

中文引用格式:辛保泉,党文义,喻健良,等. 泄漏孔径对气相 CO<sub>2</sub> 管道压降及扩散影响试验[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(2): 152-159.

英文引用格式: XIN Baoquan, DANG Wenyi, YU Jianliang, et al. Test on influence of leakage hole size on pressure drop and dispersion of gas-phase CO<sub>2</sub> pipelines[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(2): 152-159.

## 泄漏孔径对气相 CO<sub>2</sub> 管道压降及扩散影响试验\*

辛保泉<sup>1,2,3</sup>工程师, 党文义<sup>1,2</sup>正高级工程师, 喻健良<sup>4</sup>教授,  
葛春涛<sup>1,2,3</sup>高级工程师, 曹琦<sup>1,2</sup>

(1 化学品安全全国重点实验室, 山东 青岛 266071; 2 中石化安全工程研究院有限公司, 山东 青岛 266071; 3 中石化国家石化项目风险评估技术中心有限公司, 山东 青岛 266071; 4 大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116024)

中图分类号: X937 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.02.0598

资助项目: 中国石化科技部资助项目(A-671)。

**【摘要】** 为探究不同孔径时的气相 CO<sub>2</sub> 输送管道泄漏扩散特征, 基于工业级管道开展 50、100 和 233 mm 孔径的室外 CO<sub>2</sub> 泄漏试验。首先, 根据压降试验分析管内压力随泄漏时间的变化特征; 然后, 基于建立的理论模型预测泄漏流量和压降变化, 并通过试验进行验证; 最后, 分析泄漏口不同位置的 CO<sub>2</sub> 体积分数变化。结果表明: 在泄漏第 I 阶段压降速率最大, 3 类泄漏孔径的压降速率为 93.4~1967.5 kPa/s; 3 类泄漏孔径的管内压力下降至环境压力所需时间为 14.2~149.8 s, 随着泄漏孔径增加, 压降过程趋近于断崖式下降; 3 类孔径计算得出的泄漏量与试验实际释放量的相对误差为 0.25%~4.54%; 基于预测模型获得的压降曲线整体上略低于试验压降曲线, 但压降变化趋势及持续时间等均与试验结果非常接近, 表明建立的泄漏量和压降预测模型较为可靠; 在距离泄漏口 5~17 m 范围内体积分数峰值随泄漏孔径的增大显著增加, 17 m 范围外不同泄漏孔径体积分数峰值趋近相同; 5% 体积分数的气相 CO<sub>2</sub> 泄漏扩散影响距离为 26 m。

**【关键词】** 泄漏孔径; CO<sub>2</sub> 管道; 压降; 扩散; 泄漏量; 泄漏试验

### Test on influence of leakage hole size on pressure drop and dispersion of gas-phase CO<sub>2</sub> pipelines

XIN Baoquan<sup>1,2,3</sup>, DANG Wenyi<sup>1,2</sup>, YU Jianliang<sup>4</sup>, GE Chuntao<sup>1,2,3</sup>, CAO Qi<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Chemical Safety, Qingdao Shandong 266071, China; 2 SINOPEC Research Institute of Safety Engineering Co., Ltd., Qingdao Shandong 266071, China; 3 SINOPEC National Petrochemical Project Risk Assessment Technical Center Co., Ltd., Qingdao Shandong 266071, China; 4 School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

**Abstract:** In order to investigate the leakage and dispersion patterns of gas-phase CO<sub>2</sub> transport pipelines with different hole sizes, outdoor CO<sub>2</sub> leakage test with apertures of 50 mm, 100 mm and 233 mm were carried out based on industrial pipelines. Firstly, according to the pressure drop experiment, the variation

law of the pressure in the pipe with the leakage time was analyzed. Then, based on the established theoretical model, the leakage flow and pressure drop changes were predicted and verified by experiments. Finally, the variation of CO<sub>2</sub> volume fraction at different positions of the leakage port was studied. The result shows that the pressure drop rate in the first stage of leakage is the largest. Among them, the pressure drop rate of the three leakage hole sizes is 93.4–1967.5 kPa/s. It takes 14.2–149.8 s for the pressure in the pipe with three leakage hole sizes to drop to the ambient pressure. With the increase of the leakage hole size, the pressure drop process tends to be a cliff type drop. According to the established theoretical model, the relative error between the calculated leakage quality and the experimental actual release is 0.25%–4.54%. The pressure drop curve obtained based on the predictive model is generally slightly lower than the experimental pressure drop curve. However, the variation trend and duration of pressure drop are very close to the experimental results. It shows that the established theoretical method for predicting leakage quality and pressure drop is reliable. In the range of 5–17 m from the leakage port, the peak volume fraction increased significantly with the increase of the leakage hole size. The peak volume fraction of different leakage hole size outside the range of 17 m approaches the same. The dispersion distance of 5% volume fraction of gaseous CO<sub>2</sub> leakage is 26 m.

