

适用于超临界 CO₂ 管道的稳态输送水力热力计算模型

彭世焱¹ 贾启运² 李其抚¹ 路建鑫² 谢乃雅²
王武昌² 钱昊楠² 刘罗茜¹ 胡其会²

1. 国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司, 天津 300457;
2. 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, 山东 青岛 266580

摘 要:超临界 CO₂ 管道输送是碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)中的重要环节,由于超临界 CO₂ 水力热力特性与气液有明显差异,为满足实际 CO₂ 管道工艺方案设计要求,需要建立适用于超临界 CO₂ 的水力热力计算模型,为 CO₂ 管道工艺设计参数选择及方案优选提供理论支撑。基于此,以考虑高程差的管道稳态连续性方程、运动方程、能量方程三大守恒方程为基础,结合相平衡实验选择适宜状态方程计算纯 CO₂ 或含杂质 CO₂ 的物性参数,采用四阶龙格—库塔法迭代数值求解,通过 C++ 语言采用自适应步长设置来满足实际高程变化影响,自主编程得到了一维非等温考虑地形起伏的超临界 CO₂ 管输稳态水力热力计算模型,并分别通过实验和 OLGA 软件从多个方面验证了模型具有较高的精度。利用建立的模型研究杂质含量及种类对 CO₂ 管道稳态输送过程的压降和温降的影响,得到杂质种类对压降和温降的影响规律:O₂、N₂、H₂O、CO、Ar、H₂、CH₄ 等杂质对温降数据有相同的趋势,几乎不存在影响;在压降数据上发现 H₂O 杂质会导致压降减少,其余杂质均会造成不同程度的压降增加,影响程度体现为 H₂ > CO > N₂ > CH₄ > O₂ > Ar。结合 CO₂ 的独特性质,针对超临界 CO₂ 管道稳态运输的计算不应当忽略高程差的影响,同时也应注意杂质导致的温降和压降的变化。

关键词:超临界 CO₂ 管道;稳态;水力热力;数值模拟

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2024.02.001

Hydraulic and thermal calculation model of supercritical CO₂ steady-state transportation

PENG Shiyao¹, JIA Qiyun², LI Qifu¹, LU Jianxin², XIE Naiya²,
WANG Wuchang², QIAN Haonan², LIU Luoqian¹, HU Qihui²

1. PipeChina Research Institute of Science and Technology, Tianjin, 300457, China;
2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China)//
Shandong Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety, Shandong, Qingdao, 266580, China

收稿日期:2023-12-20

基金项目:国家石油天然气管网集团有限公司重大科技攻关课题“超临界 CO₂ 管道输送工艺与安全技术研究”(GWHT20220011708);国家重点研发计划“战略性科技创新合作”专项“区域二氧化碳捕集与封存关键技术研发与示范”(2022YFE0206800)

作者简介:彭世焱(1980-),男,湖南常德人,高级工程师,博士,主要从事油气储运工艺和新能源输送技术研究。E-mail: pengsy01@pipechina.com.cn

通信作者:王武昌(1979-),男,河南南阳人,教授,博士,主要从事油气安全输送及液化天然气研究。E-mail: wangwuchang@upc.edu.cn

Abstract: Supercritical CO₂ pipeline transportation is an important link in Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS). Given the significant differences in hydraulic and thermal characteristics between supercritical CO₂ and its gaseous and liquid states, it is necessary to develop a hydraulic and thermal calculation model tailored for supercritical CO₂ in order to meet the process design requirements of the actual CO₂ pipeline. This model aims to satisfy the process design requirements of actual CO₂ pipeline and provide theoretical support for the selection of design parameters and optimization of pipeline scheme. In this study, we have developed a model based on the three conservation equations for the steady-state operation of the pipeline, which take into account elevation differences. Drawing upon phase equilibrium experiments, we selected an appropriate equation of state to calculate the physical property parameters for both pure and impurity-laden CO₂. The numerical solution was obtained using the fourth-order Runge-Kutta method, with an adaptive step size control implemented in C++ to accurately capture the effects of elevation changes. The accuracy of the model was rigorously verified through experimental validation and by comparing its predictions with those of the OLGA software, confirming its high precision. Utilizing the established model, we investigated the effects of impurity content and types on the pressure drop and temperature drop during the steady-state transportation process of CO₂ pipelines. Findings revealed that among the seven components tested—O₂, N₂, H₂O, CO, Ar, H₂, and CH₄—the presence of impurities generally followed the same trend in affecting temperature drop data, with negligible impact observed. Notably, the H₂O component was found to reduce pressure drop, whereas the remaining six impurities were shown to increase it to varying degrees. The influence of these impurities on pressure drop was ranked as follows: H₂ > CO > N₂ > CH₄ > O₂ > Ar. In conclusion, the study underscores the critical role of considering elevation differences in the steady-state transportation calculations for supercritical CO₂ pipelines. Additionally, attention should also be paid to the effects of impurity components on temperature and pressure.

