

二氧化碳管道软件适应性分析

张 艳 (山东莱克工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 二氧化碳管道输送是 CCUS 技术的关键环节, 工艺计算的准确性是保障管道安全高效运行前提。本文选取常用的商业工艺计算软件, 对二氧化碳管道输送的水热力计算结果进行对比, 并结合实际工程应用效果, 对管输软件进行选取。研究结果表明, 对于稳态计算各软件计算结果相似, 对于瞬态计算工况涉及管道内部相态变化, 易选用 OLGA、HYSYS 等多相流的计算软件。通过本文的研究为二氧化碳管道工程设计与运行单位合理选择工艺计算软件提供参考, 助力提升二氧化碳管道输送系统的可靠性。

关键词: 二氧化碳管道; 工艺计算软件; 适应性; 对比分析

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 012-0106-03

Adaptability Analysis of Carbon Dioxide Pipeline Software

Zhang Yan(Shandong Lake Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: The transportation of carbon dioxide through pipelines is a critical component of CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) technology, and the accuracy of process calculations is a prerequisite for ensuring the safe and efficient operation of pipelines. This paper selects commonly used commercial process calculation software to compare the thermodynamic and hydraulic calculation results for carbon dioxide pipeline transportation. By integrating the findings with practical engineering applications, recommendations are provided for the selection of pipeline simulation software. The research results indicate that for steady-state calculations, the results from various software are similar. However, for transient calculations, especially those involving phase changes within the pipeline, it is advisable to use multiphase flow calculation software such as OLGA and HYSYS. The findings of this study offer valuable references for engineering design and operational units in selecting appropriate process calculation software for carbon dioxide pipeline projects, thereby contributing to enhancing the reliability of carbon dioxide pipeline transportation systems.

Keywords: carbon dioxide pipeline; process calculation software; adaptability; comparative analysis

在全球应对气候变化的大背景下, 碳捕集、利用和封存(CCUS)是我国碳达峰碳中和的重要减排技术, 二氧化碳管道输送作为 CCUS 产业链中的中间关键环节, 负责将捕集的二氧化碳安全、高效地运输至利用或封存地点。与传统油气管道相比, 二氧化碳管道输送具有二氧化碳复杂的相态变化独特的工艺特性。工艺计算软件能够模拟二氧化碳在管道内的流动行为, 预测压力、温度、流量等参数变化, 为管道设计、运行优化及安全评估提供关键数据支持。目前, 市场上涌现出多款适用于二氧化碳管道输送工艺计算的软件, 其功能、算法及适用场景存在差异。因此, 开展软件适应性分析对于合理选择软件、保障二氧化碳管道工程质量具有重要意义。

1 二氧化碳管道输送工艺特点

二氧化碳临界温度为 31.05 °C, 临界压力为 7.38MPa, 在管道输送过程中, 受温度、压力波动影响, 极易发生气-液-超临界态之间的转变。例如, 当管道运行压力高于临界压力, 温度在临界温度附近时, 二氧化碳处于超临界状态, 其密度接近液体, 黏度接近气体, 流动性和传热特性与常规气态或液态有显著不同。相态变化不仅影响管道输送能力, 还会对管材

选择、设备配置产生影响, 因此正常输送过程中要避免相变的产生(如图 1 所示)。

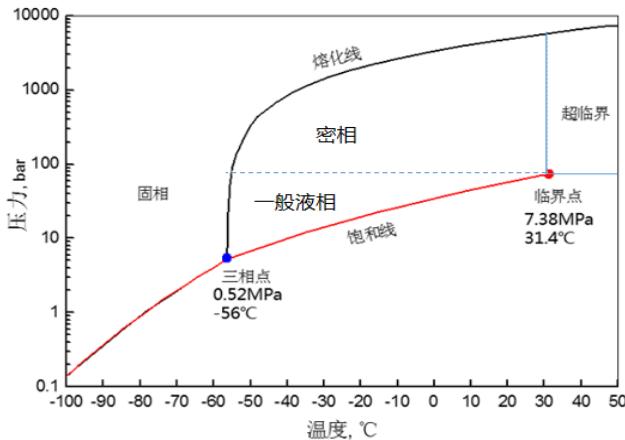


图 1 二氧化碳相态图

1.1 气态输送

CO₂ 气相输送需保持输送管程管内为气相状态, 气态二氧化碳对管道材质的要求相对较为灵活, 一般的碳钢管道即可满足输送要求, 不需要特殊的高耐腐蚀或高强度材料。为了维持管内相态的稳定性, 输送压力通常不高于 5MPa。一般适用于小规模、短距离

场景。

1.2 液相输送

CO₂输送过程中在管道内保持液相状态，二氧化碳的液化温度较低，在常温下容易气化，因此液相输送需要严格控制温度，一般需要将二氧化碳冷却至较低温度。低温环境下，管道材料的力学性能会发生变化，容易出现脆化等问题，因此需要采用特殊的低温材料，如不锈钢、铝合金等，来保证管道的强度和韧性。

