

文章编号: 0253 - 9993 (2006) 05 - 0627 - 04

# DSM 重介质旋流器流场的数值模拟

刘 峰<sup>1,2</sup>, 钱爱军<sup>2</sup>, 郭秀军<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 (北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 煤炭科学研究总院 唐山分院, 河北 唐山 063012)

**摘 要:** 采用计算流体力学软件, 选用 RSM 湍流数值计算模型, 对 DSM 型重介质旋流器的流场进行了数值模拟. 研究了 DSM 型重介质旋流器流场的速度分布、密度分布和压力分布, 得出 4 点结论: 旋流器内的流体沿着溢流管的外侧向下流动, 使旋流器分选时存在短路流, 降低了旋流器的分选效率. 旋流器内的轴向速度越接近中心越高, 大约在旋流器半径的中部通过零点, 所有速度为零的个点形成了零轴速包络面 (LZVV). 旋流器内的切向速度从内向外逐渐升高, 在空气柱附近达到最大值, 然后逐步下降到最低点. 由于回流的作用, 在旋流器中间造成负压区形成了空气柱, 空气柱截面直径大约为溢流口直径的 0.6 倍.

**关键词:** DSM 重介质旋流器; 速度场分布; 压力场分布; 密度场分布

**中图分类号:** TD922.7 **文献标识码:** A

## Numerical simulation of flow field in the DSM heavy medium cyclone

LIU Feng<sup>1,2</sup>, QIAN Ai-jun<sup>2</sup>, GUO Xiu-jun<sup>2</sup>

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Tangshan Branch, China Coal Research Institute, Tangshan 063012, China)

**Abstract:** The numerical simulation was made to the flow field in the DSM heavy medium cyclone by using the software of CFD (computational fluid dynamics) and RSM (Reynolds Stress Model) of the turbulent flow. What's more, the velocity distribution, density distribution and pressure distribution of the flow field in the DSM heavy medium cyclone were studied as well, thus following four conclusions were reached: the fluid in the cyclone flows downwards along outside of the overflow pipe, and short-circuit flow occurs during the separation, thus reducing the separation efficiency of the cyclone. The axial velocity in the cyclone becomes quicker to the centre and goes through the zero point approximately in the middle of radius of the cyclone, thus all the points where velocities are zero form the zero-axial velocity envelope plane (LZVV). The tangential velocity in the cyclone improves gradually from inside to outside and reaches the maximum close to the air column and then reduces step by step until to the minimum. Due to effect of the return flow, a negative pressure zone forms in the middle of the cyclone and the air column whose sectional diameter is about 0.6 times of the diameter of the overflow outlet occurs here.

**Key words:** DSM heavy medium cyclone; velocity field distribution; pressure field distribution; density field distribution

选煤用的重介质旋流器是在分级旋流器的基础上发展起来的. 1945 年荷兰国家矿山局 (Duth State Mines) 的一套从分级旋流器演变而来的, 处理能力为 15 t/h 的圆锥 - 圆锥型重介质旋流器 (简称 DSM) 中间试验装置投入运转. 荷兰最初研制的 DSM 重介质旋流器是目前世界上应用最广泛的一种末煤重介质

收稿日期: 2005 - 12 - 20

基金项目: "十五" 国家科技攻关基金资助项目 (2004BA615A - 12)

作者简介: 刘 峰 (1957 - ), 男, 安徽怀远人, 博士, 研究员. Tel: 0315 - 2813144, E - mail: lf - mail@163.com

分选设备。许多国家如美国、日本、德国、波兰和原苏联、捷克等国都仿制了 DSM 重介质旋流器。我国的  $\phi 500$ ,  $\phi 600$ ,  $\phi 700$ ,  $\phi 900$ ,  $\phi 1\ 200$  等产品重介质旋流器均属于这种类型<sup>[1]</sup>。

## 1 DSM 旋流器流场数值模拟条件

### 1.1 旋流器的参数

所用的 DSM 旋流器模型的结构 (图 1) 和工艺参数: 旋流器直径  $D$  为 98 mm; 锥角为  $20^\circ$ ; 进口管直径  $D_c$  为 25 mm; 溢流管直径  $D_0$  为 35 mm; 底流口直径  $D_u$  为 27 mm; 溢流管插入深度  $h$  为 62 mm; 柱段长度  $H$  为 85 mm; 进口压强  $P$  为 49 kPa; 进料流量  $Q_c$  为  $6.88\text{ m}^3/\text{h}$ ; 溢流口流量  $Q_d$  为  $1.72\text{ m}^3/\text{h}$ , 模拟对象为水、空气与固体三相流。

