文章编号:1673-5005(2011)04-0129-05

超声速旋流分离器内气液两相流流动特性

文 闯[1], 曹学文[1], 杨 燕[1], 张 静[1], 杨 涛[2]

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院,山东 青岛 266555; 2. 山东省天然气管道有限责任公司, 山东 济南 250101)

摘要:采用考虑颗粒碰撞的欧拉-拉格朗日数值方法对超声速旋流分离器内部复杂的气液两相流场进行数值计算。在数值模拟中,采用 RNG k-ε 模型模拟气相流动,采用离散相模型(DPM)追踪颗粒运动轨迹。以湿空气为介质,测量超声速分离器的轴向压力并与数值模拟结果进行对比。结果表明:数值模拟结果和测量值较为一致;气体进入超声速喷管后发生膨胀形成低温(-70 ℃),使天然气中的水凝结为液滴,同时气体经旋流叶片产生旋流,经中心体的收缩形成较大的离心加速度(300 000 g);在巨大的离心场作用下极少部分液相颗粒随气相从扩压器流出,大部分液相颗粒与旋流分离段壁面碰撞被吸附或直接进入积液槽空间被排出,达到气液分离的目的。

关键词:超声速分离器; 旋流; 离散相模型; 气液两相流; 液滴轨迹

中图分类号: TE 868 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2011.04.024

Flow characteristics of gas-liquid two phase flow in supersonic swirling separator

WEN Chuang[1], CAO Xue-wen[1], YANG Yan[1], ZHANG Jing[1], YANG Tao[2]

(1. *College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266555, *China*;
2. *Shandong Gas Pipeline Company Limited*, *Jinan* 250101, *China*)

Abstract: Numerical simulation of particle collision process of gas-liquid flow in the supersonic swirling separator was performed with Eulerian-Lagrangian model. In the numerical calculation, the RNG k-ε model was used to simulate gas-phase flow and the discrete phase model (DPM) was used to trace moving tracks of liquid particles. The axial distributions of the static pressure in the supersonic separator were numerically and experimentally investigated using the wet air as media. The numerical results agree well with experimental data. The computational results show that gas expands in the supersonic nozzle to supersonic velocities resulting in low temperature (about -70 ℃), which leads to the nucleation and condensation of water and hydrocarbons, followed by growth of liquid droplets. The swirling motion is generated by the vanes at the entrance of the nozzle. The swirling strength increases strongly due to the contraction of the central body. Under the great centrifugal field (300 000g, g is the acceleration of gravity), very few liquid droplets goes into the diffuser with dry gas, and the most of liquid particles are adsorbed on the wall of swirling separation part or enter into the drainage pipe immediately. So the gas-liquid separation was achieved.

Key words: supersonic separator; swirling flow; discrete phase model (DPM); gas-liquid two phase flow; liquid particle trajectory

超声速旋流分离器是一种用于天然气脱水和重烃分离的新装置[1-4]。在该超声速旋流分离器中,天然气经旋流叶片产生旋流后进入拉伐尔喷管绝热膨胀至超声速,形成低温低压,使天然气中的水和重烃凝结成液滴,形成雾状流;同时旋转气体经喷管后切向速度得到增加,使气液混合物在强烈的旋流场作用下实现分离。Betting 等[5]介绍了超声速分离器的工作原理并对未来应用情况进行了分析;蒋文明

收稿日期:2010-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51006123);国家"863"高技术研究发展计划项目(2007AA09Z301)

