

甲烷和壬烷蒸汽在超音速喷管中的凝结过程

蒋文明^{1,2} 刘中良² 刘 杨¹

1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580

2. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124

摘要:

为了解甲烷和壬烷蒸汽在超音速喷管中的凝结特性规律,建立了甲烷和壬烷蒸汽的超音速凝结流动数值模型,对甲烷和壬烷蒸汽的超音速凝结流动进行了数值计算。研究发现:当 $x=100.0\text{ mm}$ 时,壬烷蒸汽的过冷度达到 72 K 左右,同时壬烷蒸汽的过饱和度上升到 $21\ 904$ 才发生自发凝结现象,比甲烷—水蒸气混合物发生自发凝结的位置延迟很多,分析其主要原因是由于壬烷蒸汽分子比水分子大,凝结需要更大的自由能障,必须达到较高过冷度或过饱和度时才能实现凝结;而且在甲烷—壬烷蒸汽的压力和温度曲线上找不到“凝结冲波”现象,主要原因是壬烷蒸汽发生凝结生成的壬烷凝结液滴数量较少,增长速度较慢,同时壬烷蒸汽的凝结潜热较小,导致单位时间内放出的凝结潜热较少,无法实现对周围气体的充分加热,致使甲烷—壬烷蒸汽混合物无“凝结冲波”现象。

关键词:

甲烷;壬烷;超音速;凝结;喷管

文献标识码: A

文章编号: 1006-5539(2012)03-0027-03

0 前言

超音速分离管技术是一种全新的混合气体分离技术^[1-6],可以用于井口天然气凝液分离。与传统的三甘醇脱水技术相比^[6],该技术具有结构简单,重量轻,占地面积小等优点。超音速分离管的技术关键是井口天然气在喷管内的超音速凝结过程,研究喷管内井口天然气的超音速凝结流动规律有助于了解井口天然气在喷管内的超音速凝结特性,探索天然气超音速凝结过程的有效控制方法,为提高超音速分离管的凝结分离性能提供理论基础。

井口天然气以甲烷为主,同时含有少量重烃、水蒸

气、机械杂质等组分。实际的井口天然气在喷管内的超音速凝结过程极其复杂,多种可凝组分之间相互影响、相互干扰,研究难度较大,至今国际上尚无明确研究进展。为了简化过程,将井口天然气看作甲烷与壬烷蒸汽的混合物,采用壬烷蒸汽代表天然气中的有关重烃组分,对甲烷与壬烷蒸汽在超音速喷管内的凝结过程进行模拟计算,研究天然气的超音速凝结特征,寻找提高分离性能的途径。

1 控制方程

对于甲烷与壬烷混合物来说,壬烷蒸汽为可凝组

收稿日期:

2012-04-07

基金项目:

中央高校基本科研业务费专项资金资助(12CX04070A)

作者简介:

蒋文明(1982-),男,山东邹城人,讲师,博士,主要从事油气储运及超音速脱水技术研究。

分,甲烷为不可凝组分,整个超音速凝结过程中壬烷充当相变凝结主体,发生传热传质,甲烷本身不发生相变凝结,只充当了“环境”的角色。假设甲烷与壬烷混合物在喷管内的凝结流动过程为一维、稳态、绝热、可压缩流动过程,气体与壬烷凝结液滴之间无滑移,速度相同,而且壬烷凝结液滴均匀地分布于气流中^[7],可得以下控制方程:

1.1 质量守恒方程

$$\frac{dc}{c} + \frac{d\rho_g}{\rho_g} + \frac{dA}{A} + \frac{dy}{1-y} = 0 \quad (1)$$

$$y = \frac{4}{3} \pi r_{32}^3 \rho_l N \quad (2)$$

式中 c ——混合物流动速率, m/s;

ρ_g ——气体混合物密度, kg/m³;

A ——流通面积, m²;

y ——液相的质量分数, %;

r_{32} ——液滴 Sature 平均半径, m;

ρ_l ——水液滴密度, kg/m³;

N ——单位质量混合物中的液滴数目, kg⁻¹。

1.2 动量守恒方程

$$\frac{dp}{\rho_g} + 2 \frac{c^2 f}{D(x)} dx + \frac{cdc}{1-y} = 0 \quad (3)$$

式中 p ——气体混合物的压力, Pa;

f ——喷管内气流与壁面之间的摩擦系数;

