

引文: 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 Wenhui, AN Guoyu, XIONG Xiaoqin, 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.

## 超临界 CO<sub>2</sub> 管道阀室放空方案设计

张文辉<sup>1,2,3</sup> 安国钰<sup>2</sup> 熊小琴<sup>1,2,3</sup> 李欣泽<sup>2,3</sup> 邢晓凯<sup>1,2,3</sup>

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院; 2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院;

3. 新疆多介质管道安全输送重点实验室

**摘要:**【目的】超临界 CO<sub>2</sub> 管输是解决碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术中碳源、碳汇不匹配问题最经济的方式。当管道因维检修需进行放空作业时,由于相变与焦汤效应的影响,放空管段温度可能低于-20℃,诱发管道脆断。【方法】利用 OLGA 软件建立超临界 CO<sub>2</sub> 管道放空模型,将模拟结果与参考文献中的实验数据对比,发现 OLGA 软件在预测 CO<sub>2</sub> 相变、温降及压降方面具有较高的准确性。在此基础上,提出间歇放空方案,并模拟分析了不同初始压力与温度下放空阀开度对放空过程与关阀回温过程时长的影响。【结果】在整个干线管道放空段中,放空点是最危险点,其温度会率先降至-20℃。随着阀门开度减小,放空点到-20℃所需时间呈指数增长。放空阀开度越小,一次开阀放空总质量越大,但平均放空速率越小,放空时间成本越高。放空阀开度增大,一次开阀放空总质量减小,且干线管道放空段整体压力水平高,使将管内介质完全放空至大气压力所需时间增加。关闭放空阀后,管内介质回温过程可分为由轴向换热与径向换热主导的两个阶段,且轴向换热主导阶段的温升速率更大。随着阀门开度的增加,关阀回温时长会迅速增加并趋于稳定。【结论】放空阀开度过大或过小均会导致放空时间过长,工程应用中可以将放空点处的温度或压力与放空阀的动作连锁。为保证控制的可靠性且尽可能缩短总放空时长,需合理确定放空阀每次动作的开度。(图 14,表 3,参 25)

**关键词:** 超临界 CO<sub>2</sub>; 管道输送; 阀室放空; 间歇放空

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)07-0749-11

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.07.004

## Venting design for block valve station of supercritical CO<sub>2</sub> pipeline

ZHANG Wenhui<sup>1,2,3</sup>, AN Guoyu<sup>2</sup>, XIONG Xiaoqin<sup>1,2,3</sup>, LI Xinze<sup>2,3</sup>, XING Xiaokai<sup>1,2,3</sup>

1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing); 2. Engineering School, China University of Petroleum-Beijing at Karamay; 3. Xinjiang Key Laboratory for Transportation Safety of Multi-Medium Pipelines

**Abstract:** 【Objective】Supercritical CO<sub>2</sub> pipeline transmission is deemed the most cost-effective solution to address the carbon source-sink mismatch in Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technology. However, during venting operations required for pipeline maintenance, the vented pipeline segment might drop below -20℃ due to the phase change and Joule-Thomson effect, potentially leading to brittle fractures in the pipeline. 【Methods】OLGA software was used to establish a venting model for supercritical CO<sub>2</sub> pipelines. The subsequent comparison between the simulation results and experimental data demonstrated the accuracy of OLGA software in predicting CO<sub>2</sub> phase changes, temperature reductions, and pressure drops. On this basis, an intermittent venting design was proposed. In addition, simulations were conducted to analyze the influence of vent valve openings on the durations of the venting process and the temperature escalation process post valve closure under varying initial pressures and temperatures. 【Results】Within the vented pipeline segment of the entire trunk pipeline, the vent point was identified as the most dangerous as it is the first to experience temperature drops under -20℃. Decreasing valve openings led to an exponential increase in the duration required to reach -20℃ at this point. As the vent valve openings decreased, the total venting volume for a single valve opening operation increased, resulting in lower average venting rates and elevated time costs for venting. Conversely, excessively large vent valve openings led to a reduction in the total venting volume for a single valve opening

operation. Moreover, high pressure levels throughout the vented segment of the trunk pipeline also prolonged the duration needed to fully vent the medium in the pipeline until it reached atmospheric pressure. The temperature escalation of the medium in the pipeline following valve closure may be divided into two stages respectively dominated by axial heat transfer or radial heat transfer, and the former stage was observed at a higher rate of temperature rise. As the valve openings increased, the time taken for temperature escalation after valve closure tended to stabilize following initial rapid increments. **[Conclusion]** Both excessively large or small vent valve openings lead to prolonged venting durations. In engineering applications, the temperatures or pressures at the vent point may be linked with the vent valve actions. However, to guarantee control reliability and minimize total venting durations, it is crucial to rationally choose vent valve openings for each action. (14 Figures, 3 Tables, 25 References)

**Key words:** supercritical CO<sub>2</sub>, pipeline transmission, block valve station venting, intermittent venting

超临界 CO<sub>2</sub> 管道输送是解决碳捕集、利用与封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 技术中碳源、碳汇不匹配问题最经济的方案。当管道因维检修需要进行放空作业时,由于相变与焦汤效应的影响,放空管段温度可能低于 -20 °C,诱发碳钢管道脆断,甚至可能低于 CO<sub>2</sub> 三相点温度,在管内形成干冰并堵塞管道。此外,若低温 CO<sub>2</sub> 来不及扩散导致浓度过高,会造成人员窒息、冻伤等严重后果。放空过程主要由管内减压<sup>[1]</sup>、管口欠膨胀射流<sup>[2]</sup>以及管外扩散<sup>[3-5]</sup>过程组成。

李玉星等<sup>[6]</sup>搭建了长 12 m,主管道管径 250 mm、壁厚 12 mm 的 3 级节流实验装置,研究了纯 CO<sub>2</sub> 不同相态下的节流问题;顾帅威等<sup>[7]</sup>搭建了长 14.85 m,主管道管径 21 mm、壁厚 3 mm 的小尺度实验装置,研究了超临界 CO<sub>2</sub> 放空时管内减压过程;Teng 等<sup>[8]</sup>搭建了反应釜实验装置,分析了低温多相 CO<sub>2</sub> 介质在管外的扩散过程;李顺丽等<sup>[9]</sup>借助 OLGA 软件探索了超临界 CO<sub>2</sub> 管道放空时管内减压规律。朱国承等<sup>[10-12]</sup>搭建了长 258 m,内径为 233 mm 的工业级 CO<sub>2</sub> 管道实验平台,研究了泄放减压过程中管内介质相态变化规律、泄漏口的欠膨胀射流结构以及管外低温气固两相 CO<sub>2</sub> 的扩散规律。

Clausen 等<sup>[13]</sup>介绍了一次埋地超临界 CO<sub>2</sub> 管道的放空过程,并利用数据验证了 OLGA 软件模拟超临界 CO<sub>2</sub> 管道放空过程的可行性。De Koeijer 等<sup>[14]</sup>研究表明可以使用 OLGA 软件模拟 CO<sub>2</sub> 在管道中的焦汤效应与蒸发过程。Han 等<sup>[15-16]</sup>建立了高压 CO<sub>2</sub> 气瓶外接细管道的液态 CO<sub>2</sub> 泄放装置,通过实验测得的压力-温度曲线与理论饱和线较为接近。Wareing 等<sup>[17-20]</sup>研究表明放空立管出口处存在高度欠膨胀射流行为。挪威科技工业研究所也对 CO<sub>2</sub> 放空过程中的两相行为<sup>[21]</sup>、非平衡效应<sup>[22]</sup>、节流效应<sup>[23]</sup>、脆性断裂行为<sup>[24]</sup>以及含杂质的影响<sup>[25]</sup>进行了实验与理论研究。

