

基于超临界 CO₂ 管道输送的工程设计优化与实践

于方竹

(东营众海人力资源有限公司, 山东 东营 257000)

(中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 随着全球对减少碳排放的要求日益增强, 超临界 CO₂ 管道输送技术的重要性愈发凸显。本研究首先系统地阐述了超临界 CO₂ 管道输送技术的基本原理、特点、优势以及应用领域。然后, 本文提出了工程设计优化的必要性, 明确了优化的目标和策略, 并深入探讨了优化方法和实践。接着, 本研究从实践角度出发, 评估了超临界 CO₂ 管道输送技术的使用效果, 并提出了进一步的改进和优化建议。最后, 本文对研究结果进行了总结, 指出了研究的不足, 并对未来的研究方向提供了建议。本研究对于理解超临界 CO₂ 管道输送技术的优势、推动其在工程设计中的应用以及优化工程设计具有重要的理论和实践意义。

关键词: 超临界 CO₂ 管道输送; 工程设计; 优化策略; 实践应用; 效果评估

Abstract: With the increasing global demand for reducing carbon emissions, the importance of supercritical CO₂ pipeline transportation technology is becoming more and more prominent. Firstly, this study systematically expounds the basic principle, characteristics, advantages and application fields of supercritical CO₂ pipeline transportation technology. Then, this paper puts forward the necessity of engineering design optimization, clarifies the optimization objectives and strategies, and deeply discusses the optimization methods and practices. Then, from a practical point of view, this study evaluates the use effect of supercritical CO₂ pipeline transportation technology, and puts forward further improvement and optimization suggestions. Finally, this paper summarizes the research results, points out the shortcomings of the research, and provides suggestions for future research directions. This study has important theoretical and practical significance for understanding the advantages of supercritical CO₂ pipeline transportation technology, promoting its application in engineering design and optimizing engineering design.

Keywords: supercritical CO₂ pipeline transportation; engineering design; optimization strategy; practical application; effect evaluation

1 引言

1.1 研究背景

在巴黎气候大会和哥本哈根气候大会上, 中国政府提出了不同的碳排放减少目标。到 2030 年, 中国国内单位生产总值二氧化碳排放量将比 2005 年下降 60%–65%; 而到 2020 年, 中国国内单位生产总值二氧化碳排放量将比 2005 年下降 40%–45%。这表明中国正在加紧实施碳减排措施, 以实现碳交易市场体系的建设和节能减排政策的落实。

碳捕集与利用、封存 (CCUS) 是碳减排的有效措施, 预计将迎来快速发展期。CO₂ 管输作为碳产业链的基础设施, 其安全技术的发展、管道基础设施建设和运营经验积累等方面的工作迫在眉睫。相较于其他输送方式, 管输方式成本较低、安全高效。根据 CO₂

的相态不同, 管道输送分为气相输送、液体输送 (低压 / 高压)、超临界输送三种形式。中国有关 CO₂ 管道运输技术的研究刚刚起步, 尚没有大规模的 CO₂ 输送管线, 而国外在 CO₂ 的管道输送方面已经积累了比较多的经验, 并且有近万公里 CO₂ 输送管线, 但就 CO₂ 管道输送而言没有形成系统的标准体系。为了支撑国内 CO₂ 管道工程的落地实施, 先期建设超临界 CO₂ 工业环道, 探索及验证超临界 CO₂ 输送工艺与安全技术理论十分必要。随着全球气候变暖问题日益严重, 减少碳排放和碳捕获与储存技术越来越受到关注。超临界 CO₂ 输送技术作为一种高效、安全的储存方式, 引起了广泛的研究兴趣。

1.2 研究意义

超临界 CO₂ 管输作为连接上游捕集和下游输送的

最高效方式，通过试验环道的建设，可以为理论指导建设提供正确导向，同时推进二氧化碳管道输送安全技术的工程化进程。超临界 CO₂ 输送技术在碳捕获与储存领域具有巨大的应用前景，然而，对其进行有效的工程设计优化和实践应用评估，能够进一步提高其效率，降低成本，并最大限度地减少环境影响。

1.3 研究内容

1.3.1 管道流动保障技术验证

将开展水力模型的验证试验和瞬态工况的验证试验，以分析各实际工况下流体参数的变化规律，优化和修正理论模型，并对比工艺软件的精度，从而为超临界态工业管道的设计和流动保障技术提供有效的支持。