$D(x)$ ——离开喉部距离为 x 处的喷管直径, m。

1.3 能量守恒方程

$$cdc + d[(1-y)h_g] + d(yh_l) = 0 \quad (4)$$

其中

$$h_l = h_g - h_{lg} \quad (5)$$

式中 h_g ——水汽相的焓, J/kg;

h_l ——水液相的焓, J/kg;

h_{lg} ——水的汽化潜热, J/kg。

1.4 甲烷适用的气体状态方程

$$\frac{dp}{p} - \frac{d\rho_g}{\rho_g} - \frac{dT}{T} = 0 \quad (6)$$

式中 T ——混和气体的温度, K;

1.5 RKS 气体状态方程

$$Z = \frac{pv}{RT} = \frac{v}{v-b} - \Omega \frac{b}{b+v} F \quad (7)$$

式中

$$F = \frac{1}{T_r} [1 + (0.480 + 1.574\omega - 0.176\omega^2)(1 - T_r^{0.5})] \quad (8)$$

$$b = 0.08664 \frac{RT_c}{p_c} \quad (9)$$

$$\Omega = 4.93398 \quad (10)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (11)$$

式中 Z, b, F, Ω ——分别为 RKS 状态方程计算参数^[8-9];

v ——壬烷蒸汽体积, m³。

1.6 壬烷液滴临界半径计算模型

$$r_c = \frac{2\sigma}{\rho_l RT} \left\{ \left[-\ln \frac{\rho_s - b\rho_v \rho_s}{\rho_v - b\rho_s \rho_s} + \frac{b\rho_v}{1-b\rho_v} - \frac{b\rho_s}{1-b\rho_s} + bF\Omega \left(\frac{\rho_s}{1+b\rho_s} - \frac{\rho_v}{1+b\rho_v} \right) + F\Omega \ln \frac{1+b\rho_s}{1+b\rho_v} \right] - \frac{p_s}{RT} (S-1) \right\}^{-1} \quad (12)$$

式中 r_c ——水或壬烷的凝结临界半径, m;

σ ——水或壬烷液滴的表面张力, N/m;

ρ_l ——水或壬烷的液态密度, kg/m³;

R_v ——水蒸气或壬烷蒸汽的气体常数, J/(kg·K);

T_v ——水蒸气或壬烷蒸汽的温度, K;

p_s ——饱和水蒸气或壬烷蒸汽的饱和压力, Pa;

ρ_s ——水蒸气或壬烷蒸汽的饱和密度, kg/m³;

ρ_v ——水蒸气或壬烷蒸汽的密度, kg/m³;

S ——水蒸气或壬烷蒸汽的过饱和度, 1。

该模型^[10]是根据 RKS 状态方程推导出的,其物理意义类似于 Kelvin 公式,用于计算壬烷液滴临界半径的计算,但比 Kelvin 公式更适用于壬烷蒸汽。

1.7 壬烷相变凝结成核率计算模型

$$J_{CNT} = \frac{\rho_v^2}{\rho_l} \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m^3}} \exp\left(-\frac{4\pi r_c^2 \sigma}{3k_B T_v}\right) \quad (13)$$

式中 m ——单个蒸汽分子的质量, kg;

K_B ——Boltzmann 常数, J/K;

I ——成核率, kg⁻¹/s;

1.8 壬烷相变凝结液滴生长计算模型

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\lambda_v(1-r_c/r)(T_s-T_v)}{\rho_l h_{lg} \left(r + \frac{\sqrt{8\pi}}{1.5Pr_v} \cdot \frac{\gamma}{\gamma+1} \bar{l} \right)} \quad (14)$$

式^[11]中 r ——液滴的实际半径, m;

T_s ——蒸汽的饱和温度, K;

λ_v ——蒸汽的导热系数, W/(m·K);

h_{vl} ——水或壬烷的汽化潜热, J/kg;

Pr_v ——水蒸气或壬烷蒸汽的普朗特数, J·s;

$\bar{l}$ ——水蒸气或壬烷蒸汽的分子平均自由程, m;

γ ——绝热指数。

2 计算条件

利用上述控制方程对甲烷与壬烷混合蒸汽进行超音速凝结流动计算。计算条件为:模拟采用的喷管

有关几何尺寸取自文献^[12]中所给出的数据;入口压力(绝对压力)为 0.084 8 MPa;入口温度为 279.8 K;壬烷蒸汽入口过饱和度为 1.24;在甲烷与壬烷混合物的超音速凝结数值模拟中,采用的成核率修正系数为 1×10^6 ;采用的液滴生长修正系数为 1。

