

油气管道内外壁腐蚀缺陷干涉作用影响因素研究

黄坤, 杨磊, 李安然

(西南石油大学 石油与天然气工程学院, 成都 610500)

摘要: **目的** 研究油气管道内外壁腐蚀缺陷干涉作用机理及影响因素, 为管道安全运行提供依据和保障。**方法** 采用 ABAQUS 有限元分析软件, 结合二倍弹性斜率法和控制变量法, 改变内外壁腐蚀缺陷尺寸 (相对深度、相对长度、相对宽度) 和缺陷轴向表面间距, 求解含内外腐蚀缺陷管道极限载荷, 以极限载荷的变化为依据, 通过 5% 极限影响判定标准, 求得内外腐蚀缺陷干涉作用极限影响距离, 同时利用 MATLAB 软件建立管道内外腐蚀缺陷-干涉极限影响距离函数关系, 拟合得到公式。**结果** 当外缺陷深度 a_1/t 、内缺陷深度 a_2/t 在 0.1~0.3 变化时, 双缺陷干涉极限距离从 46 mm 增大到 193 mm, 且变化速率越来越大; 当外缺陷长度 b_1/\sqrt{Rt} 、内缺陷长度 b_2/\sqrt{Rt} 在 0.5~2.5 变化时, 双缺陷干涉极限距离从 71 mm 增大到 219 mm, 但变化速率越来越小。随着内外缺陷宽度 c_1 、 c_2 的增大, 管道极限载荷几乎不减小, 双缺陷干涉极限影响距离基本不变。构建的四元三次多项式拟合公式 $R^2=0.9898$ 、 $SSE=0.5361$ 、 $RMSE=7.3219$, 离散性低, 精度较高。**结论** 缺陷深度是影响干涉极限距离的最主要因素, 缺陷长度次之, 缺陷宽度基本不影响。**关键词:** 油气管道; 内外壁腐蚀缺陷; 干涉作用; 极限承载能力; ABAQUS; 二倍弹性斜率法
中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)03-0199-06
DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.025

Influencing Factors of Interference between Corrosion Defects in the Inner and Outer Wall of Oil & Gas Transportation Pipelines

HUANG Kun, YANG Lei, LI An-ran

(College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

ABSTRACT: In this paper, the interference mechanism and influencing factors of corrosion defects in oil and gas pipelines were studied to provide guarantee for the safety of pipelines. By using ABAQUS and the double elastic slope method and the control variable method, the ultimate load of the pipelines with internal and external corrosion defects were solved when the sizes of internal and external corrosion defects (relative depth, relative length, relative width) and the axial distance of the defect are changed. The influence criterion was determined by the limit of 5% interference effect, and the limit influence distance of internal and external corrosion defects were obtained. At the same time, MATLAB was used to establish the relationship between the corrosion defects with the interference effect limit distance. Also, the formula was obtained by fitting. The constructed quaternary cubic polynomial fitting formula $R^2=0.9898$, $SSE=0.5361$, $RMSE=7.3219$, showing low dispersion and high precision.

收稿日期: 2019-07-08; 修订日期: 2019-08-26

Received: 2019-07-08; Revised: 2019-08-26

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (2016YFC0802105)

Fund: Supported by National Key R&D Program of China (2016YFC0802105)

作者简介: 黄坤 (1965—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为油气储运工程。邮箱: 244003279@qq.com

Biography: HUANG Kun (1965—), Male, Master, Professor, Research focus: oil & gas storage and transportation engineering. E-mail: 244003279@qq.com

引文格式: 黄坤, 杨磊, 李安然. 油气管道内外壁腐蚀缺陷干涉作用影响因素研究[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 199-204.

HUANG Kun, YANG Lei, LI An-ran. Influencing factors of interference between corrosion defects in the inner and outer wall of oil & gas transportation pipelines[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 199-204.

The results show that: With the increase of depths of internal and external defects a_1/t and a_2/t from 0.1 to 0.3, the influence distance of the interference increases significantly from 46 mm to 193 mm, and the rate of change becomes larger and larger. With the increase of the lengths of internal and external defects b_1/\sqrt{Rt} and b_2/\sqrt{Rt} from 0.5 to 2.5, the influence distance of the interference increases continuously from 71 mm to 219 mm, but the rate of change becomes smaller and smaller. With the increase of the internal and external defect widths c_1 and c_2 , the influence distance of the interference is unchanged. Defect depth is the most important factor affecting the interference distance, the defect length is second, and the defect width is not affected.

