

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210677

# 面向超声导波检测的管道腐蚀建模及仿真实现\*

王晓娟, 杨帆, 王 错, 赵 锴, 郑 毅

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

**摘 要:**超声导波技术被大量应用于管道腐蚀的检测与评估。腐蚀是实际管道中的主要缺陷形式,管道腐蚀缺陷形貌多样且复杂,针对管道腐蚀导波检测的很多研究是通过仿真手段开展的。常用的缺陷简化模型不能充分反映实际腐蚀缺陷的复杂程度,有可能造成分析结果的偏差。本文在分析腐蚀特点基础上提出了基于 W-M 分形函数的腐蚀仿真模型,研究了管道腐蚀缺陷的有限元自动建模仿真方法,并通过分析讨论超声导波检测不同腐蚀缺陷的仿真结果对模型的有效性进行了验证,结果证明基于本文提出的腐蚀模型所得缺陷回波可提供更丰富的缺陷信息,有利于揭示管道腐蚀特征与导波信号之间的量化关系。本文的研究成果可为进一步分析管道腐蚀缺陷的检测评估建立理论基础。

**关键词:** 超声导波;管道腐蚀;仿真建模;W-M 分形函数

**中图分类号:** TH70 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

## Pipeline corrosion modeling and simulation for guided-waves-based inspection

Wang Xiaojuan, Yang Fan, Wang Cuo, Zhao Kai, Zheng Yi

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The ultrasonic guided-wave technique is widely used in the inspection and evaluation of pipeline defects. The defects in pipeline are mainly corrosion defects, and the actual form of pipeline corrosion is diverse and complex. A large number of researches for pipeline corrosion waveguide detection are conducted by means of simulation. The common simplified defect models cannot fully present the complexity of the actual corruptions and the mistakes may be made when analyzing the signals with them. The work in this article proposes a corrosion defect simulation model based on W-M fractal function, and further studies the finite element modeling of the pipeline with corrosion for guided waves inspection. The model is evaluated by simulation results of inspecting different corrosion defects. Results show that the obtained reflections can provide more defect information, which are conducive to reveal the quantitative relationship between the characteristics of pipeline corrosion and the guided-waves signal. Research results of this work are expected to provide theoretical support for further research on the detection and evaluation of corrosion defects in pipeline.

**Keywords:** ultrasonic guided waves; pipeline corrosion; simulation and modelling; W-M fractal function

## 0 引 言

管道在使用过程中可能出现腐蚀、疲劳、蠕变、材质劣变和冲刷磨损等多种破坏形式,管道事故统计分析数据显示腐蚀破坏是管道的主要破坏形式。腐蚀发展过程隐蔽,极易形成管道运行安全隐患并引发事故,因此腐蚀检测评估及相关管道安全问题一直是工业界和学术界普遍关注的重要课题<sup>[1]</sup>。超声导波(guided waves)是近年

来快速发展的一种先进管道无损检测技术<sup>[2]</sup>,超声导波具有多模态特性与频散特性,而实际管道中的腐蚀缺陷形式多样且形貌复杂,因此导波检测产生的腐蚀反射回波非常复杂,难以直接利用解析方法对管道腐蚀缺陷的回波进行全面准确的分析。由于腐蚀是材料经历缓慢变化过程形成的结果,通过实验加工的方式建立模拟腐蚀需要较长周期和大量重复劳动。而腐蚀现象本身具有随机性,易受外界因素影响,按照研究方案进行机械加工或化学加工获得的腐蚀缺陷往往与预期设定有一定差距,

