

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.08.009

## 水力旋流器流场大涡模拟及其结构改进

郭雪岩, 王斌杰, 杨帆

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)



郭雪岩

**摘要:** 为研究水力旋流器内部流动现象,采用大涡模拟(LES)方法对其内部流动进行了数值模拟,分析了流场内轴向零速包络面、溢流口周围循环流和短路流,以及最大切线速度轨迹面等流动现象或结构特点.结合水力旋流器设计方法与流体力学理论,提出了水力旋流器几何结构的修改方案.将改进后结构的模拟结果与原结构结果进行对比,结果表明:增大溢流管壁厚,有效地避免了溢流管周围循环流的产生;增大溢流管的插入深度,对减少短路流效果不明显;适当增大水力旋流器柱筒壁的长度,调整锥角角度,可进一步改善零速包络面以及最大切线速度轨迹面的结构,使得内流场更加稳定.改进后的方案使水力旋流器内流场分布更加合理,有助于提高分离性能.

**关键词:** 水力旋流器;大涡模拟;短路流;循环流;轴向零速包络面

**中图分类号:** S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2013)08-0696-06

郭雪岩,王斌杰,杨帆.水力旋流器流场大涡模拟及其结构改进[J].排灌机械工程学报,2013,31(8):696-701.

## LES analyses of flow fields and structure improvements of hydrocyclones

Guo Xueyan, Wang Binjie, Yang Fan

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

**Abstract:** LES (large eddy simulation) analysis has been carried out to investigate the flow fields in a hydrocyclone. Detailed flow structures and phenomena such as shortcut flow, internal circulations, locus of zero vertical velocity (LZVV) and locus of maximum tangential velocity (LMTV), have been analyzed. Combined with theories of hydrocyclone design and fluid mechanics, modification of the internal structures was conducted, including increasing thickness of overflow pipe wall, increasing depth of overflow tube insertion, appropriately increasing length of the hydrocyclone cylinder, decreasing taper angle etc. The further LES analysis shows that thicker overflow pipe wall can effectively restrain the circulation flow near the overflow pipe; but deeper overflow tube does not obviously hamper the short-circuit flow. Longer overflow tube with appropriate cone angle can determine a better LZVV and LMTV. Compared with the original cyclone, the flow fields in the modified one are obviously improved, which implies that a better liquid-solid separation can be expected.

**Key words:** hydrocyclone; large eddy simulation; shortcut flow; circulation flow; locus of zero vertical velocity

水力旋流器作为一种离心分离设备广泛应用于工程领域.水力旋流器虽结构简单,但其内部流

场的流动结构却相当复杂,利用计算流体力学方法对水力旋流器进行数值模拟,可为其优化设计提供

收稿日期: 2012-10-22; 网络出版时间: 2013-07-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20130720.0935.013.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176127,10902070); 上海市教育委员会重点学科建设资助项目(J50501)

作者简介: 郭雪岩(1964—),男,辽宁兴城人,副教授(xyguo@usst.edu.cn),主要从事计算流体力学方法及应用研究.

王斌杰(1987—),男,浙江桐乡人,硕士研究生(began2004wbj@gmail.com),主要从事计算流体力学在水力旋流器中的应用研究.

依据,最终提高旋流器的效率和性能<sup>[1-3]</sup>.有学者采用雷诺时均纳维-斯托克斯(Reynolds-averaged Navier-Stokes RANS)方程结合  $k-\varepsilon$  湍流模型或雷诺应力(Reynolds stress model, RSM)模型数值模拟水力旋流器内部流场,得到了定性的分析结果<sup>[4-5]</sup>.

