

文章编号:1673-5005(2007)04-0094-04

井下旋流油气分离器流场数值模拟

赵焕卿¹, 李增亮², 孙浩玉³

(1. 中国石油大学 科技开发公司, 山东 东营 257061; 2. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061;
3. 胜利石油管理局 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘要:鉴于现有油气分离器效率较低,为改善高含气井中井下多相混抽泵或电潜泵机组效率低下的问题,选择雷诺应力模型作为湍流模型,代数滑移混合模型作为多相流模型,对井下水力旋流油气分离器内的两相流场进行了数值模拟。通过数值计算得到了两相介质等浓度分布图和轴向速度矢量图,并将数值计算结果与同结构的水力旋流油气分离器样机的室内模拟试验结果进行了对比。研究表明,数值计算得到的各种图完全符合已知的旋流器流场分布规律。水力旋流器经过结构优化设计不仅可以进行井下油气分离,且分离效果较好,适用于较大流量和高含气率的油井条件。

关键词: 油气分离; 水力旋流器; 分离效率; 数值模拟

中图分类号: TQ 051.8

文献标识码: A

Numerical simulation of flow field in downhole hydrocyclone oil-gas separator

ZHAO Huan-qing¹, LI Zeng-liang², SUN Hao-yu³

(1. Scientific and Technological Company in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;
2. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum,
Dongying 257061, Shandong Province, China;
3. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying 257017,
Shandong Province, China)

Abstract: As the efficiency of the current oil-gas separators is very low, and to improve the efficiency of downhole multiphase pump or electrical submersible pumping unit in high gas-content wells, the numerical simulation was studied on the two-phase flow in downhole hydrocyclone oil-gas separator. Meanwhile, the Reynolds stress model was chosen as turbulence model and the algebraic slip model was chosen as multiphase flow model. With the numerical calculation, the two phase media equoconcentration distribution map and the axial velocity vectogrph were obtained and proved to completely accord with the flow field distribution in cyclone. A contrast between the numerical simulated result and the result of pre-industrial prototype which has the same structure was carried on. The results show that the optimized hydrocyclone oil-gas separator not only runs well but also possesses good separating performance, and can satisfy the requirement of high flux and high GOR wells.

Key words: oil-gas separation; hydrocyclone; separation efficiency; numerical simulation

随着油田的深入开发,尤其是注水滞后单元和高油气比区块,地层能量降低、油层脱气,高含气井将不断增多。当含有大量游离气的井液进入多相混抽泵或潜油电泵时,会造成泵排量、扬程和效率显著

下降,机组出现严重超载等现象。为消除井液中游离气对多相混抽泵或潜油电泵性能的影响,可在泵的入口处安装油气分离器,尽量多地排除游离气。现有的油气分离器对于改善井下叶片式泵的吸入性

收稿日期:2007-03-04

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技风险创新基金资助项目(050511-6-2)

作者简介:赵焕卿(1963-),男(汉族),河南偃师人,高级工程师,工程硕士,从事石油机械的研究与开发工作。

能曾起到过积极作用,但在地层油气比较高或不断增大的情况下,已不能满足较高油气比油井的生产需要。针对生产需要和现有油气分离器分离效率较低的情况,为改善高含气井中多相混抽泵或电潜泵的使用与效率低的问题,作为多相混抽泵技术研究的部分内容,开展了井下水力旋流油气分离技术的研究^[1]。水力旋流器作为用途非常广泛的分离、分级设备,具有结构简单、体积小、处理能力大、分离粒径小的特点。从目前的研究情况来看,使用旋流分离技术进行井下油气分离是可行的^[2-3]。笔者对井下水力旋流油气分离器内的两相流场进行数值模拟,为进一步改进结构、提高分离效率提供依据。

1 数学模型

1.1 湍流模型

由于雷诺应力模型中严格地考虑了流线型弯曲、漩涡、旋转和张力的快速变化,它对于复杂流动有更高精度预测的潜力,所以要考虑雷诺压力的各向异性时,必须用雷诺应力模型,故本研究中采用此模型^[4]。

