

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03650>

期刊网址: [www.ship-research.com](http://www.ship-research.com)

引用格式: 邱康, 杜鹏, 魏羲, 等. 基于断裂相场法的管道环向表面裂纹扩展研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3): 302–309.  
QIU K, DU P, WEI X, et al. Fracture phase-field method-based circumferential surface crack propagation investigation of pipeline [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(3): 302–309 (in Chinese).

# 基于断裂相场法的管道环向 表面裂纹扩展研究



扫码阅读全文

邱康<sup>1</sup>, 杜鹏<sup>1</sup>, 魏羲<sup>2</sup>, 屈泱泱<sup>3</sup>, 陈念众<sup>\*3,4</sup>

1 中石化上海海洋油气分公司, 上海 200120

2 中石化胜利工程有限公司 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017

3 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350

4 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072

**摘要:** [目的] 旨在深入探讨轴向力作用下不同初始环向表面裂纹形态(椭圆形和扇形)对管道裂纹扩展行为的影响, 为海洋工程结构物的结构完整性安全提供理论支持。[方法] 采用断裂相场法模拟和分析裂纹扩展过程, 通过连续的场函数以弥散的形式表征裂纹, 依托 Francfort–Marigo 变分原理, 将断裂能融入系统的总势能中, 引入退化函数量化损伤导致的应变能折减, 在有限元软件 ABAQUS 中进行二次开发, 利用交替解法求解管道裂纹扩展问题。[结果] 结果显示, 环向椭圆形表面裂纹深度小于壁厚的 1/2 时, 裂纹先沿环向扩展, 再沿壁厚方向扩展直至穿透; 当椭圆形裂纹贯穿程度较大时, 裂纹先沿壁厚方向扩展至穿透, 再沿环向扩展; 扇形裂纹则倾向于先沿壁厚方向穿透, 随后沿环向扩展。[结论] 研究表明, 断裂相场法能准确模拟裂纹在管道中的局部演化过程, 应重视轴向力作用下的管道初始裂纹形态及裂纹贯穿程度对管道结构完整性的影响, 这对提高管道结构的安全性及可靠性具有重要意义。

**关键词:** 管道; 裂纹扩展; 断裂相场法; 断裂力学

中图分类号: U668.2

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03650

## Fracture phase-field method-based circumferential surface crack propagation investigation of pipeline

QIU Kang<sup>1</sup>, DU Peng<sup>1</sup>, WEI Xi<sup>2</sup>, QU Yangyang<sup>3</sup>, CHEN Nianzhong<sup>\*3,4</sup>

1 SINOPEC Shanghai Offshore Oil and Gas Company, Shanghai 200120, China

2 Drilling Technology Research Institute, SINOPEC Oilfield Service Shengli Corporation, Dongying 257017, China

3 School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

4 State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin 300072, China

**Abstract:** [Objective] This study aims to deeply investigate the influence of different initial circumferential surface crack shapes (elliptical and sectoral) on pipeline crack propagation behavior under axial forces, thereby providing theoretical support for the structural integrity safety of offshore structures. [Methods] The crack propagation process is simulated and analyzed using the phase field method, and cracks are represented in a diffused manner through a continuous field function. Relying on the Francfort–Marigo variational principle, fracture energy is integrated into the total potential energy of the system. A degradation function is introduced to quantify the reduction of strain energy caused by damage. Secondary development is conducted in finite element software ABAQUS, and the staggered solution strategy is used to solve the problem of pipe crack propagation. [Results] The results show that when the depth of an elliptical circumferential surface crack is less than half the wall thickness, the crack first propagates circumferentially, then extends through the wall thickness until penetration occurs. When the extent of the elliptical crack penetration is larger, the crack first extends through the wall thickness until penetration, then propagates circumferentially. Sectoral cracks tend to penetrate through the wall thickness first, followed by circumferential expansion. [Conclusions] The results of this study indicate that the fracture phase-field method can accurately simulate the local evolution process of cracks in pipes and highlights the impact of the initial crack shape and the extent of crack penetration on the structural integrity of pipes under the action of axial forces. This has significant implications for enhancing the safety and reliability of pipeline structures.

**Key words:** pipeline; crack propagation; phase-field fracture method; fracture mechanics

收稿日期: 2023–11–18 修回日期: 2024–01–30 网络首发时间: 2024–03–25 09:42

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52071235)

作者简介: 邱康, 男, 1983 年生, 博士, 高级工程师。研究方向: 钻井工程, 海洋工程。E-mail: qiuk.shhy@sinopec.com

陈念众, 男, 1974 年生, 博士, 教授。研究方向: 海洋结构物结构完整性和可靠性。E-mail: nzchen2018@hotmail.com

\*通信作者: 陈念众

## 0 引言

近年来,随着能源需求的持续增长,管道铺设长度也在不断增加<sup>[1]</sup>。根据统计,我国管道事故的主要原因包括管材和焊缝缺陷等<sup>[2]</sup>。现场焊接质量控制难度大,问题排查整改非常复杂,这些因素常导致管道在运行过程中出现裂纹,甚至发生泄漏或断裂。上述情况不仅威胁到管道结构的功能性,还可能引发严重的环境和经济问题。因此,深入理解裂纹扩展过程对确保海洋工程结构的安全性和可靠性至关重要。

