

文章类型：综述与专论

DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-2096

二氧化碳管道意外泄漏减压过程的断裂控制研究进展

陈磊¹, 闫兴清¹, 胡延伟¹, 于帅¹, 杨凯¹, 陈绍云¹, 关辉², 喻健良¹, Haroun Mahgerefteh³, Sergey Martynov³

(¹大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116024; ²大连大学经济管理学院 辽宁 大连 116622; ³Department of Chemical Engineering, University College London, London WC1E 6BT, UK)

摘要：管道是 CCUS (carbon capture, utilization, and storage , CCUS) 技术产业链中运输大量二氧化碳 (CO₂) 的最优方式 , 但其在运行中具有意外泄漏风险。本文从实验和计算机模拟两个方面综述了国内外开展 CO₂ 管道泄漏减压、断裂扩展的研究进展 , 分析了相态、管材、埋地条件等初始状态对裂纹扩展规律的影响。阐述了状态方程、杂质因素、理论模型对开展实验和模拟计算研究的影响。归纳了适用于建立减压波预测模型的状态方程 , 开展流固耦合研究的理论方法和模拟仿真软件 , 设计 CO₂ 运输管道参考的技术文档。总结了当前 CO₂ 管道泄漏减压、断裂扩展控制研究方面需深入研究的科学问题 , 展望了亟待开展的研究内容 , 包括 : 构建多元混合物状态方程在三相点、相间线的计算模型 ; 探究裂纹裂间处 CO₂ 热物性质与裂纹断裂扩展的耦合关系 ; 建立管道止裂准则 , 开发、优化 CO₂ 运输管道专用止裂器。

关键词：二氧化碳 ; 混合物 ; 热力学性质 ; 实验 ; 计算机模拟

中图分类号 : X937

文献标志码 : A

文章编号 :

Research progress on fracture control of accidental leakage and decompression in CO₂ pipeline transportation

CHEN Lei¹, YAN Xingqing¹, HU Yanwei¹, YU Shuai¹, YANG Kai¹, Chen Shaoyun¹, Guan Hui², YU Jianliang¹, Haroun MAHGEREFTEH³, Sergey MARTYNOV³

(¹School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; ²Dalian University, School of Economics and Management, Dalian 116622, Liaoning, China; ³Department of Chemical Engineering, University College London, London WC1E 6BT, UK)

Abstract: Pipeline is the optimal way in transporting large amounts of carbon dioxide (CO₂) in CCUS (carbon capture, utilization and storage, CCUS) technology industrial chain. In this paper, the research progress on decompression and fracture propagation of CO₂ pipeline leakage was reviewed from aspects of experiment and computer simulation. The influence of phase state, pipe material and buried condition on crack propagation was analyzed. The influence of equation of state (EOS), impurity factor and theoretical model on experimental and simulation calculation were discussed. The EOS suitable for the establishment of decompression wave prediction model was summarized and the theoretical method and simulation software of fluid-structure coupling research, as well as the technical documentations for the design of CO₂ transport pipelines, were mentioned. The scientific problems that need to be studied further in CO₂ pipeline leakage decompression and fracture propagation control

收稿日期 : 2021-10-11; 修改稿日期 : 2021-11-15。

基金项目 : 国家重点研发计划 (2019YFE0197400)。

第一作者 : 陈磊 (1990—), 男, 博士研究生, 主要从事 CO₂ 管输安全方面的研究, E-mail: leichenxj@sina.com。

通信作者 : 喻健良 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事 CO₂ 管输安全方面的研究, E-mail: yujianliang@dlut.edu.cn; 关辉 (1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事碳达峰、碳中和技术经济分析研究, E-mail: gloria366000@163.com。

were summarized. Prospecting the research contents that need to be carried out include: (1) establishing the EOS calculation model of multivariate mixture at three phase point and phase line, (2) setting up the coupling relationship between the thermal properties of CO₂ and crack propagation furtherly, (3) establishing the stop criterion of pipeline fracture, and (4) developing and optimizing the special crack stop devices to avoid fracture propagation for CO₂ transportation pipelines.

Keywords: carbon dioxide; mixtures; thermodynamic properties; experiment; computer simulation

CO₂是一种典型的温室气体,其日益增加的排放量对全球气候变暖有较大贡献。我国是CO₂排放大国,在第75届联合国大会期间我国明确提出:“采取更加有利的政策和措施,CO₂排放量于2030年前达到峰值,2060年前实现碳中和。”^[1]CO₂的捕集、利用及封存是降低碳排放最具有潜力的技术^[2-4]。在CCUS产业链中,相较于槽车、铁路罐车和船舶等运输方式,管道在运输大量、连续二氧化碳时具有较高的经济性^[5]。据统计,全球已投入使用的CO₂输运管道约5100km,主要分布在欧美国家^[6]。工业过程中,以密相或超临界相CO₂的管道运输方式较为经济和高效^[2-3,7]。我国CO₂管道运输技术起步较晚,2007年中国第1套CCS-EOR(enhance oil recovery, EOR)示范项目在吉林大情字井油田进行,管道全长53km,管内为气态CO₂,产能达50万吨/年。据中国国家科技部公布,国内有20个CCUS示范项目处于建设和使用中。

近十年来,国内外研究人员对CO₂输运管道安全问题开展了大量研究,取得了较多进展。郭晓璐等^[8]基于实验和模拟研究对超临界CO₂管道泄漏后管内减压、近场射流膨胀和远场扩散过程进行了综述和展望,李玉星等^[9]归纳了含杂质气态CO₂输送管道腐蚀的研究成果,展望了管道腐蚀研究亟待解决的科学问题。这些综述对了解目前CO₂管道安全问题提供了较强参考和指导。

CO₂输运管道在运行时受第三方损害、管内外受腐蚀^[9]、焊接质量、地震、管道材料或结构失效、超压、违规操作等影响均可能造成管道泄漏或断裂^[10]。因CO₂的焦耳-汤姆逊系数较大^[11],导致泄漏口附近出现较大温降,使管道韧性值降低^[12-13]。因CO₂管道减压波的规律与天然气等介质不同,在低温环境管道易发生裂纹长程扩展断裂^[10,14-15],泄漏的CO₂经压力和温度变化^[16]、近场射流膨胀^[17]、远场扩散后形成重气高浓度区易造成环境和安全灾害^[18-19]。故CO₂输运管道的安全问题备受研究人员关注。

分析国内外研究CO₂输运管道成果发现,目前对属于CO₂输运管道安全问题的重要方向之一——管道泄漏减压过程的断裂控制,还未有综述性文献,不便于研究人员快速、系统了解该研究方向的进展及成果。基于此,本文综述CO₂输运管道泄漏减压过程的断裂控制研究进展,凝练提出当前CO₂管道断裂控制研究亟待解决的科学问题,为我国CO₂管道安全及CCUS技术的发展提供参考。

1 管道泄漏减压行为研究

CO₂管道一旦开裂,泄漏口处压力并非立即下降至大气压力,而是由断裂位置向管道两端产生减压波,如图1所示。在气体介质中减压波传播速度慢,通常低于管壁上发生的裂纹扩展速度,在这种条件下,断裂将形成持续扩展。减压波速度 W 为局部声速 C 与流质平均速度 U 的差值^[20],即 $W=C-U$ 。当减压波速度小于裂纹扩展速度时管道持续断裂扩展,反之管道实现止裂。故理解管道泄漏减压行为,是开展断裂控制研究的基础。

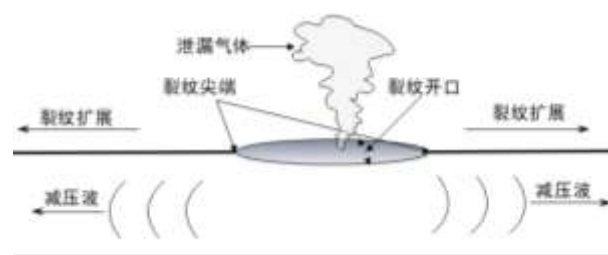


图1 管道断裂扩展

1972年 Maxey 等^[20]结合巴特利管道纪念所以对天然气管线钢全尺寸断裂做的工作，提出了适用于烃类介质的巴特利双曲线法（**Battelle two curve model, BTCM**），如图2所示。**Battelle 双曲线法将减压波速度曲线（黑色粗实线）和管道断裂速度曲线（黑色细实线）相匹配而成**，当两曲线相切时，定义为**管道止裂所需的最小断裂韧性**。因 CO₂ 管道泄漏时存在相变，裂尖处随着高压气体的膨胀产生较高的压力平台，该压力为裂尖端持续扩展提供了驱动力，导致管道裂纹长程断裂扩展，断裂扩展速度的计算方法可参考文献^[21]。

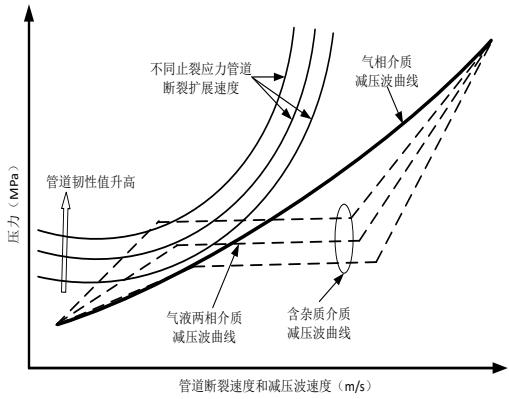


图2 Battelle 双曲线法

因 CCUS 产业链运输时并不是纯 CO₂，而是存在不同种类和浓度的杂质。当含有 H₂、N₂、O₂、Ar、CH₄、SO_x、NO_x 等杂质时，杂质的含量程度将造成管道内 CO₂ 输运时相变分层、泄漏时减压波平台升降、泄漏扩散距离不易掌握等不确定性^[22-24]。对管道内纯 CO₂ 和含杂质 CO₂ 物性参数变化规律的研究有助于对减压波更深入的认识^[25-27]，对管道安全控制起到至关重要的作用。而对管道泄漏减压规律的探究有助于深入了解管内介质热力学变化特性，同时可指导近场膨胀射流、远场扩散运动机理的研究。减压过程 CO₂ 热力学特性参数如相特性、密度、可压缩性等参数可影响减压波速度传播速度，继而影响管道断裂控制。对 CO₂ 热力学特性的研究离不开状态方程（**equation of state, EoS**）^[28]。CO₂ 作为一种实际气体，状态方程复杂，类型多样，故一定程度上增加了管道泄漏减压行为研究的难度。

