

DOI: 10.3901/JME.2012.10.139

节流阀内天然气组分凝结规律研究*

柳海¹ 吕孝飞² 张锋¹ 李名生¹ 白博峰²

(1. 中国石油新疆油田分公司采气一厂 克拉玛依 834007;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室 西安 710049)

摘要: 节流制冷低温分离工艺是天然气集输过程中常见的脱水脱烃技术, 节流凝结过程是天然气露点温度能否达标、工艺系统能否优化运行的关键。基于天然气在节流阀内的凝结过程, 建立均质凝结和异质凝结统一的数值模型, 研究天然气中易发生凝结的四种烷烃(正戊烷、正己烷、正庚烷、正辛烷)组分的凝结规律, 分析背压比和总温等因素对凝结性质的影响。结果表明: 节流阀内部流场非常复杂, 呈现强湍流特性, 节流孔内达到极低的温度使烃类组分的凝结在节流孔出口前基本完成。背压比和总温增加会减弱节流温降, 使各组分的凝结量和液滴尺寸同时减小。节流过程中各组分的凝结性质存在较大差异。分子量较小的轻烃类组分, 节流孔出口凝结量大, 且凝结量和液滴尺寸受背压比和总温的影响大。

关键词: 天然气 节流 凝结

中图分类号: TK121

Component Condensation of Natural Gas in Throttling Flow

LIU Hai¹ LÜ Xiaofei² ZHANG Feng¹ LI Mingsheng¹ BAI Bofeng²

(1. Frist Gas Production Factory, PetroChina Xinjiang Oil Field Branch Company, Karamay 834007;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: In natural gas gathering and transportation process, the throttling expansion refrigeration and low temperature separation method is one of the most common technology. The condensation is a key issue during the throttling flow, as the temperature after throttle is the main influence factors of dew point. With the field data of throttling separation technology, uniform model for homogeneous and heterogeneous condensation is established to study the natural gas throttling condensation process. Four hydrocarbon components (n-pentane, n-hexane, n-heptane, n-butane) are chosen as the objects of study. The effects of back pressure ratio and inlet total temperature on the condensation properties of different hydrocarbon components are analyzed. It is shown that, the flow field in the throttle is extremely complex, and intense turbulent flow characteristics are presented. In the natural gas throttling process, extremely low temperature is obtained which provides the suitable condition for condensation of the hydrocarbons. With increase of back pressure ratio and total temperature, the condensation mass fraction and droplet size of each condensable component decrease. Great differences of condensation parameters are found among each component. For the lighter hydrocarbon components, the condensation mass fraction is greater, and the condensation mass fraction and droplet radius of which are much more affected by the back pressure ratio and inlet total temperature.

Key words: Natural gas Throttling Condensation

0 前言

天然气外输前需要进行脱水脱烃处理, 以防止

输运过程中析出的液相形成水合物堵塞管道, 影响输气管道的平稳供气和生产装置的正常运行。低温分离法是天然气处理的主流技术, 按提供冷量的制冷系统不同, 一般可分为膨胀制冷、制冷剂制冷和联合制冷 3 种^[1]。新疆油田等国内多个油田采用节流制冷、低温分离工艺, 通过节流阀的节流效应实现

* 国家自然科学基金资助项目(51121092), 20111029 收到初稿, 20120330 收到修改稿

膨胀制冷, 将天然气冷却至水露点和烃露点以下的低温, 使大部分水蒸气、重烃凝结, 在低温分离器内实现气液分离, 得到满足露点温度要求的外输天然气。在天然气节流分离工艺中, 节流阀内的凝结过程是其中非常重要的环节, 节流阀出口凝结液滴的尺寸和凝析液量直接影响到后续分离过程中的分离效率, 并最终影响外输天然气的露点温度。

天然气组分凝结过程非常复杂, 对天然气多组分凝结的研究比较少。MUITJENS 等^[2]通过在膨胀云室内的凝结试验确定了天然气组分的凝结起始点。LOOIJMANS 等^[3-4]对甲烷—壬烷、甲烷—辛烷等双组分混合物的凝结过程进行了研究。LUIJTEN 等^[5-6]在脉冲膨胀激波管内进行了多组分天然气的成核率和液滴生长率的测量试验, 并将载气作为单组分成核的干扰, 对氦气—壬烷、甲烷—壬烷等的成核过程进行了理论分析。PEETERS 等^[7-8]研究了甲烷—壬烷/水蒸气的多组分凝结过程。LABETSKI 等^[9]对甲烷/丙烷—壬烷等混合系统中的成核和液滴生长过程进行了研究。目前, 有关天然气多组分凝结的基础模型研究较少, 此外针对节流阀这类复杂通道内的组分凝结规律的研究鲜有报道, 因此开展相关研究非常必要。