KEY WORDS: oil & gas pipeline; internal and external wall corrosion defects; interference; ultimate load bearing; ABAQUS; double elastic slope method

近年来,国内天然气管道建设蓬勃发展。预计2020年我国将拥有 1.04×10^5 km 的天然长输管道,2025 年达到 1.63×10^5 km,2030 年将超过 2×10^5 km^[1-3]。长输天然气管道长时间服役后,由于内部输送介质、外部复杂环境和人为因素的综合影响,不可避免会产生一些内外壁相邻腐蚀缺陷。实际上,相邻腐蚀缺陷在一定条件下会发生相互作用(即干涉),进一步降低管道承载能力。

DNV-RP-F101^[4]作为常用的评价标准,提出了对相邻腐蚀缺陷进行投影处理的思路。Y. F. Chen 等^[5-6]考虑群腐蚀缺陷(环向、轴向分布)交互作用,对高钢级管道的失效压力和失效形态进行了研究。A C Benjamin 等^[7-10]基于二级评价方法和管道爆破试验对管道失效行为和形态进行分析。S. S. Al-Owaisi 等^[11-14]发现两种形状(椭圆形和矩形)的相邻缺陷在轴向距离不大于3倍壁厚或周向距离不大于0.5倍壁厚时,均会产生相互作用。X. Li^[15]基于有限元方法提出一种相邻腐蚀间干涉作用评价方法,其具有更好的精确性和适用性,特别适用于轴向长腐蚀缺陷。

综上所述,目前研究集中在缺陷干涉作用对管道极限承载能力的影响方面,对相邻腐蚀缺陷尺寸影响干涉的机理以及影响程度大小的关注较少。本文中,笔者基于中缅天然气管道工程实际,采用 ABAQUS

有限元软件和二倍弹性斜率法求得含内外双腐蚀缺陷管道的极限载荷,通过极限载荷的变化,依据5%判定准则得出不同缺陷尺寸下极限影响距离,并在此基础上分析影响干涉大小的主要及次要因素,为管道安全运行提供保障。

1 有限元模型的建立和验证

1.1 几何模型及参数

本文实例为中缅天然气管道工程澜沧江穿越段,采用 X80 级全尺寸 D1016×18.4 钢管模型。根据圣维南定理^[16]:

$$\Delta L \geq 2.5\sqrt{Rt} = 2.5 \times \sqrt{\frac{1016}{2} \times 18.4} = 241.7 \text{ mm} \quad (1)$$

式中: ΔL 为受端部效应影响的管段长度, mm; R 为管道外半径, mm; t 为管道壁厚, mm。

设置管道几何模型长度为 4 m,缺陷位于管段中部,缺陷两端管道长度远大于 ΔL ,排除端部效应影响,模型相关参数^[17]见表1。工程中腐蚀缺陷无论是矩形、球形、椭球形还是棱形,均为局部减薄体积型缺陷。故本文研究对象为最具代表性的矩形腐蚀缺陷,建模时采用旋转切削的方式形成腐蚀凹坑,几何模型如图1所示。

表 1 管段几何模型参数
Tab.1 Geometric model parameters of pipeline

Material	Yield strength/ MPa	Tensile strength/ MPa	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio	Length/m	Diameter/mm	Thickness/mm
API X80	555	625	210	0.3	4	1016	18.4

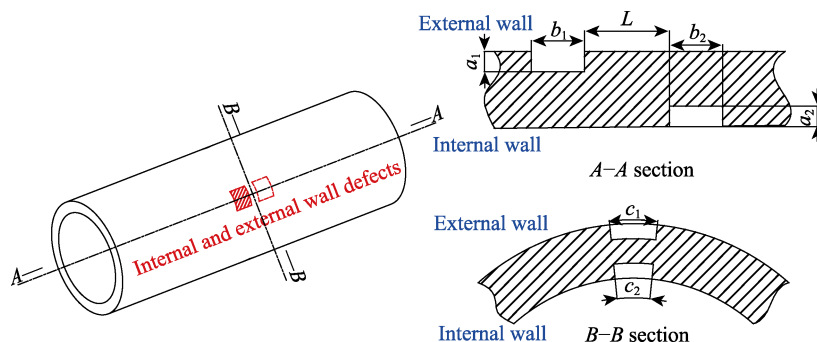


图 1 含内外壁双缺陷管道几何模型

Fig.1 Geometric model of double defect pipeline in inner and outer walls

1.2 有限元模型

为提高计算精度，本模型采用 C3D8R 八节点线性六面体减缩积分单元，在缺陷位置对网格进行局部密化处理，运用结构化分网技术最终形成网格。通过设置分析步、施加载荷及边界条件等操作，形成有限元模型，见图 2。