**Keywords:** leakage hole size; carbon dioxide pipeline; pressure drop; dispersion; leakage quality; leakage test

## 0 引言

CO<sub>2</sub> 捕集、利用与封存 (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage, CCUS) 技术是实现碳中和的关键技术<sup>[1]</sup>, 气相 CO<sub>2</sub> 管道压力输送具有经济、实用等优势, 目前是我国 CCUS 项目的主要输送方式<sup>[2-3]</sup>。由于 CO<sub>2</sub> 介质的特殊性和压力输送特点, 大规模 CO<sub>2</sub> 输送管道的运行安全性和可靠性引起社会广泛关注<sup>[4]</sup>。在管道输送过程中, 一旦发生意外泄漏, 在泄漏口处附近由于剧烈的焦耳汤姆逊效应将导致严重的低温危害<sup>[5-6]</sup>, 同时由于 CO<sub>2</sub> 无色无味, 泄漏后会因重气效应向低洼处聚集且不易被察觉, 体积分数超过一定阈值会对人群造成窒息等危害<sup>[7-8]</sup>。因此, 开展 CO<sub>2</sub> 管道泄漏特性研究对于安全防控具有重要意义。

近年来, 国内外学者针对 CO<sub>2</sub> 管道泄漏特性进行了大量研究。AHMAD 等<sup>[9]</sup>通过长 1 320.8 m、直径 117.1 mm 储存管道外接循环管道进行埋地密相 CO<sub>2</sub> 管道破裂试验, 测量得到射流云最大高度可达 60 m, 释放最低温度可达 -78 °C。WOOLLEY 等<sup>[10]</sup>基于 2 m<sup>3</sup> 球形储罐研究液相 CO<sub>2</sub> 泄漏射流和远场扩散, 发现近场体积分数测量结果与 BRICH 等<sup>[11]</sup>提出的体积分数衰减理论计算结果相近。LIU Zhenyi 等<sup>[12]</sup>进行了埋地 CO<sub>2</sub> 管道孔泄漏试验, 研究了泄漏口附近不同位置处的土壤温度变化。FAN

Xing 等<sup>[13]</sup>开展了超临界 CO<sub>2</sub> 从容器中的泄漏射流试验, 研究上游压力和喷嘴结构对于泄漏质量流量影响, 建立了经验相关性模型。TENG Lin 等<sup>[14]</sup>基于试验室条件下的可控泄漏装置分析了超临界 CO<sub>2</sub> 在不同形状泄漏口下所形成的冲击波结构。GUO Xiaolu 等<sup>[6]</sup>基于大型管道研究了超临界释放过程中近场射流和远场扩散行为, 为工业化管道建设提供基础数据。除试验外, 相关学者也进行了大量理论和模型研究。LIU Xiong 等<sup>[15]</sup>提出 2 阶段模型的计算方法, 将真实气体状态方程引入计算程序, 优化程序计算时间, 能够更精确预测泄漏源泄放强度。HU Yanwei 等<sup>[16]</sup>开展了全孔径 CO<sub>2</sub> 泄漏试验, 基于非均质假设和扩散源假设, 采用继承方法分段建立射流和扩散计算模型。目前国内外学者主要基于超临界相和液相 CO<sub>2</sub> 管道对其泄漏进行了大量研究, 但由于我国 CO<sub>2</sub> 管道建设起步较晚, 国内 CO<sub>2</sub> 管道目前仍主要基于油气田集输管道、以气态形式输送。早期建成的齐鲁石化至正理庄油田 75 km 运输管道以及大庆油田建立的 6.5 km CO<sub>2</sub> 运输管道均为气相输运管道<sup>[17-20]</sup>。因此, 气相 CO<sub>2</sub> 管道的泄漏特性仍是当前及今后相当一段时间内的重要研究内容。

合理确定管内压降变化、泄漏量和管外区域体积分数, 是定量计算 CO<sub>2</sub> 管道风险的关键内容。因此, 通过工业级管道气相 CO<sub>2</sub> 泄漏试验, 测量管内压力、管外体积分数变化; 基于管道试验结果, 研究气相 CO<sub>2</sub> 在不同泄漏孔径条件下压降变化, 提出泄

