引文：陈兵，付子言，徐梦林，等. 玻璃纤维复合材料结构对 $CO_2$ 管道外部止裂性能的影响[J]. 油气储运，2025，44(1)：26−36.
CHEN Bing, FU Ziyan, XU Menglin, et al. Effect of glass fiber composite structure on external crack arrest performance of $CO_2$ pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(1): 26−36.

# 玻璃纤维复合材料结构对 $CO_2$ 管道外部止裂性能的影响

陈兵[1]　付子言[1]　徐梦林[1]　王香增[2]　齐文娇[1]
1. 西安石油大学机械工程学院；2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司

**摘要：【目的】**碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)是目前中国实现“双碳”战略目标的关键技术，$CO_2$ 管输则是实现规模化 CCUS 的重要环节。$CO_2$ 管道本身存在各类缺陷，受 $CO_2$ 特殊的减压特性及管道内压的影响，管道缺陷发展成初始裂纹并产生延性扩展的风险大大增加，严重威胁管道运输安全。**【方法】**为使 $CO_2$ 管道实现有效止裂，采用有限元软件 ANSYS 建立玻璃纤维复合材料外部止裂结构模型，基于 EPRI(Electric Power Research Institute)的 $J$ 积分理论公式与应力分布理论计算公式对所建模型进行可靠性验证，分析外部止裂结构铺设角度、铺设厚度、铺设长度、管道径厚比以及裂纹尺寸等因素对其止裂性能的影响，最后结合延长油田 $400\times10^4$ t/a 超临界 $CO_2$ 输送方案的 L21 管道对外部止裂结构模型进行评估。**【结果】**玻璃纤维复合材料外部止裂结构可以有效转移并承担管道所受应力，降低管道发生延性断裂的风险；止裂结构铺设厚度、铺设长度、管道径厚比及裂纹尺寸均与止裂性能正相关，而铺设角度则存在最优值。止裂结构的止裂性能由各影响因素共同决定，其中铺设厚度的影响最大，而铺设角度的影响最小。止裂结构的最佳性能尺寸为：铺设厚度与管道壁厚相等、铺设长度为 0.8 倍管道外径、铺设角度为 60°。**【结论】**铺设厚度为 12 mm、长度为 326 mm 的外部止裂结构可有效阻止 L21 管道的延性断裂，研究结果可为外部止裂结构的设计提供理论基础与参考范例。(图 13，表 8，参 28)

**关键词：**CCUS；止裂结构；$CO_2$ 管道；玻璃纤维；止裂性能
**中图分类号：**TE88　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-8241(2025)01-0026-11
DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2025.01.003

# Effect of glass fiber composite structure on external crack arrest performance of $CO_2$ pipeline

CHEN Bing[1], FU Ziyan[1], XU Menglin[1], WANG Xiangzeng[2], QI Wenjiao[1]
1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University; 2. Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd.

**Abstract:** [**Objective**] Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) is regarded as a key technology essential for China to achieve its “carbon peaking and carbon neutrality” objectives. $CO_2$ pipeline transportation is considered an important element in realizing large-scale CCUS. However, due to various defects in $CO_2$ pipelines, the unique decompression characteristics of $CO_2$, and the influence of internal pipeline pressure, these pipelines face significantly elevated hazards of defects evolving into initial cracks and leading to ductile propagation, which poses a serious threat to the safety of pipeline transportation. [**Methods**] Aimed at achieving effective crack arrest for $CO_2$ pipelines, a model of external crack arrest structures made from glass fiber composites was developed using the finite element software ANSYS. The reliability of this model was verified using the $J$-integral theory formula developed by the Electric Power Research Institute (EPRI) and the stress distribution theory formula. Subsequently, the effects of various factors on the crack arrest performance of these external structures were analyzed, including paving angle, paving thickness, paving length, pipe diameter-to-thickness ratio, and crack size. Additionally, the developed model was evaluated for Pipeline L21, which is intended for the transportation of $400\times10^4$ t/a of supercritical $CO_2$ in the Yanchang Oilfield. [**Results**] The external crack arrest structures made from glass fiber composites were identified as effective in transferring and bearing stress on the pipeline, thereby mitigating the risk of ductile fracture. Paving thickness, paving length, pipe diameter-


©《油气储运》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

to-thickness ratio, and crack size were found to be positively correlated with crack arrest performance, while an optimal paving angle was consistently observed. Among various factors contributing to crack arrest performance, paving thickness had the greatest effect, whereas paving angle had the least impact. The optimal configurations for performance included a paving thickness equal to the pipe wall thickness, a paving length of 0.8 times the outer diameter of the pipe, and a paving angle of 60°. [**Conclusion**] Paving external crack arrest structures with a thickness of 12 mm and a length of 326 mm can effectively prevent ductile fracture in Pipeline L21. These research findings provide a theoretical basis and practical examples for the design of external crack arrest structures. (13 Figures, 8 Tables, 28 References)

**Key words:** Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS), crack arrest structure, $CO_2$ pipeline, glass fiber, crack arrest performance

作为实现 CCUS 技术的重要环节，$CO_2$ 管道输送在整个 CCUS 技术中具有举足轻重的角色，加之超临界态 $CO_2$ 具备高密度、高扩散性、低黏度等特性，$CO_2$ 管输具有输送量大、耗能低、经济性好等优势[1−8]。然而，管道在生产或运行过程中会存在各种类型缺陷，缺陷可在管道内压的影响下发展成为初始裂纹[9−11]。由于 $CO_2$ 特殊的减压特性，管道泄漏时会产生较高的压力平台，导致管道发生延性断裂的风险大大增加，严重威胁管道运行安全[12−15]。对于无法依靠管道自身实现止裂的管道，需要设计不同类型的止裂结构，增加管道止裂韧性，确保管道输送安全。

国内外学者对 $CO_2$ 管道延性断裂外部止裂结构已有一定的研究，Di Biagio 等[16]采用复合止裂结构对管道进行缠绕补强，通过全尺寸爆破试验，验证了该止裂结构可以实现快速止裂，但由于仅进行了有限次数的试验，结果较为分散；任科[17]设计了一种内层为碳纤维复合材料、外层为传统钢套材料的外部止裂结构，采用有限元软件 ANSYS，基于 $K$ 判据和止裂系数分析了其厚度、长度对止裂性能的影响，确定了满足经济性和性能要求的最佳尺寸规格；喻健良等[18]使用套管止裂结构对缺陷管道进行修复补强，采用有限元软件 ANSYS 建立含裂纹的外部止裂结构模型，基于止裂系数评估其性能，并对影响因素进行了研究。

目前，国内相关研究重点主要集中在碳纤维材料外部止裂结构方面，尚缺乏对玻璃纤维复合材料外部止裂结构的研究。此外，相对于碳纤维复合材料，玻璃纤维复合材料的价格约为碳纤维复合材料价格的 10%，且拥有优异的工艺性能，兼顾了性能与价格优势，能够大批量运用[19]。随着输送管道设计管径和用钢级别的不断提升，国外研究人员倾向于选择玻璃纤维材料作为外部止裂结构[20]。基于此，利用有限元软件 ANSYS 建立含裂纹的玻璃纤维复合材料外部止裂结构模型并验证其可靠性，研究不同因素对其止裂性能的影响。选取延长油田 $400\times10^4$ t/a 超临界 $CO_2$ 管道输送方案为例，对其止裂性能进行评估，以期为 $CO_2$ 管道外部止裂结构的设计提供参考。

