

含杂质 CO₂ 的管道输送

李江飞¹, 段兴华¹, 李岩芳¹, 张康¹, 邹振春¹, 吴长春², 陈颖超³, 逯国强¹

1. 承德石油高等专科学校热能工程系, 承德 067000
2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249
3. 承德石油高等专科学校石油工程系, 承德 067000

摘要 作为 CO₂ 捕集与封存的中间过程, 管道输送是目前比较经济有效的 CO₂ 输送方式。捕集到的 CO₂ 通常含有氮气、氧气、甲烷、氫气、水蒸气等杂质, 其对 CO₂ 性质有不同程度的影响, 进而影响 CO₂ 的管输特性。采用 Matlab 编程计算, 利用 Span Wagner 状态方程计算和分析了纯 CO₂ 的物性参数(密度、黏度、比热等), 对比了 PR、SRK、BWRS 状态方程应用于 CO₂ 物性计算的平均偏差, 并以精度最高的 PR 状态方程为基础, 建立了一维可压缩流体管道模型, 对含杂质 CO₂ 管道在不同输送状态(超临界、密相、液态、气态)、不同杂质类型与含量、不同管道参数等条件下的管道稳态特性进行了研究。研究表明, PR 状态方程对于含杂质 CO₂ 物性参数计算的偏差较小, 在临界点附近也能有较高的精确度, 可用于含杂质 CO₂ 物性参数的计算; 在相同输送条件下, CO₂ 管道密相输送的压降值最小、超临界状态输送的压降值次之、气态输送的压降值最大; 杂质的存在使气液两相区的范围扩大, 更容易出现两相流, 增大摩阻。通过流动仿真, 并与天然气管道对比, 揭示了含杂质 CO₂ 管道在多种稳态流动条件下的管道沿线参数变化规律。

关键词 杂质; CO₂ 管道; 状态方程; 密相; 超临界状态

随着全球温室效应日益严重, CO₂ 排放问题越来越得到世界各国的重视。CO₂ 捕集与封存技术可在短期内有效降低空气中的 CO₂ 含量, 缓解温室效应, 具有重大环保价值和战略意义。该项目包括捕集、运输和封存 3 个环节, 主要任务是收集作业中排放的 CO₂, 输送到合适的地点, 最后进行长期封存。捕集方式包括: 富氧燃烧、燃烧后捕集和燃烧前捕集。CO₂ 封存地点包括: 盐水层、碳酸盐矿石、枯竭油气藏、海洋等。作为捕集和封存的中间过程, 管道输送是比较经济有效的 CO₂ 输送方式。欧美国家已开展了多个 CO₂ 捕集与封存项目, 并修建了配套的 CO₂ 管道, 中国也已开展相关项目, 并需要建设相应管道。鉴于未来可能形成的全球性低碳系统建设, 研究长距离 CO₂ 管道运输特性可以为 CO₂ 管道实际工程建设与运行提供一定的指导及理论依据^[1,2]。

CO₂ 的临界温度(31.1℃)远高于甲烷的临界温度(-82.6℃), 接近管道输送温度。当 CO₂ 处于临界点附近时, 物性参数受温度和压力影响较大, 流动特性较复杂。同时, 杂质也会对 CO₂ 性质造成一定影响, 进而影响管道水力特性。CO₂ 物性计算是 CO₂ 管道工艺计算的基础, 主要物性参数包括密度、比热、节流效应系数等。状态方程可用于流体的物性参数计算, 目前常用于 CO₂ 的状态方程有 SW(Span Wagner)、PR(Peng Robinson)、SRK(Soave Redlich Kwong)、BWRS

(Benedict Webb Rubin Starling)、GERG(European Gas Research Group)方程等。

本文基于流体状态方程计算纯 CO₂ 和含杂质 CO₂ 的物性参数, 分析其随温度和压力的变化规律。对于纯 CO₂ 物性参数的计算, 广泛采用 SW 状态方程, 其计算误差在工程允许范围之内: 密度误差 ±0.03%~±0.05%, 声速误差 ±0.03%~±1%, 比热误差 ±0.15%~±1.5%。然而, 捕集到的 CO₂ 通常含有氮气、氧气、氫气、氢气和水蒸气等杂质。某些杂质可以改变 CO₂ 体系的热物性参数, 并严重影响压缩、提纯、运输和注气过程。为了研究杂质对 CO₂ 物性的影响, 部分文献选用 PR 状态方程、GERG 状态方程和 SRK 状态方程对氮气、氧气、氫气、硫化氢等杂质进行研究^[3-6]。