为了应对这一挑战,许多学者基于各种数值方法或计算力学方法对管道裂纹萌生及扩展过程进行了研究。例如,陈宇砾等<sup>[3]</sup>基于增强参考应力法的J积分计算和J积分稳定性评定图法对含环向穿透裂纹管道进行了失稳载荷和临界裂纹长度分析;陈飞等<sup>[4]</sup>基于扩展有限元法(XFEM),针对含环向圆形表面裂纹的X60钢管道,进行了裂纹扩展规律的数值模拟研究;朱豪豪等<sup>[5]</sup>基于扩展有限元法对含内表面缺陷管道进行分析,探讨了不同尺寸缺陷对裂纹萌生特征的影响;Song等<sup>[6]</sup>开发了一种改进的循环内聚力模型,并对海底管道低周疲劳裂纹萌生进行了预测。

在实际工程应用中,针对裂纹的数值计算主要采用内聚力模型<sup>[7]</sup>、连续断裂力学法<sup>[8]</sup>以及扩展有限元法<sup>[9]</sup>等。上述每种方法都有其优势和局限性。例如,内聚力模型能够模拟材料中裂纹萌生、演化直至完全失效的连续过程<sup>[10]</sup>,但是由于需要事先通过内聚力单元来定义断裂路径,因此内聚力模型很难模拟复杂受力情况和含有不同方向裂纹的扩展规律。连续断裂力学法是另一种常用于有限元法中求解断裂力学问题的方法,为了得到较高的计算精度并有效预测裂纹的扩展规律,该类方法需要在裂纹尖端处加密网格。扩展有限元法是传统有限元法的改进,该方法虽然在模拟裂纹扩展问题方面较为有效,但同样需要将裂纹面处理为不连续面,在模拟多裂纹交叉时也存在一定难度。

近年来,断裂相场法作为一种新兴的计算方法,通过一系列微分方程描述材料的断裂过程,提供了一个免除繁琐裂纹追踪步骤的有效工具。根据Griffith<sup>[11]</sup>和Irwin<sup>[12]</sup>的理论,裂纹扩展被视为一个稳定性问题,即当能量释放率达到某一临界值时,裂纹就会发生扩展。断裂相场法采用连续函数描述裂纹,其核心是引入阶参量描述材料的无损状态与完全破坏状态之间的各种状态。同其

他方法相比,断裂相场法通过跟踪阶参量自动演化获取裂纹路径,可方便地模拟裂纹扩展过程,为管道断裂数值模拟提供了新方法。

本研究拟采用相场断裂模型,并在有限元软件ABAQUS中进行二次开发,利用交替解法<sup>[13]</sup>求解管道裂纹扩展问题,重点关注轴向力作用下管道的环向表面裂纹扩展行为。通过数值模拟,深入研究含椭圆形和扇形两种不同初始裂纹形态的管道的裂纹扩展行为和力学响应,并分析不同形态的初始裂纹及其贯穿程度对管道结构完整性的影响。

## 1 断裂相场模型

### 1.1 理论模型

尖锐裂纹在断裂力学中指的是具有明显定义和集中的裂纹尖端的裂纹类型。考虑一个具有横截面 $\Gamma$ 的沿 $x$ 轴无限延伸的杆(图1(a)),杆所占用的区域为 $\Omega = \Gamma \times L$ ,  $L = (-\infty, +\infty)$ 。假设杆的两端受外力 $F$ 作用,在 $x=0$ 处有一个完全张开的裂纹。在离散裂纹模型中,若函数 $D(x)$ 描述了损伤,则图1(b)中所示的尖锐裂纹是狄拉克 $\delta$ 函数,该值处处为0(除了 $x=0$ 处 $D(0)=1$ )。若 $D(x)$ 的值为0,则材料未破碎;若该值达到1,则材料已经完全破碎。这种强间断的标量场函数能够严格地描述裂纹的几何位置,但往往给数值模拟带来了诸多不便。

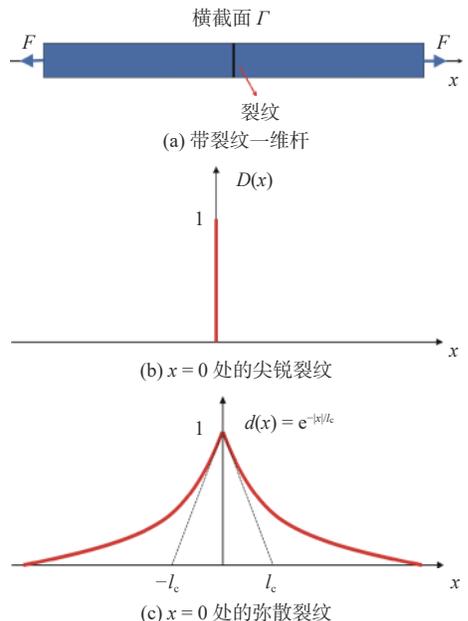


图1 裂纹弥散化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of crack diffusion

弥散裂纹(diffuse crack)指在材料中分布较广、裂纹尖端不明显、过渡区域较宽的裂纹类

型。裂纹的弥散化处理是相场法的一个关键技术,该方法有效缓解了传统尖锐裂纹模型中的应力集中和奇异性问题,提高了数值求解的稳定性和可靠性。如图1(c)所示,在相场法中,通常采用指数函数来近似表达非光滑裂纹拓扑:

$$d(x) = e^{-|x|/l_c} \quad (1)$$

式中:  $l_c$  为长度参数;  $d(x)$  为正则化或弥散裂纹拓扑。式(1)满足  $d(0)=1$ , 在极限处  $d(\pm\infty)=0$  为齐次微分方程在  $\Omega$  域中的解:

$$d(x) - l_c^2 d''(x) = 0 \quad (2)$$

式(2)又是下面变分法中的欧拉方程:

$$d = \text{Arg} \left\{ \inf_{d \in W} I(d) \right\} \quad (3)$$

式中:  $W = \{d | d(0) = 0, d(\pm\infty) = 0\}$ , 表示边界条件;  $I(d) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (d^2 + l_c^2 d'^2) dV$ , 为泛函。