从国内外研究现状可以看出,关于 CO<sub>2</sub> 管道放空的管内减压、立管出口欠膨胀射流以及管外扩散的研究成果较为丰富。经验证,OLGA 软件在超临界 CO<sub>2</sub> 管道放空工艺仿真方面较为准确,但尚无考虑碳钢低温限制的具体放空方案。在此,以某规划建设的超临界 CO<sub>2</sub> 管道为数据基础,采用 OLGA 软件模拟制定放空方案,分析间歇放空对管道工况所产生的影响,以期对未来超临界 CO<sub>2</sub> 管道放空方案的制定提供参考。

## 1 模型与验证

### 1.1 物理模型

该超临界 CO<sub>2</sub> 管道设计年输量为 100×10<sup>4</sup> t,干线管道管径 273 mm、壁厚 8 mm,首站出站温度 40 °C,末站进站压力 9.1 MPa,全长 51.5 km,在距首站 30 km 处设置中间监控阀室。首站与末站均设有放空系统,放空管道管径 273 mm、壁厚 8 mm,长 200 m,放空阀的通径与放空管道相同,放空立管管径 273 mm、壁厚 8 mm,高 15 m。管道拟建在新疆克拉玛依,埋地段的总传热系数为 1.2 W/(m<sup>2</sup>·°C),管道埋深处年平均地温 13.5 °C,年平均大气温度 7.7 °C。建立超临界二氧化碳管道拓扑结构图(图 1)。



图 1 超临界 CO<sub>2</sub> 管道拓扑结构图

Fig. 1 Topological structure of supercritical CO<sub>2</sub> pipeline

当管道需要放空时,关闭首站与末站的进出站截断阀及中间阀室的截断阀,利用首站或末站的放空系统实现对应管段的放空,即首站放空系统承担长 30 km

的管段放空任务,末站放空系统承担长 21.5 km 的放空任务。SH/T 3202—2018《二氧化碳输送管道工程设计标准》与 DNVGL-RP-F104-2017《二氧化碳管道设计运行》均规定超临界 CO<sub>2</sub> 管道线路中截断阀室的间距为 15 km,但在实际工程中可能存在某些截断阀室不具备设置放空系统的情况,导致部分截断阀室承担其下游两段相邻管段(30 km)的放空任务,这种情况加大了安全放空的难度。在此均以首站及其所承担放空管段的基本情况为例进行探究。

1.2 OLGA 模型

选择行业认可度较高的 OLGA 软件作为模拟工具,确定该超临界 CO<sub>2</sub> 管道的放空方案,并根据模拟结果对放空过程中的流动与传热问题进行分析。OLGA 软件是一维多相水热力瞬态仿真软件,其多相流计算模型为可压缩的双流体模型,求解方法为半隐式积分解法。二氧化碳的物理性质采用 OLGA 软件内置的 Span-Wagner 状态方程进行描述。建立超临界 CO<sub>2</sub> 管道的 OLGA 放空模型(图 2),其中边界 1 为首站,设置为压力边界,给定起点压力与温度;边界 2 为中间阀室,设置为压力边界,给定终点压力;边界 3 为放空立管出口,亦为压力边界,其值设定为 0.1 MPa。放空点为放空管道与干线管道相连接的点,中间节点为放空管道与放空立管相连接的点。放空阀 1 与放空阀 2 的相对流量系数随阀门开度的变化相同,建立放空阀 1 与放空阀 2 的流量特性图(图 3)。

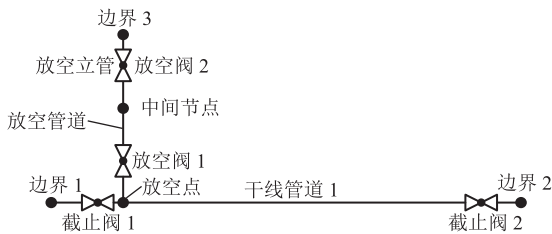


图 2 OLGA 模型 for venting of supercritical CO<sub>2</sub> pipeline

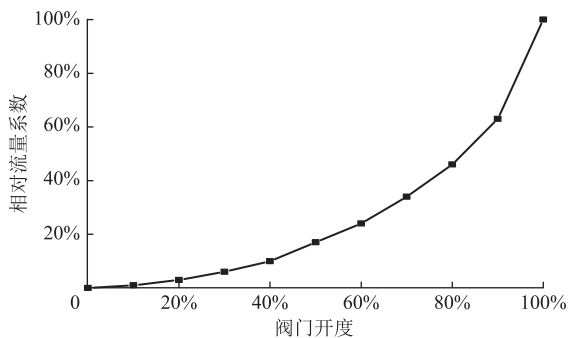


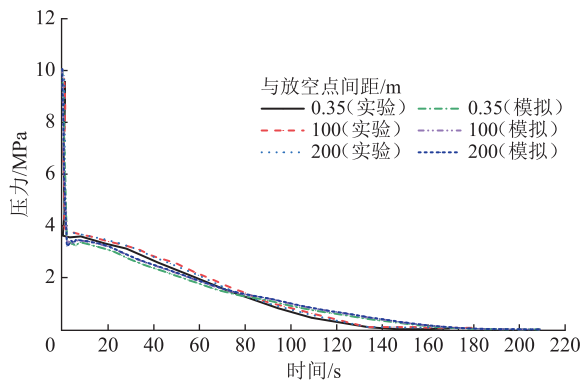
图 3 放空阀的相对流量系数随阀门开度变化曲线  
Fig. 3 Curve of relative flow coefficient changes of vent valve with variation of valve openings

1.3 模型验证

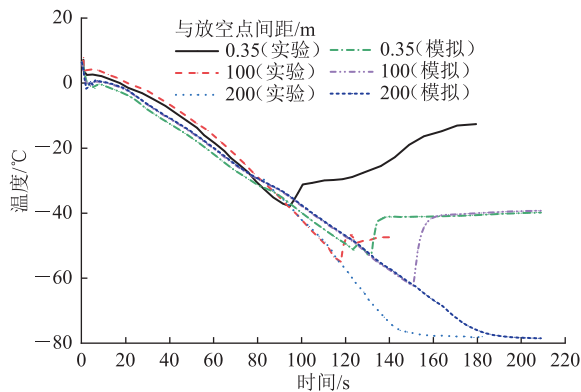
采用文献[5]中德国劳氏石油天然气公司的 CO<sub>2</sub> 泄放实验结果(表 1)对 OLGA 模型的准确性进行验证。模拟计算的初始压力设置为 10.05 MPa,初始温度为 6.4 ℃,泄放孔径为 8 mm,绘制放空管道上距放空点 0.35 m、100 m、200 m 位置处压力与温度随放空时间变化的模拟与实验结果(图 4)。模拟与实验所得的压力变化吻合度较高,在管内压力不低于 1 MPa(对应时间为 80 s)时,压力模拟结果与实验结果的偏差不超过 10%;模拟与实验所得的放空时间分别约为 210 s、180 s,二者相对偏差约 17%,OLGA 软件能够较好地预测超临界 CO<sub>2</sub> 管道放空过程中的压力变化。模拟所得的放空管道温度变化趋势整体上与实验结果

表 1 德国劳氏石油天然气公司 CO<sub>2</sub> 泄放实验管道主要参数表  
Table 1 Main parameters of experimental pipeline for CO<sub>2</sub> relief of Germanischer Lloyd