天然气各组分物理性质的不同导致凝结过程差异。水和重烃组分饱和温度较高, 容易发生均质凝结, 轻烃组分由于饱和温度较低很难均质凝结。在实际工业过程中, 天然气是不纯净的, 其中的固体颗粒等杂质为天然气组分的异质凝结提供了凝结核心, 多种组分均会发生异质凝结。本文建立了均质凝结和异质凝结统一的数学模型, 对节流阀内 $C_5 \sim C_8$ 组分的凝结规律进行了研究, 分析了背压比和总温等因素对节流凝结的影响。研究结果对烃露点温度的控制有重要参考价值。

1 模型建立

1.1 几何模型

节流阀结构如图 1 所示, 气流首先由入口通道进入到节流阀内部, 通过圆柱腔上均匀分布的 4 个节流孔流到外部的环形空间, 实现节流制冷与组分的凝结; 凝结液滴在环形空间内形成较大尺寸的液滴。对图 1 的节流阀结构进行简化, 沿节流孔截面的剖视图如图 2 所示。节流孔的长度 10 mm, 环形空间宽度 10 mm。为方便分析, 取一条位于节流孔中心位置的直线, 定义节流孔入口上游 5 mm 处为坐标 0 点, 直线的终点截取到节流孔出口下游 5 mm 处, 总长度为 20 mm。

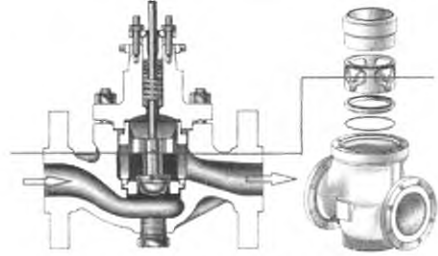


图 1 节流阀结构示意图



图 2 节流孔截面剖视图

1.2 天然气组分凝结模型

根据天然气组分的凝结性质, 建立了三维均质凝结和异质凝结统一的控制方程。进行了如下假设: 凝结生成的液滴直径非常小, 忽略液滴与气体之间的速度差和摩擦力; 系统与外界绝热, 认为凝结过程中释放的潜热全部加热气相; 不考虑组分凝结时的相互影响。

气相控制方程

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u_j)}{\partial x_j} = -\dot{m} \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_g u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} - \dot{m} u_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_g E_g}{\partial t} + \frac{\partial (u_j (\rho_g E_g + p))}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_j}{\partial x_j} + \frac{\partial (u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} - \dot{m} h_p \quad (3)$$

液相控制方程

$$\frac{\partial (\rho_g N_{\text{hom},k})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g N_{\text{hom},k} u_j)}{\partial x_j} = J_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho_g Y_{\text{hom},k})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g Y_{\text{hom},k} u_j)}{\partial x_j} = \dot{m}_{\text{hom},k} \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho_g Y_{\text{het},k})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g Y_{\text{het},k} u_j)}{\partial x_j} = \dot{m}_{\text{het},k} \quad (6)$$

式中, ρ_g 、 E_g 、 p 、 u_i 分别为气相密度、总能、压力和速度; 下标 k 代表不同的组分; q_j 、 τ_{ij} 、 h_p 分别为传热量、切应力张量和液相比焓; $N_{\text{hom},k}$ 为单位质量