收稿日期:2022-11-08 Received Date: 2022-11-08

\* 基金项目:国家自然科学基金(51505374)项目资助

进而可能造成分析结果的偏差,不利于揭示腐蚀特征与导波信号之间的量化关系。因此,针对管道腐蚀导波检测的大量研究是通过仿真手段开展的。如谭冰芯等<sup>[3]</sup>采用圆槽、椭圆槽和方槽模拟腐蚀缺陷并建立管道腐蚀超声检测仿真模型,研究了超声导波两种模态与管道腐蚀之间的相互作用。Ribeiro 等<sup>[4]</sup>使用机器学习模型分析仿真系统中低阶 SH 导波模态激励下获得的槽型缺陷回波,用于研究铝板中腐蚀缺陷的检测评估问题。Howard 等<sup>[5]</sup>将腐蚀坑简化为光滑圆槽并建立仿真模型,进一步研究分析了周向导波检测腐蚀的可行性。这些研究表明仿真分析结果可用于指导超声导波实验设计及理论研究方向,但也可以看到目前的管道导波仿真研究主要考虑的是类槽型、圆孔型和裂纹型等简化模型形式。也有部分研究采用多个离散的基本几何实体组合模拟腐蚀缺陷,比如 Løvstad 等<sup>[6-7]</sup>研究了扭转模态  $T(0,1)$  在管道中多个槽型缺陷及多个圆孔处的反射;王晓娟等<sup>[8]</sup>建立点蚀群型缺陷模型并研究分析了管道导波建模仿真的优化指标。以上工作并没有考虑实际腐蚀区域范围内各连续点凹凸且随机变化的形貌特征,没有充分反映腐蚀缺陷实际的复杂程度,使用这类简化腐蚀缺陷模型有可能影响仿真结果的准确性和可靠性,特别是基于回波分析的缺陷量化识别。

本文在以上背景下展开研究工作,针对管道腐蚀的超声导波检测,分析了实际管道腐蚀的形貌特征,引入分形理论提出了基于 W-M 分形函数的腐蚀缺陷形貌模型,进一步根据腐蚀模型数据形成管道腐蚀并构建完整的腐蚀管道仿真模型。本文提出的腐蚀建模方法有助于开展更为准确高效的管道腐蚀导波检测相关的仿真研究,可为进一步深入理解和应用管道导波技术提供理论支持。

## 1 管道腐蚀及管道缺陷的导波检测

### 1.1 管道腐蚀缺陷

管道腐蚀往往出现在管道内外部的暴露表面,腐蚀会造成管道重量减少,壁厚减薄。由于管道表面各部分的腐蚀速率不等,管道表面会出现明显的腐蚀深度变化及分布不均匀,即形成大量深度不同的浅表凹坑,这是腐蚀形貌的基本特点。受腐蚀性媒介的性质、传输速度、环境因素等影响,腐蚀形成过程中往往是和其它破坏形式同时作用进而产生多种形式的腐蚀,如均匀腐蚀、点蚀或者缝隙腐蚀以及侵蚀腐蚀等,导致管道表面形状不规则,粗糙不平<sup>[9-10]</sup>。在腐蚀演变的过程中,管道表面的起伏程度(或粗糙度)逐渐加大,腐蚀深度逐渐增加,腐蚀坑尺寸不断扩大,腐蚀过程的随机性也使得腐蚀缺陷形貌呈现更多的复杂性。目前管道腐蚀的检测评估主要从腐蚀形貌角度考虑,获得腐蚀有关几何参数后,可进一步结

合管道详细参数预测腐蚀管道极限内压载荷,并分析腐蚀管道剩余强度等信息,以保证管道的安全运行。

### 1.2 管道缺陷的导波检测

利用超声导波对管道缺陷进行检测获得的反射信号包含大量的缺陷特征相关信息,可用于缺陷的定性或量化评估。在与管道缺陷交互过程中一部分导波模态会转换为多个不同于激励信号的模态成分,转换模态的类型与管道频散曲线及激励信号的频率有关,而转换模态的能量分配及能量大小则与缺陷特征有密切关系<sup>[11]</sup>。例如,在管道中部设置缺陷,管道一端加载纵向模态导波激励(其中包括  $L(0,2)$  和  $L(0,1)$  模态),所得缺陷回波如图 1 所示。从图中可以看到,缺陷回波由 3 个波包组成,根据已有研究结论可知第 1 个波包为  $L(0,2)$  模态反射回波、第 2 个波包为转换模态回波、第 3 个波包为  $L(0,1)$  模态反射回波。各个模态回波均提供了不同程度的缺陷信息。