积分得到裂纹截面积泛函  $\Gamma(d)$  的表达式为

$$\Gamma(d) = 1/l_c \cdot I(d) = \int_{\Omega} \gamma(d, d') dV \quad (4)$$

式中:  $\gamma(d, d')$  为一维裂纹表面密度函数;  $dV = \Gamma dx$ , 为体积微元。在多维度下, 可表示为

$$\gamma(d, \nabla d) = 1/(2l_c) \cdot d^2 + l_c/2 |\nabla d|^2 \quad (5)$$

为了将断裂相场与变形问题耦合起来, 内势能表达式为

$$\Pi^{\text{int}} = E(\mathbf{u}, d) + W(d) \quad (6)$$

式中:  $E(\mathbf{u}, d)$  为应变势能, 其中  $\mathbf{u}$  为位移矢量;  $W(d)$  为断裂能。应变势能为

$$E(\mathbf{u}, d) = \int_{\Omega} \psi(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}), d) dV \quad (7)$$

式中,  $\psi(\boldsymbol{\varepsilon}, d)$  为应变能密度, 表达式为

$$\psi(\boldsymbol{\varepsilon}, d) = g(d) \cdot \psi_0(\boldsymbol{\varepsilon}) \quad (8)$$

式中:  $\psi_0(\boldsymbol{\varepsilon})$  为弹性应变能密度, 其中  $\boldsymbol{\varepsilon}$  为应变;  $g(d) = (1-d)^2 + k$ , 为抛物线退化函数, 其中  $k$  为关于求解稳定性的参数。

弹性应变能密度计算公式为

$$\psi_0(\boldsymbol{\varepsilon}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C}_0 \boldsymbol{\varepsilon} \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{C}_0$  为材料的线弹性刚度矩阵。

在小应变理论下应变  $\boldsymbol{\varepsilon}$  的表达式为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u}] \quad (10)$$

由于损伤, 弹性能随  $g(d)$  退化, 考虑损伤后相场模型中的真实应力张量  $\boldsymbol{\sigma}$  为

$$\boldsymbol{\sigma} = g(d) \boldsymbol{\sigma}_0 = [(1-d)^2 + k] \mathbf{C}_0 \boldsymbol{\varepsilon} \quad (11)$$

式中:  $\boldsymbol{\sigma}_0$  为名义应力张量。

对于刚度则有

$$\mathbf{C} = g(d) \cdot \mathbf{C}_0 \quad (12)$$

由此可见, 以相场为代表的损伤变量直接影响材料的应力和刚度。若其值达到 1, 则单元中的应力或刚度为 0。

式(6)中第 2 项断裂能  $W(d)$  的计算式为

$$W(d) = \int_{\Omega} g_c \gamma(d, \nabla d) dV \quad (13)$$

式中,  $g_c$  为临界能量释放率。

外势能则表示为

$$\Pi^{\text{ext}} = P(\mathbf{u}) = \int_{\Omega} \bar{\gamma} \cdot \mathbf{u} dV + \int_{\partial \Omega} \bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{u} dA \quad (14)$$

式中:  $P(\mathbf{u})$  势能关于位移  $\mathbf{u}$  的函数;  $\bar{\gamma}$  为体积力;  $\bar{\mathbf{t}}$  为给力边界  $\partial \Omega$  上的边界力;  $A$  为结构表面面积;  $dV$  和  $dA$  分别为体积微元和边界面元。

弥散化裂纹模型降低了求解过程对网格的依赖, 使裂纹路径模拟更加自然, 更符合实际材料中裂纹的形成和扩展规律。通过调整模型参数, 例如长度参数, 可以灵活控制裂纹的弥散程度, 适应不同材料和断裂情况。

## 1.2 模型求解

本文采用交替解法(staggered solution)<sup>[13]</sup> 求解相场断裂问题。该方法将求解过程分为两个阶段交替进行: 首先, 固定裂纹相场, 求解力学平衡方程, 确定应力和位移场; 然后, 在固定的应力和位移场条件下, 求解相场演化方程, 更新裂纹的形态和分布。这种交替求解的策略能有效平衡计算精度与计算效率, 尤其适用于通过 ABAQUS 进行复杂断裂过程的数值模拟。

求解裂纹拓扑的相场能量泛函  $\Pi^d$  为

$$\Pi^d = \int_{\Omega} [g_c \gamma(d, \nabla d) + (1-d)^2 H] dV \quad (15)$$

引入历史变量  $H$ :

$$H = \begin{cases} \psi_0(\boldsymbol{\varepsilon}), & \psi_0(\boldsymbol{\varepsilon}) > H_n \\ H_n & \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $H_n$  为先前计算的第  $n$  步的能量历史。满足 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件:

$$\psi_0 - H \leq 0, \quad \dot{H} \geq 0, \quad \dot{H}(\psi_0 - H) = 0 \quad (17)$$

