

# 超临界CO<sub>2</sub>管道不同泄放策略下低温演化特性的数值模拟研究

郭富江<sup>1</sup>, 王凯<sup>1</sup>, 苑世宁<sup>2</sup>, 毛港涛<sup>1</sup>, 丁焱<sup>3</sup>

(1. 北京石油化工学院 深水油气管线关键技术与装备北京市重点实验室, 北京 102617; 2. 中海油(天津)管道工程技术有限公司, 天津 300450; 3. 中石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

**摘要:**超临界CO<sub>2</sub>管道在泄放过程中受节流效应影响易出现显著温降,可能诱发材料冷脆和冻堵等安全风险。因此,在工程实践中亟需在保障管道完整性前提下提升泄放效率和可控性。基于OLGA软件构建了超临界CO<sub>2</sub>管道模型,分别在单端泄放和两端同时泄放工况下,分析了泄放口径对温压演化特征和泄放时间的影响。在此基础上,提出了一种融合分级降压与分区协同思想的“两端交替泄放”策略,并评估了不同泄放口径组合下,该策略在抑制极端温降和提升泄放效率方面的综合调控效果。结果表明,在单端泄放和两端同时泄放工况下,增大泄放口径虽可显著提升泄放速率,但最低温度显著降低,部分工况降至-70℃,冷脆失效风险较大,因此难以兼顾安全性与泄放效率。相比之下,两端交替泄放策略通过阶梯式释放压力和非泄放侧换热回温,有效削弱了单次节流强度,抑制了极端温降,使最低温度高于-30℃,总泄放时间控制在8.0h以内。其中,“75 mm + 25 mm”口径组合在保证结构安全的同时,在设定工况下将总泄放时间缩短至约5.0h,较好平衡了泄放过程的安全性及效率。本文提出的交替泄放思路可为超临界CO<sub>2</sub>管道泄放过程的低温风险防控和放空工艺优化提供参考。

**关键词:**超临界CO<sub>2</sub>; 放空模拟; 交替泄放; 泄放口径; 泄放效率

中图分类号: X937; TE832

文献标志码: A

文章编号: 2097-2547(XXXX)XX-001-11

## Numerical simulation study of low-temperature evolution characteristics of supercritical CO<sub>2</sub> pipelines under different blowdown strategies

GUO Fujiang<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, YUAN Shining<sup>2</sup>, MAO Gangtao<sup>1</sup>, DING Yao<sup>3</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Pipeline Critical Technology and Equipment for Deepwater Oil & Gas Development, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. CNOOC (Tianjin) Pipeline Engineering Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China; 3. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China)

**Abstract:** During the blowdown of supercritical CO<sub>2</sub> pipelines, significant temperature drops are likely to occur due to the throttling effect, which may induce safety risks such as material cold brittleness and blockage. Therefore, in engineering practice, it is necessary to improve the blowdown efficiency and controllability under the premise of ensuring pipeline integrity. A supercritical CO<sub>2</sub> pipeline model was established based on OLGA, and the effects of vent diameter on temperature and pressure evolution characteristics as well as blowdown time were analyzed under single-end venting and simultaneous dual-end venting conditions. On this basis, an “alternating dual-end venting” strategy integrating staged depressurization and zonal coordination was proposed, and its combined regulation performance in suppressing extreme temperature drops and improving blowdown efficiency was evaluated under different vent diameter combinations. The results show that, under single-end venting and simultaneous dual-end venting conditions, increasing the vent diameter can significantly enhance the blowdown rate, but the minimum temperature decreases markedly, reaching -70℃ under some conditions, resulting in a high risk of cold brittle failure. Therefore, it is difficult to balance safety and blowdown efficiency. In contrast, the alternating dual-end venting strategy effectively weakens the throttling intensity of each release and suppresses extreme temperature drops through stepwise pressure release and heat recovery on the non-venting side, maintaining the minimum temperature above -30℃ and controlling the total blowdown time within 8.0 h. Among them, the “75 mm + 25 mm” diameter combination shortens the total blowdown time to about 5.0 h under the specified conditions while ensuring structural safety, achieving a better balance between safety and efficiency of the blowdown process. The alternating venting concept proposed in this study can provide a reference for low-temperature risk prevention and venting process optimization in supercritical CO<sub>2</sub> pipeline blowdown.

**Keywords:** supercritical CO<sub>2</sub>; blowdown simulation; alternating blowdown; vent diameter; blowdown efficiency

收稿日期: 2026-01-03; 修回日期: 2026-02-04。

基金项目: 北京石油化工学院致远基金(2025205)。

第一作者: 郭富江(2000—), 硕士研究生, 研究方向为超临界CO<sub>2</sub>管道输送及流动保障, E-mail: 2023520119@bipt.edu.cn。

通信作者: 毛港涛(1997—), 博士, 讲师, 研究方向为油气管道输送及流动保障和新能源油气融合, E-mail: maogangtao@bipt.edu.cn。

实施“双碳”战略是我国构建新型能源体系、推动经济转型升级和实现高质量发展的重要举措。碳捕集、利用与封存(CCUS)技术是实现“碳中和”的关键技术路径<sup>[1-2]</sup>。但是,捕集源与封存/利用场址往往相距较远。超临界CO<sub>2</sub>管道凭借大输量、能耗低、占地少的优势,成为CO<sub>2</sub>规模化、长距离输送的主要方式<sup>[3-5]</sup>。近期,我国在南海东方1-1气田建成了首条超临界CO<sub>2</sub>海底输送管道,标志着我国离岸CCUS技术取得了重要突破。然而,在管道实际运行维护中,以及在系统失电、停输检修或设备隔离情形下,常需实施计划性放空。同时,突发事件亦可能导致非计划性泄漏。随着管道工程应用迈向深水化和长距离化,管内充装量和压力等级持续提高,导致泄放引发的安全风险增大<sup>[6]</sup>。受焦耳-汤姆逊效应和复杂相态演化的共同影响,CO<sub>2</sub>在泄放过程中易出现显著温降,并可能伴随干冰析出等现象;在此条件下,管材可能发生低温脆化甚至脆断,进而威胁管道结构完整性与运行可靠性。同时,可能出现高浓度CO<sub>2</sub>局部富集导致窒息和冻伤等严重安全事故<sup>[7]</sup>。因此,系统研究超临界CO<sub>2</sub>管道瞬态泄放工况下的温压演化规律,对于保障CCUS工程安全具有重要意义。

目前,关于超临界CO<sub>2</sub>管道输送的研究主要以陆地输送管道为对象,并已形成较为系统的研究体系<sup>[8]</sup>。针对瞬态泄放工况,现有研究主要依托室内环道实验和数值模拟方法,重点分析初始条件、阀门口径与开度、管径以及杂质等因素对节流温降特性的影响<sup>[9-10]</sup>。研究表明,放空过程的最低温度受初始温度、CO<sub>2</sub>充装量和湍流强度等因素影响,并可能出现显著的径向温度梯度以及局部极低温风险<sup>[11-12]</sup>。此外,杂质(如N<sub>2</sub>、He)的存在也会显著改变压力和温度演化路径,进而影响相态变化和风险边界<sup>[13-14]</sup>。受装置尺度限制,室内实验难以再现长距离、小时级放空过程的真实温压演化特征,因此研究者普遍采用瞬态数值模拟方法开展CO<sub>2</sub>放空研究<sup>[6]</sup>。已有研究表明,OLGA在CO<sub>2</sub>管道泄放模拟中兼具较高模拟精度与工程适应性<sup>[15-18]</sup>。进一步模拟研究发现,极性和非极性杂质均会拓宽气液两相区,加剧温压波动并使相态演化更为复杂;同时,通过提高初始温度、优化阀门开度与口径、调节背压等方式,可在一定程度上抑制瞬态温降,降低低温冷脆风险<sup>[19-20]</sup>。然而,现有研究仍以单一放空模式下的参数敏感性分析为主,调控手段局限于对阀门开度、放空口径和初始工况等参数的优化,对系统

