

中文引用格式:马舒琪,刘鑫泉,吕淑然.多缺陷相互作用下热力管道疲劳裂纹萌生寿命预测[J].中国安全科学学报,2026,36(2): 110–120.

英文引用格式:MA Shuqi, LIU Xinquan, LYU Shuran. Fatigue crack initiation life prediction of thermal pipelines under multi-defect interaction[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 110–120.

多缺陷相互作用下热力管道疲劳裂纹萌生寿命预测^{*}

马舒琪副教授,刘鑫泉^{**},吕淑然教授
(首都经济贸易大学 管理工程学院,北京 100070)

中图分类号:X941

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0231

【摘要】为解决埋地热力管道设计、使用及维护过程中外表面蚀坑腐蚀疲劳裂纹萌生寿命难以预测的问题,采用有限元方法探讨蚀坑形貌、缺陷间相互作用及轴向载荷对最大应力集中系数的影响,提出 K_t 经验公式,并建立土壤腐蚀下热力管道疲劳裂纹萌生寿命预测方法,以北京市某运行管道为例,验证该方法的科学性和有效性。结果表明:蚀坑深度增大10倍, K_t 提高2.84倍,周向宽度减小10倍, K_t 提高4.75倍, $a/c > 0.6$ 、 $b/c < 0.6$ 深窄缺陷对 K_t 提高效应更强,裂纹萌生寿命更短;缺陷间距 $d=0$ 时, K_t 达单缺陷效应的1.03倍;缺陷间距越小相互作用效应越强,裂纹萌生寿命越低,随缺陷间距减小,深窄蚀坑寿命降幅达0.12倍,浅宽蚀坑对缺陷间距更敏感,裂纹萌生寿命降幅达0.83倍;低土壤电阻率、低pH值及高温下,裂纹可在20 a内萌生,浅宽蚀坑裂纹萌生寿命对土壤参数更敏感;与仅受内压载荷工况相比,20 MPa轴向压载荷显著降低裂纹萌生寿命0.74倍;20 MPa轴向拉载荷增大至50 MPa引起的裂纹萌生寿命降幅更大,为0.82倍。

【关键词】 热力管道; 应力集中; 土壤参数; 腐蚀疲劳; 疲劳裂纹萌生寿命

Fatigue crack initiation life prediction of thermal pipelines under multi-defect interaction

MA Shuqi, LIU Xinquan, LYU Shuran

(School of Management Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China)

Abstract: To address the challenge of accurately predicting the fatigue crack initiation life caused by surface pitting corrosion in buried thermal pipelines during design, operation, and maintenance, this study employed the finite element method to investigate the influence of pit morphology, defect interaction, and axial loading on the maximum stress concentration factor K_t . An empirical formula for K_t was proposed, and a prediction method for fatigue crack initiation life under soil corrosion was developed. A pipeline in service in Beijing was used as a case study to verify the scientificity and effectiveness of this method. The results indicate that a 10-fold increase in pit depth leads to a 2.84-fold increase in K_t , while a 10-fold reduction in pit circumferential width results in a 4.75-fold increase. Deep and narrow defects characterized by $a/c > 0.6$ and $b/c < 0.6$ exert a stronger effect on increasing K_t and significantly shorten crack initiation life. When the defect spacing $d=0$, K_t reaches 1.03 times that of a single defect. The

^{*} 文章编号:1003-3033(2026)02-0110-11; 收稿日期:2025-09-20; 修稿日期:2025-11-27

^{**} 通信作者:刘鑫泉(2001—),男,北京人,硕士研究生,研究方向为风险评估与预测。E-mail:22023210005@cueb.edu.cn。

smaller the defect spacing, the stronger the interaction effects and the lower the crack initiation life. As defect spacing decreases, the fatigue crack initiation life of deep narrow pits is reduced to 0.12 times the original life, whereas shallow wide pits are more sensitive to spacing, with their crack initiation life reduced to 0.83 times the original life. Under conditions of low soil resistivity, low pH, and elevated temperature, crack initiation may occur within 20 years. The crack initiation life of shallow wide pits is more sensitive to soil parameters. Compared with internal pressure loading alone, an axial compressive load of 20 MPa significantly reduces crack initiation life by 0.74 times. Increasing axial tensile load from 20 MPa to 50 MPa results in a further life reduction of 0.82 times.

Keywords: thermal pipelines; stress concentration; soil parameters; corrosion fatigue; fatigue crack initiation life

0 引言

供热管道长期运行于复杂环境中,在内外介质、材料缺陷、内压波动与外部载荷等因素的共同作用下,呈现显著的腐蚀疲劳损伤演化特性,严重影响热力管道疲劳裂纹萌生寿命^[1]。腐蚀缺陷、初始缺陷等是金属结构疲劳失效的重要诱因^[2]。低碳钢是热力管道的常用材质,极易腐蚀^[3],电阻率、pH值等关键土壤参数显著影响埋地管道腐蚀速率^[4-6]。埋地热力管道常见的保温层下腐蚀,是由地下水与土壤悬液渗透保温层接触管道表面引起的,该种腐蚀具有腐蚀速率高且隐蔽性强等特点^[7-8]。约有80%的保温管道在运行5~10 a后存在钢管表面腐蚀问题。热力管道因埋设地下,维护与检测困难,腐蚀疲劳风险更高,易因疲劳断裂引发泄漏事故。中国测绘学会地下管线专业委员会不完全统计数据显示,我国(不含港澳台)供热管道因外腐蚀缺陷等自身结构性隐患导致的事故占比高达90.2%^[9]。因此,早期预测和评估热力管道腐蚀疲劳裂纹萌生寿命具有实际意义。

腐蚀缺陷几何特征及相互作用对缺陷局部应力集中和结构疲劳性能具有显著影响^[10]。PENG Yi等^[11]使用扫描电镜等多种材料表面表征方法,结合有限元法,揭示管道不锈钢波纹管在裂纹源位置存在高拉应力区,且在高温和腐蚀介质共同作用下,内表面应力集中处形成裂纹,最终导致脆性断裂的腐蚀失效机制。SONG Haipeng等^[12]通过材料表面微观形貌表征方法,研究经人工腐蚀铝合金在不同疲劳加载条件下的损伤演化和失效机制,发现腐蚀坑是疲劳裂纹的主要源头,裂纹萌生与蚀坑底部应力集中及微观缺陷、蚀坑不连续表面及小坑或突起等微特征密切相关,受到腐蚀形貌、加载方式和显微组织的共同影响。HORNER等^[13]采用X射线断层成

像和有限元分析方法,可视化展示低合金钢在Cl⁻蒸汽冷凝环境中,由腐蚀坑引发裂纹的演化过程,阐明腐蚀坑向裂纹转变机制。ZHANG Jia等^[14]通过有限元方法及现场试验,研究埋地管道在土壤-液体积聚腐蚀作用下的失效机制,指出深蚀坑、外表面蚀坑及多蚀坑群效应显著降低管道强度。SO等^[15]采用响应面法设计恒电流加速腐蚀试验,分析区域供热水pH值、溶解氧含量和运行时间对管道焊缝腐蚀深度的影响。李修波等^[16]采用有限元方法构建含蚀坑平板模型,基于腐蚀疲劳现象学观点计算蚀坑裂纹萌生寿命,构建双参数蚀坑腐蚀疲劳裂纹萌生寿命模型。然而,现有研究多聚焦于蚀坑的独立作用,对蚀坑与材料初始缺陷相互作用及考虑土壤环境因素对裂纹萌生寿命的影响方面研究较少。