1.3.2 管输安全控制技术验证

将进行管道放空技术的验证试验和减压波预测模型的验证试验。管道放空技术的验证试验旨在基于管道放空时管道内介质的压力、温度及相态变化规律，探索现象的成因及规律，为管道工程的安全放空操作提供指导；而减压波预测模型的验证试验则是基于瞬态工况下管道压力的变化，得到不同相态的 CO₂ 减压波传递曲线，并将其与减压波预测模型的计算结果进行比较。

1.3.3 管输运行操作技术验证

目前国内尚无超临界 CO₂ 管道工程建设的实践经验，因此在 CO₂ 管道的投运、停输再启动技术方面还存在欠缺。为此，需要对管道的投运技术（如干燥、置换、投产等）、停输再启动技术（如事故停输、计划性停输及停输再启动等）进行研究，深入分析管道在投运、停输再启动过程中管内 CO₂ 的压力、温度及相态变化规律，并验证方案的可行性。

2 超临界 CO₂ 输送技术概述

2.1 超临界 CO₂ 输送技术的基本原理

超临界 CO₂ 输送技术是一种利用超临界二氧化碳作为输送介质的新型输送技术。它涉及到物理学、化学和工程学等多个领域，其基本原理是利用超临界状态下的 CO₂ 的特殊物理性质，如高扩散性、低粘度、高溶解性等，来实现对物质的输送。在超临界状态下，CO₂ 的物理性质会随着压力和温度的变化而发生显著改变。当压力和温度达到一定条件时，CO₂ 会从气态转变为液态，同时具有液体和气体的某些特性。利用这些特性，可以将物质溶解在超临界 CO₂ 中，然后通过高压泵和管道系统将混合物输送至目的地。

2.2 超临界 CO₂ 输送技术的特点与优势

①高效性：超临界 CO₂ 输送技术能够实现连续、稳定、高效的输送，特别适合于大规模、长距离的输送任务；②环保性：由于超临界 CO₂ 的溶解性高，可以有效地溶解和携带物质，减少了对环境的影响；③经济性：超临界 CO₂ 输送技术可以在常温常压下操作，不需要加热或冷却过程，降低了能耗和成本；④安全性：超临界 CO₂ 输送技术中，由于没有使用有毒或易燃的化学物质，因此具有较高的安全性。

2.3 超临界 CO₂ 输送技术的应用领域

超临界 CO₂ 输送技术目前已经在多个领域得到了应用：①化工领域：在化工领域中，超临界 CO₂ 输送技术被广泛应用于生产过程中物料的输送。例如，可以将催化剂或反应物溶解在超临界 CO₂ 中，然后输送到反应器中进行化学反应；②医药领域：在医药领域，超临界 CO₂ 输送技术可以用于制备药物或药物中间体的过程中。例如，可以将药物溶解在超临界 CO₂ 中，然后通过高压泵和管道系统输送到反应器中进行合成或提取；③食品领域：在食品领域中，超临界 CO₂ 输送技术可以用于食品加工和食品包装过程中。例如，可以将食品原料溶解在超临界 CO₂ 中，然后输送到加工设备中进行加工或包装。

3 工程设计优化分析

3.1 工程设计优化的必要性

超临界 CO₂ 输送技术虽然具有许多优点，但在实际工程设计中，仍需要进行有效的优化以提高效率，降低成本并减少环境影响。

3.2 工程设计优化案例分析

这种超临界 CO₂ 输送技术，其原理是利用 CO₂ 在超临界状态下的特殊性质，既能够作为输送介质，又能够在一定程度上提高石油的流动性。这种技术的采用，不仅大大提高了石油的输送效率，也极大地减少了输送过程中的能源消耗和环境污染。

在工程设计优化方面，石油公司更是考虑得周全。他们针对管道、泵站、控制系统和安全措施等因素进行了细致的优化设计，以确保输送过程的稳定和安全。例如，他们选用了高性能的管道材料和独特的涂层技术，以抵抗各种环境因素的腐蚀和磨损。同时，他们还采用了先进的泵站设计和控制系统，以实现能源的高效利用和输送过程的精确控制。

此案例中所采用的超临界 CO₂ 输送技术及其工程设计优化策略，不仅带来了显著的经济效益，也产生

了深远的社会效益。这种技术的成功应用，不仅提高了石油的输送效率，降低了能源消耗和环境污染，也为企业节约了大量的运营成本，提高了企业的竞争力。同时，它也为社会提供了更为清洁、高效的能源输送方式，推动了社会的可持续发展。