近年来,LES 也已被应用于水力旋流器内部流动的数值研究. Delgadillo 和 Rajamani 等<sup>[6-7]</sup>分别采用 LES、RSM 及“重整化群” $k-\varepsilon$  湍流模型模拟旋流器流动,将其结果与试验结果对比发现,大涡模拟计算更为精确;Lim 等<sup>[8]</sup>采用粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)试验来验证 LES 和“流体体积”(volume of fluid, VOF)两相流模型结合的水力旋流器流场,模拟结果表明,速度矢量场及空气柱的结构与试验吻合良好;Schmidt 等<sup>[9]</sup>采用 LES 方法处理流体的非稳态特性,得到了较好的结果.总之,LES 方法可以很好地实现旋流器流场的精确分析.

文中采用 LES 方法对文献[5]的水力旋流器内部流动现象进行研究.通过观察流场内溢流口附近的循环流、短路流现象以及轴向零速包络面等特征结构,评估旋流器几何结构的合理性,再结合相关设计方法及流体力学的理论提出改进方案,并对改进方案进行分析和评价.

## 1 数值方法与物理模型

文中采用 CFD 软件 Fluent 6.3 模拟水力旋流器内流场.该软件的流动求解器以有限体积法离散流动控制方程,采用显式时间推进求解非定常流动.湍流模拟采用 LES,其亚格子模型为动态应力的 Smagorinsky-Lilly 模型.压力与速度耦合的方法为 PISO 算法,压力项离散采用 Pressure Staggered Option (PRESTO) 格式,时间步长设置为  $10^{-6}$  s.

### 1.1 大涡模拟方法

#### 1.1.1 控制方程

对于不可压缩流动,笛卡儿坐标系下张量形式的流体控制方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}^{\text{sgs}}}{\partial x_j} + f_i, \quad (2)$$

$$\tau_{ij}^{\text{sgs}} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j, \quad (3)$$

式中: $u_i$  为流体的瞬时速度, $u_i = \bar{u}_i + u_i'$ ,其中 $\bar{u}_i$ 为过滤后的大尺度速度,即可解尺度速度, $u_i'$ 为过滤后的小尺度脉动,即亚格子尺度速度; $\bar{u}_i \bar{u}_j$ 为速度过滤后动量通量; $\bar{u}_i u_j$ 为流动中流体动量通量的过滤值,它是未知量,需要对 $\bar{u}_i u_j$ 建立模型; $p$ 为压力的过滤值; $\rho$ 为流体密度; $\nu$ 为流体运动黏度; $\tau_{ij}^{\text{sgs}}$ 表示亚格子应力,它是过滤小尺度脉动和大尺度湍流的动量输运; $f_i$ 为质量力.若要实现大涡模拟计算,就必须构造亚格子应力的封闭模式<sup>[10]</sup>.

#### 1.1.2 亚格子模型

亚格子模型是大涡模拟的关键内容.文中采用 Smagorinsky 模式,它是雷诺平均混合长度模式在大涡模拟中的推广<sup>[11-12]</sup>,Smagorinsky 模式中亚格子涡黏系数为

$$\nu_t = C_s^2 \Delta^2 \sqrt{\langle 2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} \rangle}, \quad (4)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad (5)$$

式中: $C_s$ 为模型常数; $\Delta$ 为过渡尺度; $\bar{S}_{ij}$ 为可解尺度的变形率张量.

在数值计算中亚格子 Smagorinsky 模式最大的不足在于它的耗散太大,需要一定的方法加以克服.文中采用动态确定模式对其进行修正,其思想是利用 2 次由不同尺度过滤的亚格子应力的关系确定涡黏系数.

### 1.2 物理模型

文中选取 Lim 等<sup>[8]</sup>研究中使用的水力旋流器的结构作为初始结构,结构图如图 1 所示,结构尺寸参数为旋流器内径  $D = 45.0$  mm;入口边长  $a = 10.0$  mm;溢流口内径  $d_0 = 15.0$  mm;溢流管深度  $h_0 = 30.0$  mm;溢流口外径  $d_{\text{out}} = 24.0$  mm;沉砂口内径  $d_s = 8.0$  mm;圆柱段高度  $H = 65.0$  mm;圆锥体角度  $\theta = 28.0^\circ$ .