管长/ m	公称直径/ mm	外径/ mm	钢管壁厚/ mm	保温层壁厚/ mm	表面粗糙度/ μm
200	50	60.3	4	19	3.5



(a) 压力



(b) 温度

图 4 放空管道上距放空点不同距离处压力与温度变化的模拟结果与实验结果对比图  
Fig. 4 Comparison between simulation and experimental results of pressure and temperature changes at different distances from the vent point on the vent piping

保持一致,但在放空管段上距放空点 0.35 m 与 100 m 处,模拟结果中最低温度较实验结果分别低约 20 ℃、10 ℃,且模拟结果与实验结果相比存在滞后性;在 200 m 处模拟与实验所得的最低温度相同,均为-80 ℃左右,但模拟结果同样存在滞后性。总体而言,OLGA 软件在管道放空过程中的压降预测较为准确,但温降预测偏差较大。

2 间歇放空方案

当以固定开度(图 2 中放空阀 1 打开至固定开度,放空阀 2 全开)进行放空时,放空点为干线管道中温降幅度最大的位置,建立以下两种工况下放空点处的温度压力及相态变化趋势图(图 5)。工况 1: 阀门开度 50%,初压 8.4 MPa,初温 35 ℃;工况 2: 阀门开度 20%,初压 10.4 MPa,初温 40 ℃。放空开始的瞬间,放空点处的温度压力迅速下降,CO<sub>2</sub> 由超临界状态变为气液两相态,而后 CO<sub>2</sub> 沿着饱和线持续向低压、低温状态转变。这个过程中,管内介质的含气率逐渐升高,在管内压力不断降低的同时,受焦耳-汤姆孙效应与相变作用的影响,管内介质温度也不断降低,当温度达到最低值后,管内介质全部转变为气相,此时环境传递给管内介质的热量大于焦耳-汤姆孙效应所产生的冷量,致使管内介质温度迅速升高,最终达到环境温度。

当放空点处温度达到-20 ℃时,若继续放空,其温度会继续下降(图 5)。考虑管材的低温性能限制,此时应关闭放空阀停止放空,待干线温度回升后继

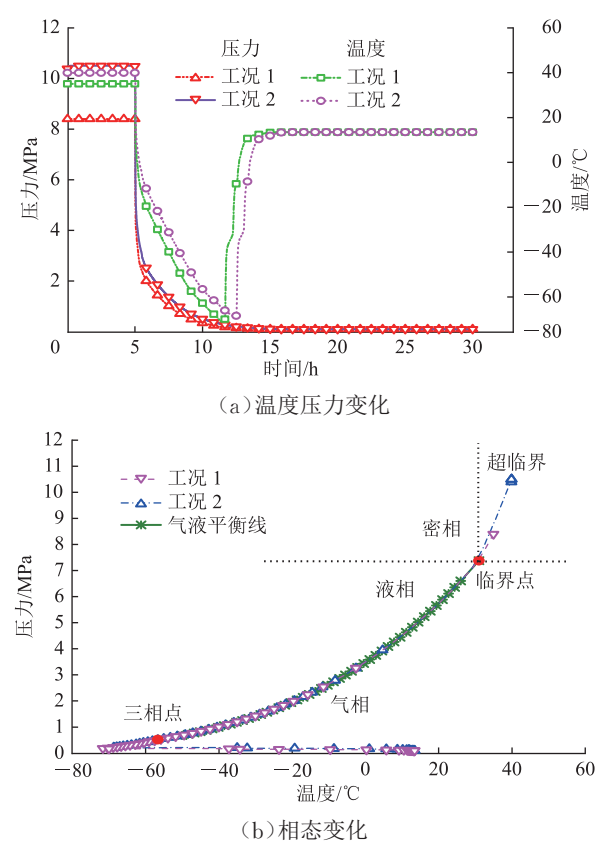


图 5 不同工况下放空点处 CO<sub>2</sub> 温度压力及相态变化曲线  
Fig. 5 Curves of temperature, pressure, and phase changes of CO<sub>2</sub> at the vent point under varying conditions

续开阀放空。后续放空过程可能再次出现干线温度达到-20 ℃的情况,此时仍需关闭放空阀停止放空,待干线温度回升后继续放空。经由上述间歇放空过程将干线管道压力降低至大气压力后,放空结束。选取典型工况(表 2)分别对首次开阀放空与首次关阀回温两个过程的持续时长及温度压力变化规律进行分析。

表 2 OLGA 软件放空模拟工况表  
Table 2 Conditions of OLGA model for venting simulation

工况	放空阀 1 开度	压力/MPa		边界 1 温度/℃	工况	放空阀 1 开度	压力/MPa		边界 1 温度/℃
		边界 1	边界 2				边界 1	边界 2	
1	5%	10.4	10	40	11	20%	8.4	8	40
2	5%	10.4	10	35	12	20%	8.4	8	35
3	5%	8.4	8	40	13	50%	10.4	10	40
4	5%	8.4	8	35	14	50%	10.4	10	35
5	10%	10.4	10	40	15	50%	8.4	8	40
6	10%	10.4	10	35	16	50%	8.4	8	35
7	10%	8.4	8	40	17	100%	10.4	10	40
8	10%	8.4	8	35	18	100%	10.4	10	35
9	20%	10.4	10	40	19	100%	8.4	8	40
10	20%	10.4	10	35	20	100%	8.4	8	35



2.1 首次开阀放空过程

首次开阀放空后,放空点是整个干线管道中温度最先达到-20℃的位置。绘制不同阀门开度与不同工况下放空点处温度达到-20℃的时间曲线(图6),随着阀门开度减小,放空点达到最低温度的所需时间呈指数增长。放空过程中阀门开度过大会导致放空点很快达到低温限制,小开度虽然可以延长放空点达到低温限制的时间,但放空速率较慢。因此,放空阀开度的确定需要综合考虑放空点达到-20℃所用时间与放空速率两方面。

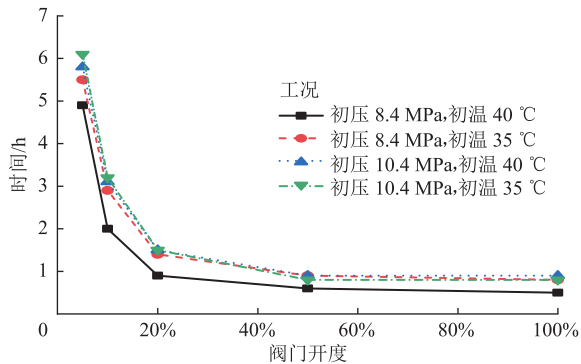


图6 不同阀门开度及不同工况下放空点处温度达到-20℃所需时间图

Fig. 6 Durations required to reach -20℃ at the vent point under varying valve openings and conditions

建立当首站(边界1)压力、温度分别为10.4 MPa、40℃时,不同放空阀开度下管内介质放空时的质量流量随时间变化曲线(图7)。阀门开度越小,放空过程的瞬时最大质量流量越小,质量流量整体上也处于较低水平,但放空点处温度达到-20℃的所需时间更长,即放空持续的时间更长。计算图中曲线与横坐标轴所围成的面积可得不同放空阀开度下的放空总质量与平均放空速率(表3)。当放空点处温度达到-20℃