利用 SW 状态方程计算纯 CO₂ 的物性参数, 分析纯 CO₂ 在不同温度和压力下的密度、比热、焓值等流体参数以及在超临界、密相、液态和气态等区域的物性特点。对比和分析 BWRS 方程、PR 方程、SRK 状态方程应用于 CO₂ 物性计算的平均偏差, 进而选择适合含杂质 CO₂ 的状态方程。

1 CO₂ 物性计算方法

1996 年, Span 和 Wagner 提出 Span Wagner 状态方程, 专门用于纯 CO₂ 物性和相平衡计算。对于纯 CO₂ 的物性计算,

收稿日期: 2015-04-06; 修回日期: 2015-08-18

基金项目: 承德市科学技术研究与发展指导计划项目(200922011)

作者简介: 李江飞, 硕士, 研究方向为油气储运, 电子邮箱: li.jiangfei@qq.com; 吴长春(通信作者), 教授, 研究方向为油气储运, 电子邮箱: cdpcspe@qq.com

引用格式: 李江飞, 段兴华, 李岩芳, 等. 含杂质 CO₂ 的管道输送[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 173-177; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.028

Span Wagner 状态方程较为准确,误差在工程允许范围之内,因此得到广泛使用。本文利用 Span Wagner 方程研究 CO₂ 的物性。 $\phi(\delta, \tau)$ 为亥姆霍兹自由能,受作用于温度和密度两个独立变量,包括理想流体 ϕ^o 和残余流体 ϕ^r 。

$$A(\rho, T)/(RT) = \phi(\delta, \tau) = \phi^o(\delta, \tau) + \phi^r(\delta, \tau) \quad (1)$$

理想气体:

$$\phi^o(\delta, \tau) = \ln(\delta) + a_1^o + a_2^o \tau + a_3^o \ln(\tau) + \sum_{i=4}^8 a_i^o \ln(1 - e^{-\tau \theta_i^o}) \quad (2)$$

真实气体部分:

$$\Delta = \left\{ (1 - \tau) + A_i [(\delta - 1)^2]^{1/(2\beta_i)} \right\} + B_i [(\delta - 1)^2]^{a_i}$$

$$\phi^r = \sum_{i=1}^7 n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} + \sum_{i=8}^{34} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\delta^c} + \sum_{i=35}^{39} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\alpha_i(\delta - \varepsilon)^2 - \beta_i(\tau - \gamma_i)^2} + \sum_{i=40}^{42} n_i \Delta^{b_i} \delta e^{-C_i(\delta - 1)^2 - D_i(\tau - 1)^2} \quad (3)$$

在实际工程计算时,输入参数是压力和温度,输出参数是密度、焓值、比热等,然而,在 Span Wagner 状态方程中压力是隐函数,求解复杂,采用数值解法进行求解。设函数 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上连续,而且 $f(a)f(b) < 0$, 则 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上至少有一个根。设 $f(x) \in C[a, b]$, 且 $f(a)f(b) < 0$, 方程 $f(x) = 0$ 在区间 (a, b) 上至少有一个根。令 $a_1 = a, b_1 = b, half = \frac{1}{2}(a_1 + b_1)$ 若 $f(a_1)f(half) < 0$, 则 $[a_1, half]$ 为有根区间, 否则 $[half, b_1]$ 为有根区间。记新的有根区间为 $[a_2, b_2]$, 则 $[a_1, b_1] \supset [a_2, b_2]$ 且 $b_2 - a_2 = \frac{1}{2}(b_1 - a_1)$; 对 $[a_2, b_2]$ 重复上述做法得: $[a_1, b_1] \supset [a_2, b_2] \supset \dots \supset [a_n, b_n] \supset \dots$ 且 $b_n - a_n = \frac{1}{2^{n-1}}(b - a)$ 。设所求的根为 x^* , 则 $x^* \in [a_n, b_n]$, $n = 1, 2, \dots$, 即 $a_n \leq x^* \leq b_n$, $n = 1, 2, \dots$, 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} (b_n - a_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^{n-1}}(b - a) = 0$ 得 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = x^*$ 。取 $x^* = half = \frac{1}{2}(a_n + b_n)$ 为 x^* 的近似解。SW 状态方程对于 CO₂ 压缩因子、节流效应系数等物性参数的具体计算公式见表 1^[7-9]。其中, $\phi_\delta = \left(\frac{\partial \phi}{\partial \delta} \right)_\tau$, $\phi_\tau = \left(\frac{\partial \phi}{\partial \tau} \right)_\delta$, $\phi_{\delta\delta} = \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta^2} \right)_\tau$, $\phi_{\tau\tau} = \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \tau^2} \right)_\delta$, $\phi_{\delta\tau} = \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta \partial \tau} \right)$ 。

