

# 双腐蚀缺陷油气管道剩余强度分析

王战辉<sup>1,2</sup>,马向荣<sup>1,2</sup>,高勇<sup>1,2</sup>,范月月<sup>1</sup>

(1. 榆林学院 化学与化工学院,陕西 榆林 719000; 2. 陕西省低变质煤洁净利用重点实验室,陕西 榆林 719000)

**摘要:**以 X60 双腐蚀缺陷油气管道为研究对象,借助 ANSYS 软件,分析双腐蚀缺陷半径和缺陷深度对其等效应力和剩余强度的影响。结果表明:随着轴向位置的增加,双腐蚀缺陷管道等效应力在屈服极限与抗拉极限之间变化;随着缺陷半径的增大,剩余强度呈增加的趋势,安全性增强;随着缺陷深度的增大,剩余强度呈减小的趋势,安全性降低。所得结论对于油气管道的腐蚀安全评价有一定的参考意义。

**关键词:**双腐蚀;油气管道;剩余强度

**中图分类号:**TQ028.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)01-0030-03

## Residual Strength Analysis of Oil and Gas Pipelines with Double Corrosion Defects

WANG Zhanhui<sup>1,2</sup>, MA Xiangrong<sup>1,2</sup>, GAO Yong<sup>1,2</sup>, FAN Yueyue<sup>1</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China;

2. Key Laboratory of Low Metamorphic Coal Clean Utilization, Yulin 719000, China)

**Abstract:** With the aid of ANSYS software, the effects of the radius and depth of double corrosion defects on the equivalent stress and residual strength of X60 double corrosion defects oil and gas pipeline were investigated. The results show that with the increase of the axial position, the equivalent stress of the pipeline with double corrosion defects changes between the yield limit and the tensile limit; with the increase of the defect radius, the residual strength increases and the safety increases too; with the increase of the defect depth, the residual strength decreases and the safety decreases too. The conclusions are of some reference significance for the safety assessment of the oil and gas pipelines.

**Keywords:** double corrosion; oil and gas pipelines; residual strength

## 0 引言

随着现代经济和科学技术的快速发展,过程工业和运输业也随之蓬勃兴起,石油、天然气这些与生活息息相关的资源变得越来越不可或缺。油气行业已经逐渐成为各个国家国民经济发展的主要支柱产业之一,在社会和经济的发展中起着举足轻重的作用。由于我国每年的石油进口量大,国内现有的天然气分布不均匀,跨地域运输困难,因此,每年需要用大量的油气管道来输送,而且输送介质大多是高腐蚀性的。由于我国管材的生产中防腐技术和施工质量不够先进,管道腐蚀失效所占比例要远高于发达国家<sup>[1]</sup>。油气集输管线由于自身所处的服役环境,会出现很多腐蚀缺陷,如果任由腐蚀缺陷发展,会使管道壁厚减薄,强度下降,对管道的承压能力和运输能力造成恶劣的影响,更严重的是会使管道破裂发生泄漏,造成爆炸等事故<sup>[2]</sup>。在所有油气管道失效的事故中,腐蚀导致事故约占 40%,管道的外部腐蚀缺陷所导致的失效就高达 15.3%;内部腐蚀缺陷导致的失效也占 12.8%。由于以上种种原因加上管线材料的一些因素将可能引起管线的应力集中,导致其缺陷腐蚀更加严重。因管线材料不可避免

有一定的内部缺陷,必须尽最大的努力去保证有重大缺陷的管线能被及时更换,小的缺陷管线和没有缺陷的管线尽可能地保护,以防止发生事故<sup>[3]</sup>。

无论在国内还是国外,腐蚀是管道缺陷失效的重要原因,并且管道检测的难度较大,因此针对管道腐蚀缺陷剩余强度的评价意义重大<sup>[4]</sup>。怎样及时发现这些缺陷,并在发现缺陷后估计缺陷的发展程度,判断管道是否还可以继续服役,避免不必要的经济损失,这就是腐蚀剩余强度所必须解决的问题<sup>[5]</sup>。国内外对于腐蚀管道剩余强度和剩余寿命开展了大量研究工作,但是大多集中于单点腐蚀缺陷,通过改变服役环境或者缺陷形状等分析其对管道承压能力的影响。因单点腐蚀结构简单,实际意义不大,不具有代表性,实际生产中大多是两个或者两个以上腐蚀缺陷组成的结构,而且许多对双点腐蚀的研究结果偏保守<sup>[6-11]</sup>。本文以 X60 双腐蚀缺陷油气管道为研究对象,借助 ANSYS 软件,得到双腐蚀缺陷管道等效应力分布云图,并分析了缺陷半径和缺陷深度对其等效应力和剩余强度的影响,所得结论对于油气管道的腐蚀安全评价有一定的参考意义。