然后, 在  $d$  固定的情况下, 计算位移场能量泛函  $\Pi^n$ :

$$\Pi^u = \int_{\Omega} [\psi(\mathbf{u}, d) - \bar{\gamma} \mathbf{u}] dV - \int_{\partial\Omega} \bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{u} dA \quad (18)$$

在位移场迭代求解达到平衡之后, 再进行相场的迭代求解。

根据时刻  $t_n$  在  $t_{n+1}$  处计算一个新的相场:

$$\mathbf{d}_{n+1} = \arg \left\{ \inf_d \int_{\Omega} [g_c \gamma(d, \nabla d) + (1-d)^2 H] dV \right\} \quad (19)$$

相场线性近似解为

$$\mathbf{K}_n^d \mathbf{d}_{n+1} = -\mathbf{r}_n^d \quad (20)$$

式中:  $\mathbf{d}_{n+1}$  为包含各积分点的新相场值的未知变量;  $\mathbf{r}_n^d$  为时刻  $t_n$  的残差向量;  $\mathbf{K}_n^d$  为时刻  $t_n$  的切向刚度。

为了计算时刻  $t_{n+1}$  的位移场, 采用时刻  $t_n$  的相场值:

$$\mathbf{u}_{n+1} = \arg \left\{ \inf_u \int_{\Omega} [\psi(\mathbf{u}, d_n) - \bar{\gamma} \cdot \mathbf{u}] dV - \int_{\partial\Omega} \bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{u} dA \right\} \quad (21)$$

与相场相似, 位移场线性化近似解为

$$\mathbf{K}_n^u \mathbf{u}_{n+1} = -\mathbf{r}_n^u \quad (22)$$

式中:  $\mathbf{u}_{n+1}$  为包含各积分点的新位移场值的未知变量;  $\mathbf{r}_n^u$  为位移场时刻  $t_n$  的残差向量;  $\mathbf{K}_n^u$  为位移场时刻  $t_n$  的切向刚度。

为了在 ABAQUS 中实现该方案, 以分层的方式使用了两种单元类型: 相场单元和位移场单元, 每一层单元在相同的节点连接, 但自由度不同。相场单元只有一个自由度, 即相场变量  $d$ 。位移场单元的自由度则取决于单元的维度。本文使用 Newton-Raphson 算法进行迭代求解, 内部迭代更新切向刚度矩阵和残差向量:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_n^d & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_n^u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{n+1} \\ \mathbf{u}_{n+1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{r}_n^d \\ \mathbf{r}_n^u \end{bmatrix} \quad (23)$$

交替解法在 ABAQUS 中的基本迭代过程<sup>[13]</sup>如图 2 所示, 图中  $\psi_{0,n}$  为  $t_n$  时刻的弹性能密度。

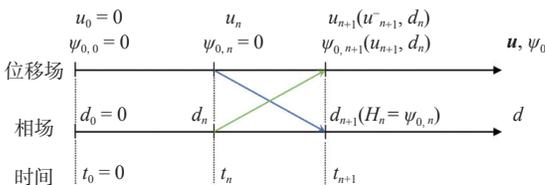


图 2 交替解法在 ABAQUS 中的迭代示意图

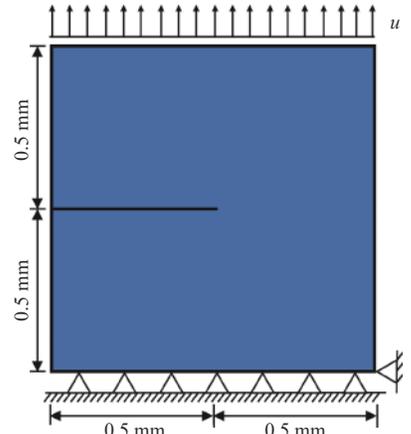
Fig. 2 Iteration diagram of staggered solution in ABAQUS

### 1.3 模型验证

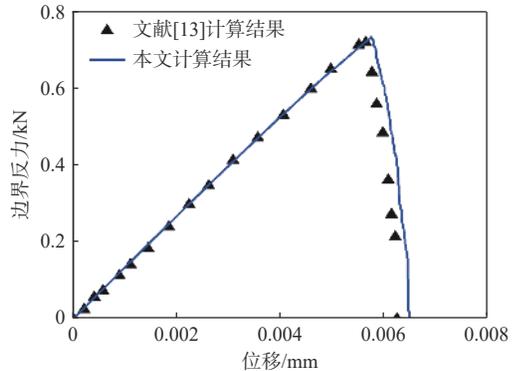
为验证模型的准确性, 对经典的二维单边缺口平板拉伸试验模型进行模拟计算。图 3(a) 给出了受拉伸的单边缺口平板几何模型及边界条件。平板底部是固定的, 顶部边缘垂直移动。材料的

杨氏模量  $E = 2.1 \times 10^5$  MPa, 泊松比  $\nu = 0.3$ , 临界能量释放率  $g_c = 2.7$  N/mm, 顶端位移  $u = 0.01$  mm。

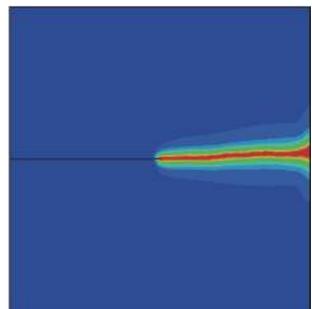
图 3(b) 给出的单边缺口平板在拉伸条件下的边界反力-位移曲线与文献 [13] 的结果基本一致, 网格细化差异虽然导致局部偏差, 但整体趋势的吻合度高。图 3(c) 给出的单边缺口平板上边界受拉伸的裂纹扩展路径预测结果不仅与实验结果相符, 也与文献 [13] 的规律一致, 这进一步验证了相场模型预测裂纹扩展的有效性。