# 1　$CO_2$ 管道止裂判据及止裂结构

## 1.1　管道止裂判据

作为控制管道延性断裂的理论基础，基于动态断裂力学理论，止裂判据可分为速度判据与能量判据。

### 1.1.1　速度判据

在 Rudinger 等[21]、Munkejord 等[22]的研究基础上，基于天然气管道全尺寸爆破实验数据，对减压波速度计算模型与裂纹扩展速度计算模型进行拟合，得到 Battelle 双曲线（图 1）。管材在运行过程中所需的止裂韧性由裂纹扩展速度曲线与减压波速度曲线共同决定。曲线 1 表示裂纹扩展速度小于管内输送介质减压波速度，管道止裂压力大于减压波平台压力，裂纹尖端应力将逐渐降低，管材可以实现止裂；曲线 3 则相反，裂纹尖端保持较高的集中应力，管材存在延性断裂风险；曲线 2 则表示恰好达到管材止裂要求的临界值。

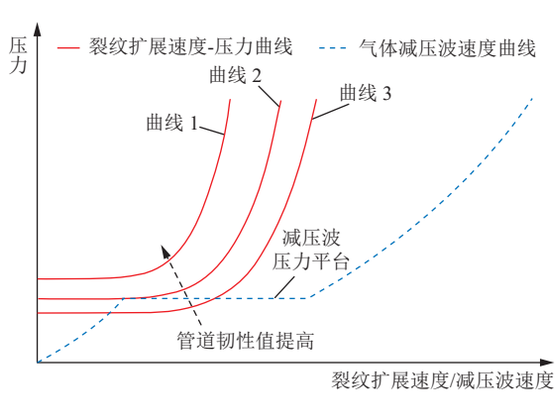



**图 1　Battelle 双曲线法示意图**

**Fig. 1　Schematic diagram of Battelle two-curve method**

### 1.1.2　能量判据

Griffith 提出的能量平衡理论是能量判据的核心

内容[23]，裂纹扩展驱动力由管内介质所具备的能量提供，阻止裂纹扩展的阻力则由管材自身的断裂韧性提供。当裂纹驱动力与裂纹扩展阻力相等时，裂纹稳态扩展；反之，裂纹扩展速度降低至实现止裂。该判据以临界动态 $J$ 积分、临界裂纹尖端张开角等与能量判据相关的度量指标评估管道材料的抗延性断裂能力，为管道止裂提供参考。

由 Rice 提出的 $J$ 积分被广泛应用于管道延性断裂的仿真计算，其能对裂纹尖端应力和应变场进行表征。计算方法包含试验和数值方法，其中理论计算包含如下两种方法[24]。

1.1.2.1　回路积分定义

从 $A$ 点到 $B$ 点通过逆时针的方向取一个积分回路（图 2，其中 $N$ 为积分回路微元的外法线方向），即为 $J$ 积分：

$$J=\int_{\Gamma}\left(w\mathrm{d}x_2-\sigma_i\frac{\partial u_i}{\partial x_1}\mathrm{d}s\right) \tag{1}$$

式中：$\Gamma$ 为包围裂纹尖端的积分回路；$x_1$、$x_2$ 分别为以裂纹尖端为坐标原点平行和垂直于裂纹面的坐标，m；$w$ 为积分回路中的应变能密度，J/m$^3$；$\sigma_i$ 为积分回路中的应力分量，MPa；$u_i$ 为积分回路中位移分量，m；d$s$ 为积分回路线的弧长，m。

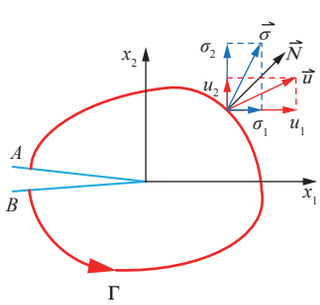



**图 2　$J$ 积分回路示意图**
**Fig. 2　Schematic diagram of $J$-integral loop**

1.1.2.2　形变功率定义

在受外加载荷和产生微变形时，$J$ 积分为：

$$J=\left(\frac{\partial U}{\partial a}\right)_P=-\left(\frac{\partial U}{\partial a}\right)_\Delta=-\left(\frac{\partial \Pi}{\partial a}\right) \tag{2}$$

式中：$U$ 为单位厚度下的应变能，J；$a$ 为裂纹长度，mm；$\Pi$ 为单位厚度下的位能，J/kg；$P$ 为恒载荷条件；$\Delta$ 为恒位移条件。

基于 $J$ 积分断裂理论形成材料延性断裂准则：

$$J=J' \tag{3}$$

式中：$J'$ 为材料断裂韧性。

若材料裂纹尖端处的 $J$ 积分小于 $J'$，裂纹可以自行止裂；反之，裂纹将发生持续扩展。

### 1.2　外部止裂结构

沿管道轴向且保留适当间隔，将外部止裂结构直接安装在管道的外侧。这不仅可以降低裂纹驱动力，而且可以提高管道局部截面的抗延性断裂韧性，阻止裂纹持续扩展[25]。常见的止裂结构包括传统钢套止裂结构、碳纤维及玻璃纤维等复合材料构成的复合止裂结构[26−27]。

在此，以由玻璃纤维复合材料构成的外部止裂结构作为研究对象。该外部止裂结构由单层纤维复合板叠层构成，优势在于单层板在铺设时可以改变角度，且单层板的自身性能参数（表 1）可按照叠层复合板的结构设计理论进行构造。

**表 1　外部止裂结构所使用材料性能参数表**
**Table 1　Performance parameters of materials for external crack arrest structure**

| 材料 | 刚度/GPa | 泊松系数 | 密度/（kg·m$^{-3}$） | 抗拉强度/MPa | 体积分数 |
|---|---|---|---|---|---|
| E-玻璃纤维 | 75.0 | 0.31 | 2 555 | 3 450 | 60% |
| 环氧树脂 | 3.5 | 0.34 | 1 175 | 65 | 40% |

## 2　外部止裂结构模型建立及验证

根据实际工程服役的止裂结构，建立含缺陷管道及外部止裂结构几何模型（图 3，其中 $D_1$ 为管道外径；$t$ 为管道壁厚；$H$ 为外部止裂结构厚度；$L_2$ 为外部止裂结构长度；$a$ 为裂纹缺陷长度；$c$ 为裂纹缺陷深度；$\lambda$ 为外部止裂结构铺设角度）。

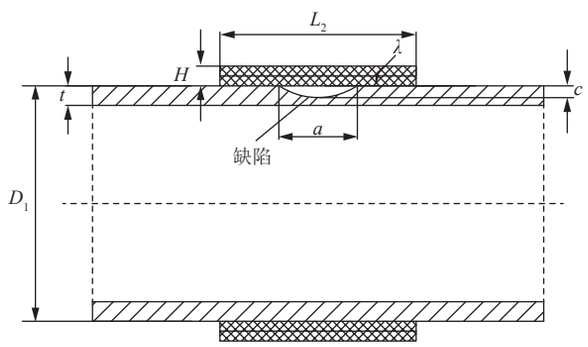



**图 3　含缺陷管道及外部止裂结构示意图**
**Fig. 3　Schematic diagram of pipeline with crack defects and the external crack arrest structure**