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51762042);陕西省教育厅专项科学研究计划项目(17JK0901)

**第一作者简介:**王战辉(1985—),男,河南漯河人,讲师,硕士,主要从事化工设备腐蚀与防护的研究工作。

## 1 有限元建模

### 1.1 几何特征和物理性能参数

X60 双腐蚀缺陷油气管道物理性能参数为:屈服强度  $\sigma_s$  为 450 MPa, 抗拉强度  $\sigma_b$  为 550 MPa, 弹性模量  $E$  为 206 GPa, 泊松比取 0.3。几何尺寸参数: 双腐蚀缺陷油气管道内径为 500 mm, 管道壁厚  $t$  为 15 mm, 筒体长度  $L$  为 2 000 mm, 腐蚀缺陷均为圆柱平底, 缺陷间距  $l_d$  为  $l_s, l_s = (Dt)^{\frac{1}{2}}$ 。式中:  $D$  为外径,  $t$  为壁厚, 单位均为 mm<sup>[12]</sup>。利用双腐蚀缺陷管道几何特征的对称性和所受载荷的轴对称性, 可采用双腐蚀管道的一半来建模, 所建几何模型如图 1 所示。

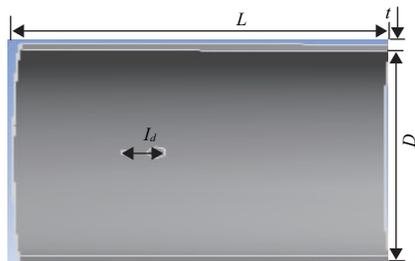


图 1 双腐蚀缺陷管道几何模型图

### 1.2 施加约束和载荷

外压、地震载荷、风载荷等载荷, 相对于内压载荷, 影响效果可以忽略不计, 因此, 只考虑内压载荷  $p$ <sup>[13]</sup>。在几何模型对称面施加对称位移约束, 在管道两端面约束其轴向位移, 管道内表面施加内压载荷  $p$ ,  $p$  取 13 MPa。

### 1.3 强度失效判断准则

利用基于塑形失效的强度判断准则, 即当腐蚀区域最大等效应力超过材料的抗拉强度  $\sigma_b$  时, 发生强度破坏, 此时的内压载荷称为剩余强度<sup>[14]</sup>。双腐蚀缺陷管道等效应力表达式为:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

式中:  $\sigma_s$  为等效应力, 单位为 MPa;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  分别为沿  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴方向上的应力, 单位为 MPa。

## 2 双腐蚀缺陷管道等效应力和剩余强度的分析

### 2.1 等效应力分布云图

双腐蚀缺陷管道等效应力分布云图如图 2 所示。由图 2 可以看出, 管道等效应力可以分为两个区域, 靠近腐蚀缺陷区域, 等效应力最大, 最容易发生强度失效。这是由几何形状不连续现象引起的不连续应力现象, 当最大等效应力超过材料的抗拉强度时, 此时的内压称为剩余强度; 远离腐蚀缺陷区域, 不连续应力迅速衰减, 应力分布均匀, 此时的等效应力

