

水力旋流器内部流场的数值研究

崔宝玉¹, 魏德洲¹, 翟庆祥¹, 张思瑶²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳市气象局 沈阳市气象服务中心, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 在 PIV 实验验证的基础上, 利用 RSM 雷诺应力模型和 VOF 两相流模型对 $\phi 50$ mm 水力旋流器内部流场进行了系统的数值研究. 结果表明: 旋流器内静压从器壁至中心逐渐下降, 静压为 0 处即为空气柱边界, 空气柱内为负压, 空气柱的存在增加了分级过程的能量消耗; 旋流器内切向速度分布符合组合涡特征, 内部为强制涡运动, 外部为半自由涡运动; 零速包络面是轴向速度方向发生改变的转折面, 其上部为柱形, 下部为锥形, 柱形段直径约为溢流管的 2.3 倍; 在外旋流区域径向速度方向从旋流器器壁指向中心, 内旋流区域存在方向相反、位置相对的径向速度, 空气柱内径向速度基本为 0.

关 键 词: 水力旋流器; 数值模拟; PIV 流场测试; 压力分布; 速度分布

中图分类号: TD 922

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)06-0894-04

Numerical Study on Internal Flow Field of Hydrocyclone

CUI Bao-yu¹, WEI De-zhou¹, ZHAI Qing-xiang¹, ZHANG Si-yao²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shenyang Weather Service Centre, Shenyang Meteorological Bureau, Shenyang 110168, China. Corresponding author: WEI De-zhou, E-mail: dzwei@mail.neu.edu.cn)

Abstract: By using RSM (Reynolds stress model) turbulence model and VOF (volume of fluid) two-phase flow model, systematic numerical study on internal flow field of $\phi 50$ mm hydrocyclone was carried out, which had been validated by PIV (particle image velocimetry) measurement results. It shows that internal static pressure of hydroclone gradually declines from wall to center, the static pressure is zero at the boundary of air core, the interior of air core is negative pressure, and additional energy is consumed by air core when the hydrocyclone works. Tangential velocity distribution could be regarded as a combined vortex, inside is forced vortex and outside is quasi-free vortex. The envelope of zero vertical velocity is a turning surface of axial velocity change, its upside is cylinder and its lower part is cone. The diameter of the cylindrical section is 2.3 times as large as overflow outlet diameter. Radial velocity direction is from the wall of the hydrocyclone toward the center in the outer vortex area, radial velocities of opposite direction and relative position exist in the inner vortex area, and radial velocity inside air core is almost zero.

Key words: hydrocyclone; numerical simulation; PIV flow field measurements; pressure distribution; velocity distribution

水力旋流器因其使用成本低、处理量大、占地面积小等优点广泛应用于矿物加工、环保、化工、食品和药剂生产等领域^[1-2]. 水力旋流器的分离特性是由内部流场决定的, 而其内部流场是非常复杂的三维流动^[1]. 从 20 世纪 50 年代开始, 水力旋流器内部流场的研究就成为一个热点. Kelsall 在 1952 年利用频闪仪第一次系统测试了水力旋

流器内部流场流速特征^[3]. 随着激光和高速摄像技术的发展, Dabir 等分别利用激光多普勒测速仪 (LDV) 和粒子图像测速技术 (PIV) 对旋流器内部流场的某些特征进行了测试^[4-5]. 20 世纪 90 年代以后, 计算流体力学 (CFD) 成为研究水力旋流器内部流场的一个重要手段^[6-7]. 近年来, 随着计算技术的发展, Rajamani 等将水力旋流器内部流

场的 CFD 模拟结果与 LDV 和 PIV 等实验测试结果进行对比,二者高度吻合^[8-9].