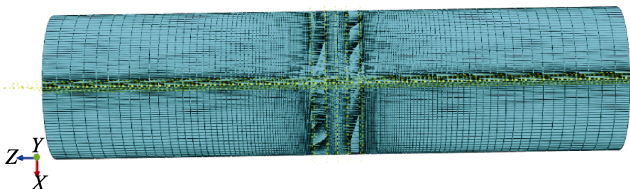


图 2 含内外壁双缺陷管道有限元模型
Fig.2 Finite Element model of double defect pipeline in inner and outer walls

1.3 有限元数据校核

导出最大位移处 $P-\varepsilon$ （内压-应变）曲线，按照 JB4732《钢制压力容器——分析设计标准》推荐的二倍弹性斜率法求得极限载荷，求解示意图 3 所示。任取 4 组参数，将通过 FEA（Finite Element Analysis，有限元分析）求解值与 GB/T 19624《在用含缺陷压力容器安全评定》、DNVGL RP F101 和 ASME B31G 进行误差分析，如表 2 和图 4 所示。可见，整体平均误差为 4.58%，属于较低误差水平，且误差绝对值控制在 10%以内。通过以上分析可得，ABAQUS 有限元研究方法用于含缺陷管道极限载荷研究是合理有效的，能够较为精确地计算出含缺陷管道极限载荷。

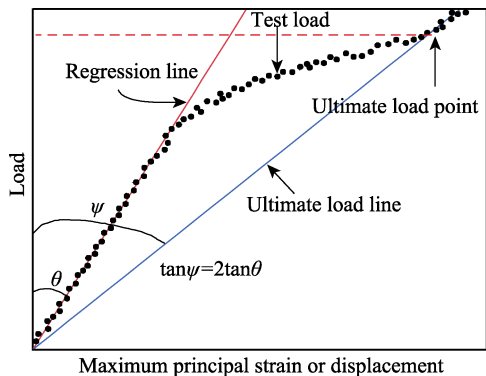


图 3 二倍弹性斜率法确定极限载荷方法示意图
Fig.3 Schematic diagram of double elastic slope method

表 2 有限元计算值与规范计算值误差分析
Tab.2 Error analysis of Finite Element calculated value %

Group	Error with GB/T19624	Error with DNVGL-RP-F101	Error with Original B31G	Error with Modified B31G
1	6.37	2.34	4.64	3.89
2	5.48	1.22	4.84	1.98
3	8.13	2.51	8.13	1.53
4	8.42	3.21	7.38	3.27

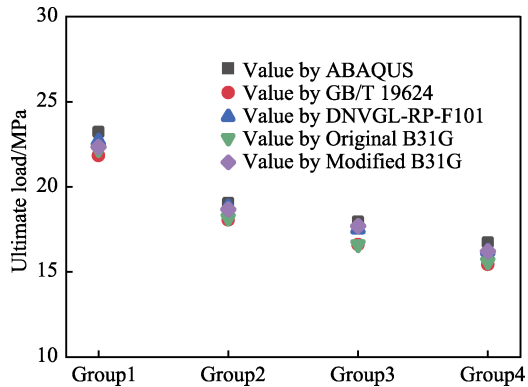


图 4 ABAQUS 计算值误差分析
Fig.4 Error analysis of ABAQUS

2 管道内外缺陷干涉极限影响距离分析

2.1 干涉作用极限影响距离计算方法

如 1.2 和 1.3 节所示方法求得含内外缺陷管道极限载荷 P_i ，与含单缺陷管道极限载荷 P_0 进行对比，采用式（2）来判断是否产生干涉影响。当极限影响因子小于 5%时，在工程上可认为此时两缺陷间无相互影响，不发生干涉^[18-19]，视为相互独立的单缺陷。

$$\omega = \frac{|\Delta P|}{P_i} \times 100\% = \frac{|P_i - P_0|}{P_i} \times 100\% \leq 5\%$$

(2)

式中： ω 为极限影响因子； P_i 为有限元计算含双缺陷管道极限内压，MPa； P_0 为有限元计算含单缺陷管道极限内压，MPa。

以内缺陷深度 $a_2/t=0.1$ 、外缺陷深度 $a_1/t=0.3$ 作为示例，设置不同缺陷轴向间距 L 为 50、150、250、350、450 mm，求得极限载荷和极限影响因子如表 3 所示。绘出 $L-\omega$ 图，以 $\omega=5\%$ 为标准，求得极限影响距离 L_{lim} 为 109 mm，如图 5 所示。

表 3 极限影响因子求解示例
Tab.3 Solution example of impact factor

Axial distance L/mm	Ultimate load of pipeline with double effects by FEA(P_i)/MPa	Ultimate load of pipeline with single effects by FEA(P_0)/MPa	Impact factor (ω)/%
50	17.83	19.02	6.26
150	18.23	19.02	4.15
250	18.62	19.02	2.10
350	18.80	19.02	1.16
450	18.87	19.02	0.79