### 2.1　有限元模型

2.1.1　模型建立

基于 ANSYS 平台，采用 Design Modeler 与 Extrude

软件建立固体区域模型，采用 Fill 建立管道内部流体区域模型。结合 GB/T 19624—2019《在用含缺陷压力容器安全评价》，将管道内表面裂纹规则化为长轴为裂纹长度 $a$、短半轴为裂纹深度 $c$ 的半椭圆形（图 4）。基于 Static Structural 静力学模块及 Fracture 断裂功能，在管道中段的内表面建立轴向半椭圆裂纹，在外部的裂纹中心处铺设玻璃纤维材料的外部止裂结构，建立含裂纹缺陷的外部止裂结构管道模型（图 5）。

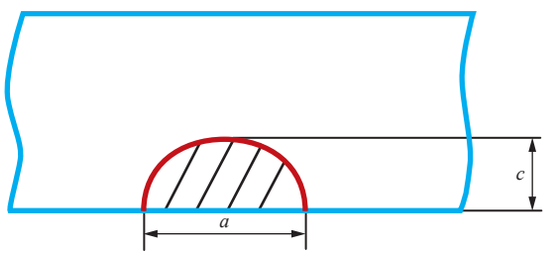



图 4　规则化后的裂纹形状示意图
**Fig. 4　Schematic diagram of crack shape after regularization**

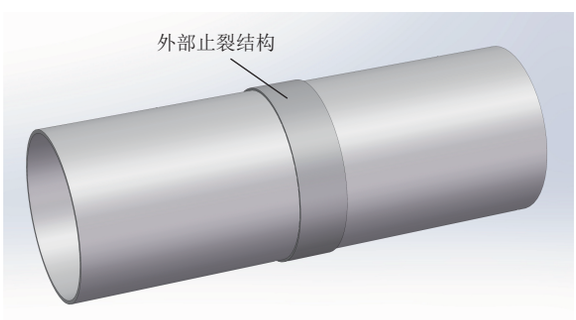



图 5　含裂纹缺陷的外部止裂结构管道模型图
**Fig. 5　Model of external crack arrest structure of pipeline with crack defects**

### 2.1.2　网格划分及参数设置

对流体域采用 Multizone（多区域）方法进行网格划分，优先采用六面体网格进行划分，然后再用其他类型网格填充六面体不能划分的区域；对固体域（即裂纹缺陷部分）采用四面体网格进行划分。

考虑重力加速度影响，在 $X$ 方向添加重力加速度 9.81 m/s$^2$。采用 Realizable $k$-$\varepsilon$ 作为湍流模型，流体介质为 $CO_2$，管道输送温度、压力为超临界状态。由 REFPROP 物性软件获取不同温度压力下 $CO_2$ 流体的密度与动力黏度，设置流体域边界条件（表 2），导入 Fluent 模块进行求解。

表 2　流体域边界条件设置表
**Table 2　Boundary conditions of fluid domain**

| 名称 | 位置 | 边界名称 | 边界类型 |
|---|---|---|---|
| 入口 | 流体流入端 | INLET | VELOCITY-INLET |
| 出口 | 流体流出端 | OUTLET | PRESSURE-OUTLET |
| 管道壁面 | 管壁 | WALL | WALL |

### 2.1.3　数据传递与处理

采用 Imported Load 加载流体载荷计算结果。受力面为管道内壁面，流体边界 WALL 为流体压力的施加源，在固体管道的内壁面处添加流体边界上的静压力。通过结构静力学计算，得到安装止裂结构后管道裂纹缺陷处的 $J$ 积分。

## 2.2　有限元模型验证

### 2.2.1　$J$ 积分结果可靠性验证

以延长油田 400×10$^4$ t/a 输送方案（表 3～表 5）中 L25 管道为对象，将 ERPI（Electric Power Research Institute）的 $J$ 积分理论公式[28]计算结果与本模型所计算出裂纹处 $J$ 积分的值进行对比。当管道承载内压时，EPRI 的 $J$ 积分计算公式为：

$$J = J_1(a_0,\ p) + J_2(c,\ p,\ n) = \frac{\pi c\left(1-v^2\right)}{E}p^2F^2 + \alpha\frac{\sigma_0^2}{E}b\left(\frac{c}{t}\right)h_1\left(\frac{c}{t},\ n\right)\left(\frac{p}{p_{\min}}\right)^{n+1} \tag{4}$$

式中：$J_1$、$J_2$ 分别为 $J$ 积分的弹性、塑性部分；$a_0$ 为包括 Irwin 小尺度屈服修正的有效裂纹长度，mm；$E$ 为弹性模量，MPa；$v$ 为泊松比；$p$ 为管道输送压力，MPa；$\alpha$ 为材料常数；$\sigma_0$ 为材料的屈服应力，MPa；$n$ 为材料硬化系数；$b$ 为未开裂韧带（$b$=$t$−$c$），mm；$h_1$ 为无量纲函数，由全塑性系数手册查找获得；$F$ 为无量纲函数，由 $c/t$ 与 $n$ 决定；$p_{\min}$ 为当 $n$=∞ 时，管道的极限压力最小值，由 $p_{\min} = 2c\sigma_0/\left(\sqrt{3}R\right)$（其中 $R$ 为管道内半径）计算，MPa。

表 3　延长油田 $CO_2$ 管道实际工况参数表
**Table 3　Actual operating parameters of $CO_2$ pipeline in Yanchang Oilfield**

| 名称 | 公称直径/mm | 管径/mm | 壁厚/mm | 流量/（10$^4$ t·a$^{-1}$） | 长度/km | 埋深/m | 地温/℃ | 管输流速/（m·s$^{-1}$） | 管输温度/℃ | 管输压力/MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L21 | 400 | 406 | 12 | 360 | 194 | 1.8 | 7.8 | 1.26 | 45 | 12 |
| L25 | 250 | 273 | 9 | 160 | 110 | | | 1.00 | 40 | |

表 4　延长油田 $CO_2$ 管道材料参数表
Table 4　Material parameters of $CO_2$ pipeline for Yanchang Oilfield

| 材料 | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 屈强比 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| X80 | 7 850 | 206 | 0.31 | 555 | 625 | 0.888 |

表 5　延长油田 $CO_2$ 管道气源组分表(体积分数)
Table 5　Gas source components of $CO_2$ pipeline for Yanchang Oilfield (volume fraction)

| $CO_2$ | $H_2$ | CO | $CH_4$ | $N_2$ | $A_r$ | $H_2S$ | $CH_3OH$ | $H_2O$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 98.81% | 0.22% | 0.51% | 0.007 55% | 0.26% | 0.006 4% | 0.000 5% | 0.005 3% | 0.02% |

将利用公式计算得出的理论值与模型模拟获得的管道裂纹处 $J$ 积分进行对比(表 6)，验证模型的准确性。可见在不同管输压力与裂纹缺陷尺寸条件下，理论与模拟的计算结果较为吻合，相对误差维持在 7%以内，满足工程计算精度要求，该模型具有可靠性，可用于后续研究。