漏量和压降预测方法,以期为气相 CO<sub>2</sub> 输送管道泄漏风险定量评估和应急管理提供依据。

### 1 管道泄漏试验装置和条件

#### 1.1 管道泄漏试验装置设计

试验基于搭建的试验装置进行,通过控制初始压力和温度实现 CO<sub>2</sub> 的气相释放。试验装置主管道长 258 m,规格为 Φ273 mm×20 mm,设计压力为 16 MPa,包括主管道、双膜爆破装置、加热装置和数据采集系统等<sup>[5]</sup>,装置如图 1 所示。在主管道上设置有信号采集系统、分段加热温控系统以及双膜起爆系统。试验介质由 CO<sub>2</sub> 罐车直接向主管道注入,通过罐车自重变化,每次试验向管道注入约 0.9 t CO<sub>2</sub> 介质,通过管道外缠绕加热带加热使得管内介质达到试验条件。在泄漏口端通过不同口径的法兰盘实现不同孔径的泄放,管道末端采用双膜爆破装置,通过控制 2 个爆破片之间压力差实现泄漏过程的安全、可控、高速开启。试验过程中将管内参数和外场数据分别传输至采集系统,实时记录试验数据。

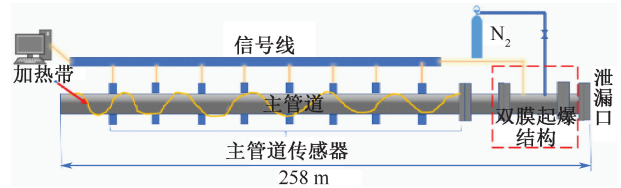


图 1 管道泄漏试验装置

Fig.1 Schematic diagram of pipeline leakage test device

#### 1.2 泄漏试验数据采集

在管道内布置压力传感器,在外场区域主要布置温度和体积分数传感器,其侧点位置距离泄漏口的位置变化如图 2 所示。温度传感器型号为 K 型热电偶,沿管道轴线方向分布,由外部装置支撑热电偶实现泄漏口同一水平高度处温度测量,其低温测量可至 -200 ℃,响应时间为 0.2 s;体积分数传感器贴近地面分布,通过红外光谱实现空气中 CO<sub>2</sub> 体积分数测量,其响应时间为 4 s,量程 0%~100%,监测精度 0.01%。

#### 1.3 泄漏试验初始条件

考虑泄漏孔径对于泄漏规律的影响,根据均匀分布原则选取 3 类代表性失效场景:小孔(50 mm)、中孔(100 mm)以及管道断裂(233 mm),孔径比分别为 0.21、0.43 和 1,孔口形状为规则圆形。当地平均风速约 1 m/s,湿度 83%。管道初始压力和温度结合真实管道实际运行条件确定,除泄漏孔径这

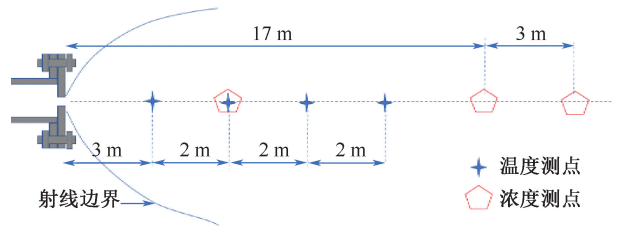


图 2 测点位置

Fig.2 Schematic diagram of measurement point positions

一变量外,3 类失效场景的其他初始条件尽量保持一致。最终,管内实测压力、温度及环境温度等试验初始条件见表 1。

表 1 试验初始条件

Table 1 Initial conditions for experiment

试验编号	初始压力/MPa	初始温度/℃	泄漏孔径/mm	环境温度/℃
T1	4	33.4	50	28
T2	4	34.5	100	28
T3	3.6	32.7	233	22.7

### 2 管道压降及扩散影响

#### 2.1 管内压降变化

图 3 所示为 3 种泄漏孔径下的管内 CO<sub>2</sub> 压降变化。

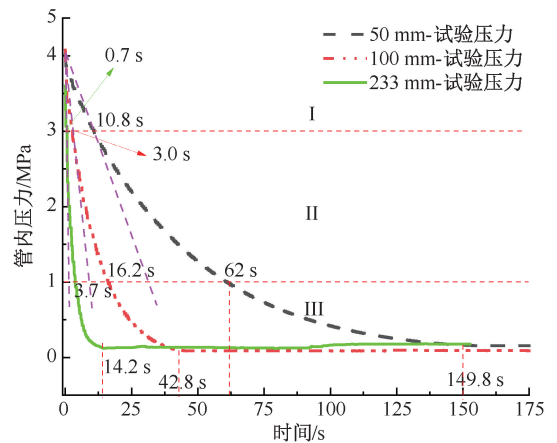


图 3 3 种泄漏孔径时的管道内压降变化

Fig.3 Pressure drop variation in pipeline with 3 types of leakage hole size

根据图 3 可知:管内减压过程可分为 3 个阶段。第 I 阶段为初始泄漏阶段,该阶段压降速率最大,泄漏孔径从小到大压降速率分别为 93.4、370、1 967.5 kPa/s。第 II 阶段为快速减压阶段,该阶段内,泄漏孔径更大的 100 和 233 mm,压降速率几乎保持稳定,处于阻塞流动状态;50 mm 孔径由于泄漏