2.2 基于缺陷深度的极限影响距离分析

采用控制变量法，设置内外缺陷长度 $b=\sqrt{Rt}$ （即 96.68 mm）、宽度 $c=20$ mm，内缺陷深度 a_2/t 、外缺陷深度 a_1/t 都分别为 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3，基

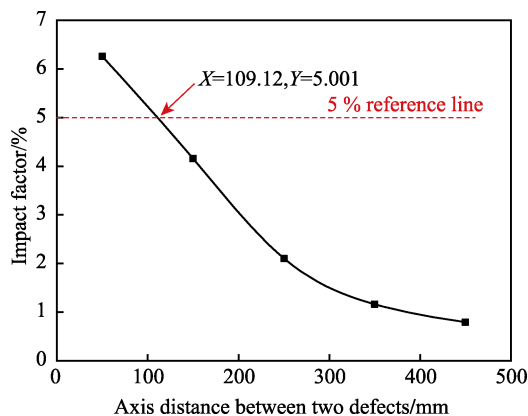


图 5 极限影响距离计算示例

Fig.5 Solution example of limit influence distance

于 2.1 节中的 5 种管道轴向间距和判定标准, 计算得到不同缺陷深度下干涉极限影响距离, 如表 4 所示。

如图 6, 缺陷深度 a_1/t 、 a_2/t 在 0.1~0.3 的范围内变化, 双缺陷干涉极限影响距离的变化范围在 46~193 mm 内, 且随着缺陷深度 a_1 、 a_2 的增加, 双缺陷干涉极限影响距离出现显著增加, 变化速率越来越大。

2.3 基于缺陷长度的极限影响距离分析

设置内外缺陷深度 $a/t=0.25$ (即 4.6 mm)、宽度 $c=20$ mm, 内缺陷长度 b_2/β 、外缺陷长度 b_1/β 都分别为 0.5、1、1.5、2、2.5 ($\beta=\sqrt{Rt}$), 基于 2.1 节中的 5 种缺陷轴向间距, 计算得到不同缺陷长度下干涉极限影响距离, 如表 5 所示。

表 4 不同缺陷深度下双缺陷干涉极限影响距离数据

Tab.4 Double defect interference limit influence distance under different defect depths

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
a_2/t	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.2	0.2	0.2
a_1/t	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.1	0.15	0.2
L_{lim}/mm	46	54	64	82	109	48	59	72	97	122	51	67	89
Group	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
a_2/t	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
a_1/t	0.25	0.3	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	
L_{lim}/mm	103	144	66	79	101	128	172	78	99	126	152	193	

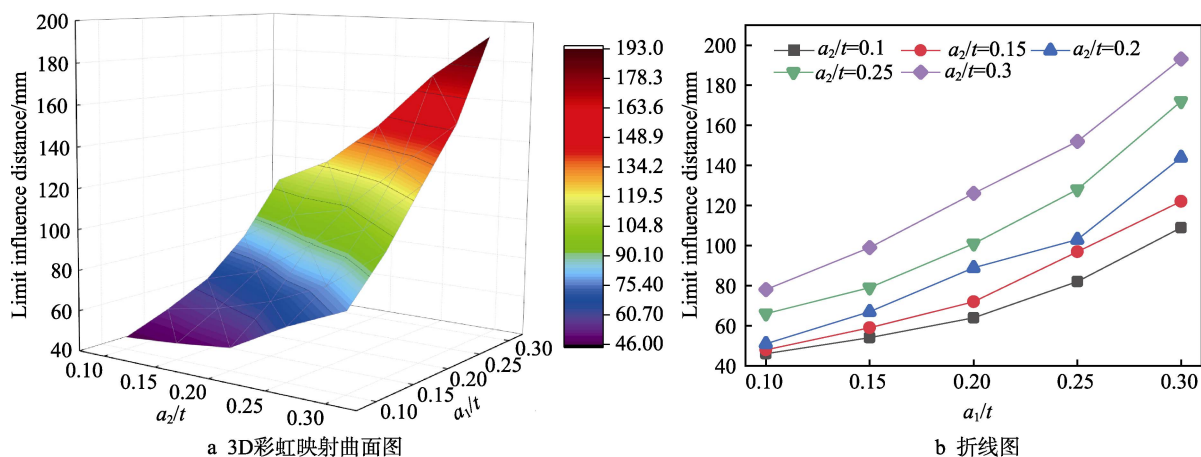


图 6 内缺陷深度-外缺陷深度-干涉作用极限影响距离关系图

Fig.6 Diagram between defect depth and interference limit influence distance: a) 3D rainbow map b) line chart

