

输油管道改输气管道止裂性能研究现状

张浩然*, 吴玉国, 李小玲, 刘杰松, 吴 波

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2025年4月9日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年6月27日

摘 要

随着我国天然气需求上升及“双碳”目标的推进, 将输油管道改建为输气管道成为节约成本、优化管网的重要途径。本文围绕输油改输气中的关键问题展开研究: 首先分析改输需注意的问题, 包括掌握原管道基本情况、管材适用性评价、脆性断裂控制、止裂性能检验(如夏比冲击试验)及剩余强度评估; 其次综述国内外止裂性能研究进展, 涉及X80/X90管线钢裂纹扩展模拟、巴特尔双曲线法(BTCM)、流固耦合模型(如ABAQUS有限元分析)等, 重点探讨裂纹尖端张开角(CTOA)、裂纹扩展速度与减压波速的耦合关系; 最后阐述改输具体步骤(清洗、内检测、管材更换、设备改造、试压干燥等), 并结合濮临管道、双-魏管道、克-乌复线等国内成功案例, 验证改输方案的可行性与安全性。这项研究为改进油气输送管道的工程实践提供了理论依据和技术指导。

关键词

输油管道改输气, 止裂性能, 夏比冲击功, 有限元模拟, 工程应用

Research Status of Crack Arrest Performance of Oil Pipeline Converted to Gas Pipeline

Haoran Zhang*, Yuguo Wu, Xiaoling Li, Jiesong Liu, Bo Wu

College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: Apr. 9th, 2025; accepted: Jun. 16th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

Abstract

With the rising demand for natural gas in China and the promotion of the “double carbon” goal, converting oil pipelines into gas pipelines has become a crucial approach to save costs, optimize

*通讯作者。

文章引用: 张浩然, 吴玉国, 李小玲, 刘杰松, 吴波. 输油管道改输气管道止裂性能研究现状[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(2): 275-282. DOI: 10.12677/jogt.2025.472031

pipeline networks, and improve resource utilization. This paper focuses on key issues in such conversions: First, it analyzes critical considerations, including understanding the basic conditions of the original pipeline, evaluating the applicability of pipe materials, controlling brittle fracture, testing crack arrest performance (e.g., Charpy impact tests), and assessing residual strength. Second, it reviews domestic and international research progress on crack arrest performance, covering topics such as crack propagation simulation for X80/X90 pipeline steel, the Battelle Two Curve Model (BTCM), and fluid-structure interaction models (e.g., ABAQUS finite element analysis), with a focus on the coupling relationship between the crack tip opening angle (CTOA), crack propagation speed, and decompression wave speed. Finally, it outlines specific conversion steps (cleaning, in-line inspection, pipe replacement, equipment modification, pressure testing, and drying) and validates the feasibility and safety of the conversion through successful domestic cases, such as the Pulin Pipeline, Shuang-Wei Pipeline, and Ke-Wu DN529 Oil Pipeline. The study provides theoretical support and technical references for the engineering practice of converting oil pipelines to gas pipelines.

Keywords

Oil Pipeline to Gas Pipeline Conversion, Crack Arrest Performance, Charpy Impact Energy, Finite Element Simulation, Engineering Applications

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近几年,我国各大城市的天然气需求呈逐年上升趋势,并以高速发展的趋势带动了天然气资源的开发,同时也加大了输气管线的建设力度。相对于新建输气管道,将现有的管道改造为天然气管道,可以节约大量的施工费用,减少投资和施工风险,提高管线的综合利用率,并对管网进行优化;另外,它还具有准备工作简单,工期短的优点。同时,也达到了国家节能减排的战略目标。

在2022年各地区进行二氧化碳排放量占比中,其中包括亚太国家地区排放量已经超过经济总量的一半,相比同人口的非洲则占比3.81%。身为世界最大的温室气体排放者之一的中国,其2022年所产生的二氧化碳废气达到了157亿吨的规模,占据了全球二氧化碳总体排放的42.6%。而这之中,电力、钢铁、化工、建筑材料、交通运输、农牧业、酒店与餐饮、商贸服务等八大产业的二氧化碳释放占比高达95.5%。由此可见,电力、钢铁及化工领域的二氧化碳排放是相当大的,同时它们也构成了我国经济发展的关键支撑力量。