速率相对更慢,管内压力尚未稳定。泄漏孔径 50、100 和 233 mm 时的管内压力从 3 MPa 减压至 1 MPa 所需时间分别为 51.2、13.2 和 3 s。第 III 阶段为缓慢压降阶段,随着 CO<sub>2</sub> 的泄漏,压降速率趋于平缓,直至管内压力逐渐趋近于环境压力。在 50、100 和 233 mm 泄漏孔径时,CO<sub>2</sub> 管内减压过程分别持续了大约 149.8、42.8 和 14.2 s。

由图 3 表明:在第 I 阶段内,随着泄漏孔径增加,压力陡降程度逐渐趋近于断崖式下降过程,与密相和超临界泄漏不同的是,气相泄漏初始阶段不会发生管内相态改变,初始压降速率主要由泄漏孔径决定。在瞬时泄放时,压力气体由静止状态转变为高速流动状态,并经泄漏口喷出管外,管内介质受到强烈扰动,将静压能转换,导致管内介质由静止瞬时转向高速流动状态,压力急剧下降。泄漏孔径越大,对管内扰动越大,管内压力陡降越明显。得出气相压降速率与孔径比( $d/D$ )满足关系:

$$\Delta P_s \propto \left(\frac{d}{D}\right)^{1.8 \sim 1.9} \quad (1)$$

式中: $\Delta P_s$  为压降速率,MPa/s;  $d$  为泄漏孔径,mm;  $D$  为管道内径,mm。

## 2.2 泄漏量及压降预测分析

气相长输管道泄漏一般分为孔泄漏和管道断裂场景,其泄漏过程可简化为气体在管内进行绝热等熵的一维流动过程,忽略摩擦因素。由于带压 CO<sub>2</sub> 气体具有一定的压缩性,引入压缩因子,并设其为常数,整合能量方程和动量方程,并结合连续性方程,得到初始稳态临界流动流量计算式<sup>[20]</sup>:

$$Q = C_d A P \sqrt{\frac{M\gamma}{ZRT} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2)$$

式中: $Q$  为初始质量流量,kg/s;  $C_d$  为排放系数,圆孔临界流动取 1;  $A$  为泄漏孔面积,m<sup>2</sup>;  $P$  为管内初始压力,MPa;  $M$  为泄漏气体的分子量,kg/mol;  $\gamma$  为气体绝热指数;  $Z$  为气体压缩因子;  $R$  为理想气体常数,J/(mol·K);  $T$  为管内初始温度,K。

受 CO<sub>2</sub> 管道泄漏存储当量限制,泄漏是非稳态过程,通过在初始泄漏流率基础上添加时间相关项,构建适合气相 CO<sub>2</sub> 管道泄漏的全过程泄漏流量计算模型。将 3 类失效场景分为孔泄漏(50 和 100 mm)和管道断裂 2 类。在孔泄漏场景中,基于无量纲时间,计算质量流速随时间变化,相关计算见下式<sup>[21]</sup>:

$$\beta = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3)$$

$$t_r = C_d \times A \times \frac{\beta \times t}{Q} \sqrt{\rho \times P} \times \alpha \quad (4)$$

$$\dot{m}_r = [1 + 0.5(\lambda + 1) \times t_r]^{-\left(\frac{\lambda+1}{\lambda-1}\right)} \quad (5)$$

$$Q_t = \dot{m}_r \cdot Q \quad (6)$$

式中: $\alpha$  为孔径影响系数, $\alpha = (d/D)^N$ ,50、100 mm 泄漏孔径的  $N$  分别取 0.9、1.6;  $t$  为泄漏时间,s;  $\rho$  为初始密度,kg/m<sup>3</sup>;  $t_r$  为无量纲时间;  $Q_t$  为随时间变化的质量流率,kg/s。

在管道断裂场景时,基于经验“双指数”模型,其气相释放速率随时间变化见下式<sup>[21]</sup>:

$$Q_t = \frac{Q}{1 + \frac{M_0}{Q \times B}} \times$$

$$\left( \exp\left(\frac{-t \times B \times Q^2}{M_0^2}\right) + \frac{M_0}{Q \times B} \times \exp\left(\frac{-t}{B}\right) \right) \quad (7)$$

$$B = 0.67 \frac{L}{u_s} \sqrt{\frac{\gamma \times f_D \times L}{D}} \quad (8)$$

$$f_D = \left[ -2 \times \lg\left(\frac{\varepsilon}{3.715 \times D}\right) \right]^{-2} \quad (9)$$

$$M_0 = \rho \times A_0 \times L \quad (10)$$

$$u_s = \sqrt{\frac{\gamma \times R \times T}{M}} \quad (11)$$

式中: $M_0$  为管道内介质存储量,kg;  $B$  为时间常数;  $L$  为管道长度,m;  $u_s$  为当地音速,m/s;  $f_D$  为管道摩擦因数;  $\varepsilon$  为绝对粗糙度,新无缝钢管一般取 0.01~0.02;  $A_0$  为管道横截面积,m<sup>2</sup>。