同时由于地形地势以及管道摩擦损失，在输送过程中会产生压降，在输送过程需要进行泵增压设置。同时需要对管道进行冷却及保冷设置，整体输送能耗高。一般适用于低温环境或者需要长期储存的场景。

1.3 超临界输送

输送过程中 CO₂ 在管道内保持超临界状态（输送起点的温度、压力均高于临界值），通过压缩机压缩升高输送压力，管道无需保温。在输送过程中二氧化碳会随着地温的变化逐渐变成密相，因此中间增压站需要根据二氧化碳密度选择合适的增压设备。

2 常用管输计算软件

选择适合的二氧化碳管输商业软件，需要综合考虑以下多个方面：要根据二氧化碳管输项目需求，若不同温度、压力下物性变化大，软件需能准确计算其粘度、密度、比热容等物性参数。若项目涉及管道与周边环境的热交换等问题，需软件有热分析功能。简单的项目若使用构建模型复杂、需输入大量参数的软件，会降低工作效率，应选择能快速、简便构建模型的软件。

2.1 OLGA

OLGA 是一款广泛应用于多相流管道模拟的专业软件，能够精确描述二氧化碳在不同相态下的流动特性。OLGA 可处理复杂的管道拓扑结构，包括分支、变径等情况，同时可以预测了管道在不同季节、不同输送量下的压力降和相态分布，为管道运行维护提供了可靠数据。其优势在于多相流计算精度高、模型灵活性强；缺点是对硬件配置要求较高，操作相对复杂，对于复杂的含有动设备的瞬态计算容易不收敛。

2.2 PIPESIM

PIPESIM 软件作为行业领先的多相流稳态流动模拟软件，在石油行业内已经得到了广泛的应用。PIPESIM 的应用贯穿了油气田开发的整个生命周期：从早期工程设计阶段的井身结构设计、人工举升系统设计，管线、地面设备以及整体管网设计，到后期日常运营管理阶段的井筒优化，管线与管网优化研究。它所面向的流体对象涵盖了常规油气藏、非常规气藏以及稠油油藏，它不仅适用于模拟海上集中管理的小

型油气田生产系统，而且适用于规模庞大的陆上油气田集输管网系统。缺点软件功能复杂，需要用户具备一定的油气工程专业知识和多相流理论基础，以及对软件操作的熟悉程度，否则难以充分发挥其功能，进行有效的模型建立、参数设置和结果分析；同时在某些极端工况或特殊情况下，如超高温、超高压、高含沙等复杂条件下，模拟结果与实际情况可能存在一定的偏差。

2.3 PIPEPHASE

PipePhase 软件所提供的流体模型包括：单相流体（气体和液体）、混合组份、原油、凝析油、蒸汽、纯组份等，覆盖最全面的流动性混合系统。应用于油气管道网络和管道系统中，是精确模拟稳态多相流的模拟工具，在一个单井中，该软件能适应从主要参数的灵敏度分析中模拟应用并广泛地搜索；对一个完整的领域，它可以实现多年可行性计划研究。

该软件主要侧重于稳态多相流模拟，对于瞬态流动等复杂动态过程的模拟能力有限，无法满足一些对瞬态分析有需求的项目。

2.4 HYSYS

HYSYS 是化工流程模拟软件的一种，广泛应用于石油天然气设计研究领域。它包括动态和稳态两大部分，具有高度智能化的特点。管道 (Pipe Segment) 可广泛用于模拟多种类型的管道输送，例如对单相流或多相流管道进行严格的传热估算，大规模的闭环管道问题。缺点是进行大规模、复杂的管输水热力计算时，尤其是对于长距离、大管径、多工况的管道系统模拟，由于其计算过程较为复杂，涉及到大量的迭代和求解过程，计算时间往往较长，容易不收敛，可能会影响项目的进度和工作效率。

2.5 SPS

Stoner Pipeline Simulator (简称 SPS) 由 DNV GL 公司开发，是一款应用在单相流长输管道上的软件，软件操作较为复杂，涉及大量的参数设置和模型构建工作，需要用户具备丰富的专业知识和操作经验。SPS 既可以对管道系统的水力、热力工况进行仿真，又可以对管道系统的调节过程及结果进行仿真，是一套世界公认的用于气体管道设计、储气能力分析、日常操作决策和计算分析的高精度软件。SPS 能够预测任何管线的动态变化，如水击、关阀、输量变化引起的瞬时压力、变化的流速等。

缺点是软件操作较为复杂，涉及大量的参数设置和模型构建工作，需要用户具备丰富的专业知识和操作经验，同时不能计算多相态的工艺仿真计算（见表 1）。

表 1 不同软件适应性

软件名称	计算类型	计算功能	缺点
PIPEPHASE	稳态	稳态水力热力	不能计算瞬态
PIPERSIM	稳态	稳态水力热力	不能计算瞬态
SPS	稳态 / 瞬态	稳态水力热力、泄漏等瞬态事故分析	单相
Pipeline Studio	稳态 / 瞬态	稳态水力热力、泄漏等瞬态事故分析	单相
HYSYS	稳态 / 瞬态	物性计算、稳态水力热力、节流泄放	长输管道计算慢，不易收敛，瞬态计算复杂
OLGA	稳态 / 瞬态	物性计算、稳态水力热力、瞬态计算（投产、停输再启动、水击）、节流泄放	大温降和压降计算不容易收敛