天然气中自发成核形成的液滴数; $Y_{\text{hom},k}$ 和 $Y_{\text{het},k}$ 分别为单位质量天然气中均质凝结和异质凝结的液滴质量; J_k 为成核率, 采用非等温修后的经典成核率公式计算^[10]; \dot{m} 为单位体积单位时间内的凝结液滴质量, 由均质凝结质量速度 $\dot{m}_{\text{hom},k}$ 和异质凝结质量速度 $\dot{m}_{\text{het},k}$ 组成^[11]

$$\dot{m} = \sum \dot{m}_{\text{hom},k} + \sum \dot{m}_{\text{het},k} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{\text{hom},k} = J_k \rho_{l,k} \frac{4\pi r_{c,k}^3}{3} + 4\pi r_{\text{hom},k}^2 \frac{dr_{\text{hom},k}}{dt} \rho_{l,k} N_{\text{hom},k} \rho_g \quad (8)$$

$$\dot{m}_{\text{het},k} = 4\pi r_{\text{het},k}^2 \frac{dr_{\text{het},k}}{dt} \rho_{l,k} N_{\text{het},k} \rho_g \quad (9)$$

式中, $\rho_{l,k}$ 为各组分流相密度, $N_{\text{het},k}$ 为异质凝结液滴数; $dr_{\text{hom},k}/dt$ 、 $dr_{\text{het},k}/dt$ 分别为均质凝结和异质凝结液滴生长率, 采用 Gyarmathy 生长率公式计算^[12]; $r_{c,k}$ 为均质凝结的临界半径; $r_{\text{hom},k}$ 和 $r_{\text{het},k}$ 分别为均质凝结和异质凝结的液滴半径。

采用 Fluent 软件进行求解计算, 将气液相方的源项以用户自定义函数(User-defined function, UDF)形式嵌入求解器。边界条件采用压力入口和压力出口, 壁面采用无滑移条件。数值方法采用有限体积法, 二阶迎风格式离散, 雷诺应力湍流模型。本文物理模型的正确性已在文献[13]中得到了验证, 此处不再赘述。

2 结果分析与讨论

2.1 节流阀内流场分布

结合新疆油田某天然气处理站的运行参数, 取边界条件如下: 入口总压 3.9 MPa, 总温 272 K, 背压 1.6 MPa。通过对处理站的天然气组分分析, 主要研究 C₅、C₆、C₇、C₈ 的凝结, 各组分的入口摩尔体积分数分别为 0.17%、0.12%、0.05%、0.03%。为方便对节流凝结流场进行分析, 选取 4 个节流孔中心所在的平面进行分析, 图 3~6 为节流中心截面上的静压、静温、速度分布和流线图。中间圆柱腔为节流部分的进口, 左侧为节流阀的出口。

从图 3~6 可以看出, 该节流阀内的流场近似对称分布。天然气进入节流孔后, 压力和温度急剧降低, 在节流孔出口截面附近最低温度达到了 -88 °C, 为天然气各组分的凝结提供了条件, 同时此处局部流速最高达到了 550 m/s。高速气流在节流阀的狭小空间内受到壁面约束, 造成内部流场呈现强湍流特性。在节流孔出口外的环室内, 凝结液滴跟随气流做强湍流运动, 存在液滴与液滴、液滴与壁面之间的碰撞, 造成大液滴的破碎和小液滴的聚并。在环室内, 气流的温度、压力得以提高, 而流速大幅度降低。

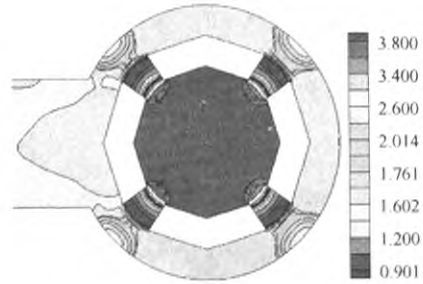


图3 节流中心截面静压等值线图(MPa)

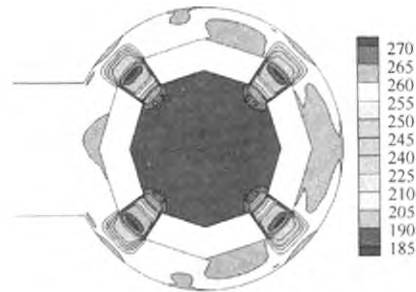


图4 节流中心截面静温等值线图(K)

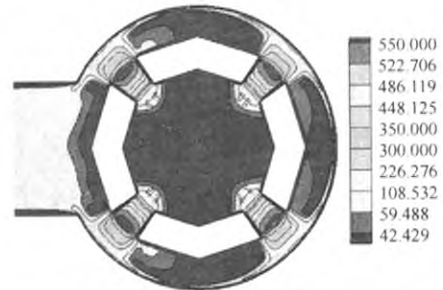


图5 节流中心截面速度等值线图(m/s)



