

文章编号: 1000-8241(2022)08-0980-07

背压对湿天然气超声速凝结特性影响的数值模拟

边江¹ 杨健¹ 李玉星¹ 刘杨¹ 褚奇¹ 杨文² 曹学文¹

1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院·山东省油气储运安全重点实验室; 2. 国家管网集团华南分公司

摘要: 超声速旋流分离器出口背压会导致 Laval 喷管内产生气动激波, 而超声速流动、激波与相变的相互作用十分复杂。为探究激波作用下湿天然气超声速流动特性, 以甲烷-水蒸气双组分混合气体为研究对象, 建立湿天然气超声速凝结和流动数学模型, 分析出口背压和入口压力对湿天然气超声速凝结流动特性的影响, 以评估激波作用下超声速旋流分离器的工作性能。模拟结果表明: 激波的存在导致水蒸气压力和温度在短时间内急剧升高, 使已凝结的液滴重新蒸发, 出口液相质量分数大幅减小; 随着入口压力的增大, 成核发生位置逐渐靠近 Laval 喷管喉部, 相应的极限成核率与液滴数目随之减小, 但由于液滴生长速率和液滴半径的增大, 液相质量分数随之增大; 当背压高于 25 kPa (即压比高于 0.58) 时, 喷管已失去液化性能, 无法正常工作。因此, 需要合理控制压比以保障背压存在情况下超声速旋流分离器的脱水效率。(图 5, 参 21)

关键词: 天然气; 水蒸气; Laval 喷管; 超声速; 凝结; 背压; 激波; 数值模拟

中图分类号: TE86

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.08.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical simulation on effects of back pressure on supersonic condensation properties of wet natural gas

BIAN Jiang¹, YANG Jian¹, LI Yuxing¹, LIU Yang¹, CHU Qi¹, YANG Wen², CAO Xuewen¹

1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China)//Shandong Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety; 2. PipeChina South China Company

Abstract: The back pressure at the outlet of supersonic cyclone separator usually causes aerodynamic shock wave in Laval nozzle, and the interaction of supersonic flow, shock wave and phase transition is very complicated. In order to explore the supersonic flow properties of wet gas under the action of shock wave, study was performed on the methane-water vapor mixtures. Then, a mathematical model for the supersonic condensation and flow of wet natural gas was established. Meanwhile, the effect of the outlet back pressure and inlet pressure on the supersonic condensation property of wet natural gas was analyzed to evaluate the performance of the supersonic cyclone separator under the action of shock waves. The simulation results show that the shock waves can cause the rapid increase in pressure and temperature of water vapor in a short time, leading to the condensed droplets re-evaporate and the liquid mass fraction at outlet reduces sharply. Besides, as the inlet pressure increases, the location of nucleation approaches the throat of Laval nozzle gradually, and the limit nucleation rate and the droplet number decrease accordingly. However, the liquid mass fraction increases due to the increasing of growth rate and sizes of droplets. Moreover, the nozzle loses its function of liquefaction when the back pressure is higher than 25 kPa (i.e., the pressure ratio is higher than 0.58), and then the nozzle cannot operate normally. Therefore, it is necessary to control the reasonable pressure ratio to ensure the dehydration efficiency of the supersonic separator with back pressure. (5 Figures, 21 References)

Key words: natural gas, water vapor, Laval nozzle, supersonic, condensation, back pressure, shock wave, numerical simulation

天然气是一种高效、经济、清洁的化石能源,随着国家经济的快速发展和“双碳”战略目标的提出,天然气需求量保持着稳定、持续的增长态势^[1]。井口开采出的天然气通常含有大量水蒸气和酸性气体等杂质,在储存和利用之前需要对其净化处理。超声速旋流分离器作为新一代天然气处理加工装置^[2],在天然气脱水^[3-4]领域已实现工业应用,在天然气脱酸气^[5-6]和液化^[7-8]等领域也进行了应用初探。该装置可以在井口实现天然气的净化处理,是对现有天然气集输工艺的发展和完善,具有良好的应用前景。

在超声速旋流分离器中,Laval 喷管作为气体凝结的场所,是整个装置的核心部件,国内外学者对喷管内气体超声速流动和凝结问题进行了大量研究。Jassim 等^[9-10]利用计算流体力学模拟技术研究了 Laval 喷管内的高压天然气流动特性,获得了真实气体和喷管几何结构对超声速流场的影响规律。Ma 等^[11-12]建立了用于预测水蒸气自发凝结的数学模型,结合成核和液滴生长理论详细描述了水蒸气在喷管内的凝结特性。曹学文等^[13]对喷管内空气-水-乙醇 3 组分混合气体的超声速凝结特性进行了数值计算,系统研究了 3 组分混合气体超声速凝结的影响因素,分析了乙醇气体对混合物凝结成核过程的影响。