表 6　有限元软件计算值与 ERPI 理论值对比表
Table 6　Comparison between finite element software calculations and ERPI theoretical values

| 管输压力/MPa | 壁厚/mm | 裂纹深度/mm | $F$ | $h_1$ | $J$ 积分 | | 相对误差 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 理论值 | 模拟值 | |
| 8 | 20 | 2.5 | 1.20 | 14.95 | 1.55 | 1.47 | −5.16% |
| 8 | 20 | 5.0 | 1.44 | 9.46 | 4.52 | 4.26 | −5.75% |
| 8 | 20 | 10.0 | 2.52 | 2.12 | 26.82 | 25.23 | −5.93% |
| 10 | 20 | 2.5 | 1.21 | 14.93 | 2.32 | 2.16 | −6.89% |
| 10 | 20 | 5.0 | 1.44 | 9.44 | 7.13 | 6.94 | −3.25% |
| 10 | 20 | 10.0 | 2.53 | 2.12 | 44.06 | 43.27 | −1.79% |
| 12 | 20 | 2.5 | 1.20 | 14.94 | 3.24 | 3.11 | −4.01% |
| 12 | 20 | 5.0 | 1.45 | 9.45 | 10.35 | 9.96 | −3.76% |
| 12 | 20 | 10.0 | 2.51 | 2.11 | 68.73 | 67.57 | −1.68% |

#### 2.2.2　应力分布验证

对安装外部止裂结构后止裂管段、止裂结构及远离止裂管段的未修复管段所受轴向应力进行模拟，并与公式计算的理论值对比(表 7)。可见，安装外部止裂结构后，需修复管段处所受到的轴向应力下降，由外部止裂结构承担了该处所受其余轴向应力，管道整体强度满足止裂需求。

表 7　轴向应力计算值与理论值对比表
Table 7　Comparison between finite element software calculations and theoretical values

| 结构 | 轴向应力/MPa | |
|---|---|---|
| | 模拟值 | 理论值 |
| 未修复管段 | 112 | 106.17 |
| 止裂管段 | 28 | – |
| 止裂结构 | 84 | – |

## 3　止裂性能影响因素分析

止裂结构的铺设角度 $\lambda$、铺设厚度 $H$ 和铺设长度 $L_2$ 是外部止裂结构止裂性能的主要影响因素，基于 ASME PCC-2-2011《压力设备和管道的检修》，以相对铺设长度 $L_2/D_1$ 表征止裂结构的铺设长度，设置为 0.4～1.2；以相对铺设厚度 $H/t$ 表征止裂结构的铺设厚度，设置为 0.6～1.4；铺设角度设置为 30°～90°。结合表 4 中 L25 管道参数，径厚比 $D_1/t$ 设置为 40～80。裂纹尺寸由裂纹深度与裂纹长度组成，以相对裂纹深度 $c/t$ 表征裂纹深度，设置为 0.5～0.8；以相对裂纹长度 $a/c$ 表征裂纹长度，设置为 2～8。以安装外部止裂结构后的管道裂纹处 $J$ 积分与止裂系数 $k$(止裂结构安装前后 $J$ 积分降低程度)为依据，对其止裂性能进行评判。

### 3.1　铺设角度

选取 L25 管道，设置裂纹长度 $a$ 为 36 mm，止裂结构铺设厚度 $H$ 与管壁厚度 $t$ 相等，铺设长度 $L_2$ 与管道外径 $D_1$ 相等，将裂纹深度 $c/t$ 设置为变量，研究铺设角度对外部止裂结构止裂性能的影响（图 6）。可见，当止裂结构的铺设角度为 30°～60° 时，随着铺设角度增大，裂纹深处 $J$ 积分降低、止裂系数 $k$ 增大，表明管道止裂性能随之增强；当止裂结构的铺设角度为 60°～90° 时，随着铺设角度增大，裂纹深处 $J$ 积分增加、止裂系数 $k$ 逐渐减小，表明管道止裂性能随之降低；止裂性能随铺设角度不同而不同，当止裂结构的铺设角度为 60° 且裂纹深度 $c/t$ 为 0.5 时，裂纹深处 $J$ 积分最低，止裂系数 $k$ 最高，此时管道整体的止裂性能达到最优。

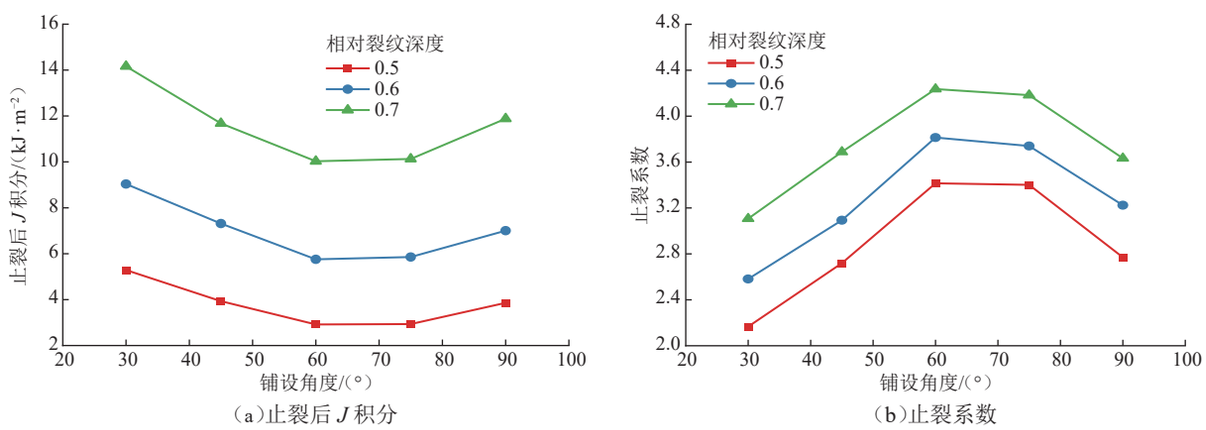



**图 6　止裂性能参数随铺设角度变化曲线**

**Fig. 6　Variation curves of crack arrest performance parameters with paving angle**

本次工作所设计的外部止裂结构由多个单层复合材料板叠加而成，单层板的铺设角度不同会导致内部纤维方向发生变化，影响止裂结构的性能。当该止裂结构铺设角度为 ±60° 时，其材料性能最佳，能有效转移裂纹处的应力载荷，降低裂纹扩展驱动力。

### 3.2　铺设厚度

选取 L25 管道，设置裂纹深度 $c/t$ 为 0.6，裂纹长度 $a/c$ 为 4，止裂结构铺设角度为 60°，在不同铺设长度 $L_2/D_1$ 条件下研究铺设厚度 $H/t$ 对其止裂性能的影响（图 7）。可见，安装外部止裂结构后，裂纹深处 $J$ 积分持续下降，同时止裂系数 $k$ 持续增大，二者近似呈线性关系。当相对铺设长度保持不变时，随着铺设厚度增大，止裂结构的止裂性能不断增强。然而，当止裂结构的铺设厚度增至与管壁厚度相等时，$J$ 积分变化趋势减缓；当铺设厚度继续增大时，止裂结构的止裂性能变化不明显，可见管壁厚度即为止裂结构的最佳铺设厚度。根据 ASME PCC-2-2011 计算得出铺设厚度临界值 $H_{repire}$=10.98 mm，$H/t$=1.22，与上述结果略有偏差，其原因在于该外部止裂结构采用了 ±60° 的交叉缠绕方式。可见，使用该标准计算出的止裂结构铺