为内压引起的薄膜应力, 沿壁厚均匀分布。

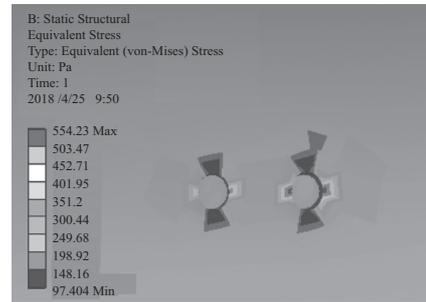


图 2 双腐蚀缺陷管道等效应力分布云图

### 2.2 双腐蚀缺陷半径的影响

双腐蚀缺陷管道缺陷深度  $d_1$ 、缺陷深度  $d_2$  为  $0.7t$ , 缺陷半径  $R_1$  为 12 mm 保持定值, 缺陷半径  $R_2$  分别取 3 mm、5 mm、7 mm, 在不同轴向位置的条件, 改变缺陷间距  $l_d$ , 其轴向位置对双腐蚀缺陷管道最大等效应力的影响如图 3-图 5 所示。由图可知, 随着轴向位置的增加, 双腐蚀缺陷管道最大等效应力保持稳定状态, 在屈服极限与抗拉极限之间变化; 当缺陷间距  $l_d$  逐渐变大时, 双腐蚀缺陷等效应力的变化逐渐减弱, 最后大都在屈服强度左右变化, 在缺陷间距  $l_d$  为  $0.3l_s$  时等效应力的变化最明显; 当缺陷间距  $l_d$  变小时, 对管壁较远的外层节点等效应力的影响可以忽略不计。双腐蚀缺陷管道缺陷间的相互作用影响与双腐蚀缺陷间距  $l_d$  有关, 当双腐蚀缺陷管道缺陷间距  $l_d$  逐渐增加时, 双点腐蚀管道缺陷之间的相互影响逐渐减弱, 当缺陷间距  $l_d > l_s$  时, 轴向腐蚀管道缺陷的相互作用越来越小; 随着腐蚀缺陷半径的增大, 两点腐蚀缺陷的相互影响的轴向临界间距有渐渐增加的趋势, 但双腐蚀管道缺陷相互影响范围大都不超过  $l_s$ 。

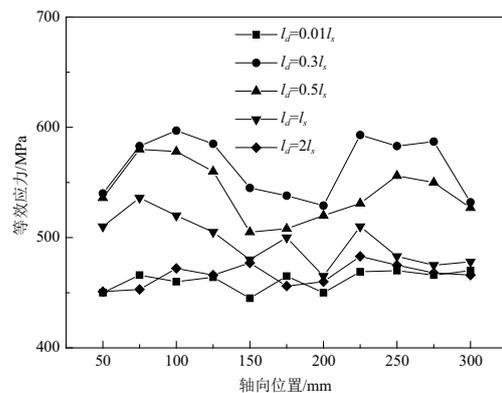


图 3  $R_1=12$  mm,  $R_2=3$  mm 轴向位置对等效应力的影响

双腐蚀缺陷管道缺陷深度  $d_1$ 、缺陷深度  $d_2$  为  $0.7t$ , 缺陷半径  $R_1$  为 12 mm 保持定值, 缺陷半径  $R_2$  分别取 3 mm、5 mm、7 mm, 改变缺陷间距  $l_d$  后, 其缺陷间距  $l_d$  对双腐蚀缺陷管道剩余强度的影响如图 6 所示。由图 6 可知, 在缺陷深度和缺陷半径为定值时, 随着缺陷间距  $l_d$  的增加, 剩余强度呈增加的趋势, 剩余强度与缺陷间距大致呈对数关系; 在缺陷深度、缺陷半径  $R_1$ 、缺陷间距  $l_d$  为定值时, 随着