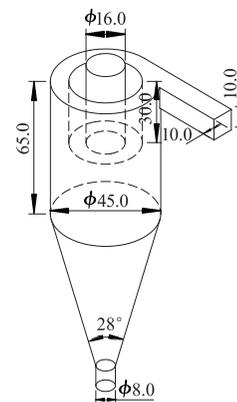


图 1 水力旋流器内流场结构  
Fig. 1 Original flow structure in hydrocyclone

## 2 网格与计算条件

### 2.1 网格划分

文章采用六面体结构网格划分水力旋流器全流域,网格总数为  $5.8 \times 10^6$ ,可以保证计算中对流场小尺度流动结构的精确捕捉.为满足 LES 对近壁面附近网格  $y^+ = 1$ <sup>[13]</sup> 的要求,在壁面内侧布置 15 层左右的边界层网格.

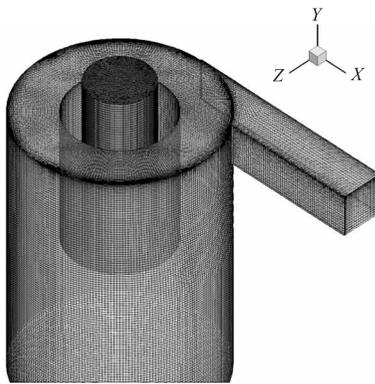


图2 水力旋流器计算区域网格划分  
Fig. 2 Mesh for hydrocyclone

### 2.2 边界条件及初始条件

假设水力旋流器在常温常压下运行,旋流器内水的温度设为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,水的密度为  $998.2\text{ kg/m}^3$ ,动力黏度为  $0.001\text{ m}^2/\text{s}$ .旋流器入口边界条件给定为第一类边界条件,即恒定的速度为  $3\text{ m/s}$ .脉动速度算法选择涡量方法.2个出口均采用压力的第一类边界条件,即相对压力  $p_g = 0$ .设定操作压力为  $p_o = 10\ 325\text{ Pa}$ ,壁面采用无滑移边界条件,初始流场的速度为 0.

## 3 模拟结果分析与设计改进

图3为水力旋流器中的局部流动示意图.标号1,2分别表示外、内旋流动,是旋流器的主要运动形式;标号4是短路流,它是从顶盖沿溢流管外壁向下运动,通过内旋流从溢流管一起流出的流体.由于它没有经过分离作用,分离效果较差,所以在设计中应当避免;标号5是循环流,它是出现在旋流器溢流管与器壁间的循环流动现象,主要是受到溢流管排出能力的影响,它的存在虽然具有二次分离的作用,但是会给水力旋流器带来更多的能量损失,应当减少循环流的产生或者减小循环流量;标号6为最大切线速度轨迹面,该面上的流体质点在水力旋流器中具有最大的切线速度;标号7为轴向零速包

络面,它是内外旋流的分界面,一款高效的水力旋流器,应该拥有较为稳定规整的轴向零速包络面和最大切线速度轨迹面.

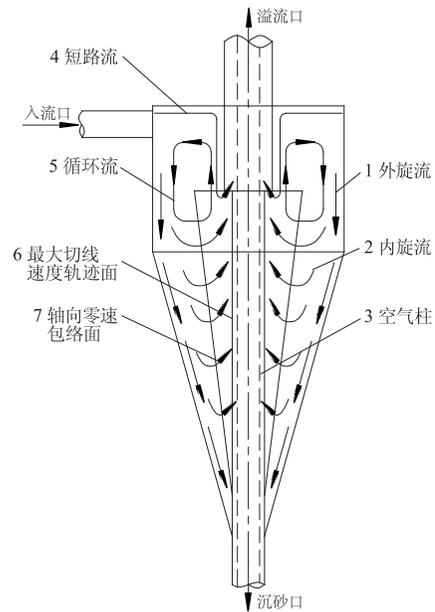


图3 旋流器局部流动示意图  
Fig. 3 Detail flow in hydrocyclone

### 3.1 模拟结果分析

图4为大涡模拟在物理时间  $3.3\text{ s}$  所得到的结果.

