

含湿天然气超音速凝结研究

张书平¹ 吴革生¹ 于志刚¹ 李亮² 白博峰²

(1. 中国石油长庆油田分公司油气工艺技术研究院, 陕西 西安 710021;
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)

摘 要 在气液无滑移假设下建立了天然气超音速凝结数理模型, 研究了天然气中水蒸气的超音速凝结过程, 并分析了 Laval 喷管扩张段半扩张角对凝结的影响。结果表明凝结模型是合理的, 液滴成核只发生在喷管喉部后非常狭窄的区域, 此后水滴的生长变得非常缓慢, 直至喷管出口不再发生显著的增加; 喷管半扩张角的大小对液滴的成核、生长有显著影响, 成核位置随半扩张角的增加略向上游移动; 喷管扩张段 0.16° 半扩张角在总压损失、出口马赫数、出口液滴尺寸等方面具有最佳的综合效果。

关键词 天然气; 超音速; 凝结; 喷管

中图分类号: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2008)11-1875-04

SUPERSONIC CONDENSATION FOR WET NATURAL GAS

ZHANG Shu-Ping¹ WU Ge-Sheng¹ YU Zhi-Gang¹ LI Liang² BAI Bo-Feng²

(1. Oil & Gas Technology Research Institute, Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract A mathematic model was proposed to describe the supersonic condensation of the wet natural gas mixture based on the assumption of no-slip inter-phase. The supersonic condensation of the steam mixed in the natural gas was numerically studied. As well, the effect of divergence angle of the Laval Nozzle on the condensation process was addressed in. The numerical results show that the model is suitable. The nucleation occurs in a limited region after the throat of the nozzle and the droplet grows slowly with the supersonic flow. The divergence angle of the Laval Nozzle has great influence on the nucleation and the droplet growth. The nucleation site will move ahead with the increase of angel. The divergence angle, 0.16 degree, has the synthetic advantage about total pressure loss, outlet Mach number and outlet droplet diameter.

Key words wet natural gas; supersonic; condensation; nozzle

0 引 言

天然气在开发过程中不可避免的含有水分及重烃, 为其管道输送和处理带来巨大危害: (1) 在高压、低温条件下易形成水合物堵塞管道; (2) 形成的水滴腐蚀管道内壁; (3) 降低了天然气的热值; (4) 大量液滴会导致管道中可能会出现气液两相段塞流。因此天然气脱水除湿是进行管道输送或进行轻烃回收前必不可少的环节, 只有将天然气中的水汽含量控制在工艺流程要求的范围内, 才能保证气体进入输气干线而转化成商品气。

天然气超音速气液分离是一种非常有发展前景的脱水新技术。它集成利用气液两相流动力学、热力

学以及超音速气体动力学理论, 利用 LAVAL 喷管通过损失一定的压力, 实现天然气超音速降温冷凝, 然后采用特殊装置产生高速旋转运动实现超强离心分离, 最后采用扩压器实现回压升温过程。这项技术具有与涡轮膨胀器相似的热力学特性, 把膨胀、气/液旋转离心分离和重新压缩等过程有机结合在一起, 具有工艺流程简单、无需化学药剂、能源浪费少、凝析油回收率高、设备免维护、可无人值守等优点。

天然气超音速分离技术最早由壳牌公司所属公司开始研发, 目前已经推出 Twister-I 和 Twister-II 两代的样机, 现处于工业推广的准备阶段^[1]。国内

收稿日期: 2008-01-10; 修订日期: 2008-09-27

基金项目: 自然科学基金项目 (No.50521604) 和新世纪优秀人才的资助 (No.NCET-04-0923)

作者简介: 张书平 (1963-), 男, 甘肃西峰人, 高级工程师, 主要从事油气工艺技术的研究。

的中国石油大学、北京工业大学分别在油田公司资助下开展了相关研究。长庆油田公司联合西安交通大学于 2005 年开始进行基础研究与技术开发。

本文主要介绍天然气超音速凝结方面的研究成果。通过构建天然气凝结数理模型，采用 Fluent 商业软件对 Laval 喷管中的天然气凝结过程进行系统研究，以获得超音速凝结的基本过程规律，同时揭示几何参数对超音速凝结的影响规律。