Keywords: Supercritical CO₂ pipeline; Steady state; Hydraulic and thermal; Numerical simulation

0 前言

近代工业发展过程中,煤炭、原油、天然气等化石燃料得到大量利用,导致大部分以 CO₂ 为主的温室气体释放至大气中,引发全球范围内诸多的生态环境问题^[1-2]。为应对气候变暖,各国在全球范围内达成共识,实施低碳减排迫在眉睫^[3-4]。碳捕获、利用和封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 是实现碳达峰与碳中和的有效技术方式,而管道运输是 CCUS 中的重要环节^[5]。从经济性考虑,超临界态为管道输送 CO₂ 的最佳相态^[6-7]。超临界 CO₂ 相较于气相和液相 CO₂,其物性及相态特性较复杂,CO₂ 管道稳态输送过程压降和温降的规律是 CO₂ 管道工艺设计参数选择和工艺方案制定的重要支撑。因此,对超临界 CO₂ 管道稳态输送水力热力变化规律的研究非常必要。

目前,针对超临界 CO₂ 管道稳态流动的研究,多集中于水平管段及单一的水力、热力或者经济模型,对适用于 CO₂ 管道输送水力热力耦合计算模型研究鲜见报道。McCoy S T 等人^[8]建立了管道输送 CO₂ 的稳态工程

经济模型,可用于量化运输成本对参数的可变性和不确定性。Mohitpour M 等人^[9]提出了 CO₂ 水平管输的稳定流动模型,为管道设计和施工提供了简单实用的技术。Chaczykowski M 等人^[10]模拟了 3 种致密相/超临界富 CO₂ 混合物在一维非等温流动条件,建立了管道 CO₂ 流动模型。刘鑫^[11]建立了 CO₂ 驱油工况下,精度较高的无起伏气液两相流水力热力数学模型。刘敏等人^[12]建立了超临界 CO₂ 管道稳态水力计算模型,并与国外模型进行了对比,发现该模型优于国外模型。吕家兴等人^[13]考虑了管道高程对超临界 CO₂ 管道输送的影响,结合分析管道输送设计中的相关参数,建立了较全面的技术经济评估模型。

本文以考虑高程差的管道稳态连续性、动量和能量守恒方程作为基础求解模型,结合筛选的彭—罗宾森 (Peng-Robinson, PR) 方程,使用四阶龙格—库塔法^[14]求解守恒方程组,并利用 C++ 语言基于 VS2017 平台建立了一维非等温超临界 CO₂ 管道稳态输送水力热力计算模型,可适用于起伏超临界 CO₂ 管道稳态输送的水力热力数据耦合计算,为 CO₂ 管道工艺设计提供理论支持。

1 模型建立

1.1 管道基本守恒方程

连续性方程、运动方程、能量方程分别见式(1)、(2)、(3)。

$$\frac{d(\rho\omega)}{dx} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d(p + \rho\omega^2)}{dx} + \frac{\rho\omega^2\lambda}{2D} + \rho g \frac{ds}{dx} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dx} \left[\rho\omega \left(h + \frac{\omega^2}{2} + gs \right) \right] + \frac{4K(T - T_0)}{D} = 0 \quad (3)$$

式中: ρ 为介质密度, kg/m^3 ; p 为压力, Pa ; h 为焓, J/kg ; ω 为流速, m/s ; x 为距离, m ; s 为高程, m ; T 为介质温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为管道埋深处温度, $^{\circ}\text{C}$; D 为管道内径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; λ 为摩阻系数, 结合实际工程情况, 采用柯列勃洛克公式^[15] 计算得出; K 为总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, 采用无保温层埋地钢管的公式计算得出。