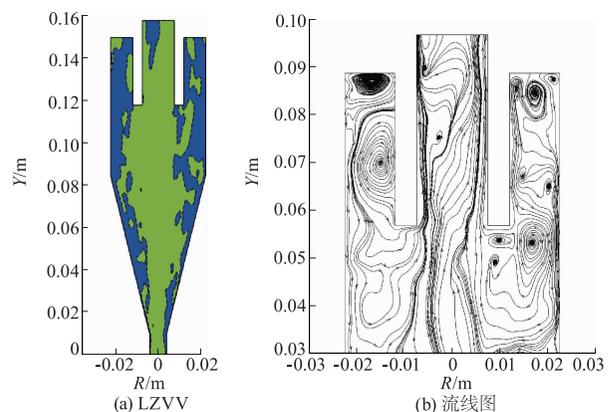


图4 大涡模拟结果零速包络面(LZVV)与溢流口处流线图  
Fig. 4 Locus of zero vertical velocity and streamline around overflow based on LES

根据 Lim 等的研究结论,该结构的水力旋流器内流动在开始后  $1.6\text{ s}$  已达到充分发展.可以认为图4所示流场的宏观尺度已经趋于稳定.图4a中绿色表示轴向速度大于零(方向向上)区域,蓝色表示轴向速度小于零(方向向下)区域,其交界面即为轴向零速包络面 LZVV. LZVV 是循环流的中心线,同时也是内外旋流的分界线<sup>[14]</sup>.在 LZVV 外层流体的

轴向速度小于零,方向向下;在其内层流体的轴向速度大于零,方向向上.由图4a还可以发现,在溢流管管壁之间的区域出现了速度向上的区域,说明该区域可能会出现循环流.而图4b相同区域处的流线图显示,在轴向已经形成了循环流动.循环流的存在大大影响了旋流器工作的能耗.所以在改进设计中,应当考虑减少循环流效应.理想的水力旋流器轴向零速包络面应当是类似于圆柱规整形状.图4a中原始结构水力旋流器的轴向零速包络面十分不规则,表明该旋流器的内外旋流分界面不稳定,内部流动速度脉动大,这将对分离效率产生很大的负面影响.因此,需要改进水力旋流器结构,使其轴向零速包络面具有规则的形状.图4b中,溢流管底部存在着一些短路流动.从前面的分析可知,短路流也会降低旋流器的分离效率,因此在设计改进中应考虑减少短路流的产生.

### 3.2 水力旋流器改进

通过查阅水力旋流设计的相关资料<sup>[14-18]</sup>,得到水力旋流器设计参数的参考范围,见表1.文中基于表中参考值进行水力旋流器参数的选取.表中 $a, b$ 分别为矩形的长和宽, $d_i$ 为入口直径, $X$ 为结构参数, $X/D$ 为结构参数与水力旋流器直径的比值.

水力旋流器的直径指筒体内径,它影响生产能力和分离力度,是水力旋流器的特征参数,文中 $D = 45.0 \text{ mm}$ ,故不做修改.入口直径 $d_i$ 是入口截面的等效直径,

$$d_i = 4 \sqrt{ab}/\pi. \quad (6)$$

目前水力旋流器的入口大部分是矩形,这主要考虑矩形入口可减小湍流的干扰影响.为减小入口段湍流,从而使流动更加稳定,可在入口面积保持不变的前提下增加湿周长度,即由原始尺寸 $10.0 \text{ mm} \times 10.0 \text{ mm}$ 修改为 $12.5 \text{ mm} \times 8.0 \text{ mm}$ .