我国在第75次联大会议上提出,中国要努力在2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和。为了响应国家号召,将传统的石化能源逐渐用更加清洁的天然气能源替代已是势在必行,而对于新的天然气管道建设又将是一笔巨大的投资,因此,将部分经过检测达标的输油管道改建为输气管道不失为一个好办法。

2. 输油改输气中需注意的问题

将输油管道改造为输气管道,目前国内并无现行规范可供参考,但我们可以借鉴外部标准,同时也应当对比国内的相关规定。

2.1. 掌握原管道的基本情况

首先需要确认工程实施是否满足规范要求,是否有任何瑕疵或潜在风险,并熟悉各类管道的确切位

置信息,理解其阴极防护特性及其防腐涂料损伤状况,基于管道维修与内部测试的数据,对原始石油运输线路进行压力承载能力和使用期限的评估。这些步骤能作为管道全面的安全评价、转换至天然气传输方案的可能性研究的基础参考资料。

2.2. 管材适用性分析与评价

通常情况下,计划转换成传输天然气的废弃石油管道或者正处于极低流量运转状态的石油管道主要建于上世纪八十年代之前。因为受到当时的国内钢铁制造技术的制约,大部分的长途运输管道都采用了非管道钢作为其管道材质(例如 Q225、16Mn 和 20 号钢等等),并且它们的接合处大多数都是螺旋式连接方式。所以,对这些管道进行改造以适应天然气传输的需求时,首先需要考虑的是管道材质的适配性问题[1]。

全方位的无损检测作为前期的评估环节至关重要。借助这种方式,我们可以了解管道的腐烂状况及其在运作过程中可能出现的瑕疵。同时,我们还可以利用其他的有效检验手段来研究并解析腐烂与缺点的种类及其形成的原因,从而为我们决定如何评定管道腐烂程度以及选择哪一种评估策略提供理论基础。此外,为了更好地理解这些问题,我们需要采集具有代表性的部分管道样本,并对它们进行包括母体材料、焊接部位和受热区域的适应性评估、整条管道的大小测量验证、残余强度的测算以及物理化学性质的实验等一系列无损检测。我们的检测准则遵循的是 GB/T3323-2005 的标准。

2.3. 控制管道的脆性断裂

通常情况下,石油运输过程中温度偏高,且大部分的长途石油传输线路都会采取加热的手段来实现。然而,当这些线路被改建为天然气之后,由于气温下降的影响,管道内部的温度也会随之减少。如果这种现象导致了管道出现脆弱性的破损,那么其影响将会是极其严重的。所以,对于天然气传输管道的材料来说,必须满足以下条件:它们的最低转化温度不能小于管道可能会出现的最小温度和规定的最大温度之间的差距[2]。

2.4. 检验管道止裂性能

对于管道的抗破损能力评估,我们必须使用夏比冲击强度来执行夏比冲击测试并验证其[CVN]数值以确定管道能否满足止裂需求[3]。具体的实验规范参考了 GB/T229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》。

2.5. 管道剩余强度评价

对于管道的剩余强度评估,其关注的主要问题包括:体积型缺陷(如因腐蚀导致的损坏)、平面型缺陷(例如应力腐蚀产生的破损、氢气引发的大面积裂痕、焊接处的开裂及疲劳引起的裂纹等问题)和弥散损伤型缺陷(最常见的是氢气的膨胀和氢气导致的小裂纹),然而,因为实际测试环境的制约,通常只能针对体积型缺陷和平面型缺陷作出评价[4]。

