

# 超临界二氧化碳管道输送安全技术研究

路兴才

(国家管网集团工程技术创新有限公司, 天津 300450)

**摘要:** 根据国际公认的风险评估机构——挪威船级社(DNV)的风险评估导则规定,在 10%的 CO<sub>2</sub> 浓度下,持续暴露时间在 15 min 有 50% 致伤致死风险。CO<sub>2</sub> 为“非易燃无毒气体”,属于 2.2 类危险品范围,为窒息性气体。从安全角度考虑,如输送 CO<sub>2</sub> 的泵和压缩机,需特别注意避免吸入段和压缩/泵送段之间成为两相流动区。基于 CO<sub>2</sub> 介质及其管道的独特性,研究国外超临界 CO<sub>2</sub> 管道安全技术体系及其相关工程的解决方案,从运营、保障两个方面分别总结国外 CO<sub>2</sub> 管道输送特点与技术现状,为国内超临界 CO<sub>2</sub> 管道安全运行提供指导。

**关键词:** 超临界 CO<sub>2</sub> 管道; 安全技术; 水击泄放; 保障技术

**中图分类号:** TE832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)05-0021-04

二氧化碳(CO<sub>2</sub>)管道输送过程中,由上游端的压缩机提供驱动力,部分还配置中途增压站。典型的做法是将 CO<sub>2</sub> 增压至 8~8.8 MPa 以上,以超临界态或密相运输提升 CO<sub>2</sub> 的密度进行安全输送,对于长距离大输量 CO<sub>2</sub> 输送,该方法为首选途径。

(1) 自然来源的 CO<sub>2</sub> 运输。在美国,自然来源的 CO<sub>2</sub> 的产地主要包括科罗拉多州 McElmo 和 Sheep Mountain Domes、新墨西哥州的 Bravo Dome 和密西西比州的 Jackson Dome。这些地方的 CO<sub>2</sub> 经管网运输到得克萨斯州和路易斯安那州的油田,用来提高原油采收率(表 1)。除美国以外,用管道输送自然来源 CO<sub>2</sub> 的还有土耳其的 Bati Raman 管道<sup>[1]</sup>。

(2) 人为来源的 CO<sub>2</sub> 运输。美国主要的 CO<sub>2</sub> 工业源是得克萨斯州、俄克拉荷马州、怀俄明州和北达科他州。美国的 CO<sub>2</sub> 管道路线,大部分经过沙漠地区或人口密度较低的地区(表 2)。然而,在致密相

状态下运输,监管是一个重要问题,当前管道法规没有考虑在这个状态下运输,是陆上部分的管道更需要特别关注的问题,因为靠近人口密集地区,从而会对公众造成更大的风险。对于较短距离的管道,可能在气相状态下输送 CO<sub>2</sub> 比较有利,因为在气相状态下的输送压力比致密相或超临界状态下输送 CO<sub>2</sub> 所需的压力要低。荷兰地区用于温室的 CO<sub>2</sub> 的输送就是这种类型的例子。

本文从运营、保障两个方面进行国外 CO<sub>2</sub> 管道工程技术体系研究。运营技术体系包括水击泄放、停输管理、泄放管理等;保障技术体系包括标准规范体系、建管法规体系、在役管道改输等。评估影响超临界 CO<sub>2</sub> 管道输送的因素,总结国外 CO<sub>2</sub> 管道输送特点与技术现状,以为国内超临界 CO<sub>2</sub> 管道安全运行提供指导。

表 2 现有长输管道输送人为来源 CO<sub>2</sub> 的实例

管道	位置	CO <sub>2</sub> 容量/ (Mt·a <sup>-1</sup> )	长度/ km	来源	年份
Canyon Reef Carriers	美国	5.2	225	气化厂	1972
Bairoil	美国	8.3	180	LaBarge 天然气厂	1986
Val Verde	美国	2.5	130	Val Verde 天然气厂	1998
Weyburn	美国/ 加拿大	5	328	天然气厂	2000
Snøhvit	挪威国家 石油公司	0.7	153	液化天然气厂	2008

表 1 现有长输管道输送自然来源 CO<sub>2</sub> 的实例

管道	位置	CO <sub>2</sub> 容量/ (Mt·a <sup>-1</sup> )	长度/ km	来源	年份
Cortez	美国	19.3	808	McElmo Dome	1984
Sheep Mountain	美国	9.5	660	Sheep Mountain	1983
Bravo	美国	7.3	350	Bravo Dome	1984
Central Basin Pipeline	美国	20	278	Denver City Hub	1985
North East Jackson Dome (NEJD)		—	295	Jackson Dome	1986
Bati Raman	土耳其	1.1	90	Dodan 油田	1983