在实际生产中,为了维持超声速旋流分离器下游管道的输送压力,在其出口往往设置一定背压。背压可能导致 Laval 喷管内产生气动激波,对喷管内湿天然气的流动和凝结特性产生较大影响:当激波产生时,气体压力和温度急剧升高,随着背压的升高还会导致激波位置向上游移动,甚至可能影响水蒸气的凝结过程。基于气体成核与液滴生长的基本理论,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_v u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_v u_j u_i) = -\frac{\partial \rho_v}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho_v \overline{u'_i u'_j}) + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_v E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_v u_j E + u_j p_v) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_j \tau_{\text{eff}} \right) + S_h \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y) = S_Y \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho N u_j) = J \quad (5)$$

$$r_d = \sqrt[3]{\frac{3Y}{4\pi\rho_l N}} \quad (6)$$

式中: t 为时间, s; u_i 和 u_j 分别为混合气体在管道轴向和径向的速度, m/s; u'_i 和 u'_j 分别为混合气体在管道轴

以甲烷-水蒸气双组分混合气体为研究对象,在考虑激波作用的条件下开展湿天然气超声速凝结流动特性数值模拟,以获得凝结冲波、气动激波对喷管内气体非平衡凝结流动参数的影响规律,提高复杂工况下湿天然气超声速脱水效率,完善现有天然气净化处理工艺。

1 计算模型

1.1 喷管结构

为了研究激波作用下 Laval 喷管内湿天然气超声速流动特性,采用 Moses 等^[14]设计的喷管结构,总长 140 mm,喉部距进口 62 mm,喉部直径 10 mm;收缩段与扩张段分别由半径 53 mm、686 mm 的圆弧构成(图 1,其中 x_i 和 x_j 分别为管道轴向和径向位置)。

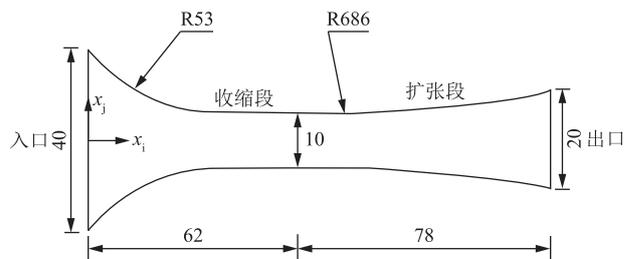


图 1 Laval 喷管几何结构示意图 (mm)

1.2 控制方程

描述超声速凝结相变过程的气液两相控制方程包括描述气相的质量、动量、能量方程,以及描述液相的液滴数目方程和液滴半径方程,各方程中添加了受液滴凝结影响而产生的源相^[15]。

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_v u_j) = S_m \quad (1)$$

向和径向的速度分量, m/s; δ_{ij} 为克罗内克函数; p_v 为混合气体压力, Pa; η 为混合气体的动力黏度, (N·s)/m; E 为混合气体的总能量, J/kg; τ_{eff} 为有效应力张量; k_{eff} 为有效导热系数, W/(m·K); T 为混合气体温度, K; Y 为液相质量分数; J 为成核率, 个/(m³·s); r_d 为液滴半径, m; ρ 为混合气体密度, kg/m³; ρ_v 、 ρ_l 分别为气相、液相密度, kg/m³; N 为单位质量自发凝结液滴数目,

个/kg; S_m 为质量源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; S_h 为能量源项, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; S_u 为动量源项, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$; S_Y 为液相质量分数源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

1.3 凝结模型

水蒸气流入喷管后经高速膨胀产生低温效应, 逐渐达到饱和状态, 但此时不会立即发生凝结现象, 必须在过饱和度超过一定值时才会突破自由能障, 形成凝结核心。凝结过程中的成核率是自由能的指数函数, Girshick 等^[16-17]基于 Katz-Wiedersich 动力学成核理论并结合熵、临界半径等概念, 推导出内部一致经典成核理论进行成核率的计算, 具体计算式如下:

$$J = \frac{1}{s} \frac{\rho_v^2}{\rho_l} \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m_o^3}} \exp\left(-\frac{16\pi\sigma^3}{3k_B\rho_l^2 R_M^2 T^2 \ln^2 S}\right) \exp\theta \quad (7)$$