性泄放策略的研究相对不足。现行CO<sub>2</sub>放空方案主要参考天然气管道放空系统,从控制方式上可概括为三类:(1)强度控制策略,如受控放空和背压放空,通过调节阀门开度或维持背压来限制放空强度<sup>[21]</sup>;(2)时序控制策略,如分级泄放、阶梯式降压和顺序降压,通过分阶段或按阈值切换降低单次节流效应<sup>[22-23]</sup>;(3)空间分区控制策略,针对多点泄放系统,可通过不同泄放点(端部/分区)的启停顺序实现风险与效率的综合协调<sup>[24-25]</sup>。然而,CO<sub>2</sub>与天然气在临界参数、焦耳-汤姆逊效应及相变路径等方面存在显著差异。若直接沿用天然气放空策略,可能导致对泄放时间、极端低温、固相析出和人员暴露风险的评估偏差,难以满足超临界CO<sub>2</sub>管道的安全放空需求。因此,有必要围绕超临界CO<sub>2</sub>管道瞬态泄放过程,对不同泄放策略开展定量评估,以明确其中低温控制与泄放效率之间的权衡关系。

综上所述,现有研究对超临界CO<sub>2</sub>管道放空过程的演化规律和关键影响因素已形成了较为系统的认识,但面向泄放全过程调控的策略研究仍相对不足,相关定量评估也较为缺乏。与此同时,现有CO<sub>2</sub>放空多借鉴天然气管道放空策略,鉴于CO<sub>2</sub>与天然气在热物性和相态演化特征方面存在显著差异,相关策略在超临界CO<sub>2</sub>管道场景下的适用边界和控制效果尚不清晰,难以据此实现对低温风险的控制和泄放效率的优化。基于此,本文提出一种融合分级降压与分区协同思想的“两端交替泄放”策略,利用OLGA软件模拟分析交替泄放场景下温压演化规律,并与单阀泄放和两端同时泄放策略进行对比,量化不同策略在温降控制和泄放效率方面的差异,以期为超临界CO<sub>2</sub>管道泄放工艺优化和低温风险控制提供参考。

## 1 数值模拟

### 1.1 物理模型

本文以南部某气田陆地超临界CO<sub>2</sub>输送管道为例建立模型。设计输量为 $175 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,长度为15 km,管道内径为190.5 mm,内壁粗糙度为0.05 mm,模型中忽略沿线高程变化对流动过程的影响。管道与外界换热采用等效总传热系数 $U$ 进行表征,并在计算中假定其为常数( $0.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ )。土壤的热容效应及其随时间变化的温度响应未单独建模,而是通过该等效总传热系数综合体现。环境温度为13 °C。根据《压力管道规范工业管道》(GB/T 20801—2020),管线钢材的低温冲击性能试验温度为-30 °C,该结

果可为后续冷脆风险评估提供设计依据和安全边界。

在管道进、出站端分别设置了截止阀1和截止阀2,中间的主管线为本文研究对象。为便于泄放操作,紧邻两侧截止阀设置放空管线,考虑到放空管道长度对整体流动影响较小,建模时以泄放孔的大小代替放空管线的口径。管道进站口采用流量控制方式,出站口及放空端采用压力控制,具体物理模型见图1。



图1 管道物理模型

Fig. 1 Physical model of pipeline

在数值模型中,管内介质为超临界CO<sub>2</sub>,其兼具类液体高密度和类气体低黏度特征,热力学行为显著偏离理想气体假设<sup>[26]</sup>。研究表明,Peng-Robinson (PR)状态方程能够较准确地描述CO<sub>2</sub>及其含杂质体系的热力学特性,已广泛用于CO<sub>2</sub>输送管道的设计与分析<sup>[27-29]</sup>。因此,本文选用PR方程进行CO<sub>2</sub>物性计算,并将获得的热物性参数作为OLGA多相流

模型的输入,以考察泄放过程中管内温度和压力的瞬态演化。具体实施路径为:基于PR状态方程在PVTsim中计算CO<sub>2</sub>物性参数,将计算结果导出为tab格式文件;随后将其导入OLGA计算,保证瞬态计算中的相态识别和两相区物性计算均采用一致的物性参数集。该处理方式可确保跨临界区域及两相区内物性描述与数值求解的一致性,从而提高瞬态泄放模拟结果的可靠性。另外,本文将PR方程的应用范围和软件求解边界限定在气-液两相,固相不在本模型直接求解的范围内。

## 1.2 模型验证

基于德国劳氏石油天然气公司(GLND)CO<sub>2</sub>泄放实验的描述<sup>[30]</sup>,构建了相应的OLGA模型,关键参数包括:管长为200 m,公称直径为50 mm,外径为60.3 mm,壁厚为4 mm,保温层厚度为19 mm,泄放孔径为35 mm,内壁粗糙度为0.05 mm。边界条件设置:外输压力为10.04 MPa,外输温度为2.9 °C,平均环境温度为5 °C。通过对比模拟数据与GLND泄放实验数据<sup>[30]</sup>,验证了模型在泄放过程模拟中的准确性和适用性(图2)。

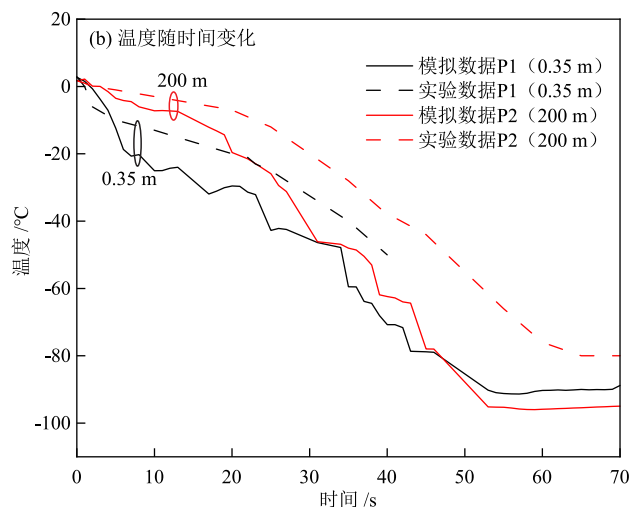
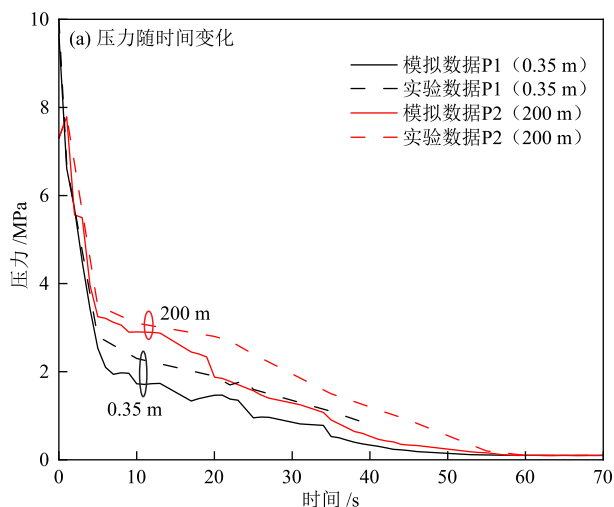