对于含杂质 CO₂ 的物性计算,还可以采用 BWRS、SRK、PR 方程等,具体计算公式为^[10-14]:

BWRS 方程:

$$p = \rho RT + \left(B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4} \right) \rho^2 + \left(bRT - a - \frac{d}{T} \right) \rho^3 + \alpha \left(a + \frac{d}{T} \right) \rho^6 + \frac{\phi^3}{T^2} (1 + \gamma \rho^2) \exp(-\gamma \rho^2) \quad (4)$$

表 1 SW 状态方程求解流体物性参数公式

Table 1 Calculation formula of SW equation

求解参数	计算展开式
压力	$p(\delta, \tau) = (1 + \delta \phi_\delta^o)(\rho RT)$
压缩因子	$Z(\delta, \tau) = \frac{p(\delta, \tau)}{\rho RT} = 1 + \delta \phi_\delta^o$
定容热容	$C_v(\delta, \tau) = -\tau^2 (\phi_\tau^o + \phi_\tau^r) R$
定压热容	$C_p(\delta, \tau) = \left[-\tau^2 (\phi_{\tau\tau}^o + \phi_{\tau\tau}^r) + \frac{(1 + \delta \phi_\delta^o - \delta \tau \phi_{\delta\tau}^o)^2}{1 + 2\delta \phi_\delta^o + \delta^2 \phi_{\delta\delta}^o} \right] R$
内能	$u(\delta, \tau) = \tau (\phi_\tau^o + \phi_\tau^r) RT$
焓值	$h(\delta, \tau) = [1 + \tau (\phi_\tau^o + \phi_\tau^r) + \delta \phi_\delta^o] RT$
熵值	$s(\delta, \tau) = [\tau (\phi_\tau^o + \phi_\tau^r) - \phi^o + \phi^r] R$
声速	$\omega^2(\delta, \tau) = \left[1 + 2\delta \phi_\delta^o + \delta^2 \phi_{\delta\delta}^o - \frac{(1 + \delta \phi_\delta^o - \delta \tau \phi_{\delta\tau}^o)^2}{\tau^2 (\phi_\tau^o + \phi_\tau^r)} \right] (RT)$
节流效应系数	$\mu R \rho = \frac{-(\delta \phi_\delta^o + \delta^2 \phi_{\delta\delta}^o + \delta \tau \phi_{\delta\tau}^o)}{(1 + \delta \phi_\delta^o - \delta \tau \phi_{\delta\tau}^o)^2 - \tau^2 (\phi_\tau^o + \phi_\tau^r) (1 + 2\delta \phi_\delta^o + \delta^2 \phi_{\delta\delta}^o)}$
黏度	$\mu(T, \rho) = \mu_0(T) + \Delta \mu(T, \rho) + \Delta_c \mu(T, \rho)$
导热系数	$\lambda(T, \rho) = \lambda_0(T) + \Delta \lambda(T, \rho) + \Delta_c \lambda(T, \rho)$

PR 方程:

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v(v + b) + b(v - b)},$$

$$a = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c x_i x_j (a_i a_j)^{0.5} (1 - k_{ij}), \quad b = \sum_{i=1}^c x_i b_i \quad (5)$$

SRK 方程:

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v(v + b)}, \quad a = b \left[\sum_{i=1}^n x_i \frac{a_i}{b_i} - \frac{G_\infty^E}{\ln(2)} \right], \quad b = \sum_{i=1}^n x_i b_i \quad (6)$$

式中, $\Delta = \left\{ (1 - \tau) + A_i [(\delta - 1)^2]^{1/(2\beta_i)} \right\} + B_i [(\delta - 1)^2]^{a_i}$

$\delta = \rho/\rho_c$, 为对比密度; $\tau = T/T_c$, 为对比温度; ρ_c 为临界密度, kg/m³; T_c 为临界温度, K; p 为系统压力, MPa; T 为系统温度, K; R 为通用气体常数, 8.314 kJ/(kmol·K)。

2 CO₂ 物性分析

2.1 纯 CO₂ 物性分析

根据状态方程及混合规则,利用 Matlab 编程,分别对含杂质 CO₂ 及纯 CO₂ 的性质进行计算。对于纯 CO₂ 的物性计算,采用 SW 状态方程,计算结果如图 1 所示。

CO₂ 的临界温度为 31.1℃, 临界压力为 7.38 MPa。从图 1 可以看出,当改变温度、压力条件,使得 CO₂ 从超临界进入密

相与液态时,CO₂的黏度和密度等参数缓慢变化;但当CO₂发生气液转化时,CO₂的物性参数发生跃变。同时,CO₂的比热、密度、黏度等在临界点区域受压力和温度影响变化较大,为了保证CO₂管道安全高效运行,应保证运行压力远离临界压力。

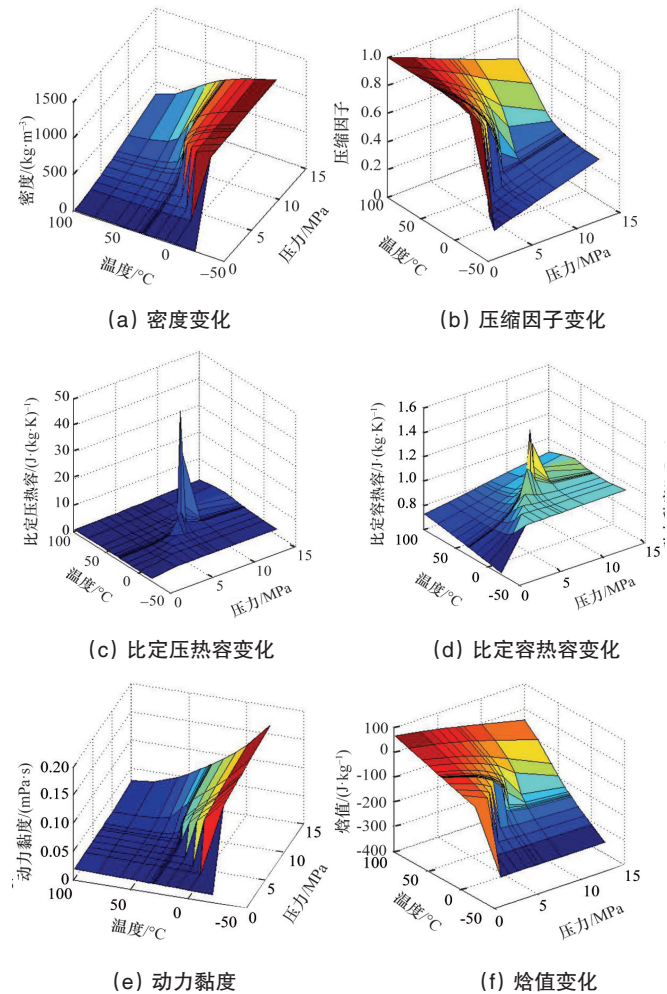


图1 纯CO₂物性参数计算 (Span Wagner EOS)
Fig. 1 Physical properties of pure CO₂ under different pressure and temperature

2.2 含杂质CO₂状态方程选取

目前常用于CO₂的状态方程为SW、PR、SRK方程等。CO₂混合物的密度、定压比热、节流效应系数等参数均可由状态方程求得。分别利用BWRS、SRK、PR方程对不同温度和压力条件下的纯CO₂密度、比热等参数进行计算,并与Span Wagner状态方程的计算结果进行对比,分析不同状态方程的纯CO₂物性计算偏差,如图2所示。