式中: s 为过饱和度; σ 为表面张力, N/m ; m_o 为单个水蒸气分子的质量, kg ; R_M 为气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k_B 为玻尔兹曼常数, 取 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; θ 为无量纲表面张力。

在凝结核心出现后, 水蒸气分子继续在凝结核心表面凝结, 使液滴半径不断增大, 整个生长过程是一个典型的传质、传热过程, 液滴生长释放出的潜热会加热液滴本身和周围气体, 从而对流场产生影响。由于凝结核心的尺寸很小, 因此, 在计算中忽略液滴之间的碰撞与聚并。Gyarmathy 等^[18-19]提出的液滴生长模型应用较普遍, 采用该模型可以求得液滴生长速率 dr/dt :

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\lambda_v \left(1 - \frac{r_c}{r_d}\right) (T_s - T)}{\rho_l h_{lv} r_d \left(1 + \frac{4\sqrt{2\pi}}{1.5 Pr_v} \frac{\gamma}{\gamma + 1} Kn\right)} \quad (8)$$

式中: λ_v 为水蒸气的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; r_c 为临界液滴半径值, m ; T_s 为气体的过冷度, K ; h_{lv} 为自发凝结潜热, J/kg ; Pr_v 为水蒸气分子普朗特数; γ 为气相比热比; Kn 为克努森数。

1.4 网格划分

采用 ANSYS Fluent 16.0 软件开展湿天然气超声速凝结流动过程的模拟计算。对 Laval 喷管进行网格划分, 并对边界层网格进行加密。针对超声速可压缩气体流动特征, 设定入口边界为压力入口, 出口边界为压力出口, 壁面边界为无滑移、无渗流、绝热边界。

对所划分的网格结构进行网格无关性验证。采用 $k-\omega$ 湍流模型, 对不同网格数的喷管进行模拟计算, 得出液相质量分数在 Laval 喷管内的分布(图 2)。当网格数大于 9 047 时, 继续加密网格对计算结果的影响

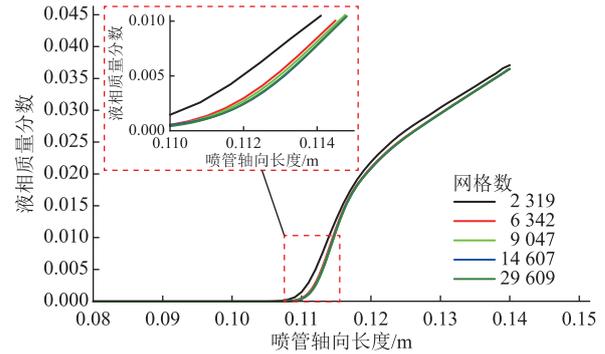


图 2 不同网格数对应的 Laval 喷管内液相质量分数分布曲线不大。综合考虑计算资源和计算精度, 选择网格数为 9 047 的喷管模型进行模拟计算。

1.5 模型验证

Moses 等^[14]的实验数据能够准确反映自发凝结所引起的流动变化。为了验证所建立的凝结模型、湍流模型、流动方程的准确性, 采用 Moses 等的实验数据与数值模拟结果进行对比分析。计算条件为: 入口水蒸气压力 70.727 kPa, 入口温度 377 K, 出口背压 0 kPa。由数值计算得到的沿程压力与入口压力的比值(简称压比)沿喷管中心轴线的变化情况(图 3)可知, 沿轴线方向, 气体在喷管内的压比逐渐下降, 当自发凝结发生时, 压比曲线先上升再下降, 这是由于凝结过程释放潜热加热气流产生了凝结冲波, 数值计算结果和实验值吻合较好, 说明所建立的数学模型和数值计算方法具有较高的准确性。