表1 水力旋流器设计参数对比

Tab. 1 Comparison between parameters of original and modified hydrocyclone

结构参数	Lim 结构	$X/D$	改进结构	$X/D$	$X/D$ 参考值
$D/\text{mm}$	45.0	1.00	45.0	1.00	1.00
$a \times b/(\text{mm} \times \text{mm})$	10.0 × 10.0	—	12.5 × 8.0	—	—
$d_i/\text{mm}$	11.3	0.25	11.3	0.25	(0.15, 0.25) <sup>[8]</sup>
$d_0/\text{mm}$	15.0	0.33	16.0	0.35	(0.20, 0.35) <sup>[11]</sup>
$d_s/\text{mm}$	8.0	0.18	10.0	0.22	(0.07, 0.20) <sup>[12]</sup>
$h_0/\text{mm}$	32.0	0.71	36.0	0.80	(0.50, 0.80) <sup>[13]</sup>
$H/\text{mm}$	65.0	1.44	90.0	2.00	(1.50, 2.00) <sup>[14]</sup>
$\theta/(\text{°})$	28.0	—	20.0	—	(1.50, 20.00) <sup>[15]</sup>

循环流的存在与流量大小主要与溢流管的排出能力有关,还与不规整零速包络面进入溢流管周围区域有关.所以可以考虑几个方面对其改进:①适当增大溢流口直径,修改文献[8]提供的最大范围值,同时为保证沉砂口与溢流口之间的比例,适当增大沉砂口直径;②减小溢流管到筒体的距离以增大溢流管厚度,使内外旋流的分离面保持在溢流管底附近,不进入溢流管与筒体之间的区域.

理想的轴向零速包络面应是规整形状,因此需要改善轴向零速包络面结构,增加流动稳定性,达到提高分离效率的目的.因此增加筒体高度,即加大了流动区域,同时可以延长流器分离时间,使流体脉动减小,起到稳定流动的作用.此外,对于直径为 $45 \text{ mm}$ 的水力旋流器来说,其分离力度在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ <sup>[14]</sup>,属于细粒分级作业,其锥角范围应小于 $20^\circ$ .因此,原始结构中的参数不合理,应加以修改.

为减少部分短路流动现象,可采用改变溢流管插入深度的方法.相关研究表明,随着水力旋流器

溢流管插入深度的增大,顶盖短路流减少<sup>[19]</sup>.但研究中发现循环流与短路流动之间存在一定联系,刻意减少短路流的产生,可能导致循环流的增加.因此,修改水力旋流器结构时,适当地增大了溢流管的插入深度.

## 4 改进结果与分析

图5为结构改进后水力旋流器局部流线图.该图为改进后的旋流器LES模拟自初始化后 $5.0 \text{ s}$ 后得到的流场.由图5可以发现,溢流管到柱筒壁之间区域的流线方向基本为轴向方向.对比图4,5可知,在图4b左侧和右侧出现的沿轴向方向的循环流动并没有在图5中出现,其主要原因是由于修改后的通流面积变窄,流动速度增大,流动方向一致.另外,改进结构前轴向零速包络面部分出现在溢流管与筒壁之间的区域,而在图5a中的相同区域内几乎没有轴向零速包络面存在,说明溢流管周围流体速

度在轴向都是向下的,流动高效合理.改进结构后,轴向零速包络面的主体部分成圆柱状,由溢流口直接连通到沉砂口,说明轴向零速包络面内的流体轴线速度趋势向上,内外旋流交界面分明,该结构的水力旋流器分离效率较高.因此,增加筒体的高度,加大水力旋流器流动的区域,可以延长旋流器分离时间,减小流体脉动,提高旋流器流动的稳定性.

