

中文引用格式:张宇,张罡,张强,等. 压力交变载荷作用下储气库注采管柱疲劳裂纹扩展研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(1): 120-126.

英文引用格式:ZHANG Yu,ZHANG Gang,ZHANG Qiang, et al. Research on fatigue crack propagation of injection-production string in gas storage facilities under alternating pressure load [J]. China Safety Science Journal, 2025,35(1):120-126.

压力交变载荷作用下储气库注采管柱疲劳 裂纹扩展研究*

张宇^{1,2}讲师,张罡²,张强^{**2}教授,马群²,秦晓杰²,贾蕊²

(1 广州大学 化学化工学院,广东 广州 510006;

2 东北石油大学 机械科学与工程学院,黑龙江 大庆 163000)

中图分类号:X937

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.01.0543

基金项目:国家自然科学基金资助(52374034);广州市博士后科学基金启动项目资助(624021-1)。

【摘要】 为提高注采管柱安全风险预测的准确性,首先,采用联合仿真分析方法,开展直通型缺口紧凑拉伸试样疲劳裂纹扩展过程有限元验证;然后,建立储气库舍外表面裂纹注采管柱疲劳裂纹扩展有限元模型,在压力交变载荷作用下,研究储气库注采管柱的疲劳裂纹扩展行为。研究结果表明:试样模拟结果与疲劳裂纹试验结果基本吻合,表明联合仿真法在疲劳裂纹扩展分析方面具有较高精度;在注采管柱疲劳裂纹扩展过程中,初始裂纹的长深比越大或应力比越高,裂纹扩展速率越快,临界最小裂纹长度为4 mm;在相同的压力载荷循环次数下,初始裂纹周向夹角越大,表面裂纹扩展长度越长,临界最小周向夹角为45°;无论初始裂纹周向夹角如何,裂纹始终沿管柱轴线方向扩展,裂纹失稳扩展长度为52 mm;在储气库交替注采时,应合理控制交替注采压力载荷的幅值,避免疲劳裂纹的萌生和扩展。

【关键词】 压力交变载荷; 储气库; 注采管柱; 疲劳; 裂纹扩展

Research on fatigue crack propagation of injection-production string in gas storage facilities under alternating pressure load

ZHANG Yu^{1,2}, ZHANG Gang², ZHANG Qiang², MA Qun², QIN Xiaojie², JIA Rui²

(1 School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou

Guangdong 510006, China; 2 School of Mechanical Science and Engineering,

Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang 163000, China)

Abstract: To improve the safety risk prediction accuracy of injection-production string, a joint simulation analysis method was used to perform finite element verification of the fatigue crack propagation process of straight-notch compact tensile specimens. Then, a finite element model of fatigue crack propagation of injection-production string with external surface cracks in gas storage was proposed. Moreover, the injection-production strings' fatigue crack propagation behavior was analyzed under alternating pressure loads. The results indicated that the specimen simulations were consistent with the

* 文章编号:1003-3033(2025)01-0120-07; 收稿日期:2024-08-10;; 修稿日期:2024-10-12

** 通信作者:张强(1981—),男,重庆人,博士,教授,主要从事油气管道和管柱力学研究。E-mail: tical2012@163.com。

fatigue crack test results, indicating that the joint simulation method had high accuracy in fatigue crack propagation analysis. During the fatigue crack propagation of the injection-production string, the larger the initial crack's length-to-depth ratio or the higher the stress ratio, the faster the crack propagation rate with a critical minimum crack length of 4 mm. Under the same number of pressure load cycles, the larger the initial crack's circumferential angle, the longer the surface crack propagates, and the critical minimum circumferential angle was 45° . The crack consistently propagated along the axis of the pipe string regardless of the initial crack's circumferential angle, and the unstable propagation length was 52 mm. During alternating injection and production in gas storage, the amplitude of the alternating pressure load should be properly controlled to avoid the initiation and propagation of fatigue cracks.