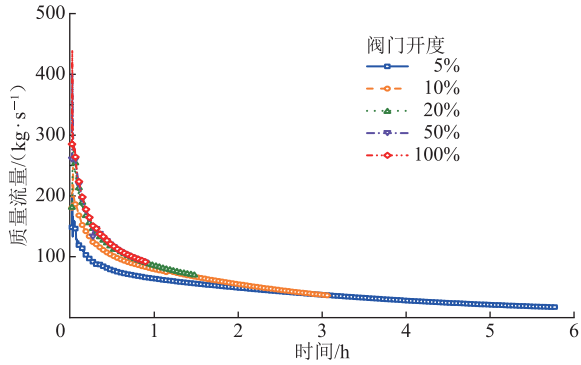


图7 首站压力10.4 MPa、温度40℃时不同放空阀开度下管内放空介质质量流量随时间变化的曲线

Fig. 7 Time-varying curve of mass flow rates changes of medium in the venting pipeline with the variation of time and with different vent valve openings under 10.4 MPa and 40℃ at the initial station

表3 首站压力10.4 MPa、温度40℃时不同放空阀开度下管内介质的放空总质量与平均放空速率表

Table 3 Total venting volumes and average venting rates of medium in the pipeline with different vent valve openings under 10.4 MPa and 40℃ at the initial station

阀门开度	放空总质量/ t	放空持续时长/ h	平均放空速率/ (t·h <sup>-1</sup> )
5%	912.6	5.8	157.3
10%	815.0	3.1	262.9
20%	596.5	1.5	397.7
50%	450.7	0.9	500.8
100%	449.3	0.9	499.2

时,由于放空持续时间较长,小阀门开度工况下所对应的放空总质量更大,也会导致维抢修工作开展的及时性受到影响。当阀门开度为5%时,5.8 h后放空点处温度达到-20℃,放空总质量为912.6 t,与阀门开度10%相比时间延长了约87%,但是放空总质量仅增加了约12%,时间成本较高。此外,据图6可知,在同样压力水平下,温度较高时,放空点会更快达到-20℃,并且压力水平越低,温度的这一影响趋势越明显;在同样温度水平下,压力越低,放空点会更快达到-20℃,并且温度水平越高,压力的这一影响趋势越明显;管道压力水平较高且阀门开度较大时(如10.4 MPa工况下,阀门开度为50%或100%),这一变化规律不再明显。这是由于超临界状态下,在同一压力水平下,温度越高,CO<sub>2</sub>的比熵越大。在同一温度水平下,压力越低,CO<sub>2</sub>的比熵越大,整个放空过程的熵差越大,其进行放空的驱动力越强,过程越迅速。

建立不同阀门开度下放空点处温度达到-20℃时,干线管道放空段的压力与温度分布图(图8、图9)。可见,阀门开度越小,干线管道放空段的压力越趋于2 MPa,温度越趋于-20℃。阀门开度越大,干线管道放空段的压力与温度分布越不均匀,后半段的温度与压力越高。当停止放空一段时间后,受温度梯度与压力梯度作用影响,干线管道放空段的温度、压力分布将趋于均匀。结合表3阀门开度与放空总质量的分析可知,放空阀的开度过大,放空点温度达到-20℃时放空总质量小,干线剩余管存量,同时压力水平高,因此将管内介质完全放空至大气压力所需时间较长。此外,图8、图9中干线管道放空段的温度与压力的变化趋势是相同且相对应的,这是由于此时管内的CO<sub>2</sub>相态位于气液平衡线上,始终处于饱和状态。

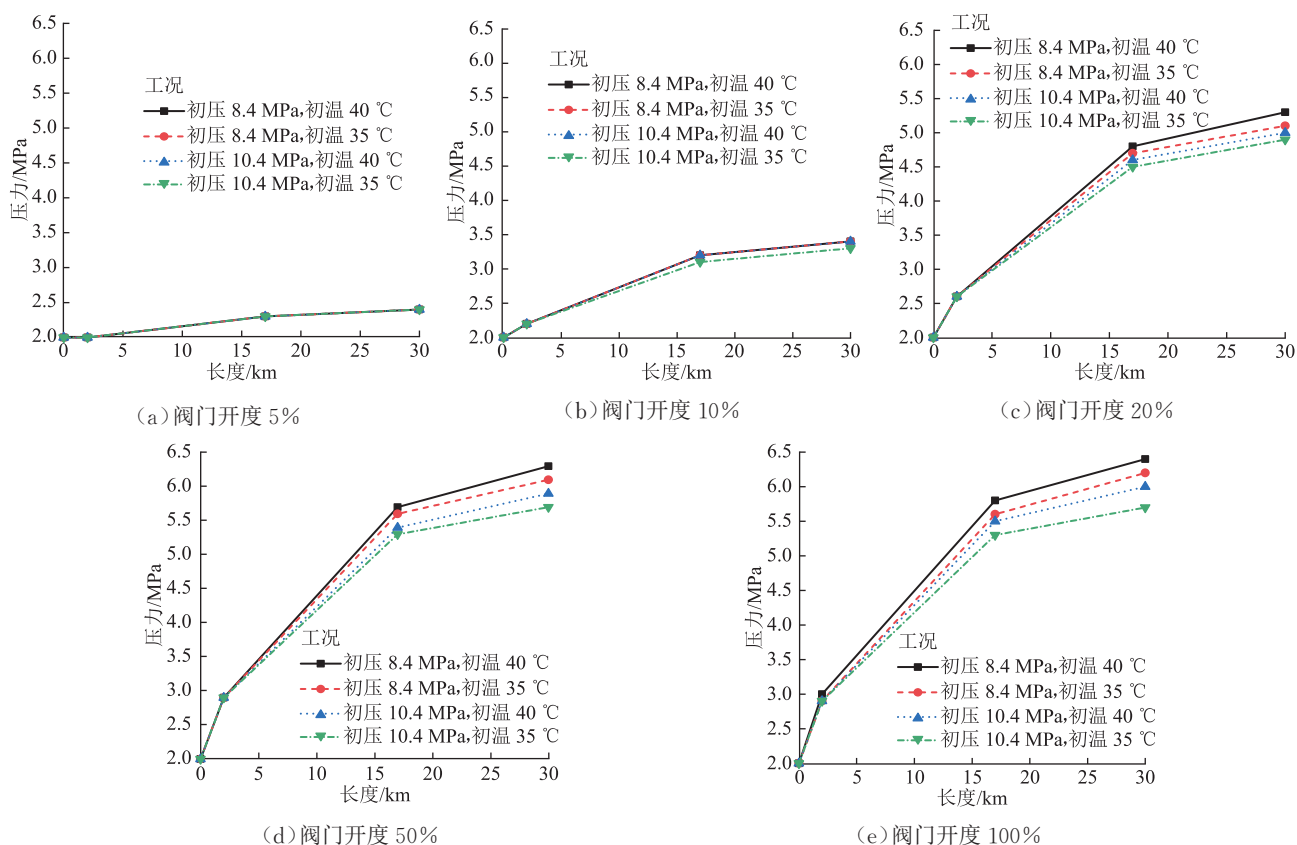


图8 不同阀门开度下放空点处温度达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时干线管道放空段的压力分布图

Fig. 8 Pressure profile of trunk pipeline vented segment with the vent point dropping to  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  corresponding to different valve openings