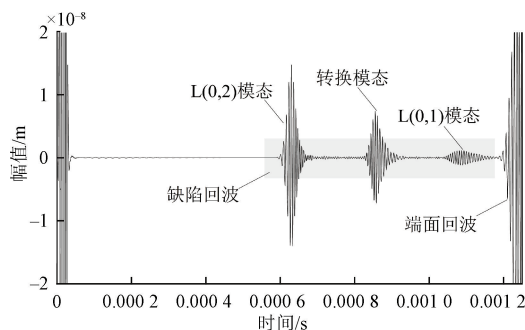


图1 纵向模态导波检测管道缺陷的回波信号

Fig. 1 Reflection signal from pipeline defect with longitudinal guided waves

管道腐蚀缺陷产生的导波回波也具有类似的模态时序。图 2 为在工业应用环境中形成的管道腐蚀,采用导波检测得到的回波信号如图 3 所示。可以看到,腐蚀反射信号中依次出现了  $L(0,2)$  模态波包、转换模态波包和  $L(0,1)$  模态波包。但由于腐蚀缺陷形貌不规则,超声导波在腐蚀区域内传播特性复杂,会涉及到各种模态成分的散射叠加及不同能量衰减特征。因此,虽然超声导波检测所获得的反射信号包含所有腐蚀相关信息,但腐蚀缺陷的多样性及无规律性,再加之超声导波本身特性复杂及各种噪声影响,使得对管道腐蚀缺陷进行准确量化评估仍然非常困难。

## 2 管道腐蚀缺陷的仿真模型设计

管道超声导波的仿真主要涉及三维实体建模问题,管道缺陷在目前相关研究中多被简化为缺陷区域内三维特征尺寸或部分三维特征尺寸为单一固定值的模型形



图2 实际管道腐蚀缺陷

Fig. 2 Corrosion defect in a real pipeline

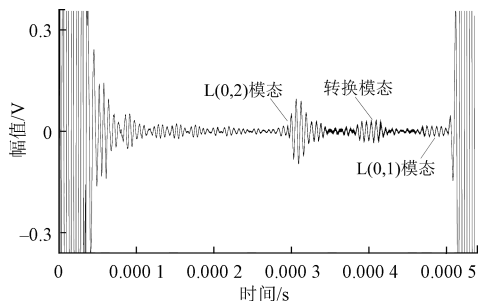


图3 实际管道腐蚀缺陷的回波信号

Fig. 3 Reflection signal from real pipeline with a corrosion

式。实际中的管道腐蚀缺陷难以用常规的数学工具描述,根据近年来发展的混沌理论,已有研究学者采用分形方法去描述并研究腐蚀<sup>[12-13]</sup>。分形是以不规则复杂几何形态为研究对象的学科,在很多领域都得到了广泛应用。分形在数学上被认为是一种基于递归的反馈系统,通过在特定方程或模型基础上结合自相似、半自相似和统计自相似等特性不断迭代生成分形。W-M分形函数是数学家Mandelbrot在Weierstrass所提函数基础上证明并改进的分形函数,已被大量用于对不同粗糙表面进行分形表征和模拟<sup>[14-15]</sup>。本文将利用W-M分形函数建立管道腐蚀缺陷的形貌模型,进一步将腐蚀缺陷形貌数据引入管道建立管道腐蚀及腐蚀管道的实体模型以便进行腐蚀缺陷检测的仿真研究。

### 2.1 W-M分形函数

W-M分形函数本身具有自相似性,可以准确模拟并建立复杂的随机分形表面,且处处连续但不可微。一般粗糙表面的形貌模型可用下式中的二维分形函数表示:

$$Z(x) = G^{(D-1)} \sum_{n=1}^{\infty} \gamma^{(D-2)n} \cos(2\pi\gamma^n x) \quad (1)$$