鉴于此,笔者考虑多缺陷及其相互作用对埋地热力管道疲劳裂纹萌生寿命的影响,采用三维有限元方法,研究单蚀坑特征参数、蚀坑与初始缺陷的相互作用、轴向载荷作用对缺陷局部应力集中的影响,建立考虑土壤腐蚀效应的热力管道腐蚀疲劳裂纹萌生寿命预测模型,以期预测含腐蚀缺陷热力管道的腐蚀疲劳裂纹萌生寿命,为含腐蚀缺陷热力管道的维护与更换提供参考。

1 腐蚀疲劳裂纹萌生寿命预测流程

使用三维有限元方法明确缺陷特征参量对应力集中系数的影响特征,提出应力集中因子经验公式。将Rossum蚀坑扩展速率模型与世界土壤协调数据库(Harmonized World Soils Database, HWSD) Version 2.0数据集相结合,得到考虑土壤腐蚀效应的蚀坑扩展速率,结合蚀坑-裂纹转变的临界深度,建立考虑土壤腐蚀效应的裂纹萌生寿命预测模型,实现对不同土壤参数和蚀坑形貌下裂纹萌生寿命的计算。预测框架如图1所示。

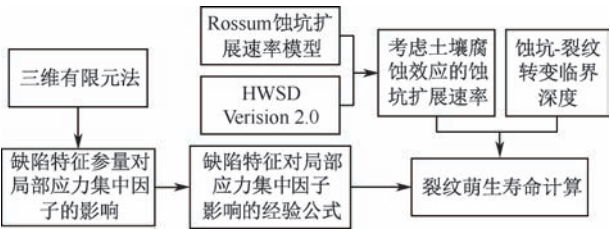


图 1 土壤腐蚀下热力管道疲劳裂纹萌生寿命预测方法

Fig. 1 Fatigue crack initiation life prediction method for thermal pipelines under soil corrosion

2 管道外表面腐蚀缺陷局部力学行为模拟

2.1 有限元模型的建立

考虑模型的对称性,使用 ABAQUS 软件建立含

表 1 热力管道模型的材料参数与几何参数

Table 1 Material and geometric parameters of thermal pipeline model

管材	管道外径/ mm	壁厚/ mm	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服强度/ MPa	临界应力强度因子 $\Delta K_{th}/(\text{MPa} \cdot \text{mm}^{0.5})$
Q235	273	7	2.0×10^5	0.3	225	87.28

将外表面腐蚀坑几何形状简化为椭球形,考虑蚀坑的常见尺寸特点^[18],将蚀坑沿管道轴向宽度 c 固定为 1 mm,改变蚀坑深度 a 、蚀坑周向宽度 b 、蚀坑与初始缺陷间距 d (单位均为 mm),蚀坑形貌参数见表 2,含外表面蚀坑管道有限元模型如图 2 所示。

表 2 外表面腐蚀坑参数取值

Table 2 External corrosion pits parameter values

蚀坑参数	a/c	b/c
取值	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5、2.0	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5、2.0

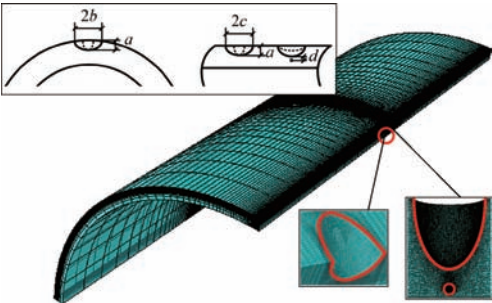


图 2 含外表面腐蚀坑管道有限元模型

Fig. 2 Finite element model for pipeline with external surface corrosion pits

2.2 内压下外表面蚀坑形貌对局部应力集中的影响

计算蚀坑处最大 K_I ,进行非线性曲线拟合得到

外表面蚀坑管道的 1/4 有限元模型。使用线弹性模型计算 1 MPa 内压载荷作用下,外表面蚀坑处的应力集中效应。边界条件设置为管道内表面受 1 MPa 内压载荷,管道对称端面施加对称边界条件。使用三维 20 节点单元 C3D20 计算,在裂纹萌生关键区域进行精细化网格划分。管道模型的材料和几何参数见表 1。通过应力集中因子 K_I 定量分析腐蚀缺陷对管道表面应力场的影响,为疲劳裂纹萌生寿命预测奠定基础。外表面蚀坑处 K_I 定义如下^[17]:

$$K_I = \frac{\sigma_m}{\sigma_n} \quad (1)$$

式中: σ_n 为基准应力,通常取无缺陷管道外表面处最大应力值,MPa; σ_m 为腐蚀缺陷局部的最大应力,MPa。

最大 K_I 与蚀坑形貌参数间的经验表达式,在常见蚀坑几何参数取值范围内具有一定的适用性,结果如图 3 所示,图中, $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ 分别为单外表面蚀坑应力集中因子经验公式的拟合系数。

外表面蚀坑周向宽度 b/c 一定时,蚀坑深度增大 10 倍,蚀坑处最大 K_I 增幅可达 2.84 倍。蚀坑深度 a/c 一定时,随着蚀坑周向宽度减小,其形貌由体积型蚀坑转变为平面型蚀坑。蚀坑周向宽度在 $b/c = 0.6 \sim 2.0$ 范围内时,随蚀坑深度增大,最大 K_I 增幅仅为 2.04 倍。而当周向宽度 $b/c < 0.6$ 时,蚀坑周向宽度减小 10 倍,最大 K_I 增幅可达 4.75 倍。基于 $K_I \geq 3$ 的数值模拟结果,可将 $a/c = 0.6, b/c = 0.6$ 分别视为深与浅、宽与窄蚀坑的转折点。表面平面型蚀坑处 K_I 的提高作用较强,在进行管道检测时,应关注表面位置处深而窄的近平面型蚀坑形貌。

最大应力集中处被认为是裂纹萌生位点,提取蚀坑根部沿线上的最大应力,按式(1)计算 K_I ,形成 K_I 随沿线角度的变化趋势如图 4 所示。深度 $a/c = 0.2$ 时椭球蚀坑根部的最大主应力云图如图 5 所示。当蚀坑周向尺寸一定时,以 $b/c = 0.4$ 为例,对于 $a/c = 0.2$ 的浅蚀坑,最大 K_I 位于靠近管壁外表面位置;随着蚀坑深度增加,最大 K_I 逐渐转移至蚀坑的最深点处。当蚀坑深度一定时,以 $a/c = 0.2$ 为例,蚀坑周向宽度增加则导致最大 K_I 位置由靠近管