作者简介:文闯(1985-),男(汉族),江苏沭阳人,博士研究生,从事天然气加工与处理技术研究。

等[6]对超声速旋流分离器的脱水性能进行了现场试验研究;Jassim 等[7-8]对超声速喷管内的单相气流场进行了数值模拟,分析了真实气体方程和喷管结构对流体流动的影响。目前的研究多限于超声速分离器内部的单相流场,较少涉及气液两相流场。气液两相流的数值算法可以分为欧拉-欧拉算法和欧拉-拉格朗日算法两种类型[9]。数值计算中主要考虑包括气相场和气液间的相互干扰,即气液两相间的动量、能量、质量的交换过程。离散相模型(discrete phase model, DPM)属于欧拉-拉格朗日算法,即对气相流场采用欧拉观点进行计算,对液滴运动采用拉格朗日观点进行跟踪计算。笔者采用考虑颗粒碰撞的欧拉-拉格朗日数值方法对超声速旋流分离器内部复杂的气液两相流场进行数值计算。

1 数学模型

1.1 连续相控制方程

连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{u})=m_s. \tag{1}$$

式中,ρ 为气相密度,kg/m^3;$\boldsymbol{u}$ 为气相速度,m/s;t 为时间,s;m_s 为液滴蒸发进入气相的质量,kg。

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{u})+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{u}\boldsymbol{u})=-\nabla p+\nabla\cdot(\bar{\bar{\boldsymbol{r}}})+\boldsymbol{F}, \tag{2}$$

其中

$$\bar{\bar{\boldsymbol{r}}}=\mu\left[(\nabla \boldsymbol{u}+\nabla \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}})-\frac{2}{3}\nabla\cdot \boldsymbol{u}\boldsymbol{I}\right]. \tag{3}$$

式中,p 为静压,Pa;$\boldsymbol{F}$ 为离散相粒子对气流的作用力,N;$\bar{\bar{\boldsymbol{r}}}$ 为应力张量;μ 为气体动力黏度,Pa·s;$\boldsymbol{I}$ 为单位张量。

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\nabla\cdot((\rho E+p)\boldsymbol{u})=\nabla\cdot(k\nabla T+(\bar{\bar{\boldsymbol{r}}}\cdot \boldsymbol{u}))+S_h. \tag{4}$$

式中,E 为总能,J;T 为静温,K;k 为热传导系数;S_h 为液滴向气流传递的热量,J。

1.2 液滴运动方程

液滴的运动方程可表示为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}_p}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{F}_D+\boldsymbol{F}_O. \tag{5}$$

其中

$$\boldsymbol{F}_D=\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2}\frac{C_D Re}{24}(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_p).$$

$$\boldsymbol{F}_O=\boldsymbol{F}_S=\frac{2K\sqrt{u}\rho \boldsymbol{d}_{ij}}{\rho_p d_p(d_{lk}d_{kl})^{0.25}}(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_p).$$

$$K=2.594,\ \boldsymbol{d}_{ij}=\frac{1}{2}(u_{i,j}+u_{j,i}).$$

式中,$\boldsymbol{u}_p$ 为颗粒速度,m/s;$\boldsymbol{F}_D$ 为颗粒的单位质量曳力,N;$\boldsymbol{F}_O$ 为其他作用力,主要包括重力、热泳力、布朗力和剪切升力(Saffman 力)等;ρ_p、d_p 分别为颗粒密度和直径;Re 为相对雷诺数;C_D 为曳力系数;$\boldsymbol{F}_S$ 为 Saffman 力;$\boldsymbol{d}_{ij}$ 为流体变形速率张量。

在超声速旋流分离器内离心力的影响远大于重力,故忽略重力的影响;热泳力主要由辐射产生,本文中不予考虑;由于是湍流运动,布朗力也可以忽略。超声速分离器内流体做强旋流流动,旋转的剪切作用非常强,由此可以产生较强的剪切升力,故在计算中主要考虑了 Saffman 力的影响。

2 数值方法

2.1 物理模型

建立的超声速旋流分离器的物理模型如图 1 所示。主要由旋流装置、喷管、旋流分离段和扩压器组成,在扩压器入口装有用于排液的集液槽。喷管设计为包含中心体的环形拉法尔喷管,收缩段采用双三次曲线法设计[10]。在分离器入口压力 4 MPa、流量 4 000 Nm^3/h、温度 30℃的工况条件下,分离器全长 743.4 mm,入口直径 80 mm,出口直径 40 mm;喷管喉部壁面和中心体直径分别为 17.48 mm 和 12.00 mm,收缩段长 67.3 mm,扩张段长 198.6 mm;扩压器长 217.5 mm;6 个导向叶片轴向均匀布置,旋流角为 47.6°。