Keywords: alternating pressure load; underground gas storage; injection and production pipe column; fatigue; crack propagation

0 引言

随着我国能源需求日益增加,天然气的供求失衡问题日益突出,巨大的调峰能力对储气设施提出了更高要求。储气库凭借其库容大、安全性高、储存转换成本低等优势,在天然气市场的应急调峰保障中扮演着越来越重要的角色。尽管储气库在全球范围内得到广泛应用,但其在使用过程中也面临着多种安全风险,如天然气泄漏、可燃气体爆炸等^[1]。在井下注采管柱服役过程中,由于不断地注入和提取天然气,井下压力会出现一定波动,这种波动可能导致注采管柱产生疲劳,进而萌生裂纹并扩展,最终出现泄漏。因此,研究注采管柱在压力交变载荷作用下的裂纹扩展行为,对于预测注采管柱安全风险,减少事故的发生,具有现实意义。

目前,学者们开展了诸多地面、海底管道疲劳裂纹的研究,如朱豪豪等^[2]采用扩展有限元法,研究了管道内表面缺陷处裂纹扩展情况;TORABI 等^[3]研究了实心圆轴在完全反向旋转弯曲条件下的疲劳裂纹增长;李思琦等^[4]结合 Clark 模型和腐蚀环境下的 Pairs 模型,建立了应力腐蚀裂纹扩展寿命的计算模型;谢知伟^[5]建立了管道半椭圆形裂纹有限元模型,研究了 2 种压力工况下不同初始裂纹尺寸的蠕变裂纹扩展寿命;周如江等^[6]建立了低温环境下钛合金三维疲劳裂纹扩展模型,发现由于闭合效应,减小厚度或降低温度均会减缓试验合金的疲劳裂纹扩展速率;徐媛媛等^[7]采用最大切应力准则,分析了海底管道裂纹扩展模式,并基于 Paris 公式预测了海底管道的疲劳扩展寿命;董超等^[8]研究了奥氏体不锈钢管焊缝的疲劳裂纹扩展行为,并根据 Paris 公式得出焊缝具有更高的裂纹扩展门槛值;梁铁波等^[9]研究了 316LN 母材在室温和高温环境下的疲

劳裂纹扩展行为。但当前学者们针对地下储气库注采管柱疲劳裂纹扩展方面的研究,还较为鲜见。

鉴于此,笔者拟采用联合仿真分析方法,建立针对储气库含裂纹管柱在压力交变载荷作用下的有限元模型,并采用数值模拟方法,分析注采管柱疲劳裂纹扩展过程,以期对注采管柱安全风险预测提供一定的参考。

1 疲劳裂纹扩展模拟计算方法

1.1 计算流程

图 1 为疲劳裂纹扩展模拟流程。该流程主要分为 2 个核心部分:①ABAQUS 软件的建模与分析;②FRANC3D 软件的裂纹扩展分析。

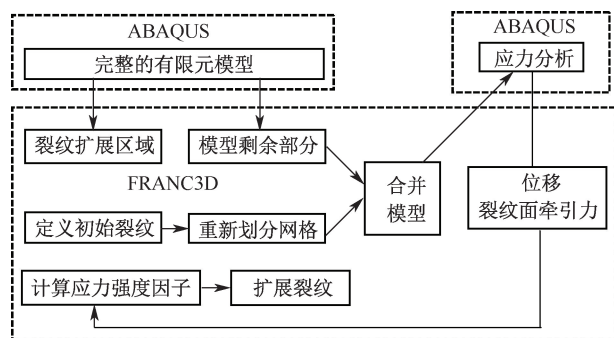


图 1 疲劳裂纹扩展模拟流程

Fig. 1 Fatigue crack propagation simulation flow chart

1.2 试样有限元模型

为验证采用 FRANC3D 与 ABAQUS 联合仿真方法的有效性,参照文献[10]的试验数据,构建直通型缺口紧凑拉伸试样的有限元模型,如图 2 所示。由于试样尺寸符合标准,且能够容易获得精确的试验数据,同时便于模拟分析,选择试样仿真研究疲劳裂纹扩展。在 ABAQUS 软件中,定义相应的载荷和