表 5 不同缺陷长度下双缺陷干涉极限影响距离数据

Tab.5 Double defect interference limit influence distance under different defect lengths

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
b_2/β	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5
b_1/β	0.5	1	1.5	2	2.5	0.5	1	1.5	2	2.5	0.5	1	1.5
L_{lim}/mm	71	113	145	175	199	92	128	149	182	204	115	142	168
Group	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
b_2/β	1.5	1.5	2	2	2	2	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
b_1/β	2	2.5	0.5	1	1.5	2	2.5	0.5	1	1.5	2	2.5	
L_{lim}/mm	190	208	133	156	177	194	211	144	174	191	206	219	

由图 7 所示，缺陷长度 b_1/β 、 b_2/β 在 0.5~2.5 的范围内变化，双缺陷干涉极限影响距离的变化范围在 71~219 mm 内，且随着缺陷深度 b_1/β 、 b_2/β 的增加，

双缺陷干涉极限影响距离虽然不断增大，但变化速率越来越小。

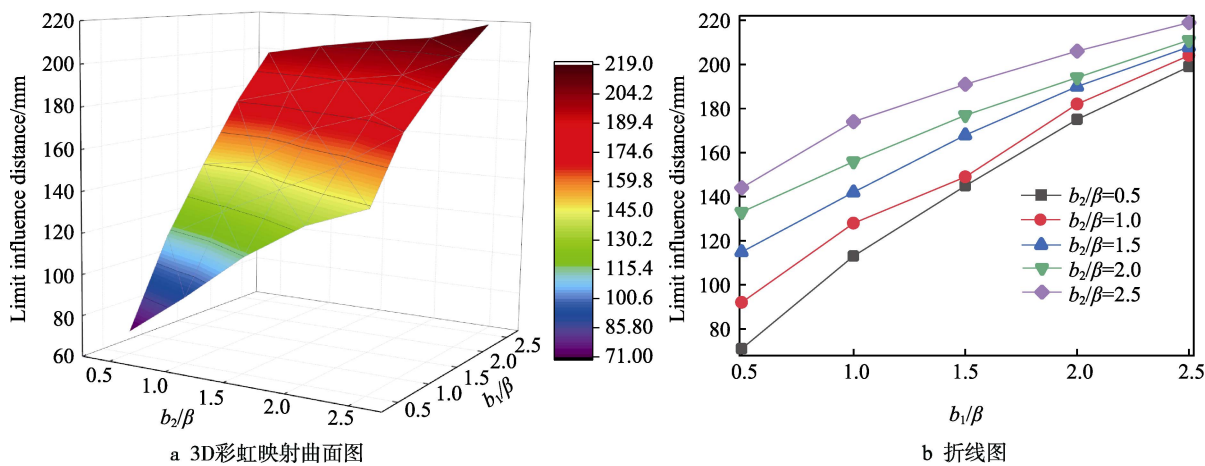


图 7 内缺陷长度-外缺陷长度-干涉作用极限影响距离关系图
Fig.7 Diagram between defect length and interference limit influence distance: a) 3D rainbow map b) line chart

2.4 基于缺陷宽度的极限影响距离分析

设置缺陷深度 $a/t=0.1$ ，长度 $b/\sqrt{Rt}=1$ ，内外缺陷宽度 c 分别为 20、50、100、200 mm，基于 $L=50$ mm 和 150 mm 两种轴向间距，计算求得极限载荷。发现当 $L=50$ mm 时，随着缺陷宽度的增加，极限载荷值从 22.13 MPa 减小到 21.48 MPa，仅减小 0.65 MPa；当 $L=150$ mm 时，管道极限载荷从 22.59 MPa 减小到 21.73 MPa，共减小 0.86 MPa。这说明内外缺陷宽度对极限载荷的影响非常小，而本文干涉极限影响距离基于极限载荷，由此可知缺陷宽度对干涉极限距离影响微弱，工程上可忽略不计。

3 管道内外缺陷干涉极限影响距离公式拟合

3.1 函数型构建

引入无量纲化参数 $A_1=a_1/t$ 、 $A_2=a_2/t$ 、 $B_1=b_1/\beta$ 、 $B_2=b_2/\beta$ ，利用 MATLAB 构建如式（3）所示的内外

缺陷干涉极限影响距离计算公式，进行拟合。

$$L_{lim} = m_1 \cdot A_1^3 + m_2 \cdot A_1^2 + m_3 \cdot A_1 + m_4 \cdot A_2^3 + m_5 \cdot A_2^2 + m_6 \cdot A_2 + m_7 \cdot B_1^3 + m_8 \cdot B_1^2 + m_9 \cdot B_1 + m_{10} \cdot B_2^3 + m_{11} \cdot B_2^2 + m_{12} \cdot B_2 + m_{13}$$
 (3)

