

天然气跨音速气水分离过程中收敛-扩张喷管回压段流动分析

王俊奇¹, 白博峰², 徐永高³

- (1. 西安石油大学 石油工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 3. 中国石油长庆油田分公司 油气工艺技术研究院, 陕西 西安 710018)

摘要: 借助收敛-扩张喷管, 使天然气流仅通过流道面积的变化即可实现跨音速流动。再绕旋流段内放置的三角翼产生旋流, 达到气水分离的目的。整个实现过程中, 回压段关系到整个装置压力损失的大小。今利用 Fluent 6.1 软件对整个流动空间进行模拟计算, 再取出回压段进行分析, 得到了回压段的压力、流速等参数的变化规律和流场细节。计算结果表明, 在回压段, 旋流总体呈逐渐衰减的趋势。沿流动方向每个截面上的流动参数分布不均匀。在给定的结构和边界条件下, 回压段内的总压损失平均为 0.14 MPa。流体进入回压段时的马赫数趋近于 1, 流出回压段时的马赫数降为 0.05 左右, 降低区域从管壁向管中心逼近, 并逐渐扩大。

关键词: 天然气; 跨音速; 气水分离; 回压段; 流动; 分析

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Analysis of Natural Gas Flow in the Back Pressure Segment of the Convergence Expanding Nozzle

WANG Jun-qi¹, BAI Bo-feng², XU Yong-gao³

- (1. School of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an 710065, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China ;
3. Oil and Gas Technology Research Institute of Petro China Changqing Oil Field Company, Xi'an 710018, China)

Abstract: Using convergence-expanding nozzle, the transonic gas flow can be realized by the change of the flow channel area in the nozzle only. In order to achieve the purpose of gas-water separation, swirl flow is generated by making the natural gas flow through around the delta wing swirl segment in the nozzle. Throughout the whole executive process, the back pressure segment relates to the pressure loss of the whole equipment. In this paper, the soft ware Fluent 6.1 was used to simulate and calculate the entire flow field of the nozzle. Then, after carrying out the analysis of back pressure segment, the full and accurate detail of the variations of pressure and velocity in the back pressure segment was obtained. The results show that, in back pressure segment, overall trend of the whirlpool gradually declines. The distribution of flow parameters is uneven on each section of the back pressure segment along the flow direction. Under the given structure and boundary conditions, the average total pressure loss within the back pressure segment is 0.14 MPa. The Mach number tends to be 1 when fluid flows into the back pressure segment and drops to about 0.05 when flows out of it. The decreasing region of the Mach number begins from the wall and approaches to the pipe centre, and gradually expands.

Key words: natural gas; transonic gas-water separation; back pressure section; flow; analysis

1 前 言

通过圆管内流道面积的变化实现天然气跨音速流动和油水分离是一项简单有效的新技术。按流体流

动方向, 可将该技术装置分为喷管段、旋流段、回压段三部分。在喷管段, 借助收敛-扩张喷管, 将流体速度提高到音速, 随之增大管径继续使流体加速, 达到跨音速流动状态, 更进一步降低流体温度, 使天然气中的饱和水凝结析出; 在旋流段, 使流体流经跨音速翼, 诱导产生高速旋转运动, 使游离水滴甩出, 附着在管内壁上, 实现气水分离的目的; 在回压段, 使流体的压力温度回升, 减小压力损失。该技术装置如图 1 所示, 仅通过流道截面的变化实现天然气流的跨音速流动, 整个装置无活动部件, 设备简便, 故对该装置的研究不仅对下游的天然气的节流降压、分离脱水具有重要意义, 而且具有广阔的工业应用前景。

在文献[1,2]中, 对喷管段和旋流段的流动规律进行了研究, 分析了流体在喷管段和旋流段流动过程中的压力、流速等参数变化, 但要实现该技术, 还缺乏对回压段流动特性的分析。因此, 本文将回压段作为重点, 利用 Fluent 6.1 软件对流体在回压段的流动过程进行模拟, 得到了回压段的压力、流速等参数的变化规律, 为该技术的生产和应用奠定基础。

2 数值计算方法

2.1 数学模型和控制方程^[3-7]

对流动作如下假设: 不考虑彻体力和热辐射; 只考虑气相流场; 气体为理想气体。三维可压缩流动的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程在笛卡尔坐标系中的微分形式统一为

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial x_i} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial x_i} = 0$$