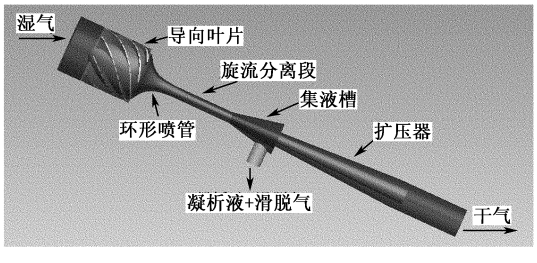

图 1 超声速旋流分离器结构

Fig. 1 Structure of supersonic swirling separator

2.2 连续相数值方法

超声速旋流分离器内是复杂的超声速旋流场,雷诺数非常高,因此选用对强旋流流场有着很好的改进效果的 RNG k-ε 模型进行数值计算[11]。

为了适应超声速旋流分离器结构复杂的特点,数值计算的网格采用四面体非结构网格,同时借助 FLUENT 的自适应网格在计算初始流场的前提下自动加密导向叶片和喷管附近的网格,可提高网格对复杂旋流场的捕捉能力和计算精度。

针对超声速可压缩气体流动特征,设定进出口边界为压力边界条件,数值计算中采用绝对压力,入口和出口压力分别为 4 和 2.68 MPa;固体壁面采用无滑移、无渗流、绝热边界。

数值计算过程采用有限体积法和二阶迎风格式对控制方程进行离散,用壁面函数法处理近壁面流动,速度场和压力的耦合采用 SIMPLE 算法。

2.3　离散相数值方法

2.3.1　随机轨道模型

在 DPM 模型中,液滴的体积浓度必须小于 10%,在这种条件下假设液滴在流场中是稀释的,同时液滴的形状被假定为球形。液滴在气相场中飞行,其阻力来源于气流,同时液滴也施加一个反作用力给气流。这个反作用力出现在气流流场的 NS 方程中,表征液滴对流场的反作用力。液滴的轨迹不仅受平均流场产生的阻力影响,还受到湍流脉动的影响[12]。湍流流动是用湍流模型进行模拟的,只能在统计平均意义上表征湍流的宏观特征, DPM 模型根据计算出的大量颗粒轨迹可以在统计意义上反映颗粒在气相流场中的运动规律[13]。另外,湍流与颗粒之间的相互作用可以用随机轨道模型进行计算,也可以用粒子云模型进行计算。本研究中流动为湍流并且希望考虑湍流对颗粒的影响,故采用随机轨道模型模拟湍流与颗粒之间的相互作用[14]。

2.3.2　液滴粒径分布

液滴的粒径分布对超声速分离器内的气液两相流场有很大的影响,根据课题组的前期研究[15],在超声速分离器的喷管出口处的液滴直径基本分布在 0.1 ~ 4 μm。针对这一分布情况,采用 Rosin-Rammler 分布模型来描述液滴的粒径分布。在该模型中,液滴的全部尺寸被分成足够多的尺寸组,每个尺寸组由一个平均粒径来表示,液滴的轨道就依据此代表粒径来计算。大于粒径 d 的颗粒质量分数为

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{d}}=\exp[-(d/\bar{d})^{n}].$$