从研究方法看，早期针对减压行为的研究主要采用理论与实验结合的方法。近年来，随着计算技术的发展，兴起了采用数值模拟方法研究减压波的热潮。本节以理论及实验研究、数值模拟研究两方面综述管道泄漏减压行为研究进展。

1.1 理论及实验研究

Cosham 等^[10,29-31]、Barnett 等^[32-33]、Massimo 等^[34]、Aursand 等^[35-37]、Liu 等^[38-40]、Wareing 等^[41]、Porter 等^[42]通过已开展的全尺寸断裂实验结果表明，CO₂ 的减压波变化规律与天然气等烃类介质截然不同，不同相态和组分的 CO₂ 输运管道泄漏后减压波与贫气和富气相比具有较长的减压波压力平台，因此 BTCM 止裂判断据不能直接用于 CO₂ 输运管道断裂扩展的研究中。现有的研究也发现，密相态或超临界态 CO₂ 在减压过程中相较于天然气管道输运，更易发生延性断裂。

Cosham 等^[43]基于 Span & Wagner (SW) 状态方程、Groupe Européen de Recherches Gazières (GERG) 状态方程、Peng & Robinson (PR) 状态方程对纯 CO₂ 和含不同摩尔浓度杂质的 CO₂ 混合物临界压力、温度、减压波速度等物性参数进行了计算，并与 Maxey 等^[44]实验得到的减压波数据进行了对比，PR 状态方程计算结果与实验数据变化趋势相同，误差在允许范围内，其编写的 GASDECOM 软件为开展预测减压波速度研究建立了基础理论。Massimo 等^[34]采用该理论，开展了两种摩尔浓度 N₂ 的 X65 管道全尺寸断裂实验，开发的 GASMISC 模型与管道断裂实验结果较为吻合，验证了 Cosham 等建立的理论体系的可行性。Aursand 等^[45]采用 PR 状态方程、EOSCG-GERG 状态方程对纯 CO₂ 和含杂质 CO₂ 减压波进行了计算，同时考虑了 CO₂

在管道存在摩擦和传热，研究发现 CO_2 的饱和压力计算值与采用的状态方程和杂质有关，杂质的存在和比例提高了饱和压力值和临界凝析压力值，其引入摩擦和传热的因素是对减压理论的优化。Botros 等^[46-48]在理论上用激波管试验了不同摩尔浓度的 Ar、 O_2 、 N_2 杂质的减压过程，研究发现 GERG-2008 状态方程^[49]比 PR 状态方程的计算结果与实验值更吻合，因 GERG-2008 状态方程引入的数据丰富，但编写状态方程程序较为复杂。同时发现含 Ar 的比例越高在临界点附近更难定义相包线， CO_2 初始温度偏低（ $5\sim 10^\circ\text{C}$ ）时，减压波压力平坦降低更益于止裂，从管道阻裂韧性值角度来看 GERG-2008 状态方程的预测结果给出的安全系数偏高，其给出的安全系数与实际应用间的关系需深入研究。Dall'Acqua 等^[50]将管内介质看作是一个孤立系统，假设 CO_2 在相变和流动时与管道间不存在热交换的等熵模型，并基于均相流模型（homogeneous equilibrium model, HEM）和 PR 状态方程开发了 PRDECOM 程序，比 Cosham 等开发的程序预测精度高，因为 PRDECOM 开发时引用的 CO_2 物性数据是经过多次修正的，物性参数更准确。

Drescher 等^[51]基于均相流模型、均匀松弛模型（homogenous relaxation model, HRM）开展了含有 N_2 的 CO_2 管道减压波测试实验，实验发现 N_2 含量越高，温度下降越快，温降幅度也最大，HRM 理论与实验结果更吻合。Munkejord 等^[22-23,52]在 HEM、HRM 理论上考虑摩擦和传热因素对纯净和含有 N_2 、He 的 CO_2 开展了实验研究，在两相区域内 HRM 比 HEM 理论对减压波速度与预测值吻合更好，因此综合考虑影响实验的因素对建立理论模型更为准确。多项研究发现 HRM 是目前研究管内相变最理想的模型。

中国石油大学李玉星等^[16,53-57]基于搭建的实验管道对纯净和含有不同浓度 N_2 的气、液/密、超临界相 CO_2 进行了减压波泄放实验，实验管道中透明视窗可观察泄放过程中管内相态变化规律，基于 HEM、HRM^[58]理论研究了减压过程中单相、两相形成过程中压降、温降、密度、焦耳-汤姆逊系数等热力学参数变化特性，综合考虑了管壁摩擦、换热等因素，建立了减压波预测模型，在 BTCM 法基础上建立了一种由管内介质初始条件可迭代计算符合输运要求的管道尺寸和韧性值的理论。搭建的实验装置如图 3 所示。

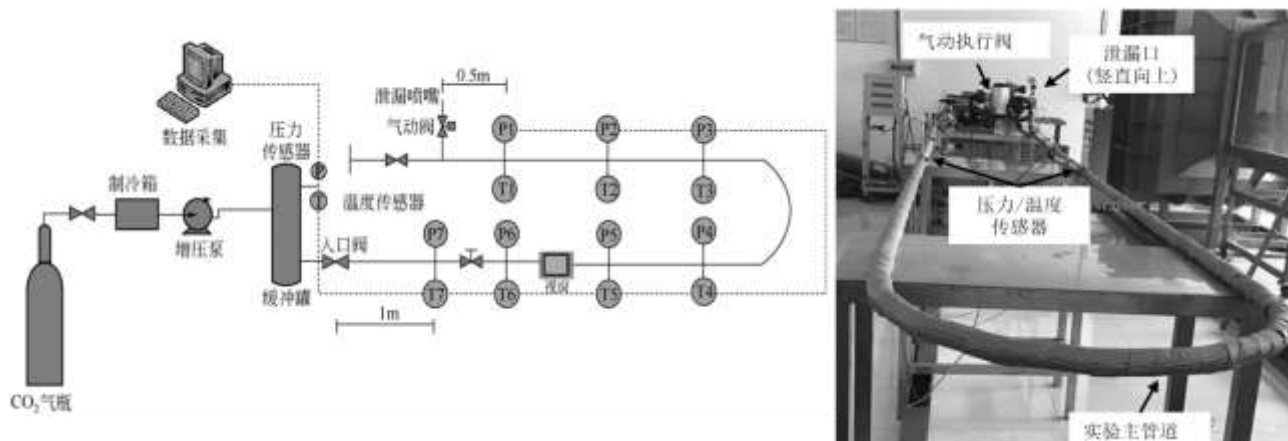


图 3 中国石油大学（华东）搭建的实验装置

大连理工大学喻健良等^[18,59-62]基于欧盟第七框架 CO_2 PipeHaz 和 CO_2 QUEST 合作项目，结合热力学定律、气泡成核理论、传热理论分析，研究了不同相态、压力、温度下泄放后管内和管外 CO_2 热力学特性、相变规律、扩散规律。郭晓璐等^[63]在该装置上开展了气相、密相、超临界相实验，基于最大应力起裂准则和 BTCM 法对 X80、X90、X100 管线钢不同安全系数（ $n=1.5、2.0、2.5$ ）下 CO_2 管道断裂中减压波速度和管道断裂速度的关系进行安全分析，研究表明：相较于气相和密相 CO_2 ，超临界 CO_2 的初始减压波速度最小，而对管道安全系数的要求最高。图 4 所示为大连理工大学建立的工业规模实验装置。

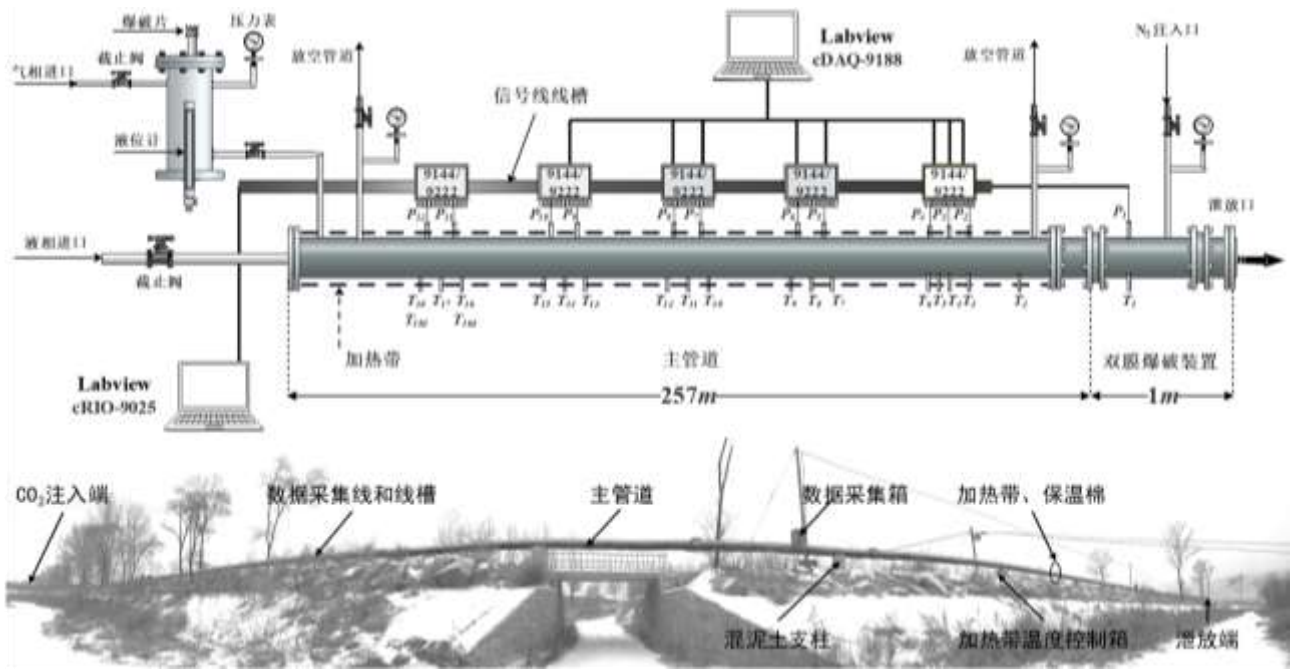


图4 大连理工大学建立的工业规模实验装置

目前对于纯 CO₂ 输运管道泄漏/断裂后管内减压过程中管内介质参数物性变化的研究不断受到关注，研究成果也日益增多，但主要集中于实验室规模。因 CCUS 产业链中运输的 CO₂ 不可避免含有不同浓度和种类的杂质，进而造成管内介质物性、热力学特性发生改变，目前对含杂质 CO₂ 输运管道泄漏减压方面研究处于起步阶段，研究方法上主要寻求最优气体状态方程，以求获得精准的减压波预测模型。研究发现开发的 GASDECOM、GASMISC、EOSCG-GERG、PRDECOM 减压波预测软件在不同状态方程基础上均基于范德华型组分混合规则^[34,43,45,50]建立，这就意味着除单一组分的临界性质，混合物中分子之间作用力、分子形状（偏心性）等因素都会影响混合物的相性质^[49]。挪威船级社发布的 DNV RP J202 文档中对含有杂质的 CO₂ 管道设计推荐建议使用 PR 状态方程。现阶段混合模型主要针对二元混合气体，应深入对于多元气体混合模型的研究，有益于多元杂质下的安全运输。表 1 为国内外 CO₂ 泄漏减压方面具有代表性的理论和实验研究成果。