将试验中 50、100 和 233 mm 泄漏孔径的初始条件带入上述公式计算,获得不同孔径下的质量流量变化如图 4 所示。结果显示,初始质量流量分别为 27.3、110.5 和 518.4 kg/s,质量流量的时变速率随泄漏孔径的增加逐渐增大。

将质量流量对时间进行积分,得到计算泄漏总质量,见表 2。与试验介质总质量比较可知:相对误差均低于 5%,精度满足工程应用。

表 2 泄漏总质量对比

Table 2 Comparison of total leakage mass

编号	计算总质量/kg	试验总质量/kg	相对误差/%
T1	999	976.55	2.30
T2	1 013	968.99	4.54
T3	856.6	854.5	0.25

整理式(2),得到压力随时间变化的近似计算见下式,代入上述质量流量,计算得到压降变化曲线,如图 5 所示。

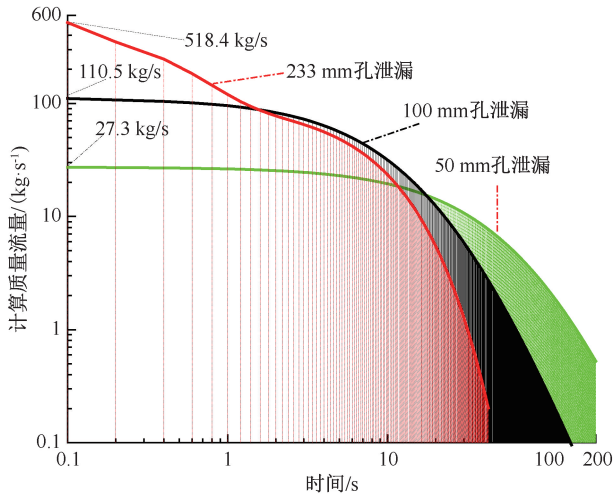


图4 3种孔径下的流量变化

Fig. 4 Variation of flow rate under 3 types of hole size

$$P_t = \frac{Q_t}{C_d A \sqrt{\frac{M\gamma}{ZG_g T} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}} \quad (12)$$

式中  $P_t$  为时间  $t$  时的管内压力, MPa。

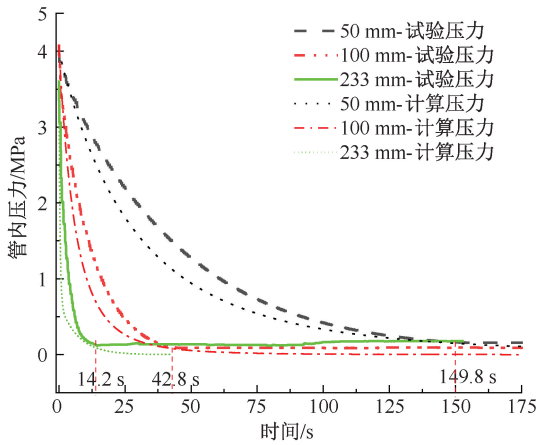


图5 不同孔径计算压降与试验压降对比

Fig. 5 Comparison between calculated pressure drop and experimental pressure drop for different hole sizes

图5表明:计算所得压降曲线整体上略低于试验压降曲线,但压降在3个阶段的变化趋势及管内压力下降至环境压力所需时间,均与试验结果非常接近,表明建立的泄漏量和压降预测方法较为可靠。