1.2 状态方程选取

目前常用于 CO_2 的状态方程为 BWRS 方程、PR 方程和 GERG-2008 方程。为探究精度较合适的状态方程, 采用自行设计的含杂质 CO_2 体系相特性测量实验装置, 基于乙二醇控温槽、可变体积耐腐蚀反应釜、恒速恒

压泵、高压气瓶等实验部件开展了纯 CO_2 及含杂质 CO_2 (掺 5% N_2) 的相平衡实验研究。含杂质 CO_2 体系相特性测量实验装置见图 1。

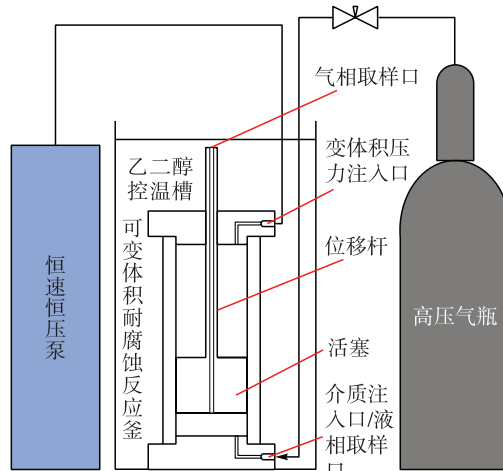


图 1 含杂质 CO_2 体系相特性测量实验装置图

Fig. 1 Experimental device for measuring the phase characteristics of impurity-laden CO_2 system

结合使用 OLGA 软件中 Multiphase 工具组件, 分别选取 BWRS 方程、PR 方程和 GERG-2008 方程模拟纯 CO_2 及含杂质 CO_2 的泡露线与实验数据进行对比, 结果见图 2。

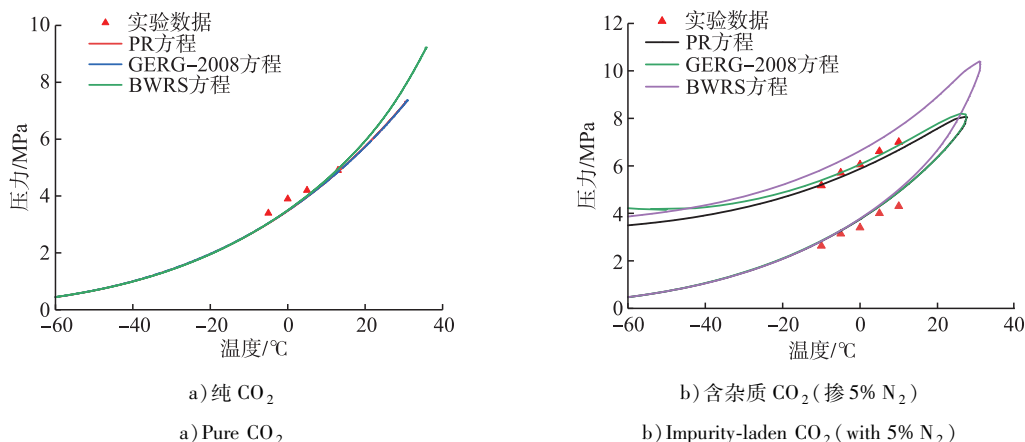


图 2 各类方程模拟纯 CO_2 及含杂质 CO_2 的泡露线与实验数据对比图

Fig. 2 Comparison of bubble lines and experimental values of various equations simulating pure CO_2 and impurity-laden CO_2

由图 2-a) 可知, PR 方程和 GERG-2008 方程泡露线同实验数据相似度高, 且两者具有一致性。BWRS 方程在高温高压情况下会逐渐偏离, 有较大误差。由图 2-b) 可知, BWRS 方程的误差更加明显, GERG-2008 方程的契合度最高, PR 方程次之但相对误差较小, 可以接受。在纯 CO_2 和含杂质 CO_2 的物性计算中, PR 方程和 GERG-2008 方程都有较高精度。结合考虑 PR 方程为立方型状态方程, 方便进行编程求解, 本文根据 PR 方程

及混合规则^[16-18], 利用 C++ 语言编程, 分别计算含杂质 CO_2 及纯 CO_2 的物性。对于含杂质 CO_2 物性计算的混合规则为 Peng Dingyu 和 Robinson D B^[17] 推导 PR 方程论文中使用的混合规则。