利用 CFD 方法对水力旋流器内部流场进行数值研究和分析已取得一定进展,但这些研究大多是围绕旋流器内部流场特征的某一方面,如速度分布、静压分布和某些参数影响等^[4-9]. 本文应用流体计算软件 ANSYS/Fluent,基于 RSM 雷诺应力模型和 VOF 两相流模型,对 $\phi 50\text{ mm}$ 水力旋流器内部流场特征进行了系统研究. 在 PIV 实验验证的基础上,分别研究了水力旋流器内部流场的空气柱特征、静压和压力降分布特征以及三维速度分布特征.

1 计算模型的建立和验证

1.1 计算模型

研究用水力旋流器的几何尺寸如图 1a 所示. $z_1 \sim z_5$ 表示被考察的 5 个截面. 旋流器模型的网格划分如图 1b 所示,网格采用六面体网格,经无关性验证,网格数量取 40 万.

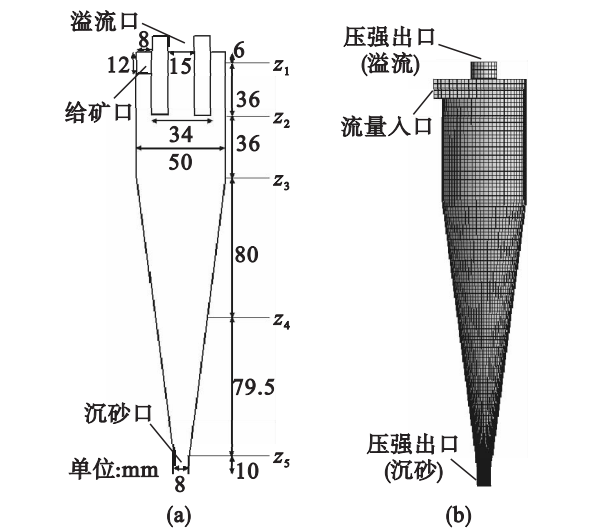


图 1 几何模型与网格
Fig. 1 Geometric model and grid

(a)—水力旋流器几何参数; (b)—网格.

数值计算采用 RSM 雷诺应力模型作为湍流模型,RSM 模型已被证明能较好地预测各向异性湍流;采用 VOF 两相流模型捕捉旋流器内空气柱的气液界面. 同时采用 SIMPLE 数值方法及高精度的 QUICK 离散格式进行数值计算.

水力旋流器给矿口采用流量入口,给入水的体积比为 1,流量设置为 35 L/min . 溢流口和沉砂口均采用压强出口,且与大气相通,即相对压强为 0,定义空气的回流系数为 1. 固壁采用无滑移边界条

件,考察计算结果中壁面处 y^+ 值介于 $25 \sim 186$ 之间.

1.2 模型验证

为了验证计算模型的可靠性,对同样结构和操作参数的水力旋流器内部流场进行 PIV 测试实验. 图 2 为所得空气柱结果对比,从图中可以看出,CFD 数值模拟所得空气柱形状和尺寸均与实验结果接近.

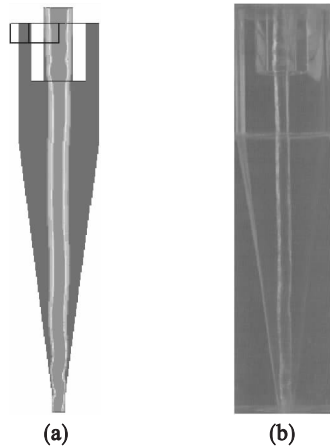


图 2 空气柱结果对比
Fig. 2 Results comparison of the air core
(a)—CFD; (b)—PIV 实验截图.

图 3 所示为 z_3 截面轴向速度分布比较,从图中可以看出,CFD 模拟对轴向速度和轴向零速包络面(LZVW)位置的预测与 PIV 实验结果高度吻合.

