

水力旋流器两相湍流数值模拟研究进展

陆 虎,陈佳祁,贾瑞强

(昆明理工大学 国土资源工程学院,云南 昆明 650093)

摘要: 数值模拟已经成为研究水力旋流器流场理论的重要手段,论述了国内外对于水力旋流器内两相流场的数值模拟研究进展,雷诺应力模型作为目前水力旋流器流场模拟的重要模型虽然已经得到广泛应用,但仍存在很大缺陷。通过分析研究成果提出了对于雷诺应力模型的改进和完善,今后对水力旋流器数值模拟研究的重点和发展方向。

关键词: 水力旋流器;湍流;数值模拟

中图分类号:TD849;TQ051.8

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2012)05-0103-04

Progress in numerical simulation of two-phase turbulent flow in hydrocyclone

LU Hu, CHEN Jia-qi, JIA Rui-qiang

(Land Resource Engineering Kunming University of Science and Technology Kunming 650093, China)

Abstract: Numerical simulation is an important means of investigating hydrocyclone flow field theory. Introduce the research progress of numerical simulation for two-phase flow field in hydrocyclone at home and abroad. Although the Reynolds stress model is widely used in the field, there are still lots of defects. Through analyzing the research results, perfect the Reynolds stress model, make clear the development direction of numerical simulation of hydrocyclone.

Key words: hydrocyclone; turbulence; numerical simulation

从1891年Bretney在美国申请了第一个水力旋流器的专利,到1980年在英国的BHRA流体工程中心发起举行国际水力旋流器学术研讨会,对水力旋流器的研究正在不断的深入,其应用范围也在不断扩大。目前,水力旋流器作为一种分离、分级、分选设备,已经广泛地应用于选矿、石油、化学工业、食品、医药等许多工业部门,近来又被广泛应用到生物工程的分离作业中。

从20世纪50年代开始,主要是通过实验来研究水力旋流器。然而由于实验条件的限制,通过实验研究旋

流器存在性能周期长、数据不连续且费用高等缺点。随着计算流体力学和计算机技术的发展,利用数值方法模拟水力旋流器内部复杂的流场特性成为趋势。对于缩短新型旋流器的研发周期,优化结构和提高性能等具有重要的理论和实际价值。

1 水力旋流器的结构与工作原理

水力旋流器根据用途的不同而具有不同的结构,固液分离用水力旋流器结构如图1所示。

收稿日期:2012-06-26 责任编辑:孙淑君

作者简介:陆 虎(1986—),男,江苏连云港人,昆明理工大学矿物加工工程专业硕士研究生。

引用格式:陆 虎,陈佳祁,贾瑞强.水力旋流器两相湍流数值模拟研究进展[J].洁净煤技术,2012,18(5):103-106.

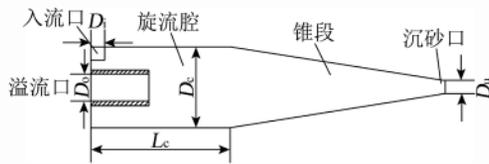


图1 固-液水力旋流器结构

图1为典型固-液分离用水力旋流器,其结构主要由入口、溢流口、旋流腔、锥段和沉砂口组成。Rietema^[1]提出了最佳的结构参数比设定: $D_1/D_c = 0.17$, $D_0/D_c = 0.17$, $D_2/D_c = 0.33$, $L_c/D_c = 0.60$, 锥角 $\theta = 20^\circ$ 。

水力旋流器的基本工作原理是基于离心沉降作用,当具有一定压力的两粗-细相混合液从旋流器筒体上部的进料口呈切线给入后,产生强烈的旋转运动,由于粗相和细相存在沉降速度差,受离心沉降作用使大部分粗相经旋流器沉砂口排出,细相由溢流口排出,从而达到粗-细相分级的目的。

2 湍流数学模型的研究进展

水力旋流器内部的流场为各向异性的强旋转湍流。水力旋流器的数值模拟重点在于选择合适的湍流模型,这决定了数值计算结果的好坏。近年来,国内外研究者设法对水力旋流器内的湍流作某种程度的近似和简化处理,得出各种不同的湍流模型,以此来进行近似的模拟,并得到了众多结论。