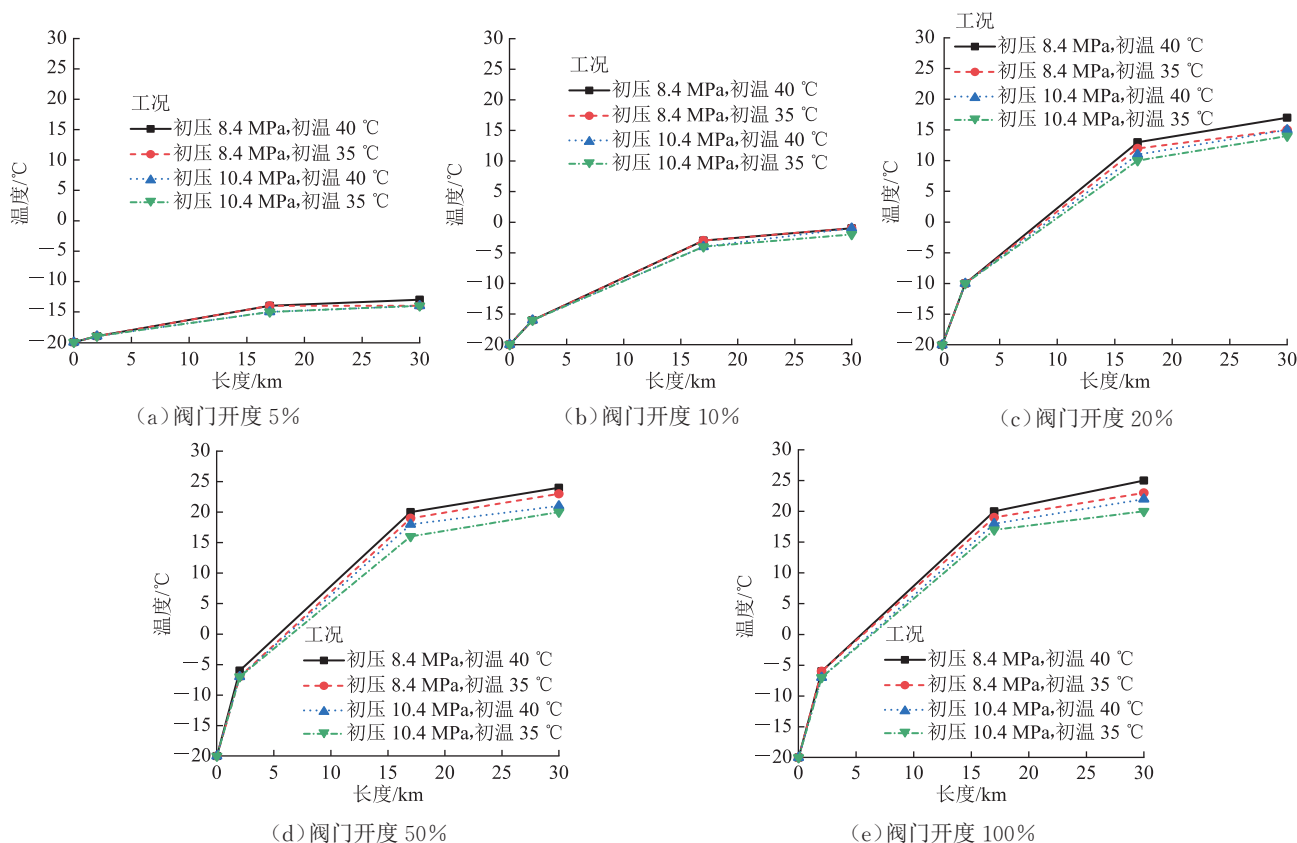


图9 不同阀门开度下放空点处温度达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时干线管道放空段的温度分布图

Fig. 9 Temperature profile of trunk pipeline vented segment with the vent point dropping to  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  corresponding to under different valve openings

## 2.2 首次关阀回温过程

当放空点处温度达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,关闭阀门,管内介质的换热包含轴向换热、径向换热两种途径:轴向换热是指在轴向温度梯度与压力梯度的作用下,由高温、高压侧向低温、低压侧的传热传质过程,即从截止阀2的上游向放空点处传递;径向换热是指管道同周围土壤环境之间的热量交换。其中,轴向的换热速率高于径向的换热速率。计算得到两个工况下放空点处的温度变化规律曲线(图10),第5 h时打开阀门进行放空,当放空点温度达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,关闭阀门,放空点温度开始回升。由图可见,关阀后第1阶段,在轴向换热的作用下,放空点处的温度迅速回升,干线管道放空段的温度分布趋于均匀;关阀后第2阶段,在管内介质温度分布趋于均匀后,轴向换热作用减弱,径向换热起主导作用,在同周围环境的温差作用下,管内介质温度缓慢升高或降低,这一阶段总体的温度变化速率低于第1阶段,故认为第1阶段结束时所对应的时长为合适的关阀回温时长。

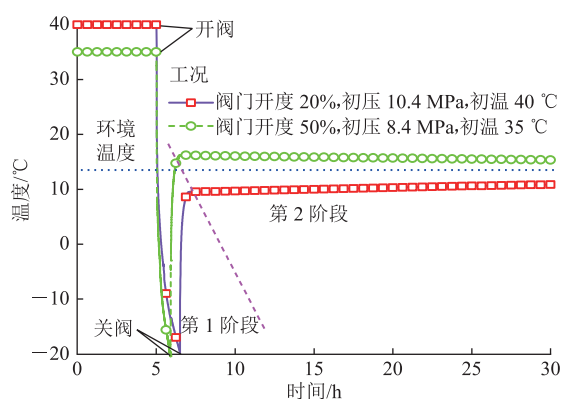


图10 不同工况下放空点处的温度变化曲线  
Fig. 10 Curves of temperature changes at the vent point corresponding to different conditions

根据不同工况下的关阀回温时长(图11)可知,阀门开度较小时,关阀回温时长短,这是由于在小开度下,关阀回温过程开始时,管内介质的温度分布已经趋于均匀,且温度值较低(图9),导致轴向换热阶段持续时间较短。随着阀门开度增大,关阀回温时长会增加并趋于稳定。

根据不同工况下关阀回温过程结束后干线管道放空段的压力、温度分布图(图12、图13)可知,关阀回温过程结束后,干线管道的压力、温度分布基本趋于均匀,管内介质处于饱和状态,压力与温度呈现一一对应关系。阀门开度越大,干线的压力、温度水平越高;阀门开度越小,干线的压力、温度水平越低。关阀回温

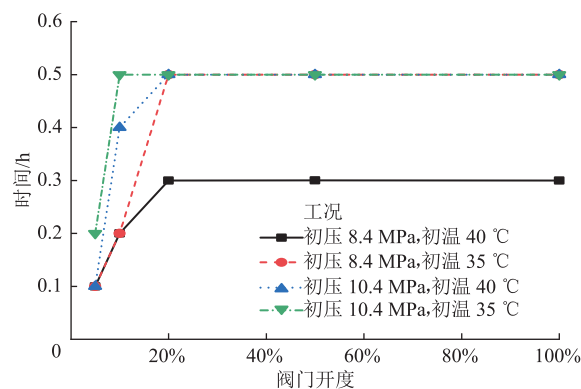


图11 不同工况下的关阀回温时间变化曲线  
Fig. 11 Durations of temperature escalation post valve closure corresponding to different conditions

过程结束时干线管道放空段的温度、压力与图8、图9中15~30 km处的温度、压力基本一致,说明关阀回温中的传热回温过程主要发生在上游管道。此外,若首次放空的阀门开度过小,关阀回温过程结束时管道温度水平整体较低,将导致下一次放空过程的允许温降幅度过小,放空点处温度将很快达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,不利于管内介质的迅速放空;若首次放空的阀门开度过大,关阀回温过程结束时管道温度水平整体较高,尽管下一次放空过程允许温降幅度较大,但是根据前述分析,阀门开度大,放空总量小,剩余管存量较大,且压力水平高,同样不利于管内介质的迅速放空。故首次放空阀门开度的确定需综合考虑关阀回温过程的时长与关阀回温过程结束后管道的温度水平两方面的因素。