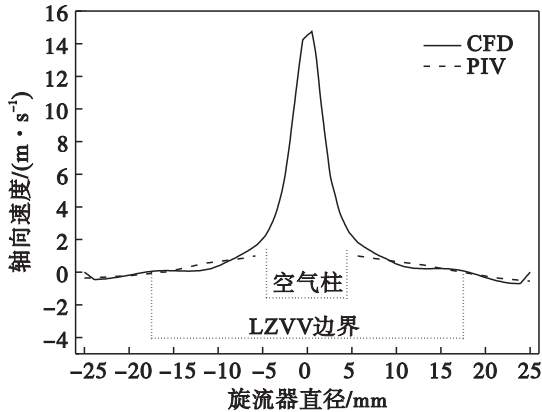


图 3 z_3 截面轴向速度分布
Fig. 3 Axial velocity distributions in z_3 plane

从图 2 和图 3 可以看出,CFD 数值模拟和 PIV 实验所得结果高度一致,这表明所采用的计算模型能正确地预测水力旋流器内部流场,有很高的可靠性.

2 结果与分析

2.1 静压和压力降分布

水力旋流器分离效率的提高常常以消耗能量

为代价,其能量损失的主要形式就是压力损失. 因此研究旋流器流场内部静压和压力降分布对提高分离效率、降低能耗有重要意义. 图 4 为旋流器内静压分布情况,从图中可以看出,水力旋流器内静压分布基本呈轴对称状态,从器壁沿直径向中心方向急剧降低. 在旋流器内部,沿中心轴线出现一柱形负压区,该负压区是空气柱形成的必要条件. 从图 4 中还可以看出,压强最低的点为 z_3 截面的圆心点,也就是说,在旋流器中心轴线上,分别存在着从 z_1 和 z_5 截面指向 z_3 截面的压强梯度,这致使空气分别从溢流口和沉砂口回流. 但由于水力旋流器内部自下而上的内旋流,最终的空气柱仍为从沉砂口吸入空气并从溢流口排出.

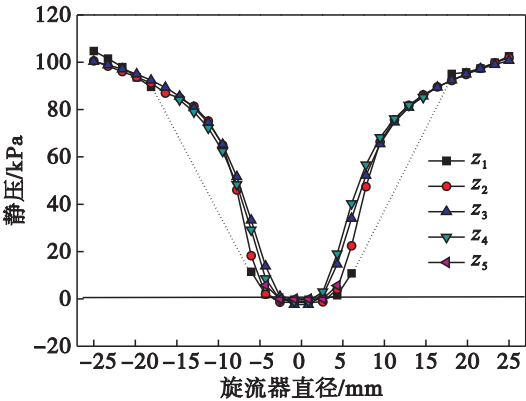


图 4 水力旋流器内静压分布

Fig. 4 Static pressure distributions inside the hydrocyclone

当水力旋流器入口流量为 35 L/min 时,可测得入口压强为 108 684 Pa,考察各截面压力降分布如图 5 所示. 从图 5 中可以看出,在空气柱附近,压力降急剧增大,因此从能量角度来说,空气柱的存在确实增加了水力旋流器分级过程的能量消耗.

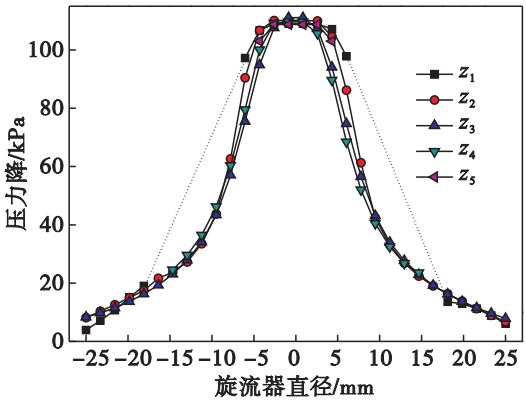


图 5 $z_1 \sim z_5$ 截面压力降分布

Fig. 5 Pressure drop distributions in $z_1 \sim z_5$ planes

2.2 切向速度分布

在水力旋流器内部的三维流动中,切向速度

是产生离心力的基本前提,占据着最为重要的地位. 从图 6 中可以看出,切向速度在强制涡与半自由涡交界处达到最大值. 在强制涡内,切向速度 u_t 与旋流器半径 r 成正比,即 $u_t = rC$ (C 为常数);在半自由涡区域,切向速度 u_t 随着旋流器半径 r 的增大而减小,可求得 $u_t r^{0.5 \sim 0.58} = C$. 因此,切向速度 u_t 与旋流器半径 r 的总关系式可以写成 $u_t r^n = C$,其中 n 为指数,该关系式表明水力旋流器内部流场切向速度基本符合组合涡特征. 在内部, $n = -1$,为强制涡运动;在外部, $n = 0.5 \sim 0.58$,为半自由涡运动.