边界条件。在试样上下 2 个孔洞上施加边界条件,限制其在 x 和 y 方向上的位移。在上下加载孔的中心处 P1 和 P2 点,分别与上下加载柱面建立耦合约束,并在这些加载孔施加集中力 F 。整个模型采用 8 节点六面体线性减缩积分 C3D8R 单元进行网格划分。

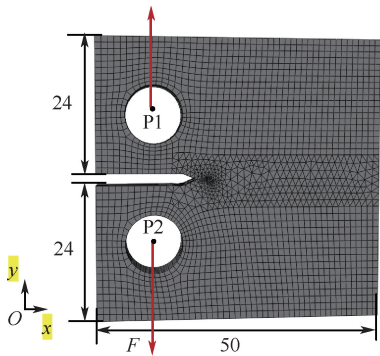


图 2 直通型缺口紧凑拉伸试样有限元模型

Fig. 2 Finite element model of straight-through notch compact tensile specimen

在裂纹扩展区域,预先形成初始裂纹,并将裂纹前缘的网格单元尺寸设定为 0.1 mm,这样做是为了更精确地计算裂纹尖端的应力强度因子^[11]。在初始预制裂纹参数设定完成后,FRANC3D 将自动执行网格重划分,生成包含初始裂纹的试样网格模型,共划分了 30 349 个单元,图 3 展示了裂纹尖端区域网格。

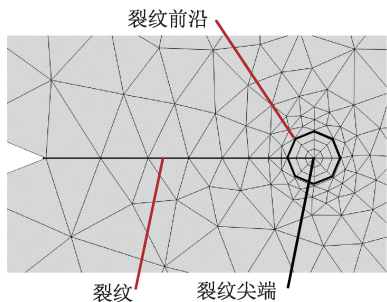


图 3 裂纹尖端区域网格

Fig. 3 Crack tip region mesh

1.3 模拟结果对比验证

选取文献[10]中试样 1、试样 2 和试样 3 的数据,尺寸和加载参数见表 1。

表 1 模拟试样参数设置

Table 1 Simulation specimen parameter

试样编号	应力比 R	最大拉载/kN	壁厚/mm
1	0.02	8.8	6.8
2	0.02	8.5	6.8
3	0.02	7.0	6.8

试样疲劳试验最终状态如图 4 所示,可见:裂纹沿着预制的开口方向扩展,直至断裂。将试验法测

得的数据与有限元模拟得到的数据对比,其中,记录模拟裂纹扩展到 15 mm,其结果如图 5 所示。其中,图 5a 给出了试样 2 疲劳裂纹模拟的扩展长度 a 对应的等效应力云图。可见:与试样疲劳试验的裂纹扩展形貌基本吻合,在载荷循环次数 N 达到 9 725 次时,观察到裂纹扩展了 1 mm。随着 N 增加至 73 925 次, a 增长显著,裂纹扩展了 14 mm。通过提取 3 个试样在各个循环次数下的裂纹长度。图 5b 给出了疲劳裂纹扩展模拟循环次数与试样对比结果。从 a 和 N 的关系可知:随着 N 的增加,裂纹长度急剧增长。对比试验和模拟的裂纹长度,试样 1、试样 2 和试样 3 的最大误差分别为 9.97%、4.41% 和 5.45%,表明联合仿真法在疲劳裂纹扩展模拟分析方面具有较高精度。