## 2.3 间歇放空全过程

以边界1压力为10.4 MPa、温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,选取首次放空阀门开度为20%的工况对后续间歇放空过程进行分析。从平均放空速率与放空各阶段的温度分布情况来看,选取20%作为首次放空阀门开度的原因有:①开度小于20%时,平均放空速率小,放空时间成本高;②开度大于20%时,首次开阀放空总量小,且管道压力水平高,也会导致放空时间增加(表3);③开度为20%,放空点处温度达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,干线管道温度梯度较大(图9c),可充分利用轴向换热,且关阀回温过程结束后干线管道的温度分布接近土壤温度(图13c),有利于减弱径向换热,此时关阀回温时长较阀门开度10%时仅增加了25%(图11)。第5 h时,开始进行间歇放空,计算并绘制间歇放空全过程放空点处压力、温度变化曲线(图14)。由图14b可知,在第8.1 h左右有一次关阀回温过程。关阀后放空点处温度在轴向换热的作用下短时间内由 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回升至 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,之后

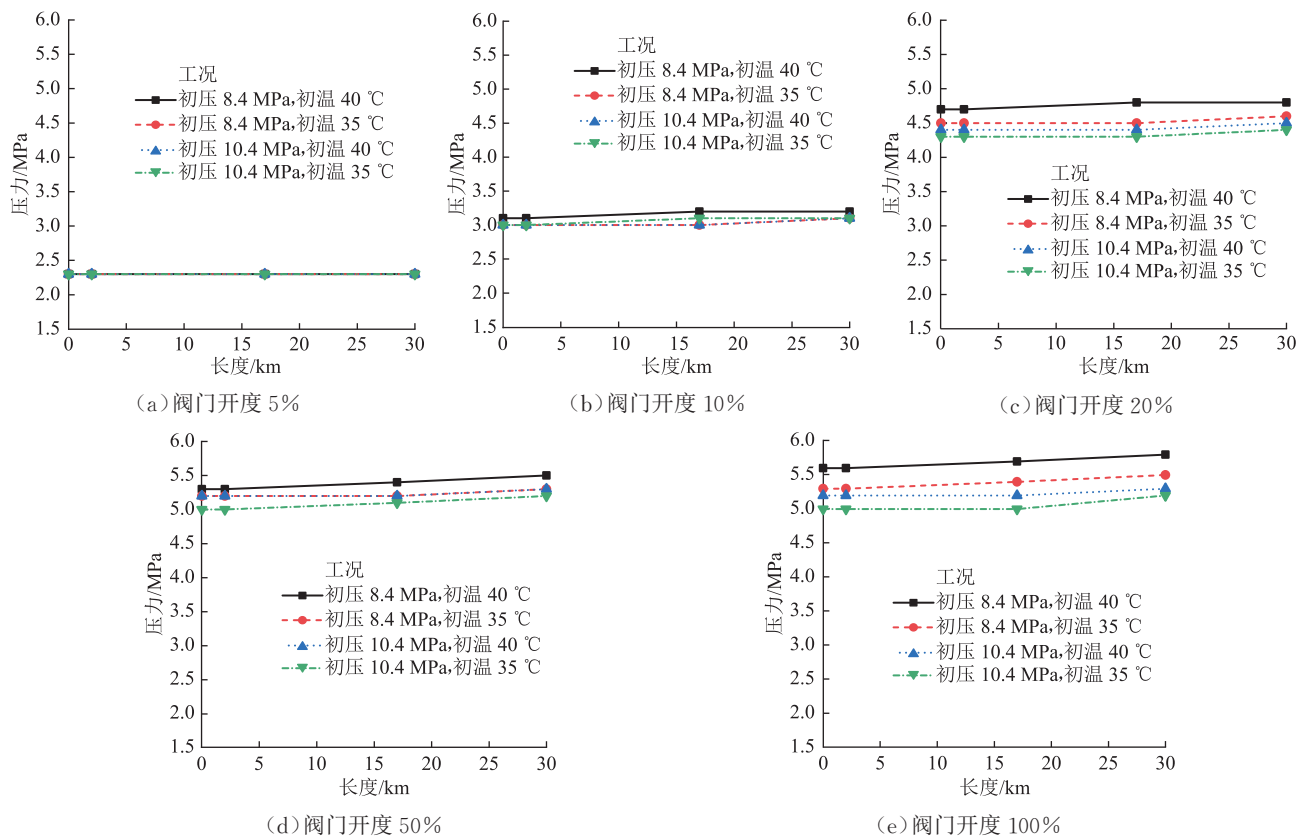


图 12 不同阀门开度下关阀回温过程结束后干线管道放空段的压力分布图

Fig. 12 Pressure profile of trunk pipeline vented segment after temperature escalation post valve closure corresponding to different valve openings

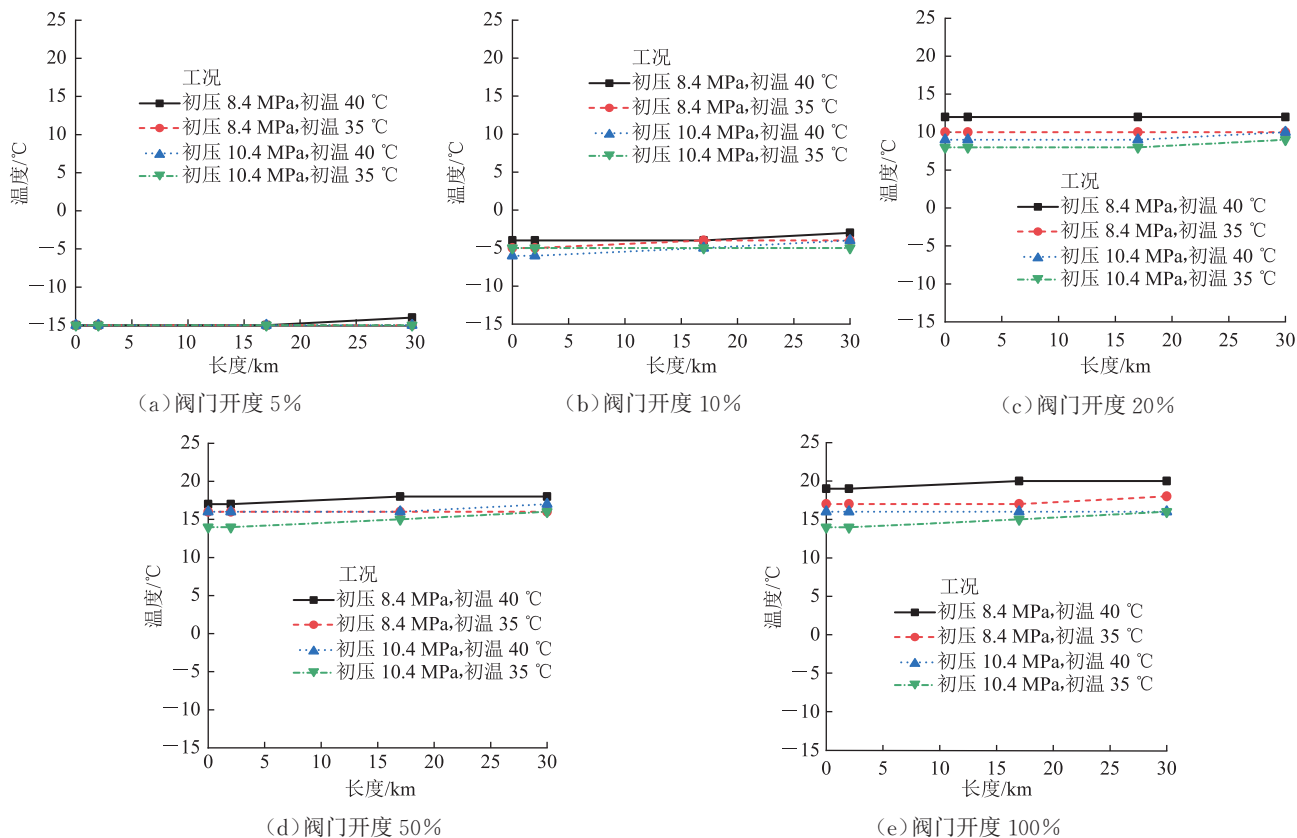


图 13 不同阀门开度下关阀回温过程结束后干线管道放空段的温度分布图

Fig. 13 Temperature profile of trunk pipeline vented segment after temperature escalation post valve closure corresponding to different valve openings