从图2可以看出,3个方程的偏差比较较为明显,PR方程的整体误差最小,SRK方程的整体误差较小,BWRS方程的整体误差最大,尤其是在高于8 MPa时,偏差急剧增大。因此,对于纯CO₂的物性计算,应该采用Span Wagner状态方程。对于含杂质CO₂的物性计算,应采用PR状态方程。

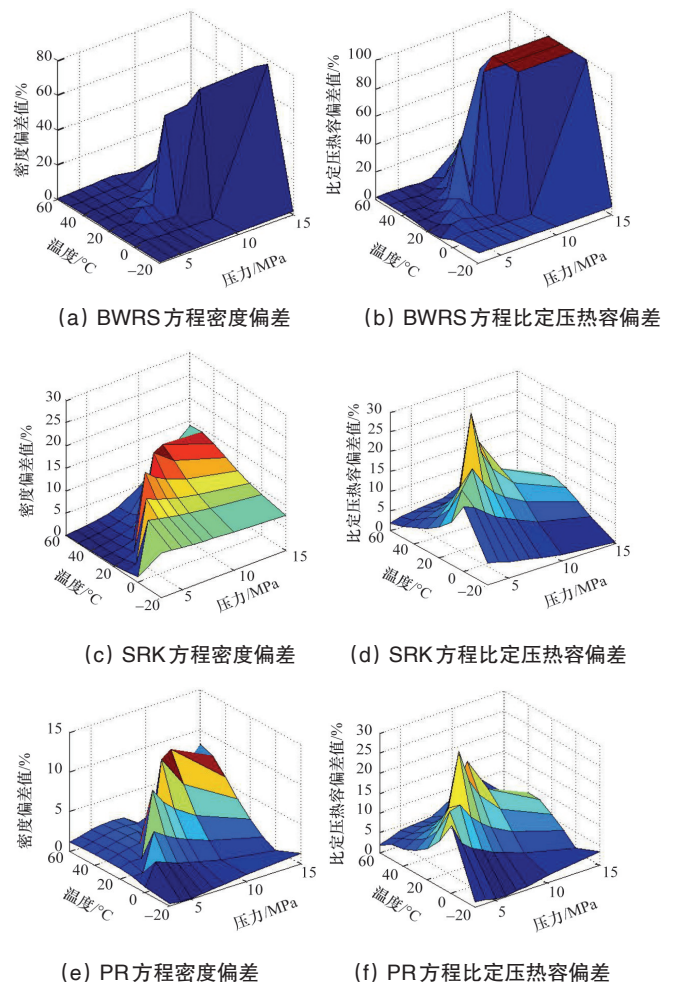
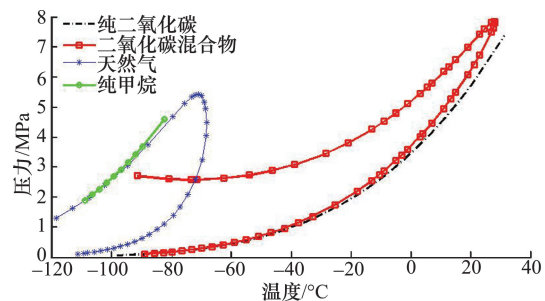


图2 不同状态方程的CO₂物性计算偏差
Fig. 2 Deviation comparison of pure CO₂ calculated by EOS of BWRS, SRK and PR

2.3 杂质对CO₂物性的影响

甲烷临界温度(-82.6℃)很低,与管道运行温度(0~30℃)相差很大,在管道输送过程中不容易发生相变;CO₂临界温度(31.1℃)与管道运行温度较为接近,低压输送时容易产生气液两相流。含杂质CO₂相图和天然气相图对比如图3所示。



天然气混合物组分体积分数: 甲烷95%, CO₂ 5%;
CO₂混合物组分体积分数: CO₂ 95%, 甲烷5%

图3 含杂质CO₂相图和天然气相图对比
Fig. 3 Comparison of phase diagrams of CO₂-rich mixture and natural gas