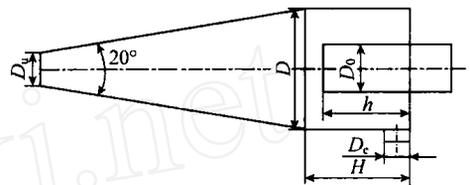


图 1 DSM 旋流器模型

Fig. 1 The model of DSM cyclone

### 1.2 模拟边界条件的选择和确定

旋流器的器壁处流体的速度设为 0, 进料口设为速度入口, 底流口和溢流口设为压力出口。

(1) 进口条件  $v_i = 4Q_c/d_i^2$ ,  $k_i = 0.003\ 75v_i^2$ ,  $\epsilon_i = k_i/0.4d_i$ , 其中  $v_i$  为进料口的试验平均速度;  $Q_c$  为进料流量;  $d_i$  为进料口直径;  $K_i$  为进料口端动能;  $\epsilon_i$  为进料口端动能耗散率。

(2) 出口条件 重介旋流器的底流口和溢流口可认为是充分发展流。因而可根据 Fluent6.1 软件包的要求进行估算, 所用公式<sup>[2]</sup>为  $Re = vD/\nu$ ,  $l = 0.16Re^{-1/8}$ ,  $l = 0.07L$ , 其中  $Re$  为雷诺数;  $v$  为溢流口和底流口的试验平均速度, 计算公式同进口;  $D$  为溢流口和底流口的内直径;  $\nu$  为水的运动黏性系数;  $l$  为湍流强度;  $l$  为湍流长度标尺;  $L$  为水力直径, 对于充分发展的管流取  $L = D$ 。

(3) 壁面的处理 对于模拟的壁面设为标准的固壁。

### 1.3 数值模拟流程

本文的数值模拟流程主要是以 Fluent 6.1 软件包为主的模拟流程。分为两部分: 前处理部分 (Gambit) 主要进行物理建模、网格划分及边界条件位置的设定等; 模拟计算核心处理部分 (Fluent) 包含了各种边界的参数设定、数值分析计算、结果绘图和数据分析等。

在进行数值分析前, 本文利用 Gambit 软件来建造物理模型并设定相关尺寸。因为旋流器是单个入口, 计算得到的速度场在入口附近沿对称轴具有非对称性, 因此在对旋流器建模时选用 3D 进行模拟<sup>[2]</sup>, 最后以 .msh 文件输出, 然后转到 Fluent 软件下处理。本工作利用 Fluent 软件的有限体积法的技巧, 将各方程离散成可以数值计算的代数方程, 本文的数值模拟采用了分离法来进行迭代计算。在进行大量的不同模拟和文献查阅后确定了代数方程的离散方法: 压力相 Presto 法; 压力与速度之间的耦合 Simple 法; 连续方程式、动量方程、能量方程 Quick 法。按上述方法进行数值模拟, 迭代的松弛因子为 Fluent 软件的默认值, 对 DSM 旋流器的流场, 一般当迭代超过 3 000 次时还没有收敛则说明数据是发散的, 要调整网格和设定参数重新进行数值模拟。

## 2 DSM 旋流器流场数值模拟结果

根据文献 [3], 流场模拟选用 RSM 湍流数值计算模型。从 DSM 旋流器的 XY 面的剖面图 (图 2) 可以看出旋流器内的一个轴剖面的速度分布全貌和零轴速包络面 (LZVV 包络面)。对 DSM 旋流器内速度场使用激光测速仪 (LDV) 测量时作了 6 个截面, 以旋流器的筒体同圆锥的相交面为基准面。在基准面下方的垂直距离 27, 47, 67, 87, 107, 127 mm 处分别平行截取 6 个面, 由上到下依次标号为

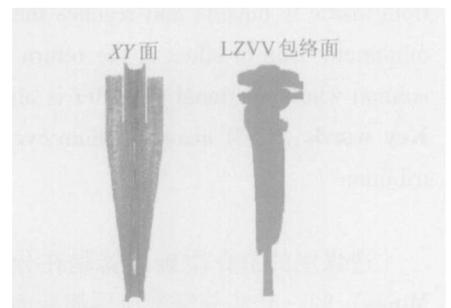


图 2 DSM 旋流器 XY 面的速度剖面图和 LZVV 包络面

Fig. 2 Profile of velocity on the XY surface and LZVV envelope of the DSM cyclone

截面.

### 2.1 轴向速度

轴向速度数值模拟与试验测量数据比较如图 3 所示. 由图 3 可见, 实验测量和数值模拟数据在轴向上基本吻合. 旋流器内的轴向速度从器壁越接近中心越高; 速度由负变正, 大约在旋流器半径的中部通过零点, 形成所谓零轴速包络面 LZVV. 该面内部流体向上流动形成内旋流, 而在外部的流体则向下流动形成外旋流.