2.1 对标准 $k-\varepsilon$ 模型修正的研究进展

Driessen^[2]在考虑湍流的影响下修正了水力旋流器的切向速度公式。Rietema 假定了涡黏性沿径向不变、径向速度沿径向不变或径向速度沿径向按线性增大,采用 $N-S$ 方程和两相流动量方程,推导出了切向速度的计算公式,并与 Kelsall 的实测结果^[3]进行比较,得出涡黏性对水力旋流器内湍流的影响可忽略不计。Pericleous 等^[4]采用湍流数学模型对水力旋流器单相流场进行了模拟,成功预测了 Kelsall 的实测结果,并认为标准的 $k-\varepsilon$ 模型必须进行修正才能适用于旋流器速度场的计算。

Duggins 和 Frich^[5]考虑了水力旋流器中两相流动属于各向异性的湍流流动,利用修正的 $k-\varepsilon$ 模型对液相流场进行了计算。该模型将流场中沿径向各点的涡黏性系数视为张量,并利用水力旋流器湍流流场各向异性的观点较为准确地描述了湍流及其扩散。但是,该模型对湍流的各项异性特性考虑不完全,忽略了旋转流动对雷诺正应力的影响,因此有待进一步完善。

戴光清^[6]和李建明等^[7]采用修正 $k-\varepsilon$ 模型和各向异性 $k-\varepsilon$ 模型,分别对水力旋流器的三维流场进行了数值模拟,得到了轴向中心截面速度矢量分布、切向速度分布以及轴向速度分布,其结果与利用二维激光多普勒测速仪测试结果基本吻合。

王尊策^[8]采用修正的 $k-\varepsilon$ 模型对复合式水力旋流器内部流场进行了数值模拟。其模拟结果与实测结果吻合较好,说明该数学模型能够达到较准确地流场预测,这将有助于对旋流器结构与性能的分析。吴春笃等^[9]采用修正的 $k-\varepsilon$ 模型,离散相颗粒采用 DPM 模型对水力旋流器内三维流场进行了数值模拟,得到了压力及速度场分布图,从而提出设计水力旋流器的部分要点。

2.2 Prandtl 混合长度模型的研究进展

K T Hsieh 和 R K Rajamani^[10]分别采用修正的 Prandtl 混合长度理论模型,利用代数逼近法对 $N-S$ 方程进行求解,得到的切向和轴向速度分布与实测结果基本吻合。凌国平^[11]同样采用修正的 Prandtl 混合长度模型进行模拟,得到了轴向、径向、切向速度分布,结果与多普勒激光测速仪的实测结果基本吻合。

欧益宏等^[12]和王卫国等^[13]都采用混合模型对水力旋流器内部多相流流场进行三维数值模拟,并且成功模拟了两相流体的速度场分布和不同时间的体积分布。这些研究成果都有力地支持了前人的试验和理论总结。

2.3 代数应力模型的研究进展

代数应力模型保留了湍流的各向异性基本物理特征,能较好地适应水力旋流器流场特性。Boysan 等^[14]采用代数应力模型和随机轨道模型成功模拟了旋风分离器中的两相湍流,其研究方法对模拟水力旋流器的两相流场具有重要参考价值。

Hargreaves 和 Silvester^[15]采用代数应力模型对液-液旋流器中的强旋湍流进行了模拟,得到的速度场分布与实测结果比较吻合,这些数值计算结果对揭示水力旋流器分离机理具有重要价值。

李玉星等^[16]采用修正的 $k-\varepsilon$ 模型和分散相的代数滑移混合模型 ASM,成功模拟出液-液水力旋流器内流体流动的分散相浓度分布图和速度矢量图、流线图。这为优化旋流器结构、预测旋流器性能和研究粒子跟踪及旋流器特性参数对分离效率的影响等提供了重要参考价值。

2.4 雷诺应力模型的研究进展

1993年 Dyakowski 和 Williams^[17] 将湍流模型和雷诺应力方程耦合求解,得到一种较为完善的雷诺应力代数模型。Slack 等^[18] 采用雷诺应力湍流模型和大涡模型对旋流器的单相流场进行模拟,并与二维激光多普勒测速仪的实测结果吻合较好。

陆耀军等^[19] 先后利用标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型和雷诺应力模型对液-液旋流分离管中的强旋湍流进行了数值模拟研究。结果表明3种模型中以雷诺应力模型的预报结果与实测结果最为吻合。

