

二氧化碳管道输送课程体系建设探索

李欣泽^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院; 2. 新疆多介质管道安全输送重点实验室

摘要:在国家“双碳”战略目标的背景下,油气储运工程课程体系须主动适应新时代要求,加速课程与教学内容的迭代升级。建议结合CCUS(碳捕集、利用与封存)技术发展,开展二氧化碳管道输送课程的教学。本文重点从理论面授、上机实操和实习实践等三个方面的教学开展形式探讨了二氧化碳管道输送课程体系建设。教学内容涵盖二氧化碳物性和相特性、二氧化碳管输工艺和安全、多相流工艺模拟软件操作、设备与工艺流程认知、运维操练等。以期适应低碳发展需要,培养一批CCUS管道领域的应用型工程技术人才,保障国家“双碳”战略目标的顺利实现。

关键词:“双碳”目标;二氧化碳;管道输送;课程建设;人才培养

【DOI】10.12252/j.issn.2096-627X.2024.05.158

一、背景及意义

(一)二氧化碳管输课程在油气储运工程专业的重要性

2020年9月22日,习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出了“3060碳达峰与碳中和”的目标,这为世界低碳环保事业贡献了中国方案与中国智慧。为了能够顺利达成“双碳”目标,中国对CCUS(碳捕集、利用与封存)技术给予了高度重视,并将其纳入国家中长期科技发展规划,这将是一场广泛且影响深刻的系统性变革,势必会推动我国能源结构实现根本性的转变^[1]。

CCUS产业链由二氧化碳捕集、压缩、运输、利用或封存等多个环节组成,需要所有环节高度集成与协同发展。而二氧化碳运输是CCUS产业链的重要环节之一,因此必将依托于长距离的二氧化碳管道及其配套基础设施建设^[2]。

油气储运,即石油与天然气的储存与运输,是石油天然气工业的关键环节,它充当着油气生产、加工到消费之间的桥梁。在我国能源结构将发生巨大变革的背景下,传统油气管网须适应“能源生产低碳转型、能源传输格局重塑、能源消费灵活多样”的发展要求,需不断拓宽油气管网利用边界。国家“双碳”战略目标对油气储运工程专业人才培养提出新要求,调整油气储运工程专业课程体系,将二氧化碳管道输送课程作为油气储运工程专业课将是顺势而为。

(二)国内外二氧化碳管道工程建设现状

国际上正在运营超过50条独立的二氧化碳管道,管网的长度近万公里。美国的二氧化碳管道运营商基本为能源公司,已建二氧化碳输送管道约有8000km,已成规模化,整体技术体系较为完备。在油田提高采收率方面中,最早的长距离二氧化碳管道由美国CRC(Canyon Reef Carriers)公司于1972年建成,该管道总长

354km,将二氧化碳输送至Texas州SACROC油田。迄今现存最长二氧化碳管道为美国Cortez管道,全长808km,管径762mm,采用API 5L X65钢,年输量约2000万吨,其将天然纯二氧化碳从科罗拉多州输送至德克萨斯州,用于油田提高采收率^[3]。

中国二氧化碳管输技术发展缓慢,二氧化碳输送以低温储罐公路运输为主,2023年胜利油田投产了国内第一条百公里百万吨高压密相二氧化碳管道^[4]。管道干线长度109km,管径DN300,设计压力12MPa,设计输量170万吨/年。黄维和等认为,中国碳中和前需构建区域间的干线管道,形成输送规模 10×10^8 t级、总里程约 6×10^4 km的国家输碳管网^[5]。