### 2.3 泄漏区域扩散结果

根据3组试验监测结果,CO<sub>2</sub>在不同泄漏孔径时,中轴线不同位置的扩散结果如图6—图8所示。

泄漏区域体积分数变化结果表明:受泄放当量限制,在泄漏过程中,泄漏口外部各监测点的CO<sub>2</sub>体积分数随时间先快速上升后缓慢下降,但维持高

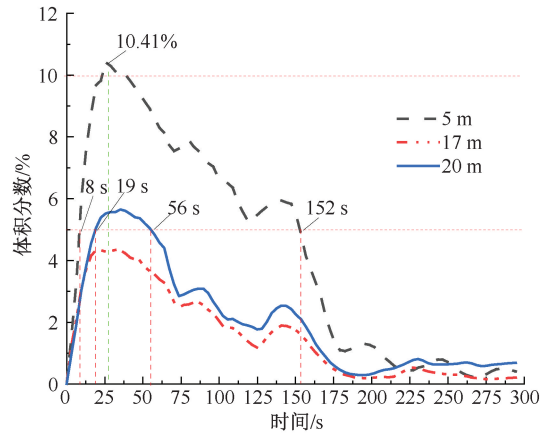


图6 50 mm孔径的CO<sub>2</sub>体积分数

Fig. 6 CO<sub>2</sub> volume fraction for 50 mm hole size

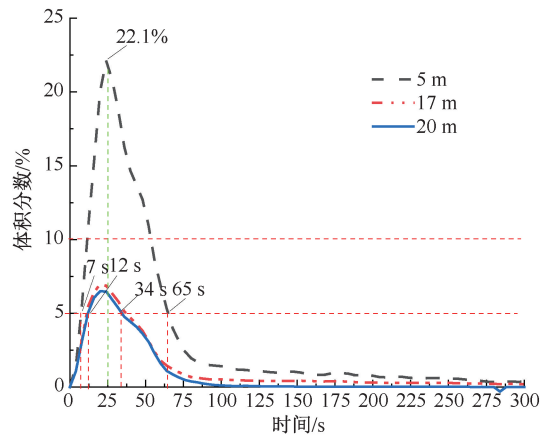


图7 100 mm孔径的CO<sub>2</sub>体积分数

Fig. 7 CO<sub>2</sub> volume fraction for 100 mm hole size

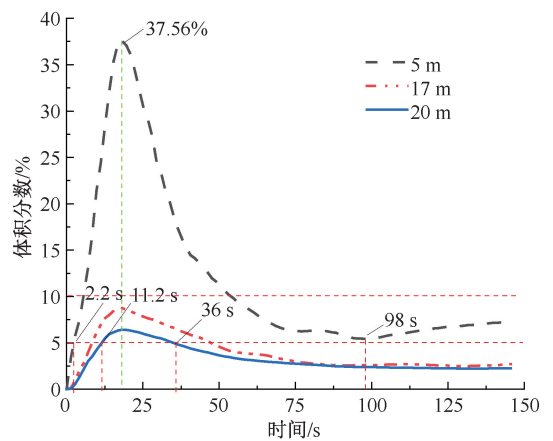


图8 233 mm孔径的CO<sub>2</sub>体积分数

Fig. 8 CO<sub>2</sub> volume fraction for 233 mm hole size

体积分数的持续时间逐渐缩短。监测数据表明:最大体积分数峰值均在距离泄漏口最近的5 m测点处,泄漏孔径50、100和233 mm时的体积分数最大峰值分别为10.41%、22.1%和37.56%。相比于其

他测点最大体积分数,5 m 处峰值前后体积分数变化较快。

环境中的 CO<sub>2</sub> 体积分数在 5% 附近会威胁生命健康,5%~10% 之间会导致头晕头疼等一系列身体不适,大于 10% 会造成窒息以及死亡等危险,因此,将 5% 体积分数作为泄漏口外场安全距离阈值体积分数<sup>[5-6]</sup>。试验 T1、T2 和 T3 在 5 m 处暴露于危险阈值体积分数的时间分别为 8~152、7~65 和 2.2~98 s。在 20 m 处暴露于危险阈值体积分数的时间分别为 19~56、12~34 和 11.2~36 s。综合考虑外场射流冲击和危险阈值体积分数持续时间,建议对不同泄漏孔径下 5~20 m 区域内的危险控制时间不低于 152 s。

图 9 为不同泄漏孔径下中心轴线上不同位置上的最大体积分数测量值和体积分数预测曲线;采用下式拟合 5 m 外轴线上最大体积分数:

$$Y_c = a \cdot X^b \quad (13)$$

式中:Y<sub>c</sub> 为 CO<sub>2</sub> 体积分数,%;a、b 为控制系数,不同泄漏孔径的控制系数见表 3;X 为轴线方向某位置与泄漏口距离,m。

表 3 控制系数的选取

Table 3 Selection of control coefficient

泄漏孔径/mm	a	b
50	25.39	-0.56
100	95.87	-0.912
233	271.3	-1.23

图 9 表明:随着距离的增加,不同泄漏孔径的最大体积分数均显著降低,且差异逐渐减小并趋于一致。在近泄漏口 5 m 处,泄漏孔径大小对其最大体积分数产生的影响较为明显。随着泄漏孔径增加,该测点处 CO<sub>2</sub> 最大体积分数显著提高。在 17 m 测点处最大体积分数较同组试验 5 m 处有大幅下降,对比不同泄漏孔径在 17 m 处产生的最大体积分数差异也逐渐缩短。在 20 m 处最大体积分数较同组试验 17 m 处体积分数变化幅度较小,不同泄漏孔径下最大体积分数在 20 m 位置出现近似重合现象。这是由于泄漏区域体积分数分布受孔径大小、地形以及气象条件等诸多要素的共同影响。CO<sub>2</sub> 自泄漏口释放到大气中会经历射流和扩散 2 个过程,在射流过程中最大体积分数受射流动能和射流流量影响较大。随着泄漏孔径增大,射流动能和射流流量显著增大,会造成射流影响区域内最大体积分数显著提升。随着距离增加,射流动能快速衰减,最大体积分数也大幅降低。扩散过程中,由于 CO<sub>2</sub> 的重气扩