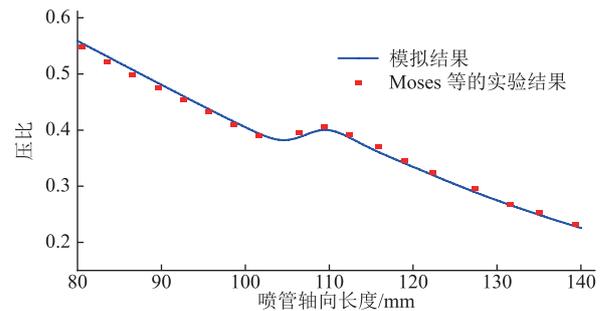


图 3 Laval 喷管模型模拟结果与 Moses 等实验结果对比图

2 模拟结果

2.1 出口背压对水蒸气超声速凝结特性的影响

设置入口水蒸气温度为 360 K、入口水蒸气压力为 43 kPa, 水蒸气的出口背压分别为 15 kPa、20 kPa、25 kPa(对应压比分别为 0.35、0.47、0.58), 模拟该条件下天然气中水蒸气的超声速凝结过程, 得到出口背压对水蒸气超声速流动与凝结参数的影响(图 4)。

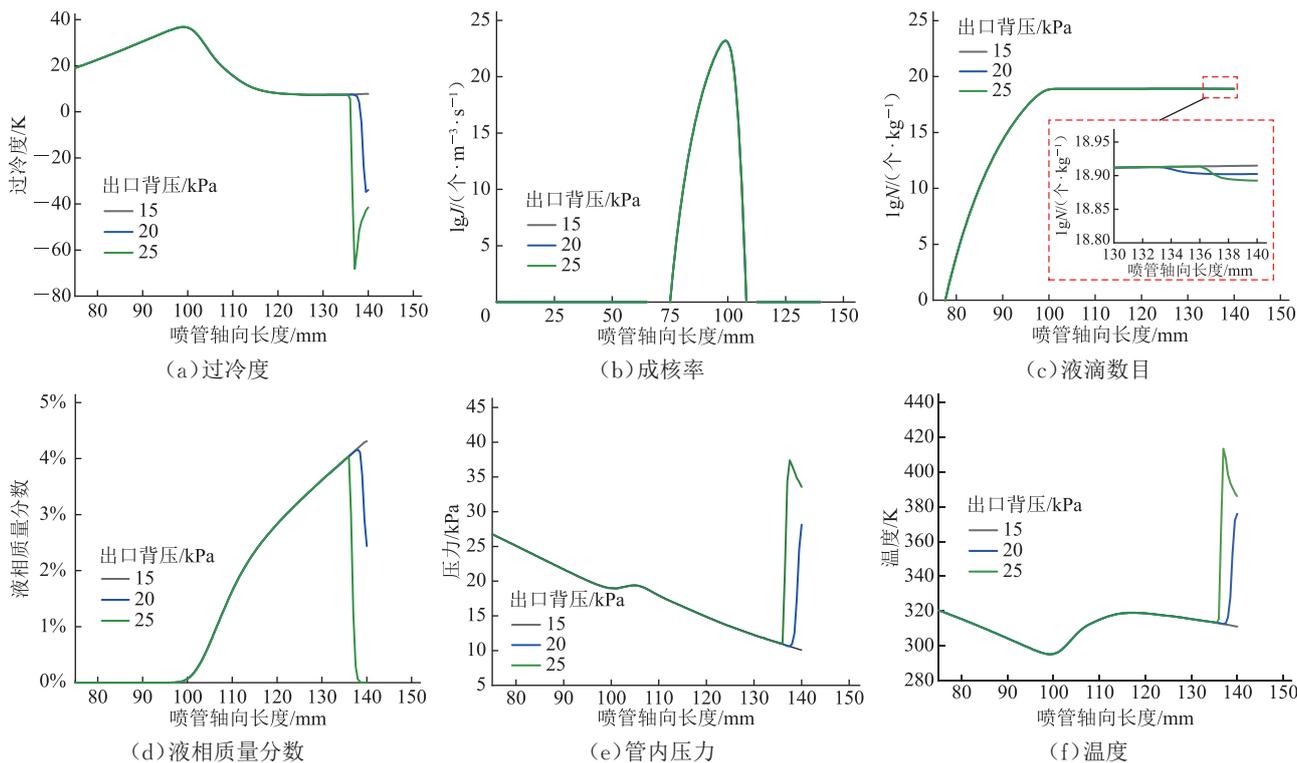


图4 不同背压下水蒸气超声速流动与凝结参数分布曲线

在混合气体进入 Laval 喷管喉部之后,过冷度迅速增大,气体呈现明显的热力学不平衡状态,此后,由于凝结成核释放潜热对气体进行加热,过冷度迅速下降至 7.5 K 左右,直至在接近喷管出口时,由于背压的作用再次发生波动(图 4a)。在刚进入 Laval 喷管的一段距离内,气体未处于饱和状态,因而未凝结形成液滴;当凝结发生时,成核率及液滴数目在短时间内迅速增大,成核率在喷管轴向长度 99 mm 附近达到最大值,约为 1.57×10^{23} 个/($\text{m}^3 \cdot \text{s}$),之后由于气体凝结释放潜热,成核率再次迅速减至 0 个/($\text{m}^3 \cdot \text{s}$) (图 4b),液滴数目在较短距离内从 0 个/kg 急剧达到峰值 (7.91×10^{18} 个/kg),由于在计算中忽略了液滴间的撞击情况,液滴数目在达到峰值后基本维持稳定(图 4c)。在形成液滴之后,液相质量分数从 0% 逐渐增大,在过冷度下降后,由于水蒸气分子仍可以在液滴表面不断聚集,液相质量分数继续增大但增长速率放缓;随着背压的增大,过冷度明显减小,导致已经凝结的液滴出现重新蒸发,出口液相质量分数也大幅减小,当出口背压从 20 kPa 增至 25 kPa 时,喷管内最大液相质量分数从 4.16% 减至 4.04%,喷管出口液相质量分数从 2.44% 减至 0%(图 4d)。

由不同背压条件下湿天然气在喷管内的压力分布(图 4e)可知,湿天然气通过喷管喉部后发生凝结,