表 1 国内外 CO₂ 泄漏减压方面理论和实验研究成果

代表性学者	实验装置 /理论研究	初始温度 /°C	初始压力 /MPa	相态类型	介质种类及纯度/%	泄漏方式	方法、理论和成果
Cosham 等 ^[43]	理论研究	-60~60	0.5~8.5	气相/液相/超临界	100/97.5CO ₂ +2.5(H ₂ /N ₂ /CO/Ar/O ₂ /CH ₄)	无	对比 SW、GERG-2004、PR 方程，PR 方程计算结果与 Maxey ^[44] 实验结果最接近
Massimo 等 ^[34]	φ610mm×12.7/13.7mm、长 48m 断裂管道	13/17.8	12.95/12.7	密相	96.2CO ₂ +3.8N ₂ /94CO ₂ +6N ₂	全尺寸断裂	建立预测减压波速度的 GASMISC 模型与管道断裂实验结果符合度高
Aursand 等 ^[45]	φ610mm×16mm、长 50m 断裂管道	-60~35	2~9	气相/液相/超临界	100/99.8 95(CO ₂)+0.2 5(H ₂ /N ₂ /Ar/O ₂ /C ₂ H ₆)	~ 全尺寸断裂 ~ 裂	PR、EOSCG-GERG 状态方程，考虑管壁摩擦，构建 HEM，与实验过程吻合
Botros 等 ^[46-48]	φ63.5mm×6mm、长 42m 实验管道	6~15	12~38	密相/超临界	90~99.5(CO ₂)+ 0.5~10(H ₂ 、N ₂ 、CO、O ₂ 、CH ₄)	38.1mm (爆破片)	建立预测减压波速度的一维等熵模型，GERG-2008 方程比 PR 方程结果优
Dall'Acqua 等 ^[50]	φ50mm×2mm、长 172m 实验管道	26.9~31.4	8.8~14.9	密相/超临界	60~100(CO ₂)+ 0~45(H ₂ 、N ₂ 、He、CO、O ₂ 、CH ₄ 、H ₂ O)	18.5mm (爆破片)	基于 HEM，PR 方程开发 PRDECOM，该软件比 GASDECOM 预测结果优
Drescher 等 ^[51]	φ12mm×1mm、长	16.1~20.4	11.9~12.1	密相	70~89.8(CO ₂)+	10mm	基于 HEM，考虑管壁摩擦

	139m 实验管道				10.2~30 N ₂	(阀门)	换热, 分析 N ₂ 浓度对减压过程中管内物性变化影响
Munkejord 等 [22-23,52]	φ48.3mm×3.75mm、长 61.67m 实验管道	24~26	12~13	密相	98(CO ₂)+2N ₂ / 98(CO ₂)+2He	50mm (爆破片)	PR 方程、一维质量、动量及能量方程, 考虑摩擦换热和气流分层构建减压模型
李玉星等 [16,53-57]	φ21mm×3mm、长 14.85m 实验管道	23~40	5~8.5	气相/液相/超临界	94~98(CO ₂)+ 2~6(N ₂)	20mm (阀门)	基于 HEM、HRM 理论、PR 方程, 不同泄漏口径、考虑管壁摩擦, 建立纯/混介质减压波预测模型
喻健良等 [18,59-63]	φ273mm×20mm、长 258m 实验管道	17.4~36.9	3.6~9.2	气相/液相/超临界	100CO ₂	280mm (爆破片)	PR 方程、一维质量、动量及能量方程, 摩擦换热、热力学定律、气泡成核理论

1.2 基于减压理论的模拟计算研究

因全尺寸管道实验资金投入高、实验周期长、实验重复性低等特点, 在上述实验研究基础上采用数值模拟方法可对 CO₂ 输运管道减压波变化特性进行更深入的研究。

Godbole 等 [38] 基于管内介质与管壁间摩擦和管道直径对减压波的传播速度有影响的考虑在 CFX 软件中模拟了全尺寸管道打开后管内介质流动形态变化, 基于对出口平面的流动总是趋向于一个阻塞的实验现象, 将全孔径减压建模为瞬态范诺流模型, 预测了管内马赫数值随减压过程的变化规律, 该模型全面考虑了减压过程中管道对减压波的影响。

Elshahomi 等 [64] 采用 Fluent 软件, 通过用户定义函数 (user defined functions, UDF) 程序调用了 GERG-2008 状态方程动态库, 基于密度求解器的平流上游分裂法计算了 CO₂ 混合物的热力学性质, 并依据 Cosham [31]、Botros [46] 的实验参数, 模拟了初始温度和杂质对减压波速度的影响, 提出流体中“杂质”的冷凝可影响管内流体相变化, 目前该观点需在实验过程中进行论证。Park 等 [65] 将 GERG-2008 状态方程编写成 UDF 程序在 Fluent 软件中对含杂质 CO₂ 管道减压波变化规律进行了模拟, 该 CFD 模型成功跟踪了减压过程中压力的快速下降规律, 并解释了减压过程中的相变现象, 在相同初始压力下, 提高初始温度可降低初始减压波速, 同等杂质摩尔比例下含有 H₂ 的减压波平台最高, CO、O₂、N₂ 依次次之, 与 Aursand 等 [45] 的实验规律相似, 但和实验结果存在偏差。Liu 等 [66-70] 采用同种理论分析了减压过程中管内 CO₂ 处于液相、气相的热力学性质, 通过引入传质和潜热的源项和时间松弛因子的非平衡气液理论模拟了相变过程, 模拟研究发现松弛因子的取值可改变相变过程, 对减压波速度数值的影响更为明显。该模型获得的减压波速度模拟结果与其开展的实验研究具有高度吻合, 但 GERG-2008 状态方程封装为动态文件且受版权保护, 无法广泛推广。Tatiana 等 [71] 同样引入质量转化系数通过 Fluent 软件基于 PR 状态方程建立了考虑非平衡相变的纯 CO₂ 二维多相减压模型, 与文献中参考的实验结果吻合度高, 但 PR 状态方程比 GERG-2008 方程构建简单, 模拟结果误差在允许范围内。PR 状态方程结构简单, 易于掌握且预测误差相较于 GERG 状态方程仅在高温度、高压力区存在差异, 故围绕该状态方程建立理论模型的研究较丰富 [49]。

Jie 等 [72] 采用任意拉格朗日欧拉方法 (arbitrary Lagrangian Euler method, ALE) 和 HEM 以 Cosham 等 [31] 公布的实验数据为初始条件在 Fluent 软件上建立了计算流体动力学模型, 该模型可预测含杂质的气相和密相 CO₂ 的管道破裂后的瞬态流动和管内介质的热力学行为, 减压波的模拟结果的变化规律与 Cosham 实验数据相符合。Jie 等的研究成果说明综合考虑管壁摩擦和管间换热、不同的状态方程、杂质种类对减压波速度的预测有着直接的影响。Xu 等 [73] 基于 CFD 和 HEM 建立的管道排空减压模型 CFD-DECOM, 对 Maxey [44] 发布的富气、气相、液相 CO₂ 实验数据进行了验证, 可预测减压波和反射波的传播规律, 对反射波的研究 Guo 等 [62] 开展的实验研究中虽有描述, 但反射波对管内介质特性的变化和减压波的影响尚未开展研究。

除 CFX、Fluent 模拟软件, 油气储运行业标准工具 OLGA 多相流瞬态模拟平台, 可模拟地面管网中流

体与时间相关的瞬态流动过程，精确预测生产系统中例如流量、压力、温度、流体组分等关键参数。Gelein 等^[74]利用 OLGA 软件中 SPT 模块对 Snøhvit CO₂ 研究项目中减压实验结果进行了模拟，认为该模块预测的减压波数值与实验值有一定的吻合性，但还需改进预测精度，开展的泄放实验指出减压过程中存在相态变化和传热，并测定了泄放过程中管内、外和总换热系数。OLGA 软件功能模块缺乏灵活的自定义函数修改，相关操作教程不易获取，对 CO₂ 管道输运方面的研究适用性不具优势。

常规的计算机模拟主要通过建立几何模型、构建理论方程、选择合适的求解器等操作，弥补实验研究方面的补足。在进行减压波传播过程模拟时，使用 Fluent 软件居多，预测结果和实验数据之间的误差在可接纳范围内。研究理论上主要以均相流模型为主，早期的研究人员认为泄漏时属于高速射流阶段，介质流速较快，可忽略相间滑移。Park 等^[65]和 Tatiana 等^[71]认为流速在一定范围内时应考虑，同时需考虑介质与管壁间的换热，在长距离输运时等熵模型是不适用的。因此随着科研成果的增多，在建立数学模型时，应更充分的考虑模型的边界条件的设置。表 2 为国内外 CO₂ 泄漏减压方面具有代表性的模拟研究成果。