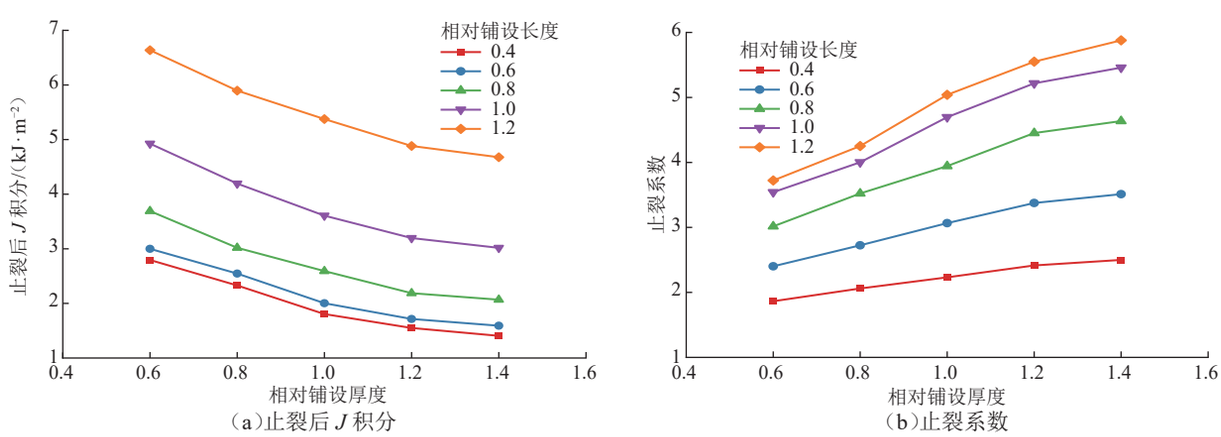



**图 7　止裂性能参数随铺设厚度变化曲线**

**Fig. 7　Variation curves of crack arrest performance parameters with paving thickness**

设厚度具有较高的可靠性，同时也证实采用合适的铺设角度不仅能增强止裂结构的止裂性能，还能适当减小止裂结构的厚度。

### 3.3　铺设长度

选取 L25 管道，设置裂纹深度 $c/t$ 为 0.6，裂纹长度 $a/c$ 为 4，止裂结构铺设角度为 60°，在不同铺设厚度 $H/t$ 条件下研究铺设长度 $L_2/D_1$ 对止裂结构止裂性能的影响（图 8）。保持铺设厚度 $H$ 不变，随着铺设长度 $L_2/D_1$ 的增大，安装外部止裂结构后的 $J$ 积分持续下降，同时止裂系数 $k$ 持续增加，止裂性能不断增强。当铺设长度 $L_2/D_1$ 在 0.4～0.8 之间时，止裂后 $J$ 积分急剧下降，止裂系数 $k$ 快速增加；铺设长度 $L_2/D_1$ 在 0.8～1.2 之间时，二者的变化趋势相对平缓，故最佳铺设长度 $L_2/D_1$ 为 0.8。该结果表明当外部止裂结构的铺设长度达到一定值时，其止裂性能趋于稳定。因此，增加铺设长度有利于裂纹处的应力转移至止裂结构，提高止裂性能，但过度增加铺设长度会导致复合材料局部硬化而失去止裂效果。通过 ASME PCC-2-2011 计算出该裂纹尺寸下止裂结构铺设长度 $L_2$=191.23 mm，即 $L_2/D_1$=0.71。对比本研究最佳铺设长度的计算结果 $L_2/D_1$=0.8 可知，该标准所计算出的铺设长度相对较保守。综合考虑止裂结构的铺设长度与铺设厚度对止裂结构性能的影响，该止裂结构尺寸设计为 $H/t$=1，$L_2/D_1$=0.8。

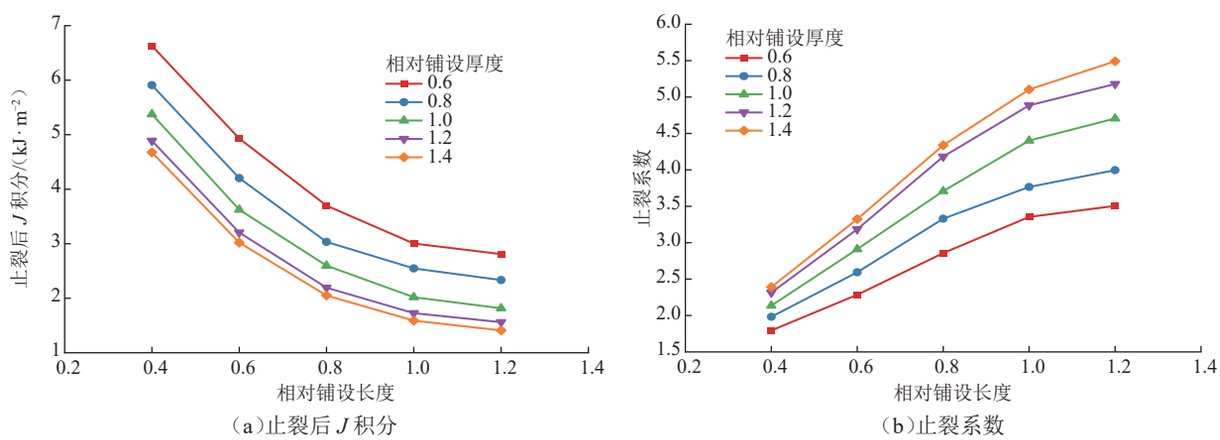



**图 8　止裂性能参数随铺设长度变化曲线**

**Fig. 8　Variation curves of crack arrest performance parameters with paving length**

### 3.4　管道径厚比

选取 L25 管道，设置裂纹长度 $a$ 为 36 mm，止裂结构铺设厚度设与管道壁厚相等，铺设长度 $L_2/D_1$ 为 0.8，铺设角度为 60°，将裂纹深度 $c/t$ 设置为变量，研究管道径厚比 $D_1/t$ 对止裂结构止裂性能的影响（图 9）。可见保持管道外径 $D_1$ 不变，增加管道径厚比 $D_1/t$，主体管道壁厚 $t$ 相应减小。裂纹深度 $c/t$ 相等时，随着管壁厚度 $t$ 的减小，安装止裂结构后的 $J$ 积分持续下降，止裂性能增强；随着管道径厚比 $D_1/t$ 的增加，止裂系数 $k$ 不断增大，表明止裂结构在壁厚较小的管道上能获得更好的止裂性能。因此，可以通过调整管道径厚比提高管道输送安全性能。