出现凝结冲波,导致压力出现小幅度跃升。当背压为 15 kPa 时,凝结冲波的产生促使压力升高 450 Pa,但是凝结冲波发生后下游的压力分布没有出现间断,说明无气动激波产生,除了在凝结发生处出现压力跃升外,压力沿喷管轴向呈单调递减趋势,此时背压对喷管内部流动无影响。当背压升高至 20 kPa 时,压力在接近喷管出口 ($x_i = 138$ mm) 出现间断,而此处并无凝结现象发生(图 4b),说明此处突增的 17.511 kPa 压力是由气动激波造成的,该压力跃升值约为上游发生凝结冲波造成的压力跃升值的 39 倍,而当背压升高至 25 kPa 时更是达到了约 59 倍,发生位置也前移至 $x_i = 135$ mm 处。此外,气动激波在发生的时间和空间上明显比凝结冲波短,即凝结冲波具有一定的厚度,相对气动激波发展较为缓慢,而气动激波的厚度很小,导致压力场的突变。综合分析可知,当出口背压为 15 kPa (即压比低于 0.35) 时,气动激波没有进入喷管内,对湿天然气的超声速流动过程无影响。

由不同背压条件下湿天然气在喷管内的温度分布(图 4f)可知,当背压为 15 kPa 时,由于没有气动激波产生,除了凝结冲波导致温度回升 23.8 K 外,温度沿喷管轴向呈单调递减趋势,说明此时背压对喷管内部湿天然气的温度场无影响;当背压升高至 20 kPa 时,受气动激波影响,温度在接近喷管出口处出现跃升,约

升高 56.6 K, 该值约为上游发生凝结冲波造成的温度跃升值的 2.4 倍, 当背压升高至 25 kPa 时, 达到约 4.2 倍。

对比不同背压条件下的湿天然气超声速凝结流动特性可知, 在背压导致的气动激波产生之前, 不同背压下湿天然气的流动和凝结参数分布基本一致, 直至接近喷管出口处, 随着出口背压升高, 气动激波逐渐产生且向入口方向移动, 激波的存在逐渐影响湿天然气的凝结和流动状态, 且背压越大, 影响越显著。当背压为 20 kPa 和 25 kPa 时, 在接近喷管出口处出现气动激波, 激波的产生导致水蒸气压力和温度在很短时间内急剧升高。背压变化对水蒸气成核率和液滴数目基本不产生影响, 这是由于激波仅位于喷管出口, 仅影响接近喷管出口的参数变化, 没有影响到水蒸气成核区域。随着背压升高, 过冷度和液相质量分数均明显减小, 当背压高于 25 kPa (即压比高于 0.58) 时, 喷管失去液化性能, 无法正常工作。通过改变出口背压可知, 不同压比会显著影响气动激波的产生及强度; 气动激波比凝结冲波对流场造成的影响更大, 其使凝结液滴再次蒸发, 严重影响湿天然气的脱水效率。