式中： L_{lim} 为内外缺陷极干涉极限影响距离，mm； $m_1—m_{13}$ 为四元三次多项式中待定参数； A_1 为外缺陷深度无量纲系数； A_2 为内缺陷深度无量纲系数； B_1 为外缺陷长度无量纲系数； B_2 为内缺陷长度无量纲系数。

3.2 拟合公式

根据 50 组双缺陷干涉极限影响距离数据，使用 Matlab 软件的 nlinfit 函数进行多元非线性回归拟合，对待定参数保留 4 位小数，得到各参数拟合结果见表 6。参数拟合的相关系数平方和、残差平方和以及均方差参数如表 7 所示，计算结果的参数函数拟合分布如图 8 和图 9 所示。可见，相关系数平方和 $R^2=0.9898$ ，非常接近于 1，且绝大部分数据点分布在拟合曲线上，总体拟合精度较高。

表 6 拟合参数取值
Tab.6 Fitting parameter value

Parameter	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7
Value	3478.0135	-797.9935	318.0556	-2655.3183	2424.8627	-331.7537	0.1447
Parameter	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}	
Value	-7.4821	69.9249	-2.3887	11.3465	7.5725	-62.2588	

表 7 拟合精度指标
Tab.7 Fitting accuracy

Precision	Sum of squares of correlation coefficients (R^2)	Sum of residuals (SSE)	Mean square error (RMSE)
Value	0.9898	0.5361	7.3219

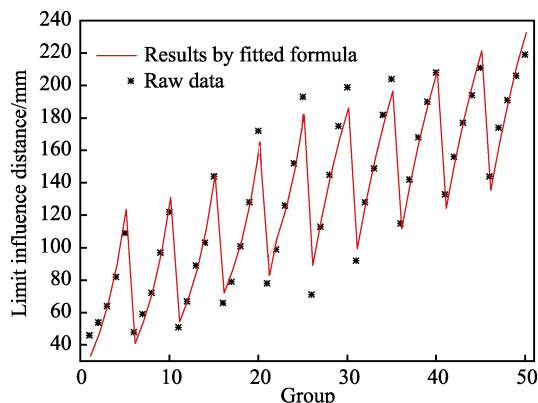


图 8 回归拟合曲线图
Fig.8 Regression fitting curve

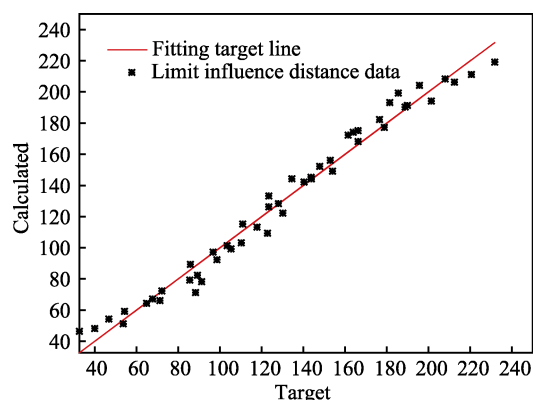


图 9 回归拟合曲线 X-Y
Fig.9 Regression fitting curve X-Y

引入参数 f_{A_1} 、 f_{A_2} 、 f_{B_1} 、 f_{B_2} 四个函数，分别表征外缺陷深度、内缺陷深度、外缺陷长度、内缺陷长度对极限距离的影响。经过整合，得到内外双缺陷干涉极限影响距离公式如下：

$$L_{\lim} = f_{A_1} + f_{A_2} + f_{B_1} + f_{B_2} - 62.2588$$

$$\begin{cases} f_{A_1} = 3478.0135 \times A_1^3 - 797.9935 \times A_1^2 + 318.0556 \times A_1 \\ f_{A_2} = -2655.3183 \times A_2^3 + 2424.8627 \times A_2^2 - 331.7537 \times A_2 \\ f_{B_1} = 0.1447 \times B_1^3 - 7.4821 \times B_1^2 + 69.9249 \times B_1 \\ f_{B_2} = -2.3887 \times B_2^3 + 11.3465 \times B_2^2 + 7.5725 \times B_2 \end{cases} \quad (4)$$

4 结论

1) 随着内外缺陷深度 a_1 、 a_2 的增大，管道极限承载能力迅速下降，下降的幅度越来越大。双缺陷干涉极限影响距离出现显著增加，且变化速率越来越大。

2) 随着内外缺陷长度 b_1 、 b_2 的增大，管道极限承载能力下降，但当缺陷长度大于 $2.5\sqrt{Rt}$ 时，极限载荷基本不变。双缺陷干涉极限影响距离不断增加，但变化速率越来越小。