收稿日期: 2024-09-20

基金项目: 国家石油天然气管网集团有限公司应用基础课题(AQWH202204)

作者简介: 路兴才(1985—),男,山东济阳人,工程师,研究方向为管道工程设计理论与方法、技术与装备研发。

## 1 运营技术体系

### 1.1 水击泄放

当 CO<sub>2</sub> 以流体的形式输送时,其密度与水大致相同。因此,与天然气运输相比,它在阀门突然关闭或打开时表现出更严重的动态响应。所谓的水锤可能发生在流体突然停止或被迫改变方向时。由此产生的压力波会引起管道局部超压,导致管道破裂。通过保持较低的流体速度和避免阀门突然关闭,可以缓解这种现象。

对于密度较高的 CO<sub>2</sub>,由于流体的可压缩性更高,这种水击影响预计比水的影响要小。如果阀门迅速打开,则可能会通过阀体产生等温压力降低。当压降足够高时,CO<sub>2</sub> 的温度会下降,有冻结阀门或产生干冰或水合物的风险(从液相到气相有很大的焓变化)。在阀门开启/关闭期间,在阀门上采用旁路将有助于阀门上游和下游之间的压力平衡,并避免由于 CO<sub>2</sub> 膨胀而破坏阀座。因此,正确的启动和停止程序对 CO<sub>2</sub> 管道非常重要。

在国外 CO<sub>2</sub> 管道设计阶段会进行流动保障分析,其中就包含水击分析,根据分析结果是否需要水击泄放。从调研结果来看,国外 CO<sub>2</sub> 管道无水击泄放系统<sup>[2]</sup>。

### 1.2 停输管理

由于 CO<sub>2</sub> 管道处于超临界状态运行,在停输期间,存在相变或超压的可能性,应根据项目的具体情况建立管道停输程序,以谨慎且可控的方式进行管道停输。停输程序可能在很大程度上取决于管道布置和辅助设施系统,因此应该为每个特定管道建立停输程序。

在计划内停输期间,应保持足够高管道压力,以防止密相管道蒸气形成,以及形成游离水相的风险。

如果停输期间存在温度降低风险,即由于环境温度较低(如在海上条件下),应避免可能出现的双相流现象相关降温,以便保护系统。如果停输期间存在升温风险,即由于环境温度较高,压力可能升高。应考虑超压保护系统,以及管道系统的设计参数。

### 1.3 泄放管理

为保证安全,根据 US DOT CFR(美国运输部联邦法规),要求管道沿线每隔至多 15 km(10 mile)就要安装切断阀。通过分隔各个部分来控制释放到大气中的 CO<sub>2</sub> 数量,可以防止压力损失波及整个管道泄漏。如果泄漏未被发现,那么 CO<sub>2</sub> 会在管道

附近的低洼处和其他地势低的地方聚集从而带来非常大的危害。

如前所述,放空系统可配备与温度表或压力表相连的流量控制阀。控制阀的设定值选择应为最低管道设计温度留有足够的裕度,以防止管道在放空过程中暴露于设计温度下。

国外 CO<sub>2</sub> 管道在放空操作时<sup>[3]</sup>,主要考虑以下因素。

(1)应缓慢开启放空阀,以免发生焦耳-汤姆逊冷却造成的不利影响,不允许管道金属温度降至材料标准建议的最低温度以下。

(2)应考虑放空作业期间产生 CO<sub>2</sub> 对附近人们影响的可能性。

(3)应考虑放空作业期间产生噪声影响生活在或工作在排气设施附近人们的可能性。

(4)应考虑噪声衰减设备对 CO<sub>2</sub> 放空速度和消散的潜在影响。

以 Quest 项目的放空要求为例,该项目要求在放空时,必须在壳牌人员的持续监督下进行,必须监测风向,以确保 CO<sub>2</sub> 羽流不会威胁到附近的居民或其牲畜,同时还建议在放空操作之前在居民的院子里安装便携式空气质量监测设备,CO<sub>2</sub> 扩散需要建模和验证。

## 2 保障技术体系

### 2.1 标准规范体系

全世界范围的管输 CO<sub>2</sub> 经验(尤其是美国、加拿大和澳大利亚)提供了设计、建设和运行 CO<sub>2</sub> 管道的标准和规范。设计、建设和运行管道的国际应用主要规范和法规见表 3。

上述规范均适用于输送 CO<sub>2</sub> 管道。有些将常温常压下 CO<sub>2</sub> 视为不可燃、无毒气体。IP6(英国石油学会管道规范)也把 CO<sub>2</sub> 看作气体。大多数的标准参照相关标准,这些相关标准中很少专门针对 CO<sub>2</sub> 输送管道<sup>[4]</sup>。

