离器的性能预测

钱付平, 章名耀

(东南大学 洁净煤发电与燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 针对常规旋风分离器中的“灰斗返混”问题, 有研究者提出在旋风分离器底部增设一直管, 使含尘气流进入其中进一步分离。本文应用雷诺应力输运模型对常规旋风分离器和加直管旋风分离器内部气相流场进行了数值模拟, 并分析了常规旋风分离器锥体底部的下行流量。结果表明: 常规旋风分离器锥体底部的气流旋转还很激烈, 其下行流量并不为零, 而加直管旋风分离器使尾涡停留在直管中, 增加了粉尘的分离空间, 有利于粉尘的进一步分离。

关 键 词: 旋风分离器; 直管; 雷诺应力输运模型; 数值模拟

中图分类号: TM621.7 文献标识码: A

符号说明

- | | |
|---|---|
| a —分离器入口高度/m | L —上、下行流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ |
| b —分离器入口宽度/m | Ω —常数 |
| D —分离器筒体直径/m | ϕ —源项/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ |
| D_e —排气芯管直径/m | δ —克罗内克尔数 |
| H —筒体高度/m | ϵ —耗散项/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ |
| h —锥体高度/m | ν_i —湍流粘度/ $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ |
| S —排气芯管插入深度/m | σ_k —常数 |
| B —排尘口直径/m | u —速率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| k —湍动能/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ | u' —速率脉动项/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| r —截面上点到中心的距离/m | t —时间/s |
| R —旋转项/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ | C_1 —常数 |
| S, D —方程以柱坐标表达的
曲线项/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ | C_2 —常数 |
| Y, Z — Y 轴、 Z 轴轴向距离/m | V_m —入口风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| D_1 —当量直径/m | T_i —入口湍流强度 |
| ρ —密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | V_z —轴向速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| | P —应力项/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ |

上、下标

- | | |
|------------------------|------------------------|
| $-$ —求时均值 | i —常数, $i = 1, 2, 3$ |
| j —常数, $j = 1, 2, 3$ | k —常数, $k = 1, 2, 3$ |
| m —常数, $m = 1, 2, 3$ | |

1 引 言

旋风分离器是一种广泛应用于发电、化工、建

材、冶金、食品、环保和炼油等众多行业的颗粒除尘设备。常规的旋风分离器都是在其锥体底部接上灰斗, 已有试验表明: 锥体底部的下行流量并不为零, 表明有一部分气流进入了灰斗。因灰斗底部封死, 气流必将反转向上重新进入锥体的内旋流中, 这将会搅起已被分离出的颗粒并把其中较细的颗粒再次带入内旋流中, 产生所谓的“灰斗返混”, 这也是影响效率的一个重要问题。已有研究者在旋风分离器锥体底部增设一直管^[1], 使含尘气流进入直管中进一步分离, 而且有试验证明: 增设直管后, 旋风分离器的分离效率显著提高^[2]。本文针对这一问题应用 CFD 技术对改进后的旋风分离器的分离性能进行研究。

2 模型及计算

旋风分离器结构如图 1 所示, 图中旋风分离器为双切向进口。其中的几何参数为: $a = 91 \text{ mm}$, $b = 40 \text{ mm}$, $D = 200 \text{ mm}$, $D_e = 65 \text{ mm}$, $H = 261 \text{ mm}$, $h = 495 \text{ mm}$, $S = 178 \text{ mm}$, $B = 80 \text{ mm}$ 。