式中: $Z(x)$ 表示随机表面的深度; $x$ 表示表面坐标位置; $D$ 表示分形维数,用于描述随机表面的不规则性,取值范围一般为 $1 < D < 3$ ;  $G$ 表示特征尺度系数,表征 $Z(x)$ 的幅值大小,用于确定随机表面的具体尺寸; $\gamma$ 表示表面轮廓的空间频率。常见腐蚀缺陷表面的深度分布多符合正态分布,为了反映这类表面的高频谱密度及相位的随机性, $\gamma$ 值一般取1.5。

本文采用三维W-M分形函数对管道腐蚀缺陷复杂

的表面形貌进行建模,其数学模型如式(2)所示:

$$Z(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \gamma^{(D-3)n} \sin[\gamma^n (x \cos B_n + y \sin B_n) + A_n] \quad (2)$$

和二维分形函数中的变量类似,其中 $Z(x, y)$ 表示腐蚀缺陷表面的深度, $x$ 和 $y$ 分别是腐蚀表面的横纵坐标; $C_n$ 为尺度系数,一般定义为服从均值为0,方差为1的正态分布的随机数,用于表征腐蚀表面的严重程度。 $D$ 是理论上的分形维数或等效分形维数,取值范围一般为2~3。 $\gamma$ 表征腐蚀表面轮廓的空间频率。 $A_n$ 和 $B_n$ 是相互独立的随机数,并服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布, $n$ 为自然序列数。

由W-M分形函数的基本理论可知,分形维数 $D$ 、尺度系数 $C_n$ 及空间频率值 $\gamma$ 等参数对腐蚀模型的形貌结果有重要影响。本文重点讨论分析基于不同分形维数及尺度系数的分形函数构建的腐蚀缺陷模型。

### 2.2 基于W-M分形函数的腐蚀缺陷仿真模型

为了分别研究分形维数及尺度系数这两个参数对腐蚀缺陷形貌模型的影响,依据管道参数首先将尺度系数取值固定为0.25,同时根据经验值设置空间频率为1.5,自然序列数 $n=1, 2, 3, \dots, 100$ ,进而建立不同分形维数对应的腐蚀缺陷形貌模型。腐蚀缺陷表面横纵坐标取值需结合管道模型参数进行定义并调整,以保证后续生成正确的腐蚀管道模型。本文讨论的实例所用管道模型长度为3 m,壁厚为4 mm,内直径和外直径分别为26和34 mm。设定管道腐蚀缺陷模型的轴向长度范围为10 mm,周向角度范围为 $150^\circ$ 。将W-M分形函数中各数据点的横坐标 $x$ 定义为轴向位置,纵坐标 $y$ 定义为周向位置,进一步结合管道模型参数及网格划分等信息确定各点数据并建立腐蚀缺陷模型。图4给出了不同分形维数下管道腐蚀缺陷模型的实例结果,其中图4(a)~(d)分别对应分形维数为2.2、2.4、2.6和2.8时的情况。

从图4可知,基于分形函数建立的缺陷模型具有一般腐蚀缺陷的特点,即不同分形维数的腐蚀缺陷表面轮廓都存在高低起伏,显示出明显的不规则性及随机性。Dobson等<sup>[16]</sup>开展的研究已证明大多数腐蚀缺陷表面的深度变化规律呈现正态分布,据此对建立的几种腐蚀缺陷数据进行验证,结果如图5所示。从图中可以看出不同分形维数( $D=2.2, 2.4, 2.6, 2.8$ )对应的腐蚀缺陷表面形貌数据有比较明显的分布规律,依据分布判据可知符合正态分布。这也进一步间接验证了基于W-M分形函数建立的缺陷模型可有效地反映腐蚀缺陷三维形貌的基本特征。