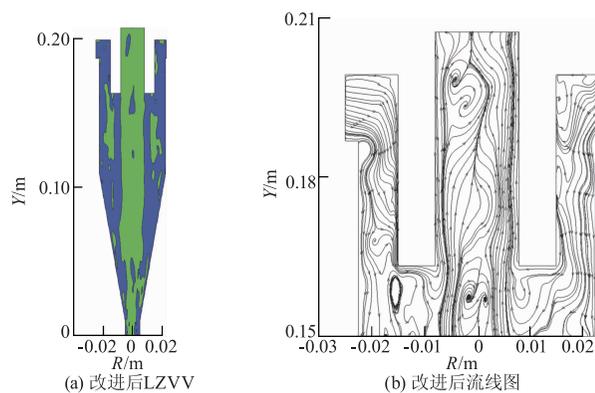


图5 结构改进后零速包络面与溢流口处流线图  
Fig. 5 Locus of zero vertical velocity and streamline of modified hydrocyclone

在改进方案中,虽然增大了溢流管插入深度来减少短路流,但是,水力旋流器在溢流管附近出现的短路流较改进前并无改善,这表明在增大溢流管壁厚度的同时,小幅增大溢流管插入深度并不能改善短路流动,因此还需设计相应的方案修改水力旋流器结构.

图6为水力旋流器改进前后的轴向的速度分布云图,其中黄色部分是水力旋流器内速度最高的区域,即水力旋流器流动中的最大切线速度轨迹面.

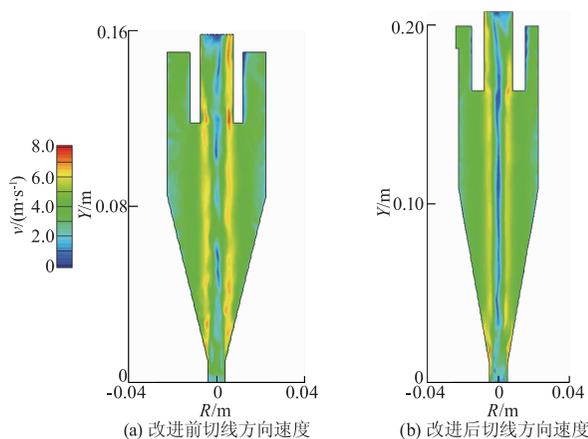


图6 改进结构前后水力旋流器切线速度分布对比  
Fig. 6 Comparison between the tangential velocity distributions of modified and original structure

对比图6a,b可以发现,改进后的最大切线速度

轨迹面以及速度流场分布更加光滑平整,水力旋流器中心低压区速度分布清晰,成一直线,这说明改进后水力旋流器内部流动的脉动大大减小,内部流动更加稳定,这有助于分离效率的提高<sup>[14,20]</sup>.

综合上述流场内流动细节的计算结果可知,改进后水力旋流器的结构更加合理高效.因此可以认为,文中采用大涡模拟方法指导水力旋流器结构改进的技术路线是有效可行的.

## 5 结论

1) 大涡模拟方法准确有效地捕捉到了水力旋流器内流场内轴向零速包络面、溢流口周围循环流及短路流等水力旋流器内特有的流动现象.

2) 增大溢流管壁厚,可有效避免溢流管周围循环流的产生;增大溢流管的插入深度,对减少短路流效果不明显;若适当增大水力旋流器柱筒壁的长度,调整锥角角度,可进一步改善零速包络面以及最大切线速度轨迹面结构,提高内流场稳定性及分离效率.

## 参考文献 (References)

- [1] 蔡圃,王博. 水力旋流器内非牛顿流体多相流场的数值模拟[J]. 化工学报, 2012, 63(11): 3460-3468.  
Cai Pu, Wang Bo. Numerical simulation of multiphase flow field of non-Newtonian fluid in hydrocyclone[J]. CIESC Journal, 2012, 63(11): 3460-3468. (in Chinese)
- [2] 蒋明虎,刘道友,赵立新,等. 锥角对水力旋流器压力场和速度场的影响[J]. 化工机械, 2011, 38(5): 572-576.  
Jiang Minghu, Liu Daoyou, Zhao Lixin, et al. Cone angle effect on hydrocyclone pressure and velocity fields[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2011, 38(5): 572-576. (in Chinese)
- [3] 苏劲,袁智,侍玉苗,等. 水力旋流器细粒分离效率优化与数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(20): 183-190.  
Su Jin, Yuan Zhi, Shi Yumiao, et al. Separation efficiency optimization of liquid-solid hydrocyclone and numerical simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(20): 183-190. (in Chinese)
- [4] Cullivan J C, Williams R A, Dyakowski T, et al. New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism from computational fluid dynamics [J]. Minerals Engineering, 2004, 17(5): 651-660.