(三)二氧化碳管道行业标准

目前,二氧化碳管道多借鉴天然气管道设计及输送经验,尚无统一的二氧化碳管输行业标准,国外部分标准只是提出了管输二氧化碳工作守则、技术要求等,内容以定性的通用描述为主,设计参数优化和管道运行规范未见报道。如美国的监管体系整合了联邦法规与行业标准,包括49-CFR 195、ANSI B31.4(侧重液体石油管道但适用性延伸至二氧化碳输送)、ASME B31.4(涵盖液态烃及类似液体管道);欧洲则采用了一系列本国或区域标准,如IP6、BS EN 14161(针对石油天然气工业管道)、BS PD 8010(管道施工通用规范)、DNV ST-F101(专用于海底管道)以及DNV RP-J202(针对二氧化碳管道特定的设计与运维);加拿大则遵循其国内标准CAS-Z662-7来指导二氧化碳管道项目的实施^[6-7]。国内仅有SH/T3202-2018《二氧化碳输送管道工程设计标准》和GB/T 42797-2023《二氧化碳捕集、输送和地质封存·管道输送系统》^[8-9],内容多摘自ISO,以定性描述为主,无工艺及技术细节。不涉及超临界态二氧化碳管道设计参数和运行方案优化,也不包括管道停输再启动、水击保护、安全放空、泄漏/扩散应急抢险等运行

安全操作内容。目前新疆、山东、陕西、江苏等多个省份已启动二氧化碳管道规划或建设，但管道运行规范还处于空白，亟须研制示范工程建设急需核心标准。

（四）二氧化碳管道运行面临挑战

二氧化碳存在超临界态、液态、固态与超临界四种状态。二氧化碳物性特别是相特性及管输特性和原油、天然气存在很大差异，且捕集二氧化碳气源含多种杂质。二氧化碳的临界点较低，输送过程中的压力、温度变化可能会导致相态的改变，不能直接套用原油、天然气管道已有输送技术。二氧化碳的密度和黏度是影响管道输送经济性的重要因素，超临界态二氧化碳具有黏度低、密度大的特点，以超临界态管道输送二氧化碳是目前国际上进行长距离、大规模碳运输的最安全经济方式。

超临界二氧化碳管道在运行过程中，难免会遇到计划停输、事故停输、水击、泄漏、计划放空、紧急放空等工况，二氧化碳将在管道内形成瞬变流动，易发生相变和低温工况（ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），密度、比热容等物性参数会发生阶跃式变化，从而导致压力、温度等运行参数发生剧变，对管道及设备形成冲击，造成损伤，危害管道安全^[10]。二氧化碳是一种无色无味无毒气体，不易燃、不易爆。与成品油、天然气的危险性相比较，二氧化碳属于无毒窒息性气体，密度较空气重，泄漏后易在低洼地带或密闭空间聚集，不仅破坏周围环境，对土壤微生物生长产生一定抑制作用，还可能造成人畜窒息、中毒、冻伤，甚至死亡的风险。

二、二氧化碳管输课程体系建设

为支撑二氧化碳管输人才培养，培养学生创新思维和实战能力，建议二氧化碳管输课程体系建设融合理论面授、上机实操和实习实践等多种教学方式。

（一）理论面授

理论面授内容建议至少包括二氧化碳物性和相特性、二氧化碳管输工艺和二氧化碳管输安全三个部分。

1. 二氧化碳物性和相特性

学习二氧化碳管道输送工艺，首先需要了解其物性及相态特性，明确二氧化碳在不同条件下物性以及相态的变化规律，以保证管道输送的安全性。二氧化碳与空气等常见物质一样具有气液固三态。二氧化碳的相态图有两个明显的特征点：三相点（ $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， 0.52 MPa ）和临界点（ $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， 7.38 MPa ）。二氧化碳相态可分为5个区域：超临界区域、密相区域、液相区域、固相区域和气相区域。

另外，由于来源不同，管输二氧化碳流体中常会含有不同类型的杂质，常见的杂质有： N_2 、 H_2 、 O_2 、 CH_4 、 H_2S 和Ar等。杂质的存在对管道的输送和安全运行会产生不利影响。含杂质二氧化碳的相平衡、临界参数、物性参数等与纯二氧化碳均有不同。因此，含有不同杂质种