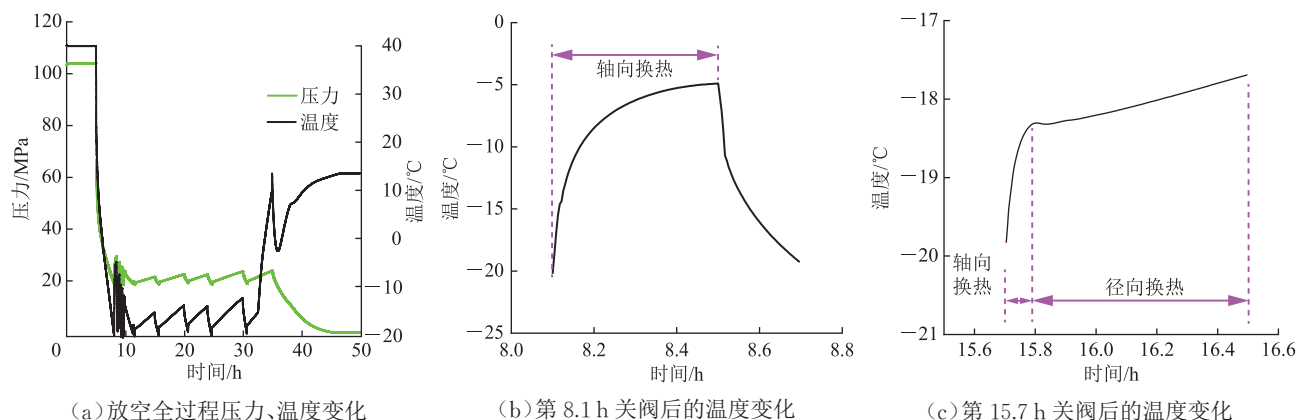


图 14 间歇放空全过程放空点处压力、温度变化曲线

Fig. 14 Curves of pressure and temperature changes at the vent point throughout the intermittent venting process

继续开阀放空,放空点处温度降低。由图 14a 可知,在 12 h 之后,依靠轴向换热作用回温所能达到的温度值越来越接近 $-20^{\circ}\text{C}$ (图 14c 中轴向换热阶段),为保证有效的放空时间,需依靠径向换热使放空点处介质继续回温(图 14c 中径向换热阶段),此时管道中介质的含气率已经达到较高水平,因此依靠径向换热也能获得较高的温升速率。工程实际中可将放空点处的温度或压力与放空阀的动作连锁,开始放空时,控制放空阀开启至一定开度,当放空点温度达到 $-20^{\circ}\text{C}$ 时,关闭放空阀,持续检测放空点的温度升高速率。当其温度升高速率明显降低时,控制放空阀开启继续放空,重复上述控制过程,直至管内介质压力降至大气压力,放空结束。整个放空过程需合理设定放空阀每次动作的开度,放空阀开度过小或过大,均会导致放空时间过长。同时,若放空阀开度过大,会导致放空点处温度达到 $-20^{\circ}\text{C}$ 的时间很短,对自动控制系统的可靠性要求更高。

### 3 结论及建议

目前,对于 CO<sub>2</sub> 管道如何安全放空,国内外相关标准未做详细规定。根据前述分析,在保证放空管道温度不低于 $-20^{\circ}\text{C}$ 的条件下,提出以下结论与建议:

1) 为保证放空时干线管道不超过低温限制,与之前的研究相比,明确提出应采用间歇放空的方式做放空设计。即开启放空阀放空,当放空点温度达到 $-20^{\circ}\text{C}$ 时,关闭放空阀,利用轴向换热与径向换热使管内介质回温,并重复上述过程直至管内压力降至大气压力。工程实际应用中可将放空点的温度或压力与放空阀的动作连锁,但是为保证控制的可靠性且尽可能缩短放空总时长,需要合理设定放空阀每次动作的开度。

2) 从放空过程来看,间歇放空时放空阀开度的确定需综合考虑放空点处温度达到 $-20^{\circ}\text{C}$ 时的平均放空速率与管道整体压力水平两方面的因素。从回温过程来看,间歇放空时放空阀开度的确定需综合考虑关阀回温过程的时长与关阀回温过程结束后放空管道的温度水平两方面的因素。放空阀开度过小或过大均会导致放空时间过长。

3) 停止放空时,管内介质温度的回升主要靠轴向对流换热与径向换热两个过程,轴向对流换热的速率大于径向换热的速率。初始放空阶段,轴向换热起主导作用,后续放空阶段,径向换热起主导作用。

4) 通过研究放空阀开度与管内介质温度及压力变化的关系,分析了停止放空时管内介质温度回升的原因,对超临界 CO<sub>2</sub> 管道放空方案的制定具有指导意义。研究发现,放空时,初始温度越高、压力越低,管内介质温降越快,可以从热力状态及过程的角度进行深入解释。对于放空问题的研究,建议从系统的角度出发,综合考虑管内减压过程、管口射流过程以及管外扩散过程,合理设置放空系统参数与放空方案,保证管材低温要求与扩散安全距离要求等。

#### 参考文献:

- [1] 杨腾,李玉星,王海峰,衣华磊,柳歆,胡其会,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(增刊 2): 101-107.  
YANG T, LI Y X, WANG H F, YI H L, LIU X, HU Q H, 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.
- [2] 喻健良,郑阳光,闫兴清,郭晓璐,曹琦,朱海龙,等. 工业规模 CO<sub>2</sub>