3 计算结果

利用上述数学模型及计算条件对文献中给出的喷管进行有关数值计算,研究甲烷与壬烷蒸汽在喷管中的超音速凝结特性,计算结果主要包括沿喷管轴向的压力、过冷度、成核率、液滴数等关键凝结参数的分布。有关计算结果见图 1~8。

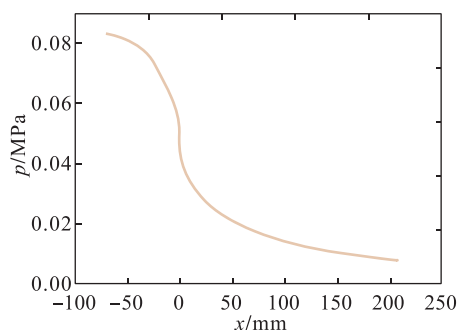


图 1 压力曲线

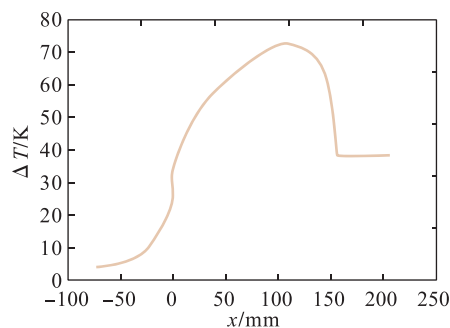


图 2 过冷度曲线

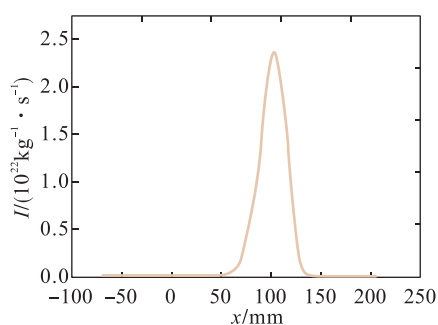


图 3 成核率曲线

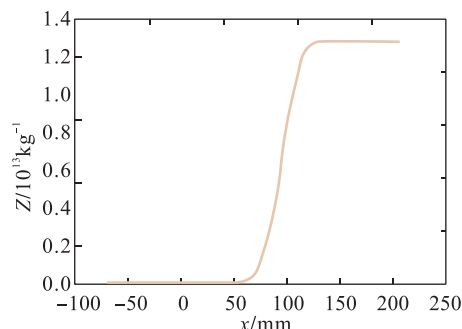


图 4 液滴数量曲线

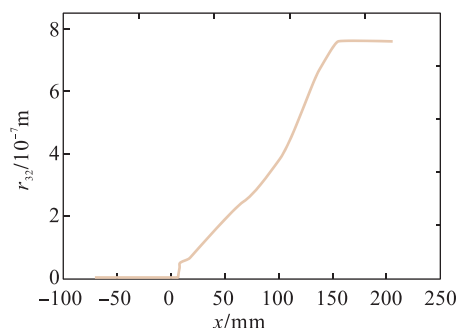


图 5 液滴平均半径曲线

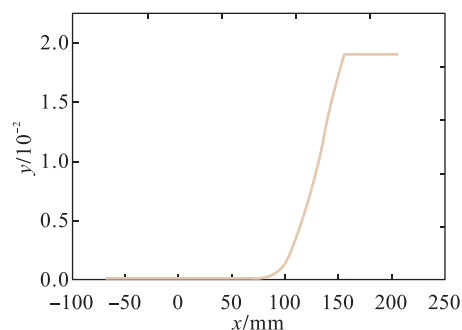


图 6 液相质量分数曲线

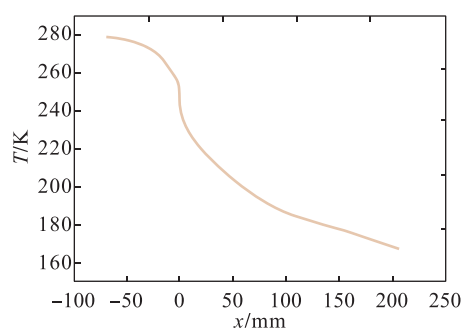


图 7 温度曲线

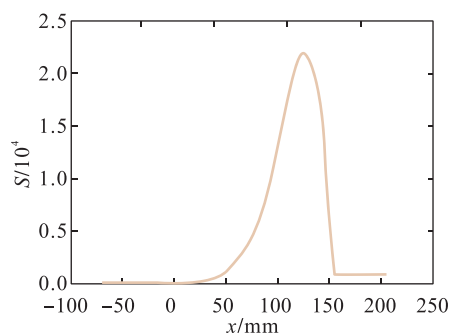


图 8 过饱和度曲线 (下转第 52 页)