式中

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho w_1 \\ \rho w_2 \\ \rho w_3 \\ e \end{bmatrix} \quad \vec{F} = \begin{bmatrix} \rho w_i \\ \rho w_1 w_i + \delta_{i1} p \\ \rho w_2 w_i + \delta_{i2} p \\ \rho w_3 w_i + \delta_{i3} p \\ (e + p) w_i \end{bmatrix} \quad \vec{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{i1} \\ -\tau_{i2} \\ -\tau_{i3} \\ -\tau_{ij} w_j + q_i \end{bmatrix}$$

其中, $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial w_l}{\partial x_l} \delta_{ij} (l=1,2,3)$; $q_i = K \frac{\partial T}{\partial x_i}$; $e = \rho (c_v T + \frac{1}{2} V^2)$; $V^2 = \sum_{i=1}^3 w_i^2$; i, j 分

别表示笛卡尔坐标系的坐标分量($i, j = 1, 2, 3$), x, y, z 。其余符号和参数见后面符号表中的说明。

对上述方程进行雷诺平均后得到平均化后的湍流流体力学方程组, 其方程形式、本构关系、参数估算式等在计算流体力学模拟软件 FLUENT6.1 中有详细介绍, 本文采用该软件进行流动模拟。

2.2 边界条件

进口采用压力边界条件(进口截面上的静压 4.6 MPa、总压 7.2 MPa、总温 -15°C); 出口和排液口截面上亦为压力边界条件(出口背压 7 MPa、出口总温 18.35°C); 管段内壁、三角翼的表面等采用固体壁面边界条件, 三个方向的速度分量为 0, 管壁为绝热边界。

2.3 物理模型和网格剖分

模拟对象为天然气跨音速气水分离装置, 结构尺寸如图 1 所示, 图中单位为 mm, 入口处天然气流量为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 喷管的收敛段型面为 3 次曲线, 扩张段型面为直线, 在旋流段和回压段亦采用光滑

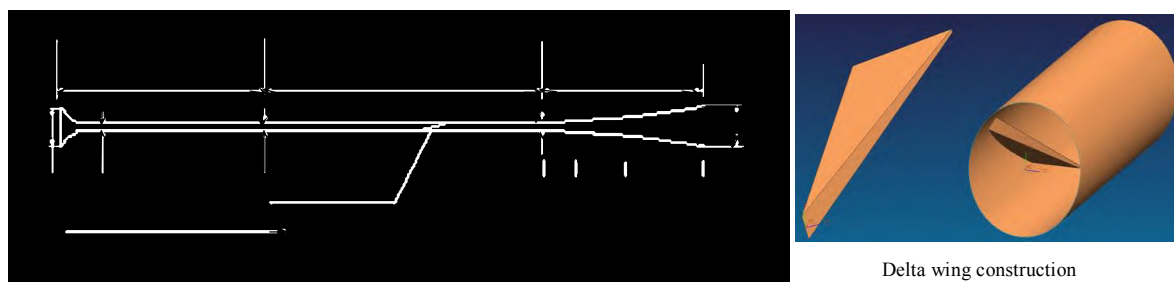


图 1 天然气跨音速气水分离装置示意图

Fig.1 Sketch of the natural gas -water transonic separation apparatus

过度的直线型面。在旋流段装有一个三角翼实现流体的旋流，这在文献[1]中有详细论述。回压段是整个装置的关键，为了研究回压段的流动规律，用 Gambit 2.1 软件对整个流动空间生成非结构化网格，再取出回压段进行研究。

2.4 计算过程

由于整个流场内的参数变化范围较大，迭代过程较难收敛，因此根据实际流场的参数分布进行流场初始化。迭代开始时，Corant 数(时间步长与空间步长之比)取较小的值 0.5 以保持计算稳定，当残差稳定、收敛后适当增大。迭代 500 步后，将 Corant 数取到 5。而且，开始最好先用一阶迎风格式计算得到一个基本收敛的结果，再在此基础上改成二阶迎风格式，得到最终的收敛结果。

3 计算结果与分析

作为三角翼旋流分离系统的重要组成部分，回压段内的流动特性也有重要的地位。期望气体在回压段内能够高效地减速增压，因此希望流动过程的损失尽可能小，而且在回压段出口截面上的静压尽可能高，流动速度降到与进口截面上的速度相当。