表 2 国内外 CO₂ 泄漏减压方面模拟研究成果

代表性学者	介质相态	软件类型	计算模型及求解器	理论和研究方法	主要研究成果
Godbole 等 ^[38]	液相	CFX	RANS 模型 基于体积求解器	一维质量、动能和能量守恒方程，RANS 湍流方程、PR 状态方程、Haaland 方程	模拟管道瞬间断裂减压波传播规律，分析了减压波传播前后马赫数大小的成因
Elshahomi 等 ^[64]	气相/液相/ 超临界	Fluent	Realisable $k-\epsilon$ 模型 基于密度求解器	二维质量、动能和能量守恒方程，GERG-2008 方程、分相流方程、平均向上差分法	减压预测模型模拟结果与实验值误差较小，可预测减压过程中声速、密度、焓值、焓值
Park 等 ^[65]	气相/液相/ 超临界	Fluent	SST $k-\omega$ 模型 基于密度求解器	二维质量、动能和能量守恒方程，多相非平衡理论	预测结果优于 HYSYS，与 NIST 计算结果吻合，可预测三相点时的热力学参数
Liu 等 ^[66-70]	密相	Fluent	Realisable $k-\epsilon$ 模型 基于压力求解器	一维质量、动能和能量守恒方程，GERG-2008 方程、PRESTO 法、均相流方程、线性插值法	时间松弛因子大小的选取对相平衡影响大，并直接影响减压波传播处竖直截面质量流率
Tatiana 等 ^[71]	密相	Fluent	Realisable $k-\epsilon$ 模型 基于二级迎风格式的 密度求解器	二维质量、动能和能量守恒方程，PR 方程、SW 方程、非等熵流动方程	引入质量转化系数修正相变化模型，不同的相态采用不同状态方程计算，提高了模型预测
Jie 等 ^[72]	气相/密相	Fluent	Realisable $k-\epsilon$ 模型 基于体积求解器	一维质量、动能和能量守恒方程，PR 方程、任意 ALE 方法、非等熵流动方程	构建 PR-DECOM 程序，气相减压波平台偏高，存在管壁摩擦时假设的均相方程不应成立
Xu 等 ^[73]	液相/ 超临界	Fluent	Realisable $k-\epsilon$ 模型 基于体积求解器	二维质量、动能和能量守恒方程、均相流方程	CFD-DECOM 预测精度介于实验值和 GASDECOM 软件之间
Gelein 等 ^[74]	气相/密相	OLGA	基于密度求解器	一维质量、动能和能量守恒方程，VPT 方程、均相流模型	OLGA 预测结果需与更多实验结果协同分析，验证可信度

2 管道断裂控制研究

现有的输运管道失效研究借鉴于油气管道的起裂、扩展、止裂判据，Zhu^[21]、谢丽华等^[75]对国内外输气管线止裂韧性的预测方法进行了综述，纯 CO₂ 和含杂质 CO₂ 在不同相态的实验研究和模拟研究成果尚未进行归纳与总结。基于此，对管道安全控制从实验研究和数值模拟研究两个方向对管道安全控制方面的研究进展进行了综述。

2.1 实验研究

1972 年 Canyon Reef Carriers 公司建成第 1 条 CO₂ 输运管道，Maxey^[44]等陆续开展了对 CO₂ 管道安全输运方面的研究，研究结果和建议一直推动着全球 CO₂ 管道输运的技术进步，实验研究规模比较大的主要为 COOLTRANS 项目^[33]、CO₂QUEST 项目^[42]、CO₂PipeHaz 项目^[76]、DNV GL 项目^[77]、BIGCCS 项目^[78]。

管道受管内介质的作用，受周向应力是轴向应力的两倍，所以管道在断裂扩展时以轴向扩展，在周向方向上形成止裂^[79]。为避免运行断裂及延性扩展，提高管道管体的韧度值的设计，使管道通过管体韧性形

成止裂，或者是采用不同结构的止裂器强制止裂^[6,31]。Cosham 等^[29]开展了采用不同预置裂纹长度、不同 CO₂ 浓度和初始状态下的三组全尺寸断裂实验。Test1-Test2 断裂张开口为“花瓣”型和“鱼嘴”型，Test3 断裂张开口呈“平铺”型，并形成了断裂扩展，研究认为断裂外观不同的两个因素是初始缺陷的长度和管道的韧性，同时指出与烃类介质的管道断裂形态不同。该实验因实验成本高，实施周期长，因此无法进行重复性试验，但从文献调研来看，断裂形态符合不同相态具有的特点，而管道埋地覆盖条件对断裂速度的影响并未进行分析，图 5 为 Cosham 等^[29]开展实验研究获得的成果。

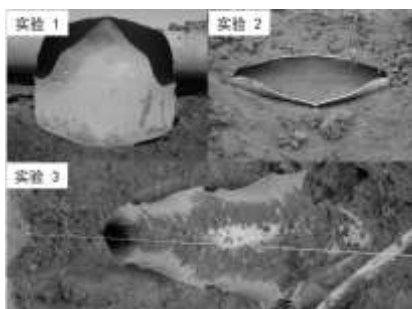


图 5 Cosham 等^[29]开展的实验现象



图 6 Barnett 等^[33]开展的实验现象

Barnett 等^[33]于 2011—2014 年在英国国家管网资助 COOLTRANS 项目（CO₂ Liquid pipeline transportation）支持下，在英国坎布里亚郡 Spadeadam 测试场开展了 100 多项（有效实验数据 99 组）CO₂ 管道运输测试项目，从实验结果认为适用于判断烃类气体介质管道韧性断裂的 Battelle 双曲线判据不能直接应用于气相、液相、密相 CO₂ 管道运输的管道断裂止裂中，实验结论与 Cosham 等^[29-31]的实验结论一致，实验成果如图 6 所示。Massimo 等^[34]开展的采用 X65 管道用于含 3.8%、6% N₂ 杂质的密相 CO₂ 管道进行了全尺寸断裂拓展和止裂实验，实验结果发现 BTCM 不能直接用于含杂质 CO₂ 管道断裂与止裂的指导中，需要根据更多的全尺寸断裂实验进行修正该方法，同时发现 N₂ 浓度越高所需管道止裂韧性值越大。Valerie 等^[77]、Michal 等^[80]系统介绍了 CO₂SAFE-ARREST 项目中 1 条采用 9 种不同韧性值管道焊接而成的 85m 全尺寸实验管道，管内介质为密相含杂质 CO₂，回填土深度为 1m，重点分析了管道材料和 CO₂ 混合物性质、破裂速度和瞬态压力数据，实验结果证明原来的 BTCM 不适用于密相 CO₂ 输送管道止裂设计指导中。Cosham 等^[29]、Barnett 等^[33]、Massimo 等^[34]、Valerie 等^[77]、Michal 等^[80]开展的全尺寸实验中对均采用埋地铺设实验管道，但缺乏对不同埋地条件管道断裂速度、形态方面的分析与研究。埋地覆盖物质、施工碾压、物质密度对管壁的作用力均会影响管道扩展速度和断裂形态，故在搜集的文献中发现断裂开口朝向地面，且目前尚未见到水下输运情境下的全尺寸实验研究文献。

Davis 等^[81]对比了相同管道材料在全尺寸实验和落锤冲击实验后测试管段的前部、中部和尾部的断口表面，引入分离指数用来量化管道端口面裂纹与原尺寸间关系。全尺寸实验的 SI 值低于夏比实验值，但与落锤冲击实验值较为接近，认为在研究管道解理面方面落锤冲击实验结果可替代全尺寸实验结果。但 Davis 指出全尺寸实验管材采用的生产标准与现役标准存在差距，CO₂ 输运管道断裂时管内减压行为可能导致全尺寸实验和落锤冲击之间存在不相关的分离行为。

对于大型管道全尺寸实验不仅周期长，耗资较大，同时需要具备采集实验数据所需仪器设备，因此目前具备有全尺寸管道断裂控制实验场的仅有英国、意大利、俄罗斯、中国、挪威。Cosham 等^[29]、Barnett 等^[33]、Massimo 等^[34]开展的 CO₂ 输运管道的全尺寸实验发现用于预测烃类介质的 Battelle 双曲线法不能直接指导 CO₂ 输运管道安全设计，目前对于不同相态、不同掩埋条件输运背景下管道断裂过程中的规律，如断裂扩展规律、裂纹形态、韧脆转变温度条件等均处于初步阶段。因此有必要从实验室规模、中尺寸型规模、工业使用规模开展实验研究。如表 3 所示为 CO₂ 输运管道断裂实验研究成果。

表 3 CO₂ 输运管道断裂实验研究成果

代表性学者	实验装置信息	初始温度 /°C	初始压力 /MPa	相态类型	介质种类及纯度 /%	获取实验数据方式	典型实验结论
Cosham 等 ^[29]	φ914mm×25.4, 长 139.63m/φ914mm×25.4, 长 68.61m/φ610×12.7 mm, 长 55.8m	13.1/10.5/15.0	14.83/15.06 /15.02	密相	(90.9CO ₂ +1H ₂ +4N ₂ +1.8O ₂ +2.2CH ₄)/(93.7CO ₂ +1.1H ₂ +3.4N ₂ +1.8CH ₄)/(90.3CO ₂ +1.1H ₂ +6.6N ₂ +2CH ₄)	P、T、DAS、漆包线, CO ₂ 浓度传感器、气象站、相机	管道断裂速度最高为 125m·s ⁻¹ , 延性断裂形成止裂所需管道止裂韧性值 328~342J, 管道断裂形态和管道韧性值有关
Barnett 等 ^[33]	φ610×19.1mm, 长 317m	15	15	密相	100CO ₂	同 ^[35] 文献, 增加无人机, 地貌形态激光扫描仪	管道断裂速度保持在 100m·s ⁻¹ 左右, 管道韧性值 350J 可实现止裂, 开发的止裂环可实现止裂
Massimo 等 ^[34]	φ610mm×12.7 /13.7mm、长 48m 断裂管道	13/17.8	12.95/12.7	密相	96.2CO ₂ +3.8N ₂ /94CO ₂ +6N ₂	同 ^[35] 文献, 增加扫描电镜	N ₂ 浓度越高所需管道止裂韧性值越大, 不同断裂位置处解理形态不同
Aursand 等 ^[35]	φ610mm×16mm、长 50m 断裂管道	-60~35	2~9	气相/液相/超临界	100/99.8-95(CO ₂ +0.2~5(H ₂ /N ₂ /Ar/O ₂ /C ₂ H ₆))	P、T、DAS	杂质种类和浓度影响止裂难度、裂纹扩展速度
Valerie 等 ^[77] 、Michal 等 ^[80]	φ610×13.5/14.6mm, 长 85m	11.6	15	密相	91.11CO ₂ +8.89N ₂	同 ^[35] 文献, 增加扫描电镜	断裂时形成大量气云, 实验场湿度增大, 泄漏处可形成脆性断裂, 断裂距离比设计长度长
Davis 等 ^[81]	φ610×13.5mm, 长 10m 落锤撕裂试样	20.5	6.5	液相	90CO ₂ +10N ₂	P、T、DAS、扫描电镜	落锤冲击实验比夏比实验更符合全尺寸实验裂纹解理面分布