图 2 为旋风分离器的三维网格。常规旋风分离器网格数为 3 万左右, 加直管旋风分离器网格数为 5 万左右, 坐标原点取在旋风分离器顶部。

已有文献[3~6]对旋风分离器气相流场进行

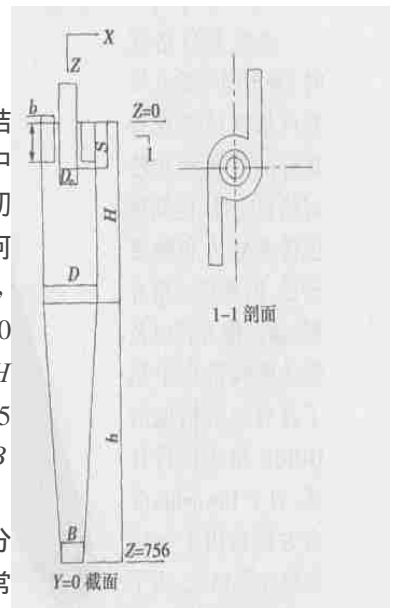


图 1 双进口旋风分离器结构示意图

了详细的数值研究,认为雷诺应力输运模型(RSTM)在预测旋风分离器内部气相流场时和实验结果吻合较好。RSTM的优点是可以准确地考虑各向异性效应,因而大多数被用来模拟旋风分离器内具有强旋流特点的流场。

本文应用CFD商业软件Fluent对常规旋风分离器和加直管(300 mm)旋风分离器气相流场进行了数值模拟,计算中采用RSTM,在Fluent计算中,使用的RSTM湍流模式为^[7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u' u' u' j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u'_k \overline{u' u' u' j}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \times \left[\frac{\nu_i}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u' u' u' j}}{\partial x_k} \right] + P_{ij} + \phi_{ij} + \epsilon_{ij} + R_{ij} + S_{ij} + D_{ij} \quad (1)$$

其中:

$$P_{ij} = -\rho \left[\overline{u' u' u' k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} + \overline{u' u' u' k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right] \quad (2)$$

$$\phi_{ij} = -C_1 \rho \frac{\epsilon}{k} \left[\overline{u' u' u' j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] - C_2 \rho \left[P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right] \quad (3)$$

$$\epsilon_{ij} = -\frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \epsilon \quad (4)$$

$$R_{ij} = -2\rho \Omega_k (\overline{u' u' u' m} \epsilon_{ikm} + u'_i u'_m \epsilon_{jkm}) \quad (5)$$

选取差分格式时,考虑到一阶迎风差分格式虽然具有良好的迁移性和较好的稳定性,但其数值误差较大和精度较低,因此对动量方程、湍动能方程以及湍动能耗散率采用了具有二阶精度的QUICK格式进行计算,对于Reynolds应力方程选用了一阶迎风差分格式。为了加速连续性方程收敛,压力速度耦合采用了SIMPLEC算法。对压力梯度项进行离散时,利用了交错网格的精神,使用PRESTO!

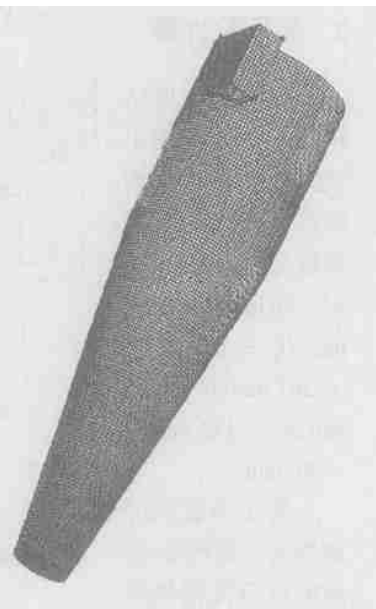


图2 网格划分图

采用了边界条件为:入口边界—入口气流为常温状态的空气,入口

处流速为13.5 m/s, $T_i = 5\%$, 入口当量直径 $D_1 = 1.3 [(ab)^{0.625} / (a+b)^{0.25}] = 0.065$ m。