(a) 受拉伸的单边缺口平板几何模型及边界条件



(b) 拉伸下单边缺口平板边界反力-位移曲线与文献结果对比



(c) 单边缺口平板上边界受拉伸的裂纹扩展路径

图 3 模型验证分析

Fig. 3 Model validation analysis

## 2 有限元数值仿真

### 2.1 模型建立

为探究不同的管道初始环向裂纹形态在相同

加载状态下对管道安全的影响,本文采用ABAQUS建立了一个含初始环向表面裂纹的简单管道模型。由于给出的相场断裂模型不考虑焊接残余应力的影响且仅在弹性范围下进行求解,因此假设管道焊缝与管道为等强度匹配,不建立含焊缝模型,同时不考虑材料塑性,将管道材料视为线弹性材料。管道直径 $D=2\text{ m}$ ,管道壁厚 $s=0.1\text{ m}$ ,管道长度 $l=2\text{ m}$ 。具体参数如表1所示。

表1 模型属性  
Table 1 Properties of model

弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	临界能量释放率 $g_c/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$
$2.0\times 10^5$	0.3	150

初始裂纹模型设置在管道的外侧表面,位于管道的中点处。初始裂纹呈环向分布,并且其沿管道壁厚方向扩展,如图4所示。图中, $a$ 为裂纹深度, $c$ 为裂纹半长。

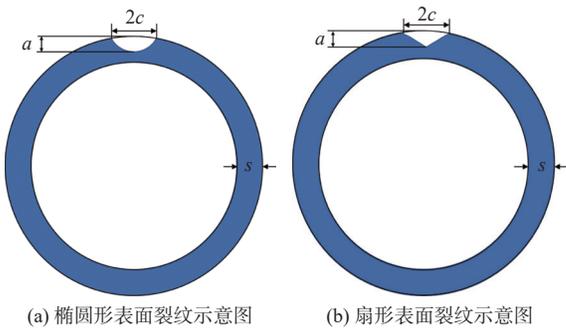


图4 管道椭圆形和扇形表面裂纹示意图

Fig. 4 Schematic diagram of elliptical and sectoral surface cracks in pipes

管道边界条件设置为:一端为固定约束(3个方向的平动及转动全部限制),另一端施加沿管道轴向匀速增加的位移荷载。如图5所示,加载速率 $\Delta u_x$ 为0.0024m每增量步。本文使用Newton-Raphson算法进行迭代求解,在ABAQUS中选择固定增量步,最大增量步数为200,增量步大小为0.01,采用标准的力和位移收敛准则。

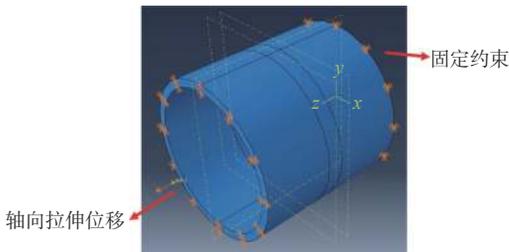


图5 管道边界条件

Fig. 5 Pipeline boundary conditions

考虑到计算成本,对网格疏密性进行分析。在ABAQUS中采用全局种子对模型进行布种及分析计算,结果如表2所示。可见,较大网格尺寸

会导致计算结果不准确,而随着网格尺寸的减小,边界反力的计算结果开始趋于稳定。需要指出的是,因为在相场模型中需要将单元属性分配给更多的虚拟单元,所以较小的网格尺寸会导致计算成本显著增加。

表2 网格疏密性分析  
Table 2 Mesh density analysis

网格尺寸/m	边界反力/N
0.03	3 934.45
0.04	3 936.84
0.05	3 944.58
0.10	3 984.73

基于上述考虑,为了寻求计算精度与合理计算效率之间的平衡,本文研究时对包含裂纹的区域采取了更精细的网格划分策略,在保证计算效率的同时减少因网格尺寸过大而导致裂纹尖端的应力奇异性。具体来说,管道整体采用全局种子尺寸为0.1m,表面裂纹处采用尺寸为0.04m的局部种子进行布种。网格划分如图6所示。

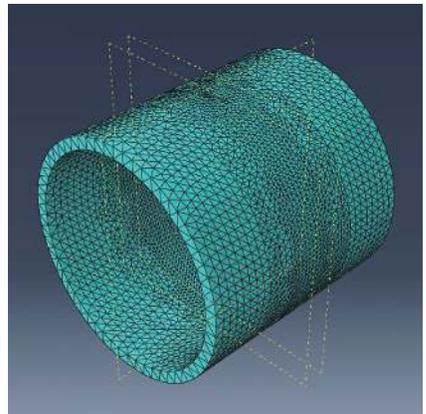


图6 网格划分

Fig. 6 Mesh division

鉴于表面裂纹区域存在的几何不连续性,六面体单元在此区域的网格划分变得复杂且不理想。因此,为更有效地适应这种几何复杂性,本文采用了具有更高几何适应性的C3D4单元的网格划分方案。该单元作为四节点的线性四面体单元,其灵活性更适合于复杂几何形状的精确定义,特别是在涉及尖锐或不规则几何特征的区域。