图2 模拟结果与实验结果对比

Fig. 2 Comparison between simulation results and experimental results

结果表明,OLGA模拟结果与GLND实验结果在整体趋势上基本一致。在泄放时间方面,GLND实验记录值为57 s,模拟预测值为60 s,相对偏差在6%以内,表明模型对泄放动力学过程具有较高预测精度。在最低泄放温度方面,实验记录值为-80 °C,模拟预测值为-93 °C,相对偏差为16.3%。最低泄放温度属于泄放过程中对边界条件最为敏感的“极值指标”,其预测误差通常高于泄放时间和压

力变化等整体量。造成最低温度偏差的原因主要包括以下几个方面:(1)最低温度通常出现在阀口/节流点附近的局部小尺度区域,且持续时间极短;受到测点布置、传感器响应和采样频率限制,极端瞬时低温存在被低估的可能。(2)数值模型采用平衡相态假设以及简化的相变与传热传质描述,对节流区内的射流膨胀、局部湍流混合和两相滑移等非平衡效应刻画有限。(3)阀门等效边界条件、管壁换

热系数取值,以及状态方程(EOS)在临界区附近对热物性参数的表征精度,均可能对最低温度预测产生影响。

在CO<sub>2</sub>节流和泄放过程的数值标定研究中,类似的最低温度预测偏差具有一定普遍性。研究表明,OLGA等模拟软件在最低泄放温度预测方面通常呈现偏保守特征<sup>[31-34]</sup>。本文验证结果与上述研究规律一致,偏保守性有助于在工程安全校核中为低温风险预留合理的安全裕度。同时,在实际工程中,不同工况下参数组合对应的CO<sub>2</sub>泄放时间和温压响应难以通过实验手段系统获取,研究可行性受制于实验成本高昂、装置尺度限制以及参数覆盖范围不足等因素。因此,数值模拟已成为当前CO<sub>2</sub>管道泄放研究中最常用的研究手段之一,OLGA等多相流仿真软件也被广泛用于分析泄放过程中的温压演化规律及工程响应特征。综上,OLGA对泄放过程温压演化趋势和泄放时间的预测在工程分析层面具有较好的适用性。同时,其对最低温度的偏保守预测为低温风险评估提供了一定安全裕度,但在接近相态边界或极端节流条件下,仍需结合更精细的模型或实验数据进行进一步校核。

## 2 泄放过程管内参数变化规律分析

### 2.1 输送工况的稳态模拟分析

本文基于PVTsim软件,采用PR状态方程,对输送介质的相态特征及临界参数进行了分析。输送介质中CO<sub>2</sub>物质的量分数为99.5%,其余0.5%为微量杂质(主要包括甲烷、乙烷和丙烷),导致临界压力(7.39 MPa)和临界温度(30.7 °C)较纯CO<sub>2</sub>略有偏移。杂质的存在使放空过程温压变化与相态转变更加复杂,增加了系统的不稳定风险。为确保介质始终处于超临界状态,出站背压设定为9 MPa,进站温度维持在45 °C,保证压力与温度均高于临界点,以避免输送过程中出现气液分离等不利情况。

稳态输送模拟时,首先关闭放空阀,打开两端截止阀,并设置最小步长为0.01 s,模拟时长为10.0 h,管道沿程温压分布曲线见图3。结果表明,管道沿程温压均呈平稳线性下降,变化连续无突变,说明管内未出现剧烈传热或压力波动,介质保持单相流动,未发生相变。整体输送过程流体性质稳定,为后续的泄放工况模拟提供了良好的初始条件,有助于准确预测温压演化和冷脆风险,为制定合理的安全泄放策略奠定了基础。

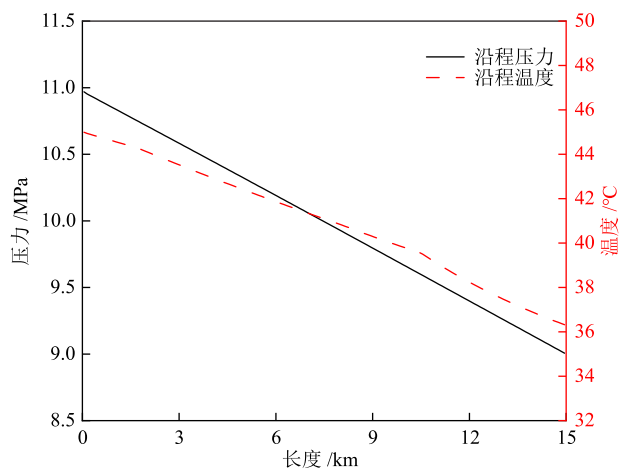


图3 稳态输送中管线沿程温压分布

Fig. 3 Temperature and pressure distribution along pipeline under steady-state transport

### 2.2 超临界CO<sub>2</sub>管道放空瞬态模拟分析

#### 2.2.1 单一放空阀泄放

基于稳态输送工况,关闭管线两端截止阀并开启放空阀1,开展单端放空模拟。选取25 mm、50 mm和75 mm 3种放空口径,系统分析放空口径变化对泄放过程的影响,结果见图4。结果表明,泄放口径通过调控管内流体的质量流率和节流强度,可显著影响压力衰减速率、最低泄放温度和整体泄放时间。3种口径工况在演化趋势上具有一致性,泄放初期以节流效应主导,温度快速下降;随着压力逐步释放并接近常压,管内外换热增强,温度在达到最低值后缓慢回升。然而,不同口径条件下最低温度和泄放时间差异显著(表1),这源于节流冷却强度、相态演化路径和换热能力的综合作用<sup>[35]</sup>。

具体而言,小口径(25 mm)下受限于泄放能力,管内压力释放过程被显著延长,总泄放时间约为14.0 h。较缓慢的降压削弱了单位时间内的节流强度,同时增强了管道与环境之间的有效换热作用,使节流冷却效应得以部分抵消,最低温度降至-31 °C,低温风险相对较低。然而,泄放时间过长将显著延长停输和处置周期,工程运行效率较低。当泄放口径为50 mm时,泄放质量流率明显提高,压力在更短时间内被释放。泄放初期温度下降速率较大,在较短时间内可达到更低温度,反映放空阀附近节流和闪蒸过程增强,最低温度明显低于泄放口径为25 mm时,总泄放时间显著缩短。当泄放口径为75 mm时,上述机制被进一步强化。较大的流通面积使高压阶段的泄放质量流率大幅提