1.3 数值求解

为编程迭代求解方便, 将式(1)、(2)、(3)转化为 T 、 p 、 ω 的函数, 一维管道流动的连续性、动量和能量方程的最终形式见式(4)。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dT}{dx} \\ \frac{dp}{dx} \\ \frac{d\omega}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{其中 } a_{11} = \frac{\omega}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, a_{12} = \frac{\omega}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T, a_{13} = 1, b_1 = 0; \\ & a_{21} = 0, a_{22} = \frac{1}{\rho}, a_{23} = \omega, b_2 = -\frac{\omega^2 \lambda}{2D} - g \sin \theta; a_{31} = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p, \\ & a_{32} = \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T, a_{33} = \omega, b_3 = -\frac{4K(T - T_0)}{\rho \omega D} - g \sin \theta. \end{aligned}$$

以 PR 方程为基础,将焓、熵、温度、压力和密度的热力学关系式代入式(4),即可对 T, p, ω 求解,因此构成了闭合的方程组。直接计算过于繁琐复杂且耗时耗力,选择使用计算容易、精度较高的四阶龙格—库塔法对式(4)进行迭代求解。由四阶龙格—库塔法积分后得到各变量增值后的值见式(5)~(7)。

$$T_{i+1} = T_i + \frac{\Delta x}{6} \left[\left(\frac{dT}{dx} \right)_1 + 2 \left(\frac{dT}{dx} \right)_2 + 2 \left(\frac{dT}{dx} \right)_3 + \left(\frac{dT}{dx} \right)_4 \right] \quad (5)$$

$$p_{i+1} = p_i + \frac{\Delta x}{6} \left[\left(\frac{dp}{dx} \right)_1 + 2 \left(\frac{dp}{dx} \right)_2 + 2 \left(\frac{dp}{dx} \right)_3 + \left(\frac{dp}{dx} \right)_4 \right] \quad (6)$$

$$w_{i+1} = w_i + \frac{\Delta x}{6} \left[\left(\frac{dw}{dx} \right)_1 + 2 \left(\frac{dw}{dx} \right)_2 + 2 \left(\frac{dw}{dx} \right)_3 + \left(\frac{dw}{dx} \right)_4 \right] \quad (7)$$

给定入口处初始 T, p, ω 条件,利用 C++ 语言设置自适应步长,使用四阶龙格—库塔法反复步进求解,可求出精度较高的管路从始端到末端的水力热力分布数据。针对管道高程起伏计算,编程时导入高程和里程数据文件,根据高程和里程情况设定合适的距离步长,判断每个距离步长的起终点高程是否变化,如果无变化则没有起伏,如果发生变化则计算此变化对应的起伏角度和高程差,进而计算由于高程差引起的压降和温降。

1.4 模型验证

1.4.1 实验验证

为验证模型的准确度,利用研究团队已有的水合物环道,更新循环泵、加装高压管段使其适合进行 CO_2 输送,环道全长 35.8 m,内径 25.4 mm,壁厚 5 mm,无保温层,其余环道参数及设备见施政均^[19]的实验。利用模型对不同工况进行了模拟,选用不同的入口压力、入口流量、入口温度以及组分得到了温降及压降数据,并与实验数据进行了对比,见表 1。

表 1 模拟参数表

Tab. 1 Simulation parameters

工况	入口压力 / MPa	入口流量 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	入口温度 / $^{\circ}\text{C}$	组分
1	8.1	0.42	32	纯 CO_2
2	9.3	0.83	35	纯 CO_2
3	8.7	0.65	33	5% N_2 , 95% CO_2
4	10.5	0.97	35	5% N_2 , 95% CO_2

温降及压降的实验数据与模拟数据对比见图 3。从压降数据来看,压降模拟数据和实验数据趋于一致,相对误差均 $< 8\%$;温降数据更加准确,模拟数据和实验数据基本相同,相对误差均 $< 6\%$ 。因此,本文采用的计算模型能够很好地描述纯 CO_2 及含杂质 CO_2 超临界稳态输送的水力热力特性。压降的模拟数据与实验数据之间的误差,相较于温降更大,分析其原因在于实验管道中众多的节流部件导致了压降实验数据的增大,节流部件的存在没有在模型中量化表示。