CO₂管道与天然气管道对比分析发现,天然气临界压力较低且管道的输送温度远高于天然气的临界温度,而含杂质CO₂管道临界压力较高且管道输送温度在临界温度附近,随着管道压力的降低,CO₂管道更容易进入气液两相区,为了保证长输CO₂管道安全高效运行,应保证管道运行中压力高于临界压力。

3 CO₂管道流动仿真

杂质会对CO₂性质有不同程度的影响,进而影响CO₂的管输特性。基于PR状态方程,利用可压缩流体稳态流动模型^[15],分析不同杂质类型及杂质含量对CO₂混合物相态的影响。含杂质CO₂组分体积分数:CO₂ 95%,氮气1%,氧气1%,氩气1%,甲烷1%,乙烷1%,氢气1%,硫化氢1%。CO₂管道基础参数:外径762 mm,壁厚12 mm,流量19.3 Mt/a,环境温度20℃,绝对粗糙度0.06 mm,总传热系数0.4 W/(m²·℃)。利用管道稳态仿真模型研究杂质类型、含量、高程对CO₂管道水力特性的影响。计算不同高程对CO₂管道运行的影响,结果如图4所示;计算不同杂质类型和含量对CO₂管道运行的影响,结果如图5所示;计算不同相态下的CO₂管道运行参数变化,结果如图6所示。

从图4可以看出,天然气管道输送流体密度较小,高程差较小时对管道影响不大;与天然气管道不同,CO₂管道输送流体密度较大,较小高程差也会对仿真结果造成较大影响。

从图5可以看出,在高于临界压力输送时,CO₂体系中含1%的杂质对压降的影响很小;在高于临界压力输送时,随着甲烷含量增大,管道温降增大,压降变化很小。

从图6可以看出,液态、密相、超临界状态比较适合CO₂

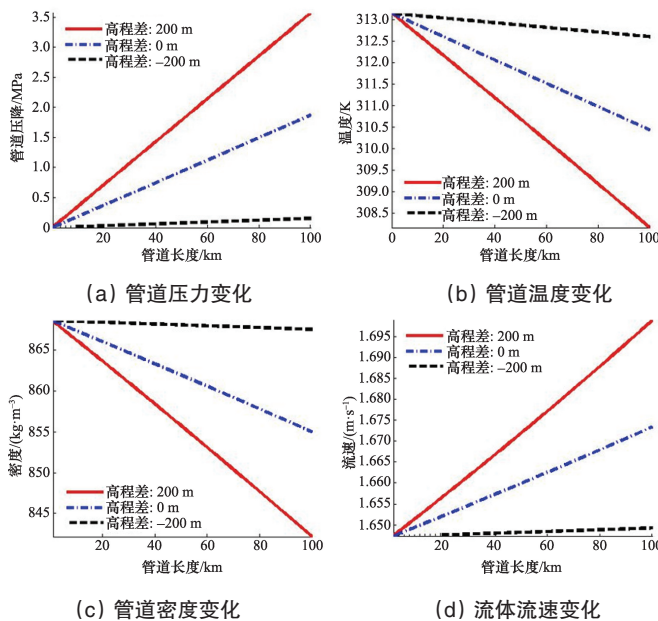


图4 高差对CO₂管道沿线参数的影响

Fig. 4 Effects of different elevations on flow parameters along the pipeline

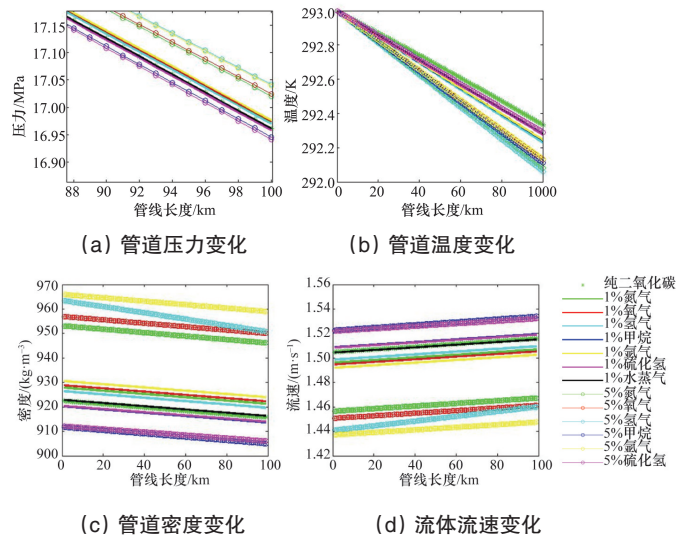


图5 杂质类型和含量对CO₂稳态流动的影响

Fig. 5 Effects of different impurities and their content on flow parameters along the pipeline