注：P—Pressure sensor; T—Thermocouple; DAS—Data acquisition systems

2.2 模拟计算研究

全尺寸实验具有准备周期长、耗资大、可重复性不强、实验危险系数高等特点, 而基于动力学、水力学数值计算技术在探究 CO₂ 输运管道诸多机理方面相比与实验研究存在一定的优势和科学性。对于不具备全尺寸实验条件的科研人员, 也可通过现已发表的实验研究的文献结合 ANSYS、LS-DYNA、ABAQUS 等分析软件进行更深入的研究。

Martynov 等^[82]基于 ANSYS 软件结合计算流体力学、断裂力学建立了密相和超临界输运管道泄漏、热传递、断裂扩展的动态流固耦合模型, 研究指出杂质的存在会加大管道止裂难度, 使断裂扩展速度和扩展距离更不确定, 该结论与 Barnett 等^[33]和 Massimo 等^[34]实验结论相同。任科^[83]基于 ANSYS 软件建立了超临界 CO₂ 输运管道三维含外部裂纹的模型, 研究了不同温度和压力下对管道的影响, 温度的下降导致裂纹扩展区的等效应力和应变变大、J 积分值变小, 加快了管道裂纹的扩展。ANSYS Mechanical 在非线形分析方面也能符合模拟要求, 但 ABAQUS 软件在裂纹扩展领域功能更强大, 算法更成熟。

Hu 等^[84]基于减压波预测模型和改进的 BTCM 模型, 建立了超临界 CO₂ 管道断裂过程中的止裂韧性模型, 对减压波速和裂缝扩展速度的比较, 判断管道是否可以依靠自身的韧性来阻止裂缝扩展, 建立的模型能够快速、准确地计算出超临界 CO₂ 管道中止裂断裂所需的最小壁厚和最小夏比能量, 该预测模型的研究结果有助于更好地理解超临界 CO₂ 管道的断裂过程。Hu 等^[84]采用的是基于速度判据实现止裂的方法, 程序设计上采用 MATLAB 语言, 没有可视化界面和供操作人员输入设计参数的窗口, 若将速度判据设计思路开发成软件, 可为工程应用提供理论支撑和直观的止裂设计结果展示。

Aursand 等^[35-37,78,85]采用 LS-DYNA 软件基于局部断裂准则、壅塞理论、等熵模型及 SW 状态方程建立了埋地密相 CO₂ 管道断裂流固耦合模型, 对管道断裂扩展过程进行了数值模拟, 同时将模拟结果与实验进行了对比, Aursand 等采用的光滑粒子流体动力学方法首次通过粒子的形式动态描述了裂纹扩展时覆盖土质

随断裂扩展的进行分布的规律，该流固耦合模型考虑的综合因素多，与工业运输情景最符合。金峤等^[86]对注入地下 1000m 深度的两种壁厚、不同初始深径比的 CO₂ 运输管道进行了建模，采用虚拟裂纹闭合法及 Walker 公式对疲劳强度下表面裂纹管道断裂扩展的模拟结果表明裂纹在不等幅压力波动下扩展过程更复杂，长输管道在服役过程中面临因天气温度变化对管内介质相态变化的影响同样值得关注。

Keim 等^[87-89]采用修改后的 Bai-Wierzbicki 模型、GERG-2008 气体状态方程在 ABAQUS 软件平台运用 ALE 耦合对 3 种介质进行了数值计算，建立了管道变形、气体减压、裂纹扩展之间相互耦合的动态能量平衡判断裂纹扩展/止裂的准则，并考虑了管道是否存在回填土及土质密度对管道断裂扩展的影响，研究发现不同的运输介质造成的裂纹扩展速度不同，回填土深度的增加可降低管道断裂扩展速度和长度。该模拟结果与 Barnett 等^[33]开展的实验中结果中覆盖土对裂纹扩展速度和长度响应结论相同，ALE 耦合方法在虽能展现管内介质泄漏后压力分布规律，但缺乏对断裂扩展时裂纹细节的捕捉。Okodi^[90]等采用 ABAQUS 软件基于扩展有限元法（extended finite element method, XFEM），以最大主应变和断裂能作为损伤判断参量，建立了 CO₂ 管道裂纹扩展和裂间应力的数值计算模型，模型可用于预测具有不同尺寸纵向裂纹的管道试件的破裂应力，结果表明 XFEM 可以有效地分析管道中的裂纹扩展和破裂应力，由于该模型仅对 3 种裂纹类型进行了模拟，Okodi 建议采用更多管道等级、管道尺寸、裂纹类别进行更为系统的研究，以获得更可靠的结论，该建议更为客观地评价了其工作，同时为从事相关研究提供了新思路。Talemi 等^[91-93]采用 ABAQUS 软件基于流固耦合模型模拟了埋地密相 CO₂ 运输管道动态脆性断裂过程，使用 Python 脚本模拟计算裂纹长度逐渐增加后强度因子和裂纹扩展速度对管内流体的影响，将流体域更新后的状态方程对管道的影响再施加至裂间位置进行循环计算，建立的 XFEM 与 CFD（computational fluid dynamics）耦合模型可预测减压波变化规律、裂纹扩展速度，该耦合模型是研究 CO₂ 运输管道动态断裂扩展最有潜力的模型。Zhen 等^[94]采用同样的软件模拟技术路线，对气相 CO₂ 管道断裂过程进行了模拟，重点研究了裂纹尖端张开角和裂纹扩展速度的扩展规律，与 Talemi 不同的是采用了 cohesive 裂纹扩展的方式，裂纹只能沿着预先设定的路径进行扩展，在周向止裂方面存在研究不足，而 XFEM 裂纹扩展方法在管道断裂方面具有优势，建议深入研究。

Kawaguchi 等^[95]在丹麦实验场的 4 次全尺寸断裂实验研究，并公布了全部实验数据，Botros 等^[96]基于 Kawaguchi 等实验数据建立了管道断裂扩展的双向流固耦合模型。模型中流体域采用迭代气体压力场循环作用于裂尖位置的固体域，通过动态有限元法分析管道断裂扩展/止裂中裂纹尖端扩展角的变化规律、裂纹扩展速度、压力场分布规律、泄漏气体马赫数分布规律等内容，如图 7 所示。该模型与参考文献实验结果中裂纹扩展规律、裂纹扩展速度高度吻合，但缺乏对管道止裂方面的研究。

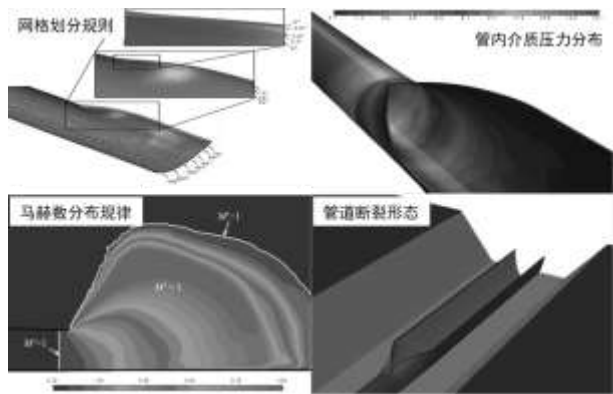


图 7 Botros 等^[96]研究成果

对于 CO₂ 运输管道泄漏、断裂扩展过程的模拟，需要掌握计算流体力学、材料力学、弹塑性力学、断裂力学知识，是一个多知识融合的领域。CO₂ 运输管道泄漏减压过程原本已较为复杂，管内介质与管材间相互耦合过程是深入研究 CO₂ 运输管道的难点，同时也是热点。现有的研究成果对 CO₂ 运输管道断裂扩展过

程和管内介质参数变化规律已有初步的研究成果，但对于管道断裂扩展的控制方面的研究，以目前研究成果分析均使用管道自身韧性实现止裂，对于开发 CO₂ 输运管道专用止裂器方面的研究极为迫切。如表 4 所示为国内外 CO₂ 输运管道断裂扩展模拟成果。

表 4 国内外 CO₂ 输运管道模拟计算研究成果

代表性学者	介质相态	软件类型	材料失效准则	裂纹扩展理论	主要研究成果
Martynov ^[82]	密相/ 超临界	ANSYS	最大主应力准则	弹性力学、弹塑性力学、断裂力学、三维质量、动能和能量守恒方程，HLP 方程、GERG-2008 方程	杂质影响管道断裂扩展速度和距离，加大止裂难度；密相、超临界输运时建议加装止裂装置
任科 ^[83]	超临界	ANSYS	最大主应变准则	弹性力学、弹塑性力学、断裂力学、J 积分理论、有限元法	管内、覆盖土层的温度和压力对管道影响，总结 J 积分与不同管端位置断裂速度关系
Hu 等 ^[84]	气相/液相/ 超临界	Matlab	最大主应力准则	弹性力学、弹塑性力学、断裂力学、BTCM 方程	基于 BTCM 和 3 种型号钢材直径、壁厚、韧性值，结合减压波和断裂扩展速度建立止裂准则
Aursand 等 ^[35-37,78,85]	超临界	LS-DYNA	Von Mises 准则	三维质量、动能和能量守恒方程，弹性力学、弹塑性力学、断裂力学、有限元法、均相流方程、SW 方程、光滑粒子法	建立管内介质与管道双向流固耦合模型，分析管道延性时扩展速度、管内压力和温度变化、管道断裂形貌、对覆盖土的力学影响
金峤等 ^[86]	超临界	ABAQUS	最大主应力准则	弹性力学、弹塑性力学、断裂力学、虚拟裂纹闭合法、Walker 公式	不同初始深径比的管道内壁裂纹受动压形成疲劳扩展
Keim 等 ^[87-89]	液相/ 超临界	ABAQUS	修改的 Bai-Wierzbicki 准则	弹性力学、弹塑性力学、断裂力学、GERG-2008 方程、欧拉-拉格朗日法、均相流方程	首次揭示了管内减压过程压力梯度变化、介质形态、裂纹尖端应力数值与延性断裂扩展速度间关系
Okodi 等 ^[90]	超临界	ABAQUS	最大主应变准则	弹性力学、弹塑性力学、断裂力学、扩展有限元法	不同尺寸纵向裂纹受管内体积膨胀后裂纹尖端应力分布，裂纹尖端张开角（位移）变化规律
Talemi 等 ^[91-93]	气相	ABAQUS	最大主应力准则	三维质量、动能和能量守恒方程，弹性力学、弹塑性力学、断裂力学、均相流方程、扩展有限元法	建立脆性断裂模型，研究裂纹尖端张开角、应力积分因子、流体域间相互耦合关系
Zhen 等 ^[94]	气相	ABAQUS	最大主应力准则	三维质量、动能和能量守恒方程，弹性力学、弹塑性力学、断裂力学、有限元法、均相流方程	揭示了管道断裂形态、裂纹张开角变化规律、裂纹扩展速度变化规律
Botros 等 ^[96]	气相	ABAQUS	最大主应力准则	三维质量、动能和能量守恒方程，弹性力学、弹塑性力学、断裂力学、	揭示了裂纹尖端应力分布、马赫数分布规律