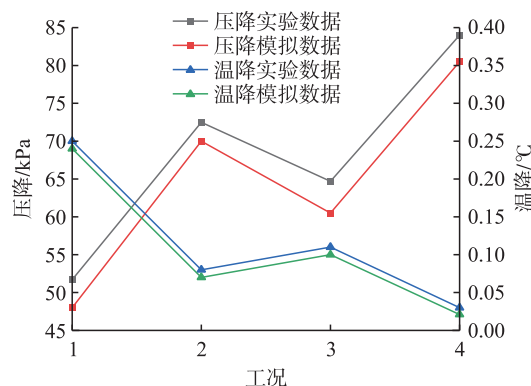


图 3 实验数据与模拟数据对比图

Fig. 3 Comparison of experimental data and simulated data

1.4.2 OLGA 软件验证

考虑到上文实验设备属于小尺寸环道,和工业运用背景下的 CO_2 管道稳态运输过程中压降和温降等数据变化情况有所差异,不足以完整支撑仿真模型的验证。故选取工业规模级别的管道基础参数进行 OLGA 软件验证:管长 80 km,外径 323 mm,壁厚 12 mm,入口压力 15 MPa,入口温度 40°C ,输量 50 kg/s ,平均环境温度 15°C ,绝对粗糙度 0.06 mm ,土壤传热系数 $1.65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$,土壤埋深 1.5 m。设定不同组分参数、高程参数分别使用模型和 OLGA 软件对超临界 CO_2 输送管道稳态输送条件下的沿程水力热力分布进行仿真模拟,并进行数据对比,从多方面验证模型的准确性。模拟工况见表 2。

表 2 模拟工况表

Tab. 2 Simulation working conditions

工况	入口压力 /MPa	入口温度 /℃	输量 / ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	组分	地形起伏
5	15	40	50	纯 CO_2	水平管段
6	15	40	50	99% CO_2 , 1% N_2	水平管段
7	15	40	50	纯 CO_2	起伏管段
8	15	40	50	99% CO_2 , 1% N_2	起伏管段

针对水平管段,利用本文模型和 OLGA 软件分别对表 2 中的工况 5、6 进行稳态数值计算,结果见图 4。由图 4 可知,本文模型和 OLGA 软件计算的压降曲线

近似重合,差异体现在温降曲线上。对于温降曲线,含杂质 CO_2 输送温降数据首尾处一致性高,中间段有所差异,模型计算的含杂质 CO_2 输送温降比 OLGA 软件计算结果大,偏差约 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时,OLGA 软件在模拟含杂质 CO_2 稳态输送时的温降多次出现局部波动,而采用本文模型计算时则较为稳定。在纯 CO_2 输送温降数据上,本文模型和 OLGA 软件计算温降数据变化趋势大体相同,前半段 OLGA 软件模型计算温降数据偏大,后半段本文模型计算温降数据偏大,误差约 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。无论是本文模型还是 OLGA 软件计算,同种工况下,含杂质 CO_2 均比纯 CO_2 的输送温降数据有所减少,压降数据略有增大。