表 3 CO<sub>2</sub> 管道国际应用主要规范和法规

英文名称	中文名称
ISO 13623	石油和天然气工业:管道输送系统(此规范与 DINEN 14161 有关)
ASME B31.4	液化烃和其他液体用管道输送系统
ASME B31.8	输气和配气管道系统
CSA Z662	油气管道系统
DNVGL-RP-F104	CO <sub>2</sub> 管道的设计与操作
BS EN 14161	石油和天然气工业:管道输送系统
BS PD 8010	管道的实用规程:海底管道
DNV OS-F101	海底管道系统

## 2.2 建管法规体系

超临界输送 CO<sub>2</sub> 没有被美国运输部 (DOT) 认为是有毒材料,但 CO<sub>2</sub> 管道执行联邦法规第 49 号第 195 部分按有毒液体管道运输接受监管,执行美国 DOT 管道和危险物材料委员会 (PHMAS) 的安全标准,CO<sub>2</sub> 在高压液相或超临界状态下运输,这与其他有毒材料运输管道相似。从干线到单口井运输 CO<sub>2</sub> 的较小的配注管道一般不受制于 PHMAS 安全标准。

CO<sub>2</sub> 管道由联邦和州政府的共同监管<sup>[5]</sup>,管道监管权属于美国运输部地面运输委员会,受美国运输部管道和危险物品材料安全委员会 (PHMSA) 的联邦安全法规制约,PHMSA 直接负责监管所有洲际管道的安全,然而州内管道从属于州政府的监管(只要标准不低于联邦规则),州政府同时负责监管 CO<sub>2</sub> 输送管道的开发和运营。建设 CO<sub>2</sub> 管道许可证获得需要 1~2 年时间。国家 CO<sub>2</sub> 管网的发展需同时满足美国温室气体排放目标。

## 2.3 在役管道改输

国外 CO<sub>2</sub> 管道均为专用的管道,没有通过在役管道改输的案例,当现有管道重新评定,用于 CO<sub>2</sub> 运行时,管道项目重新投入运行,进入新的运行阶段,需要拥有新的设计和运行场所。在役管道改输 CO<sub>2</sub> 方面,DNVGL-PR-F104(挪威船级社程序及实践规范)提出了一套评定方案<sup>[6]</sup>。

根据重新评定流程(图 1)对给出的流程进行识别,并通过以下步骤进行描述。

(1)发起。决定对现有管道系统进行评估,以达到 CO<sub>2</sub> 输送的目的。需要对系统进行重新评定,以确保 CO<sub>2</sub> 运行安全可靠。

(2)完整性评估。首先须通过技术条件的评估来说明管道系统的完整性。应评估系统如何运行的历史信息与运行要求的比较。完整性管理过程/程序中的可用信息可能有助于提供支持,但这可能不必提供所有需要的信息。确定材料选择以及管道系统的压力等级是关键信息,应作为完整性评估的组成部分进行筛选。应确定并应用监控和数据采集系统 (SCADA),作为确定 CO<sub>2</sub> 管道要求差距的依据。

(3)水力分析。应进行流量评估,根据线路沿线的输送能力及相应的压力和温度分布来确定可行性。应确定和评估对管道系统的修改要求。

(4)安全评估。该系统的安全性评估应解决产品变更的影响。所设计的系统应根据 CO<sub>2</sub> 管道的具体安全要求进行评估。应确定和评估对管道系统

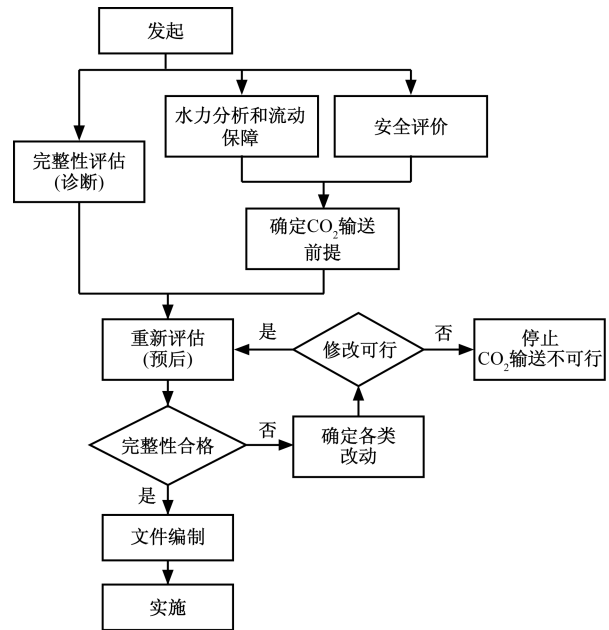


图 1 管道系统转变为 CO<sub>2</sub> 输送管道的重新评定流程

的修改要求,如额外的截断阀、泄漏检测升级<sup>[7]</sup>。须重点关注由于产品特性变化导致的意外泄放后果分析。CO<sub>2</sub> 的危险距离可能比烃类产品的危险距离大得多,特别是在山谷或低洼地区,这是因为泄放的库存质量较高且密度大于空气密度。