3. 输气管道止裂性能的相关研究进展

参考国内外天然气管道和 CO₂ 管道等输气管道的止裂性能方面研究,对我国输油管道改输气具有重要的指导意义。

曹宇光,甄莹,贺娅娅等[5]-[7]等构建含轴向穿透裂纹的 X80 管道数值模型,包含壳单元与三维实体单元,以裂纹临界张开角为破坏参量,研究初始裂缝长度、检测单元长度、管壁厚度等参数对极限压力的影响规律,建立管道极限压力预测和修正模型。针对传统数值模拟方法的不足,提出了包含裂尖实

时位置预测的迭代加载法,提高了模拟的准确性,为输气管道止裂性能理论研究做出重要贡献。

贺云婷[8]以 X90 管线钢管为研究对象,利用 ABAQUS 软件建立管道裂纹动态扩展及止裂的全耦合计算方法。在此基础上,结合流体-固体-裂纹的全耦合数值模拟,获得裂纹的扩展速率与气体压力波的传播速率,并比较二者的关系来判定裂纹是否止裂。为高钢级输气管道止裂性能研究提供了新的模拟方法。

Maxey [9]等结合巴特尔纪念研究所对天然气管线钢全尺寸断裂的研究成果,提出适用于烃类介质的巴特尔双曲线法(BTCM)。该方法为预测管道在烃类介质输送过程中的裂纹扩展和止裂行为提供了重要的理论依据,通过建立相关数学模型,对管道止裂性能进行量化分析,在输气管道止裂性能理论研究领域具有开创性意义。

杨坤等[10]等针对延性裂纹在管线中的长程扩展特性,归纳 Battelle 双曲线止裂预测模型,并开发相应的修正算法,构建含及能量释放率、流变应力修正的 TGRC-1、TGRC-2 止裂预测模型,并对模型进行验证,为天然气管道止裂性能评估提供了新的模型和思路。

朱晓华[11]等基于内聚力模型建立了全尺寸埋地 X80 钢质燃气管道的动态断裂数值模型,考虑回填土与管道的相互作用,对比分析有无回填土条件下的裂纹扩展行为,为埋地管道的动态断裂安全评估提供了理论依据,补充了全尺寸试验的不足,揭示了回填土与管道裂纹扩展的耦合机制,对管道设计、维护及事故预防具有指导意义。

吕锦杰[12] [13]以 X80 管线钢为研究对象,通过数值模拟计算结果表明,该方法能较好地反映真实管线的动力破坏过程,为进一步揭示全尺寸管道的动态破裂奠定了基础。

李红克,张彦华[14]将裂纹尖端张开角作为断裂参数,利用有限元法,对具有轴向穿透裂纹的管线进行极限压力分析,并对其影响因素进行分析,并提出基于临界 CTOA 作为破坏条件的极限压力预报模型。研究表明,如果选择适当的数值计算方法,并选择合适的单元尺度,则可将临界 CTOA 用于带刺穿裂纹管线的极限压力预报。现有的管道损伤预测模型对小裂缝的承载力存在着严重的低估,而对于大裂缝的计算往往高估了管线的极限压力,从而对管线的安全构成了潜在的风险。

金勇[15]等建立静裂纹管道的有限元模型,采用运动式耦合方法与管道端面进行耦合,获取裂纹尖端张开位移(CTOD)随应变的变化关系,同时使用 FAD 图评估方法对工程进行失效评估,有效评估管道的安全性,为管道安全评估提供了新的方法和途径。

Cosham [16]等在不同裂纹长度、CO₂ 浓度及初始条件下,进行了三组全尺寸破坏试验。试验研究表明,裂纹起始长度、裂纹扩展韧度与裂纹扩展所需要的韧度之比是导致裂纹形貌差异的主要原因。并指出与烃类介质管道断裂形态存在差异,为深入理解管道断裂行为提供了实验依据。

Talemi [17] [18]等借助 ABAQUS 软件,基于流固耦合模型对埋地密相 CO₂ 输运管道的动态脆性断裂过程进行模拟。通过 Python 脚本计算裂纹长度增长对强度因子及裂纹扩展速度的影响,并构建 XFEM (扩展有限元法)与 CFD (计算流体动力学)的耦合模型,该模型能够有效预测减压波的变化规律及裂纹扩展速度,为 CO₂ 输运管道动态断裂扩展研究提供了关键工具,进一步推动了数值模拟技术在输气管道止裂性能分析中的工程应用。