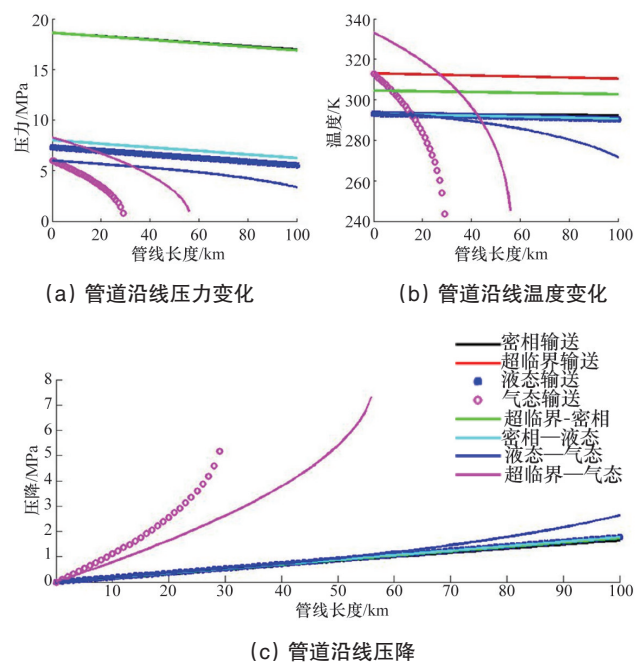


图6 不同相态下的管道流动参数变化

Fig. 6 Variation of flow parameters along the pipeline under different phase

管道输送,密相状态压降最小,气态输送压降最大,两相流的出现会使压降急剧增大。当含有杂质时,临界压力和临界温度都增加。因此,管道中杂质的存在主要体现在对流体临界压力和临界温度的影响,两相流的出现会使管道压降急剧增大,应保证管道运行压力高于CO₂体系的临界压力。

4 结论

为了研究含杂质CO₂在不同运输状态的管道水力特性,利用Matlab编程,计算CO₂密度、黏度、焓、比热等随温度与压

力的变化,为工程计算优选了合适的状态方程,分析不同管道参数下的CO₂流动仿真,得到如下结论。

1) 在实际生产和建设时,输送状态的选择要根据实际输送需要和当地环境温度等情况进行综合分析。对于CO₂管道的气态输送,管道中CO₂密度很低、压降很大,不适宜用CO₂长距离运输;对于CO₂管道的液态输送,适用条件为环境温度较低、输量较小的情况;对于CO₂管道的密相输送,适用条件为环境温度较低、输量较大的情况;对于CO₂管道的超临界输送,适用条件为环境温度较高、输量较大情况,适用范围较广。

2) PR状态方程对于含杂质CO₂物性参数计算的偏差较小,在临界点附近也能有较高的精确度,可用于含杂质CO₂物性参数的计算。CO₂的比热、密度、黏度等在临界点区域受压力和温度变化较大。

3) 杂质的存在会使CO₂体系中气液两相区的范围扩大,流体更容易从液态转为气态。当CO₂从液态向气态过渡时,流体参数发生跃变,管道压降也急剧增大。在管道设计与运行过程中,应考虑杂质对CO₂物性和管道水力特性的影响,并保证管道运行压力高于CO₂体系的临界压力。

参考文献(References)