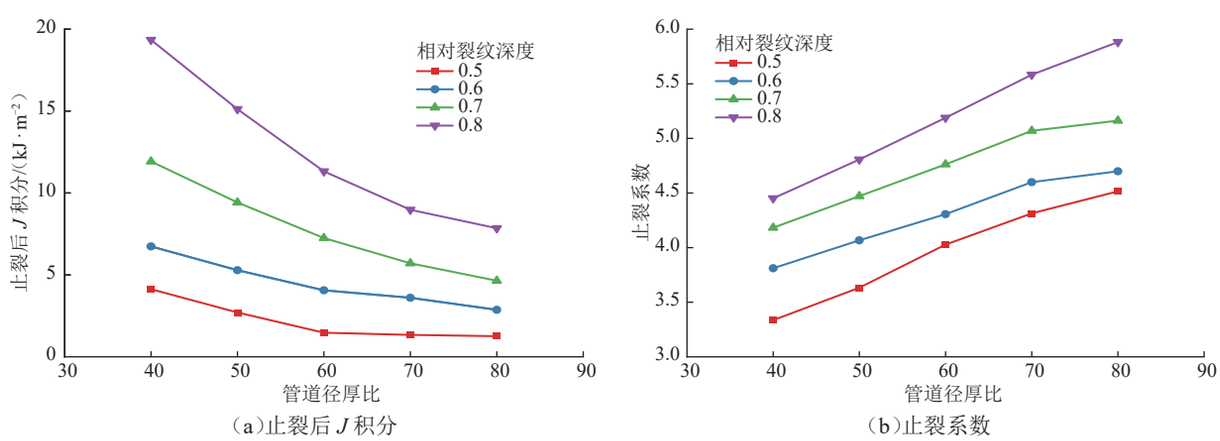



**图 9　止裂性能参数随管道径厚比变化曲线**

**Fig. 9　Variation curves of crack arrest performance parameters with pipe diameter-thickness ratio**

### 3.5　裂纹尺寸

选取 L25 管道，止裂结构铺设厚度与管道壁厚相等，铺设长度 $L_2/D_1$ 为 0.8，铺设角度为 60°，将裂纹深度和裂纹长度分别设置为变量，研究裂纹尺寸对止裂结构止裂性能的影响（图 10、图 11）。可见，随着裂纹深度增加，止裂后 $J$ 积分持续增加，表明裂纹越深，即使安装止裂结构也不能完全降低裂纹扩展风险；当裂纹长度固定时，安装止裂结构前的裂纹处 $J$ 积分也随着裂纹深度增加而增大，因此安装止裂结构后的 $J$ 积分不再具备评判止裂结构止裂性能的作用。止裂系数 $k$ 随裂纹深度增加而递增，表明止裂结构在裂纹更深时性能更佳。其原因是在相同裂纹长度下，随着裂纹深度增加，裂纹前缘及周围的应力状态会受到较大影响，导致裂纹附近出现鼓胀效应。安装止裂结构可以有效抑制该效应，将应力转移至止裂结构，从而实现有效止裂。

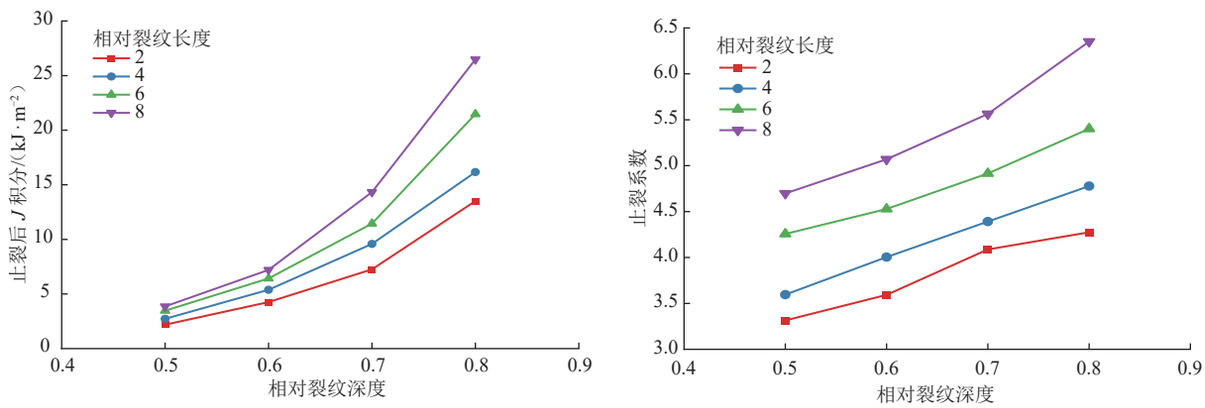



**图 10　止裂性能参数随裂纹深度变化曲线**

**Fig. 10　Variation curves of crack arrest performance parameters with crack depth**

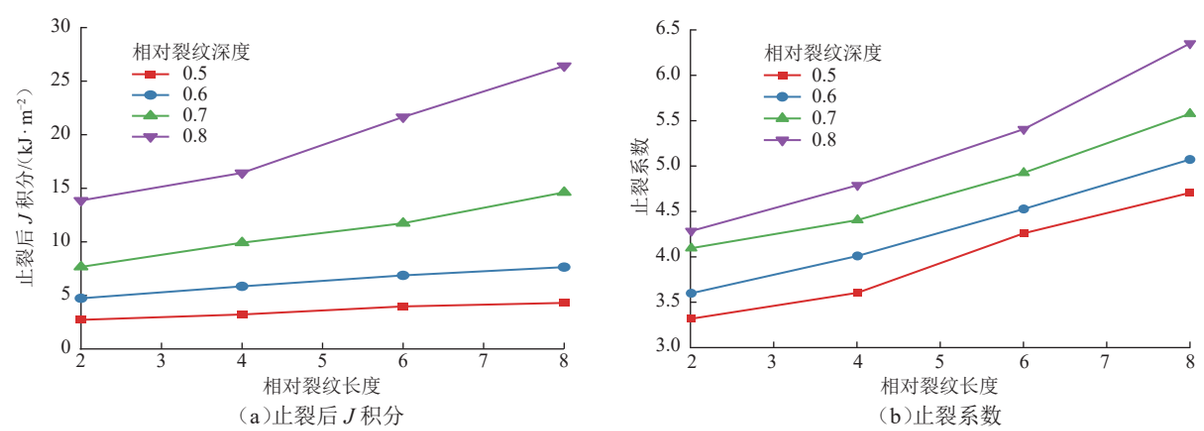



**图 11　止裂性能参数随裂纹长度变化曲线**

**Fig. 11　Variation curves of crack arrest performance parameters with crack length**

裂纹深度 $c/t$ 为 0.7～0.8 时，随着裂纹长度 $a/c$ 的增大，止裂后的 $J$ 积分持续增加；裂纹深度 $c/t$ 为 0.5～0.6 时，止裂后 $J$ 积分的增长趋势相对缓慢。可见裂纹较浅时，裂纹扩展的概率受长度影响较小。在相同裂纹深度下，随着裂纹长度 $a/c$ 增加，止裂系数 $k$ 递增，表明裂纹越长，止裂结构的性能表现越好。