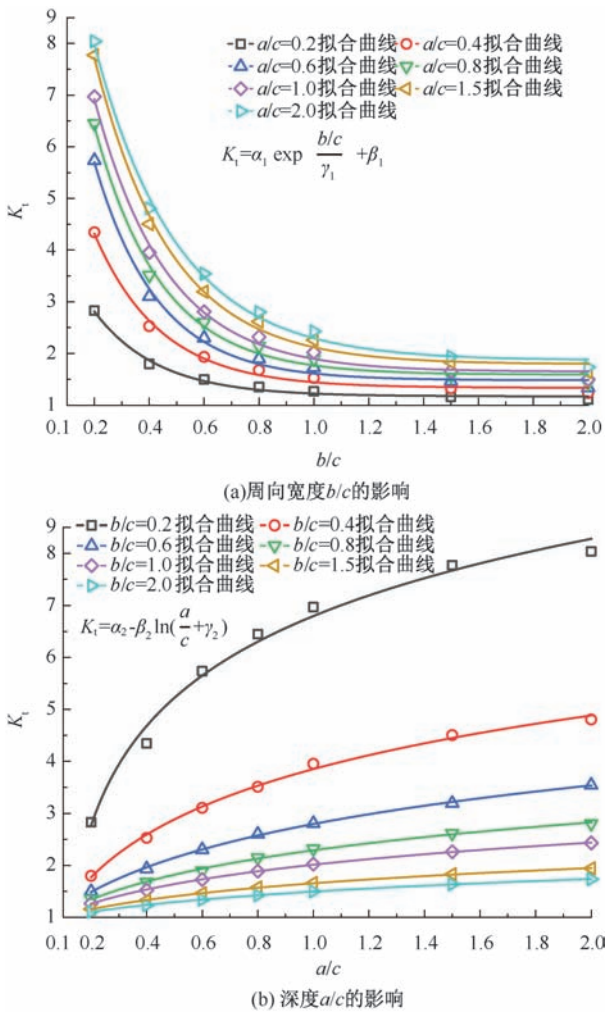


图 3 外表面腐蚀坑形貌对其附近应力集中的影响

Fig. 3 Effect of morphology of external surface corrosion pits on local stress concentration

壁外表面逐渐转移至蚀坑底部位置,随蚀坑宽度进一步增加,最大 K_t 点逐渐偏离蚀坑对称面。对于浅窄形貌的蚀坑,倾向于形成蚀坑顶部边缘裂纹,而深宽形貌蚀坑倾向于形成蚀坑底部裂纹。

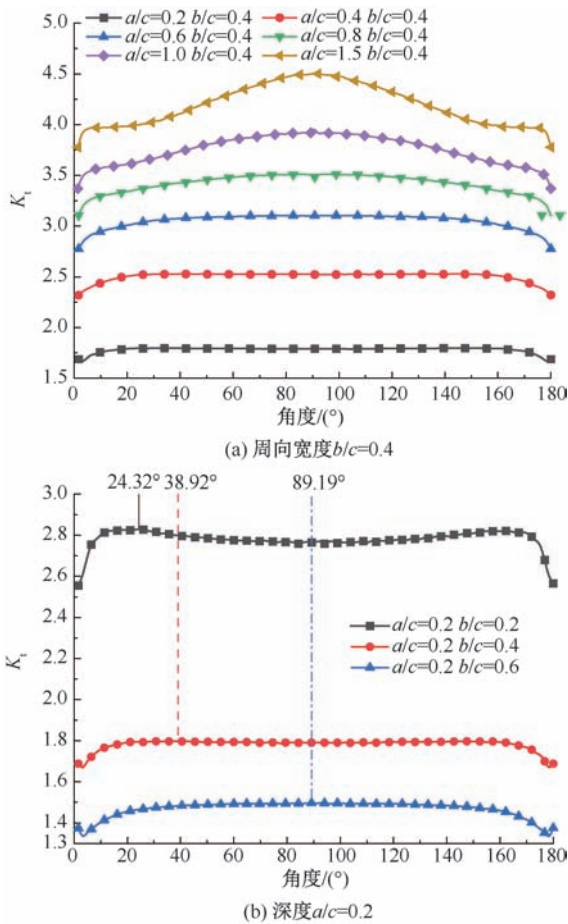


图 4 外表面腐蚀坑根部应力集中因子随缺陷角度的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of stress concentration factor at roots of external surface corrosion pits with defect angle

2.3 外表面腐蚀缺陷与初始缺陷的相互作用效应

管道材料受加工、焊接过程中的冶炼、制造技术和工艺参数等影响,不可避免地存在气泡、夹杂物等初始缺陷。初始缺陷与外表面蚀坑间的相互作用进一步加剧应力集中。参考《承压设备无损检测 第二

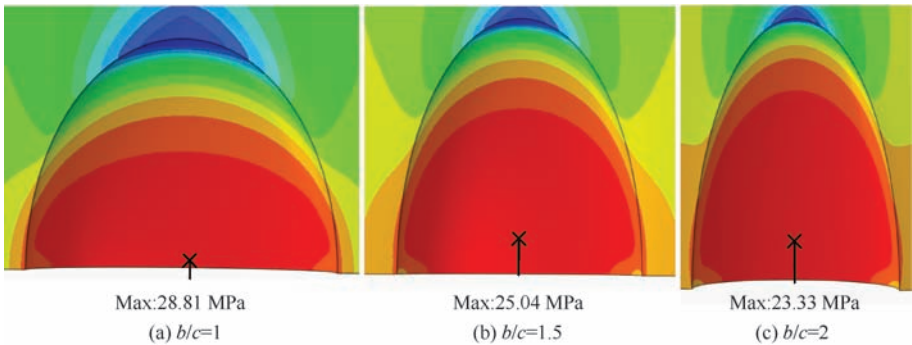


图 5 深度 $a/c=0.2$ 时外表面蚀坑根部最大主应力云图

Fig. 5 Maximum principal stress contours at roots of external surface corrosion pits at depth $a/c=0.2$

部分:射线检测》^[19]中焊接接头质量评定方法,结合实际管道无损检测结果,将初始缺陷简化为半径

0.1 mm 球状,以缺陷球心至蚀坑底部距离作为缺陷间距。模型参数见表 3。

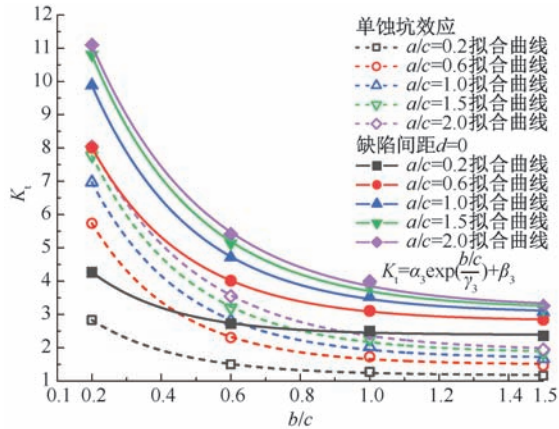
表 3 外表面蚀坑与初始缺陷参数取值

Table 3 Parameter values of external surface corrosion pits and initial defects

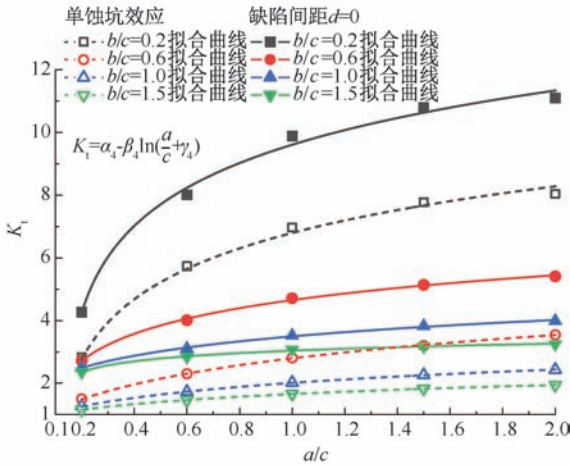
初始缺陷参数/mm	腐蚀缺陷参数	a/c	b/c	d/mm
固定为半径 0.1 mm 球状	$a/c、b/c$	0.2、0.6、1.0、1.5、2.0	0.2、0.6、1.0、1.5	0、0.15、0.25、0.35、0.45、0.55