图6 节流中心截面流线图

2.2 天然气组分的节流凝结性质

在流场计算基础上, 分别对天然气各组分的节流凝结过程进行了计算分析, 计算条件与前面相同。结合实际过程以及文献[14]有关异质凝结核心的分析, 本文取异质凝结核心的外界核心浓度 $1.0 \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$, 初始颗粒半径为 $1.0 \times 10^{-8} \text{ m}$ 。选取凝结液滴湿度作

为对比参数,分析天然气的节流凝结性质。图 7~10 为 C₅、C₆、C₇、C₈ 在节流中心截面的凝结液滴湿度分布(湿度 Y 为均质凝结液滴湿度和异质凝结液滴湿度之和)。

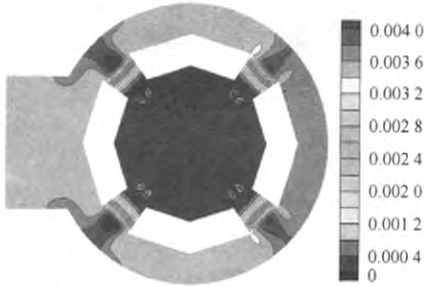


图 7 节流中心截面 C₅ 湿度等值线

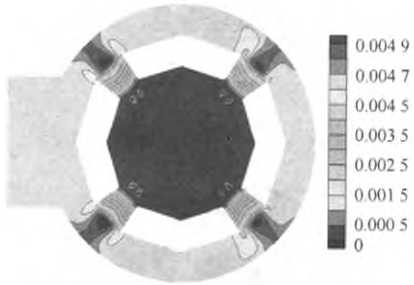


图 8 节流中心截面 C₆ 湿度等值线图

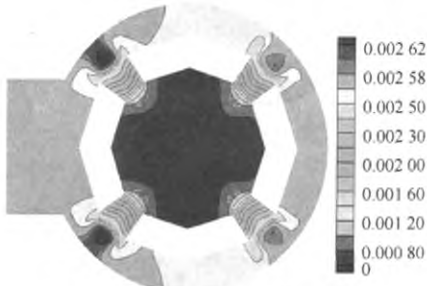


图 9 节流中心截面 C₇ 湿度等值线

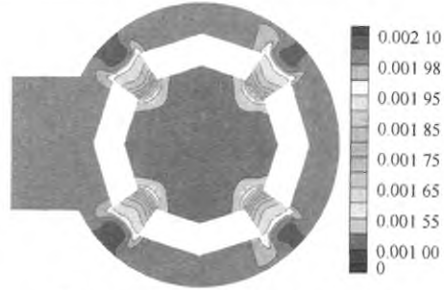


图 10 节流中心截面 C₈ 湿度等值线图

从计算结果看,天然气各组分在节流孔出口前已基本完成了凝结,节流之后各组分凝结量不再发生显著变化。由于异质凝结不需要较高的过饱和度,气体温度达到饱和温度不久即开始凝结,各组分开始凝结位置都比较靠前。随着组分分子量的增加,开始凝结的位置越靠近节流孔上游。C₇、C₈ 组分由于饱和温度较高,在节流孔外即开始凝结,在节流孔内凝结量较小,而在节流一段距离之后才达到 C₅、C₆ 的饱和温度, C₅、C₆ 开始凝结位置比较靠后,生长过程持续到节流孔出口,在节流孔内的短距离内即完成了凝结,凝结量很大,参数变化梯度也较大。

2.3 背压比对凝结的影响

保持外界核心浓度 $1.0 \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$, 初始颗粒半径 $0.01 \mu\text{m}$, 入口总压 3.9 MPa, 总温 272 K 不变, 背压比分别取 0.40、0.45 和 0.50。

将不同背压下各组分在节流孔出口的液滴尺寸和相对凝结量数据列表,如表 1 所示(相对凝结量为凝结液滴量占入口气体中该组分总质量的百分比)。

气流进入节流孔之后压力和温度持续降低,在节流孔出口外的环室内压力和温度回升,节流孔内存在压力和温度的极小值点。背压比增大,压力和温度的极小值增加,而且极值点位置向节流孔入口移动。