1 天然气超音速凝结模型

1.1 物理模型

天然气是以 CH_4 为主的混合气体，本研究采用 CH_4 的物理性质进行计算。在 Laval 喷管中，由于要求天然气凝结的液滴尺寸足够大 (μm 量级)，因此要求喷管的扩张段有足够长度。这样，喷管内的流动边界层厚度将是影响计算结果的重要因素，通常一维流动模型无法获得边界层厚度，因此采用三维凝结流动模型^[2]。三维流动模型也方便喷管后的三维流动计算。由于水滴约为微米量级，因此可以假设水滴与当地气流无滑移。含湿天然气凝结流动数值模型包括：气相模块、液相模块和水蒸气成核及水滴生长模型。

1.2 气相流动控制方程

$$\frac{\partial \rho_{\text{av}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{\text{av}} U) = -\rho \dot{m} \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_{\text{av}} U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{\text{av}} U U) = -\nabla p + \nabla \cdot \Pi - \rho \dot{m} U \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_{\text{av}}}{\partial t} + \nabla \cdot (E_{\text{av}} U) = -\nabla \cdot p U + \nabla \cdot \Pi \cdot U - \rho \dot{m} (h_{\text{v}} - h_{\text{fg}}) \quad (3)$$

能量方程中总能 E_{av} 的表达式为：

$$E_{\text{av}} = \rho_{\text{av}} \left(e + \frac{1}{2} U \cdot U \right) \quad (4)$$

为了使方程组封闭，补充状态方程：

$$p = Z \rho_{\text{av}} R T \quad (5)$$

1.3 液相流动控制方程

水蒸气发生凝结后，流场中存在天然气、水蒸气以及由雾滴组成的液相，由这三种物质组成的混合物的平均密度为 ρ ，得到：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1-Y}{\rho_{\text{av}}} + \frac{Y}{\rho_{\text{l}}} \quad (6)$$

上式中湿度为 Y 。由于 $\rho_{\text{l}} \gg \rho_{\text{av}}$ ，可以近似得到：

$$\rho = \frac{\rho_{\text{av}}}{1-Y} \quad (7)$$

描述水滴分布的状态参数有水滴数 N 和水滴半径 r 。水滴数目分布的方程：

$$\frac{\partial (\rho N)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho N U) = \rho_{\text{av}} J \quad (8)$$

上式中 J 为成核率。水蒸气凝结引起湿度 Y 的增加，湿度分布方程：

$$\frac{\partial (\rho Y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y U) = \rho \dot{m} \quad (9)$$

由湿度 Y 的定义式：

$$Y = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{l}} N \quad (10)$$

$$r = \sqrt[3]{3Y / (4\pi \rho_{\text{l}} N)} \quad (11)$$

这样，由方程 (8) 和 (9) 求解得到水滴数 N 和湿度 Y ，再由式 (11) 就可以求得水滴的半径分布。质量凝结速率 \dot{m} 和成核过程以及水滴生长过程相关，表示为：

$$\dot{m} = (1-Y) J \rho_{\text{l}} \frac{4\pi r^3}{3} + 4\pi r^2 \frac{dr}{dt} \rho_{\text{l}} N \quad (12)$$

其中第一项表示自发成核而产生的相变质量，第二项表示水滴生长而产生的相变质量。

1.4 含湿量方程

在流动过程中，随着蒸汽不断凝结为水滴，天然气中的含湿量也在不断变化，因此需要给出描述天然气中含湿量变化的方程。

$$\frac{\partial \rho_{\text{v}} D}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{\text{v}} U D) = -\rho \dot{m} \quad (13)$$