(5)前提。应结合水力分析和安全评估的结果来确定 CO<sub>2</sub> 输送的前提。这些都将定义可能偏离原有设计条件的功能和系统要求。应确定系统要求,并将其作为整套前提的组成部分来重新评定。

(6)重新评估。根据完整性评估和 CO<sub>2</sub> 运输前提的输入,可以对系统进行完整性评价。系统中确定不符合完整性要求的部分将需要进行设计修改和重复进行重新评价。在某些情况下,所要求的修改是不可行的,如从成本效益的角度来看,会导致重新评定过程的终止。

(7)修改备选方案。应根据可行性评估修改备选方案。将通过记录完整性状态对修改备选方案进行重新评价。

(8)文件编制。进行系统的文件编制,确定 CO<sub>2</sub> 管道的要求以及系统状态和系统变更要求,以符合这些要求。

(9)实施。实施系统的变更应在系统过渡到新的 CO<sub>2</sub> 输运运行模式之前进行。

## 3 结论

结合国外超临界 CO<sub>2</sub> 管道安全技术研究,对比国内 CO<sub>2</sub> 管输技术的研究进展,得到如下结论。

(1)结合国内碳源、汇的分布区域,输送管道跨

距大,需穿越人口聚集地域,考虑 CO<sub>2</sub>管道泄漏积聚后对周边人员的危害性,采用安全定量风险的分析方法,对人口密集区管道的设计及运行管理给出解决建议。

(2)科学经济的监测和预警措施可有效降低管道安全事故的发生频率,结合国内外油气输送管道安全事故类型,识别 CO<sub>2</sub>管输中的主要安全风险种类,研究管道安全监测、预警技术及工程措施。

(3)针对 CO<sub>2</sub>不同相态的输送工艺,尤其是超临界输送和液相输送,对管输系统的阀门、计量、增压、监测、防腐等设备设施的选型编写选型指南,并对设备的关键技术条件进行研究确定。

### 参考文献

- [1] CHOI Y S, NEŠIĆ S. Effect of water content on the corrosion behavior of carbon steel in supercritical CO<sub>2</sub> phase with impurities[J]. *Corrosion*, 2011, 2011: 11377.
- [2] VITALI M, CORVARO F, MARCHETTI B, et al. Thermodynamic challenges for CO<sub>2</sub> pipelines design: a critical review on the effects of impurities, water content, and low temperature[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, 114: 103605.
- [3] BONHAM S, CHRYSOSTOMIDIS I, CROMBIE M, et al. Local community benefit sharing mechanisms for CCS projects [J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 8177-8184.
- [4] 李玉星, 刘兴豪, 王财林, 等. 含杂质气态 CO<sub>2</sub>输送管道腐蚀研究进展[J]. *金属学报*, 2021, 57(3): 283-294.
- [5] WANG Z M, SONG G L, ZHANG J. Corrosion control in CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery from a perspective of multiphase fluids[J]. *Frontiers in Materials*, 2019, 6: 00272.
- [6] 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.
- [7] XIANG Y, WANG Z, XU M H, et al. A mechanistic model for pipeline steel corrosion in supercritical CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O environments[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2013, 82: 1-12.

## Study on Safety Technology of Supercritical Carbon Dioxide Pipeline Transportation

LU Xingcai

(Pipe China Engineering Technology Innovation Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

**Abstract:** According to the risk assessment guidelines of DNV, an internationally recognized risk assessment agency, there is a 50% risk of injury and death from sustained exposure within 15 minutes at a CO<sub>2</sub> concentration of 10%. Carbon dioxide is a “non-flammable and non-toxic gas”, which belongs to Class 2.2 dangerous goods and is an asphyxiating gas. For safety reasons, such as CO<sub>2</sub> pumps and compressors, special care should be taken to avoid a two-phase flow zone between the suction section and the compression/pumping section. Based on the uniqueness of CO<sub>2</sub> medium and its pipeline, the safety technology system of supercritical CO<sub>2</sub> pipeline and its related engineering solutions in foreign countries were studied, the characteristics and technical status of CO<sub>2</sub> pipeline transportation in foreign countries from two aspects of operation and guarantee were summarized, in order to provide guidance for the safe operation of domestic supercritical CO<sub>2</sub> pipeline.

**Keywords:** supercritical CO<sub>2</sub> pipeline; safety technology; water hammer discharge; support technology