Hu [19]等建立静裂纹管道的有限元模型,采用运动式耦合方法与管道端面进行耦合,获取裂纹尖端张开位移(CTOD)随应变的变化关系,同时使用 FAD 图评估方法对工程进行失效评估,有效评估管道的安全性,为管道安全评估提供了新的方法和途径。

Yan Li [20]建立了含腐蚀缺陷管道的有限元模型,并对影响超临界 CO₂ 管道爆破压力的参数进行了灵敏度分析。在完整管道有限元分析和爆压模型的基础上,采用非线性拟合方法建立了具有腐蚀缺陷的超临界 CO₂ 管道爆压方程。与实验数据相比,该预测方程对 X60-X80 钢管管道的爆破压力具有较高的预

测精度。

Okodi [21]等运用 ABAQUS 软件, 基于扩展有限元法(XFEM), 将最大主应变和断裂能作为损伤判据, 构建了 CO₂ 管道裂纹扩展与裂间应力的数值计算模型。该模型可用于预测含不同尺寸纵向裂纹的管道试件的破裂应力, 研究表明, XFEM 能够有效模拟管道裂纹扩展过程并分析其破裂应力特性。

B. Bedairi [22]等在处理裂纹与腐蚀同时发生的管道混合缺陷时, 采用弹塑性断裂力学方法对管道进行了相应的裂纹、腐蚀和 CIC 缺陷的破坏压力预测。并通过实验破裂试验验证。表明了有限元模型对于材料的失效准则的适用性。

4. 输油改输气的具体步骤

输油管道改为输气管道的实施步骤如下。

4.1. 清洗管道

在对石油管道进行改造为天然气前, 需要确保其内部的结蜡部分被完全清除掉, 这样才能避免可能导致设备运转及终端消费者出现问题的风险。针对不同的管道系统, 清理的方法也会有所差异, 如果管道尺寸较大且结蜡程度深, 结合物理与化学方式的清理方案会更为合适。具体的操作步骤包括: 利用一系列由大小不等、软硬兼备的耐磨型清管车逐步深入地进行清理工作。在此过程中, 需根据实际需求设定相关参数并向清管器中注入适量的洗涤液体, 以便于分解管道表面遗留的蜡质污渍。同时, 借助清管车辆的缓行过程, 可以实现全面深度的管道内部清洗。此外, 也可以选择运用喷射式清管技术来完成管道的清理任务[23]。

4.2. 对全线管道进行内检测

管道内检测是对管道进行完整性评估的重要手段, 完整性评估方法涵盖静水压力测试、直接评估以及在线检测。其中, 在线检测是唯一不会对管道完整性构成直接威胁的检测技术[24]。当前市场上最为流行的设备便是智能猪(Smart Pig)类型的检测机器, 它拥有长时间工作的能力, 并且能够适应各种传感器的应用环境。但是, 关于该种型号及所使用的传感器技术的详细信息并未被广泛地研究过。除使用机器人外, 传统的检测技术, 如超声波检测, 电磁声波检测, 涡流检测, 漏磁检测皆可为管道内检测做出完整性评估。

4.3. 根据对各类管道材料的全面评估, 确定哪些管材需要替换

对于受到腐化、压力或其他外部力量作用的长距离输送管道, 如果无法满足燃气管道的质量要求, 必须强制替换和修复。比如, Q235-A·F 材料不适合用作燃气管道。鉴于中国中部与山东地区的石油改造为天然气的实际状况, 位于三、四级人流稠密区域的管道需要更改为使用 Q235-A·F 材质; 而在一级、二级人流量较少的区域, 因初期管道输气量低且中原油田到济南线的最底温度高, 基于对此种 Q235-A·F 材料的评估结果, 暂时不做替代选择。