在计算中应给定喷管进口的初始含湿量 d_0 。

方程 (1)、(2)、(3)、(5)、(8)、(9) 及 (13) 就是含湿天然气凝结流动的全部控制方程。

1.5 自发凝结成核及水滴生长模型

成核率 J 和水滴生长率 dr/dt 由经典的成核理论和水滴生长理论计算^[3]。

$$J = \frac{1}{1+\phi} q_c \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m^3}} \frac{\rho_{\text{av}}}{\rho_{\text{l}}} \exp\left(-\frac{4\pi r_c^2 \sigma}{3kT}\right) \quad (14)$$

$$\phi = \frac{2(\gamma-1)}{\gamma+1} \frac{h_{\text{fg}}}{RT} \left(\frac{h_{\text{fg}}}{RT} - \frac{1}{2} \right)$$

$$r_c = \frac{2\sigma T_s}{\rho_{\text{l}} h_{\text{fg}} \Delta T}$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\alpha \lambda_g \left(T_s - \Delta T \frac{r_c}{r} - T \right)}{\rho_{\text{l}} h_{\text{fg}} (r + 1.59l)} \quad (15)$$

$$\Delta T = T_s - T$$

式中 q_c 为凝结系数， α 为液滴生长校正系数。

2 三维数值方法及验证

数值计算采用 FLUENT 软件进行, 采用 UDF 编程, 将水蒸气凝结生长过程以及描述水滴尺寸和分布的液相控制方程与该软件链接。

Moore 在 1973 年公布的实验数据成为计算水蒸气凝结的经典对比数据^[4]。水蒸气进口压力 0.0248 MPa, 进口温度 357.7 K。下面采用其中的一组喷嘴尺寸和压力测量结果与计算值进行对比。

液滴表面张力计算表达式:

$$\sigma = (82.27 + 75.612T_R - 256.889T_R^2 + 95.928T_R^3) \times 10^{-3} \text{Nm}^{-1}$$

其中 $T_R = T_g / 647.286$ 。

图 1 表明程序计算结果基本与实验结果基本对应。在喷嘴喉部后压力出现小幅度的回升, 然后快速下降, 这正是发生凝结的基本现象。可见, 所提出的模型及计算方法对凝结发生位置的预报准确性良好, 但对压力回升幅度预测值小于实验结果, 压力回降的位置有较小的偏差。

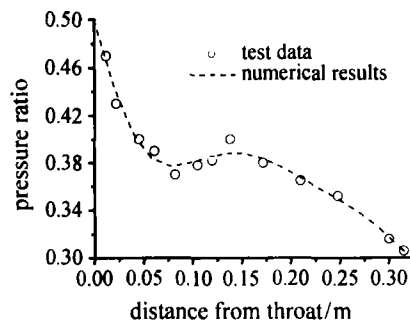


图 1 数值计算结果与实验测量值的比较

Fig.1 Comparison between the numerical calculation and the experimental data

工业过程中, 天然气压力一般较高, 而目前可供利用的高压条件下含湿天然气中凝结流动的实验数据很少, 且全部是激波管中的实验数据。因此, 数值验证只能对一些关键参数进行数量级的对比。文献^[5,6]给出了高压条件下甲烷与水蒸汽混合气体在激波管中凝结的少量实验数据。实验中发生凝结的压力在 0.4 MPa 左右, 温度在 -33°C 附近, 成核率实验值的范围为 $7.7 \times 10^{16} \sim 1.4 \times 10^{17}$ 。这些结果与本项目的数值模拟结果处在相同量级 (具体结果见下节), 说明本文的模型对高压条件下的含湿天然气超音速凝结过程是合理的, 可以被用来开展系统研究。

3 结果与分析

由于要求天然气中的水蒸气在 Laval 喷嘴出口具有较大的尺寸与湿度, 以及较小流动损失, 以便于后续流动有较高的分离效果, 因此, 在先期研究的基础上, 对喷嘴出口直径相同, 扩张段半扩张角分别为 0.14° 、 0.16° 、 0.18° 的喷嘴进行了三维凝结流动分析。入口来流总压 11 MPa, 总温 20°C , 水蒸气为饱和状态, 气体流量 $10 \times 10^4 \text{Nm}^3/\text{d}$ 。图 2~图 5 给出了三种半扩张角情况下凝结参数沿喷嘴轴线的分布。