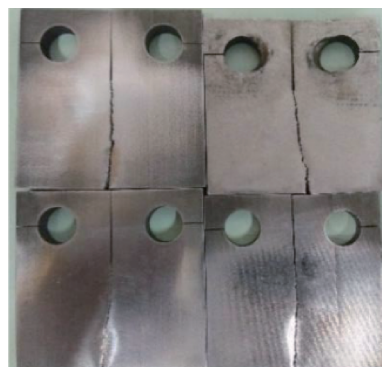


图 4 试样疲劳试验最终状态

Fig. 4 Final state of specimen fatigue test

2 注采管柱疲劳裂纹扩展模型

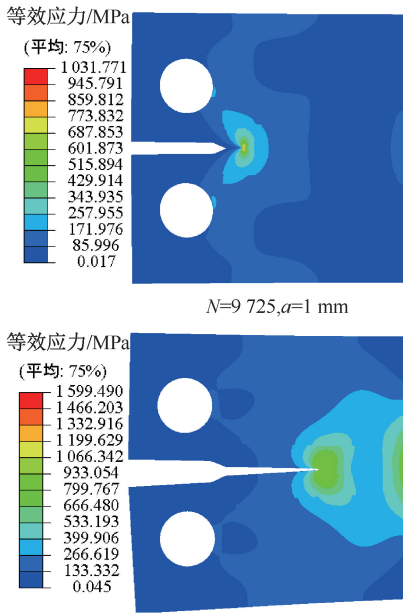
2.1 有限元模型

为对含有裂纹的注采管柱进行疲劳裂纹扩展分析,构建能够承受不同注采压力载荷条件的有限元模型,如图 6 所示。

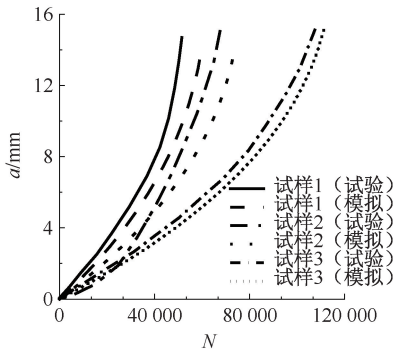
首先,构建储气库注采管柱模型,长度为 1 000 mm,内径为 76 mm,壁厚为 6.45 mm。材料选用 P110 管材,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3。整个模型网格采用 8 节点六面体 C3D8R 单元进行划分。随后,将储气库注采管柱模型导入 FRANC3D 软件中。将管柱的有限元模型划分 2 个区域:①未裂纹扩展区域,全局模型中的灰色区域(图 6a);②裂纹扩展区域,如图 6b 所示的子模型。整体网格模型共划分为 27 000 个单元,裂纹扩展的分析仅在管柱子模型上进行。

2.2 计算步骤

将模型导入 FRANC3D 软件后,启动疲劳裂纹



(a) 疲劳裂纹模拟中扩展长度和应力云图



(b) 裂纹扩展长度与循环次数曲线

图 5 疲劳裂纹扩展模拟与试验对比

Fig. 5 Comparison of fatigue crack propagation between simulation and measurement

扩展的分析流程。为完成裂纹的自动扩展,需要依次完成 4 个关键步骤,具体操作为:

1) 引入初始裂纹。在子模型中引入初始裂纹,指定裂纹的形状为半椭圆形,并设置裂纹的长半轴和短半轴的具体尺寸。随后,定义裂纹前缘网格的半径,确保在这一区域拥有足够的网格密度,以提升分析精度。在完成所有参数配置后,更新有限元网格模型。

2) 施加疲劳载荷。在储气库运行过程中,高速气流会对管壁施加压力,井底的最小运行压力为 20 MPa,最大运行压力为 50 MPa。在 ABAQUS 分析环境中,对管柱模型施加边界条件,其中一端保持固定,在管柱内部施加变化的压力载荷。在进行有限元分析时,采用常幅疲劳载荷加载,并记录裂纹的

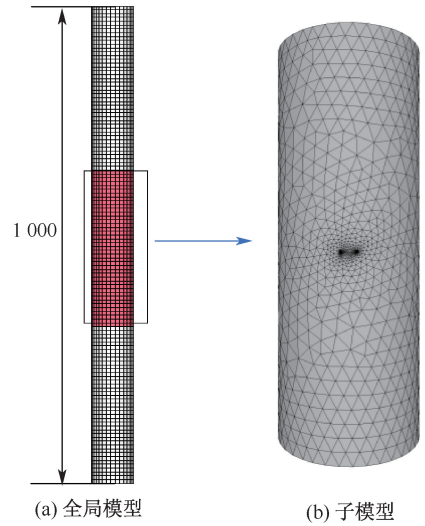


图 6 含裂纹储气库注采管柱有限元模型

Fig. 6 Finite element model of injection and production string of cracked gas storage