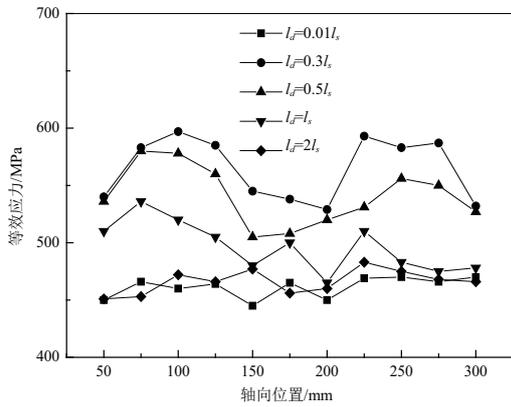


图4  $R_1=12\text{ mm}, R_2=5\text{ mm}$  轴向位置对等效应力的影响

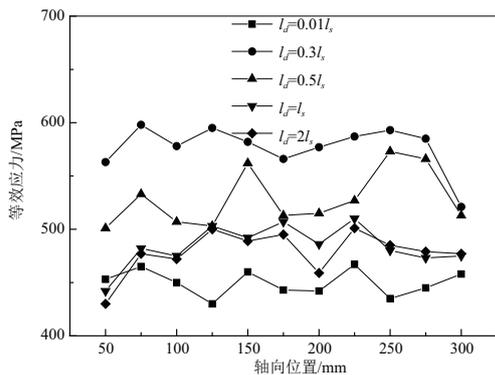


图5  $R_1=12\text{ mm}, R_2=7\text{ mm}$  轴向位置对等效应力的影响

缺陷半径  $R_2$  的增大, 剩余强度呈增加的趋势, 发生强度失效时内压较大, 安全性增强。

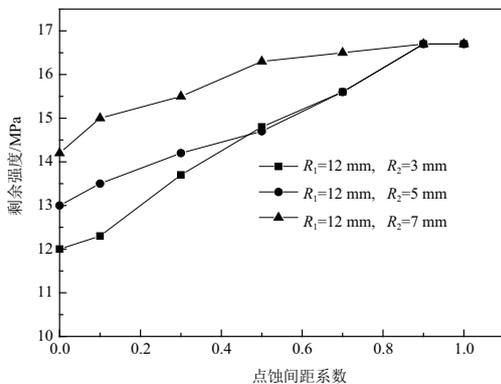


图6 轴向间距对剩余强度的影响

### 2.3 双腐蚀缺陷深度的影响

双腐蚀缺陷管道缺陷半径  $R_1$ 、缺陷半径  $R_2$  为 7 mm, 缺陷深度  $d_2$  为  $0.7t$  保持定值, 缺陷深度  $d_1$  分别取  $0.3t$ 、 $0.5t$ , 在不同轴向位置的条件下, 改变缺陷间距  $l_d$  后, 其轴向位置对双腐蚀缺陷管道最大等效应力的影响如图 7-图 8 所示。由图可知, 当缺陷间距  $l_d$  为定值时, 随着轴向位置的增加, 腐蚀缺陷管道最大等效应力保持稳定状态, 双腐蚀缺陷管道等效应力在屈服极限与抗拉极限之间变化;

当轴向位置为定值时, 缺陷间距  $l_d$  出现临界值  $0.5l_s$ , 当小于临界值  $0.5l_s$  时, 等效应力随缺陷间距  $l_d$  的增大而减小, 双腐蚀之间相互作用减小, 剩余强度增大, 安全性得到保障, 剩余强度增加; 当大于临界值时, 等效应力随缺陷间距  $l_d$  的增大基本维持不变, 双腐蚀之间基本没有相互作用, 剩余强度维持不变。

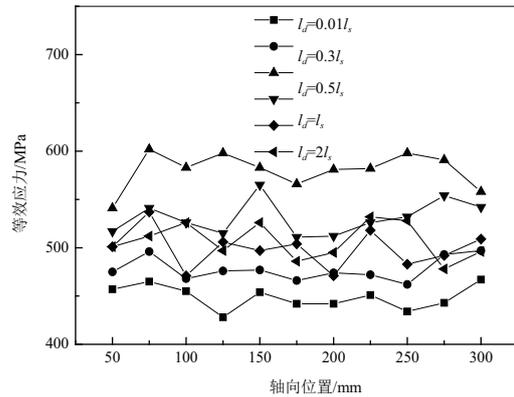


图7  $d_1=0.3t, d_2=0.7t$  轴向位置对等效应力的影响

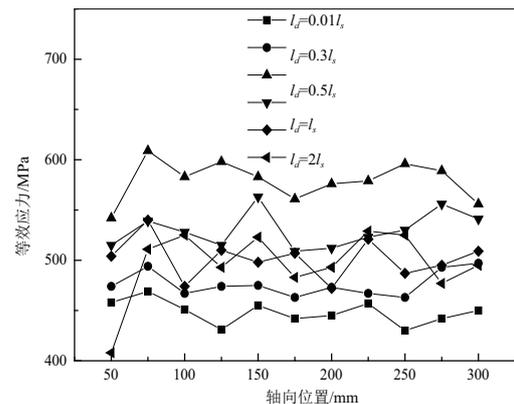


图8  $d_1=0.5t, d_2=0.7t$  轴向位置对等效应力的影响

双腐蚀缺陷管道缺陷半径  $R_1$ 、缺陷半径  $R_2$  为 7 mm, 缺陷深度  $d_2$  为  $0.7t$  保持定值, 缺陷深度  $d_1$  分别取  $0.3t$ 、 $0.5t$ , 通过改变缺陷间距  $l_d$ , 缺陷间距  $l_d$  对双腐蚀缺陷管道剩余强度的影响如图 9 所示。由图 9 可知, 在缺陷深度