当 $d=0$ 时,最大 K_I 如图 6 所示,图中, $\alpha_3、\beta_3、\gamma_3、\alpha_4、\beta_4、\gamma_4$ 分别为 $d=0$ 时应力集中因子经验公式的拟合系数。缺陷局部 K_I 变化趋势与单蚀坑效应一致,然而 K_I 值相比单蚀坑值明显提高。

1.03 倍,缺陷间相互作用效应显著。



(a) 周向宽度 b/c 的影响



(b) 深度 a/c 的影响

图 6 缺陷间距 $d=0$ 时外表面蚀坑形貌对最大 K_I 的影响

Fig. 6 Effect of external pit morphology on maximum K_I at defect spacing $d=0$

$d=0$ 时的 K_I 增长幅度如图 7 所示,随着外表面蚀坑深度的增加,增长率呈上升趋势,而随着蚀坑宽度的增加,增长率逐渐下降。深度 $a/c=0.2$ 浅蚀坑的增长率较低,而 $a/c>0.6、b/c<0.6$ 的深窄蚀坑增长率较大,深窄蚀坑处 K_I 最大达到单蚀坑效应的

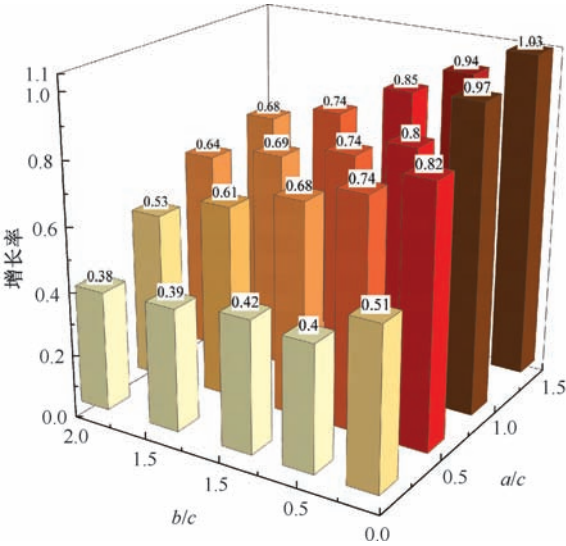


图 7 缺陷间距 $d=0$ 时蚀坑处最大 K_I 增长率

Fig. 7 Maximum K_I growth rate at corrosion pits with defect spacing $d=0$

最大 K_I 位置较单外表面腐蚀坑效应变化明显,缺陷间距 $d=0$ 时, K_I 分布如图 8 所示。

缺陷间相互作用使最大 K_I 位置由单蚀坑效应中蚀坑顶部处移动至初始缺陷处。在 $a/c>0.6、b/c<0.6$ 深且窄的外表面蚀坑形貌下,最大 K_I 出现在初始缺陷顶部边缘处,而随着外表面蚀坑形貌由深向浅、由窄向宽改变,最大 K_I 逐渐转移至初始缺陷底部位置。

缺陷相互作用下缺陷形貌对最大 K_I 的影响如图 9 所示,图中, $\alpha_5、\beta_5、\gamma_5$ 分别为缺陷相互作用下应力集中因子经验公式的拟合系数。 $d=[0.25,0.55]$ 时,最大 K_I 位于单蚀坑效应值与缺陷间距 $d=0$ 状态值之间, $b/c=0.2$ 时, K_I 与单蚀坑效应值相近;而当 $b/c=[0.6,1.5]$ 且 $d=[0.25,0.55]$ 时,随着腐蚀缺陷深度 a/c 的增加, K_I 由缺陷间距 $d=0$ 状态值逐渐趋近单蚀坑效应值。随着蚀坑间距 d 的增加, K_I 由缺陷间距 $d=0$ 状态值逐渐趋近单缺陷效应值。蚀坑深度一定,随蚀坑周向宽度增加, K_I 趋于缺陷间距 $d=0$ 值。当 $d=0.15\text{ mm}$ 且 $b/c=0.2$ 时, K_I 未

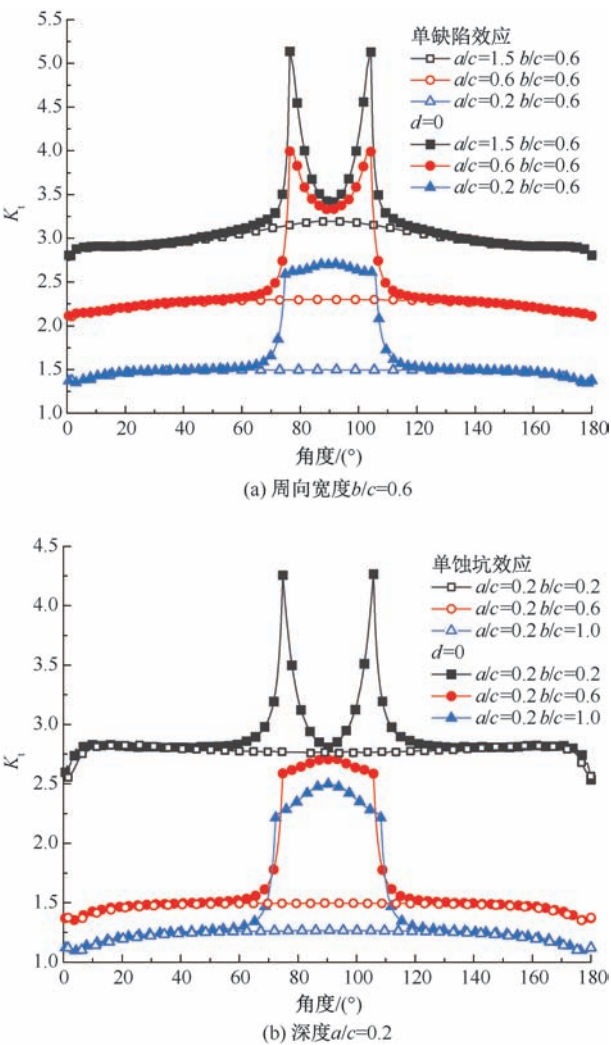


图 8 缺陷间距 $d=0$ 时最大 K_I 分布

Fig.8 Maximum K_I distribution at corrosion pits with defect spacing $d=0$

超过间距 $d=0$ 情形,但随着缺陷宽度的增大, K_I 值逐渐降低,至 $b/c=0.6$ 时出现随蚀坑深度先升高后降低的趋势,在蚀坑深度 $a/c=0.2、0.6$ 时,部分高于间距 $d=0$ 时 K_I 值。 $b/c>1$ 后 K_I 超出间距 $d=0$ 情形。

2.4 内压-轴向载荷对腐蚀坑局部应力集中的影响

热力管道在实际运行工况下,由于温度变化,管道会发生热膨胀或收缩,引起管道的轴向变形,从而产生轴向载荷。在内压-轴向载荷联合作用下,研究外表面蚀坑形貌对最大 K_I 及裂纹萌生寿命的影响。外表面蚀坑与载荷参数取值见表 4。

轴向载荷作用下管道外表面蚀坑形貌对最大 K_I 的影响如图 10 所示。内压-轴向拉载荷下, K_I 均呈增长趋势。轴向载荷值一定时,拉伸载荷对最大 K_I 的影响相比于轴向压缩载荷更强,以 $a/c=0.2、b/c=0.2$ 为例,对比不受轴向载荷情形,拉载荷为 80 MPa 条件下 K_I 增长 1.33 倍,而压载荷为 80 MPa 条件下 K_I 增长 0.73 倍。