针对起伏管段,利用本文模型和 OLGA 软件对表 2 中工况 7、8 进行稳态仿真计算,结果见图 5。

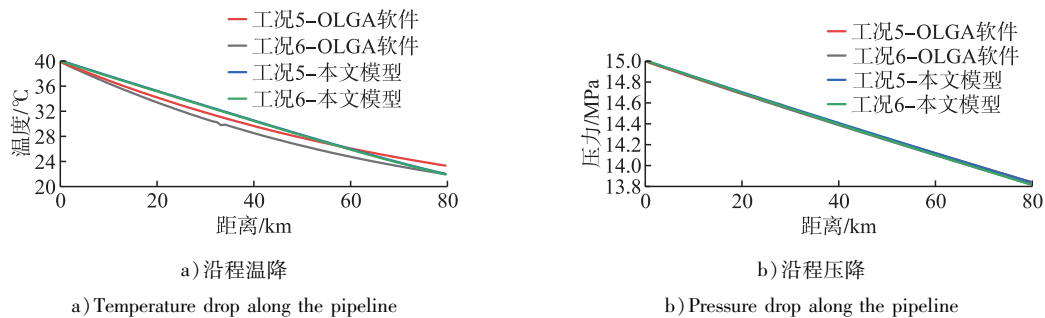


图 4 水平管段数据对比曲线图

Fig. 4 Comparison curves of horizontal pipeline data

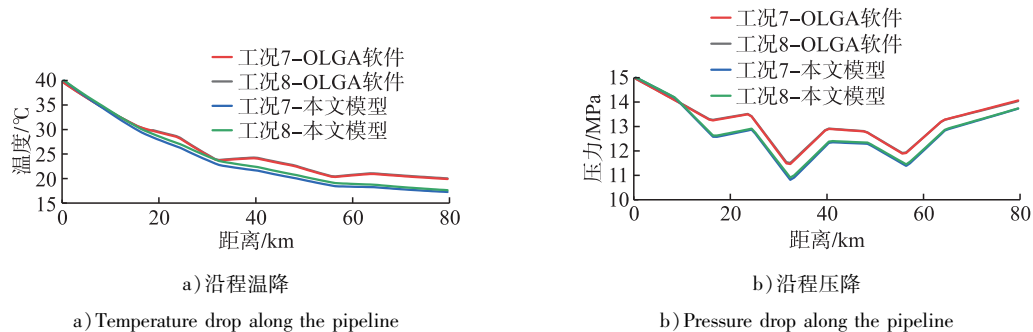


图 5 起伏管段数据对比曲线图

Fig. 5 Comparison curves of undulating pipeline data

在设置了高程变化的情况下温降及压降也出现了明显的相对应起伏,当高程增加时,会导致压力快速下降以及对应温度下降;当高程降低时,则导致压力 and 对应温度上升。考虑到超临界 CO_2 独特的相态特性,在管道运输过程中,高程影响不可忽略,在低洼地段应注意出现超压情况,高峻地段应注意出现压力下降导致相变的情况。本文模型依旧在数值计算结果上和 OLGA 软件计算数据保持近似,模型计算的温降和压降数据均比 OLGA 软件数据大,同 OLGA 软件的温降误差约 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,而

压降误差约 0.7 MPa 。

为探究本文模型与 OLGA 软件在温度、压力计算结果上的误差情况,进行了平均相对误差的计算,结果见图 6。在水平管段工况(工况 5、6)下的误差比起伏管段工况(工况 7、8)下的误差更大;同时温降数据计算误差大于压降数据计算误差。但所有工况下,最大误差不超过 8%,基本符合工程要求。对于本文模型,无论是计算纯 CO_2 或含杂质 CO_2 ,无论是水平管段还是起伏管段都可以得到较精准的计算结果,说明本文模型可以用于水

平及起伏 CO_2 管道稳态输送水力热力计算, 具有较好的工程应用价值。

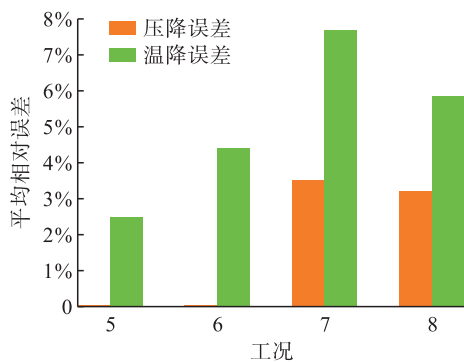


图6 平均相对误差曲线图

Fig. 6 Average relative error curves

2 杂质影响因素研究

含杂质 CO_2 相较于水或油等液体, 其物性和相态特性复杂多变^[20-21], 通常情况下, CO_2 管道无法完全保证 CO_2 纯度, 所含杂质会影响稳态输送的水力热力数值。但目前国内对于 CO_2 运输和地质储藏并没有标准的组分要求。本文通过查阅文献调研了美国和加拿大大部分运行中的 CO_2 管道, 其中对于 CO_2 含量要求体积百分比 > 95%。故本文选取常见的 CO_2 管道杂质 O_2 、 N_2 、 H_2O 、 CO 、 Ar 、 H_2 、 CH_4 , 利用模型分别进行单组分 5% 含量杂质的模拟计算, 并将计算结果和纯 CO_2 数据进行对比, 研究单个杂质对超临界 CO_2 管道稳态输送温降及压降的影响, 其余参数设置同 1.4.2 节。

O_2 、 N_2 、 H_2O 、 CO 、 Ar 、 H_2 、 CH_4 对于温降数据有着相同的趋势, 几乎不存在影响, 结果见图 7。在压降数据上杂质的影响呈现了不同的趋势, 对比纯 CO_2 可知, 除了 H_2O 会导致压降降低外, 其余杂质均会造成不同程度的压降升高, 各杂质影响程度大小体现为 $\text{H}_2 > \text{CO} > \text{N}_2 > \text{CH}_4 > \text{O}_2 > \text{Ar}$, 结果见图 8。