3 二氧化碳输运管道设计研究

管道输运 CO₂ 是 CCUS 技术中具有经济性和经验性的选择，Massimo 等^[34]、任科^[83]、Wilkowski 等^[97]设计的钢套止裂环，Aursand 等^[78,85]设计的钢丝网布复合止裂器，Mazurkiewicz 等^[98]设计的碳纤维止裂器，Abeele 等^[99]设计的较长长度的止裂套在全尺寸管道断裂扩展实验和模拟计算中均具有较好的止裂效果，仅停留在试验阶段，并未给出适用场景指导。而 CO₂ 焦耳-汤姆逊系数大，含杂质的 CO₂ 管道内相平衡和水合物腐蚀机理的影响对管道的设计也是一个挑战。采用常规的 ASEM B 31.8、ASEM 831.4、IP6、BS EB 14161、BS PD 8010 和 DNV-OS-F101 等标准规范用于 CO₂ 管道设计外，更应该考虑管道随温度、压力变化后相平衡问题，含杂质 CO₂ 形成酸性体对管壁的腐蚀问题^[9]。

管径的大小不仅直接决定了输送能力，基于经济性考虑，管径越大，投资就越高，最合理的管径是在满足输送要求的基础上使管径最小，但现有研究表明，管道的厚度也是需要重点关注的对象。King 等^[100]采用 ASME 指导手册中计算管道厚度、BTCM 止裂计算，运用管道韧性值高于断裂扩展韧性值的方法对 CO₂ 输运管道进行了设计，该设计方法指出管道的韧性值高于断裂扩展的值可不用安装止裂装置，并具有止裂的效果，但 BTCM 方法在试验过程中给出的建议是不能直接用于 CO₂ 管道的输运中，因此该设计方法的安全性无法考证。Lyons 等^[101]对密相 CO₂ 输运管道建立了量化风险评估体系，该评估体系不仅对输运管道受

第三方外部干扰故障频率模型进行综述,同时对影响密相 CO₂ 管道的正常工作的主要因素进行了分析,研究发现,由于密相 CO₂ 管道的设计压力要求高,在管道施工中需要使用高壁厚的管道,由于 Lyons 仅搜集了英国范围内密相 CO₂ 运输管道的资料,该模型由于英国 CO₂ 运输管道故障数据库资料匮乏,对该模型的推广有一定的局限性,但 Lyons 也正在搜集全球输运管道事故信息,不断完善量化风险评估体系。

Lu 等^[102]对输运 CO₂ 管道中管径、壁厚、压力的设计要求和成熟的设计公式进行了更为系统的综述,但输运场景仅是陆地输运,仅考虑了管道内压管材的设计,未考虑覆土、海水输运情景。闫兴清等^[103]基于机械能衡算方程构建了密相 / 超临界相 CO₂ 管道内径计算方法,计算结果与 Skovholt^[104]及 McCoy 模型^[105]计算结果进行对比,计算结果具有合理性,该方法指出了计算过程中的注意事项,以指导 CO₂ 管道输运工艺及经济性评价研究。Zhao 等^[106]采用最小二乘法对不同运行温度范围下的管道直径模型进行了对比分析,提出了一种新的分步分段优化方法,与现有的优化方法相比,该方法可以明显节省均衡化成本,但该方法仅考虑温度这一单因素。Valluri 等^[107]综合分析了 CO₂ 输运管道受土壤腐蚀和大气腐蚀后管道易出现失效现象,在分析腐蚀机理和腐蚀速度的基础上提出管道的设计应考虑加入一些金属元素避免电化学腐蚀或降低腐蚀速率,同时指出管道壁厚的设计应根据输运不同相态的 CO₂ 进行区别设计。

现阶段 CO₂ 输运管道的设计主要参考油气管道的设计,应用场景为人烟稀少区域,铺设过程尚未考虑掩埋覆盖^[2]、水下条件^[6]、温差幅值^[102,108]。杂质的存在影响临界压力和温度、密度、黏度的改变,但现有的管道设计标准仅有 DNV RP J202 考虑的杂质的影响,相关知识体系尚不完善。对于陆地输运场景下目前仅有英国的 BS 7910 和美国的 API 579-1/ASME FFS-1 对 CO 输运管道安全制定了评价标准,设计上仅有挪威船级社发布的 DNV RP J202 文档中对 CO₂ 管道设计进行了指导,撰写者认为该设计手册采用的实验数据较少,开展的实验有限,参考的数据年限偏远,需随着管材性能提升和输运条件的更新对标准进行修订。对于 CO₂ 管道的设计在借鉴油气管道设计的基础上更应着重于管材韧性值的选取、管道内介质温度和压力的控制、施工技术。

4 结语

本文从实验研究和数值模拟研究两个方面综述了管道泄漏减压和断裂扩展的研究进展,综合分析了杂质种类、状态方程、理论模型对泄漏减压规律的影响,归纳了数值模拟软件研究 CO₂ 管道扩展断裂的主要成果和研究热点,同时对 CO₂ 输运管道设计研究进行了综述。对管内减压过程研究,涉及到相间滑移和三相点共存时减压波的传播规律更为复杂,研究难度更大;对管道的韧/脆性断裂和断裂控制方法的研究体系尚不完善;泄漏后果的风险评估和安全控制尚未形成体系,分析与检测也未有健全的标准,管道的设计目前虽有雏形但未结合现阶段工业需求进行修订。基于对 CO₂ 输送管道泄漏特性和安全控制领域国内外研究现状综述表明,CO₂ 输运管道意外泄漏过程和断裂控制方面的不足主要体现在:

(1) 关于管道泄漏后管内 CO₂ 的热力学、物理性质的研究,尽管状态方程有 18 多种,但不同的状态方程适用性不尽相同,用于实验的混合物介质主要为人为构造,与工业输运作业区域相关的数据存在一定的差异,对混合物临界点、三相点、相间线周围的计算需要准确划分,提高计算精度。

(2) 用于全尺寸管道断裂扩展的止裂器、止裂环虽能实现止裂,但未建立止裂装置的设计标准、应用范围;模拟研究内容中针对断裂速度和扩展规律的研究多,对止裂装置结构优化、受力分析、材料选择方面需加大模拟研究力度。

(3) 对 CO₂ 输运管道断裂扩展模拟的研究,管内流体采用均相流模型未考虑相间滑移,对气液固三相的相变规律、热力学特性研究尤显不足;采用均匀松弛模型的研究需将模拟与实验结果进行对比,不断优化该模型的适用性。流固耦合模型均未考虑干冰生成,管内介质随管道断裂扩展变化动态过程目前处于研

究空白。

结合 CO₂ 输送管道泄漏特性和安全控制研究现状，在工业运输 CO₂ 管道泄漏后管内减压、管道断裂扩展研究方面仍需在理论研究、工程应用方面深入开展以下工作：

(1) 含杂质 CO₂ 实验数据尚未能建立完整的相态模型，杂质的类型、含量及组分对 CO₂ 临界温度、临界压力的变化规律的掌握有益于依托质量守恒、能量守恒、传热、传质和压力损耗等理论构建长输管道运营体系。

(2) 管道存在泄漏后，管壁周围温度梯度变化规律，材料达到韧脆转变温度的失效机理与管内压力、泄漏口形态和方向间的规律；裂纹裂间位置处 CO₂ 泄漏压力、温度变化与裂纹扩展角、裂纹扩展速度的耦合关系。

(3) 对于三元、多元气体状态方程研究较少，含有多元介质管道泄漏情境下埋地与非埋地、土壤覆盖状况对管道裂纹扩展的影响，即不同初始状态下减压波传播及衰减规律，可修正速度判据。

(4) 基于弹塑性力学、断裂力学，研究管道腐蚀过程中裂纹萌生、发展过程，开发安全、可靠、便安装的止裂器，防止管道延性扩展断裂并建立止裂准则。

参考文献

- [1] 王金南. 加快实现碳排放达峰 推动经济高质量发展[N]. 经济日报,2021-01-04(1).
WANG J N. To accelerate peaking carbon emissions and promote high-quality economic development[N]. Economic Daily, 2021-01-04(1).
- [2] WOOD D A. Carbon dioxide handling and carbon capture utilization and sequestration (CCUS) research relevant to natural gas: a collection of published research (2009–2015)[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 25: A1-A9.
- [3] VERMEUL V R, AMONETTE J E, STRICKLAND C E, et al. An overview of the monitoring program design for the FutureGen 2.0 CO₂ storage site[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 51: 193-206.
- [4] LI Q, CHEN Z A, ZHANG J T, et al. Positioning and revision of CCUS technology development in China[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 46: 282-293.
- [5] ROUSSANALY S, BUREAU C G, HUSEBYE J. Costs benchmark of CO₂ transport technologies for a group of various size industries[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 12: 341-350.
- [6] ROUSSANALY S, BERGHOUT N, FOUT T, et al. Towards improved cost evaluation of carbon capture and storage from industry[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 106: 103263.
- [7] PRAH B, YUN R. Investigations on CO₂ hydrate slurry for transportation in carbon capture and storage[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(10): 5085-5092.<http://dx.doi.org/10.1007/s12206-019-0947-0>
- [8] 郭晓璐, 喻健良, 闫兴清, 等. 超临界 CO₂ 管道泄漏特性研究进展[J]. 化工学报, 2020, 71(12): 5430-5442.
GUO X L, YU J L, YAN X Q, et al. Research progress on leakage characteristics of supercritical CO₂ pipeline[J]. CIESC Journal, 2020, 71(12): 5430-5442.
- [9] 李玉星, 刘兴豪, 王财林, 等. 含杂质气态 CO₂ 输送管道腐蚀研究进展[J]. 金属学报, 2021, 57(3): 283-294.
LI Y X, LIU X H, WANG C L, et al. Research progress on corrosion behavior of gaseous CO₂ transportation pipelines containing impurities[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(3): 283-294.
- [10] COSHAM A, EIBER R J. Fracture propagation in CO₂ pipelines [J]. The Journal of Pipeline Engineering, 2008, 4: 281-292.
- [11] CHACÍN A, VÁZQUEZ J M, MÜLLER E A. Molecular simulation of the Joule-Thomson inversion curve of carbon dioxide [J]. Fluid Phase Equilibria, 1999, 165(2): 147-155.
- [12] ASHARI R, ESLAMI A. Anisotropy in mechanical properties and corrosion of X-52 pipeline steel at different pipe angles[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2019, 55(3): 546-553.<http://dx.doi.org/10.1134/S2070205119030043>
- [13] 陈国龙, 闫振汉, 喻健良, 等. 大规模埋地 CO₂ 管道泄漏过程中的温度场变化[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(3): 870-877.
CHEN G L, YAN Z H, YU J L, et al. Temperature field in the process of the buried CO₂ pipeline release in large scale[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(3): 870-877.http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=perio&id=aqyhjxb202003011
- [14] JONES D G, ARMSTRONG K, BARNETT J. Fracture propagation control in dense phase CO₂ pipelines[C]// 2013 Pipeline

Technology Conference, 2013.