蚀坑宽度一定时, K_I 随轴向拉载荷值及蚀坑深度的增大而增大,且蚀坑越深, K_I 受轴向载荷的影响越明显。以 $b/c=1.5$ 为例,对比不受轴向载荷情形,拉载荷为 80 MPa 条件下, K_I 由 $a/c=0.2$ 时增长 4.62 倍提升至 $a/c=2.0$ 时增长 6.15 倍。蚀坑深度一定时,蚀坑周向宽度越宽, K_I 受轴向载荷的影响越明显。以固定 $a/c=2.0$ 为例,对比不受轴向载荷情形,拉载荷为 80 MPa 条件下, K_I 由 $b/c=0.2$ 时增长 0.54 倍提升至 $b/c=1.5$ 时增长 6.15 倍。

轴向压载荷作用下,周向宽度 $b/c=0.2$ 时,深

表 4 外表面蚀坑与载荷参数取值

Table 4 Parameter values of external surface pits and loading conditions

内压/MPa	轴向载荷/MPa	外表面腐蚀坑参数/mm	$a/c(b/c)$
1	$\pm 20、\pm 50、\pm 80$ (+压载荷,-拉载荷)	$a/c、b/c$	0.2、0.6、1.0、1.5、2.0 (0.2、0.6、1.0、1.5)

窄蚀坑处 K_I 随轴向压载荷的增大呈现先下降后上升的趋势。 $a/c=0.6$ 时,最大降幅为 0.095 倍, $b/c\geq 0.6$ 时 K_I 降低趋势不大,而后上升趋势明显。蚀坑深度一定时,随着轴向压载荷增大,宽缺陷处 K_I 超过窄缺陷,宽缺陷处 K_I 受轴向载荷影响更显著。以固定 $b/c=1.5$ 为例,对比不受轴向载荷情形,压载荷为 80 MPa 条件下, K_I 由 $a/c=0.2$ 时增长 3.93 倍提升至 $a/c=2.0$ 时增长 5.61 倍;以固定 $a/c=2.0$ 为例,对比不受轴向载荷情形,压载荷为 80 MPa 条件下, K_I 由 $b/c=0.6$ 时增长 1.29 倍提升至 $b/c=$

1.5 时增长 5.61 倍。

3 土壤腐蚀作用下疲劳裂纹萌生寿命预测

采用蚀坑扩展速率模型^[20-21] 确定埋地钢材料表面蚀坑深度随时间变化的幂函数关系。

$$L_p = C(10 - pH)^n \rho^{-n} u^a \quad (2)$$

式中: L_p 为蚀坑深度,mm;pH 为土壤 pH 值; ρ 为土壤电阻率, $\Omega \cdot m$; u 为土壤环境下暴露时间,a; $C、$

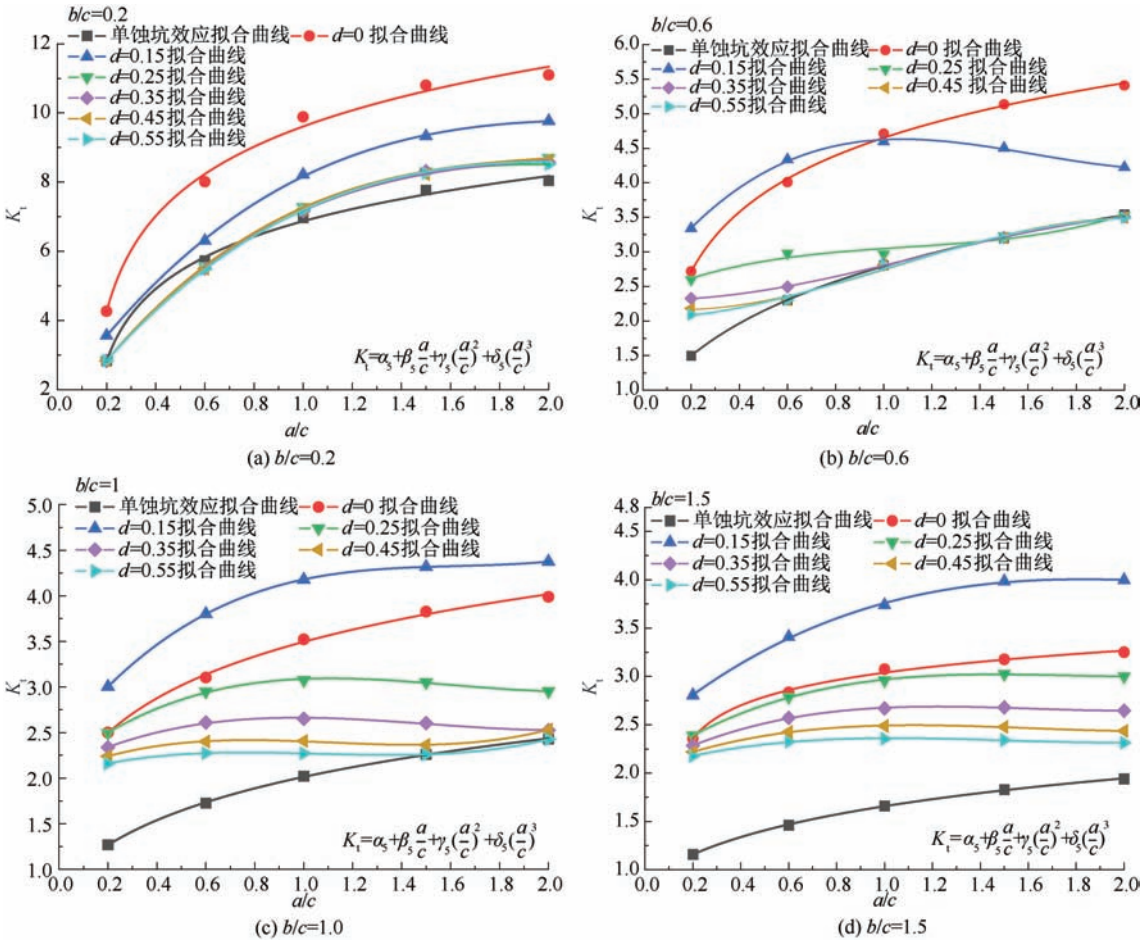


图9 缺陷相互作用下蚀坑形貌与缺陷间距对最大 K_I 的影响

Fig. 9 Influence of pit morphology and spacing on maximum K_I under defect interaction

n 为土壤透气度系数,取 $C=9.017, n=1/2$ 。

模型所需的土壤悬液参数取值范围,由 HWS version2.0 数据集^[22]以及北京市某运行管道状态确定。使用土壤悬液电导率的温度修正公式,将土壤悬液电导率修正至管道运行状态温度下^[23]:

$$E_{\theta} = E_{25} [1 + \delta(\theta - 25)] \quad (3)$$

式中: E_{θ} 为温度 θ 时的土壤电导率, S/m; δ 为修正系数,通常取 0.02; θ 为摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

采用蚀坑向裂纹转变的临界深度表达式^[24]。计算埋地热力管道外表面蚀坑到达临界深度的时间,作为土壤腐蚀下热力管道的疲劳裂纹萌生寿命。

$$L_c = \pi \left(\frac{\Delta K_{th}}{4.4 K_{I\sigma m}} \right) \quad (4)$$

式中 L_c 为临界蚀坑深度, mm。

3.1 土壤状态的影响

以北京市某实际管道运行状态为例,探讨土壤状态参数 θ 、pH 值、 ρ 对埋地热力管道腐蚀疲劳裂纹

萌生寿命的影响趋势。取每年供暖季 4 个月,非供暖季 8 个月计算,土壤参数见表 5。

表 5 土壤状态参数取值范围

Table 5 Range of soil condition parameters

$\theta/^{\circ}\text{C}$		pH 值	$\rho/(\Omega \cdot \text{cm})$	
供暖季	非供暖季	—	供暖季	非供暖季
θ_1	θ_2	pH	ρ_1	ρ_2
25~90		6.0~8.6	119.05~1 000.00	