(上接第29页)

从图2、8可看出,当喷管轴向距离为100.0 mm时,壬烷蒸汽的过冷度上升到72 K,同时壬烷蒸汽的过饱和度也上升到21 904,此时发现壬烷蒸汽发生自发凝结现象,到达Wilson点。从图2的过冷度分布和图8的过饱和度分布曲线上可以明显看出,甲烷—壬烷蒸汽混合物比甲烷—水蒸气混合物发生自发凝结的位置延迟很多^[11],经分析,主要是由于壬烷蒸汽分子比水分子大,壬烷分子半径为 1.3×10^{-9} m,水分子半径为 1.93×10^{-10} m,因此,壬烷蒸汽发生自发凝结所需要的自由能障也相对大,导致混合蒸汽必须达到较高过冷度或过饱和度时才能达到Wilson点,实现自发凝结过程。

从图1的压力分布曲线上找不到像甲烷—水蒸气发生自发凝结时的压力波动现象;从图7的温度分布曲线上也找不到像甲烷—水蒸气发生自发凝结时的温度波动现象。这是因为壬烷蒸汽与水蒸气的凝结过程相比,以及与水蒸气凝结液滴数量相比壬烷蒸汽凝结生成的液滴数量小很多,而且壬烷蒸汽的液滴增长速度较慢,同时壬烷蒸汽本身的发生相变凝结释放的凝结潜热也很小,单位时间内放出的热量较少,无法实现对周围混合气的充分加热作用,因此不能造成周围混合气的压力突增引发“凝结冲波”现象。

4 结论

a)当喷管轴向距离为100.0 mm时壬烷蒸汽发生自发凝结现象,比甲烷—水蒸气混合物发生自发凝结的位置延迟很多,主要原因是由于壬烷蒸汽分子比水分子大很多,壬烷蒸汽发生自发凝结所需要的自由能障也相对大很多有关。

b)压力分布曲线上找不到像甲烷—水蒸气发生自发凝结时的压力波动现象;温度分布曲线上也找不到像甲烷—水蒸气发生自发凝结时的温度波动现象。主要是因为壬烷蒸汽与水蒸气的凝结过程相比,与水蒸气凝结液滴数量相比壬烷蒸汽凝结生成的液滴数

量小很多,而且壬烷蒸汽的液滴增长速度较慢,又因为壬烷蒸汽本身的发生相变凝结释放的凝结潜热也很小,单位时间内放出的热量较少,无法实现对周围气体的充分加热。

参考文献:

- [1] 刘恒伟,刘中良,冯永训,等.新型湿空气除湿装置工作性能的实验研究[J].热科学与技术,2004,3(2):143-146.
- [2] 刘恒伟,刘中良,冯永训,等.新型天然气超声波旋流脱水装置及其内部流动规律的理论分析解[J].北京工业大学学报,2006,9(32):829-832.
- [3] 庞会中.新型超音速气体净化分离装置设计研究[D].北京:北京工业大学硕士学位论文,2009.
- [4] 曹学文,陈丽,林宗虎,等.超音速旋流天然气分离器研究[J].天然气工业,2007,27(7):109-111.
- [5] 曹学文,陈丽,杜永军,等.超声速旋流天然气分离器的旋流特性数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2007,31(6):79-81,86.
- [6] 赵铁峰.一种新型超音速分离装置[J].天然气与石油,2002,3(20):45-46.
- [7] 胡益武,缪晖,刘棋.天然气三甘醇法脱水装置的开发研究[J].天然气与石油,2002,4(20):41-44.
- [8] Tong Jingshan, Li Jing. Thermophysical Properties Calculations of Fluids[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1982.23-30.
- [9] Young J B. An Equation of State for Steam for Turbomachinery and Other Flow Calculations[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998, 110(1): 1-7.
- [10] 蒋文明.多组分凝结性超音速流传热传质理论及实验研究[D].北京:北京工业大学博士学位论文,2010.
- [11] Moore M J, Sieverding C H. Two-phase Steam Flow Inturbines and Separators [M]. New York: McGraw-Hill, 1976.
- [12] Lamanna G. On Nucleation and Droplet Growth in Condensing Nozzle Flow [D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2000.