高,管内压力约4.0 h内即可接近常压。该泄放过程更接近准绝热快速泄放状态,外界换热难以及时补偿节流冷却和相变潜热消耗的影响,导致最低温度迅速降至-75 °C。该极端低温工况显著增加了材料冷脆风险,对管道完整性和运行安全性造成不利影响<sup>[36-37]</sup>。

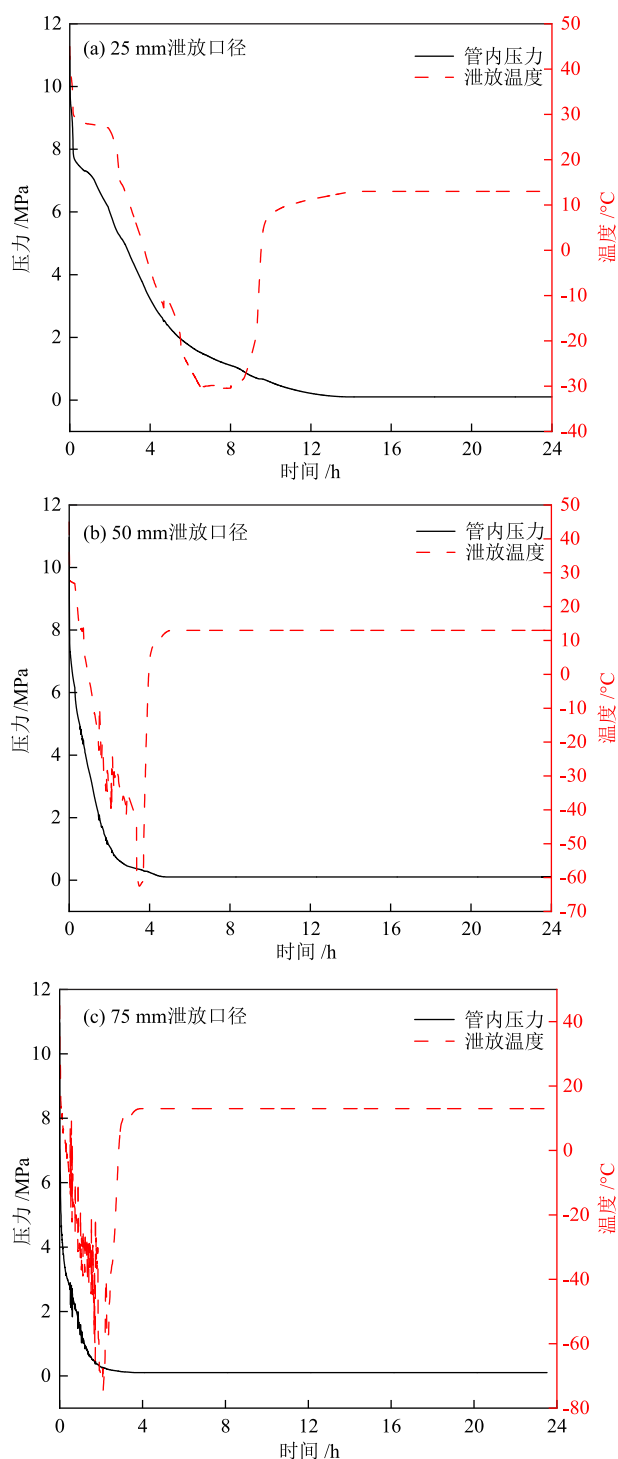


图4 单一放空阀泄放过程中温度和压力随时间的变化

Fig. 4 Variation of temperature and pressure with time during blowdown through single vent valve

表1 单一放空阀泄放过程中的最低温度和泄放时间

Table 1 Minimum temperature and blowdown time during blowdown through single vent valve

泄放口径 /mm	最低温度 /°C	泄放时间 /h
25	-31	14.0
50	-63	5.5
75	-75	4.0

为揭示超临界CO<sub>2</sub>泄放过程中的温压演化和相变特性,在温压相图上绘制不同泄放口径(25 mm、50 mm和75 mm)下温压轨迹,结果见图5。由于体系中引入了微量杂质,CO<sub>2</sub>-杂质混合体系的相边界在低温低压区域未表现为理想纯组分条件下的单一曲线,而是由露点线与泡点线共同构成,二者并不完全重合。随着泄放开始,管内压力迅速降低至临界压力以下,温压轨迹由超临界区向低温低压区迁移,体系由稳定单相状态向更复杂的相态转化区间演化。在泄放初期,节流效应占主导,过程可近似视为等焓降压,温度持续下降。随着泄放进行,环境换热和流动扰动增强,温度曲线出现波动。当温度降至三相点(-56.6 °C)附近时,存在固相(干冰)析出风险,体系呈现典型的复杂相态转化特征<sup>[38-39]</sup>。此后,随着压力继续下降,温度逐步回升并趋近环境温度。

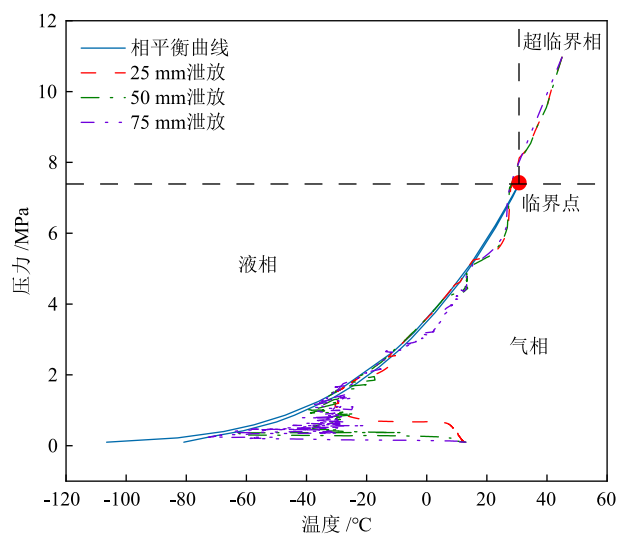


图5 泄放过程中管内的相变过程

Fig. 5 Phase transition process inside pipeline during blowdown

### 2.2.2 进出站两端放空阀同时泄放

为进一步缩短泄放时间,本节对两端放空阀同时开启条件下的泄放特性进行研究。具体方法为,在管道稳态输送后,同时关闭进出口截止阀并开启两端放空阀,以开展瞬态泄放模拟。共设计6组不同口径组合,重点分析对应的温度演化特征和泄放时间,结果见图6。