将描述旋流器内流体运动的连续性方程和 Navier-Stokes 方程进行时均化处理以后,可以得到 Reynolds 时均方程组。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0,$$

动量方程为

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + X_i.$$

雷诺应力模型中直接从各向异性的前提出发,求解 Reynolds 输运方程,从而得到雷诺应力的各种有关分量。Reynolds 输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U \overline{u'_i u'_j}) = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij},$$

式中,左端两项分别为应力的时间变化律和对流项,右端4项分别为应力扩散项 D_{ij} 、剪应力产生项 P_{ij} 、应力-应变项 Π_{ij} 和湍能耗散项 ε_{ij} ,表达式为

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + (\overline{p' u'_i}) \delta_{jk} + (\overline{p' u'_j}) \delta_{ik} - \mu \left(\frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u'_i u'_j} \right) \right];$$

$$P_{ij} = -\rho \left[\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right];$$

$$\Pi_{ij} = \overline{p' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)};$$

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \left(\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \right).$$

对该方程封闭后,所得右端各项的具体形式为

$$D_{ij} = C_s \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right);$$

$$\Pi_{ij} = \Pi_{ij1} + \Pi_{ij2},$$

$$\Pi_{ij1} = -C_1 \rho \frac{k}{\varepsilon} \left(\overline{u'_j u'_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right),$$

$$\Pi_{ij2} = -C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} G_k \right);$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \varepsilon.$$

此外还有

$$G_k = -2\rho \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}; \quad k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}.$$

式中, G_k 为湍动能产生率; δ_{ij} 为Cronecker符号; k 为湍动能,其值由输运方程

$$\frac{\partial(u_k k)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(C_s \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} \frac{1}{\rho} G_k - \varepsilon$$

确定; ε 为湍能耗散率,其值由输运方程

$$\frac{\partial(u_k \varepsilon)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(C_s \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_{s1} \frac{1}{\rho} G_k - C_{s2} \varepsilon \right)$$

确定;模型常数 $C_s, C_1, C_2, C_s, C_{s1}, C_{s2}$ 分别为 0.10, 1.8, 0.6, 0.09, 1.44, 1.92。由此构成了雷诺应力模型的封闭方程组。

1.2 多相流模型

代数滑移混合模型是一种简化的两相流动模型,可以考虑两相间的速度不同而引起的滑移,特别适用于在重力、离心力或其他体积力作用下颗粒、气泡或液滴的分离计算。由于气液分离旋流器主要依靠离心力来促使气液分离,因此采用该模型^[5]。

混合的连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_{m,i}) = 0,$$

混合的动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_{m,j}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_{m,i} u_{m,j}) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu_m \times \left(\frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{m,j}}{\partial x_i} \right) + \rho_m g_j + F_j + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_{Dk,i} u_{Dk,j} \right),$$

气相体积分方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_p \rho_p u_{m,i}) = -\frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_p \rho_p u_{p,i}).$$

滑移速度指分散相气相(p)与液相(q)的速度差,即 $v_{qp} = u_p - u_q$,可由下式求解:

$$v_{qp} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} a.$$

式中, a 为气泡的离心加速度; d_p 为气泡直径。

漂移速度与滑移速度的关系为

$$u_{Dp} = v_{qp} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} v_{qk},$$

其中

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k; \mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k;$$

$$u_m = \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_k \right) / \rho_m;$$

$$u_{Dk} = u_k - u_m.$$

式中, n 为相数; ρ_m 为混合密度; μ_m 为混合粘度; u_m 为质量平均速度; u_{Dk} 为漂移速度。

2 边界条件

2.1 入口边界

因为旋流器内部的流动可被认为是二维椭圆型湍流流动, 所以入口的三维几何边界可被简化为二维的基圆圆周入口, 即认为流体从基圆圆周各处切向均匀进料。为了减小入口条件对水力旋流器内流场的影响, 必须对入口速度的 3 个分量进行处理, 假定旋流器入口处的轴向、径向和切向速度分别用 u_{in} , v_{in} 和 w_{in} 表示, 则入口条件为

$$u_{in} = \frac{4Q_i}{\pi D_i^2} \sin \theta, v_{in} = \frac{Q_i}{\pi D D_i}, w_{in} = \frac{4Q_i}{\pi D_i^2} \cos \theta,$$

$$k_{in} = 0.006(u_{in}^2 + v_{in}^2 + w_{in}^2), \varepsilon_{in} = \frac{2k_{in}^{3/4} C_\mu^{3/4}}{KD_i}.$$