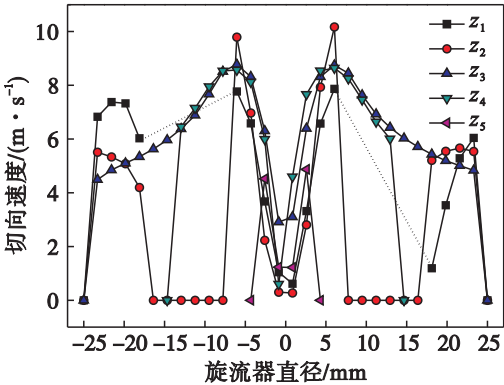


图 6 水力旋流器内切向速度分布

Fig. 6 Tangential velocity distributions inside the hydrocyclone

2.3 轴向速度分布

水力旋流器内轴向速度分布如图 7 所示. 从图中可见,旋流器内液相轴向速度远小于切向速度,自器壁至中心轴线,速度方向发生明显转向,形成外部向下、内部向上的双旋流流场. 轴向速度方向发生改变的转折面,即为零速包络面 (LZVV),图 7a 可清楚看到零速包络面上部为柱形、下部为锥形,自溢流管入口贯穿至沉砂口出口. 考察零速包络面柱形段直径,约为旋流器直径的 0.75 倍,约为溢流管直径的 2.3 倍,与 Kelsall 研究结果略有不同. 同时从图 7 中可以看出,溢流管中心空气的轴向速度向下,这验证了溢流口确实存在空气回流.

2.4 径向速度分布

从图 8 水力旋流器内径向速度分布可见,旋流器内液相的径向速度是 3 个速度分量里最小的,同时也是最复杂的,因此对径向速度的研究难度也最大^[1-2,8]. 从图 8 中可以看出,在外旋流区域,径向速度方向从旋流器器壁指向中心. 在内旋流区域特别是空气柱边界附近,由于流体轴向速度和湍流强度的突然增加,在内旋流区域流体之间产生很高的轴向速度梯度,越靠近空气柱,流体

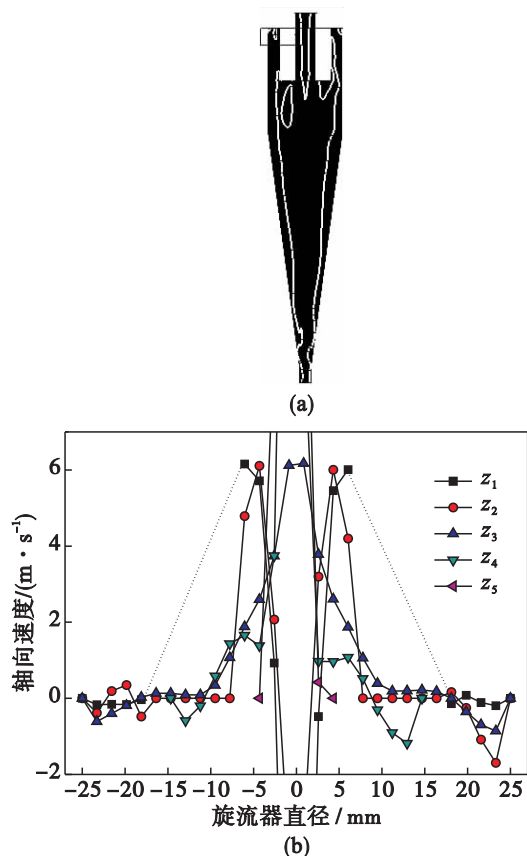


图 7 水力旋流器内轴向速度分布
Fig. 7 Axial velocity distributions inside the hydrocyclone
(a)—LZVV 轮廓线;
(b)— $z_1 \sim z_5$ 截面轴向速度分布曲线.