式中,$\bar{d}$ 为液滴平均直径;n 为分布指数。$\bar{d}$ 取为 2 μm,n 取为 10。

2.3.3　边界条件

(1)喷管出口为液滴的入射面,假定液滴由这个面进入旋流分离段,计算中将这个面设置为逃逸边界条件,即液滴如果因回流到达这个面,则认为液滴不再返回计算域。

(2)超声速旋流分离器的干气出口设为逃逸边界条件。

(3)在集液槽空间壁面和液体出口采用捕捉边界条件,即液滴到达壁面和液体出口后将被捕捉。

(4)旋流分离段壁面采用捕捉边界条件,其他壁面选择反射边界条件。

3　计算结果及其分析

3.1　模型验证

在分离器入口压力为 0.6 MPa、流量为 360 Nm^3/h、温度为 30 ℃的工况下,以湿空气为介质,通过超声速旋流分离器的试验对数学模型进行验证。试验中,在超声速分离器上布置了 7 个压力测点,分别位于分离器入口、喷管收缩段、喉部、喷管出口、扩压器入口、扩压器中部和分离器出口,选用 Rosemount3051 型压力变送器测量压力,数值模拟和试验结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,由于数值方法中没有考虑液滴凝结的影响,使得喷管出口处的压力值明显大于数值模拟值,最大误差达 6.3%,但数值结果和试验测量值总体上较为一致。该数值方法准确预测了分离器内压力场的变化规律,验证了数值方法的准确性和可靠性。

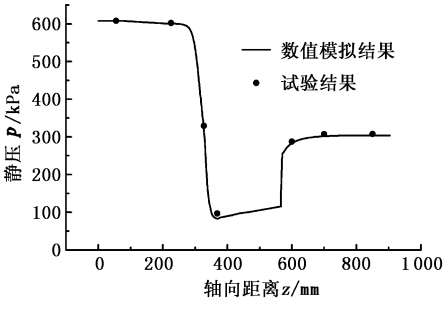

图 2　数值与试验结果验证

Fig. 2　Comparison of numerical results with experimental data

3.2　连续相流场

数值计算中流体介质采用中原白庙凝析气田 26 井天然气组分,并将 C_{5+} 以上组分设为 C_5 进行简化计算,简化后的天然气摩尔组分为:2.04% N_2, 0.45% CO_2, 0.03% H_2O, 91.36% CH_4, 3.63% C_2H_6, 1.44% C_3H_8, 0.26% i-C_4H_{10}, 0.46% n-C_4H_{10}, 0.17% i-C_5H_{12}, 0.16% n-C_5H_{12}。在超声速旋流分离器的入口压力为 4 MPa、温度 30 ℃时,相应的喷管出口处气体的密度为 4.9 kg/m^3,水的密

度为 1 074.4 kg/m^3,颗粒的体积分数远小于 1%,可以作为离散相处理,满足 DPM 模型的使用条件。

超声速旋流分离器内的气相流场的静温和切向速度沿轴向变化规律如图 3 所示。从图 3 中可以看出:气体进入拉伐尔喷管后,在喷管的收缩段气流被平稳压缩,温度下降缓慢;到达喉部后加速膨胀至超声速,温度急剧下降为-70 ℃左右;经旋流分离段静温缓慢升高,气体在扩压器入口处产生激波,温度陡然回升;经扩压器后有所恢复。天然气进入喷管后在旋流叶片的作用下发生旋转,切向速度由于中心体的收缩而得到增强;喷管出口处的切向速度约为 110 m/s,喷管出口处中心体的半径为 4.0 mm,根据离心加速度的公式,此时天然气受到的最大离心加速度约为 300 000g(g 为重力加速度,m/s^2);进入旋流分离段后,边界层与摩擦阻力的存在使切向速度略有减小,在扩压器内由于受到激波影响而急速下降,逐渐减小。