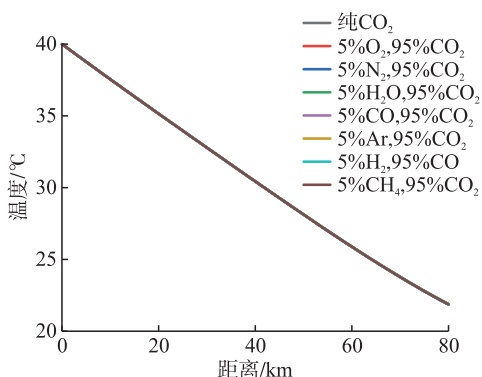


图7 各杂质沿程温度曲线图

Fig. 7 Temperature curves of impurities

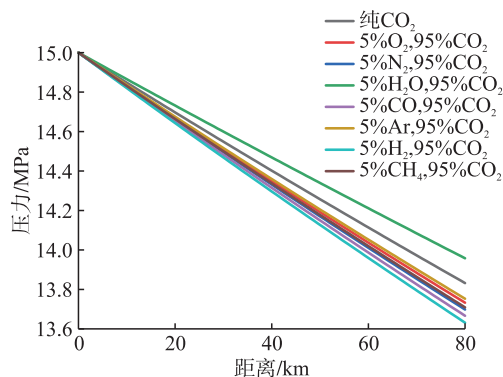


图8 各杂质沿程压力曲线图

Fig. 8 Pressure curves of impurities

3 结论

1) 结合实验筛选出适合计算纯 CO_2 及含杂质 CO_2 物性的状态方程, 使用 C++ 语言自主编程了可自适应步长高精度计算起伏管道、含杂质的超临界 CO_2 管道稳态输送水力热力计算模型, 通过实验以及 OLGA 软件充分验证了其具有较高精度。本文模型为今后建立国产模拟计算软件奠定了基础, 促进继续开展瞬态、管网等方面更复杂的数值模拟以及国产模拟计算软件的开发。

2) 探究了不同杂质对超临界 CO_2 管道稳态输送水力热力特性变化的影响。各类杂质产生的影响在温降方面可忽略不计, 而在压降方面则各有不同, H_2O 有降低压降的作用, 其余杂质则有提高压降的作用, 影响程度体现为 $\text{H}_2 > \text{CO} > \text{N}_2 > \text{CH}_4 > \text{O}_2 > \text{Ar}$ 。

3) GERG-2008 方程精度比 PR 方程精度高, 但也更复杂, 自编程更困难, 故后续应加大推进 GERG-2008 方程的自编程研究。对于自适应的步长计算高程变化, 当高程变化较复杂时所需时间较长, 应该完善合理的高程简化方式。

参考文献:

- [1] 李海, 王强. CCUS 中 CO_2 利用和地质封存研究 [J]. 现代化工, 2022, 42 (10): 86-90.
LI Hai, WANG Qiang. Study on utilization and geological storage of CO_2 in CCUS [J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42 (10): 86-90.
- [2] 邢力仁, 武正弯, 张若玉. CCUS 产业发展现状与前景分析 [J]. 国际石油经济, 2021, 29 (8): 99-105.
XING Liren, WU Zhengwan, ZHANG Ruoyu. Development status and prospect analysis of CCUS industry [J]. International Petroleum Economics, 2021, 29 (8): 99-105.
- [3] 赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 等. “双碳”目标下: 中国 CCUS 发展现状、存在问题及建议 [J]. 环境科学, 2023, 44 (2): 1128-1138.