出口边界—出口假设流动已局部单向化,出口压力为外界大气压。

固壁边界—无滑移边界条件,近壁采用Launder and Spalding提出的标准壁面函数处理。

3 计算结果与分析

3.1 常规旋风分离器计算结果

图3为 $Y=0$ 方向上 $Z=200$ mm、 $Z=400$ mm、 $Z=700$ mm以及 $Z=750$ mm时切向速度分布,从图中可以看出,旋风分离器内流动呈双涡结构,外涡旋近似呈准自由涡流动,内涡旋近似呈准强制涡流动。外涡旋中速度梯度较小,内涡旋中速度梯度很大,内外涡旋交界面上切向速度值最大,交界面的位置在0.7~0.8倍芯管半径处。接近旋风分离器锥体底部($Z=750$ mm)处,切向速度仍然具有较大的值,平均约为10 m/s。姬忠礼在对圆筒形旋风管所作的加尘实验表明在直筒形旋风管的下部存在着一个灰环^[8],其轴向宽度约为 $D/4$ 。这种现象与Alexander的实验观察基本一致^[9]。经流场测定,在灰环所在径向截面上的最大切向速度值只有芯管下口截面处的12%,即切向速度最大值沿轴向衰减了88%。同时灰环截面处切向速度分布已趋平坦,轴向速度值也衰减了90%以上。因此,他将最大切向速度沿轴向衰减了88%的截面(尾涡的位置)与排气芯管下口截面之间的距离定义为自然旋风长,由本文模拟的结果可以看出,对于常规旋风分离器,其自然旋风长一般会大于旋风分离器本体长度,即漩涡的尾部并不位于锥体底部,如果给其提供空间的话,漩涡仍有向下旋转的可能。

图4为 $Y=0$ 剖面上 $Z=750$ mm端面轴向速度径向分布,图中可以看出,在接近旋风分离器锥体底部,轴向速度并不具有很好的轴对称性,而且该位置轴向速度并没有完全衰减,绝对值约为0.3~0.4 m/s。轴向速度沿径向又分为上行流和下行流,上下行流的分界点处的轴向速度为零。旋风分离器的每一断面处,无论是上行流区的上升流量,还是下行流区的下降流量均可通过轴向速度对过流面积的积分求得。即:

$$L = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r V_z dr \quad (6)$$

其中位于轴向速度等于零直线上部的为下降流量。

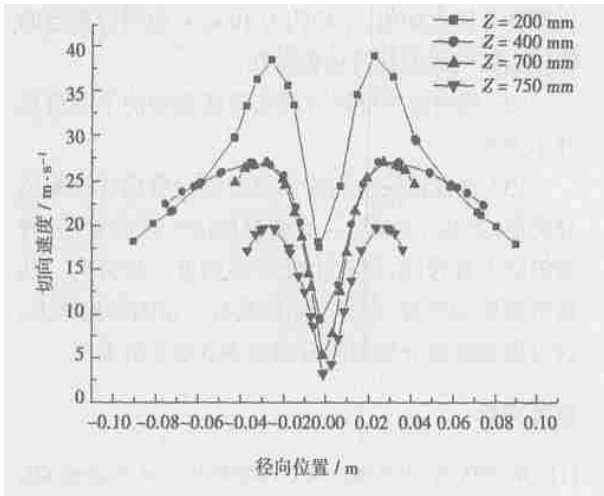


图 3 $Y = 0$ 剖面上切向速度沿径向分布

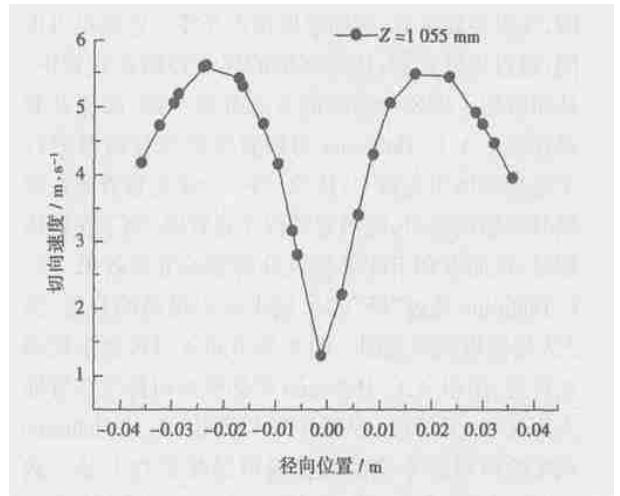


图 5 $Y = 0$ 剖面上 $Z = 1055$ mm 时切向速度分布

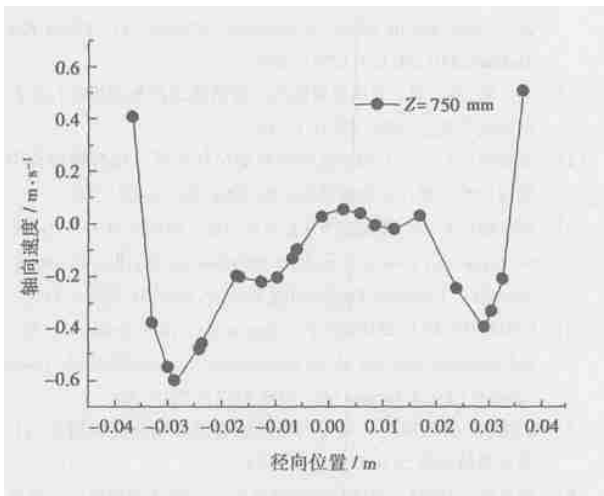


图 4 $Y = 0$ 剖面上 $Z = 750$ mm 时轴向速度分布

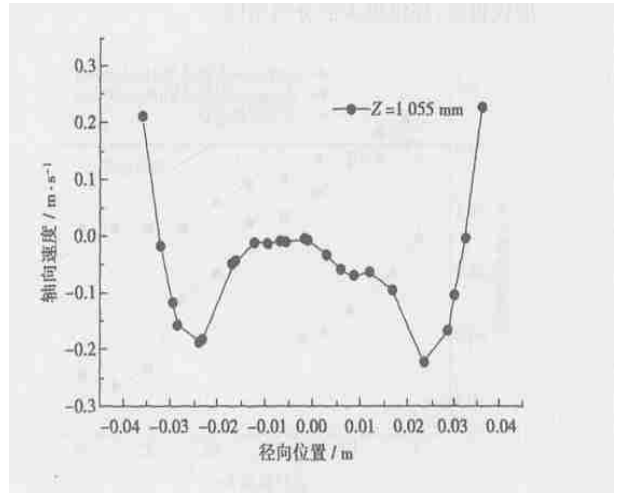


图 6 $Y = 0$ 剖面上 $Z = 1055$ mm 时轴向速度分布

从图 4 可以看出, $Z = 750$ mm 端面处的下降流量并不为零, 表明有一部分气流进入了灰斗。由于灰斗底部封死, 气流必将反转向上重新进入锥体的内旋流, 这将会搅起已被分离出的颗粒并把其中较细的颗粒再次带入内旋流中, 产生所谓的“灰斗返混”, 严重影响分离器的分离效率。正是从这个意义上看, 底部加直管旋风分离器使得含尘气流进入直管内, 从而得到进一步分离, 提高分离效率。

3.2 加直管旋风分离器计算结果

图 5 为加直管旋风分离器直管中 $Z = 1055$ mm 时的切向速度分布, 从该图可以看出: 直管中切向速度也呈“双涡”结构, 在直管中心附近, 切向速度值最大。在接近直管的底部, 气流切向速度平均约为 3~4 m/s。同时图 6 中该端面的轴向速度分布也表