土壤状态对裂纹萌生寿命的影响如图 11 所示。疲劳裂纹萌生寿命随外表面蚀坑周向宽度的增大而增大,随外表面蚀坑深度的增大而减小,对于深而窄的蚀坑,其裂纹萌生寿命极短。

$\theta_1=80^{\circ}\text{C}; \theta_2=25^{\circ}\text{C}, \rho_1=476.19 \Omega \cdot \text{cm}; \rho_2=1\,000 \Omega \cdot \text{cm}$, 裂纹萌生寿命在 pH 值 [6.0, 8.6] 区间内随 pH 值增大而增大。pH 值对浅宽蚀坑疲劳裂纹萌生寿命的影响更大。当 $\theta_1=80^{\circ}\text{C}; \rho_1=476.19 \Omega \cdot \text{cm}$; pH 值处于 8 以下时,裂纹萌生寿命均在 20 年以内。

$\theta_1=80^{\circ}\text{C}; \theta_2=25^{\circ}\text{C}, \text{pH}=7$, 裂纹萌生寿命在

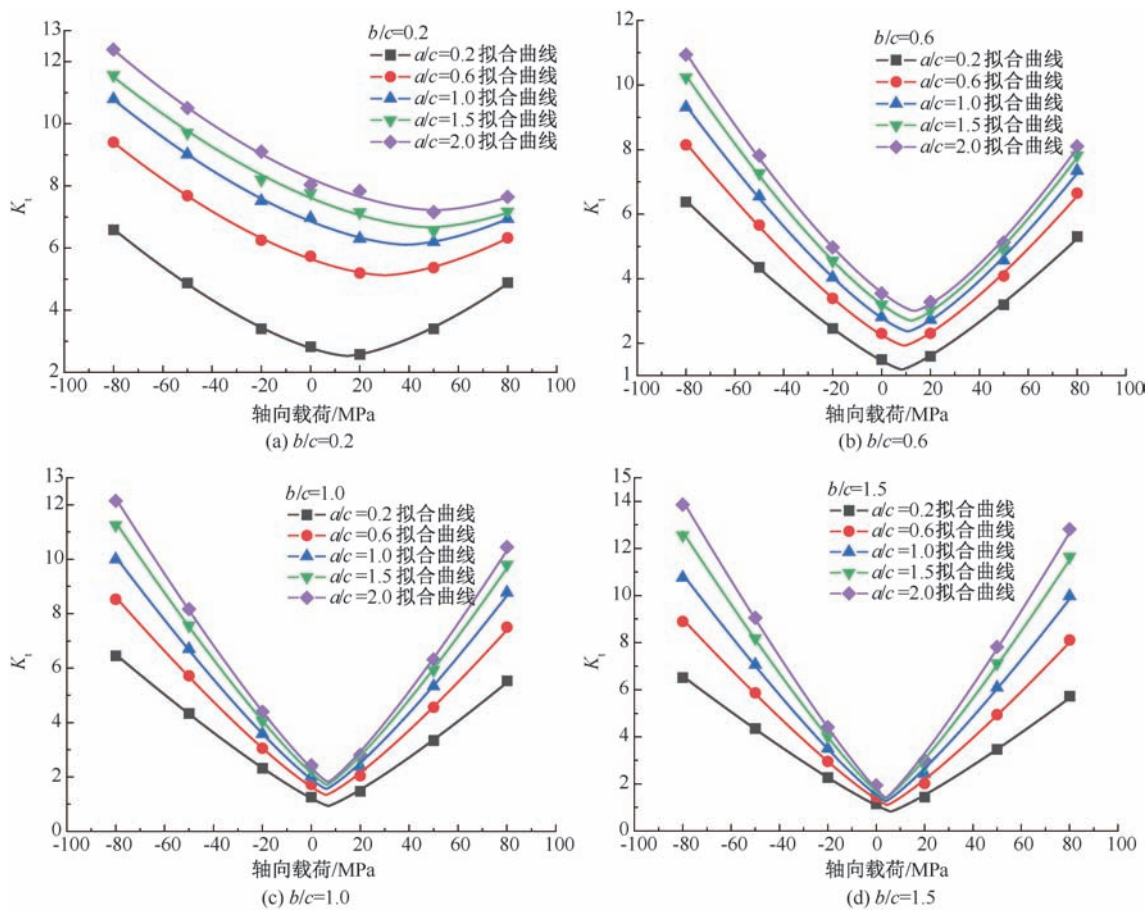


图 10 轴向载荷作用下的外表面蚀坑对最大 K_I 的影响

Fig. 10 Effect of external surface corrosion pits on maximum K_I under axial stress

$\rho_1 = [119.05, 476.19] \Omega \cdot \text{cm}$ 区间内随 ρ 的增大而增大,电阻率值对浅宽蚀坑萌生寿命的影响更大。在限制条件的电阻率所有取值下,裂纹萌生寿命均在 20 年以内。

土壤电阻率随温度的变化而发生改变,固定 $\text{pH}=7$ 的条件下,裂纹萌生寿命随环境温度的升高而降低,温度因素对腐蚀疲劳裂纹萌生寿命的影响较小,在 $\text{pH}=7$ 条件下, $\theta_1 = [70, 90]^\circ\text{C}$ 区间内时,裂纹萌生寿命均在 20 年以内。

在埋地热力管道的铺设过程中,应测量土壤透气度、 pH 值、电阻率和地下水位等参数,形成管网土壤环境数据库,避免在电阻率过低、 pH 值过低等不利土壤环境下敷设管道,管道外保温层在敷设时应密封完好。

3.2 腐蚀条件下多缺陷的相互作用效应

固定 $\theta_1 = 80^\circ\text{C}$; $\theta_2 = 25^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 7$, $\rho_1 = 476.19 \Omega \cdot \text{cm}$; $\rho_2 = 1\,000 \Omega \cdot \text{cm}$, 缺陷相互作用对裂纹萌生寿命的影响如图 12 所示,考虑缺陷相互作用效应后,裂纹萌生寿命相比仅考虑单蚀坑效应时

显著降低。

$d = 0.15$ 时,裂纹萌生寿命下降幅度最大。随着缺陷间距增大,相互作用效应减弱。对于深窄形貌的外表面蚀坑,裂纹萌生寿命极短,但缺陷间距的增大并不会引起裂纹萌生寿命的显著变化,与仅考虑单蚀坑时变化不大。例如: $a/c = 1.5$, $b/c = 0.2$, d 由 0.55 mm 减小至 0.15 mm , 裂纹萌生寿命由 0.49 年降至 0.43 年,降低 0.12 倍。而对于浅宽形貌的外表面蚀坑,缺陷间距减小将导致裂纹萌生寿命显著缩短,例如: $a/c = 0.2$, $b/c = 1.5$, d 由 0.55 mm 减小至 0.15 mm , 寿命由 3.46 年降至 2.08 年,降低 0.4 倍,且远低于单蚀坑效应寿命值 12.14 年,降低 0.83 倍。

缺陷间相互作用使得疲劳裂纹萌生寿命显著缩短,在管道的制造与敷设过程中,应尽可能避免管道中因原材料制造过程、焊接加工过程中引入初始缺陷,在运行过程中检测钢管缺陷时,在关注深窄形貌缺陷的同时,对于浅宽形貌的缺陷,应注意其与初始缺陷间的相互作用。