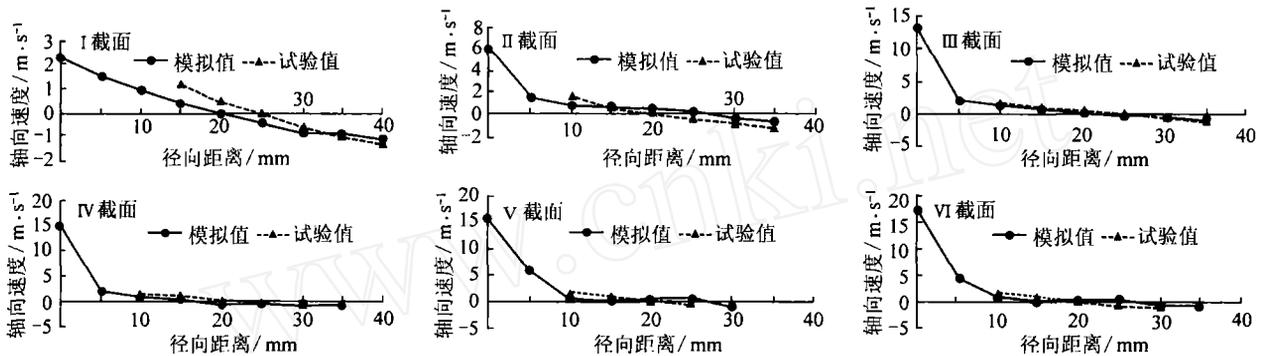


图 3 ~ 截面轴向速度模拟值与试验测量值的对比

Fig. 3 Comparison of simulated values and experimental values of axial velocity on the to sections

### 2.2 切向速度

数值模拟和实验测量得到的切向速度如图 4 所示. 由图 4 可见, 除去靠近壁面的点拟合情况不太好外, 其他点拟合得均比较好. 旋流器内的切向速度总体的变化趋势是从内向外逐渐升高, 在空气柱附近达到最大值, 然后逐步下降到最低点<sup>[4]</sup>. 这一变化趋势同从理论上分析强制涡和自由涡的结论相对应, 从而证明了旋流器内确实存在着这两种涡.

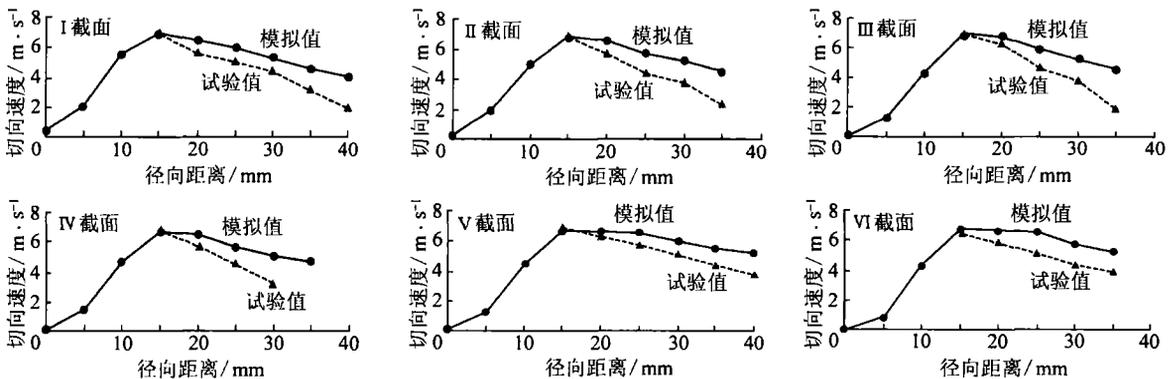


图 4 ~ 截面切向速度模拟值与试验测量值的对比

Fig. 4 Comparison of simulated values and experimental values of tangential velocity on the to sections

### 2.3 径向速度

径向速度分布在实验中没有测量. 文献 [5] 表明, 旋流器径向分布为: 随着位置从器壁趋向轴心, 径向速度逐渐增大, 在空气柱边缘附近又急剧降低; 锥段径向速度方向始终由器壁指向轴心; 内旋流区的径向速度比外旋流区的径向速度变化幅度大 (图 5). 由图 5 看出, 数值模拟出的径向速度分布变化趋势同文献和理论推导的变化趋势是一致的.