- [15] MOLAG M, DAM C. Modelling of accidental releases from a high pressure CO₂ pipelines[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 2301-2307.
- [16] WANG C L, LI Y X, TENG L, et al. Experimental study on dispersion behavior during the leakage of high pressure CO₂ pipelines[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 105: 77-84.
- [17] WAREING C J, WOOLLEY R M, FAIRWEATHER M, et al. Large-scale validation of a numerical model of accidental releases from buried CO₂ pipelines[M]// KRASLAWSKI A, TURUNEN I. *Computer aided chemical engineering*. Elsevier. 2013: 229-234.
- [18] YAN X Q, GUO X L, YU J L, et al. Flow characteristics and dispersion during the vertical anthropogenic venting of supercritical CO₂ from an industrial scale pipeline[J]. *Energy Procedia*, 2018, 154: 66-72.
- [19] ZHANG T, ZHANG W C, YANG R Z, et al. CO₂ capture and storage monitoring based on remote sensing techniques: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 281: 124409.
- [20] MAXEY W A, KIEFNER J F, EIBER R, et al. Ductile fracture initiation, propagation and arrest in cylindrical vessels[J]. *ASTM Special Technical Publication*, 1972: 70-81.
- [21] ZHU X-K. Review of fracture control technology for gas transmission pipelines[C]// 2014 International Pipeline Conference, 2014.
- [22] MUNKEJORD S T, HAMMER M. Depressurization of CO₂-rich mixtures in pipes: two-phase flow modeling and comparison with experiments[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 37: 398-411.
- [23] MUNKEJORD S T, AUSTEGARD A, DENG H, et al. Depressurization of CO₂ in a pipe: high-resolution pressure and temperature data and comparison with model predictions[J]. *Energy*, 2020, 211: 118560.
- [24] TERENCEZI A. Expansion waves in two-phase pipelines[C]// 2006 International Pipeline Conference, 2006.
- [25] WETENHALL B, RACE J M, AGHAJANI H, et al. The main factors affecting heat transfer along dense phase CO₂ pipelines[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 63: 86-94.
- [26] 赵青. 含杂质 CO₂ 不同相态管输节流及减压特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
ZHAO Q. Throttling process and decompression property for pipeline transportation of anthropogenic CO₂ in different phase[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2015.
- [27] BÖTTCHER N, TARON J, KOLDITZ O, et al. Evaluation of thermal equations of state for CO₂ in numerical simulations[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(2): 481-495. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-1704-1>
- [28] DIAMANTONIS N I, BOULOUGOURIS G C, MANSOOR E, et al. Evaluation of Cubic, SAFT, and PC-SAFT equations of state for the vapor-liquid equilibrium modeling of CO₂ mixtures with other gases[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(10): 3933-3942.
- [29] COSHAM A, JONES DG, ARMSTRONG K, ALLASON D, et al. Analysis of a dense phase carbon dioxide full-scale fracture propagation test in 24 inch diameter pipe[C]// 2016 International Pipeline Conference, 2016.
- [30] COSHAM A, JONES D G, ARMSTRONG K, et al. Analysis of two dense phase carbon dioxide full-scale fracture propagation tests[C]//2014 International Pipeline Conference, 2014.
- [31] COSHAM A, JONES D G, ARMSTRONG K, et al. The decompression behaviour of carbon dioxide in the dense phase[C]// 2012 International Pipeline Conference, 2012.
- [32] BARNETT J, COOPER R. The COOLTRANS research programme: learning for the design of CO₂ pipelines[C]// 2014 International Pipeline Conference, 2014.
- [33] BARNETT J, COOPER R. An operator's perspective on fracture control in dense phase CO₂ pipelines[C]// 2016 International Pipeline Conference, 2016.
- [34] MASSIMO D B, ANTONIO L, ELISABETTA M, et al. Fracture propagation prevention on CO₂ pipelines: full-scale experimental testing and verification approach[C]// 2017 Pipeline Technology Conference, 2017.
- [35] AURSAND E, DØRUM C, HAMMER M, et al. CO₂ pipeline integrity: comparison of a coupled fluid-structure model and uncoupled two-curve methods[J]. *Energy Procedia*, 2014, 51: 382-391.
- [36] AURSAND E, DUMOULIN S, HAMMER M, et al. Fracture propagation control in CO₂ pipelines: validation of a coupled fluid-structure model[J]. *Engineering Structures*, 2016, 123: 192-212.
- [37] BERSTAD T, DØRUM C, JAKOBSEN J P, et al. CO₂ pipeline integrity: a new evaluation methodology[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 3000-3007.
- [38] GODBOLE A, MICHAL G, LU C, et al. Full-bore pipeline rupture as 'Transient Fanno' flow[C]// 2016 International Pipeline Conference, 2016.

- [39] LIU X, GODBOLE A R, LU C, et al. Consequence modeling of CO₂ pipeline failure[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 5109-5115.
- [40] LIU X, GODBOLE A R, LU C, et al. Investigation of the consequence of high-pressure CO₂ pipeline failure through experimental and numerical studies [J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 32-47.
- [41] WAREING C J, FAIRWEATHER M, FALLE S A E G, et al. Modelling ruptures of buried high-pressure dense-phase CO₂ pipelines in carbon capture and storage applications – Part II. A full-scale rupture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 42: 712-728.
- [42] PORTER R T J, MAHGEREFTEH H, BROWN S, et al. Techno-economic assessment of CO₂ quality effect on its storage and transport: CO₂ quest[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 54: 662-681.
- [43] COSHAM A, EIBER R J, CLARK E B. GASDECOR: Carbon dioxide and other components[C]// 2010 International Pipeline Conference, 2010.
- [44] MAXEY W A. Long shear fractures in CO₂ lines controlled by regulating saturation, arrest pressures [J]. *Oil Gas Journal*, 1986, 84.
- [45] AURSAND E, AURSAND P, HAMMER M, et al. The influence of CO₂ mixture composition and equations of state on simulations of transient pipeline decompression[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 54: 599-609.
- [46] BOTROS K K, GEERLIGS J, ROTHWELL B, et al. Effects of argon as the primary impurity in anthropogenic carbon dioxide mixtures on the decompression wave speed [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2017, 95(3): 440-448.
- [47] BOTROS K K, GEERLIGS J, ROTHWELL B, et al. Measurements of decompression wave speed in simulated anthropogenic carbon dioxide mixtures containing hydrogen[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2017, 139(2): 021201.
- [48] BOTROS K K, IGI S, KONDO J. Measurements of decompression wave speed in natural gas containing 2%-8% (mole) hydrogen by a specialized shock tube[C]// 2016 International Pipeline Conference, 2016.
- [49] KUNZ O, WAGNER W. The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: an expansion of GERG-2004[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2012, 57(11): 3032-3091.
- [50] DALL'ACQUA D, TEREZI A, LEPORINI M, et al. A new tool for modeling the decompression behaviour of CO₂ with impurities using the Peng–Robinson equation of state[J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 1432-1445.
- [51] DRESCHER M, VARHOLM K, MUNKEJORD S T, et al. Experiments and modeling of two-phase transient flow during pipeline depressurization of CO₂ with various N₂ compositions[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 2448-2457.
- [52] MUNKEJORD S T, DENG H, AUSTEGARD A, et al. Depressurization of CO₂-N₂ and CO₂-He in a pipe: experiments and modeling of pressure and temperature dynamics[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 109: 103361.
- [53] GU S W, LI Y X, TENG L, et al. A new model for predicting the decompression behavior of CO₂ mixtures in various phases[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 120: 237-247.
- [54] GU S W, LI Y X, TENG L, et al. An experimental study on the flow characteristics during the leakage of high-pressure CO₂ pipelines[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 125: 92-101.
- [55] TENG L, ZHANG D T, LI Y X, et al. Multiphase mixture model to predict temperature drop in highly choked conditions in CO₂ enhanced oil recovery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 108: 670-679.
- [56] 顾帅威, 李玉星, 滕霖, 等. 小尺度超临界 CO₂ 管道小孔泄漏减压及温降特性[J]. *化工进展*, 2019, 38(2): 805-812.
GU S W, LI Y X, TENG L, et al. Decompression and temperature drop characteristics of small-scale supercritical CO₂ pipeline leakage with small holes[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(2): 805-812.
- [57] 梁杰, 李玉星, 刘翠伟, 等. 埋地输气管道泄漏特性实验研究[J]. *化工学报*, 2019, 70(4): 1644-1652.
LIANG J, LI Y X, LIU C W, et al. Experimental study on leakage characteristics of buried gas pipelines[J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(4): 1644-1652. http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=perio&id=hgxb201904047
- [58] TENG L, LIU X, LI X G, et al. An approach of quantitative risk assessment for release of supercritical CO₂ pipelines[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 94: 104131.
- [59] 喻健良, 朱海龙, 郭晓璐, 等. 超临界 CO₂ 管道减压过程中的热力学特性[J]. *化工学报*, 2017, 68(9): 3350-3357.
YU J L, ZHU H L, GUO X L, et al. Thermodynamic properties during depressurization process of supercritical CO₂ pipeline[J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(9): 3350-3357. http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=perio&id=hgxb201709005
- [60] 喻健良, 郭晓璐, 闫兴清, 等. 工业规模 CO₂ 管道泄放过程中的压力响应及相态变化[J]. *化工学报*, 2015, 66(11): 4327-4334.
YU J L, GUO X L, YAN X Q, et al. Pressure response and phase transition in process of CO₂ pipeline release in industrial scale[J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(11): 4327-4334. http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=perio&id=hgxb201511005