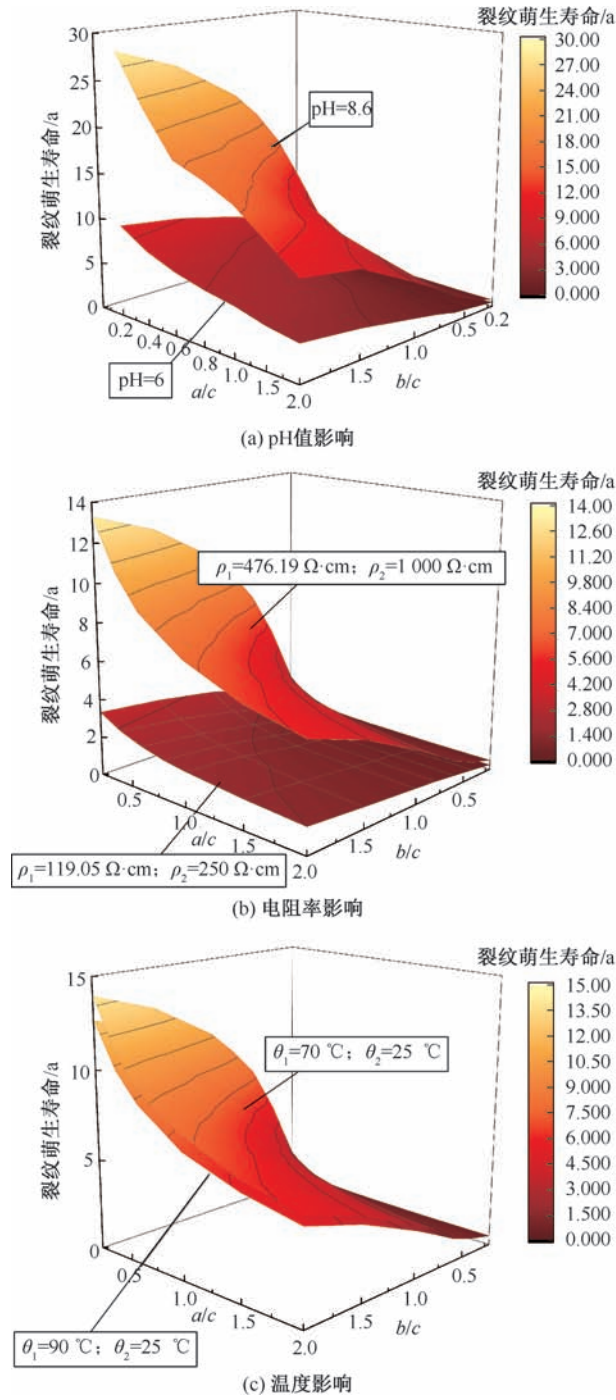


图 11 土壤参数对热力管道腐蚀疲劳裂纹萌生寿命的影响
Fig. 11 Effect of soil parameters on corrosion fatigue crack initiation life of thermal pipeline

3.3 腐蚀条件下轴向载荷作用的影响

固定 $\theta_1 = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\theta_2 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} = 7$, $\rho_1 = 476.19\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$; $\rho_2 = 1\text{ }000\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, 研究内压-轴向载荷联合作用对热力管道腐蚀疲劳裂纹萌生寿命的影响, 结果如图 13 所示。随着外表面蚀坑周向宽度的减小和深度的增加, 裂纹萌生寿命减小。轴向压载荷对裂纹萌生寿命的影响更显著。以固定 $a/c =$

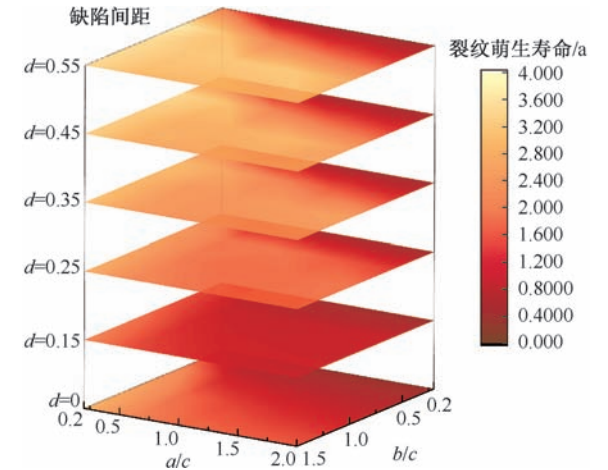


图 12 缺陷相互作用对管道疲劳裂纹萌生寿命的影响

Fig. 12 Effect of defect interaction on corrosion fatigue crack initiation life of thermal pipelines

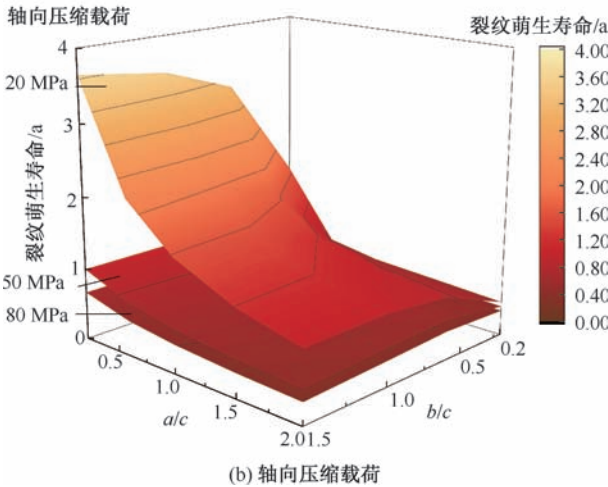
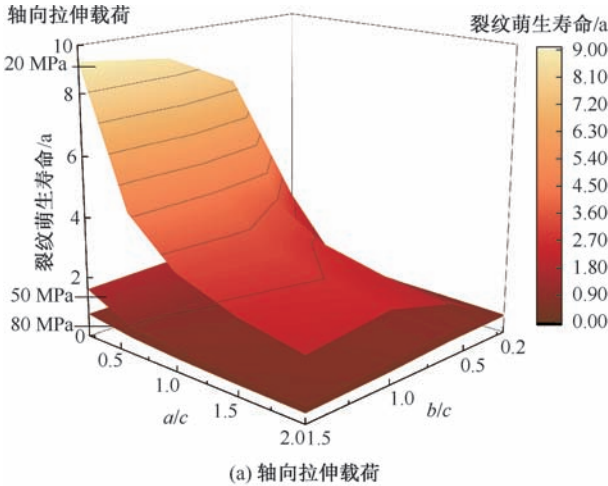


图 13 内压-轴向载荷联合作用对热力管道腐蚀疲劳裂纹萌生寿命的影响

Fig. 13 Effect of internal pressure and axial stress on corrosion fatigue crack initiation life of thermal pipelines

0.2, $b/c = 1.5$ 为例, 对比不受轴向载荷情形, 20 MPa 拉载荷下裂纹萌生寿命对比不受轴向载荷降低 0.35 倍; 而 20 MPa 压载荷下裂纹萌生寿命对比不受轴向载荷则降低 0.74 倍。然而当内压一定, 轴向载荷增大时, 拉载荷作用相比于压载荷所引起的裂纹萌生寿命降幅更大。以固定 $a/c = 0.2$, $b/c = 1.5$ 为例, 对比 20 MPa 拉载荷情形, 50 MPa 拉载荷作用下裂纹萌生寿命对比 20 MPa 下降 0.82 倍, 而 50 MPa 压载荷下裂纹萌生寿命对比 20 MPa 下降 0.73 倍。轴向载荷 ≥ 50 MPa 时, 裂纹萌生寿命变化幅度较小且寿命极短。实际运行中应避免复杂载荷作用, 优化膨胀节设计, 减少温度变化引起的轴向载荷波动, 防止裂纹萌生寿命缩短。