扩展情况和对应的加载次数。在 FRANC3D 软件中,设置压力交变载荷的应力比 R 为 20/50,即 0.4,这意味着裂纹将在 20~50 MPa 的压力交变载荷范围内扩展。基于 R ,模拟计算不同初始裂纹形貌的管柱的疲劳裂纹扩展。

3) 计算应力强度因子。FRANC3D 采用 M -积分计算应力强度因子,能实现多工况的应力强度因子的叠加。利用 M -积分可同时得到 3 种断裂模式的应力强度因子: K_I 、 K_{II} 和 K_{III} 。具有复杂应力场的裂纹尖端的应力强度因子,可采用 M 积分法表示为:

$$M^{(1,2)} = \int_{\Gamma} (\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_j} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_j} - W^{(1,2)} \delta_{1,j}) \frac{\partial q}{\partial x_j} ds / A_q \quad (1)$$

式中: Γ 为围绕裂纹尖端的积分路径; σ_{ij} 为应力张量,Pa; u_i 为位移分量,m; i 和 j 为应力或位移在坐标系中的方向; $W^{(1,2)}$ 为相互作用应变能密度, J/m^3 ;上标 1 和 2 分别表示实际场和辅助场; $\delta_{1,j}$ 为 $i=1$ 时的单位张量; s 为单位纬线长度,m; A_q 为裂纹扩展的积分面积, m^2 。 $W^{(1,2)}$ 定义为:

$$W^{(1,2)} = \sigma_{ij}^{(1)} \varepsilon_{ij}^{(2)} = \sigma_{ij}^{(2)} \varepsilon_{ij}^{(1)} \quad (2)$$

式中 ε_{ij} 为应变张量。

M -积分、材料属性和应力强度因子间的相关性表示为:

$$M^{(1,2)} = 2 \times \left[\frac{1 - \nu^2}{E} K_I^{(1)} K_I^{(2)} + \frac{1 - \nu^2}{E} K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)} + \frac{1 - \nu^2}{E} K_{III}^{(1)} K_{III}^{(2)} \right] \quad (3)$$

式中： ν 为泊松比； E 为弹性模量，Pa； K_I 、 K_{II} 和 K_{III} 分别为 I 型、II 型、III 型应力强度因子， $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

4) 选择扩展模型。在完成初始预制裂纹的模拟后，P110 管材裂纹扩展速率 da/dN 与应力强度因子幅 ΔK 之间的关系可由 Paris 公式得到，即

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

式中 C 和 m 均为材料常数。裂纹扩展的 Paris 参数^[12]见表 2。

表 2 疲劳裂纹扩展 Paris 参数

Table 2 Fatigue crack propagation Paris parameters

参数 C	参数 m	阈值 $\Delta K_{th}/$ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	断裂韧性因子 $K_{IC}/$ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
5.40×10^{-9}	2.88	4	156

3 疲劳裂纹扩展分析结果

3.1 长深比影响

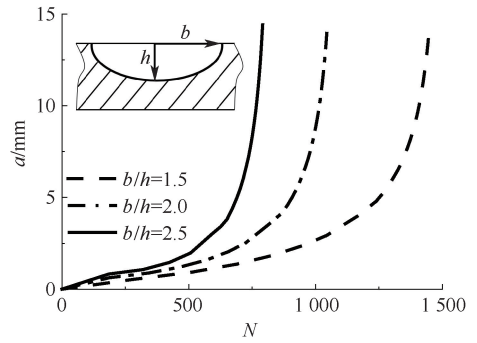
设置注采管柱初始裂纹长半轴为 b ，初始裂纹短半轴（深度）为 h ，长深比 b/h 取 1.5、2.0、2.5。不同 b/h 下的疲劳裂纹结果如图 7 所示。

由图 7a 可知：当 N 小于 500 次时， a 较小；随着 N 增加， a 急剧增大。裂纹扩展速率随着初始裂纹 b/h 的增加而增大，特别是当 N 大于 500 次时，裂纹 b/h 的影响更显著。由图 7b 可知：初始时表面裂纹尖端的等效应力为 1 441 MPa， N 增加至 1 265 次，等效应力增加到 6 160 MPa。