2.2 入口压力对水蒸气超声速凝结特性的影响

设置入口水蒸气温度为 360 K、出口水蒸气背压为 20 kPa, 入口水蒸气压力分别为 33 kPa、38 kPa、

43 kPa、48 kPa (对应压比分别为 0.61、0.53、0.47、0.42), 研究入口压力对水蒸气超声速凝结特性的影响 (图 5)。

随着入口水蒸气压力从 33 kPa 增大至 48 kPa, 气体所达到的极限过冷度降低, 原因在于相同的温度下, 水蒸气压力越大, 出现大规模成核时对应的过冷度越低, 因此, 当入口温度不变时, 入口压力越高, 水蒸气越容易达到凝结所需过冷度要求, 实现凝结 (图 5a)。在入口水蒸气压力由 33 kPa 升至 48 kPa 的过程中, 成核发生位置向喷管入口方向前移了 13 mm, 极限成核率从 2.10×10^{24} 个/($\text{m}^3 \cdot \text{s}$) 降至 5.08×10^{22} 个/($\text{m}^3 \cdot \text{s}$), 液滴数目由 1.37×10^{20} 个/kg 减至 2.57×10^{18} 个/kg, 这是由于随着成核发生位置逐渐靠近喉部, 凝结发生时的温度更高, 相应的极限成核率与液滴数目减小, 释放潜热随之减小 (图 5b、图 5c)。在入口水蒸气压力升高的过程中, 尽管液滴数目有所减少, 但随着压力的升高, 其所能达到的过冷度减小, 液滴生长速率增大, 液滴半径也随之增大^[20-21], 从而使液相质量分数增大 (图 5d)。当入口水蒸气压力由 33 kPa 增至 48 kPa, 即压比由 0.42 增至 0.61 时, 喷管中最大液相质量分数由 3.32% 增至 4.43%, 但是由于存在出口背压, 随着入口水蒸气压力的增大, 喷管出口附近开始出现激波并逐渐前移, 导致压力和温度短时间内急剧升高 (图 5e、图 5f), 过冷度和过饱和度均有所减小, 已经凝结的液滴重新蒸发, 液滴