## 2.2 数值算例

为了探究不同形态的初始表面裂纹在相同加载下对管道轴向反力的影响,对含不同初始表面裂纹的管道进行建模分析。管道的最终破坏状态被定义为:材料达到其断裂韧性的极限或者当模拟中的应力超过其最大承受能力时的状态。通过

在 ABAQUS 中设置临界能量释放率准则来实现研究目的。模拟中, 当能量释放率达到预设的断裂准则阈值时, 就认为管道已经达到了最终破坏状态; 此外, 也可以通过观察裂纹的扩展和传播情况来判断管道的破坏状态, 即当观察到裂纹在管道中完全扩展, 导致结构整体失去承载能力时, 就认为管道已经达到了最终破坏状态。

### 2.2.1 椭圆形裂纹

为研究椭圆形裂纹贯穿程度对管道轴向反力

的影响, 裂纹相对深度  $a/s$  取为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 和 0.9。各情况下的裂纹扩展路径如图 7 所示。如前所述, 裂纹相场  $d$  所描述的是材料的状态, 若  $d=0$ , 则材料是完整的; 若该值达到 1, 则材料已完全失效。一般认为, 当  $d \geq 0.9$  时, 则该处形成裂纹。图中, 红色区域即为裂纹带。对于不同的裂纹贯穿程度, 管道的最终裂纹扩展路径基本是一致的, 管道的最终破坏状态未受裂纹贯穿程度的影响。

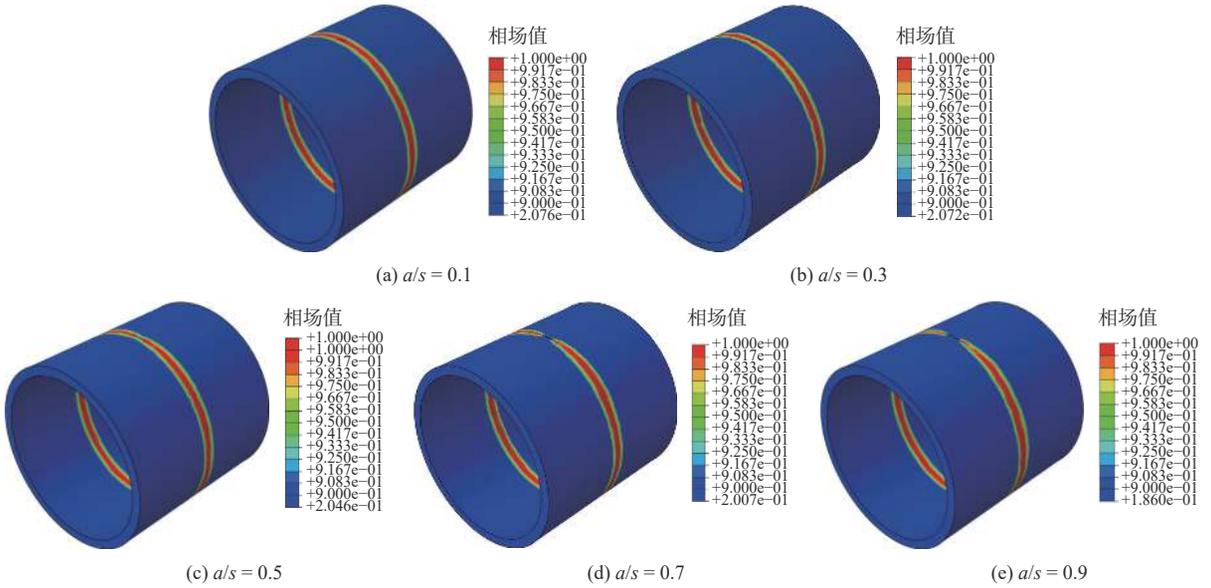


图 7 不同椭圆形表面裂纹贯穿程度管道裂纹扩展路径

Fig. 7 Crack propagation paths of pipe with different extents of the elliptical surface crack penetration

对于局部的裂纹扩展情况, 经模拟得出, 当裂纹贯穿程度较小时 ( $a/s \leq 0.5$ ), 裂纹先向管道环向扩展, 再进行壁厚方向扩展直至穿透; 当裂纹贯穿程度较大时, 裂纹先进行壁厚方向扩展至穿透, 再向管道环向进行扩展。

对于环向椭圆形表面裂纹, 当裂纹较浅时, 应力集中主要发生在裂纹的边界处, 导致裂纹扩展时更容易沿着环向进行。随着裂纹沿着环向扩展, 裂纹的深度 (壁厚方向) 也逐渐增加, 直至最终穿透管道; 当裂纹较深时, 壁厚方向 (即裂纹尖端) 的应力集中更加显著, 裂纹更倾向于先在壁厚方向扩展直至穿透, 因为裂纹尖端在壁厚方向上遇到的阻力较小, 穿透后, 裂纹继续沿着环向扩展。

管道边界的反力-位移曲线如图 8 所示。由图可见, 随着初始表面裂纹贯穿程度的增加, 管道抵抗拉力的能力逐渐减弱, 最大反力逐渐减小。各情况下的管道边界处反力峰值见表 3。

### 2.2.2 扇形裂纹

为研究扇形裂纹贯穿程度对管道轴向反力的影响, 裂纹相对深度取  $a/s$  为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 和