表 1 不同背压比下的节流孔出口凝结参数对比

背压比 p/p_0	温降 $\Delta T/K$	相对凝结量 $Y/Y_{max}(\%)$				液滴半径 $r/\mu\text{m}$			
		正戊烷	正己烷	正庚烷	正辛烷	正戊烷	正己烷	正庚烷	正辛烷
0.40	12.985	54.3	77.4	84.7	94.3	0.110	0.119	0.095 4	0.086 5
0.45	12.104	49.5	76.3	83.4	94.0	0.106	0.117	0.094 9	0.086 4
0.50	10.670	38.9	72.8	82.7	93.5	0.097	0.115	0.094 7	0.086 0

从表 1 可以看出,各组分的凝结量和液滴尺寸都随背压比的增加而减小。C₅、C₆ 组分随背压比的变化凝结量变化较明显,背压比增加 0.05,凝结量减小值最大达到了 10.6%;而背压比的变化对 C₇、C₈ 组分的凝结影响较小,背压比增加 0.05,凝结量

的变化幅度最大值只有 1.3%。对出现上述现象的原因进行分析:在流体温度与压力到达极小值点之前,由于压力温度分布的一致性,在不同背压下液滴的生长过程相同,极值点之后压力和温度的回升导致液滴的生长速度减小。背压比增加,极值点的位置

越靠前, 极值点的压力温度增大, 导致液滴生长率的减小, 在相同的凝结核心数量和初始颗粒尺寸下, 节流孔出口的液滴尺寸和凝结量都减小。C₅、C₆组分体积分数较多, 而且饱和温度较低, 不易凝结, 受背压比变化影响较大, 而C₇、C₈组分体积分数较少, 而且在进入节流孔之前已经开始凝结, 进入节流孔后在非常高的过饱和度下很容易凝结, 背压比变化造成的压力温度变化对其影响很小。

表2 不同总温下的节流孔出口凝结参数对比

温度 T ₀ /K	温降 ΔT/K	相对凝结量 Y/Y _{max} (%)				液滴半径 r/μm			
		正戊烷	正己烷	正庚烷	正辛烷	正戊烷	正己烷	正庚烷	正辛烷
267	13.407	62.6	89.1	90.6	96.6	0.116	0.123	0.097 1	0.087 1
272	12.985	54.3	77.4	84.7	94.3	0.110	0.119	0.095 4	0.086 5
277	12.479	41.4	66.0	78.6	90.8	0.101	0.112	0.090 9	0.085 5

随着总温的增大, 天然气各组分的凝结量和液滴尺寸都减小, C₅、C₆凝结量的变化幅度较大, C₇、C₈凝结量变化幅度很小。以上组分的凝结液滴尺寸随总温变化较小, 变化幅度在10%以内。主要原因是由于入口总温增大时, 在整个节流阀内温度增加, 使凝结开始位置逐渐靠后, 液滴生长速度减小, 凝结时间缩短, 导致凝结量和液滴尺寸都减小。C₅、C₆组分体积分数多, 受总温变化影响大, 而C₇、C₈组分体积分数较少, 受总温影响较小。在总温增加5 K, 温降减小0.5 K时, C₅、C₆凝结量减小值最大达到了12.9%, 而C₇、C₈凝结量变化幅度最大值只有6.1%。

3 结论

本文基于天然气处理工艺中的节流凝结过程建立了均质凝结和异质凝结统一的数学模型, 对节流阀内发生凝结的主要组分C₅~C₈的凝结规律进行了研究, 分析了背压比和总温等因素对节流凝结的影响, 得到了以下结论。

(1) 天然气在节流阀的节流孔内发生显著的温降和压降, 各烃类组分在节流孔出口前基本完成凝结过程。

(2) 背压比和总温的增大会减弱节流温降, 导致各组分的凝结量和液滴尺寸同时减小; 分子量小的烃类组分, 受背压比和总温的影响越大。

(3) 节流阀环室内部流场非常复杂, 凝结液滴在环室内跟随气流做强湍流运动, 液滴发生碰撞聚并等行为。后续研究需要构建液滴/液滴群的碰撞聚并与破碎动力学模型, 预测节流阀出口的液滴分布, 为改进节流阀环形腔的结构, 增加凝结液滴尺寸提供指导。