### 2.4 空气柱的描述

关于空气柱对旋流器分离效果和能耗的影响褒贬不一<sup>[6]</sup>, 但空气柱是确实存在旋流器中. 在旋流器内由于回流的作用在溢流口和底流口之间形成了空气柱. 由图 6 (b) 可以看出中间形成一个负压区, 由

于这个负压区的存在将空气从底流口吸入从溢流口排出,从而形成了空气柱.由图 6 (a) 的密度分布图可以看出中间存在着一个密度为 1.225 (空气密度) 区域,这也证明了空气柱的存在.图 6 (b) 显示的空气柱截面直径大约为溢流口直径的 0.6 倍,这也与实验测量到的空气柱直径相符.

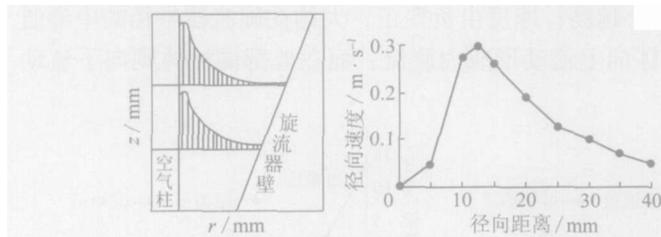


图 5 激光测速仪测出的径向速度与 I 截面模拟径向速度

Fig. 5 Radial velocities indicated by the laser tachometer and simulated on the I section

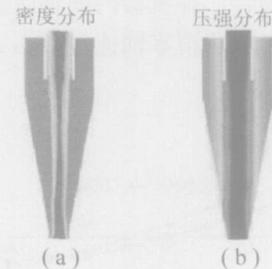


图 6 DSM 旋流器的密度和压强分布

Fig. 6 Distribution of density and pressure strength of the DSM cyclone

### 3 结 语

(1) 由速度分布图可以看出,在旋流器内的流体沿着溢流管的外侧存在着一个向下的流动区域,在溢流管的下端同溢流会合从溢流管流出.从而导致了旋流器分选时有部分物料在进料口附近沿溢流管外壁向下存在短路流,使物料没有进入分选区域就随溢流管排出,造成溢流跑粗的现象,降低了旋流器的分选效率;同时还可见在旋流器内流体沿旋流器的内壁存在一个一直到底流口的下滑区,这个高梯度速度变化的下滑区的存在有利于重粗颗粒快速排出,但是轻细颗粒一旦进入这一区域也会随着排除,这就造成小部分轻细颗粒短路到底流;溢流短路比底流短路的几率大.因此在设计旋流器时应选用合适的工艺和结构参数来减小或消除这两种短路流的存在.

(2) 由图 3 表明,旋流器内的轴向速度从器壁越接近中心越高;速度由负变正,大约在旋流器半径的中部通过零点.所有速度为零的点形成了所谓零轴速包络面 LZVV (图 2).该面内部流体向上流动形成内旋流,而在外部的流体则向下往底部流动形成外旋流<sup>[7]</sup>.由图 4 可见,旋流器内的切向速度总体的变化趋势是从内向外逐渐升高,在空气柱附近达到最大值,然后逐步下降到最低点.这一变化趋势同理论分析中的强制涡和自由涡相对应,从而证明了旋流器内确实存在着这两种涡.

(3) 由图 6 (b) 可以看出,在旋流器内由于回流的作用,在旋流器中间形成一个负压区,由于这个负压区的存在把空气从底流口吸入从溢流口排出,从而形成了空气柱.由图 6 (a) 的密度分布图可以看出,中间存在着一个密度为 1.225 (空气密度) 的区域,这也证明了空气柱的存在.图 6 (b) 显示的空气柱截面直径大约为溢流口直径的 0.6 倍,这也与实验测量到的空气柱直径相符.

本文证明,用 Fluent 软件,选取雷诺应力湍流计算模型 (RSM),进行 DSM 重介质旋流器流场的数值模拟,可以得到理想的模拟结果,为进一步开展重介质旋流器的理论研究打下了基础.

### 参考文献:

- [1] 王祖瑞,石德明,王振国,等.重介质选煤的理论与实践 [M].北京:煤炭工业出版社,1988.175~187.
- [2] 李勇.介绍计算流体力学通用软件——Fluent [J].水动力学研究与进展 (A辑),2001,16(2):254~258.
- [3] 刘峰,钱爱军,郭秀军.重介质旋流器流场湍流数值计算模型的选择 [J].煤炭学报,2006,31(3):346~350.
- [4] 徐继润.水力旋流器强制涡及内部损失的研究 [D].沈阳:东北工学院,1989.82~84.
- [5] 李晓钟.水力旋流器内流体流动特性及能耗规律的研究 [D].成都:四川联合大学,1997.100.
- [6] 熊广爱.水力旋流器中空气柱的作用 [J].有色金属 (选矿部分),1982(4):26~29.
- [7] 褚良银.水介旋流器分离性能强化研究 [J].过滤与分离,2004(1):1~4.