- [1] Seevam P N, Race J M, Downie M J. Carbon dioxide pipelines for sequestration in the UK: An engineering gap analysis[J]. *Journal of Pipeline Engineering*, 2007, 6(3): 133-146.
- [2] Huh C, Kang S G. Effect of water and nitrogen impurities on CO₂ pipeline transport for geological storage[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4(4): 2214-2221.
- [3] Chaczykowski M, Osiadacz A J. Dynamic simulation of pipelines containing dense phase/supercritical CO₂-rich mixtures for carbon capture and storage[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 9(7): 446-456.
- [4] Wang J S, Ryan D, Anthony E J, et al. The effect of impurities in oxyfuel flue gas on CO₂ storage capacity[J]. *Greenhouse Gas Control*, 2012, 11(2): 158-162.
- [5] Span R, Wagner W. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1996, 25(6): 1509-1596.
- [6] Fenghou A, Wakeham W A, Vesovic V. The viscosity of carbon dioxide [J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1998, 27(6): 31-35.
- [7] Mondéjar M E, Martín M C, Span R, et al. New (p, ρ, T) data for carbon dioxide-nitrogen mixtures from (250 to 400)K at pressures up to 20 MPa[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2011, 43(12): 1950-1953.
- [8] Mondéjar M E, Villamañán R M, Span R, et al. Accurate (p, ρ, T) data for two new (carbon dioxide+nitrogen) mixtures from (250 to 400)K at pressures up to 20 MPa[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2012, 48(4): 254-259.
- [9] Giljarhus K E T, Munkejord S T, Skaugen G. Solution of the span wagner equation of state using a density_energy state function for fluid-dynamic simulation of carbon dioxide[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(3): 1006-1014.
- [10] Mazzoccoli M, Bosio B, Arato E. Analysis and comparison of equations-of-state with p - ρ - T experimental data for CO₂ and CO₂-mixture pipeline transport [J]. *Energy Procedia*, 2012, 23(8): 274-283.
- [11] Klinkby L, Nielsen C M, Krogh E, et al. Simulating rapidly fluctuating CO₂ flow into the vedsted CO₂ pipeline, injection well and reservoir[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4(5): 4291-4298.
- [12] Soave G. Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state[J]. *Chemical Engineering Science*, 1972, 27(6): 1197-1203.
- [13] Ding Y P, Robinson D B. A new two-constant equation of state[J]. *Chemical Engineering Science*, 1976, 15(1): 59-64.
- [14] Visser de E, Hendriks C, Barrio M, et al. Dynamis CO₂ quality recommendations[J]. *International Journal of Green Gas Control*, 2008, 2(4): 478-484.
- [15] Munkejord S T, Jakobsen J P, Austegard A, et al. Thermo- and fluid-dynamical modeling of two-phase multi-component carbon dioxide mixtures[J]. *International Journal of Green Gas Control*, 2010, 4(4): 589-596.

Pipeline transportation of CO₂-rich mixture

LI Jiangfei¹, DUAN Xinghua¹, LI Yanfang¹, ZHANG Kang¹, ZOU Zhenchun¹, WU Changchun², CHEN Yingchao³, LU Guoqiang¹

1. Department of Thermal Engineering, Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China

2. Department of Storage and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. Department of Petroleum Engineering, Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China

Abstract Pipeline transportation is regarded as an economical and effective way to transport CO₂. The captured CO₂ generally contains such impurities as N₂, O₂, CH₄, Ar, and H₂O. The type and content of impurities will impact the properties of CO₂-rich mixture and subsequently the flow characteristics. The physical properties of pure CO₂ were calculated and analyzed using Matlab based on Span Wagner EOS. Then the uniformly most accurate EOS for CO₂-rich mixture was selected by comparing the calculation accuracy of the BWRS, SRK and PR EOS. Based on PR EOS, which has been proved to be the most proper EOS for CO₂-rich mixture, a one-dimensional compressible flow model was developed to describe the steady and transient flow characteristics of CO₂-rich mixture in the pipeline. Finally, the steady simulation under different flow states (supercritical state, dense phase, liquid state, gaseous state), impurities (type and content), and pipe parameters was conducted. The results show that PR EOS is the most proper EOS for CO₂-rich mixture. Compared with gas transportation of CO₂ pipeline, the pressure drop of dense phase and supercritical state transportation is relatively small, while the pressure drop of dense phase transportation is the least. Different types of impurities have different effects on broadening the gas-liquid two-phase region of CO₂-rich mixture. Compared with that of natural gas pipeline, laws of steady flow of CO₂-rich mixture pipeline are revealed, which may provide theoretical guidance for efficient operation and safe control of CO₂ pipeline.

Keywords impurity; CO₂ pipeline; EOS; dense phase; supercritical state

(责任编辑 吴晓丽)