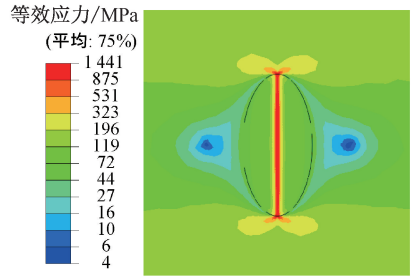
当 a 超过 3 mm 时， b/h 增加效应更加明显，体现在应力强度因子的增加上，不同 b/h 下储气库注采管柱应力强度因子如图 8 所示。具体而言，当 a 小于 3 mm 时，应力强度因子基本重合；当 a 大于 3 mm，应力强度因子随着长深比的增加而增大。计算得出，当初始裂纹长度小于 $2b = 4$ mm、深度小于 $h = 1$ mm 时，疲劳裂纹将不会发生扩展。据此，可以确定疲劳裂纹扩展的临界最小裂纹尺寸。当 N 达到 1 477 次时，裂纹发生失稳扩展，此时裂纹扩展长度为 $2b = 53$ mm，裂纹失稳扩展临界长度取 52 mm。

3.2 周向夹角影响

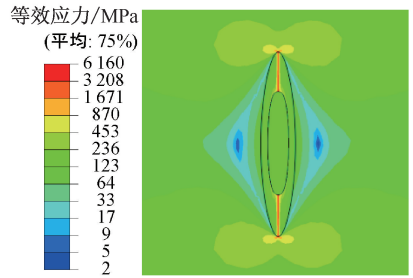
在压力交变载荷影响下，研究周向夹角对疲劳裂纹的影响。周向夹角 β 指裂纹面与管柱轮廓圆周周向线之间的角度，范围 $0 \sim 90^\circ$ 。取 3 种不同初始周向夹角 β ，即 60° 、 75° 和 90° ，图 9 为不同角度下储气库注采管柱疲劳裂纹扩展的模拟结果，图 9a 为 β 的示意图。观察图 9a 曲线可知：对于特定的管柱尺



(a) 裂纹扩展长度与循环次数曲线



$N=0$



$N=1265$

(b) 疲劳裂纹扩展的等效应力

图 7 不同长深比下储气库注采管柱疲劳裂纹扩展模拟
Fig.7 Fatigue crack propagation simulations in injection and production strings of gas storage under different length-to-depth ratios

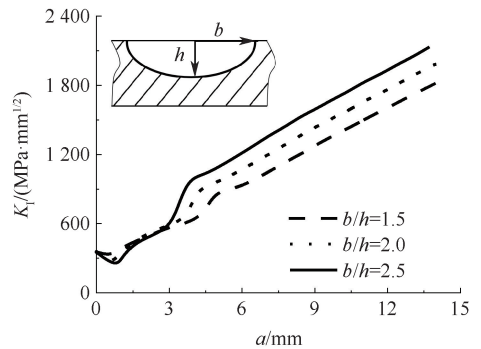
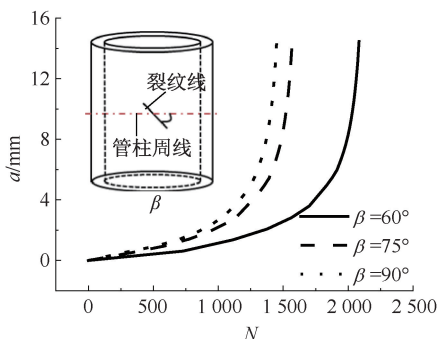


图 8 不同长深比下储气库注采管柱应力强度因子
Fig.8 Stress intensity factors of injection and production strings in gas storage under different length-to-depth ratios

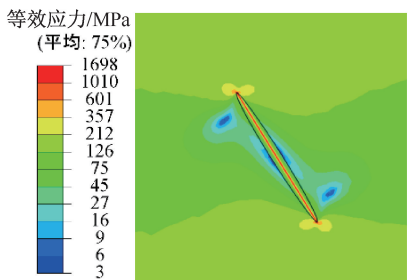
寸，在 N 保持一致条件下，初始 β 越大，所形成的表

面裂纹长度也 longer。同时,形成相同长度表面裂纹所需的 N 随着 β 的增大而减少,表明 β 越大,管柱的预期剩余寿命越短。计算得出,当 β 低于 45° 时,疲劳裂纹将不会发生扩展。因此,可将 45° 作为疲劳裂纹扩展的临界 β 。