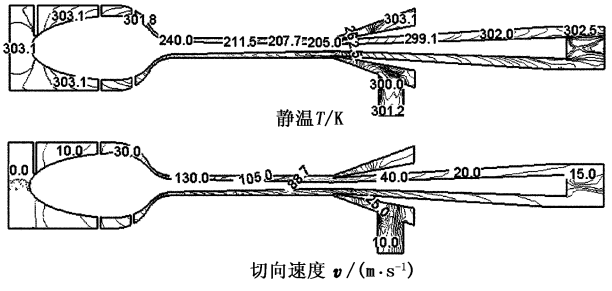

图 3 静温和切向速度沿轴向分布

Fig. 3 Axial distribution of static temperature and tangential velocity

3.3 液滴轨迹

在超声速旋流分离器中,由于液相的承载率很低,所以未考虑连续相与离散相间的耦合。液滴的速度采用喷管出口气相的速度,且液滴为水相颗粒。对液滴模型作如下基本假设:(1)液滴为球形颗粒,且不考虑液滴的蒸发过程;(2)入射颗粒的速度与气相速度相等;(3)液相颗粒被壁面捕捉到即被除去。

通过在超声速旋流分离器的喷管出口处释放液滴研究液滴的轨迹,液滴的直径范围为 0.1 ~4 μm,平均直径为 2 μm,液滴运动轨迹如图 4 所示。从图 4 中可以看出,大部分液滴在巨大离心力的作用下从集液槽排出,仅有少部分液滴从扩压器出口流出。

图 5 为 3 种典型的单个液滴的运动轨迹,即(a)当液滴直径大于 1.2 μm 时,液相颗粒与旋流分离段壁面碰撞被吸附;(b)当液滴直径位于 0.4 ~ 1.2 μm 时,液相颗粒直接进入集液槽空间排出;(c)如果液滴直径小于 0.4 μm,液相颗粒将随气相从扩压器流出。从图 5 中可以看出:第一类液滴是在巨大离心力的作用下被甩至旋流分离段壁面形成液膜,然后在惯性力的作用下沿管壁进入集液槽,最后被分离;第二类液滴在离心力和惯性力共同作用下直接进入集液槽空间排出,达到气液分离的目的。以上两部分液滴的运动形式是超声速旋流分离器内液滴的主要运动形式。第三类液滴,从喷管出口处释放后,进入旋流分离段后同样也发生旋转,但此时惯性力起主导作用,故这部分液滴随气相从扩压器出口流出,造成气体含液,但这部分液滴是极少部分。

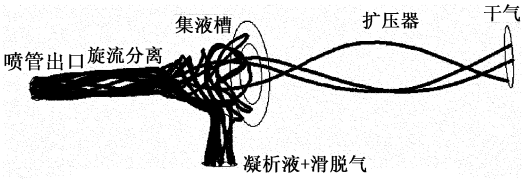

图 4 超声速旋流分离器内液滴轨迹

Fig. 4 Liquid particles trajectories in supersonic separator

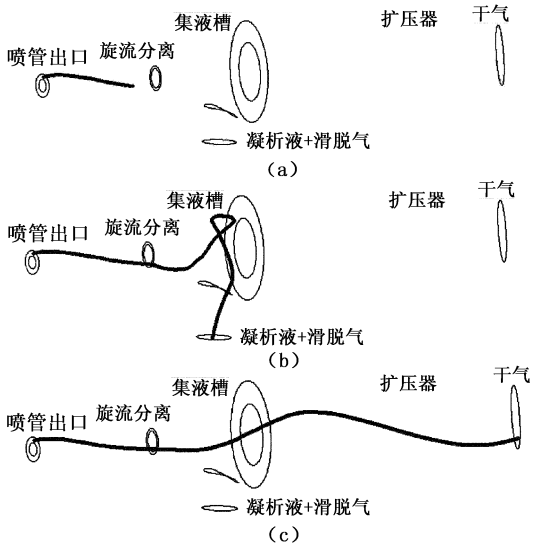

图 5 单个颗粒轨迹

Fig. 5 Single particle trajectory

4 结 论

(1)数值方法可以准确预测分离器内的压力场的变化规律,且数值计算结果和试验测量值较为一致,验证了数值方法的准确性和可靠性。

(2)在超声速旋流分离器中,天然气膨胀至超声速形成约为-70 ℃的低温,使水发生凝结;旋流叶片使天然气发生旋转,并产生最大约为 300 000 g 的离心加速度,实现气液混合物的分离。

(3)当液滴直径大于 0.4 μm 时,离心力起主要

作用,液滴将在巨大的离心场作用下被甩向管壁或直接进入集液槽被分离;当液滴较小时,惯性力占主导地位,使极少部分液滴随气相从扩压器出口流出,造成气体含液。

参考文献:

[1] OKIMOTO F, BROUWER J M. Supersonic gas conditioning [J]. World Oil, 2002,223:89-91.