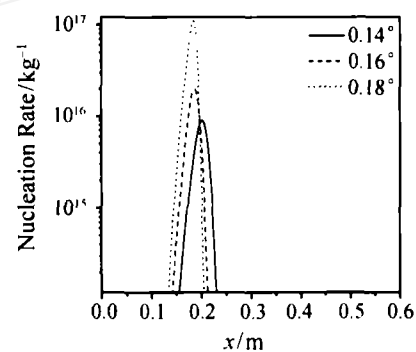


图 2 沿喷嘴轴向的成核率

Fig.2 Nucleation rate distribution in the nozzles

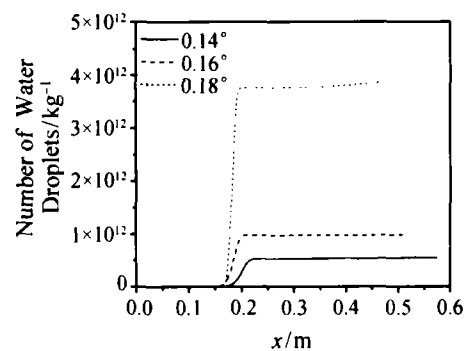


图 3 沿喷嘴轴向的水滴数

Fig.3 Number of water droplet distribution in the nozzles

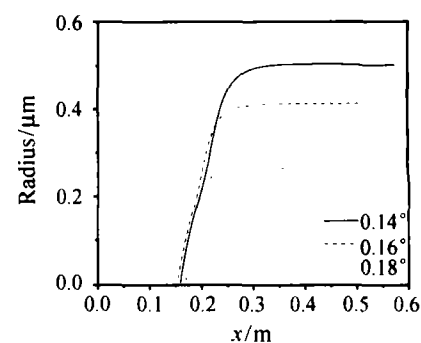


图 4 水滴平均半径沿喷嘴轴向的分布

Fig.4 Average droplet radius distribution in the nozzles

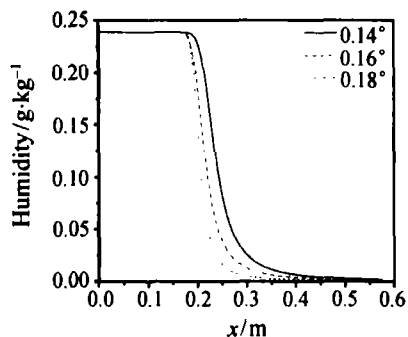


图 5 含湿量沿喷管轴向的分布

Fig.5 Humidity distribution in the nozzles

含湿天然气在 LAVAL 喷管内的液滴凝结可分成 2 个阶段：(1) 液滴凝结成核阶段；(2) 液滴成长阶段。计算结果表明，液滴成核率只存在于非常狭窄的区域，发生在喷管喉部后，成核率急剧上升到 $10^{16} \sim 10^{17}$ 量级，同时液滴数目急剧增加到 10^{12} 量级；由于在快速成核区后过冷度迅速下降，此后水滴的生长变得非常缓慢，直至喷管出口不再发生显著的增加。

喷管半扩张角的大小对液滴的成核、生长有显著的影响。半扩张角增加，由于喷管出口直径相同，因此扩张段长度减小。半扩张角增加，气体膨胀迅速，气流首先达到足够高的过冷度，因此首先发生成核现象，即成核位置略向上游移动，成核率也较大；但是，半扩张角增加后，扩张段长度减小，凝结时间减小，因此喷管出口处的液滴尺寸变小。从液滴生长率看，半扩张角为 0.16° 时的水滴生长率最大（图 4 中斜率），而且生长率达到最大值的位置也最靠近上游，在整个水滴生长阶段，生长率比其它半扩张角时的生长率都要大。