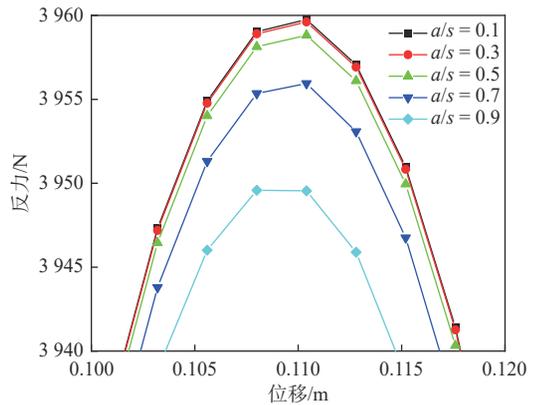


图 8 不同贯穿程度的椭圆形表面裂纹管道反力-位移曲线

Fig. 8 Reaction force-displacement curves of pipe with different extents of the elliptical crack penetration

表 3 椭圆形表面裂纹管道在轴向载荷作用下最大反力

Table 3 Maximum reaction force of pipe with elliptical surface crack under axial load

初始裂纹深度/m	最大反力/N
0.01	3 959.75
0.03	3 959.61
0.05	3 958.82
0.07	3 955.94
0.09	3 949.58

0.9。各情况下的裂纹扩展路径如图 9 所示,图中红色区域为  $d \geq 0.9$  的裂纹带。对于不同的裂纹

贯穿程度,管道最终的裂纹扩展路径基本一致,管道的最终破坏状态未受裂纹贯穿程度的影响。

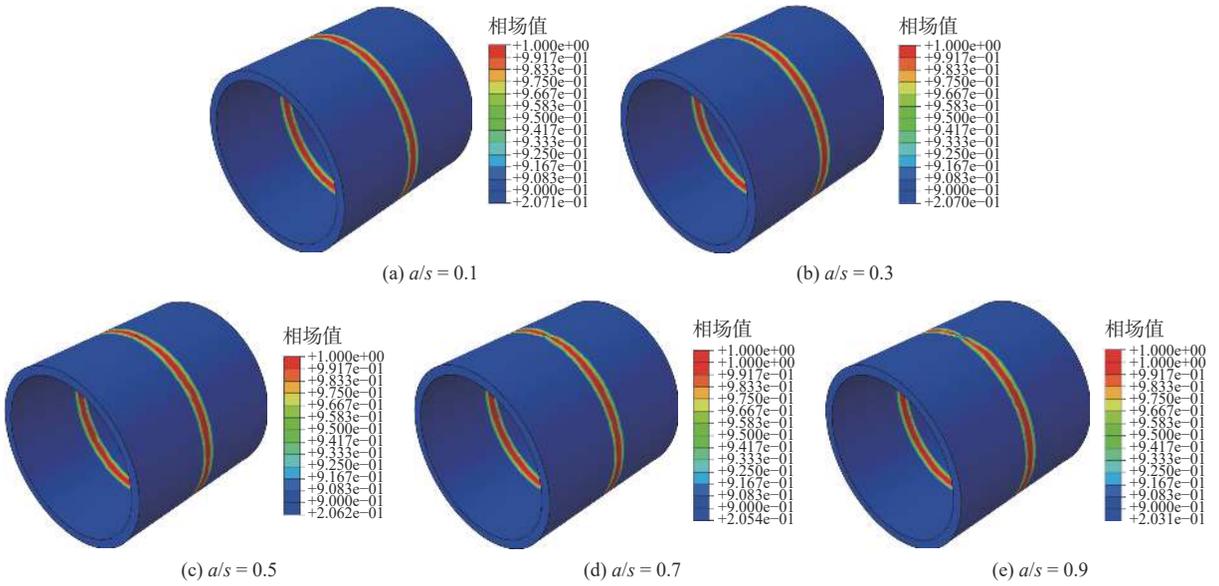


图 9 不同扇形表面裂纹贯穿程度管道裂纹扩展路径

Fig. 9 Crack propagation paths of pipe with different extents of the sectoral surface crack penetration

对于局部的表面裂纹扩展情况,当初始表面裂纹形态为扇形时,表面裂纹一般先进行壁厚方向扩展至穿透,再向管道环向方向进行扩展。

对于环向扇形表面裂纹,裂纹尖端形态导致壁厚方向的应力集中更加显著。因此,这种类型的裂纹更倾向于首先在壁厚方向进行扩展直至穿透,穿透后,裂纹继续沿着环向方向扩展。

管道边界的反力-位移曲线如图 10 所示。同样可见,随着初始表面裂纹贯穿程度的增加,管道抵抗拉力的能力逐渐减弱,最大反力逐渐减小。各情况下的管道边界处反力峰值见表 4。

表 4 扇形表面裂纹管道在轴向载荷作用下的最大反力

Table 4 Maximum reaction force of pipe with a sectoral surface crack under axial load

初始裂纹深度/m	最大反力/N
0.01	3 959.80
0.03	3 959.77
0.05	3 959.54
0.07	3 959.13
0.09	3 958.18

在轴向力影响下的裂纹扩展现象,对含不同椭圆形和扇形初始环向表面裂纹形态的管道进行了数值模拟分析,研究了不同初始裂纹形态和贯穿程度下的管道裂纹扩展情况及力学响应,基于算例结果验证了断裂相场模型在海洋工程结构物裂纹扩展预测中的适用性。得到主要结论如下:

1) 断裂相场法可以较好地模拟出拉伸载荷作用下的管道断裂过程,并清晰地描述管道的裂纹扩展路径。

2) 对于环向椭圆形表面裂纹,初始裂纹较浅时,应力集中主要出现在裂纹边缘,导致裂纹倾向于沿环向扩展。随着裂纹的环向扩展,其深度(沿壁厚方向)也相应增加,直至最终穿透管壁;对于较深的初始裂纹,壁厚方向的应力集中更为明显,使得裂纹首先沿壁厚方向扩展并穿透,穿透后再继续沿环向扩展。

3) 环向扇形表面裂纹由于其特有的裂纹尖端形态,导致壁厚方向的应力集中更加显著。这

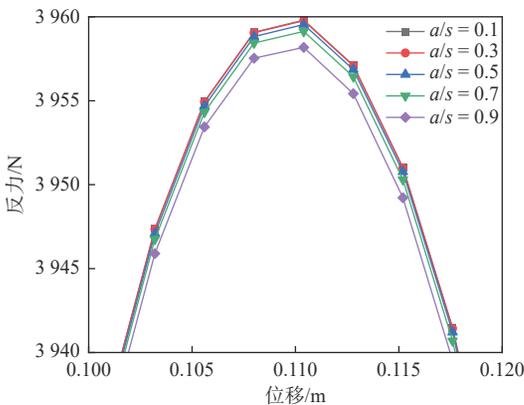


图 10 不同贯穿程度的扇形表面裂纹管道反力-位移曲线

Fig. 10 Reaction force-displacement curves of pipe with different extents of the sectoral surface crack penetration

### 3 结 论

基于断裂相场法探讨了含环向表面裂纹管道

类裂纹更易先沿壁厚方向穿透, 然后再沿环向方向继续扩展。

4) 随着初始表面裂纹贯穿程度的增加, 管道抵抗拉力的能力逐渐减弱, 最大反力逐渐减小。

#### 参考文献:

- [1] 陈荣旗, 雷震名. 中国海底管道工程技术发展与展望[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 667–672.  
CHEN R Q, LEI Z M. Progress and outlook of submarine pipeline engineering technologies in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(6): 667–672 (in Chinese).
- [2] 狄彦, 帅健, 王晓霖, 等. 油气管道事故原因分析及分类方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(7): 109–115.  
DI Y, SHUAI J, WANG X L, et al. Study on methods for classifying oil & gas pipeline incidents[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(7): 109–115 (in Chinese).
- [3] 陈宇砾, 王国珍, 轩福贞, 等. 含环向穿透裂纹管道LBB裂纹扩展稳定性计算程序开发[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(4): 654–659.  
CHEN Y L, WANG G Z, XUAN F Z, et al. Development of calculation program for LBB crack growth stability of pipe with circumferential through-wall crack[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(4): 654–659 (in Chinese).
- [4] 陈飞, 丁宁, 王馨怡, 等. 基于XFEM的管道表面裂纹环向扩展数值模拟[J]. 材料保护, 2022, 55(12): 47–54, 78.  
CHEN F, DING N, WANG X Y, et al. Numerical simulation of circumferential propagation of surface cracks on pipeline based on XFEM[J]. Materials Protection, 2022, 55(12): 47–54, 78 (in Chinese).
- [5] 朱豪豪, 郭海林, ZHUMAKELDI A. 外力作用下管道内表面缺陷处裂纹扩展研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(3): 66–72.  
ZHU H H, GUO H L, ZHUMAKELDI A. Research on crack propagation of pipeline inner surface defect under external force[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(3): 66–72 (in Chinese).
- [6] SONG Z H, CHEN N Z. A modified cyclic cohesive zone model for low-cycle fatigue crack initiation prediction for subsea pipelines under mode I loading[J]. Ocean Engineering, 2023, 276: 114200.
- [7] 田文祥, 周伟, 林力, 等. 基于内聚力模型复合水泥基材料细观开裂模拟[C]//中国力学大会论文集(CCTAM 2019). 杭州: 中国力学学会, 2019: 1515–1526.  
TIAN W X, ZHOU W, LIN L, et al. Mesoscopic cracking simulation of composite cementitious materials based on cohesive force model[C]//Proceedings of the Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics (CCTAM 2019). Hangzhou: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2019: 1515–1526 (in Chinese).
- [8] WANGEN M. Finite element modeling of hydraulic fracturing in 3D[J]. Computational Geosciences, 2013, 17(4): 647–659.
- [9] 胡少伟, 鲁文妍. 基于XFEM的混凝土三点弯曲梁开裂数值模拟研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 48–51.  
HU S W, LU W Y. Numerical simulation of concrete three-point bending beam cracking based on XFEM[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2014, 35(4): 48–51 (in Chinese).
- [10] 林力, 杨鑫平, 常晓林, 等. 基于内聚力模型的粉煤灰混凝土细观开裂研究[J]. 人民长江, 2018, 49(20): 81–86, 100.  
LIN L, YANG X P, CHANG X L, et al. Research on meso-cracking of fly ash concrete based on cohesive zone model[J]. Yangtze River, 2018, 49(20): 81–86, 100 (in Chinese).
- [11] GRIFFITH A A. VI. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921, 221(582-593): 163–198.
- [12] IRWIN G R. Fracture, elasticity and plasticity[M]. Berlin: Springer, 1958.
- [13] MOLNÁR G, GRAVOUIL A. 2D and 3D Abaqus implementation of a robust staggered phase-field solution for modeling brittle fracture[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2017, 130: 27–38.