近年来,各研究者对雷诺应力模型的研究不断深入,并在此模型的基础上,对水力旋流器的数值模拟日趋完善。Grady 等^[20] 采用雷诺应力方程对10 mm水力旋流器的分离效率进行了数值模拟计算,其结果与试验结果吻合很好。Yang 等^[21] 采用雷诺应力模型对水力旋流器的流场和粒子分离性能进行了数值模拟计算,经与实验结果比较,其吻合程度很好。邹宽等^[22] 采用雷诺应力模型对水力旋流器的液相流场进行了计算。得到的轴向和切向速度分布、流线图、等压线和零轴速包络面等数据结果与 He 等^[23] 在相同假设条件下采用修正的 $k-\varepsilon$ 模型得到的结果进行了比较,其更接近实验结果。

王志斌等^[24] 利用雷诺应力模型对旋流器流场进行了数值模拟计算,根据模拟结果对流场结构、压力分布结构以及空气核的特征方面进行了分析。同时通过对固体颗粒采用随机轨道模型,液相采用雷诺应力模型,成功模拟出固体颗粒的运动轨迹,发现颗粒存在随机性的分离过程。马文兵^[25] 采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型和雷诺应力模型分别对旋流器内液相流动状态进行了数值模拟,并通过实验验证发现雷诺应力模型比 RNG $k-\varepsilon$ 模型能更准确地描述旋流器内部的流动状态。

李慧^[26] 采用雷诺应力模型进行了固-液分离用水力旋流器的数值模拟研究,并利用正交实验的方法对影响旋流器性能的各个参数进行了分析,得到了最优的操作参数和结构参数。徐会^[27] 利用雷诺应力模型对水力旋流器内多相流流场进行了三维数值模拟,得到了旋流器内不同截面的速度、压力和浓度分布。

3 结语与展望

近年来对于水力旋流器的数值模拟在精度和计算量上都有很大提高,雷诺应力模型虽然也已被广泛应用于对水力旋流器的数值模拟,但仍然存在很大缺陷,

如雷诺应力模型中的湍流耗散率依然采用各向同性的,这并不适用于强旋湍流场的模拟。随着计算机技术与计算流体力学的发展,建立完善的旋流器理论,研究出精度更高、适用范围更广的旋流器数值模拟模型将成为对水力旋流器的研究重点。

通过完善水力旋流器的数学模拟模型,从中建立对旋流器进行优化设计的理论基础,从而指导水力旋流器的设计与生产,开发出效率更高的旋流器。

参考文献:

- [1] Rietema K. Performance and design of hydrocyclones IV: Design of hydrocyclones [J]. Chemical Engineering Science, 1961, 15(3/4): 320-325.
- [2] Svarovsky L. Hydrocyclone [M]. London: Hott, Rinehart and Winston, 1984.
- [3] Kelsall D F. A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone [J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1952, 30(1): 87-108.
- [4] Pericleous K A. Mathematical simulation of hydrocyclone [J]. Applied Mathematical Modeling, 1987, 11(4): 242-255.
- [5] Duggins R K, Frith P C W. Turbulence anisotropy in cyclones [J]. Filtration & Separation, 1987, 24(6): 394-397.
- [6] 戴光清, 李建明. 水力旋流器湍流流场数值模拟 [J]. 化工学报, 1997, 48(1): 123-126.
- [7] 李建明, 戴光清. 旋流器中较强旋液体流动的数值计算 [J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1999, 14(3): 278-285.
- [8] 王尊策. 复合式水力旋流器的结构及特性研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [9] 吴春笃, 张伟, 黄永强, 等. 新型旋流分离器内固液两相流的数值模拟 [J]. 农业工程学报, 2006, 2(22): 98-102.
- [10] Hsieh K T, Rajamani R K. Mathematical model of the hydrocyclone based on physics of fluid-flow [J]. AIChE Journal, 1991, 37(5): 735-746.
- [11] 凌国平. 油水分离旋流器内部流场的数值模拟 [J]. 苏州大学学报(自然科学版), 1995, 11(1): 17-22.
- [12] 欧益宏, 杜扬, 周明来, 等. 柱形水力旋流器多相流场及分离过程的数值模拟 [J]. 流体机械, 2005, 33(1): 28-31.
- [13] 王卫国, 周慎杰. 圆柱旋流器液固两相流场的数值模拟 [J]. 煤矿机械, 2006, 27(2): 224-226.
- [14] Boysan F, Ayers W H, Swithenbank J. A fundamental mathematical modeling approach to cyclone design [M]. England: University of Sheffield Department of Chemical Engineering and Fuel Technology, 1982, 60: 222-230.