此外,从图4中基于不同分形维数建立的几种腐蚀缺陷可以看到,随着分形维数的增大,腐蚀缺陷模型的起伏情况显示出明显不同,腐蚀三维形貌变得越来越复杂,



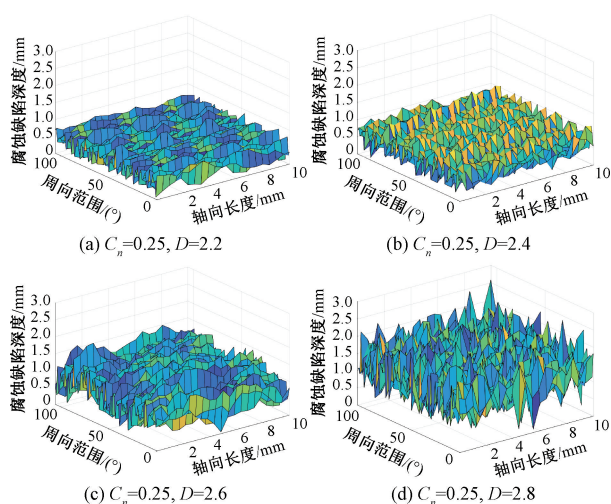


图4 不同分形维数管道腐蚀缺陷模型

Fig. 4 Pipeline corrosion defect model with different fractal dimensions

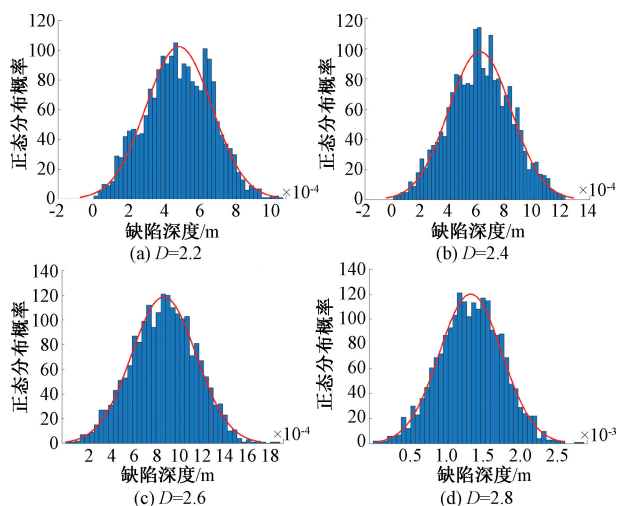


图5 不同分形维数腐蚀缺陷数据分布

Fig. 5 Data distribution of corrosion defect with different fractal dimensions

幅值变化及轮廓的起伏变化加强,可对应不同严重程度腐蚀的情况。这表明在后续的缺陷评估研究中,可以直接利用分形维数这一参数或基于分形维数构建表征腐蚀缺陷严重性的量化指标。

从工程应用角度考虑,除了表面形貌,腐蚀缺陷的深度尺寸也是影响管道安全和寿命的重要指标,在基于 W-M 分形函数构建的腐蚀缺陷模型中可以通过尺度系数进行调整。建模过程中需考虑待研究腐蚀的深度变化范围,并结合管道建模要求确定尺度系数值以保证腐蚀缺陷模型的深度值与管道数据匹配。在本文讨论的仿真实例中,将分形维数固定为 2.8,空间频率设置为 1.5,取尺度系数分别为 0.05、0.1、0.15、0.2,并建立对应的腐蚀缺

陷模型。图 6 给出了分形函数尺度系数为上述 4 种情况时的腐蚀缺陷模型,其中图 6(a)~(d) 分别对应尺度系数为 0.05、0.1、0.15、0.2 的 4 种情况。从图中可以看出,随着尺度系数的增大,腐蚀缺陷表面形貌的整体变化趋势没有太大的变化。显示出较为明显变化的是缺陷的径向深度,即随着尺度系数的增加,径向深度值变得越来越大。故在建模时可以通过调整此项参数得到不同径向深度的腐蚀缺陷模型以便进行深度相关的研究。