类和含量的二氧化碳气源对于增压功率、换热功率、管道沿程温降、压降、管输能力的影响也是教学的重点内容。

2. 二氧化碳管输工艺

二氧化碳管道输送就输送方式而言，可以分为气态输送、液态输送、密相输送和超临界输送。该部分内容应深入细致地探讨不同输送状态下的理论基础与操作实践，旨在为学生构建一个全面且实用的知识体系，以应对多相态的输送需求与挑战。每种输送方式的选择将综合考虑气源的压力和温度条件、目标用户对压力、温度的需求、线路长度及线路地区等级的划分、输送长度、输送规模等因素，以确保输送过程的经济高效。其中超临界态输送是要求二氧化碳的压力和温度均在临界值之上，超临界二氧化碳密度接近液体，黏度与气体接近。对于大输量、长距离二氧化碳管道，综合考虑工程投资和运行费用，采用超临界输送更具优势。通过学习管输工艺，学生不仅能够理解每种输送方式的技术细节与应用条件，还能结合管道设计的基本原则，合理选择输送方式与设计参数，确保管道安全、经济、高效输送。

3. 二氧化碳管输安全

二氧化碳管输安全授课内容应紧密围绕确保二氧化碳管道系统长期安全运行的目标展开。深入分析管道停输再启动、水击、放空、泄漏等瞬态工况下可能存在的主要风险并探讨相应的预防与应对措施，旨在培养学生的系统思维、风险评估能力以及事故应急处理技能。

例如超临界二氧化碳管道在停输过程中，温度和压力不断下降，若停输时间过长，可能会出现气化现象，管内气泡不断生成和泯灭，形成冲击性段塞流，管内压力瞬间突变，造成水击和管道震动。应对措施包括铺设保温层，提高停输前管道运行压力等。因管道内流体压力与外界大气压相差较大，若管内流体直接向大气放空，在二氧化碳放空过程中，因二氧化碳的焦耳-汤姆逊效应，流体以大压差流经放空阀时，可能生成干冰堵塞放空管线，并引发危险事故。另外，干线内可能因为快速降压引起流体迅速膨胀或蒸发导致管内剧烈降温，低温可能破坏管材和管道仪表。应对措施包括多级节流泄放、人为调整放空前工艺参数、放空管级间局部加热、保温、增设缓冲罐等措施。

（二）上机实操

描述管道瞬态工况下运行参数规律的数学模型非常复杂，如果没有准确、快速的求解算法及运行工况分析手段，短时间内准确给出压力、温度及流量随时间的变化是很困难的。管道商业仿真软件作为管道动态工况分析仿真工具，能够很好地解决这一问题，随着数值求解算法的不断发展和计算机技术持续进步，仿真软件的

应用范围日益扩大, 仿真效果更加准确。管道仿真商业软件已成为管道运行安全分析、运行优化分析的基本工具, 可为工况分析、事故演练、事故预案编制提供决策, 提高管道运行和管理效率, 预防和减小事故损失。

因此, 在理论授课基础上, 建议增加二氧化碳管输模拟软件实训授课内容。使学生掌握OLGA等多相流工艺模拟软件、PVTSIM物性计算软件的基本使用。通过系统学习, 学生可借助软件建立超临界二氧化碳稳态和瞬态输送水力热力计算模型并开展工况计算和分析工作。其中稳态工况是模拟管道在设计输量下的稳态运行工况。绘制管道沿程图, 得到管道沿线压力、温度、密度分布情况。瞬态工况是模拟管道停输再启动、管道泄漏、管道放空、管道水击、管道清管、管道二氧化碳腐蚀、水合物生成、管道投产等工况。绘制不同时刻下的管道沿程图, 得到管道压力、温度、流量等主要参数在不同时刻的沿程分布情况; 绘制时间趋势图, 得到某一管道位置处压力、温度、流量与时间的变化关系。

(三) 实习实践

实习实践是深入齐鲁石化至胜利油田高压密相二氧化碳管道沿线及站场、吉林油田CCUS示范区等现场生产一线, 通过现场观察和学习, 了解设备配置、功能和参数, 熟悉站场工艺流程。深入理解操作人员日常运维工作, 加深对管道停输再启动、水击、放空、泄漏等瞬态运行工况的认识。