4.4. 更换与安装输气设备

管理者在更新和安装气体输送设备时, 必须对相关设备实施定期保养, 同时应加强设备的维护管理, 以此来延长设备的使用寿命并增强设备运行过程的安全性[25]。

4.5. 采用分段试压法进行管道强度试压及严密性试验

考虑到水的安全性, 采用水作为试压介质, 并根据复杂的地形条件将长输管道划分为若干小段。采

用分段水压试验对管道进行严密性和强度的压力试验是现在石油和天然气行业中非常频繁使用的方法,以确保管道的安全和高效施工[26]。

4.6. 干燥与置换流程

干燥、置换流程为:通球扫线→N₂置换→甲醇干燥→N₂置换→投产试运行→收尾[27]。

5. 国内成功案例

5.1. 濮临输油管道改输天然气

在 1999 年年末濮临输油管道顺利完成改输天然气工程一次投运。利用原有的濮临输油管道长度 215.43 km, 约占整个中济输气管(即从中原油田 - 济南的输气管道)全长的 82.4%, 管材有 Q235-AF、SM41B、16Mn、T/S-52K 共 4 种规格, 改输线路上共计有 7 段大河、大渠穿越和 6 段中大河渠跨越, 穿越大部分管道采用石油沥青玻璃布加强级防腐及套管保护方法, 直接跨越管道采用石油沥青玻璃布加强级防腐、混凝土支墩固管及套管保护方法[28]。

改输工作前进行充分准备。为防止旧管段内的油蜡及机械杂质堵塞过滤器、仪表和终点用户管网, 保障濮阳至段庄段油改气输气工程顺利实施, 管道清洗作为中济项目建设的重要环节, 累计完成清管作业总长度达 210 公里[29]。

更改输送用途前, 采用清管器对原油管道内部的结油、结蜡进行清除, 完成清管工序。但是在管线检查过程中, 发现老管段自身存在一些问题, 难以满足输气管线的相关标准。

核心问题在于: 防腐绝缘层老化严重或有破损点; 管道被盗油打孔; 直跨管道的套管密封不严, 并且存在腐蚀等现象。因此, 在接下来的整改工作中, 就需要针对准备工作中检测出的这些问题进行处理。

在分析原有输油管道的基础状况后, 在改造输送前的准备工作基础上, 对濮临输油管道进行了安全调整。在规定的设计输送量范围内, 经过调整的管道已经符合天然气输送的强度标准。为提升天然气输送的安全性, 对原有的 7 个输油泵站的截断阀室进行了改进, 同时新增了 3 个新的阀室。

5.2. 双 - 魏旧输油管道改输天然气

双 - 魏旧输油管道在 2001 年 6 月成功完成改造, 开始输送天然气。最初设计的双 - 魏输油管道使用螺纹钢, 材料为 A3F 钢, 设计的工作压力为 5.0 MPa, 最高工作温度为 100℃, 管道的水压测试压力为 7.5 MPa。经过计算, 输气管道的启动输送压力为 2.0 MPa[30]。

前期准备及整改工作与前面例子类似, 收集大量的数据形成对原有管道的全面基础现状分析报告, 然后对管道现状制定整改计划。通过详细检测对原有管道的腐蚀程度、管道的壁厚进行检测, 特别是对易破坏和关键、危险部分的管道进行检测, 发现双 - 魏旧输油管道的防腐层基本正常, 个别发生防腐层变脆、变硬需进行更换修复, 裸露的进行套管补强。整改期间, 后期应做好管道的壁厚和腐蚀度的定期检测, 加强对管道的安全生产管理, 特别需关注线路经过村庄和集镇的管道的运行安全。

5.3. 克 - 乌 DN529 输油复线改输天然气

呼图壁气田开发中, 气田附近急需大口径输气管线, 新建管线投资大, 建设风险性高, 管道建设周期长, 因此采用原来的大管径管道, 将原有管道克 - 乌 DN529 输油复线管道改输天然气。克 - 乌复线为材质较好的大直径钢管, 其输送流量和管线内输送压力均可满足气田所需, 所以决定利用已有的管线[31]。