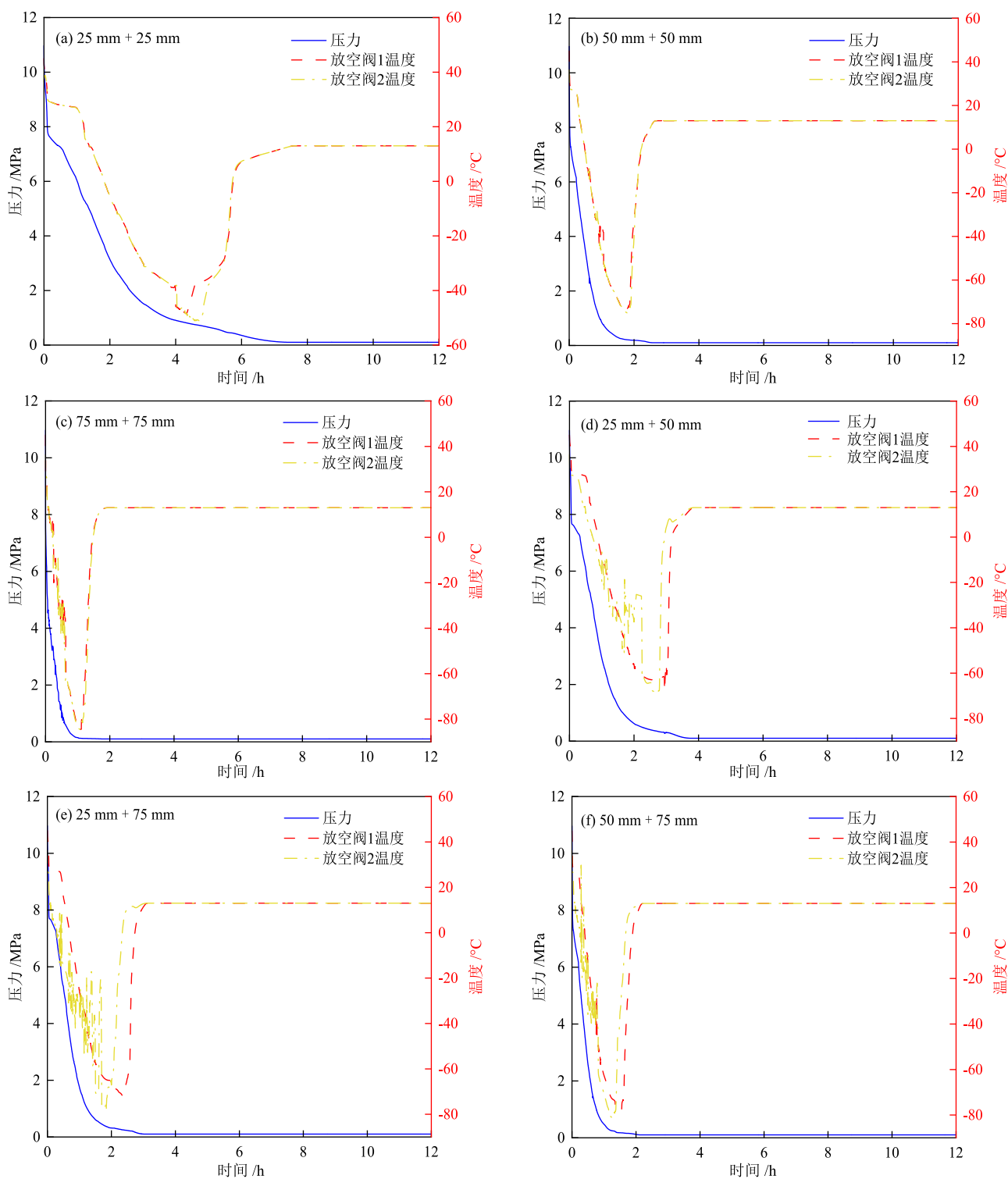


图6 进出站两端同时泄放过程中温度和压力随时间的变化

Fig. 6 Variations of temperatures and pressures with time during simultaneous blowdown at inlet and outlet stations

文中两端泄放工况下的各口径组合均按照“进站侧放空阀1口径+出站侧放空阀2口径”的顺序进行标注。以25 mm + 75 mm工况为例,表示进站侧放空阀1口径为25 mm,出站侧放空阀2口径为75 mm。结果表明,当进/出口放空阀口径相同时,两端等效流通能力相近,压力泄放速率基本一致,

因此管内温压响应呈现出较高的空间对称性和时间同步性。然而,在小口径泄放条件下,泄放质量流量受限,管内压力下降相对缓慢。在分钟级瞬态过程中,管壁-环境向流体换热的过程逐渐与节流冷却过程竞争,更易出现局部回温现象。该过程对瞬态压力波传播、阀口附近两相分布以及微小流量差

异更为敏感,从而导致两端温降轨迹在细节上不再严格重合。相比之下,在较大口径条件下,泄放过程更短、节流冷却效应更强,换热回温影响相对较弱,两端温度曲线表现为更加接近同步。以75 mm + 75 mm组合(图6(c))为例,泄放时间为2.0 h,但最低泄放温度同步降至-85 °C。其物理机理在于双端同时泄放条件下,等效节流能力对称叠加,管内压力在更短时间内快速释放,节流冷却效应在泄放初期占据主导。而管壁-环境换热难以及时补偿由节流和相变引起的能量损失,导致温度迅速降至极低水平,从而显著增加了CO<sub>2</sub>固相析出、局部堵塞和材料低温脆化失效的风险,对管道结构完整性和运行安全造成不利影响。

当两端放空阀口径不一致时,温压响应呈现出明显的非对称性(图6(d)~图6(f)),其原因为两端边界泄放能力不匹配所引起的质量流率分配差异。在泄放初期,大口径端因等效流通能力较高而成为主要放空通道,局部压降速率更高、节流效应更为显著,温度在该端更早且更大幅度下降。相比之下,小口径端受限于较低的流通能力,质量流率较低,其压降和温降均表现出明显滞后,并在一定时间范围内维持在较高压力水平,使壁面-环境换热和管壁热容释放能够更充分地参与能量平衡,从而在一定程度上缓解节流冷却引起的温度骤降。综上,可以通过引入基于泄放能力差异的分级配置策略对泄放过程进行调控。在“大口径+小口径”的组合泄放模式下,大口径端用于实现快速减压,小口径端则发挥缓冲调节作用,有助于延缓极端低温的出现,从而降低管道低温脆化等相关安全风险。

表2 进出站两端同时泄放过程中的最低温度和泄放时间  
Table 2 Minimum temperature and blowdown time during simultaneous blowdown at inlet and outlet stations