散效应,易受地形和大气条件影响,体积分数变化较慢,易在低洼处聚积,导致最大体积分数升高。

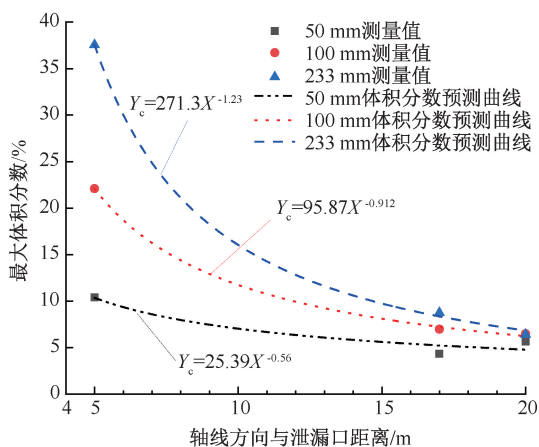


图 9 不同孔径下轴线方向上 CO<sub>2</sub> 最大体积分数对比

Fig. 9 CO<sub>2</sub> comparison of maximum volume

fraction in axial direction under different hole sizes

通过以上最大体积分数变化现象和理论分析,可知:最大体积分数在 17 m 轴线内主要受射流控制,17 m 之后主要受扩散控制。因此,在 5~17 m 之间体积分数急剧下降,在 17~20 m 之间体积分数缓慢降低。由于现场泄漏口下风向 20 m 位置附近存在低洼地形,导致 CO<sub>2</sub> 积聚,造成 50 mm 泄漏孔径时在 20 m 位置出现体积分数上升。由拟合公式计算可得,泄漏孔径 50、100 和 233 mm 时,CO<sub>2</sub> 最大体积分数下降至 5% 的最小距离分别为 18.2 (试验值 > 20 m)、25.5 和 25.7 m。因此,试验中,气相 CO<sub>2</sub> 泄漏的安全防护距离建议至少为 26 m。需要说明的是,泄漏区域的体积分数变化,除了与泄漏初始条件有关,还会受到现场风速、地形条件等多个因素不同程度的影响,具体的安全防护距离应结合实际条件具体分析。

### 3 结论

1) CO<sub>2</sub> 管道泄漏过程可分为 3 个阶段,管内压降速率与孔径比成比例关系,在泄漏孔径 50、100 和 233 mm 时,管内压力下降至环境压力所需时间分别为 149.8、42.8 和 14.2 s。因此,压降对管道泄漏速率的影响不可忽略,在管道定量风险评估时不宜采用恒定泄漏速率。

2) 基于建立的预测模型计算得到泄漏孔径 50、100 和 233 mm 的总泄漏量分别为 999、1 013 和 856.6 kg,与试验初始管道介质总质量相对误差分别为 2.30%、4.54% 和 0.25%。根据该模型可以预

测近似工况时的 CO<sub>2</sub> 泄漏速率和泄漏量,为管道风险评估和应急管理提供理论依据。

3) CO<sub>2</sub> 泄漏区域体积分数均呈现先快速增加后缓慢下降的特征。随泄漏孔径增加,泄漏口近场最大体积分数逐渐增加,50、100 和 233 mm 泄漏孔

径在 5 m 位置的体积分数最大峰值分别为 10.41%、22.1%和 37.56%。气相 CO<sub>2</sub> 泄漏体积分数在距离泄漏口轴线方向 17 m 内主要受射流控制,17 m 外主要受自由扩散控制。根据该模型预测气相 CO<sub>2</sub> 在体积分数 5%时的泄漏扩散影响距离至少为 26 m。