式中, $C_\mu = 0.09$, $K = 1.42$; Q_i 为处理量; D_i , D 分别为入口和旋流器直径; θ 为入口流道与横截面夹角。

2.2 出口边界

底流口与溢流口边界均按充分发展湍流状态处理, 即取流体流动特征的梯度为零作为出口边界条件:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0, \varphi = u, v, w, k, \varepsilon.$$

2.3 壁面

壁面按无滑移处理为

$$\varphi = 0, \varphi = u, v, w, k, \varepsilon.$$

2.4 对称轴

旋流器中心轴线按轴对称处理为

$$v = 0, \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0, \varphi = u, p, k, \varepsilon.$$

3 数值计算方法

井下气液分离水力旋流器的二维结构模型示意

图见图 1。各部分结构参数为: 直径 $D = 68$ mm, 入口直径 $D_i = 20$ mm, 底流口直径 $D_d = 32$ mm, 入口角度 $\theta = 0^\circ$, 溢流口直径 $D_o = 10$ mm, 分离器总长度 $L_1 = 570$ mm, 溢流管长度 $L_u = 15$ mm, 尾管长度 $L_d = 65$ mm, 柱段长度 $L_2 = 100$ mm。

在进行数值模拟计算时, 先要进行网格划分, 以四边形结构化网格为最优。因近轴区、入口区和近壁区的速度梯度较大, 相应采用了较密的网格, 其他区域则采用较疏的四边形结构化网格, 本文中所作数值模拟的模型网格划分数目都在 40 万以上。采用 SIMPLE 算法对模型进行求解。

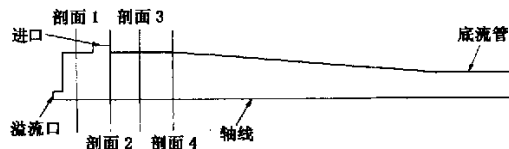


图 1 井下气液分离水力旋流器的二维结构模型

4 数值计算结果分析

模拟计算时取混合物体积分含气率 55%, 液相密度 998 kg/m^3 , 动力粘度 $1.003 \text{ mPa} \cdot \text{s}$; 气相密度 1.225 kg/m^3 , 动力粘度 $0.0001789 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

4.1 流场压力分布

对井下气液分离旋流器流场模拟的一个重点是对其压力场的分析, 因为它能反映出水力旋流器的一个重要指标——压力损失。模拟计算的流场压力基本上是沿轴向分布的, 进口处压力最高, 同时由于气液两相在旋流器内旋转流动、分离产生压力损失, 沿径向由壁面到中心, 压力逐渐降低。

4.2 流场轴向速度分布

为了便于分析某个截面处的参数分布(图 1), 可在水力旋流器的不同位置取相应的横截面。在水力旋流器的 3 个速度分量中, 轴向速度对于分析气液分离旋流器的性能至关重要。图 2 是气液分离旋流器内所取 4 个界面处的轴向速度矢量图。箭头方向表示轴向速度的方向, 箭头长度表示其大小。其中轴向速度为零的点组成的面称为 LZVV, 即零轴向速度包络面, 它是评价分离器性能的一个重要指标, 它内部的流体由溢流口排出, 外面的流体则由尾管排出。模拟结果的流场参数分布规律与文献[7] ~ [10] 所提供的相似结构旋流器内流场的实验测试及仿真结果一致, 表明了数值模拟的可靠性。