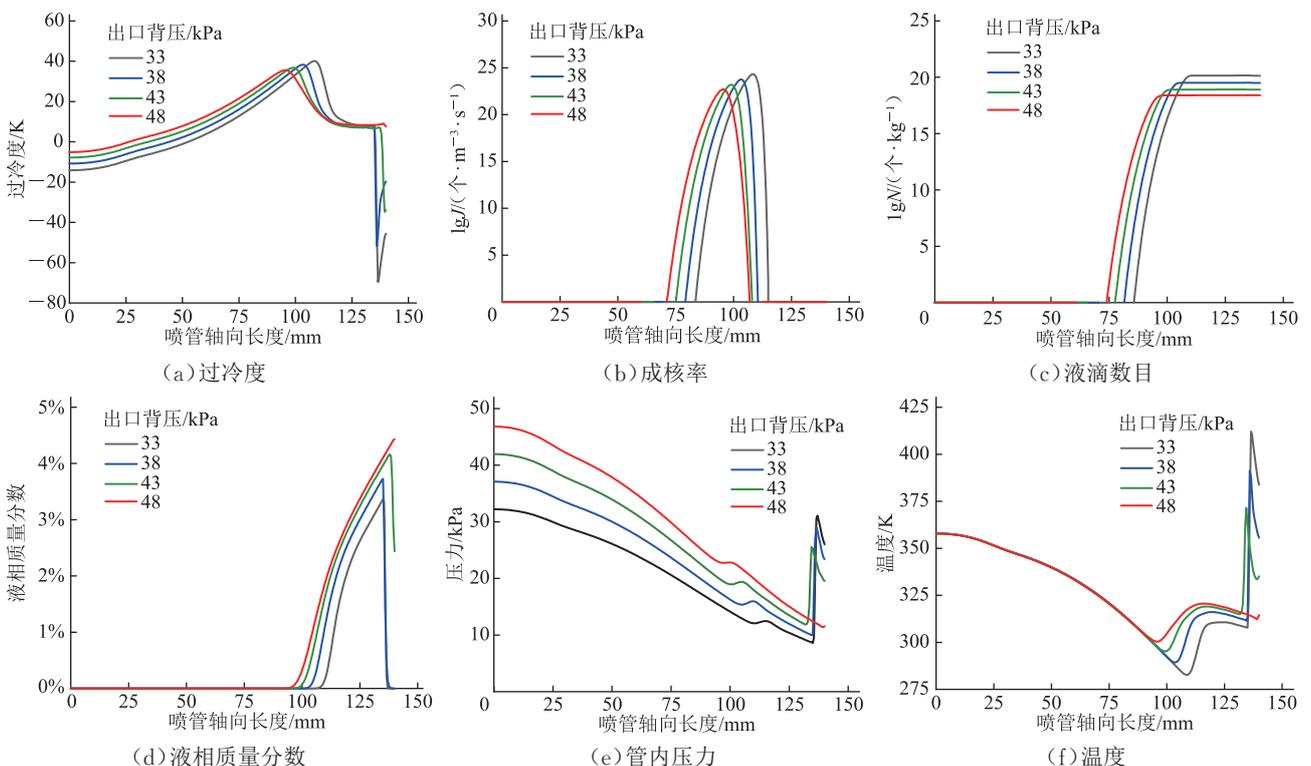


图 5 不同入口压力下水蒸气超声速流动与凝结参数分布曲线

半径迅速减小,出口液相质量分数大幅减小,当压比为0.47时,喷管出口液相质量分数减至2.44%,当压比大于0.53时,出口液相质量分数减至0%。因此,保持背压不变,通过改变入口压力也会显著影响气动激波的产生及强度,进而对湿天然气的脱水效率造成影响。

3 结论

以甲烷-水蒸气双组分混合气体为研究对象,基于气体成核与液滴生长的基本理论,建立了湿天然气超声速凝结和流动数学模型,采用ANSYS Fluent 16.0软件模拟了激波作用下出口背压、入口压力对Laval喷管内水蒸气超声速凝结特性的影响,结论如下:

(1)保持喷管入口水蒸气压力不变,随着出口背压的增大,在接近喷管出口处出现气动激波并逐渐向喷管入口方向移动,过冷度随之减小;激波的存在导致水蒸气压力和温度在短时间内急剧升高,使已凝结的液滴重新蒸发,出口液相质量分数大幅减小。当出口背压增大时,喷管内最大液相质量分数减小,当压比高于0.58时,喷管失去液化性能。

(2)保持喷管出口背压不变,随着入口水蒸气压力的升高,成核发生位置逐渐靠近喉部,相应的极限成核率与液滴数目减小,释放潜热随之减少,但由于液滴生长速率增大,液滴半径随之增大,使液相质量分数增大;由于出口背压的存在,随着入口水蒸气压力的减小(压比的增加),在接近喷管出口处逐渐出现激波,导致出口液相质量分数大幅减小。

(3)激波的位置及其对凝结和流动过程的影响主要由压比决定,不同的压比会显著影响气动激波的产生及强度,需要合理控制压比以保证湿天然气超声速脱水效率,避免凝结液滴发生二次蒸发现象。为提高Laval喷管的制冷性能,降低激波对凝结液化效率的影响,后续研究可从喷管结构优化入手,合理调控激波的波系结构,降低激波强度,以提升Laval喷管的液化效率。

参考文献:

[1] 黄献智,杜书成.全球天然气和LNG供需贸易现状及展望[J].油气储运,2019,38(1):12-19.
HUANG X Z, DU S C. Status and prospect supply and demand trading of global natural gas and LNG[J]. Oil & Gas

Storage and Transportation, 2019, 38(1): 12-19.

- [2] 边江,曹学文,孙文娟,杨文,蒋文明.气体超声速凝结与旋流分离研究进展[J].化工进展,2021,40(4):1812-1826.
BIAN J, CAO X W, SUN W J, YANG W, JIANG W M. A review on condensation and swirl separation of supersonic gas[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(4): 1812-1826.
- [3] SHOOSH TARI S H R, SHAHSAVAND A. Predictions of wet natural gases condensation rates via multi-component and multi-phase simulation of supersonic separators[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2014, 31(10): 1845-1858.
- [4] HAGHIGHI M, HAWBOLDT K A, ABDI M A. Supersonic gas separators: review of latest developments[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27(Part 1): 109-121.
- [5] WEN C, KARVOUNIS N, WALTHER J H, YAN Y Y, FENG Y Q, YANG Y. An efficient approach to separate CO₂ using supersonic flows for carbon capture and storage[J]. Applied Energy, 2019, 238: 311-319.
- [6] DE OLIVEIRA A L, DE MEDEIROS J L, DE MELO D C, TEIXEIRA A M, BRIGAGÃO G V, PASSARELLI F M, et al. Carbon capture and high-capacity supercritical fluid processing with supersonic separator: natural gas with ultra-high CO₂ content[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 66: 265-283.
- [7] 曹学文,王迪,杨文.甲烷-乙烷超声速流动液化过程的数值模拟[J].油气储运,2016,35(9):936-941.
CAO X W, WANG D, YANG W. Numerical simulation on methane-ethane supersonic flow liquefaction process[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(9): 936-941.
- [8] 边江,曹学文,杨文,于洪喜,尹鹏博.入口压力对天然气超声速液化特性的影响[J].高压物理学报,2018,32(3):1-7.
BIAN J, CAO X W, YANG W, YU H X, YIN P B. Influence of inlet pressure on supersonic liquefaction of natural gas mixtures[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(3): 1-7.
- [9] JASSIM E, ABDI M A, MUZYCHKA Y. Computational fluid dynamics study for flow of natural gas through high-pressure supersonic nozzles: part 1. Real gas effects and shockwave[J]. Petroleum Science and Technology, 2008, 26(15): 1757-1772.
- [10] JASSIM E, ABDI M A, MUZYCHKA Y. Computational fluid dynamics study for flow of natural gas through high-