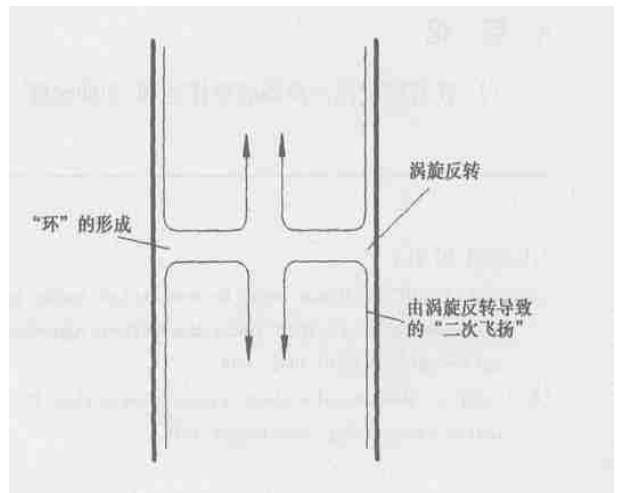


图 7 旋风分离器内“环”的形成

明, 气流旋转至此, 轴向速度接近于零。这些足以说明: 通过增设直管, 使得涡旋的尾部停留在直管中, 从而增加了旋风分离器的有效分离空间, 改善其分离性能。A. C. Hoffmann 对加直管旋风分离器进行了喷烟和加尘实验^[1], 认为: 当一个延长直管附在旋风分离器底部时, 尾涡常常位于直管段, 而在锥体部分, 从而有利于改善旋风分离器的分离效果。A. C. Hoffmann 通过“环”的形成来确定尾涡的位置, 图 7 为尾涡形成示意图。图 8 为不同入口风速下尾涡的位置, 图中 A. C. Hoffmann 喷烟实验时排气芯管插入深度 $S=0.2\text{ m}$ 。从图中可以看出, A. C. Hoffmann 的实验结果和本文的数值模拟结果定性上是一致的, 证明了数值模拟的正确性。同时, 实验和计算都发现, 随着入口风速的增加, 尾涡有向下移动的趋势。因此, 在入口风速较大的情况下, 还可以进一步加长直管, 提供更大的分离空间。

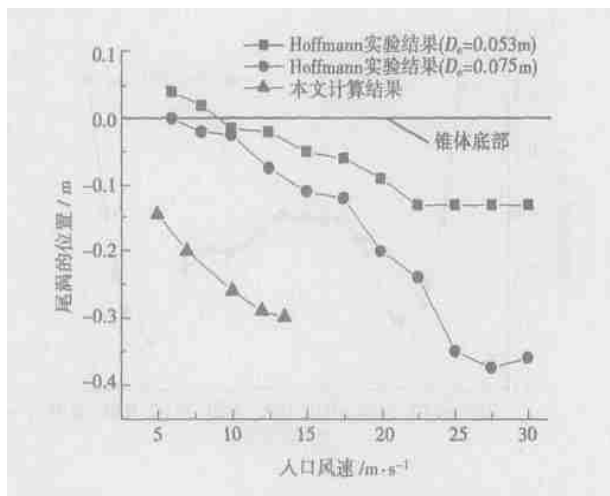


图 8 尾涡位置随入口风速的变化

4 结 论

(1) 在常规旋风分离器的锥体底部, 切向速度

仍然具有较大的值, 平均约为 10 m/s , 说明分离器的锥体底部气流的旋转还很激烈;

(2) 通过常规旋风分离器锥体底部的下降流量并不为零;

(3) 这种比较激烈的下降流量会造成常规旋风分离器的“灰斗返混”。而底部加上一段直管后, 将漩涡引入直管内, 使含尘气流得到进一步分离。从数值模拟结果看, 直管空间仍具有一定的分离能力, 这对提高旋风分离器的分离效率具有实际意义。

参考文献:

[1] HOFFMANN A C, JONGE R DE, ARENDS H, *et al.* Evidence of the ‘natural vortex length’ and its effect on the separation efficiency of gas cyclones[J]. *Filtr Sep*, 1995, 32: 799–804.

[2] STEFAN OBERMAIR, GERNOT STAUDINGER. The dust outlet of a gas cyclone and its effects on separation efficiency[J]. *Chem Eng Technol*, 2001, 24(12): 1259–1263.

[3] 毛 羽, 庞 磊. 旋风分离器内三维紊流场的数值模拟[J]. 石油炼制与化工, 2002, 33(2): 2–6.

[4] 王海刚, 刘 石. 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[J]. 热能动力工程, 2003, 18(4): 337–342.

[5] HOEKSTRA A J, DERKSEN J J, VAN DEN AKKER H E A. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones[J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54: 2055–2065.

[6] GRIFFITHS W D, BOYSAN F. Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modeling of the performance of a numerical of cyclone samplers[J]. *J Aerosol Sci*, 1996 27(2): 281–304.

[7] 彭维明. 切向旋风分离器内流场的数值模拟和试验研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 20–24.