主要实践内容包括设备与工艺流程认知、运维操练等。其中设备与工艺流程认知要求学生掌握二氧化碳管道与油气管道设备差异。比如上游气源来气为气态二氧化碳, 增压工艺方案包括压缩机直接增压方案、压缩机(增压至超临界压力)+泵组合方案以及压缩机(增压至液化压力)+泵组合方案。需要通过技术经济比选, 确定最优方案。运维操练是要求学生参与站场的日常运营, 监控设备状态、检查工艺参数, 协助操作人员进行设备维护。通过体验实际操作, 了解管道系统运维, 加深对站场设备及其主要功能的认识。

三、结语

随着全球向低碳经济转型, 二氧化碳管道输送作为CCUS产业链的核心环节, 在国家战略性新兴产业布局中发挥着至关重要的作用。鉴于现有行业标准的局限和人才培养方案的不足, 本文提出的二氧化碳管输课程体系建设显得尤为迫切。该建设方案融合了理论面授、上机实操和实习实践多种教学方式, 教学内容全面。旨在培养兼具扎实理论基础与实战技能的CCUS管输领域复合型人才, 为国家实现“双碳”目标作出贡献。

参考文献

[1] LIU E, LU X, WANG D. A systematic review

of carbon capture, utilization and storage: status, progress and challenges[J]. *Energies*, 2023, 16(6).

[2] 陆诗建, 张娟娟, 杨菲, 等. CO₂管道输送技术进展与未来发展浅析[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2022, 58(6): 944-952.

[3] PELETIRI S P, RAHMANIAN N, MUJTABA I M. CO₂ Pipeline design: a review[J]. *Energies*, 2018, 11(9): 2184.

[4] 舒华文. 胜利油田百万吨级CCUS输注采关键工程技术[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(1): 10-17.

[5] 黄维和, 李玉星, 陈朋超. 碳中和愿景下中国CO₂管道发展战略[J]. *天然气工业*, 2023, 43(07): 1-9.

[6] Det Norske Veritas. DNV-RP-J202: Design and Operation of CO₂ Pipelines[S]. Hovik, Norway: DNV, 2010.

[7] PARTRICIA S, KAMAL K B, BRIAN R, et al. 含杂质二氧化碳管道输送[M]. 赵帅, 张健, 李清方, 等. 北京: 中国石化出版社, 2014.

[8] 中华人民共和国工业和信息化部. CO₂输送管道工程设计标准: SH/T 3202-2018[S]. 北京: 中国石化出版社, 2018.

[9] 国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会. CO₂捕集、输送和地质封存·管道输送系统: GB/T 42797-2023[S].

[10] 李欣泽, 袁亮, 张超, 等. 超临界二氧化碳管道瞬态输送工艺研究进展及方向[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43(1): 22-32.

作者简介: 李欣泽, 男, 1987年生, 高级工程师, 2022年博士毕业于中国科学院西北生态环境资源研究院防灾减灾工程及防护工程专业, 现主要从事超临界二氧化碳长距离输送管道运行安全保障关键技术、多年冻土区油气管道冻融灾害防治关键技术等方面的研究工作。

基金项目: 中国石油大学(北京)克拉玛依校区教学改革项目, “双碳”目标下创新班课程《二氧化碳管道运行安全保障技术》建设; 中国石油大学(北京)克拉玛依校区科研启动基金项目, XQZX20230021; 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目“二氧化碳管道停输再启动温压协同变化机理与安全控制理论研究”, 2023D01A19; 新疆维吾尔自治区克拉玛依市创新环境建设计划(创新人才)项目“管输二氧化碳瞬变过程温压及相态协同变化机理和安全控制研究”, 20232023hjcxrc0001; 新疆维吾尔自治区“天池英才”引进计划项目; 新疆天山创新团队“油气高效管输技术研究与创新团队”项目, 2022TSYCTD0002。