- 管道大孔泄漏过程中的射流膨胀及扩散规律[J]. 化工学报, 2017, 68(6): 2298-2305. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20161614.
- YU J L, ZHENG Y G, YAN X Q, GUO X L, CAO Q, ZHU H L, et al. Under-expanded jets and dispersion during big hole leakage of high pressure CO<sub>2</sub> pipeline in industrial scale[J]. CIESC Journal, 2017, 68(6): 2298-2305.
- [3] 殷布泽, 闫锋, 聂超飞, 芦澍, 胡其会, 李玉星. 基于 PHAST 的 CO<sub>2</sub> 露空管道大规模泄漏与放空模拟[J]. 油气与新能源, 2023, 35(6): 82-89. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2023.06.012.
- YIN B Z, YAN F, NIE C F, LU S, HU Q H, LI Y X. Large scale venting and leakage simulation of exposed CO<sub>2</sub> pipelines based on PHAST[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(6): 82-89.
- [4] 张对红, 丛思琦, 胡其会, 程磊, 列斯别克·塔拉甫别克, 韩辉, 等. 初始温压对超临界/密相 CO<sub>2</sub> 管道泄放的影响实验[J]. 油气储运, 2024, 43(3): 281-288. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.03.004.
- ZHANG D H, CONG S Q, HU Q H, CHENG L, TALAFUBIEKE L S B K, HAN H, et al. Experiments on the influence of initial temperature and pressure on the relief of supercritical/dense-phase CO<sub>2</sub> pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(3): 281-288.
- [5] 柳歆, 王海锋, 杨腾, 胡其会, 殷布泽, 李玉星, 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. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.04.003.
- LIU X, WANG H F, YANG T, HU Q H, YIN B Z, LI Y X, et al. Numerical simulation of high-pressure carbon dioxide pipeline venting and safe release[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(4): 387-394.
- [6] 李玉星, 滕霖, 王武昌, 胡其会, 赵青, 李顺利. 不同相态管输 CO<sub>2</sub> 的节流放空实验[J]. 天然气工业, 2016, 36(10): 126-136. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2016.10.016.
- LI Y X, TENG L, WANG W C, HU Q H, ZHAO Q, LI S L. An experimental study on throttling and blowdown of pipeline CO<sub>2</sub> in different phase states[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10): 126-136.
- [7] 顾帅威, 李玉星, 滕霖, 王财林, 胡其会, 张大同, 等. 小尺度超临界 CO<sub>2</sub> 管道小孔泄漏减压及降温特性[J]. 化工进展, 2019, 38(2): 805-812. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2018-0961.
- GU S W, LI Y X, TENG L, WANG C L, HU Q H, ZHANG D T, et al. Decompression and temperature drop characteristics of small-scale supercritical CO<sub>2</sub> pipeline leakage with small holes[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(2): 805-812.
- [8] TENG L, LI Y X, HU Q H, ZHANG D T, YE X, GU S W, et al. Experimental study of near-field structure and thermo-hydraulics of supercritical CO<sub>2</sub> releases[J]. Energy, 2018, 157: 806-814. DOI: 10.1016/j.energy.2018.04.195.
- [9] 李顺利, 潘红宇, 李玉星, 滕霖, 张大同. 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. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.11.017.
- LI S L, PAN H Y, LI Y X, TENG L, ZHANG D T. 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.
- [10] 朱国承, 曹琦, 王萌, 喻健良, 闫兴清, 于帅, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 管道泄漏扩散风险分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1486-1494. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2020.1825.
- ZHU G C, CAO Q, WANG M, YU J L, YAN X Q, YU S, et al. Risk analysis of supercritical CO<sub>2</sub> release and diffusion[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1486-1494.
- [11] 郭晓璐, 喻健良, 闫兴清, 徐鹏, 徐双庆. 超临界 CO<sub>2</sub> 管道泄漏特性研究进展[J]. 化工学报, 2020, 71(12): 5430-5442. DOI: 10.11949/0438-1157.20200453.
- GUO X L, YU J L, YAN X Q, XU P, XU S Q. Research progress on leakage characteristics of supercritical CO<sub>2</sub> pipeline[J]. CIESC Journal, 2020, 71(12): 5430-5442.
- [12] 喻健良, 刘长远, 闫兴清, 曹琦, 刘少荣. 高压超临界 CO<sub>2</sub> 管道泄漏扩散灾害模拟[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1495-1502. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.0159.
- YU J L, LIU C Y, YAN X Q, CAO Q, LIU S R. Simulation research of leakage and diffusion disaster in high-pressure supercritical CO<sub>2</sub> pipelines[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1495-1502.
- [13] 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. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.06.044.
- [14] DE KOEIJER G, BORCH J H, DRESCHER M, LI H L, WILHELMSEN Ø, JAKOBSEN J. CO<sub>2</sub> transport-depressurization, heat transfer and impurities[J]. Energy Procedia, 2011, 4: 3008-3015. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.211.
- [15] HAN S H, KIM J, CHANG D. An experimental investigation of liquid CO<sub>2</sub> release through a capillary tube[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 4724-4730. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.381.

- [16] HAN S H, CHANG D, KIM J, CHANG W. Experimental investigation of the flow characteristics of jettisoning in a CO<sub>2</sub> carrier[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2014, 92(1): 60–69. DOI: 10.1016/j.psep.2013.10.003.
- [17] WAREING C J, FAIRWEATHER M, FALLE S A E G, WOOLLEY R M. Validation of a model of gas and dense phase CO<sub>2</sub> jet releases for carbon capture and storage application[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 20: 254–271. DOI: 10.1016/j.ijggc.2013.11.012.
- [18] WEN J, HEIDARI A, XU B P, JIE H E. Dispersion of carbon dioxide from vertical vent and horizontal releases: A numerical study[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2013, 227(2): 125–139. DOI: 10.1177/0954408913480078.
- [19] XIE Q Y, TU R, JIANG X, LI K, ZHOU X J. The leakage behavior of supercritical CO<sub>2</sub> flow in an experimental pipeline system[J]. *Applied Energy*, 2014, 130: 574–580. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.088.
- [20] LI K, ZHOU X J, TU R, XIE Q Y, JIANG X. The flow and heat transfer characteristics of supercritical CO<sub>2</sub> leakage from a pipeline[J]. *Energy*, 2014, 71: 665–672. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.005.
- [21] LOG A M, HAMMER M, MUNKEJORD S T. A flashing flow model for the rapid depressurization of CO<sub>2</sub> in a pipe accounting for bubble nucleation and growth[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2024, 171: 104666. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104666.
- [22] LOG A M, HAMMER M, DENG H, AUSTEGARD A, HAFNER A, MUNKEJORD S T. Depressurization of CO<sub>2</sub> in a pipe: effect of initial state on non-equilibrium two-phase flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2024, 170: 104624. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104624.
- [23] HAMMER M, DENG H, AUSTEGARD A, LOG A M, MUNKEJORD S T. Experiments and modelling of choked flow of CO<sub>2</sub> in orifices and nozzles[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2022, 156: 104201. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104201.
- [24] NORDHAGEN H O, MUNKEJORD S T, HAMMER M, GRUBEN G, FOURMEAU M, DUMOULIN S. A fracture-propagation-control model for pipelines transporting CO<sub>2</sub>-rich mixtures including a new method for material-model calibration[J]. *Engineering Structures*, 2017, 143: 245–260. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.04.015.
- [25] MUNKEJORD S T, DENG H, AUSTEGARD A, HAMMER M, AASEN A, SKARSVÅG H L. 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. DOI: 10.1016/j.ijggc.2021.103361.

(编辑:祁梦瑶)

**基金项目:**新疆维吾尔自治区“一事一议”引进战略人才项目“安全高效超临界 CO<sub>2</sub> 管道建设关键技术与应用”,XQZX20240054;新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目“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;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;新疆天山创新团队“油气高效管输技术研究与创新团队”,2022TSYCTD0002;新疆维吾尔自治区 2022 年度“天池英才”引进入选人员项目“超临界 CO<sub>2</sub> 长距离输送管道运行安全保障关键技术研究”,TCYC12。

**作者简介:**张文辉,男,1994 年生,讲师,2019 年硕士毕业于中国石油大学(北京)石油与天然气工程专业,现主要从事油气管道输送工艺等方面的研究工作。地址:新疆克拉玛依市克拉玛依区安定路 355 号,834000。电话:0990-6633353。Email:zhangwh@cupk.edu.cn

**通信作者:**邢晓凯,男,1970 年生,教授,2015 年博士毕业于北京工业大学热能工程专业,现主要从事油气管道输送工艺、多相流与地面集输等方面的研究工作。地址:新疆克拉玛依市克拉玛依区安定路 355 号,834000。电话:0990-6633315。Email:xingxk2002@cup.edu.cn

• Received: 2024-01-31

• Revised: 2024-03-06

• Online: 2024-03-25