[8] 姬忠礼, 吴晓林. 旋风分离器自然旋流长的实验研究[J]. 石油学报, 1993, 9(4): 86–91.

[9] ALEXANDER R M. Fundamentals of cyclone design and operation [J]. *Proc Australas Inst Min Metall*, 1949, 152: 203–228.

(上接第 40 页)

[3] IEEE COMMITTEE. Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1973 92(6): 1904–1914.

[4] ORDYS A. Modelling and simulation of power generation plants[M]. London: Springer-Verlag London Limited, 1994.

[5] 李运泽, 严俊杰, 林万超, 等. 压水堆核电机组二回路的矩阵分析法[J]. 热力发电, 2000 29(5): 26–28.

[6] 李运泽, 杨献勇. 超临界直流锅炉长期动态特性的建模与仿真[J]. 热能动力工程, 2003 18(1): 23–26.

[7] 李运泽, 杨献勇. 大型锅炉长期动态特性研究中的烟气计算模型[J]. 热能动力工程, 2003 18(2): 170–172.

object. Through an exposition of neural network discrimination and modeling principle the authors have by an analysis of power plant on-site data set up respectively a linear mathematical model of steam-drum water level relative to feedwater flow rate and a nonlinear model of superheated steam temperature relative to specific value β . As the neural network-based modeling can result in high computation speed and precision, the model output basically reflects the actual operating conditions of the thermotechnical object. **Key words:** thermotechnical object, neural network, on-site data, dynamic modeling, simulation

电厂热力系统的长期动态特性模型= **Long-term Dynamic Characteristics Model of a Power Plant Thermodynamic System** [刊, 汉] / LI Yun-ze, WANG Jun (College of Aeronautical Science & Engineering under the Beijing University of Astronautics and Aeronautics, Beijing, China, Post Code: 100083), YANG Xian-yong (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 38 ~ 40, 44

The long-term dynamic characteristics of a thermodynamic system are of major significance to the design of simulation or control systems for various types of thermal power plants. Through a rational analysis and simplification of relevant mechanism a mathematical model of long-term dynamic processes has been set up for a thermodynamic system from an integral standpoint. Such an integral dynamic model can fairly rationally reflect the heat accumulation and work-performing law of the thermodynamic system in a long-term dynamic process. As a result, the above model can remedy the deficiency of the dynamic model of present-day thermal power plants and better meet the requirements for analyzing plant long-term dynamic characteristics and studying plant load control strategy. With the model serving as a tool a simulation study was conducted of the long-term dynamic characteristics of a 600 MW supercritical power plant. The simulation results have been found to be rational and accurate. **Key words:** power plant thermodynamic system, long-term dynamic characteristics, dynamic thermal balance, mathematical model

底部加直管旋风分离器的性能预测= **Performance Prediction for a Cyclone Separator with an Added Vertical Pipe at Its Bottom** [刊, 汉] / QIAN Fu-ping, ZHANG Ming-yao (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Research Institute of Thermal Energy Engineering and Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 41 ~ 44

To cope with the problem of “the re-entrainment into the hopper of fine dust particles in an inner vortex flow due to the agitation of separated particles” occurring in conventional cyclone separators, some researchers have proposed the adding of a straight pipe at the bottom of the separator, thereby allowing dust-laden air to enter the pipe for further separation. By using a Reynolds Stress Transportation Model (RSTM) a numerical simulation was conducted of the internal gas-phase flow field in a conventional cyclone separator and in a cyclone separator with an added straight pipe at its bottom. Furthermore, an analysis was performed of the downward flow at the cone bottom of the conventional cyclone separator. The results of the analysis indicate that the gas flow eddying at the cone bottom of the conventional cyclone separator is found to be still very intense and its downward flow does not amount to zero. On the other hand, the cyclone separator with an added straight pipe has made its tail vortex stagnating in the straight pipe. This has led to the provision of an additional separation space for ash dust, creating a favorable condition for its further separation. **Key words:** cyclone separator, straight pipe, Reynolds stress transportation model, numerical simulation

往返式冷凝器中流场数值模拟的研究= **A Study of the Numerical Simulation of Flow Field in a Reciprocating**