湿度表示了天然气中所含的水蒸气质量百分数，其值愈大，说明天然气中的水蒸气愈多，三种半扩张角的喷管内，天然气中剩余含湿量仍然存在细微差别。半扩张角 0.18° 喷管出口的湿度最小，为 $1.17 \times 10^{-6} \text{ kg(H}_2\text{O)/kg(CH}_4\text{)}$ ，半扩张角 0.14° 时喷管出口的湿度最大，为 $2.39 \times 10^{-6} \text{ kg(H}_2\text{O)/kg(CH}_4\text{)}$ ，占进口含水量的 1.0%。

从表 1 来看，半扩张角为 0.14° 出口马赫数最小，总压损失最大，而 0.18° 的扩张角，液滴尺寸最小，均不利于喷管后的流动分离。因此综合来看，半扩张角为 0.16° 的喷管设计最为合理，喷管出口的平均液滴半径为 $0.41 \mu\text{m}$ ，湿度为 $1.79 \times 10^{-6} \text{ kg(H}_2\text{O)/kg(CH}_4\text{)}$ 。

4 结论

在气液无滑移假设下建立了含湿天然气超音速凝结数理模型，以 CH_4 的物性代替天然气，系统研究了 Laval 喷管内水蒸气的超音速凝结过程，并分析了喷管扩张段半扩张角对凝结的影响。计算结果表明，液滴成核率只存在于非常狭窄的区域，发生在喷管喉部后；喷管扩张段半扩张角对液滴的成核、生长有显著影响，成核位置随扩张角的增加略向上游移动。在 0.14° 、 0.16° 、 0.18° 三个半扩张角中， 0.16° 时的水滴生长率最大，而且最大生长率的位置也最靠近上游，在总压损失、出口马赫数、出口液滴尺寸等方面具有最佳的综合效果，在设计工况下，液滴最大半径 $0.41 \mu\text{m}$ ，湿度为 $1.79 \times 10^{-6} \text{ kg(H}_2\text{O)/kg(CH}_4\text{)}$ ，占进口含水量的 0.7%。

表 1 不同扩张角喷管流动和水滴参数

Table 1 The outlet flow parameters and droplet radius in the nozzles with different divergence angles

| 半扩张角 ($^\circ$) | 出口马赫数 | 出口温度 ($^\circ\text{C}$) |
|-------------------|------------------------|---------------------------|
| 0.14 | 1.51 | -54.7 |
| 0.16 | 1.53 | -56.3 |
| 0.18 | 1.55 | -58.0 |
| 半扩张角 ($^\circ$) | 水滴半径 (μm) | 总压损失 (Pa) |
| 0.14 | 0.50 | 296700 (2.7%) |
| 0.16 | 0.41 | 268000 (2.4%) |
| 0.18 | 0.26 | 210300 (1.9%) |

参考文献

- [1] L M Brouwer, H D Epsom. Twister Supersonic Gas Conditioning or Unmanned Platforms and Subsea Gas Processing. Offshore Europe, Aberdeen UK, 2003. 2-5
- [2] Emmons H W. Fundamentals of Gas Dynamics. Princeton University Press, 1958
- [3] Kiril A Streletzky, Yury Zvinevich, Barbara E Wyslouzil. Controlling Nucleation and Growth of Nanodroplets in Supersonic Nozzles. Journal of Chemical Physics, 2002, 116(10): 4058-4070
- [4] Moore M J, Walters P T, Crane R I, et al. Predicting the Fog-Drop Size in Wet-Steam Turbines. IME Conference Publication, 1973, 3: 101-109
- [5] Lamanna G. On Nucleation and Droplet Growth in Condensing Nozzle Flows. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, Proefschrift, 2000. ISBN 90-386-1649-X
- [6] Luijten C G M. Nucleation and Droplet Growth at High Pressure. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, Proefschrift, 1998. ISBN 90-386-0747-X