### 3.6　影响因素敏感性分析

基于上述不同影响因素下止裂系数 $k$ 的增长率数据，结合线性回归的数学方法，得到了影响因素的敏感性分析结果（图 12）。不同影响因素对止裂结构

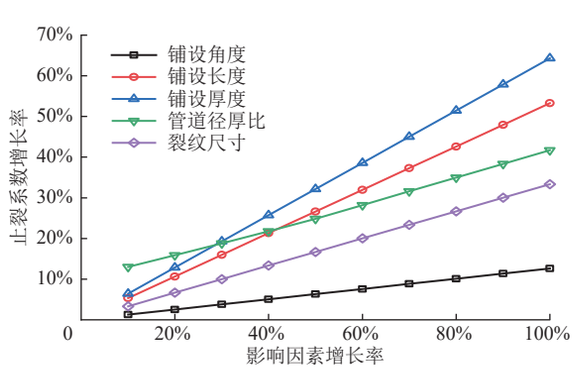



**图 12　外部止裂结构性能对不同影响因素的敏感性分析图**

**Fig. 12　Sensitivity analysis of the performance of external crack arrest structure to different influencing factors**

的止裂系数 $k$ 影响程度不同，随着影响因素增长率的增大，这些影响因素对止裂系数 $k$ 的影响趋势一致。其中，铺设厚度对止裂系数 $k$ 的影响最为显著，铺设长度、管道径厚比及裂纹尺寸次之，而铺设角度的影响最小。因此，在设计外部止裂结构时，铺设厚度与铺设长度是需要重点考虑的关键因素。

## 4　外部止裂结构方案评估

结合延长油田 $400\times10^4$ t/a 超临界 $CO_2$ 输送方案中的 L21 管道外部止裂结构方案，开展研究得出外部止裂结构的最佳性能尺寸（表 8）。基于 ISO 27913-2016《二氧化碳捕获、运输和地质储存 管道运输系统》附表 D 的推荐方法，采用环比应力校正因子为 2 时的 Battelle 双曲线修正模型，判断当外部止裂结构以最佳尺寸安装在 L21 管道中时是否可以阻止延性断裂扩展（图 13）。可见，最佳性能尺寸的外部止裂结构提供的止裂压力可达 9.9 MPa，高于减压波平台压力 7.6 MPa；同时，两条速度曲线呈现相离状态。因此，该外部止裂结构在铺设角度为 60°、铺设厚度为 12 mm、铺设长度为 326 mm 时，能有效阻止管道延性断裂，实现止裂。

**表 8　应用于 L21 管道的外部止裂结构设计参数**

**Table 8　Design parameters of external crack arrest structure applied to L21 pipeline**

| 材料 | 厚度/mm | 长度/mm | 铺设角度/(°) |
|---|---|---|---|
| 玻璃纤维复合材料 | 12 | 326 | 60 |

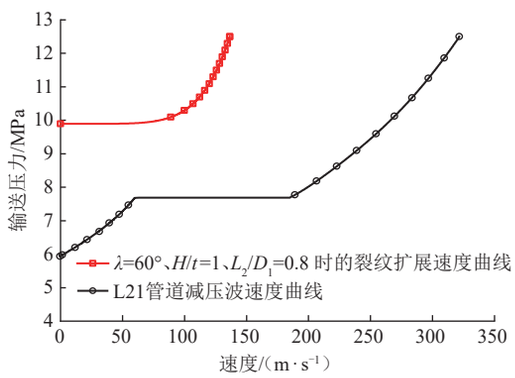



**图 13　应用于 L21 管道的外部止裂结构时的减压波-裂纹扩展速度曲线**

**Fig. 13　Decompression wave-crack propagation velocity curves when applied to external crack arrest structure of the L21 pipeline**

## 5　结论与展望

1）基于止裂后的 $J$ 积分和止裂结构应力分布，对所建立的玻璃纤维复合材料外部止裂结构模型进行了验证，结果表明：该外部止裂结构能够有效地转移和承受管道处的应力，实现有效止裂，进一步验证了其可靠性。

2）综合分析了该止裂结构铺设角度、厚度、长度、管道径厚比及裂纹尺寸对其止裂性能的影响，并基于止裂系数 $k$ 的增长率数据，得到影响因素敏感性分析，结果表明：该外部止裂结构的止裂性能随铺设厚度、铺设长度的增加而增强，其止裂性能对铺设厚度的变化最为敏感，铺设角度的影响最小。

3）研究得出了外部止裂结构的最佳性能尺寸：铺设厚度与管道壁厚相等，铺设长度为 0.8 倍管道外径，铺设角度为 60°。结合延长油田 $400\times10^4$ t/a 超临界 $CO_2$ 输送方案的 L21 管道对此最佳尺寸进行评估，结果表明：L21 管道处安装厚度为 12 mm、长度为 326 mm 的外部止裂结构所提供的止裂压力为 9.9 MPa，高于减压波平台压力 7.6 MPa，可以有效阻止管道的延性断裂。

4）当前只考虑了管道内表面的裂纹情况，有限元模拟也未考虑双向流固耦合的影响，因此建议采用流固耦合方法对含贯穿裂纹及埋藏裂纹的管道止裂结构进行深入研究。同时，此次工作未对土壤密度、涂层的类型、厚度等外部环境因素进行研究分析，未来应深入研究外部环境因素对止裂结构止裂性能的影响。

**参考文献：**

[1] 胡其会，李玉星，张建，俞欣然，王辉，王武昌，等. “双碳”战略下中国 CCUS 技术现状及发展建议[J]. 油气储运，2022，41(4)：361−371. DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.001.
HU Q H, LI Y X, ZHANG J, YU X R, WANG H, WANG W C, et al. Current status and development suggestions of CCUS technology in China under the “Double Carbon” strategy[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(4): 361−371.

[2] JIANG K, ASHWORTH P, ZHANG S Y, LIANG X, SUN Y, ANGUS D. China’s carbon capture, utilization and storage (CCUS) policy: a critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109601. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109601.

[3] 陈兵，郭焕焕，崔维刚，肖红亮. 含杂质 $CO_2$ 管道泄漏扩散模拟分析[J]. 石油与天然气化工，2019，48(3)：104−109. DOI：10.3969/j.issn.1007-3426.2019.03.019.

CHEN B, GUO H H, CUI W G, XIAO H L. Simulation analysis of leakage and diffusion of carbon dioxide with impurities[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2019, 48(3): 104−109.

[4] 陈磊，闫兴清，胡延伟，于帅，杨凯，陈绍云，等. 二氧化碳管道意外泄漏减压过程的断裂控制研究进展[J]. 化工进展，2022，41(3)：1241−1255. DOI：10.16085/j.issn.1000-6613.2021-2096.
CHEN L, YAN X Q, HU Y W, YU S, YANG K, CHEN S Y, et al. Research progress on fracture control of accidental leakage anddecompression in $CO_2$ pipeline transportation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(3): 1241−1255.

[5] 陆诗建，张娟娟，杨菲，王风，刘苗苗，贡玉萍，等. $CO_2$ 管道输送技术进展与未来发展浅析[J]. 南京大学学报(自然科学)，2022，58(6)：944−952. DOI：10.13232/j.cnki.jnju.2022.06.002.
LU S J, ZHANG J J, YANG F, WANG F, LIU M M, GONG Y P, et al. Progress and future development trend of $CO_2$ pipeline transportation technology[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2022, 58(6): 944−952.

[6] TAKHT RAVANCHI M, SAHEBDELFAR S. Catalytic conversions of $CO_2$ to help mitigate climate change: recent process developments[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 145: 172−194. DOI: 10.1016/j.psep.2020.08.003.

[7] SAJI A, YOSHIDA H, SAKAI M, TANII T, KAMATA T, KITAMURA H. Fixation of carbon dioxide by clathrate-hydrate[J]. Energy Conversion and Management, 1992, 33(5/6/7/8): 643−649. DOI: 10.1016/0196-8904(92)90067-7.