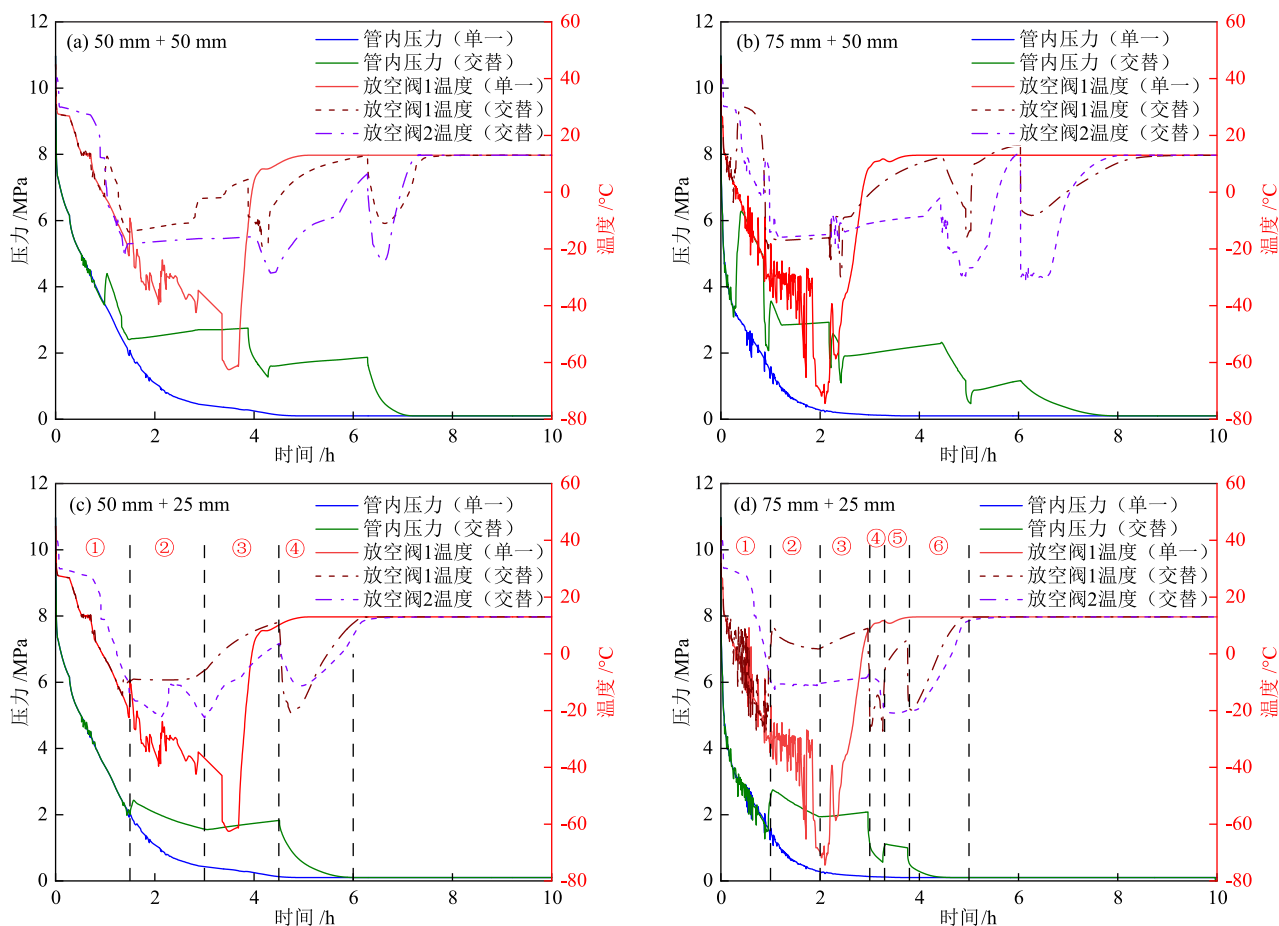
放空口径/mm	最低温度/°C	泄放时间/h
25 + 25	-52	8.0
50 + 50	-75	3.0
75 + 75	-85	2.0
25 + 50	-69	4.0
25 + 75	-78	3.0
50 + 75	-81	2.5

### 2.2.3 进出站两端放空阀交替泄放

单一放空阀泄放与两端同时泄放均呈现出相

似特征。随着泄放口径增大,泄放效率显著提高,但节流冷却效应同步增强,管内温度快速下降,热应力增大、低温冲击加剧,冷脆风险随之上升。针对上述特征,本文提出一种融合分级降压与分区协同思想的“两端交替泄放”策略。该策略通过控制进、出口阀门的启闭顺序,交替释放管内压力,并利用非泄放侧与环境之间的换热过程实现阶段性回温,旨在控制低温风险的前提下,实现泄放效率与运行安全之间的平衡。交替泄放策略的具体模拟流程为,首先开启入口端放空阀进行泄放,当阀口温度降至-20 °C左右,关闭放空阀;随后开启出口端放空阀继续泄放,当出口端阀口温度降至-20 °C左右关闭该阀,此时两端放空阀均关闭;待系统与环环境换热实现回温,再重复上述“泄放-回温”循环直至管内压力接近常压。在低温风险显著降低的阶段后期,可在保证安全的前提下同时开启进、出口阀门以加快泄放过程,直至管内压力稳定在常压水平且阀口温度逐渐回升并接近环境温度,此时视为泄放过程结束。

基于两端同时泄放的模拟结果,选取不同泄放口径组合开展两端交替泄放模拟,结果见图7。从压力变化趋势看,在单一放空阀泄放模式下,管内压力呈快速近线性下降趋势,初期压降速率较高,50 mm与75 mm口径条件下系统分别在5.5 h和4.0 h内降至常压。相比之下,交替泄放模式下压力呈阶梯式下降趋势,降压过程更为平缓。四种组合下的泄放时间依次为7.0 h、8.0 h、6.0 h和5.0 h,较单一放空阀泄放略有延长,但有效削弱了瞬态压降强度,有助于提升操作过程的安全性和可控性。不同泄放条件下的温度演化差异更为显著。单一放空阀泄放因节流效应强,温度最低可降至-70 °C以下,明显低于钢材脆化温度,存在较大冷脆风险。相比之下,在交替泄放过程中,单侧放空时另一侧处于回温状态,轴向导热和热量再分布使管内温度呈现阶段性回升。“回温-再泄放”的节奏性操作不仅显著抑制了温度的骤降(整体控制在-30 °C以上),而且有助于减缓相变敏感区间内温压响应的剧烈波动。温度曲线的“回升-再下降”特征以及压力平台期对应的温度爬升段,均与交替操作中的泄放阶段和非泄放侧回温阶段相对应。这进一步验证了交替泄放在减缓低温冲击、维持系统热稳定性方面的优势。模拟结果中,末段温度回升趋势基本一致,主要因为末段在保证安全的前提下,同时开启了进、出口阀门泄压以缩短整体泄放周期。



分图(c)中①~④、分图(d)中①~⑥代表交替泄放过程中的不同操作阶段:①、②代表两侧放空阀分别开启的初始泄放阶段;③代表回温阶段;④在分图(c)中代表进、出口放空阀同时开启的末端泄放阶段;④、⑤代表交替泄放阶段;⑥代表进、出口放空阀同时开启的末端泄放阶段。

图7 进出站两端交替泄放过程中温度和压力随时间的变化

Fig. 7 Variation of temperature and pressure with time during alternating blowdown at inlet and outlet stations

综合四种交替泄放组合的模拟结果可见,大口径与小口径阀门交替配合表现出较好的温压调控能力。相较于对称口径组合(如 50 mm + 50 mm),非对称口径组合中,大口径阀门承担快速降压作用,而小口径阀门在泄放阶段有利于降低节流强度并促进系统回温,从而有效缓解温度骤降和相变引发的冷脆和潜在冻堵风险。在所研究的组合中,50 mm + 25 mm 和 75 mm + 25 mm 组合表现最佳,最低温度均高于韧脆转变临界温度(-30 °C)。其中,75 mm + 25 mm 组合泄放时间更短(5.0 h),综合性能最优。因此,“大口径+小口径”交替泄放使管内压力呈阶梯式平稳下降,同时温度回升特征清晰,表现出良好的过程可控性。后续研究可在更广泛的工况和边界条件下开展敏感性分析和参数优化,并结合实验或实际运行数据对策略的有效性和适用边界进行验证。