- [61] GUO X L, YAN X Q, YU J L, et al. Under-expanded jets and dispersion in high pressure CO₂ releases from an industrial scale pipeline [J]. *Energy*, 2017, 119: 53-66.
- [62] GUO X L, YAN X Q, YU J L, et al. Pressure responses and phase transitions during the release of high pressure CO₂ from a large-scale pipeline [J]. *Energy*, 2017, 118: 1066-1078.
- [63] GUO X L, XU S Q, CHEN G J, et al. Fracture criterion and control plan on CO₂ pipelines: theory analysis and full-bore rupture (FBR) experimental study[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 69: 104394.
- [64] ELSHAHOMI A, LU C, MICHAL G, et al. Decompression wave speed in CO₂ mixtures: CFD modeling with the GERG-2008 equation of state [J]. *Applied Energy*, 2015, 140: 20-32.
- [65] PARK A, KO Y, RYU S, et al. Numerical modeling of rapid depressurization of a pressure vessel containing two-phase hydrocarbon mixture[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 113: 343-356.
- [66] LIU B, LIU X, LU C, et al. Computational fluid dynamics simulation of carbon dioxide dispersion in a complex environment[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 419-432.
- [67] LIU B, LIU X, LU C, et al. Multiphase decompression modeling of CO₂ pipelines[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2017, 7(4): 665-679.
- [68] LIU B, LIU X, LU C, et al. Decompression modeling of pipelines carrying CO₂-N₂ mixture and the influence of non-equilibrium phase transition[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 4204-4219.
- [69] LIU B, LIU X, LU C, et al. A CFD decompression model for CO₂ mixture and the influence of non-equilibrium phase transition[J]. *Applied Energy*, 2018, 227: 516-524.
- [70] LIU X, MICHAL G, GODBOLE A, et al. Decompression modeling of natural gas-hydrogen mixtures using the Peng-Robinson equation of state[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(29): 15793-806.
- [71] TATIANA F, LABOUREUR D M, GLOVER C J. A 2-D CFD model for the decompression of carbon dioxide pipelines using the Peng-Robinson and the Span-Wagner equation of state[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 140: 299-313.
- [72] JIE H E, XU B P, WEN J X, et al. Predicting the decompression characteristics of carbon dioxide using computational fluid dynamics[C]// 2012 9th International Pipeline Conference, 2012.
- [73] XU B P, JIE H G. Numerical study of compressed CO₂ pipeline decompression characteristics using CFD-DECOM[C]// 2011 Process Safety and Environmental Protection, 2011.
- [74] GELEIN D K, JAN H B, MICHAEL D, et al. CO₂ transport-depressurization, heat transfer and impurities[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 3008-3015.
- [75] 谢丽华, 吉玲康, 孙志强, 等. 国内外输气管线止裂韧性的预测方法[J]. *石油工业技术监督*, 2004, 20(12): 8-10.
XIE L H, JI L K, SUN Z Q, et al. Methods used in China and other countries to predict fracture-arrest toughness of gas pipeline[J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2004, 20(12): 8-10.http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=perio&id=sygyjsjd200412002
- [76] WOOLLEY R M, FAIRWEATHER M, WAREING C J, et al. CO₂ PipeHaz: quantitative hazard assessment for next generation CO₂ pipelines[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 2510-2529.
- [77] VALERIE L, BENTE H L, ROBERT N, et al. CO₂ SAFE-ARREST: a full-scale burst test research program for carbon dioxide pipelines (I): Project overview and outcomes of test 1[C]// 2018 International Pipeline Conference, 2018.
- [78] AURSAND P, HAMMER M, MUNKEJORD S T, et al. Pipeline transport of CO₂ mixtures: models for transient simulation[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 15: 174-185.
- [79] ZHU X H, DENG Z L, LIU W J. Dynamic fracture analysis of buried steel gas pipeline using cohesive model[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 128: 105881.
- [80] MICHAL G, DAVIS B, ØSTBY E, et al. CO₂ SAFE-ARREST: a full-scale burst test research program for carbon dioxide pipelines (II): Is the BTCM out of touch with dense-phase CO₂?[C]// 2018 International Pipeline Conference, 2018.
- [81] DAVIS B J, MICHAL G, LU C. A detailed comparison of separation characteristics between laboratory scale fracture tests and a full-scale burst test[J]. *Journal of Pipeline Engineering*, 2018, 17: 313-323.
- [82] MARTYNOV S B, TALEMI R H, BROWN S, et al. Assessment of fracture propagation in pipelines transporting impure CO₂ streams[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 6685-6697.
- [83] 任科. 超临界二氧化碳管道断裂理论和控制方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2018.
RENG K. Study on theory and control method of supercritical carbon dioxide pipe fracture[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2018.
- [84] HU Q H, ZHANG N, LI Y X, et al. A new model for calculation of arrest toughness in the fracture process of the supercritical CO₂ pipeline[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(26): 16804-16815.

- [85] AURSAND E, AURSAND P, BERSTAD T, et al. CO₂ pipeline integrity: a coupled fluid-structure model using a reference equation of state for CO₂[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 3113-3122.
- [86] 金峤, 孙泽宇, 孙威. 内压波动下的 CO₂ 管道轴向表面裂纹疲劳扩展研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(5): 84-93.
JIN Q, SUN Z Y, SUN W, Fatigue propagation of axial surface crack in CO₂ pipeline under internal pressure fluctuation[J], *Engineering Mechanics*, 2015, 32(5): 84-93.
- [87] KEIM V, MARX P, NONN A, et al. Fluid-structure-interaction modeling of dynamic fracture propagation in pipelines transporting natural gases and CO₂-mixtures[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2019, 175: 103934.
- [88] KEIM V, NONN A, MÜNSTERMANN S. Application of the modified Bai-Wierzbicki model for the prediction of ductile fracture in pipelines[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2019, 171: 104-116.
- [89] KEIM V, PAREDES M, NONN A, et al. FSI-simulation of ductile fracture propagation and arrest in pipelines: comparison with existing data of full-scale burst tests[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2020, 182: 104067.
- [90] OKODI A, LIN M, YOOSEF G N, et al. Crack propagation and burst pressure of longitudinally cracked pipelines using extended finite element method[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2020, 184: 104115.
- [91] TALEMI R H, BROWNB S, MARTYNOV S, et al. Assessment of brittle fractures in CO₂ transportation pipelines: a hybrid fluid-structure interaction model[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2016, 2: 2439-2446.
- [92] TALEMI R H, COOREMAN S, MAHGEREFTEH H, et al. A fully coupled fluid-structure interaction simulation of three-dimensional dynamic ductile fracture in a steel pipeline[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019, 101: 224-235.
- [93] TALEMI R H, BROWN S, MARTYNOV S, et al. Hybrid fluid-structure interaction modeling of dynamic brittle fracture in steel pipelines transporting CO₂ streams[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 54: 702-715.
- [94] ZHEN Y, ZU Y Z, CAO Y G, et al. Effect of accurate prediction of real-time crack tip position on dynamic crack behaviors in pipeline[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 94: 104136.
- [95] KAWAGUCHI S, MURAI K, HASHIMOTO Y, et al. Full-scale burst tests of ultra-high pressured rich-gas pipelines under buried and unburied conditions[C]// 2009 International Pipeline Conference, 2009.
- [96] BOTROS K K, CLAVELLE E J, UDDIN M, et al. Next generation ductile fracture arrest analyses for high energy pipelines based on detail coupling of CFD and FEA approach[C]// 2018 International Pipeline Conference, 2018.
- [97] WILKOWSKI G, RUDLAND D, ROTHWELL B. How to optimize the design of mechanical crack arrestors[C]// 2006 International Pipeline Conference, 2006.
- [98] MAZURKIEWICZ L, TOMASZEWSKI M, MALACHOWSKI J, et al. Experimental and numerical study of steel pipe with part-wall defect reinforced with fibre glass sleeve[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2017, 149: 108-119.
- [99] ABEELE V F, AMLUNG L, BIAGIO M D, et al. Towards a numerical design tool for composite crack arrestors on high-pressure gas pipelines[C]// 2010 International Pipeline Conference, 2010.
- [100] King G G, KUMAR G G. Designing CO₂ transmission pipelines without crack arrestors[C]// 2010 8th International Pipeline Conference, 2010.
- [101] LYONS C J, RACE J M, WETENHALL B, et al. Assessment of the applicability of failure frequency models for dense phase carbon dioxide pipelines[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 87: 112-120.
- [102] LU H F, MA X, HUANG K, et al. Carbon dioxide transport *via* pipelines: a systematic review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 266, 121994.
- [103] 闫兴清, 李佳桐, 喻健良, 等. 超临界/密相二氧化碳长输管道内径计算方法探讨[J]. *石油化工设备*, 2020, 49(4): 22-26.
YAN X Q, LI J T, YU J L, et al. Discussion on inner diameter calculation methods of supercritical/dense carbon dioxide long-distance transportation pipeline[J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2020, 49(4): 22-26.
http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=perio&id=syhgsb202004005
- [104] SKOVHOLT O. CO₂ transportation system[J]. *Energy Conversion and Management*, 1993, 34(9): 1095-1103.
- [105] MCCOY S. The economics of CO₂ transport by pipeline and storage in saline aquifers and oil reservoirs[D]. Carnegie Mellon University, 2008.
- [106] ZHAO D Y, TIAN Q H, LI Z M, et al. A new stepwise and piecewise optimization approach for CO₂ pipeline[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 49: 192-200.
- [107] VALLURI S, CLAREMBOUX V, KAWATRA S. Opportunities and challenges in CO₂ utilization[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 113: 322-344.
- [108] ONYEBUCHI V E, KOLIOS A, HANAK D P, et al. A systematic review of key challenges of CO₂ transport via pipelines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2563-2583.