- [ 5 ] Schuetz S, Mayer G, Bierdel M, et al. Investigations on the flow and separation behaviour of hydrocyclones using computational fluid dynamics [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2004, 73(2/3/4): 229 - 237.
- [ 6 ] Delgadillo J A, Rajamani R K. A comparative study of three turbulence-closure models for hydrocyclone problem [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2005, 77(4): 217 - 230.
- [ 7 ] Delgadillo J A, Rajamani R K. Exploration of hydrocyclone designs using computational fluid dynamics [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2007, 84(1/2/3/4): 252 - 261.
- [ 8 ] Lim E W C, Chen Y R, Wang C H, et al. Experimental and computational studies of multiphase hydrodynamics in a hydrocyclone separator system [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(24): 6415 - 6424.
- [ 9 ] Schmidt S, Blackburn H M, Rudman M. Impact of outlet boundary conditions on the flow properties within a cyclone [C] // *Proceedings of 15th Australasian Fluid Mechanics Conference*. Sydney, Australia: [ s. n. ], 2004: 13 - 17.
- [ 10 ] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流大涡数值模拟的理论和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [ 11 ] 瞿丽霞, 王福军, 丛国辉, 等. 隔舌间隙对双吸离心泵内部非定常流场的影响 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(7): 50 - 55.  
Qu Lixia, Wang Fujun, Cong Guohui. Effect of volute tongue-impeller gaps on the unsteady flow in double-suction centrifugal pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(7): 50 - 55. (in Chinese)
- [ 12 ] 王春林, 司艳雷, 赵佰通, 等. 旋流自吸泵内部湍流场大涡模拟 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(9): 68 - 72.  
Wang Chunlin, Si Yanlei, Zhao Baitong. Large eddy simulation on interior flow field of rotational flow self-priming pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(9): 68 - 72. (in Chinese)
- [ 13 ] Jiang X, Lai C H. Numerical Techniques for Direct and Large-Eddy Simulations [M]. New York: CRC Press, 2009: 46 - 47.
- [ 14 ] 庞学诗. 水力旋流器技术与应用 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2011: 264 - 273.
- [ 15 ] Zhu Guofeng, Liow J L, Andrew N. Computational study of the flow characteristics and separation efficiency in a mini-hydrocyclone [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2012, 90(12): 2135 - 2147.
- [ 16 ] Martinez L F, Lavin A G, Mahamud M M, et al. Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2008, 47(2): 192 - 199.
- [ 17 ] Hwang K J, Hwang Y W, Yoshida H, et al. Improvement of particle separation efficiency by installing conical top-plate in hydrocyclone [J]. *Powder Technology*, 2012, 232: 41 - 48.
- [ 18 ] Murthy Y R, Bhaskar K U. Parametric CFD studies on hydrocyclone [J]. *Powder Technology*, 2012, 230: 36 - 47.
- [ 19 ] 张丹, 陈焯. 锥角对固液水力旋流器流场及其分离性能的影响 [J]. *流体机械*, 2009, 37(8): 11 - 16.  
Zhang Dan, Chen Ye. Effect of the cone angle on flow field and separation performance of solid-liquid hydrocyclones [J]. *Fluid Machinery*, 2009, 37(8): 11 - 16. (in Chinese)
- [ 20 ] Gao Shuling, Wei Dezhou, Liu Wengang, et al. CFD numerical simulation of flow velocity characteristics of hydrocyclone [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China: English Edition*, 2011, 21(12): 2783 - 2789.

(责任编辑 盛杰)