为确保油改气后, 管道安全、畅通运行, 对该管线进行全线腐蚀性数据统计, 对腐蚀缺陷进行漏磁检测, 经过数据处理, 分析腐蚀缺陷的分布和分布特征, 与室内试验的结合, 按里程统计, 得出全线管

道剩余强度,以得出管道剩余强度的正确结论。为方便判定管道改造过程中腐蚀缺陷的分布位置,对腐蚀严重的管线部位,进行开挖和更换,以确定管道是否需要防腐层维修、管段是否需进行维护、管道如何进行科学运行管理[32]。

鉴于克-乌复线原设计的清管器无法满足输气管道清管需求,且无法发送内窥检测器,因此在改造工程中对原发球筒进行了加长处理,将管道内曲率半径较小的弯头更换为曲率半径更大的弯头,同时将原闸板阀、球阀替换为平板闸阀,并借助7个加压站及干线的清管球指示器实现清管器的接收与发送作业。以上工作为后续全线清管、内窥检测做好了充足的准备工作。

将原有管道中残存的液态水及其他固体或半固态物质清除掉,在以往的管线清理经验基础上,本次工程设计单位使用的一项技术储备为机械清管、化学清洗。这一措施是使将来该管道进行检修、改造工程得以顺利完成的一个准备工作,保证了在后期天然气正常通气后能向外界提供高质量的供气质量。本方案采用气密性试压技术,在天然气投产阶段,采用压力等级为3.0 MPa的天然气对全管段实施气密性试压。该技术克服了传统压缩空气试压在工期、成本及施工安全等方面的弊端,同时有效提升了管线试压的安全系数。

参考文献

- [1] 帅健. 腐蚀管线的剩余寿命预测[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(4): 91-93.
- [2] 张亨. 输油管道改输天然气的研究与实践[J]. 油气储运, 2002, 21(6): 47-50.
- [3] 宋北, 郭泉, 姜英龙, 曹宇堃, 王博, 杨昊泉. 夏比冲击试验方法标准现状及影响因素综述[J]. 压力容器, 2022, 39(6): 58-67.
- [4] 卜文平, 刘建国, 等. 输油管道改输天然气的问题研究[J]. 油气储运, 2002, 21(4): 53-55.
- [5] 曹宇光, 甄莹, 贺娅娅, 等. 基于裂纹尖端张开角含轴向穿透裂纹 X80 管道极限压力预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 139-146.
- [6] Zhen, Y., Chang, Q., Cao, Y.G., et al. (2022) Simulation Method for Crack Propagation of Natural Gas Pipelines with Realtime Prediction of Crack Tip Position. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, **46**, 143-151.
- [7] 甄莹. 基于裂纹尖端张开角的天然气管道止裂控制基础研究[D]: [博士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2021.
- [8] 贺云婷. 高钢级输气管道裂纹延性扩展及止裂模拟技术研究[J]. 焊管, 2018, 41(10): 8-13, 17.
- [9] Maxey, W., Kiefner, J., Eiber, R. and Duffy, A. (1972) Ductile Fracture Initiation, Propagation, and Arrest in Cylindrical Vessels. In: Corten, H., Ed., *Fracture Toughness: Part II*, ASTM International, 70-81. <https://doi.org/10.1520/stp38819s>
- [10] 杨坤, 池强, 李鹤, 等. 高钢级天然气输送管道止裂预测模型研究进展[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(4): 9-14.
- [11] Zhu, X., Deng, Z. and Liu, W. (2020) Dynamic Fracture Analysis of Buried Steel Gas Pipeline Using Cohesive Model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **128**, Article ID: 105881. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105881>
- [12] 吕锦杰. 天然气/石油管道的动态断裂模拟及止裂研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2018.
- [13] 吕锦杰, 赵军华, 于培师. 全尺寸 X80 天然气管道动态断裂研究[J]. 机械强度, 2018, 40(6): 1485-1489.
- [14] 李红克, 张彦华. 以临界 CTOA 为参量的含裂纹管道极限压力有限元模拟[J]. 焊接学报, 2005, 26(1): 53-57, 83.
- [15] 金勇, 黎延志, 何玉龙, 张轶男, 魏昊天, 王路明. 管道裂纹有限元分析与 ECA 评估研究[J]. 当代化工研究, 2023(1): 134-136.
- [16] Cosham, A., Jones, D.G., Armstrong, K., Allason, D. and Barnett, J. (2016) Analysis of a Dense Phase Carbon Dioxide Full-Scale Fracture Propagation Test in 24 Inch Diameter Pipe. 2016 11th International Pipeline Conference, Calgary, 26-30 September 2016, V003T05A012. <https://doi.org/10.1115/IPC2016-64456>
- [17] Talemi, R.H., Brownb, S., Martynov, S. and Mahgerefteh, H. (2016) Assessment of Brittle Fractures in CO₂ Transportation Pipelines: A Hybrid Fluid-Structure Interaction Model. *Procedia Structural Integrity*, **2**, 2439-2446. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.305>
- [18] Talemi, R.H., Brown, S., Martynov, S. and Mahgerefteh, H. (2016) Hybrid Fluid-Structure Interaction Modelling of