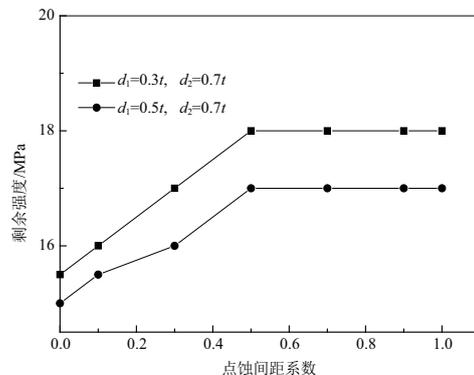


图9 缺陷深度对剩余强度的影响

(下转第 43 页)

1 000 r/min 的低转速钻削时,孔径差值的原因主要是 CFRP 的回弹导致“缩孔”现象;当使用 5 000 r/min 的高转速钻削时,孔径差值的原因主要是钻削振动增大,同时钻削温度升高,钻削铝合金时出现积屑瘤,导致铝合金层孔径偏大;当使用 3 000 r/min 的折中转速钻削时,孔径差值有所降低,但铝合金层仍有钻削振动现象。

2) 变参数钻削 CFRP/铝合金叠层时,由于阶跃变参数钻头停留在孔内部进行参数变化,导致阶跃变参数的 CFRP 孔径比退让变参数的大,从而缩小了铝合金与 CFRP 的孔径差值。

3) 不同的变参数位置,孔径差值有所不同。当钻尖处于叠层界面中间时,因为钻削工况较差,这个位置下孔径差值较大;当钻尖刚接触下层铝合金或钻尖完全钻入下层铝合金后进行变参数时,孔径差值并没有明显区别。所有的变参数方案中孔径差值最大值为 0.008 8 mm,这一数值仅略大于定参数钻削中最小的孔径差值 0.007 4 mm。

3) 采用阶跃变参数方式,当钻尖完全钻入下层铝合金时进行参数变化的情况下,铝合金与 CFRP 孔径差值最小,为 0.004 5 mm,比定参数钻削中的最小孔径差值缩小了 39.2%,证明变参数钻削可以有效降低 CFRP/铝合金叠层钻削不同材料层的孔径差值,提高孔径精度。

#### 参考文献:

[1] 江东. 趣谈百年飞机材料之变迁 [J]. 大飞机, 2013(6): 97-

99.

- [2] 康仁科,杨国林,董志刚,等. 飞机装配中的先进制孔技术与装备 [J]. 航空制造技术, 2016(10): 16-24.
- [3] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册 第 3 卷 铝合金 镁合金 [M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [4] ZHANG Xuesong, CHEN Yougjun, HU Junling. Recent advances in the development of aerospace materials [J]. Composite Structures, 2018, 97:22-34.
- [5] ZITOUNE R, KRISHNARAJ V, COLLOMBET F, et al. Experimental and numerical analysis on drilling of carbon fibre reinforced plastic and aluminium stacks [J]. Composite Structures, 2016, 146:148-158.
- [6] ZITOUNE R K, VIJAYANCOLLOMBET, FRANCIS. Study of drilling of composite material and aluminium stack [J]. Composite Structures, 2010, 92:1246-1255.
- [7] D'orazio A, El Mehtedi M, FORCELESE A, et al. Tool wear and hole quality in drilling of CFRP/AA7075 stacks with DLC and nanocomposite TiAlN coated tools [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 30:582-592.
- [8] 栾皓童,王奔,徐勇增,等. CFRP/钛合金叠层构件制孔孔径分布规律研究 [J]. 工具技术, 2017, 51(2): 46-49.