- pressure supersonic nozzles: part 2. Nozzle geometry and vorticity[J]. Petroleum Science and Technology, 2008, 26(15): 1773-1785.
- [11] MA Q F, HU D P, JIANG J Z, QIU Z H. A turbulent Eulerian multi-fluid model for homogeneous nucleation of water vapour in transonic flow[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009, 23(3): 221-231.
- [12] YANG Y, WALTHER J H, YAN Y Y, WEN C. CFD modeling of condensation process of water vapor in supersonic flows[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115: 1357-1362.
- [13] 曹学文, 边江, 靳学堂, 尹鹏博, 杨文. 三组分气体超声速凝结过程数值模拟与实验研究[J]. 石油学报(石油加工), 2019, 35(1): 99-110.
- CAO X W, BIAN J, JIN X T, YIN P B, YANG W. Numerical simulation and experimental study on supersonic condensation process of ternary mixture[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2019, 35(1): 99-110.
- [14] MOSES C A, STEIN G D. On the growth of steam droplets formed in a Laval nozzle using both static pressure and light scattering measurements[J]. Journal of Fluids Engineering, 1978, 100(3): 311-322.
- [15] 边江. 超声速分离器内 CO₂ 相变凝结特性及结构优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- BIAN J. Study on the condensation characteristics of CO₂ and the structure optimization of supersonic separators[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [16] GIRSHICK S L, CHIU C P. Kinetic nucleation theory: a new expression for the rate of homogeneous nucleation from an ideal supersaturated vapor[J]. The Journal of Chemical Physics, 1990, 93(2): 1273-1277.
- [17] GIRSHICK S L. Comment on: "self-consistency correction to homogeneous nucleation theory"[J]. The Journal of Chemical Physics, 1991, 94(1): 826-827.
- [18] GYARMATHY G. The spherical droplet in gaseous carrier streams: review and synthesis[J]. Multiphase Science and Technology, 1982, 1(1/2/3/4): 99-279.
- [19] ZHANG G J, ZHANG S, ZHOU Z N, LI Y M, WANG L, LIU C. Numerical study of condensing flow based on the modified model[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 1206-1214.
- [20] 文闯. 湿天然气超声速旋流分离机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- WEN C. Wet gas separation using supersonic swirling method[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [21] 蒋文明, 刘中良, 邓展飞, 刘晓丽, 李志彪, 鲍玲玲. 入口参数对双组分混合物自发凝结流动的影响[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(6): 796-802.
- JIANG W M, LIU Z L, DENG Z F, LIU X L, LI Z B, BAO L L. Influences of inlet parameters on two-component mixture spontaneous condensation flows[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(6): 796-802.
- (收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2022-04-15; 编辑: 王雪莉)
-
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“基于超声速膨胀的重烃结晶促进天然气凝结液化机理”, 52104071; 国家自然科学基金资助项目“基于超声速膨胀的天然气非均质凝结机理”, 52074341。
- 作者简介:** 边江, 男, 1992年生, 讲师, 2020年博士毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 现主要从事油气水多相流理论及应用、天然气处理与加工相关技术的研究与教学工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 266580。电话: 18562951819。Email: bianjiang868@163.com
- 通信作者:** 曹学文, 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 2006年博士毕业于西安交通大学动力工程及工程热物理专业, 现主要从事天然气处理与加工、油气水多相流理论及应用、海底管道完整性管理等技术的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 266580。电话: 15053208836。Email: caoxw2004@163.com