3) 随着内外缺陷相对宽度 c_1 、 c_2 的增大，管道极限承载能力基本不变，双缺陷干涉极限影响距离基

本不变，工程上可忽略缺陷宽度对干涉作用的影响。

4) 通过对比分析，发现缺陷深度是影响干涉的最主要因素，缺陷长度次之，缺陷宽度基本不影响，在实际工程中应对缺陷深度和缺陷长度给予重点关注。

5) 通过多元回归非线性拟合，得到内外双缺陷极限干涉距离同外缺陷深度、内缺陷深度、外缺陷长度、内缺陷长度之间的公式，可应用于工程上快速判定是否产生干涉作用。

参考文献：

- [1] 王小强, 王保群, 王博, 等. 我国长输天然气管道现状及发展趋势[J]. 石油规划设计, 2018, 29(5): 1-6.
WANG Xiao-qiang, WANG Bao-qun, WANG Bo, et al. The current situation and development trend of China's long distance natural gas pipeline[J]. Petroleum planning & engineering, 2018, 29(5): 1-6.
- [2] 马钢, 白瑞. 全球油气管道分布及发展展望[J]. 焊管, 2018, 41(3): 6-11.
MA Gang, BAI Rui. Global oil and gas pipeline distribution and development prospect[J]. Welded pipe and tube, 2018, 41(3): 6-11.
- [3] 祝慧智, 李秋扬, 吴超, 等. 2017 年全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2019, 38(4): 373-378.
ZHU Que-zhi, LI Qiu-yang, WU Chao, et al. Construction status and development trend of global oil & gas pipelines in 2017[J]. Oil & gas storage and transportation, 2019, 38(4): 373-378.
- [4] DNVGL-RP-F101, Recommend practice corroded pipeline[S].
- [5] CHEN Y, ZHANG H, ZHANG J, et al. Failure assessment of X80 pipeline with interacting corrosion defects[J]. Engineering failure analysis, 2015, 47: 67-76.
- [6] ABDALLA FILHO J E, MACHADO R D, BERTIN R J, et al. On the failure pressure of pipelines containing wall reduction and isolated pit corrosion defects[J]. Computers and structures, 2014, 132: 236.
- [7] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D, et al. Interaction of corrosion defects in pipelines—Part 2: MTI JIP database of corroded pipe tests[J]. International journal of pressure vessels & piping, 2016, 145: 41-59.
- [8] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D, et al. Burst tests on pipeline containing closely spaced corrosion defects[C]//International conference on offshore mechanics and arctic engineering. Shanghai: Schiff und Hafen, 2006: 103-116.
- [9] BENJAMIN A C, CUNHA D J S. New method for the prediction of the failure pressure of interacting corrosion defects[C]//International offshore and polar engineering conference. Lisbon: Journal of marine science and application, 2007: 264-271.
- [10] BENJAMIN A C, ANDRADE E Q D, JACOB B P, et al. Failure behavior of colonies of corrosion defects composed of symmetrically arranged defects[C]//International pipeline conference. Calgary: Experimental techniques, 2006.

(下转第 223 页)