[8] 苏丕波，梁金强，张伟，刘坊，王飞飞，李廷微，等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏系统[J]. 天然气工业，2020，40(8)：77−89. DOI：10.3787/j.issn.1000-0976.2020.08.006.
SU P B, LIANG J Q, ZHANG W, LIU F, WANG F F, LI T W, et al. Natural gas hydrate accumulation system in the Shenhu sea area of the northern South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(8): 77−89.

[9] RYAKHOVSKIKH I V, BOGDANOV R I. Model of stress corrosion cracking and practical guidelines for pipelines operation[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 121: 105134. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105134.

[10] 殷布泽，黄维和，苗青，闫锋，欧阳欣，胡其会，等. $CO_2$ 管道泄漏减压特性与裂纹扩展研究现状及发展趋势[J]. 油气储运，2023，42(9)：1042−1054. DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.008.
YIN B Z, HUANG W H, MIAO Q, OU Y X, HU Q H, et al. Status and development trends of research on $CO_2$ decompression characteristics and crack propagation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(9): 1042−1054.

[11] 陈磊，胡延伟，闫兴清，于帅，刘镇溪，乔帆帆，等. $CO_2$ 管道断裂扩展与管内减压耦合特性数值模拟[J]. 油气储运，2024，43(5)：537−544. DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2024.05.006.
CHEN L, HU Y W, YAN X Q, YU S, LIU Z X, QIAO F F, et al. Numerical simulation of coupling characteristics between fracture propagation and internal decompression of $CO_2$ pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(5): 537−544.

[12] 赫一凡，于帅，闫兴清，喻健良，等. 基于特征线法的 $CO_2$ 减压波传播模型构建及止裂壁厚研究[J]. 化工学报，2023，74(12)：5038−5047，5075. DOI：10.1194910438-1157.20230943.
HE Y F, YU S, YAN X Q, YU J L, et al. Construction of $CO_2$ decompression wave propagation model based on methodof characteristics and research on crack arrest wall thickness[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 74(12): 5038−5047, 5075.

[13] NORDHAGEN H O, MUNKEJORD S T, HAMMER M, GRUBEN G, FOURMEAU M, DUMOULIN S. A fracture-propagation-control model for pipelines transporting $CO_2$-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.

[14] PAKRAVESH A, ZAREI H. Prediction of Joule–Thomson coefficients and inversion curves of natural gas by various equations of state[J]. Cryogenics, 2021, 118: 103350. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2021.103350.

[15] 付雅茹，张东，闫锋，王熠凡，白芳，张宏，等. $CO_2$ 管道裂纹韧性扩展速度数值模拟[J]. 油气储运，2024，43(4)：395−403. DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2024.04.004.
FU Y R, ZHANG D, YAN F, WANG Y F, BAI F, ZHANG H, et al. Numerical simulation of ductile crack propagation velocity in $CO_2$ pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(4): 395−403.

[16] DI BIAGIO M, LUCCI A, MECOZZI E, SPINELLI C M. Fracture propagation prevention on $CO_2$ pipelines: full scale experimental testing and verification approach[C]. Colorado Springs: Pipeline Technology Conference 2017, 2017: 1−17.

[17] 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.
REN K. Study on theory and control method of supercritical

carbon dioxide pipe fracture[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2018.

[18] 喻健良，李宁，秦磊，董硕. 轴向穿透裂纹管道套管止裂性能分析[J]. 石油化工设备，2010，39(1)：32−35. DOI：10.3969/j.issn.1000-7466.2010.01.009.
YU J L, LI N, QIN L, DONG S, et al. Analysis on Crack Arrest Performance of Axial Throughwall Crack Pipe Repaired by Sleeve[J]. Petro-Chemical Equipment, 2010, 39(1): 32−35.

[19] 许经纬. 碳纤维/玻璃纤维混杂增强复合材料力学性能研究及风电叶片应用[D]. 苏州：苏州大学，2019.
XU J W. Study on mechanical properties of carbon/glass hybridized fabric reinforced composites and applications for wind turbine blades[D]. Suzhou: Soochow University, 2019.

[20] VAN DEN ABEELE F, AMLUNG L, DI BIAGIO M, ZIMMERMANN S. Towards a numerical design tool for composite crack arrestors on high pressure gas pipelines[C]. Calgary: 2010 8th International Pipeline Conference, 2010: 359−368.

[21] RUDINGER G. Fundamentals of gas particle flow[M]. Elsevier, 1980:1−142.

[22] MUNKEJORD S T, HAMMER M, LØVSETH S W. $CO_2$ transport: Data and models: A review[J]. Applied Energy, 2016, 169: 499−523. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.100.

[23] GOSWAMI S, ANITESCU C, CHAKRABORTY S, RABCZUK T. Transfer learning enhanced physics informed neural network for phase-field modeling of fracture[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 106: 102447. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.102447.

[24] 帅健. 管线力学[M]. 北京：科学出版社，2010：30−49.
SHUAI J. Pipeline mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2010: 30−49.

[25] KONG D, HUANG X Y, XIN M Y, XIAN G J. Effects of defect dimensions and putty properties on the burst performances of steel pipes wrapped with CFRP composites[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020, 186: 104139. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2020.104139.

[26] WANG L Y, SONG S L, DENG H B, ZHONG K. Finite-element analysis of crack arrest properties of fiber reinforced composites application in semi-elliptical cracked pipelines[J]. Applied Composite Materials, 2018, 25(2): 321−334. DOI: 10.1007/s10443-017-9621-9.

[27] GUAN C, ROTHWELL B, KONDO J, MURATA M, ARMSTRONG K. Full scale burst validation tests for crack arrestor designs for NPS 48 grade 550 rich gas pipeline[C]. Calgary: 2016 11th International Pipeline Conference, 2016: V003T05A005.

[28] WANG W G, YANG W, LI C Q, YANG S T. A new method to determine elasto-plastic J-integral for steel pipes with longitudinal semi-elliptical surface cracks[J]. Engineering failure analysis, 2020, 118: 104915. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104915.

（编辑：张腾）

**基金项目：**国家重大工程延长石油碳捕集和驱油封存一体化示范项目子项目“延长油田液态 $CO_2$ 管道输送可行性研究”，ycsy2015ky-B-02；陕西省重点研发计划项目“基于 CCUS 的含杂质 $CO_2$ 管道输送安全关键技术研究”，2022SF-233；西安石油大学研究生创新项目立项“$CO_2$ 管道玻璃纤维复合材料外部止裂结构性能研究”，YCS23214285。

**作者简介：**陈兵，女，1969 年生，教授，2000 年硕士毕业于甘肃工业大学化工过程机械专业，现主要从事油气田地面输送技术、CCUS 管输安全技术、石油石化设备腐蚀与安全防护技术的研究工作。地址：陕西省西安市雁塔区电子二路 18 号，710065。电话：15102948086。Email：bchen@xsyu.edu.cn

**通信作者：**付子言，男，1996 年生，在读硕士生，2019 年毕业于成都工业学院，现主要从事 CCUS 技术管道安全输送研究工作。地址：陕西省西安市雁塔区电子二路 18 号，710065。电话：18349105302。Email：1225881481@qq.com

• Received: 2024-04-25
• Revised: 2024-05-26
• Online: 2024-10-23