4 结 论

1) 外表面蚀坑深度增大 10 倍, K_t 提高 2.84 倍; 周向宽度减小 10 倍, K_t 提高 4.75 倍。 $a/c > 0.6$ 、

$b/c < 0.6$ 深窄缺陷易引起局部剧烈应力集中, 显著降低疲劳裂纹萌生寿命。

2) 缺陷间相互作用显著提高最大 K_t , 降低裂纹萌生寿命, 缺陷间距越小相互作用效应越强, 浅宽缺陷对缺陷相互作用更敏感。缺陷间距 $d = 0$ 时寿命降幅最大, 随 $d = [0.15, 0.55]$ mm 减小, 深窄缺陷裂纹萌生寿命降低 0.12 倍; 而浅宽缺陷裂纹萌生寿命显著缩短, 降低 0.4 倍, 较单缺陷效应降低 0.83 倍。

3) 低电阻率、低 pH 值及高温环境下的疲劳裂纹萌生寿命显著缩短, 浅宽蚀坑对土壤参数更敏感。

4) 与不受轴向载荷相比, 轴向压载荷对裂纹萌生寿命的影响更显著, 20 MPa 拉、压载荷作用下, 裂纹萌生寿命最大降低 0.35、0.74 倍。存在轴向载荷时, 拉载荷作用相比于压载荷所引起的裂纹萌生寿命降幅更大, 50 MPa 拉、压载荷作用对比 20 MPa 载荷下, 裂纹萌生寿命最大下降 0.82、0.73 倍。

参 考 文 献

- [1] 徐会会, 奥妮, 吴圣川, 等. 金属结构材料腐蚀疲劳寿命预测模型的研究进展[J]. 固体力学学报, 2023, 44(1): 1-33.
XU Huihui, AO Ni, WU Shengchuan, et al. Research progress on corrosion fatigue life prediction models of metal structural materials[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2023, 44(1): 1-33.
- [2] ZERBST U, MADIA M, KLINGER C, et al. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. III: cavities, dents, corrosion pits, scratches[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97: 759-776.
- [3] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 10-45.
- [4] WASIM M, DJUKIC M B. External corrosion of oil and gas pipelines: a review of failure mechanisms and predictive preventions[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 100: DOI:10.1016/j.ngse.2022.104467.
- [5] 尹志彪, 王莎莎, 祝振洪, 等. 北京地区土壤腐蚀性关键参量与 Q235 钢腐蚀速率预测模型研究[J]. 工程科学学报, 2023, 45(11): 1 939-1 947.
YIN Zhibiao, WANG Shasha, ZHU Zhenhong, et al. Key parameters of soil corrosivity and a model for predicting the corrosion rate of Q235 steel in Beijing[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(11): 1 939-1 947.
- [6] 李敬洋, 王震, 陈怡, 等. 基于 BP-GIS 的京津冀碳钢土壤腐蚀速率地图研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1 151-1 158.
LI Jingyang, WANG Zhen, CHEN Yi, et al. Beijing-Tianjin-Hebei carbon steel soil corrosion rate map based on BP-GIS[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(6): 1 151-1 158.
- [7] DRAGOVIC H, DAMACENO D S, MEYER O H H, et al. Water transport and corrosion under insulation: Experimental investigations of drying in mineral wool [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 190: 198-210.
- [8] 薛凯隆, 崔欣超, 祁云, 等. 基于 DBO-SVM 的采空区煤自燃危险性预测[J]. 沈阳理工大学学报, 2024, 43(6): 85-90.
XUE Kailong, CUI Xinchao, QI Yun, et al. Prediction of spontaneous combustion fire in goaf based on DBO-SVM[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2024, 43(6): 85-90.
- [9] 中国测绘学会地下管线专业委员会, 北京地下管线综合管理研究中心. 2023 年度全国地下管线事故统计分析报告[EB/OL]. [2025-05-01]. <https://wx.zsxq.com/group/28885411224811/topic/8855222258485222>.

- [10] 王晓明, 张浩楠, 邓华, 等. 点蚀效应下超强钢丝疲劳损伤演化及寿命预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(6): 2 523-2 534.
WANG Xiaoming, ZHANG Haonan, DENG Hua, et al. Fatigue damage evolution and life prediction of high strength steel wire under pitting effect[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(6): 2 523-2 534.
- [11] PENG Yi, XUE Song, YANG Tao, et al. Failure analysis of 316 L stainless steel bellows serving in steam tube[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 199: DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104718.
- [12] SONG Haipeng, SUN Lishun, ZHANG Hao, et al. Experimental investigation on damage evolution and failure mechanism of pre-corroded AA7075-T6 under multiaxial fatigue loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 271: DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108643.
- [13] HORNER D A, CONNOLLY B J, ZHOU Shengqi, et al. Novel images of the evolution of stress corrosion cracks from corrosion pits [J]. Corrosion Science, 2011, 53(11): 3 466-3 485.
- [14] ZHANG Jia, LIAN Zhanghua, ZHOU Zhaoming, et al. Safety and reliability assessment of external corrosion defects assessment of buried pipelines-soil interface: a mechanisms and FE study[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 82: DOI: 10.1016/j.jlp.2023.105006.
- [15] SO Y, LIM J, KANG S, et al. Derivation of corrosion depth formula according to corrosion factors in district heating water through regression analysis[J]. Materials, 2023, 16(8): 3 254-3 265.
- [16] 李修波, 余建星, 樊志远, 等. 工程结构蚀坑的腐蚀疲劳裂纹起始寿命预测[J]. 油气储运, 2019, 38(7): 751-757.
LI Xiubo, YU Jianxing, FAN Zhiyuan, et al. Prediction of corrosion fatigue crack initiation life of pits in engineering structures[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(7): 751-757.
- [17] 西田正孝. 应力集中[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 106-111.
- [18] WU Jiebin, XU Shanhua, LI Anbang, et al. Prediction model of fatigue crack propagation life of corroded steel plate considering pit characteristics [J]. International Journal of Fatigue, 2025, 190: DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108591.
- [19] NB/T 47013.2—2015, 承压设备无损检测 第二部分: 射线检测[S].
NB/T 47013.2—2015, Nondestructive testing of pressure equipments-Part2: radiographic testing[S].
- [20] KONDO Y. Prediction of fatigue crack initiation life based on pit growth [J]. Corrosion, 1989, 45 (1): 7-11.
- [21] ROSSUM J R. Prediction of pitting rates in ferrous metals from soil parameters [J]. Journal of American Water Works Association, 1969, 61(6): 305-310.
- [22] Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Institute for Applied Systems Analysis. Harmonized world soil database version 2.0[EB/OL]. [2025-05-01]. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/>.
- [23] MA Ruijun, MCBRATNEY A, WHELAN B, et al. Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement[J]. Precision Agriculture, 2011, 12: 55-66.
- [24] LI Shuxin, AKID R. Corrosion fatigue life prediction of a steel shaft material in seawater [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 34: 324-334.



作者简介: 马舒琪 (1985—),女,河北保定人,博士,副教授,主要从事风险评估、风险预测与决策、城市运行安全等方面的研究。E-mail:shuqi_10@163.com。