2.4 总温对凝结的影响

总温也是对天然气凝结影响较大的因素。保持外界核心浓度 $1.0 \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$, 初始颗粒半径0.01 μm, 入口总压3.9 MPa, 背压1.6 MPa, 分析入口总温对天然气各组分节流凝结参数的影响。总温分别取267 K、272 K和277 K。各组分节流凝结的液滴尺寸和相对凝结量变化列于表2。

参 考 文 献

- [1] 郑欣, 王遇冬, 王登海, 等. 影响低温法控制天然气露点的因素分析[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 123-125. ZHENG Xin, WANG Yudong, WANG Denghai, et al. Analysis on influencing factors of natural gas dewpoint controlled by the method of affecting low temperature [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(8): 123-125.
- [2] MUITJENS M, KALIKMANOV V I, Van DONGEN M E H, et al. On mist formation in natural gas [J]. Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP, 1994, 49(1): 63-72.
- [3] LOOIJMANS K N H. Homogeneous nucleation and droplet growth in the coexistence region of n-alkane/methane mixtures at high pressures [D]. The Netherlands: Eindhoven University of Technology, 1995.
- [4] LOOIJMANS K N H, LUIJTEN C C M, Van DONGEN M E H. Binary nucleation rate measurements of n-nonane /methane at high pressures [J]. The Journal of Chemical Physics, 1995, 103(4): 1714-1717.
- [5] LUIJTEN C C M. Nucleation and droplet growth at high pressure[D]. The Netherlands: Eindhoven University of Technology, 1998.
- [6] LUIJTEN C C M, Van HOOY R G P, JANSSEN J W F, et al. Multicomponent nucleation and droplet growth in natural gas [J]. The Journal of Chemical Physics, 1998, 109(9): 3553-3558.
- [7] PEETERS P. Nucleation and condensation in gas-vapor mixtures of alkanes and water[D]. The Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2002.
- [8] PEETERS P, HRUBÝ J, Van DONGEN M E H. High pressure nucleation experiments in binary and ternary

- mixtures [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2001, 105(47): 11763-11771.
- [9] LABETSKI D. Nucleation of n-nonane in mixtures of methane, propane, and carbon dioxide [D]. The Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2007.
- [10] YOUNG J B. Two-dimensional, nonequilibrium, wet-steam calculations for nozzles and turbine cascades [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, 114(3): 569-579.
- [11] TANAKA M, MASTUO S, SETOYUCHI T, et al. Effects of heterogeneous condensation on the transonic flow fields on a bump model [J]. *Journal of Thermal Science*, 2005, 14(1): 34-40.
- [12] GYARMATHY G. The spherical droplet in gaseous carrier streams: Review and synthesis [J]. *Multiphase Science and Technology*, 1982, 1(1-4): 99-279.
- [13] 吕孝飞, 常春, 白博峰. 正戊烷节流凝结规律研究模拟[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(16): 133-138.
- LŪ Xiaofei, CHANG Chun, BAI Bofeng. Investigation of condensation characteristics of n-pentane inthrottling flow[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(16): 133-138.
- [14] 吕孝飞, 常春, 白博峰. 节流阀中己烷凝结流动数值模拟[J]. *化工学报*, 2011, 62(9): 2447-2454.
- LŪ Xiaofei, CHANG Chun, BAI Bofeng. Numerical simulation of hexane condensing flow in throttle [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2011, 62(9): 2447-2454.

作者简介: 柳海, 男, 1967 年出生, 高级工程师, 新疆油田公司采气一厂副厂长、总工程师、安全总监。主要从事油气田开发管理工作。

E-mail: liuhai666@petrochina.com.cn

白博峰(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事多相流动与传热传质方面的研究。

E-mail: bfbai@mail.xjtu.edu.cn

节流阀内天然气组分凝结规律研究

作者: 柳海, 吕孝飞, 张锋, 李名生, 白博峰, LIU Hai, L(U) Xiaofei, ZHANG Feng, LI Mingsheng, BAI Bofeng

作者单位: 柳海, 张锋, 李名生, LIU Hai, ZHANG Feng, LI Mingsheng(中国石油新疆油田分公司采气一厂克拉玛依 834007), 吕孝飞, 白博峰, L(U) Xiaofei, BAI Bofeng(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室 西安 710049)

刊名: 机械工程学报 

英文刊名: JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

年, 卷(期): 2012, 48(10)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jxgxcb201210021.aspx