### 参 考 文 献

- [1] LAU C K, GOZGOR G, MAHALIK M K, et al. Introducing a new measure of energy transition: green quality of energy mix and its impact on CO<sub>2</sub> emissions[J]. *Energy Economics*, 2023, 122: DOI:10.1016/j.eneco.2023.106702.
- [2] 张晓明,刘筱颖,董伟,等. 海州露天矿采空区地表 CO<sub>2</sub> 通量的试验研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(2): 66-73.  
ZHANG Xiaoming, LIU Xiaoying, DONG Wei, et al. Experimental study on soil surface CO<sub>2</sub> fluxes in goaf area of Haizhou open-pit mines[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(2): 66-73.
- [3] MAZZOLDI A, HILL T, COLLS J. A consideration of the jet-mixing effect when modelling CO<sub>2</sub> emissions from high pressure CO<sub>2</sub> transportation facilities[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1 571-1 578.
- [4] 辛保泉,曹琦,党文义,等. 超临界二氧化碳泄漏减压模型构建及泄漏量分析[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(3): 1 128-1 135.  
XIN Baoquan, CAO Qi, DANG Wenyi, et al. Construction of decompression model and analysis of leakage flow rate of supercritical carbon dioxide in pipelines[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(3): 1 128-1 135.
- [5] GUO Xiaolu, YAN Xingqing, YU Jianliang, et al. Under-expanded jets and dispersion in supercritical CO<sub>2</sub> releases from a large-scale pipeline[J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 1 279-1 291.
- [6] GUO Xiaolu, YU Jianliang, YAN Xingqing, et al. Throttle and expansion characteristics of supercritical carbon dioxide during its venting [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2023, 122: DOI: 10.1016/j.ijggc.2022.103800.
- [7] KOORNNEEF J, SPRUIJT M, MOLAG M, et al. Uncertainties in risk assessment of CO<sub>2</sub> pipelines [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1 587-1 594.
- [8] BROWN S, BECK J, MAHGEREFTEH H, et al. Global sensitivity analysis of the impact of impurities on CO<sub>2</sub> pipeline failure[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013, 115: 43-54.
- [9] AHMAD M, LOWESMITH B, DE KOEIJER G, et al. COSHER joint industry project: large scale pipeline rupture tests to study CO<sub>2</sub> release and dispersion[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 37: 340-353.
- [10] WOOLLEY R M, FAIRWEATHER M, WAREING C J, et al. An integrated, multi-scale modelling approach for the simulation of multiphase dispersion from accidental CO<sub>2</sub> pipeline releases in realistic terrain[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 27: 221-238.
- [11] BIRCH A D, BROWN D R, DODSON M G, et al. The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas[J]. *Combustion Science and Technology*, 1984, 36(5/6): 249-261.
- [12] LIU Zhenyi, XIU Zihao, ZHAO Yao, et al. Experimental study on the leakage temperature field of buried CO<sub>2</sub> pipelines[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(27): 70 288-70 302.
- [13] FAN Xing, WANG Yangle, ZHOU Yuan, et al. Experimental study of supercritical CO<sub>2</sub> leakage behavior from pressurized vessels[J]. *Energy*, 2018, 150: 342-350.
- [14] TENG Lin, LI Yuxing, HU Qihui, et al. Experimental study of near-field structure and thermo-hydraulics of supercritical CO<sub>2</sub> releases[J]. *Energy*, 2018, 157: 806-814.

- [15] LIU Xiong, GODBOLE A, LU Cheng, et al. Source strength and dispersion of CO<sub>2</sub> releases from high-pressure pipelines: CFD model using real gas equation of state[J]. *Applied Energy*, 2014, 126: 56–68.
- [16] HU Yanwei, YAN Xingqing, CHEN Lei, et al. Leakage hazard distance of supercritical CO<sub>2</sub> pipelines through experimental and numerical studies[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, 119: DOI:10.1016/j.ijggc.2022.103730.
- [17] 元冠玲. 齐鲁二化工厂至正理庄油田高 89 地区 CO<sub>2</sub> 输送管道及液化分离工程方案研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2014.
- QI Guanling. Research on CO<sub>2</sub> pipeline and liquid separation project of Qilu petrochemical to Zhenglizhuang oilfield[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [18] 谢尚贤, 韩培慧, 钱昱. 大庆油田萨南东部过渡带注 CO<sub>2</sub> 驱油先导性矿场试验研究[J]. *油气采收率技术*, 1997, 4(3): 13–19, 41.
- XIE Shangxian, HAN Peihui, QIAN Yu. A pilot test and research on oil displacement by injecting CO<sub>2</sub> in eastern Sanan of Daqing oilfield[J]. *Oil and Gas Recovery Technology*, 1997, 4(3): 13–19, 41.
- [19] 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.
- LI Yuxing, LIU Xinghao, WANG Cailin, et al. Research progress on corrosion behavior of gaseous CO<sub>2</sub> transportation pipelines containing impurities[J]. *Journal of Metals*, 2021, 57 (3): 283–294.
- [20] 郑度奎, 程远鹏, 李昊燃, 等. IAFSA-GRNN 在油田集输管道 CO<sub>2</sub> 腐蚀速率预测中的应用[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32 (1): 110–117.
- ZHENG Dukui, CHENG Yuanpeng, LI Haoran, et al. Application of IAFSA-GRNN in CO<sub>2</sub> corrosion rate prediction of oil gathering and transportation pipelines [J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32 (1): 110–117.
- [21] LEES F. Lees' loss prevention in the process industries[M]. Texas: Butterworth-Heinemann, 2012: 54–56.



**作者简介:** 辛保泉 (1990—),男,山东安丘人,博士,工程师,主要从事过程安全定量风险评估、泄漏扩散及爆炸安全防护等方面的研究。E-mail: xinbq.qday@sinopec.com。