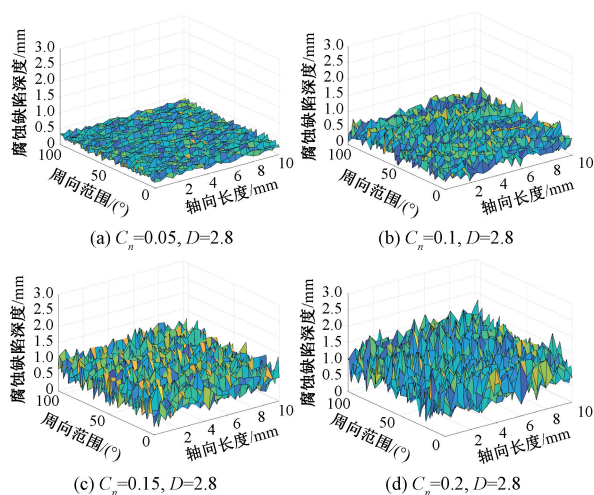


图6 不同尺度系数管道腐蚀缺陷模型

Fig. 6 Pipeline corrosion defect model with different scale coefficients

综上所述,基于 W-M 分形函数建立的腐蚀缺陷模型可有效反映腐蚀缺陷的不规则、随机等复杂形貌特征, W-M 分形函数的分形维数和尺度系数是影响腐蚀模型的重要参数,通过参数调整可得到对应不同严重程度的腐蚀缺陷模型为后续研究提供数据支撑。

### 3 腐蚀管道的有限元建模及腐蚀缺陷的导波检测

本文采用 ANSYS 有限元仿真软件对管道腐蚀缺陷的超声导波检测进行数值模拟。研究所考虑的管道模型为实际应用中常见的钢管类型,其具体数据同 2.2 节所述。缺陷位于距管道端面 1 m 位置处,换能器布置在管道一端,三者的相对位置关系如图 7 所示。钢管模型的材料特性见表 1。

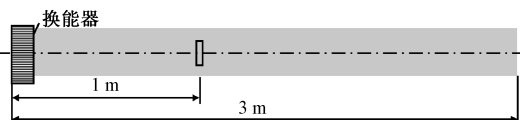


图7 本文研究的钢管及缺陷模型

Fig. 7 Steel pipeline and defect model studied in this article



表 1 钢管模型的材料特性

Table 1 Material properties of the steel pipe model

| 密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|--------------------------------------|----------|-----|
| 7 850                                | 200      | 0.3 |

腐蚀管道的数值仿真需重点考虑管道腐蚀缺陷的建模问题。有限元仿真系统中建立缺陷的方法较多,如布尔运算法、“杀死”单元法和直接建模法等。为了实现形貌复杂的腐蚀缺陷的构建,本文通过将腐蚀缺陷按照缺陷数据分解为若干单元,进一步直接在管道的三维实体模型上建立各缺陷单元并进行合并获得完整的腐蚀缺陷及腐蚀管道模型,然后再划分网络。基于这种建模方法可实现建模仿真过程的自动化。整体腐蚀管道模型主要由缺陷区管道和非缺陷区管段(连接区管段)组成。为了消除导波在管道端面产生的反射信号,从而简化管道缺陷回波信号分析,在管道模型的两端设置了阻尼区。本文选择空间实体单元 SOLID185 进行建模,根据管道模型实例的参数,在腐蚀缺陷区域径向方向上划分为 4 层网格,每层网格单元长度 1 mm;轴向方向上划分网格单元长度为 0.5 mm;周向方向上划分为 96 个网格单元。为保证对整体模型进行网格划分时可生成高质量的网格单元,在建立腐蚀缺陷模型过程中直接根据网格划分情况生成腐蚀缺陷模型每个单元的各组成部分,即在管道径向、轴向和周向上逐层、逐行及诸列建立缺陷各部分,从而形成完整的腐蚀缺陷模型。此外,为保证模型计算时具有足够的计算精度并降低计算成本,时间步长经优化设置为 4 000 步。本文举例所用的管道腐蚀缺陷部分的建立过程如图 8 中的实例所示,其中图 8(a)为首先建立的腐蚀缺陷最底层,图 8(b)~(d)分别为沿管道径向在第 2,3 及 4 层建模所得到的结果,其中图 8(d)为最终的腐蚀缺陷实体模型。