### 2.3 局限性与展望

本研究基于数值模拟方法,对超临界 CO<sub>2</sub> 管道

泄放过程的温压演化规律开展分析,并在此基础上对交替泄放策略的调控效果进行了评估,相关结论建立在若干模型简化条件之上。首先,本文数值模型仅考虑气液两相流动过程,未将固相行为纳入求解框架。当泄放过程中预测最低温度接近 CO<sub>2</sub> 三相点(-56.6 °C)时,模型难以表征固相析出与聚集行为及其对流动与传热的耦合反馈,因此无法对干冰生成及潜在冻堵风险开展定量评估。其次,本文采用等效热边界条件描述管道与环境之间的换热,未显式引入外界介质(如土壤、海床)的热容效应及其瞬态温度响应,从而在一定程度上限制了对回温过程与温度极值的精确刻画。此外,本文研究对象主要面向陆地条件下的超临界 CO<sub>2</sub> 管道,未考虑海洋环境中高静水压力及外部换热条件显著变化等因素对泄放过程的多重影响。

针对上述局限,后续研究可从数值模型框架完善、环境边界条件拓展以及工程场景验证 3 个层面进一步推进。首先,当研究工况中最低温度接近

CO<sub>2</sub>三相点时,有必要引入包含固相相平衡的多相相态模型,或结合实验观测,对固相析出行为及其潜在冻堵风险开展定量分析。其次,可进一步引入非稳态传热模型,显式考虑土壤/海床热容效应、环境温度的时变特性以及多层传热结构(管壁-保温层-覆土/海床),以更合理刻画泄放过程的回温行为。同时,可在上述模型框架下对交替泄放策略的关键参数(如阈值温度、切换周期)开展敏感性和不确定性分析。此外,随着国内海底超临界CO<sub>2</sub>管道工程的逐步推进,后续还可结合更大尺度实验或现场运行数据,对本文模型及交替泄放策略在海洋环境下的适用性进行验证,以缩小模拟尺度与工程尺度在传热机制和时间尺度上的差异,提升研究结论的工程可靠性。

### 3 结论

本文基于OLGA软件建立了超临界CO<sub>2</sub>管道数值模型,以泄放效率和最低温度为评价指标,对单端泄放、两端同时泄放以及两端交替泄放三种策略的温压演化特征进行了系统对比,揭示了两端交替泄放在抑制极端温降与保障泄放效率之间的协同优化效果,并得到如下主要结论。

(1)当管线进出口温度和压力均高于CO<sub>2</sub>临界条件时,沿程温度与压力变化平稳,介质始终保持单相超临界状态,未出现相态突变或流动不稳定现象,验证了所建模型在稳态工况下的合理性,为后续瞬态泄放分析提供了可靠初始条件。

(2)传统泄放策略难以兼顾泄放效率与温度控制。单端泄放时,增大泄放口径可将泄放时间由约14.0 h缩短至约4.0 h,但最低温度同时由-31 °C降至-75 °C。两端同时泄放进一步加快了泄压过程,最低温度可降至约-85 °C,极端低温风险显著增大。

(3)在设定的管道尺度、热边界和介质组成条件下,采用“大口径+小口径”交替泄放策略可有效缓解泄放过程中温压波动,使最低温度控制在-30 °C以上,总泄放时间控制在8.0 h以内,其中“75 mm + 25 mm”口径组合下的总泄放时间可缩短至约5.0 h。与传统泄放策略相比,该策略在抑制极端低温的同时维持了较高的泄放效率。

#### 参考文献

- [1] CHEN S Y, LIU J F, ZHANG Q, et al. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112537.
- [2] LU J X, HU Q H, ZHANG D H, et al. Numerical simulation of impurity-containing supercritical CO<sub>2</sub> pipeline transport in CCUS [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2024, 138: 104236.
- [3] 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 Q H, LI Y X, ZHANG J, 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.
- [4] 单彤文, 张超, 秦锋, 等. 二氧化碳规模化封存典型技术路线解析与产业前景展望[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(6): 196-204.  
SHAN T W, ZHANG C, QIN F, et al. Typical technical roadmap analysis and industry prospect of large-scale CO<sub>2</sub> sequestration [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(6): 196-204.
- [5] WANG W H, GUANG Y, LIU W, et al. Experimental investigation of stress corrosion on supercritical CO<sub>2</sub> transportation pipelines against leakage for CCUS applications [J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 266-276.
- [6] 陈子晗, 张文辉, 李欣泽, 等. 超临界CO<sub>2</sub>管道放空系统设计原则[J/OL]. *化工进展*, 1-20[2026-02-03]. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1184.  
CHEN Z H, ZHANG W H, LI X Z, et al. Design principles for venting systems in supercritical CO<sub>2</sub> pipelines [J/OL]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 1-20[2026-02-03]. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1184.
- [7] 殷布泽, 黄维和, 苗青, 等. CO<sub>2</sub>管道泄漏减压特性与裂纹扩展研究现状及发展趋势[J]. *油气储运*, 2023, 42(9): 1042-1054.  
YIN B Z, HUANG W H, MIAO Q, et al. Status and development trends of research on CO<sub>2</sub> decompression characteristics and crack propagation [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(9): 1042-1054.
- [8] 步亚冉, 张明, 陈晶华, 等. 超临界CO<sub>2</sub>管道瞬态数值仿真模型开发与停输工况分析[J]. *石油与天然气化工*, 2025, 54(6): 155-164.  
BU Y R, ZHANG M, CHEN J H, et al. Development of a transient numerical simulation model and analysis of shutdown conditions for a supercritical CO<sub>2</sub> pipeline [J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2025, 54(6): 155-164.
- [9] HE Y F, YU S, YAN X Q, et al. Development of a throttling venting model for CO<sub>2</sub> pipelines and study of venting characteristics [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 196: 106962.
- [10] HU Q H, WU Y, ZHAO X F, et al. Experiments on the effect of restriction orifice characteristics and impurities on the venting characteristics of supercritical/dense-phase CO<sub>2</sub>