- ZHAO Zhenyu, YAO Sun, YANG Shuopeng, et al. Under goals of Carbon Peaking and Carbon Neutrality: Status, problems, and suggestions of CCUS in China [J]. *Environmental Science*, 2023, 44 (2): 1128-1138.
- [4] 郭克星, 闫光龙, 张阿显, 等. CO₂ 捕集、利用与封存技术及 CO₂ 管道研究现状与发展 [J]. *天然气与石油*, 2023, 41 (1): 28-40.
- GUO Kexing, YAN Guanglong, ZHANG Ayu, et al. Status quo and development of the research on CO₂ capture, utilization and storage technology and CO₂ pipeline [J]. *Natural Gas and Oil*, 2023, 41 (1): 28-40.
- [5] BUMB P, DESIDERI U, QUATTROCCHI F, et al. Cost optimized CO₂ pipeline transportation grid: A case study from Italian industries [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 2009, 3 (10): 312-319.
- [6] 胡其会, 李玉星, 张 建, 等. “双碳”战略下中国 CCUS 技术现状及发展建议 [J]. *油气储运*, 2022, 41 (4): 361-371.
- HU Qihui, LI Yuxing, ZHANG Jian, et al. Current status and development suggestions of CCUS technology in China under the “Double Carbon” strategy [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41 (4): 361-371.
- [7] 黄维和, 李玉星, 陈朋超. 碳中和愿景下中国二氧化碳管道发展战略 [J]. *天然气工业*, 2023, 43 (7): 1-9.
- HUANG Weihe, LI Yuxing, CHEN Pengchao. China's CO₂ pipeline development strategy under the strategy of carbon neutrality [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43 (7): 1-9.
- [8] MCCOY S T, RUBIN E S. An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂ with application to carbon capture and storage [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, 2 (2): 219-229.
- [9] MOHITPOUR M, GOLSHAN H, MURRAY A. Pipeline design & construction: A practical approach [M]. 2nd ed. New York: ASME Press, 2003.
- [10] 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: 446-456.
- [11] 刘 鑫. CO₂ 驱水平集输管道气液两相流热力水力数值计算及应用 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- LIU Xin. Numerical calculation and application of thermal and hydraulic hydraulics of gas-liquid two-phase flow in CO₂ flooding horizontal gathering and transportation pipeline [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [12] 刘 敏, 滕 霖, 李玉星, 等. 适用于超临界 CO₂ 管道输送的水力模型及特性研究 [J]. *油气田地面工程*, 2016, 35 (6): 14-17.
- LIU Min, TENG Lin, LI Yuxing, et al. Study on hydraulic model and characteristics for supercritical CO₂ pipelines [J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2016, 35 (6): 14-17.
- [13] 吕家兴, 侯 磊, 王玉江, 等. 起伏地区超临界 CO₂ 管道输送特性及管输工艺参数经济性研究 [J]. *天然气化工 (C1 化学与化工)*, 2021, 46 (1): 121-127.
- LYU Jiaying, HOU Lei, WANG Yujiang, et al. Characteristics and economics of supercritical CO₂ pipeline transportation in undulating terrain [J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2021, 46 (1): 121-127.
- [14] 晏水平, 黄树红. 求解运动方程的一种数值算法 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2002, 30 (5): 65-67.
- YAN Shuiping, HUANG Shuhong. A numerical method for solution of motion's equations [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2002, 30 (5): 65-67.
- [15] 李玉星, 姚光镇. 输气管道设计与管理 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2009.
- LI Yuxing, YAO Guangzhen. The design and management of gas transmission pipeline [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009.
- [16] HUH C, KANG S G, HONG S, et al. Onshore and offshore transport process design for carbon dioxide sequestration in a marine geological structure [C]//ASME. Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, May 31-June 5, 2009, Honolulu, Hawaii, USA. New York: ASME, 2009: 1503-1512.
- [17] PENG Dingyu, ROBINSON D B. A new two-constant equation of state [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1976, 15 (1): 59-64.
- [18] BOXER G. Engineering thermodynamics: Theory, worked examples and problems [M]. London: Red Globe Press, 1976.
- [19] 施政灼. 水合物试采流道内固液流动特性研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2021.
- SHI Zhengzhuo. Study on solid-liquid flow characteristics in hydrate test production channel [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021.
- [20] 陈 兵, 徐梦林, 房启超, 等. 超临界含杂质 CO₂ 管网停输再启动对水合物生成的影响 [J]. *石油与天然气化工*, 2022, 51 (4): 43-50.
- CHEN Bing, XU Menglin, FANG Qichao, et al. Effect of supercritical impurity-containing CO₂ pipe network shutdown and restarting conditions on hydrate generation [J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2022, 51 (4): 43-50.
- [21] 高 飞, 辛建旭, 郭志强, 等. 含杂质 CO₂ 物性变化规律及其机理研究 [J]. *石油化工高等学校学报*, 2022, 35 (4): 18-25.
- GAO Fei, XIN Jianxu, GUO Zhiqiang, et al. Study on physical property changes and their mechanism of carbon dioxide containing impurities [J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2022, 35 (4): 18-25.