- surface engineering, 2009, 22(6): 68-71.
- [19] 杜娟, 田辉, 陈亚军, 等. 7A04 铝合金应力腐蚀敏感性
及裂纹萌生与扩展行为[J]. 材料工程, 2018, 46(4):
74-81.
DU Juan, TIAN Hui, CHEN Ya-jun, et al. Susceptibility
to stress corrosion and crack initiation and propagation of
7A04 aluminum alloy[J]. Journal of materials enginee-
ring, 2008, 46(4): 74-81.
- [20] 王亮. 等离子喷涂纳米结构热障涂层组织结构与残余
应力分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
WANG Liang. Analysis of microstructure and residual str-
ess of plasma sprayed nano-structured thermal barrier co-
atings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [21] 赵运才, 张佳茹, 何文. 基于 ANSYS 生死单元法的多
层等离子喷涂体系仿真[J]. 金属热处理, 2017, 42(12):
225-231.
ZHAO Yun-cai, ZHANG Jia-ru, HE Wen. Simulation of
multi-layer plasma spraying system based on ANSYS ele-
ment death and birth method[J]. Heat treatment of metals,
2017, 42(12): 225-231.
- [22] 王秋成. 航空铝合金残余应力消除及评估技术研究[D].
杭州: 浙江大学, 2003.
WANG Qiu-cheng. Research on residual stress elimina-
tion and evaluation technology of aviation aluminum all-
oy[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [23] 肖罡, 李落星, 叶拓. 6013 铝合金平面热压缩流变应力
曲线修正与本构方程[J]. 中国有色金属学报, 2014,
24(5): 1268-1274.
XIAO Gang, LI Luo-xing, YE Tuo. Modification of flow
stress curves and constitutive equations during hot plane
compression deformation of 6013 aluminum alloy[J]. The
Chinese journal of nonferrous metals, 2014, 24(5):
1268-1274.
- [24] 鲁帅. 快速凝固技术中激冷辊材的热疲劳性能研究[D].
北京: 北京有色金属研究总院, 2012.
LU Shuai. Study on thermal fatigue of the chilling roll
materials in rapid solidification techniques[D]. Beijing:
General Research Institute for Nonferrous Metals, 2012.
- [25] 谢汉芳, 李付国, 王玉凤, 等. 粉冶金金属钼的动态再结
晶行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(4):
669-672.
XIE Han-fang, LI Fu-guo, WANG Yu-feng, et al. Study
on dynamic recrystallization behavior of powder metall-
urgy molybdenum[J]. Rare metal materials and enginee-
ring, 2011, 40(4): 669-672.
- [26] 孙瑞敬. 氧化锆陶瓷室温压入力学行为研究[D]. 太原:
太原理工大学, 2016.
SUN Rui-jing. Indentation behavior of zirconia ceramics
at room temperature[D]. Taiyuan: Taiyuan University of
Technology, 2016.
- [27] 凌锡祥. 8YSZ 热障涂层隔热性能及热冲击性能的数值
研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
LING Xi-xiang. Numerical study of the thermal insulation
and thermal shock performance of 8YSZ thermal barrier
coatings[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [28] 谢义英, 李强. 等离子喷涂 8YSZ 涂层在铝熔体作用下
热冲击行为的数值模拟[J]. 表面技术, 2018, 47(4):
102-108.
XIE Yi-ying, LI Qiang. Numerical simulation of thermal
shock behavior of plasma sprayed 8YSZ thermal barrier
coatings subjected to molten aluminum[J]. Surface techn-
olog, 2018, 47(4): 102-108.

(上接第 204 页)

- [11] AL-OWAISI S S, BECKER A A, SUN W. Analysis of
shape and location effects of closely spaced metal loss
defects in pressurised pipes[J]. Engineering failure
analysis, 2016, 68: 172-186.
- [12] HOSSEINI A, CRONIN D S, PLUMTREE A. Crack in
corrosion defect assessment in transmission pipelines[J].
Journal of pressure vessel technology, 2013, 135: 8.
- [13] KYU J Y, KIM W S, KYU H O. Integrity assessment of
API X70 pipe with corroded girth and seam welds via num-
erical simulation and burst test experiments[J]. Engineer-
ing failure analysis, 2016, 70: 254.
- [14] FREIRE JOSÉ L F, VIEIRA RONALDO D, FONTES
PABLO M, et al. The critical path method for assessment
of pipelines with metal loss defects[J]. Journal of pipeline
engineering, 2013, 14: 658.
- [15] LI X, BAI Y, SU C, et al. Effect of interaction between
corrosion defects on failure pressure of thin wall steel pip-
eline[J]. International journal of pressure vessels & piping,
2016, 138: 8-18.
- [16] 邱昌盛. 超高压反应管的极限压力研究[D]. 广州: 华
南理工大学, 2013.
QIU Chang-sheng. Investigation on the ultimate pressure
of ultrahigh pressure tubular reactor[D]. Guangzhou: South
China University of Technology, 2013.
- [17] 徐学利, 严培林, 毕宗岳. X80 管线钢化学成分对焊缝
韧性影响分析[J]. 热加工工艺, 2017, 46(3): 174-177.
XU Xue-li, YAN Pei-lin, BI Zong-yue. Effect analysis of
chemical composition of X80 pipeline steel on weld toug-
hness[J]. Hot working technology, 2017, 46(3): 174-177.
- [18] 穆怀, 曾祥国, 李洋, 等. 多缺陷相互作用及对油气管
道强度影响研究[J]. 四川理工学院学报(自科版), 2016,
29(2): 46-50.
MU Huai, ZENG Xiang-guo, LI Yang, et al. Interaction of
multi defect and its influence study on the strength of oil
and gas pipeline[J]. Journal of Sichuan University of Sci-
ence & Engineering (natural science edition), 2016, 29(2):
46-50.
- [19] 彭剑, 周昌玉, 薛吉林, 等. 含多局部减薄缺陷压力管
道的安全评定方法讨论[J]. 压力容器, 2010, 27(5):
21-25.
PENG Jian, ZHOU Chang-yu, XUE Ji-lin, et al. Discussion
on safety assessment of pressure pipe with multiple local
wall thinning defects[J]. Pressure vessel technology, 2010,
27(5): 21-25.