3 不同软件适应性分析

在 CO_2 超临界管道输送过程中，对沿线压力 (p)、体积 (V) 及温度 (T) 的精确预测至关重要，主要是维持 CO_2 处于稳定状态，防止任何不利的相变发生，进而保障输送效率、安全性和经济性能。因此，软件计算准确性关系到管道的安全运行。

3.1 对于稳态工况

以百万吨、百公里 CO_2 输送管道为例，采用不同软件对管道水力热力进行模拟，从计算结果可以看出，不同软件计算结果偏差很小。常用的软件均可进行 CO_2 稳态水热力计算，辅助管道的选型设计（见图 2，图 3）。

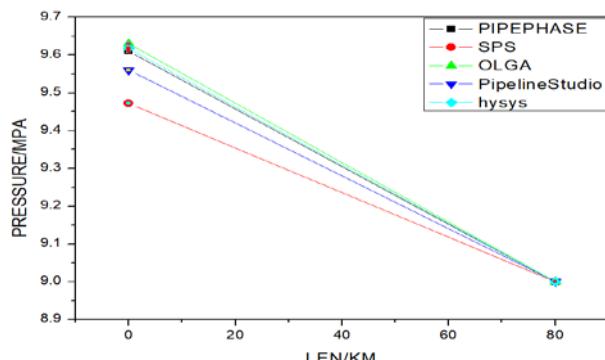


图 2 管道沿线压力变化趋势

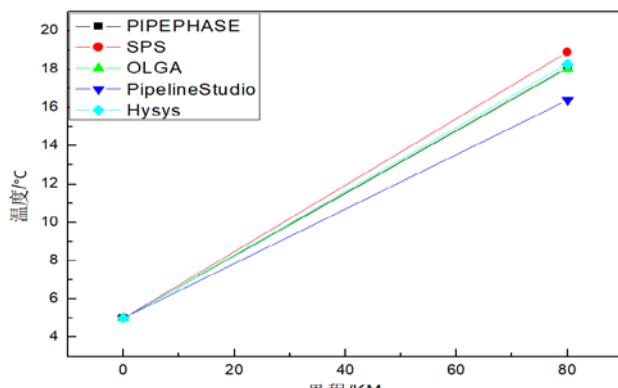


图 3 管道沿线温度变化趋势

3.2 瞬态工况

在实际管道运行过程中，常会遇到增压设施动力中断，进、出站阀门突然关闭、停输等引起的瞬态工况。对于瞬态计算，需要结合管内流体相态情况及软件的使用范围，若有相变产生，可适用 OLGA, HYSYS 等可以计算多相流的计算软件，若无相变产生，可用 SPS 等软件进行分析（见图 4）。

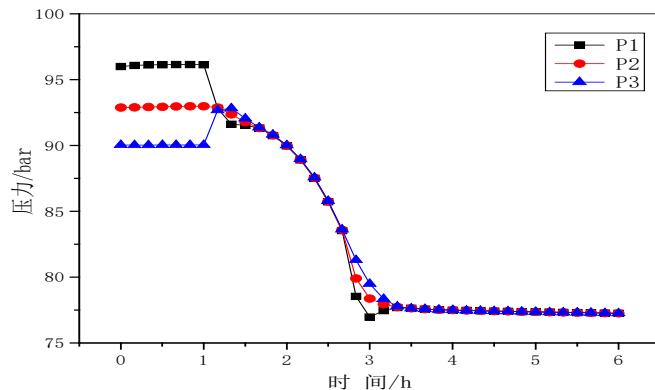


图 4 管道停输过程压力变化趋势

4 结论

①对于小输量、短距离，建议选用气相输送；对于大输量、长距离，建议选用超临界输送。

②不同软件的使用范围不同，但对稳态水力热力计算，不同软件均可适用于，且不同软件之间计算结果相差不大。对于瞬态计算，需要结合管内流体是否发生相变确定合适的软件。

参考文献：

- [1] 李琦, 魏亚妮, 刘桂臻. 中国沉积盆地深部 CO_2 地质封存联合咸水开采容量评估 [J]. 化工管理, 2013, 11(4):5-6.
- [2] 叶健, 杨精伟. 液态二氧化碳输送管道的设计要点 [J]. 油气田地面工程, 2010, 29(4):37-38.
- [3] 刘建武. 二氧化碳输送管道工程设计的关键问题 [J]. 油气储运, 2014, 33(4):369-373.
- [4] 吴瑕, 李长俊, 贾文龙. 二氧化碳的管道输送工艺 [J]. 油气田地面工程, 2010, 29(9):52-53.