- pipeline [J]. *Energy*, 2025, 338: 138829.
- [11] 杨腾, 李玉星, 王海锋, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 管道放空特性实验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(S2): 101-107.  
YANG T, LI Y X, WANG H F, et al. Experimental study on venting characteristics of supercritical CO<sub>2</sub> pipelines [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(S2): 101-107.
- [12] YAMASAKI H, YAMAGUCHI H, HATTORI K, et al. Experimental observation of CO<sub>2</sub> dry-ice behavior in an evaporator/sublimator [J]. *Energy Procedia*, 2017, 143: 375-380.
- [13] MUNKEJORD S T, DENG H, AUSTEGARD A, et al. Depressurization of CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>-He in a pipe: Experiments and modelling of pressure and temperature dynamics [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 109: 103361.
- [14] 胡其会, 杨腾, 苗青, 等. 含杂质超临界 CO<sub>2</sub> 管道放空对管内温压变化的影响实验[J]. *油气储运*, 2024, 43(9): 985-994.  
HU Q H, YANG T, MIAO Q, et al. Experimental study on the influence of venting on temperature and pressure changes in impurity-containing supercritical CO<sub>2</sub> pipeline [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(9): 985-994.
- [15] DE KOEIJER G, BORCH J H, DRESCHER M, et al. CO<sub>2</sub> transport—Depressurization, heat transfer and impurities [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 3008-3015.
- [16] CLAUSEN S, OOSTERKAMP A, STRØM K L. Depressurization of a 50 km long 24 inches CO<sub>2</sub> pipeline [J]. *Energy Procedia*, 2012, 23: 256-265.
- [17] 李萌, 聂超飞, 欧阳欣, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 管道输送理论与仿真研究进展[J]. *油气储运*, 2025, 44(5): 495-507.  
LI M, NIE C F, OUYANG X, et al. Research progress on theory and simulation of supercritical CO<sub>2</sub> pipeline transportation [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2025, 44(5): 495-507.
- [18] 李顺利, 潘红宇, 李玉星, 等. 放空管设计对超临界 CO<sub>2</sub> 管道放空影响研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(11): 101-105.  
LI S L, PAN H Y, LI Y X, et al. Study on influence of blow-down pipe design on blow-down of supercritical CO<sub>2</sub> pipeline [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(11): 101-105.
- [19] 闫冰, 史博会, 陈俊文, 等. 地形起伏超临界 CO<sub>2</sub> 管道两端阀室放空动态模拟[J]. *油气储运*, 2024, 43(5): 561-569.  
YAN B, SHI B H, CHEN J W, et al. Dynamic venting simulation of valve chambers at both ends of supercritical CO<sub>2</sub> pipelines with topographic relief [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(5): 561-569.
- [20] DRESCHER M, VARHOLM K, MUNKEJORD S T, et al. Experiments and modelling of two-phase transient flow during pipeline depressurization of CO<sub>2</sub> with various N<sub>2</sub> compositions [J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 2448-2457.
- [21] ZUO L L, JIN A T, CHEN Q, et al. Simulation on venting process and valve opening control method for gas trunk pipelines [J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(6): 3016-3028.
- [22] 何蕾, 张明, 衣华磊, 等. 海上平台超临界二氧化碳泄放工艺研究——以渤中 25-1 海上平台为例[J]. *中国海上油气*, 2023, 35(5): 212-222.  
HE L, ZHANG M, YI H L, et al. Study on supercritical CO<sub>2</sub> blowdown process for offshore platforms: A case study of BZ25-1 offshore platform [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(5): 212-222.
- [23] YU S, YAN X Q, HE Y F, et al. Study on the effect of valve openings and multi-stage throttling structures on the pressure and temperature during CO<sub>2</sub> pipeline venting processes [J]. *Energy*, 2024, 308: 132967.
- [24] 孙璐璐. 川西北 SYS 区块气井放空技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2023.  
SUN L L. Research on gas well blowdown technology in the SYS block, Northwestern Sichuan Basin [D]. Chengdu: SouthWest Petroleum University, 2023.
- [25] CAO Q, YAN X Q, YU S, et al. Experimental investigation of the characteristics of supercritical CO<sub>2</sub> during the venting process [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 110: 103424.
- [26] 李欣泽, 袁亮, 张超, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 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.  
LI X Z, YUAN L, ZHANG C, et al. Research progress and direction on transient transportation process of supercritical CO<sub>2</sub> pipeline [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(1): 22-32.
- [27] PENG D Y, ROBINSON D B. A new two-constant equation of state [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1976, 15(1): 59-64.
- [28] 李玉星, 刘梦诗, 张建. 气体杂质对 CO<sub>2</sub> 管道输送系统安全的影响[J]. *天然气工业*, 2014, 34(1): 108-113.  
LI Y X, LIU M S, ZHANG J. Impacts of gas impurities on the security of CO<sub>2</sub> pipelines [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(1): 108-113.
- [29] 彭世垚, 贾启运, 李其抚, 等. 适用于超临界 CO<sub>2</sub> 管道的稳态输送水力热力计算模型[J]. *天然气与石油*, 2024, 42(2): 1-7.  
PENG S Y, JIA Q Y, LI Q F, et al. Hydraulic and thermal calculation model of supercritical CO<sub>2</sub> steady-state transportation [J]. *Natural Gas and Oil*, 2024, 42(2): 1-7.
- [30] 柳敬, 王海锋, 杨腾, 等. 高压 CO<sub>2</sub> 管道放空及安全泄放的数值模拟[J]. *油气储运*, 2024, 43(4): 387-394.  
LIU X, WANG H F, YANG T, et al. Numerical simulation

- of high-pressure CO<sub>2</sub> pipeline venting and safe release [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(4): 387-394.
- [31] 张文辉, 安国钰, 熊小琴, 等. 超临界CO<sub>2</sub>管道阀室放空方案设计[J]. *油气储运*, 2024, 43(7): 749-759.  
ZHANG W H, AN G Y, XIONG X Q, et al. Venting design for block valve station of supercritical CO<sub>2</sub> pipeline [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(7): 749-759.
- [32] 陈子晗, 张文辉, 李欣泽, 等. 超临界CO<sub>2</sub>管道放空系统设计原则[J/OL]. *化工进展*: 1-20 [2026-01-06]. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1184.  
CHEN Z H, ZHANG W H, LI X Z, et al. Design principles for venting systems in supercritical CO<sub>2</sub> pipelines [J/OL]. *Chemical Industry and Engineering Progress*: 1-20 [2026-01-06]. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1184.
- [33] 廖涛, 王梓丞, 张海帆, 等. 超临界CO<sub>2</sub>长输管道多管段多点放空方案设计[J]. *化工进展*, 2025, 44(10): 5582-5589.  
LIAO T, WANG Z C, ZHANG H F, et al. Design of multi-point venting scheme for supercritical CO<sub>2</sub> long-distance pipeline with multiple pipe sections [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, 44(10): 5582-5589.
- [34] 丁晓勇, 徐恒元, 贾占功, 等. 停输及泄放工况下超临界CO<sub>2</sub>管输瞬态特性研究[J]. *油气田地面工程*, 2024, 43(8): 16-20.  
DING X Y, XU H Y, JIA Z G, et al. Study on transient characteristics of supercritical CO<sub>2</sub> pipeline transportation under shutdown and discharge conditions [J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2024, 43(8): 16-20.
- [35] 张鸿武, 胡其会, 赵雪峰, 等. 陆上CO<sub>2</sub>管道泄漏风险研究进展[J]. *化工进展*, 2025, 44(S1): 462-477.  
ZHANG H W, HU Q H, ZHAO X F, et al. Research progress on leakage risk of onshore CO<sub>2</sub> pipeline [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, 44(S1): 462-477.
- [36] 范振宁, 梁海宁, 房茂立, 等. CO<sub>2</sub>管道多级节流放空特性研究[J]. *安全与环境学报*, 2025, 25(5): 1761-1769.  
FAN Z N, LIANG H N, FANG M L, et al. Investigation of multi-stage throttling and venting characteristics in CO<sub>2</sub> pipelines [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2025, 25(5): 1761-1769.
- [37] ZHANG D H, WANG R X, OUYANG X, et al. Experimental study of the full-scale burst failure behavior of carbon dioxide steel pipeline [J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2025, 5(1): 100221.
- [38] GUO X L, YU J L, YAN X Q, et al. Throttle and expansion characteristics of supercritical carbon dioxide during its venting [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2023, 122: 103800.
- [39] CAO Q, YAN X Q, YU S, et al. Experimental investigation of the characteristics of supercritical CO<sub>2</sub> during the venting process [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 110: 103424.