4 实践应用与效果评估

4.1 超临界 CO₂ 输送技术在实践中的应用

超临界 CO₂ 输送技术是一种新型的输送技术，由于其具有高效率、低能耗、环保等优点，因此在实践中得到了广泛的应用。例如，在石油工业中，超临界 CO₂ 输送技术被用于输送原油和天然气，其高效率 and 低能耗的特点使其成为石油工业中的理想选择。此外，在化学工业中，超临界 CO₂ 输送技术也被用于输送化学原料和产品，其环保的特点使其成为化学工业中的绿色输送技术。

4.2 实践应用的效果评估

超临界 CO₂ 输送技术在实践中得到了广泛的应用，其效果也得到了评估。通过与传统的管道输送技术相比，超临界 CO₂ 输送技术具有更高的输送效率和更低的能耗。此外，由于超临界 CO₂ 输送技术使用的是超临界状态的 CO₂，因此其环保性能也得到了显著的提升。在实践中，超临界 CO₂ 输送技术的使用也减少了管道的腐蚀和泄漏问题，提高了管道的安全性和使用寿命。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本研究深入探讨了超临界 CO₂ 输送技术的基本原理、特点与优势，以及其在工程设计中的应用。通过对工程设计优化的深入研究发现，有效的工程设计优化不仅可以提高超临界 CO₂ 输送和储存的效率，降低成本，而且可以有效减少环境影响。

5.2 研究不足与展望

在超临界 CO₂ 输送工程设计优化的研究中，尽管已经取得了一定的进展，但仍存在一些不足之处，需要进一步研究和探讨。

首先，对于超临界 CO₂ 的性质和行为，还需要进一步深入的研究。尽管已经有一些实验和理论研究，但超临界 CO₂ 的行为和性质在高压、高温等极端条件下仍然存在很多未知。其次，现有的输送管道设计主要是基于传统的管道设计方法，对于超临界 CO₂ 的特殊性质考虑不够充分。因此，开发针对超临界 CO₂ 输送管道的专门设计方法和技术，提高管道的输送效率

和安全性，是未来研究的重要方向。最后，对于实际应用中的问题，也需要进行深入的研究。例如，超临界 CO₂ 输送管道的材料选择、防腐技术、泄漏检测等方面的问题，都需要进行实际研究和实验验证，以确保输送工程的实际运行效果和安全性。

综上所述，未来的研究需要进一步深入探讨超临界 CO₂ 的性质和行为，开发专门的设计方法和技术，加强热力学、动力学以及安全性的研究，并对实际应用中的问题进行深入研究和实践验证。

5.3 对未来研究的建议

为了进一步推动超临界 CO₂ 输送工程设计优化的研究：

首先，需要加强基础研究。对于超临界 CO₂ 的性质和行为，需要进一步深入实验和理论研究。同时，也需要开发专门的设计方法和技术，以提高管道的输送效率和安全性。其次，需要加强多学科交叉合作。超临界 CO₂ 输送工程设计优化涉及到多个学科领域的知识和技术，包括化学工程、机械工程、材料科学等。因此，未来的研究需要加强多学科交叉合作，充分利用各学科的优势和资源，推动研究的深入发展。最后，需要加强国际合作与交流。超临界 CO₂ 输送工程设计优化是一个国际性的研究领域，未来的研究需要加强国际合作与交流，共享研究成果和经验，推动研究的进步和发展。

参考文献：

- [1] 徐冬, 刘建国, 王立敏, 等. CCUS 中 CO₂ 运输环节的技术及经济性分析 [J]. 国际石油经济, 2021, 29(6): 8-16.
- [2] 高瑞民, 赵晓兰, 陈光莹, 等. 二氧化碳管道输送过程管径设计分析 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(12): 95-99.
- [3] 张九天, 张璐. 面向碳中和目标的碳捕集利用与封存发展初步探讨 [J]. 热力发电, 2020(49): 1-10.
- [4] 高蓝宇. 二氧化碳吸附和输送技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [5] 汪蝶. CO₂ 液化、输送与储存技术研究 [D]. 荆州: 长江大学, 2017.
- [6] 黄辉, 周晶, 粟科华. CO₂ 输送管道工程设计标准的探讨 [J]. 天然气业, 2014, 34(12): 131-134.
- [7] 陆诗建. 碳捕集、利用与封存技术 [M]. 北京: 中国石油出版社, 2020.