3.1 总压分布

图 2(a)是沿流动方向回压段入口和出口截面上的总压分布云图，截面距整个装置的入口距离分别为 793、1043 mm，图 2(b)是沿流动方向的总压分布图。从模拟结果可以看出管道内的总压在各截面上的分布是不均匀的，总体呈逐渐减小的趋势。导致总压减小的原因是：流体与管壁之间的摩擦、流体层之间相互摩擦和掺混等因素。因此，为了出口截面上达到尽可能高的静压，回压段内流动过程的损失应该尽量减小。由于气流经过旋流段后有较大的切向旋流速度，回压段各截面上的气流参数也不均匀，总压损失较大。

3.2 马赫数分布

流体进入回压段时的马赫数趋近于 1，流出回压段时的马赫数已降为 0.05 左右，如图 3 所示。马赫数反映了流体的流动速度，由于旋流的作用在不同截面上马赫数的分布也不均匀，回压段内流道面积增大，管道内径由 18 mm 增加到 60 mm，流体流速减小，从接近当地音速减小到 $18.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，流速降低的区域在各截面上从管壁向管中心逼近，并逐渐扩大。

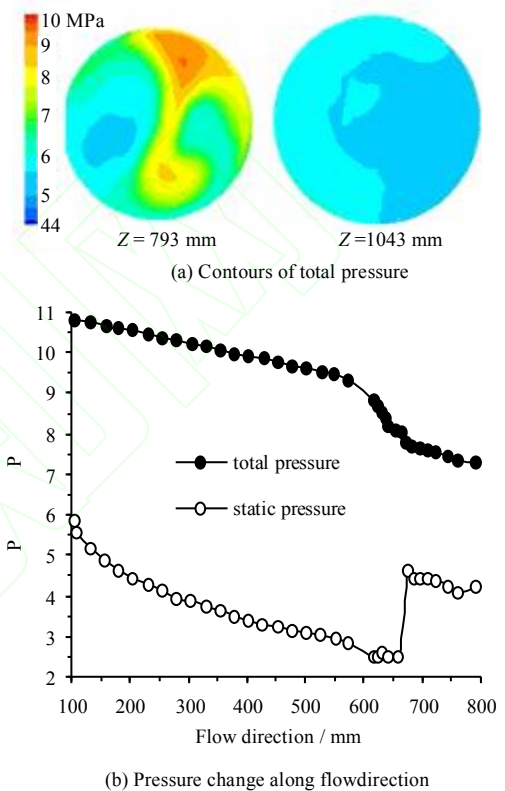


图 2 回压段内主流方向总压等值云图

Fig.2 The contours of total pressure along main flow direction in back-pressure segment

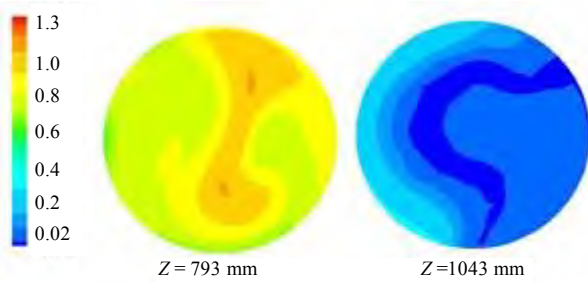


图 3 回压段内沿主流方向各横截面上马赫数等值云图

Fig.3 The contours of Mach number in several section along main flow direction in back-pressure segment

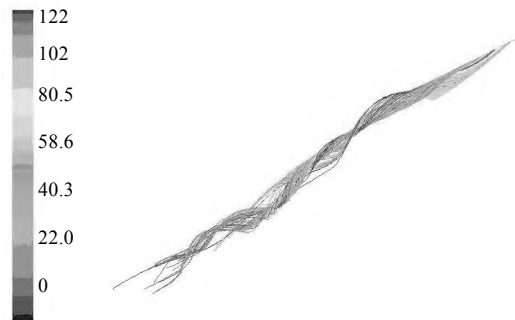


Fig.4 The streamline on delta wing in different direction

图 4 三角翼面上的流线分布图

图3的马赫数分布反映了流体沿轴向的速度分布,切向的速度可从三角翼面上的流线分布图上获得,如图4所示。超音速气流在流经三角翼后,由于前缘涡的不断产生和相互诱导,在背风面出现强度较大、稳定的涡流,由于涡对周围流体的诱导作用,气流做螺旋线运动。

3.3 二次流分布

图5反映了回压段内各截面上二次流的速度分布云图,箭头的长短表示二次流绝对速度的大小,颜色代表切线速度的大小。从图上可以看出在回压段,由于流道面积增大,旋流呈逐渐衰减的趋势。这是因为旋流是在三角翼段流经翼时产生的,通过三角翼之后,由于没有新的涡线加入,旋流无法得到不断地加强,加之局部摩擦耗散使二次流速呈逐渐衰减的趋势。