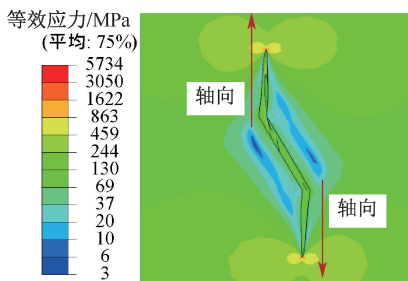
在 b/h 为 1.5 的条件下,当初始裂纹周向夹角为 60° 时,由不同 N 下的等效应力云图(图 9b)可知:在载荷循环次数为 0 次时,观察到最大应力集中在管柱表面裂纹的尖端,其值达到 1 698 MPa。随着 N 增加到 1 963 次时,最大等效应力值显著增加到 5 734 MPa,这一变化揭示了随着 N 的增加,裂纹尖端所承受的应力也相应增大。由图 9b 还可知:不论初始裂纹周向夹角如何,裂纹的扩展路径始终沿着管柱轴线方向进行。



(a) 裂纹扩展长度与循环次数曲线



$N=0$



$N=1\ 963$

(b) 疲劳裂纹扩展的等效应力

图 9 不同轴向角度下储气库注采管柱疲劳裂纹扩展模拟
Fig. 9 Fatigue crack propagation simulation in injection and production strings of gas storage under different circumferential angles

3.3 应力比影响

储气库注采管柱在交替注采时,最小压力与最大压力的比值定义为应力比 R ,在不同 R 条件下,得到疲劳裂纹扩展模拟结果如图 10 所示。

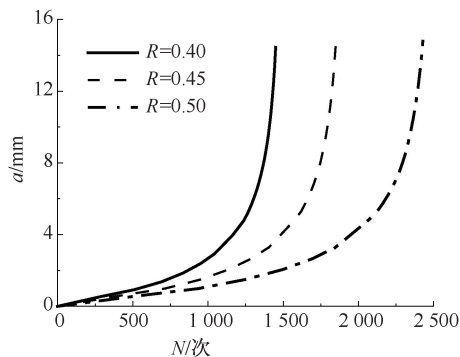


图 10 不同应力比下的储气库注采管柱疲劳裂纹扩展模拟

Fig. 10 Simulation of fatigue crack propagation simulation in injection and production strings of gas storage under different stress ratios

在相同疲劳载荷循环次数下,应力比越小,裂纹扩展之后的长度越长。这是因为 R 越小,最小和最大压力的差值越大,直接影响了注采管柱内部的疲劳裂纹的扩展程度,在储气库实际交替注采过程中,应控制最小和最大注采压力的幅值。

4 结 论

1) 通过对比试样疲劳裂纹扩展模拟循环次数与试样疲劳试验结果可知:采用 FRANC3D 与 ABAQUS 软件的联合仿真分析方法,对疲劳裂纹扩展模拟分析具有较高精度。

2) 在储气库注采管柱交变压力载荷作用下,储气库注采管柱疲劳裂纹扩展时,长深比越大的初始裂纹,扩展速率更快;在保持裂纹长深比恒定条件下,裂纹扩展速率随着初始裂纹周向夹角的增大而呈现上升趋势。在相同疲劳载荷循环次数下,应力比越小,裂纹扩展之后的长度越长,在储气库实际的交替注采时,应控制最小和最大注采压力的幅值。

3) 不论储气库注采管柱初始裂纹周向夹角如何,裂纹的扩展路径始终沿着储气罐管柱的轴向方向进行。计算得到疲劳裂纹扩展的临界最小裂纹长度为 4 mm,临界裂纹深度为 1 mm,临界最小周向夹角为 45° ,裂纹失稳扩展的临界长度为 52 mm。