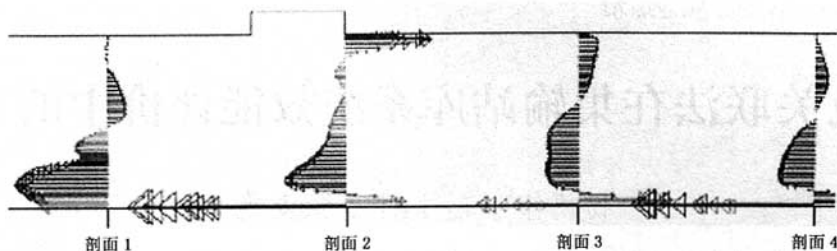


图2 局部放大的轴向速度矢量图

4.3 流场两相介质等浓度分布

图3为计算所得的气、液相浓度等高线分布图。可见旋流器轴心处形成了很完整的气柱(夹带少量液体),气柱由底流管下部直达溢流口并从溢流口排出,且气柱未到达底流口,表明气体可以很好地从溢流口排出。液相部分则沿旋流器壁下行从底流口排出。由图中可以看出,旋流器可以很好地将气液两相分离。

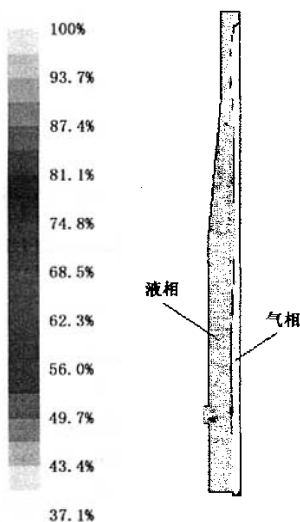


图3 气、液相等浓度分布图

旋流器的数值模拟分离效率计算公式为

$$\eta = Q_{q1}/Q_{q2}$$

式中, η 为旋流器分离效率; Q_{q1} 为溢流口气体流量,kg/s; Q_{q2} 为旋流器进口气体流量,kg/s。

4.4 试验分离效率与仿真效率的对比

按照井下气液分离的工况要求,加工了与数值模拟试验相同结构尺寸的水力旋流器样机,并进行了室内整机模拟试验,用水和空气做试验介质,对其分离性能进行了测试。

将数值计算结果与室内模拟试验结果进行对比,入口含气率为55%时,试验分离效率与仿真分离效率的对比曲线见图4。从图中可见,试验旋流器混合物的处理量在100~150 m³/d时,分离效果最佳,分离效率为70%左右。试验分离效率比仿真分离效率略低,但两条曲线的变化规律相同,且随着处理量的增加,试验分离效率与数值模拟分离效率

的差值减小。

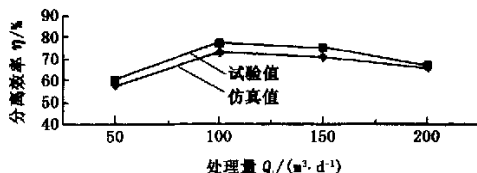


图4 试验与仿真分离效率的对比曲线

5 结束语

根据水力旋流器的流场特点,选择了雷诺应力模型作为湍流模型,以代数滑移混合模型作为多相流模型,用SIMPLE算法进行数值计算。通过数值模拟得到了两相介质等浓度分布图和轴向速度矢量图。将数值计算结果与同结构的水力旋流油气分离器的室内模拟试验结果进行对比,试验分离效率与仿真分离效率相比略低,但两条曲线的变化规律相同。水力旋流器经过结构优化设计不仅可以进行井下油气分离,且较以往油气分离器分离效率高,气液混合物体积含气率55%时的分离效率可达70%以上,适用于较大流量和高含气率的油井条件。在下一步的研究工作中,只要对数值模拟的模型作进一步的完善,在提高其预测精度的同时,努力提高试验研究水平,水力旋流油气分离器的设计研制与应用会有非常广阔的前景。

参考文献:

- [1] 梅思杰,邵永实,刘军,等.潜油电泵技术(上册)[M].北京:石油工业出版社,2004.
- [2] 褚良银,陈文梅.水力旋流器[M].北京:化学工业出版社,1998.
- [3] 杨启明.国外井下气液分离采气新技术研究现状分析[J].天然气工业,2001,21(2):85-88.
YANG Qi-ming. Analysis of present situation of studying new gas recovery technique by downhole gas liquid separation abroad[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(2): 85-88.