4 结 论

本文应用CFD方法,采用Fluent 6.1软件,进行了天然气跨音速气水分离回压段的数值模拟,获得了详细的流场细节与规律。计算结果表明,在回压段,旋流总体上呈逐渐衰减的趋势。流动参数在每个流动截面上的分布不均匀。在本文给定的结构和边界条件下,回压段内的总压损失约为0.14 MPa。进入回压段时的马赫数趋近于1,流出回压段时的马赫数已降为0.05左右,各个流动截面的马赫数分布也不均匀,回压段内流动不均匀会导致较大的总压损失。降低区域从管壁向管中心逼近,并逐渐扩大。

符号说明:

c_v, c_p	— 分别为流体的定容、定压比热, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	w_i, w_j	— 分别表示流体当地 i, j 方向的瞬时速度分量, $m \cdot s^{-1}$
K	— 流体导温系数, $K = \frac{c_p \mu}{Pr}$	ρ	— 流体的瞬时密度, $kg \cdot m^{-3}$
p	— 流体的瞬时压强, $kg \cdot m^{-2}$	μ	— 流体的瞬时流动黏性系数, $mPa \cdot s$
T	— 流体的瞬时温度, K	μ_t	— 湍流黏度, $mPa \cdot s$

参考文献:

- [1] WANG Jun-qi(王俊奇), XU Yong-gao(徐永高), XUE Zhong-tian(薛中天), *et al.* Transonic gas-water separation and liquid drainage technology by swirling flow in gas wellbore(气井井筒跨音速气水分离与旋流排液技术) [J]. *Acta Petrolei Sinica*(石油学报), 2006, 27(5): 119-123.
- [2] WANG Jun-qi(王俊奇), XU Yong-gao(徐永高), BAI Bo-feng(白博峰), *et al.* The numerical simulation of supersonic natural gas swirling around delta-wing(超音速天然气绕三角翼旋流的数值仿真) [C]// *The 3rd Conference on Engineering Computational Fluid Dynamics in China*(第三届工程计算流体力学会议). Harbin(哈尔滨): Harbin Institute of Technology Press(哈尔滨工业大学出版社), 2006, 117-123.
- [3] WU Yi-zhao(伍贻兆), YANG Zha-sheng(杨柞生). *Transonic Gas Dynamics*(跨音速空气动力学) [M]. Beijing(北京): National Defense Industry Press(国防工业出版社), 2004.
- [4] WANG Xin-yue(王新月), YANG Qing-zhen(杨清真). *The Basis of Thermodynamics and Gas Dynamics*(热力学与气体动力学基础) [M]. Xi'an(西安): Northwestern Polytechnical University Press(西北工业大学出版社), 2004.
- [5] WANG Fu-jun(王福军). *Computational Fluid Dynamics Analysis' CFD Software Principles and Applications*(计算流体力学分析-CFD软件原理与应用) [M]. Beijing(北京): Tsinghua University Press(清华大学出版社), 2004.
- [6] LI Ren-xian(李人宪). *The Basis of Finite Volume Method*(有限体积法基础) [M]. Beijing(北京): National Defense Industry Press(国防工业出版社), 2005.
- [7] LI Jian-long(李建隆), CHE Xiang-rong(车向荣), CHEN Guang-hui(陈光辉), *et al.* Simulation and experiment study on the flow field of new type a hydrocyclone(新型旋流器流场模拟与实验研究) [J]. *J Chem Eng of Chinese Univ*(高校化学工程学报), 2008, 22(3): 371-377.

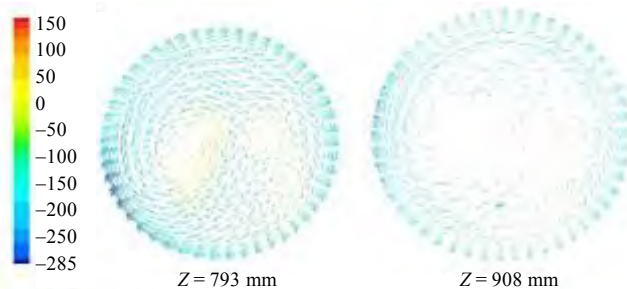


图5 回压段内沿主流方向各横截面上二次流速度矢量图
Fig.5 The contours of vectors by tangential velocity in several section along main flow direction in back-pressure segment