[2] ALFYOROV V, BAGIROV L, DMITRIEV L, et al. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components [J]. Oil and Gas Journal, 2005,103(5):53-58.

[3] LIU H W, LIU Z L, FENG Y X, et al. Characteristic of a supersonic swirling dehydration system of natural gas [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2005,13(1):9-12.

[4] 蒋文明, 刘中良, 刘恒伟, 等. 超音速分离管内部流动的二维数值模拟与分析[J]. 工程热物理学报, 2008,29(12):2119-2121.
JIANG Wen-ming, LIU Zhong-liang, LIU Heng-wei, et al. Two dimensional simulation and analysis of the flow in supersonic separator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008,29(12):2119-2121.

[5] BETTING M, EPSOM H D. Supersonic separator gains market acceptance [J]. World Oil, 2007,254:197-200.

[6] 蒋文明, 刘中良, 刘恒伟, 等. 新型天然气超音速脱水净化装置现场试验[J]. 天然气工业,2008,28(2):136-138.
JIANG Wen-ming, LIU Zhong-liang, LIU Heng-wei, et al. Field test study on new type supersonic dehydrating facilities in natural gas purification plant [J]. Natural Gas Industry, 2008,28(2):136-138.

[7] JASSIM E, ABDI M, MUZYCHKA Y. Computational fluid dynamics study for flow of natural gas through high-pressure supersonic nozzles: real gas effects and shock-wave [J]. Petroleum Science and Technology, 2008,26(15):1757-1772.

[8] JASSIM E, ABDI M, MUZYCHKA Y. Computational fluid dynamics study for flow of natural gas through high-pressure supersonic nozzles: nozzle geometry and vorticity [J]. Petroleum Science and Technology, 2008,26(15):1773-1785.

[9] 林建忠. 流固两相拟序涡流及稳定性[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.

[10] 文闯, 曹学文, 吴梁红. 新型超声速旋流分离器设计及数值模拟[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010,34(4):119-122.
WEN Chuang, CAO Xue-wen, WU Liang-hong. Structure design and numerical simulation of novel supersonic swirling separator [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(4):119-122.

[11] POPE S B. Turbulent flows [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[12] 金向红,金有海,王建军. 气液旋流器内液滴破碎和碰撞的数值模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010,34(5):114-120.
JIN Xiang-hong, JIN You-hai, WANG Jian-jun. Numerical simulation on breakup and collision of droplet in gas-liquid cyclone separator [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2010,34(5):114-120.

[13] 周强, 程乐鸣, 骆仲泱, 等. 方形卧式分离器两相流场的数值模拟[J]. 动力工程,2004,24(4):567-571.
ZHOU Qiang, CHENG Le-ming, LUO Zhong-yang, et al. Numerical simulation of two-phase flow field in horizontal square cyclone [J]. Power Engineering, 2004,24(4):567-571.

[14] 宋健斐,魏耀东,时铭显. 旋风分离器内颗粒浓度场的数值模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008,32(1):90-94.
SONG Jian-fei, WEI Yao-dong, SHI Ming-xian. Numerical simulation on particle concentration distribution in cyclone separator [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2008,32(1):90-94.

[15] 曹学文. 超声速旋流天然气分离研究[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院,2006.
CAO Xue-wen. A study on the supersonic swirling separation of natural gas [D]. Xi'an: School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 2006.

(编辑　沈玉英)