(下转第101页)

3 结 论

(1)集输站库系统的灰色关联效能评价方法采用了灰色理论作为科学计算的理论依据,有效地减少了站库系统效能评价中人为因素的影响,使这种多指标的综合评价更具有科学性,实现了站库系统效能的科学、客观的多指标评价,有一定的实用性和可操作性。

(2)该评价方法应用灰色关联的分析方法,不仅能从给出的结果关联系数矩阵中看出各站每一项具体指标的优劣,而且又把影响集输站库系统效能的各方面的指标因素综合量化为一个指标——灰色综合关联度,能直观地看出各站库的总体效能优劣,从而为管理者和决策者提供科学依据。

参考文献:

- [1] 邓聚龙.灰色理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1992.
- [2] 冯叔初.油气集输[M].东营:石油大学出版社,1988.
- [3] 刘思峰.灰色系统理论及其应用[M].2版.北京:科学出版社,1999.

- [4] 王靖,张金锁.综合评价中确定权重向量的几种方法比较[J].河北工业大学学报,2001,30(2):52-57.
WANG Jing, ZHANG Jin-suo. Comparing several methods of assuring weight vector in synthetical evaluation[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2001,30(2): 52-57.
- [5] 钟美.层次分析法在评价某企业报酬要素权重中应用[J].昆明理工大学学报:理工版,2004:29(1):137-141.
ZHONG Mei. Application of analytic hierarchy process to determining the weights of reward factors in some enterprises[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Science and Technology), 2004:29(1):137-141.
- [6] 洪少朋.利用层次分析法确定农业科技进步因素的权重[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2002,3(2):24-26.
HONG Shao-peng. Application of arrangement analytical method to work out the proportions of the agriculture technical progressing factors[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science), 2002,3(2):24-26.

(编辑 沈玉英)

(上接第93页)

- [6] 李诗久.工程流体力学[M].北京:机械工业出版社,1980:224-230.
- [7] 孙尚勇.流体力学与流体机械[M].北京:煤炭工业出版社,1991:96-103.
- [8] STREETER V L, WYLIE E B.流体力学[M].周均长,郝中堂,冯士明,等,译.北京:高等教育出版社,1987:306-313.

- [9] 刘金世.电动潜油泵导叶轮流道检测仪的设计[J].石油机械,2005,33(1):40-42.
LIU Jin-shi. Design of the flow-path inspecting instrument of idler pulleys and impellers of electric submersible pumps[J]. China Petroleum Machinery, 2005,33(1): 40-42.

(编辑 沈玉英)

(上接第97页)

- [4] 王福军.计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [5] 李宾飞.泵下液砂旋流分离器数值模拟研究[D].东营:石油大学石油工程学院,2004.
- [6] 李白力.除油水旋流器流动规律及分离性能数值模拟研究[D].东营:石油大学储运与建筑工程学院,2002.
- [7] 徐继润,罗茜.水力旋流器流场理论[M].北京:科学出版社,1998.
- [8] 庞学诗.水力旋流器工艺计算[M].北京:中国石化出版社,1997.

- [9] 任连城,梁政,钟攻祥,等.基于CFD的水力旋流器流场模拟研究[J].石油机械,2005,33(11):15-17.
REN Lian-cheng, LIANG Zheng, ZHONG Gong-xiang, et al. CFD-based simulation of flow field of hydrocyclones[J]. China Petroleum Machinery, 2005,33(11):15-17.
- [10] 贺会群,杨振会,吴刚,等.油水旋流分离器流场模拟分析与研究[J].石油机械,2005,33(12):1-5.
HE Hui-qun, YANG Zhen-hui, WU Gang, et al. Flow field simulation on oil and water cyclone separator based on CFD[J]. China Petroleum Machinery, 2005, 33(12):1-5.

(编辑 沈玉英)