收稿日期:2018-11-23

#### (上接第 32 页)

和缺陷半径为定值时,随着缺陷间距  $l_d$  的增加,剩余强度先增加后不变,出现临界值  $0.5l_s$ ;当缺陷间距  $l_d$  小于临界值  $0.5l_s$  时,缺陷间距对剩余强度影响较大,剩余强度与缺陷间距大致呈线性关系;当缺陷间距  $l_d$  大于临界值  $0.5l_s$  时,剩余强度保持不变,缺陷间距对剩余强度影响可以忽略不计;在缺陷半径  $R_1$ 、缺陷半径  $R_2$ 、缺陷深度  $d_2$ 、缺陷间距  $l_d$  为定值时,随着缺陷深度  $d_1$  的增大,剩余强度呈减小的趋势,发生强度破坏时内压较小,安全性降低。

### 3 结语

1) 靠近腐蚀缺陷区域,等效应力最大,最容易发生强度失效;远离腐蚀缺陷区域,不连续应力迅速衰减至薄膜应力。

2) 随着轴向位置的增加,双腐蚀缺陷管道等效应力在屈服极限与抗拉极限之间变化。

3) 在缺陷深度和缺陷半径为定值时,随着缺陷间距  $l_d$  的增加,剩余强度呈增加的趋势,大致呈对数关系;在缺陷深度、缺陷半径  $R_1$ 、缺陷间距  $l_d$  为定值时,随着缺陷半径  $R_2$  的增大,剩余强度呈增加的趋势,安全性增强。

4) 在缺陷深度和缺陷半径为定值时,随着缺陷间距  $l_d$  的增加,剩余强度先增加后不变,出现临界值  $0.5l_s$ ;在缺陷半径  $R_1$ 、缺陷半径  $R_2$ 、缺陷深度  $d_2$ 、缺陷间距  $l_d$  为定值时,随着缺陷深度  $d_1$  的增大,剩余强度呈减小的趋势,安全性降低。

#### 参考文献:

[1] 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, 44(7): 109-115.

- [2] 宋艾玲,梁光川,王文耀. 世界油气管道现状与发展趋势 [J]. 油气储运, 2006, 30(10): 63-62.
- [3] 李影,李国义,马文鑫. 我国油气管道建设现状及发展趋势 [J]. 中国西部科技, 2009, 22(14): 6-8.
- [4] 李睿. 输气管道内腐蚀缺陷剩余强度评估方法适应性分析与应用 [J]. 工业安全与环保, 2018, 44(8): 1-4.
- [5] 周红明,周闻青,茅振华,等. 海底油气管道剩余强度参数化建模方法研究 [J]. 机械强度, 2018, 40(2): 444-448.
- [6] 黄坤,吴佳丽,全恺,等. 含腐蚀缺陷油气管道评价技术研究进展 [J]. 表面技术, 2018, 47(1): 116-122.
- [7] 王莉莉,张寒,齐哈兵,等. 高温下含椭圆型缺陷管道局部应力分析 [J]. 石油化工高等学校学报, 2018, 31(1): 95-100.
- [8] 李增亮,陈猛. 外腐蚀管道剩余强度及剩余寿命的有限元分析 [J]. 润滑与密封, 2010, 35(10): 86-89.
- [9] 范晓勇,胡军,张晓峰,等. 不同钢级含腐蚀缺陷管道的剩余强度评价比较 [J]. 化工设备与管道, 2016, 53(5): 73-76.
- [10] 赵纪禹,王笑楠,李璐. 含双体积型腐蚀缺陷管道的有限元应力分析 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2017, 34(4): 37-40.
- [11] 曹学文,赵联祁,崔铭伟,等. 相互影响双腐蚀缺陷管道的剩余强度 [J]. 油气储运, 2015, 34(4): 354-355.
- [12] 崔铭伟,封子艳,韩建红,等. 不同尺寸双点蚀缺陷管道剩余强度分析 [J]. 石油矿场机械, 2015, 44(2): 14-21.
- [13] 张兆贵,崔铭伟. 双点蚀缺陷管道剩余强度计算方法 [J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(8): 759-765.
- [14] 崔铭伟,封子艳,由洋,等. 双点蚀缺陷管道剩余强度分析 [J]. 化工机械, 2016, 43(3): 365-372.

收稿日期:2018-11-12