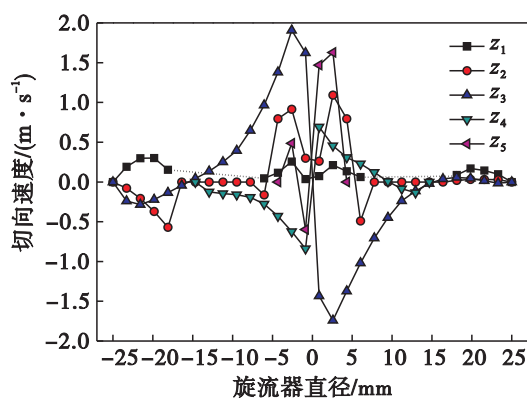


图 8 水力旋流器内径向速度分布
Fig. 8 Radial velocity distributions inside the hydrocyclone

轴向速度越大,因此带动周边流体产生方向相反、位置相对的径向流动.同时从图 8 中还可以看到,空气柱内流体径向速度几乎为 0.

3 结 论

1) 旋流器内静压呈轴对称分布,从器壁至中心,静压逐渐下降,并沿中心轴线形成一负压区,

沉砂口和溢流口均存在空气回流,但最终的空气柱仍然从沉砂口吸入空气并从溢流口排出.压力降分布研究表明,空气柱的存在确实增加了水力旋流器分级过程的能量消耗.

2) 旋流器内切向速度分布符合组合涡特征,满足 $u_t r^n = C$. 在强制涡区域, $n = -1$; 在半自由涡区域, $n = 0.5 \sim 0.58$. 数值研究方法对于研究不同工艺条件下水力旋流器指数 n 值有重要意义.

3) 自旋流器器壁至中心,轴向速度发生明显的转向,形成外部向下、内部向上的双旋流流场. 零速包络面上部为柱形、下部为锥形,自溢流管入口贯穿至沉砂口出口,其柱形段直径约为溢流管的 2.3 倍.

4) 在外旋流区域,径向速度方向从旋流器器壁指向中心. 在内旋流区域特别是空气柱边界附近,存在方向相反、位置相对的径向速度. 空气柱内径向速度基本为 0.

参考文献:

[1] 庞学诗. 水力旋流器技术与应用[M]. 北京:中国石化出版社,2011:18-45.
(Pang Xue-shi. Technology and application of hydrocyclone [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011: 18-45.)
[2] Wills B A, Napier-Munn T J. Mineral processing technology [M]. Amsterdam: Elsevier Science & Technology, 2006: 212-223.
[3] Kelsall D F. A study of the motion of solid particles in a hydrocyclone[J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineering*, 1952, 30: 87-104.
[4] Dabir B, Petty C A. Laser Doppler anemometry measurements of tangential and axial velocities in a hydrocyclone operation without an air core[C]// The Second International Conference on Hydrocyclone. Bath, 1984: 15-26.
[5] Bergstrom J, Vomhoff H. Experimental hydrocyclone flow field studies [J]. *Separation and Purification Technology*, 2007, 53(1): 8-20.
[6] Rodes N, Pericleous K A, Drake S N. The prediction of hydrocyclone performance with a mathematical model[C]// Process International Conference on Hydrocyclone. Oxford, 1987: 113-117.
[7] Brennan M. CFD simulations of hydrocyclones with an air core[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2006, 84(6): 495-505.
[8] Jose A D, Rajamani R K. A comparative study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2005, 77: 217-230.
[9] Wee E L C, Chen Y R. Experimental and computational studies of multiphase hydrodynamics in a hydrocyclone separator system [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65: 6415-6424.