- [15] Hargreaves J H, Silvester R S. Computational fluid dynamics applied to the analysis of deoiling hydrocyclone preferences [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1990, 68(4): 365-383.
- [16] 李玉星, 冯淑初. 油水分离水力旋流器理论模型及数值模拟[J]. 石油机械, 2000, 28(11): 26-29.
- [17] Dyakowski T, Williams R A. Modeling turbulent flow within a small-diameter hydrocyclone [J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48(6): 1143-1152.
- [18] Slack M D et al. Advances in cyclone modeling using unstructured grids [J]. Trans IChemE, 2000, 78(A): 1098-1104.
- [19] 陆耀军, 周力行, 沈熊. 不同湍流模型在液-液旋流分离管流场计算中的应用及比较[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(2): 105-109.
- [20] Grady S A, Wesson G D, Abdullab M et al. Prediction of 10-mm hydrocyclone separation efficiency using computational fluid dynamics [J]. Filtration and Separation, 2003, 40(9): 41-46.
- [21] Yang I H, Shin C B, Kim T H. A three-dimensional simulation of a hydrocyclone for the sludge separation in water purifying plants and comparison with experimental data [J]. Minerals Engineering, 2004, 17(5): 637-641.
- [22] 邹宽, 杨荣, 曹玮, 等. 水力旋流器湍流流动的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(1): 127-129.
- [23] He P, Salcudean M, Gartshore I S. A numerical simulation of hydrocyclones [J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1999, 77(Part A): 429-439.
- [24] 王志斌, 陈文梅, 褚良银, 等. 旋流分离器中固体颗粒随机轨道的数值模拟及分离特性分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 34-39.
- [25] 马文兵. 水力旋流器的流场模拟与控制研究[D]. 鞍山: 鞍山科技大学, 2006.
- [26] 李慧. 固-液分离水力旋流器的三维数值模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
- [27] 徐会. 水力旋流器的多相流模拟和实验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2007.

(上接第99页)

4 结 语

唐山天和科技开发有限公司在干燥除尘领域内不断研发新式除尘设备, 拥有多个专利, 设计的煤泥干燥系统中含尘气体经过此3种除尘设备后, 经环保部门监测, 所排气体均能达到排放标准, 说明以上除尘系统在使用中经得起理论与实践的考验。

参考文献:

- [1] 曾钦, 李军, 王慧香, 等. 内蒙古某褐煤干燥特性的实验研究[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(2): 57-59.
- [2] 高俊荣, 陶秀祥, 侯彤, 等. 褐煤干燥脱水技术的研究进展[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(6): 73-76.
- [3] 伊·阿·杨托夫斯基. 选煤产品的干燥[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1957.
- [4] 程军. KJC 喷雾除尘装置在潘三选煤厂的应用[J]. 煤质技术, 2010(6): 67-68.
- [5] 王秀军, 彭定茂, 黄凤豹, 等. 褐煤脱水改质技术[J]. 洁净煤技术, 2010, 16(3): 83-86.
- [6] 郭芬, 李德伟, 任伟涛. 新型滚筒式褐煤干燥系统的应用[J]. 洁净煤技术, 2010, 16(1): 29-31.
- [7] 张殿印, 王纯. 除尘手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [8] 申丽, 张殿印. 工业粉尘的性质[J]. 金属世界, 1998(2): 31-32.
- [9] 嵇敬文. 除尘器[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [10] 马广大. 除尘器性能计算[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [11] 张殿印, 王纯. 除尘工程设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [12] 王晶, 李振东. 工厂消烟除尘手册[M]. 北京: 科学普及出版社, 1992.
- [13] 谭天祐, 梁凤珍. 工业通风除尘技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [14] 陆军, 王凤红, 阚晓静, 等. 玻璃钢湿式除尘器在煤泥干燥系统中的应用[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(2): 36-37.
- [15] 郑铭. 环保设备-原理设计应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [16] 葛咸浩. 龙固选煤厂煤泥浮选试验研究[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(5): 23-25.