- Dynamic Brittle Fracture in Steel Pipelines Transporting CO₂ Streams. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **54**, 702-715. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.08.021>
- [19] Hu, Q., Zhang, N., Li, Y., Wang, W., Zhu, J. and Gong, J. (2021) A New Model for Calculation of Arrest Toughness in the Fracture Process of the Supercritical CO₂ Pipeline. *ACS Omega*, **6**, 16804-16815. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01360>
- [20] Li, Y., Wang, W., Chen, Z. and Li, Y. (2023) Integrity Assessment of Supercritical CO₂ Transport Pipelines. *Geoenergy Science and Engineering*, **221**, Article ID: 211355. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2022.211355>
- [21] Okodi, A., Lin, M., Yoosef-Ghods, N., Kainat, M., Hassanien, S. and Adeeb, S. (2020) Crack Propagation and Burst Pressure of Longitudinally Cracked Pipelines Using Extended Finite Element Method. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **184**, Article ID: 104115. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104115>
- [22] Bedairi, B., Cronin, D., Hosseini, A. and Plumtree, A. (2012) Failure Prediction for Crack-In-Corrosion Defects in Natural Gas Transmission Pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **96**, 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.06.002>
- [23] 李亚茜, 田园, 阴丽诗, 等. 射流清管器环状喷嘴流场模拟及优化设计[J]. 天然气与石油, 2023, 41(5): 78-85.
- [24] Ellinger, M. (2017) A History of In-Line Inspection Tools. *Inspection Engineering Journal*, **23**, 2.
- [25] 李广东. 天然气输气站建设及运行安全管理策略探究[J]. 清洗世界, 2021, 37(12): 155-156.
- [26] Deng, T., Zhou, J., Zhang, Y., Chen, Y. and Jing, G. (2016) The Technique of Segmental Pigging Process for Long Distance Pipeline of Oil and Gas in China. *Journal of Pressure Vessel Technology*, **139**, Article ID: 011701. <https://doi.org/10.1115/1.4034284>
- [27] 王振洪. 原油管道改输天然气前的清管实践[J]. 油气储运, 2005(3): 49-50, 60-64.
- [28] 张穹. 濮阳输油管道改输天然气的技术分析[J]. 油气储运, 2003, 22(3): 9-14.
- [29] 张红兵, 陈艳芳, 何明金. 濮阳线输油改输气管道清洗[J]. 天然气石油, 2002, 20(1): 5-8.
- [30] 刘智军, 吴永焕, 陈李斌. 双-魏旧输油管道改输天然气技术与措施[J]. 管道技术与设备, 2003(5): 22-23
- [31] 刘晨东, 孙文成, 台熙鑫, 等. 克-乌 DN529 输油复线改输天然气实践与研究[J]. 中国高新科技产业, 2008(22): 110-114.
- [32] 白真权, 赵新伟, 罗金恒, 等. 克乌复线管道腐蚀缺陷检测数据综合统计分析[J]. 油气储运, 2000, 19(3): 28-31.