参考文献

- [1] 李碧曦, 易俊, 张鹏, 等. 储气库注采管柱腐蚀规律及保护措施[J]. 油气田地面工程, 2015, 34(10): 27-29.
LI Bixi, YI Jun, ZHANG Peng, et al. Corrosion law and protection measures of injection and production pipe columns in gas storage tanks [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2015, 34(10): 27-29.
- [2] 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 Haohao, GUO Hailin, ZHUMAKELDI A. Research on crack propagation of pipeline inner surface defect under external force [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(3): 66-72.
- [3] TORABI A R, KHAVAS M H. Fatigue crack growth in a solid circular shaft under fully reversed rotating bending[J]. Journal of Failure Analysis & Prevention, 2012, 12(4): 419-426.
- [4] 李思琦, 杨宇, 李孝品, 等. 核电机组汽轮机低压叶轮叶根槽应力腐蚀裂纹扩展寿命分析[J]. 发电设备, 2023, 37(4): 248-252.
LI Siqi, YANG Yu, LI Xiaopin, et al. Analysis on stress corrosion crack propagation life of low-pressure impeller blade root groove in nuclear power unit steam turbine [J]. Power Equipment, 2023, 37(4): 248-252.
- [5] 谢知伟. P91 钢高温管道蠕变裂纹扩展寿命评价[J]. 设备监理, 2023(4): 60-64.
XIE Zhiwei. Life evaluation of creep crack growth in P91 steel high temperature pipeline [J]. Plant Engineering Consultants, 2023(4): 60-64.
- [6] 周如江, 于培师, 吴连生, 等. 低温环境下 TC4ELI 钛合金三维疲劳裂纹扩展模型[J]. 机械工程材料, 2023, 47(12): 87-92.
ZHOU Rujiang, YU Peishi, WU Liansheng, et al. Three-dimensional fatigue crack growth model of TC4ELI titanium alloy at low temperature [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(12): 87-92.
- [7] 徐媛媛, 孙健华, 张捷, 等. 海底管道疲劳裂纹扩展寿命预报的影响因素分析[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(1): 121-125.
XU Yuanyuan, SUN Jianhua, ZHANG Jie, et al. Influence factor analysis for fatigue crack propagation life prediction of subsea pipelines [J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(1): 121-125.
- [8] 董超, 李勤, 赵红波, 等. 奥氏体不锈钢管窄间隙焊缝疲劳裂纹扩展研究[J]. 焊管, 2022, 45(5): 65-68.
DONG Chao, LI Qin, ZHAO Hongbo, et al. Fatigue crack growth studies on narrow gap pipe welds of austenitic stainless steel material [J]. Welded Pipe and Tube, 2022, 45(5): 65-68.
- [9] 梁铁波, 李毅, 赵京, 等. 主管道用 316LN 疲劳裂纹扩展性能研究[J]. 科技视界, 2022(31): 71-73.
LIANG Tiebo, LI Yi, ZHAO Jing, et al. Study on fatigue crack extension performance of 316LN for main pipeline [J]. Science & Technology Vision, 2022(31): 71-73.
- [10] 李其棒. 航空发动机涡轮盘用 GH4133B 合金疲劳裂纹扩展数值模拟研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018.
LI Qibang. Aeroengine turbine disk GH4133B alloy fatigue crack propagation numerical simulation study [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2018.
- [11] 熊勋, 杨莹, 汪舟, 等. 基于 FRANC3D 和 ABAQUS 联合仿真三维疲劳裂纹扩展分析及寿命预测[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2020, 44(3): 506-512.
XIONG Xun, YANG Ying, WANG Zhou, et al. Three-dimensional fatigue crack propagation analysis and life prediction based on co-simulation of FRANC3D and ABAQUS [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2020, 44(3): 506-512.
- [12] 王建才. 含 CO₂ 环境下油井管材料腐蚀疲劳性能研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015.
WANG Jiancai. Research on performance of corrosion fatigue for octg material in environment containing CO₂ [D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, 2015.

作者简介: 张宇 (1988—), 女, 黑龙江大庆人, 博士后, 讲师, 主要从事油气储运、分析化学、新能源等方面的研究。E-mail: keyan339500.1399@gzhu.edu.cn。