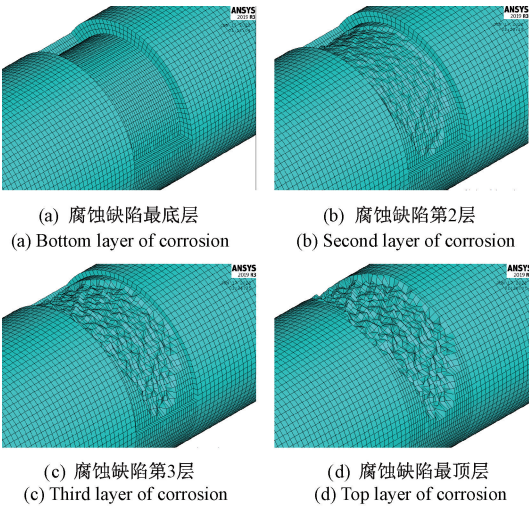


图 8 腐蚀缺陷模型建立过程

Fig. 8 The process of building the corrosion defect model

建立腐蚀管道模型的主要步骤总结如下:

- 1) 定义缺陷区管段和连接区管段参数;
- 2) 建立连接区管段;并根据待建立腐蚀缺陷的最大轴向长度、最大径向深度和最大周向宽度建立凹槽型缺陷管段;
- 3) 根据腐蚀缺陷的表面及边界形貌数据,提取各点二维位置信息,并利用各点数据值建立腐蚀缺陷模型区域内各对应单元。
- 4) 管道各管段间及腐蚀内各单元间进行合并连接处理,以形成完整腐蚀管道模型。

4 管道腐蚀的导波回波分析

4.1 典型管道腐蚀模型

为了验证本文提出的建模方法的有效性和通用性,首先以平槽缺陷、槽型腐蚀、椭圆腐蚀及任意边界腐蚀作为 4 种典型管道缺陷模型研究其回波特性并进行对比分析。其中平槽缺陷是目前超声导波领域研究腐蚀缺陷的主要简化模型;槽型腐蚀、椭圆腐蚀和任意边界腐蚀是以本文所提方法建立的腐蚀模型,后者更接近实际中腐蚀的形貌特征。4 种腐蚀缺陷的有限元实体模型如图 9 所示,其中图 9(a)~(d)分别为平槽缺陷、槽型腐蚀、椭圆腐蚀及任意边界腐蚀。为便于比较,将这 4 种腐蚀缺陷的表面腐蚀基本形貌特性设置为一致,即模型的分形维数和尺度系数相同。所有缺陷的总体形貌图见图 10,从左至右分别为平槽缺陷、槽型腐蚀、椭圆腐蚀和任意边界腐蚀。

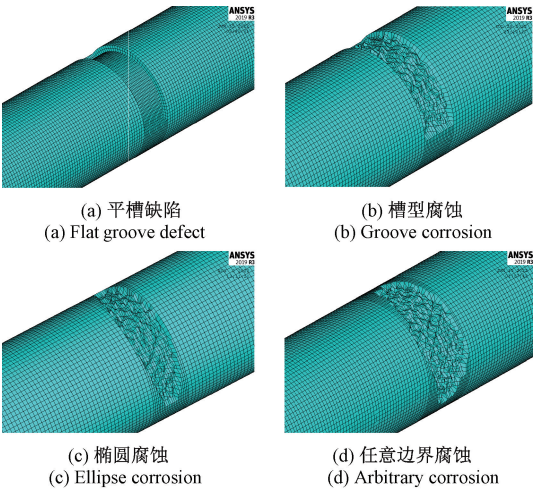


图 9 典型管道腐蚀模型

Fig. 9 Typical pipeline corrosion models

四种缺陷的最大轴向长度设置为 10~15 mm,最大径向深度控制在 3 mm 以内,周向宽度均设置为 150°。这

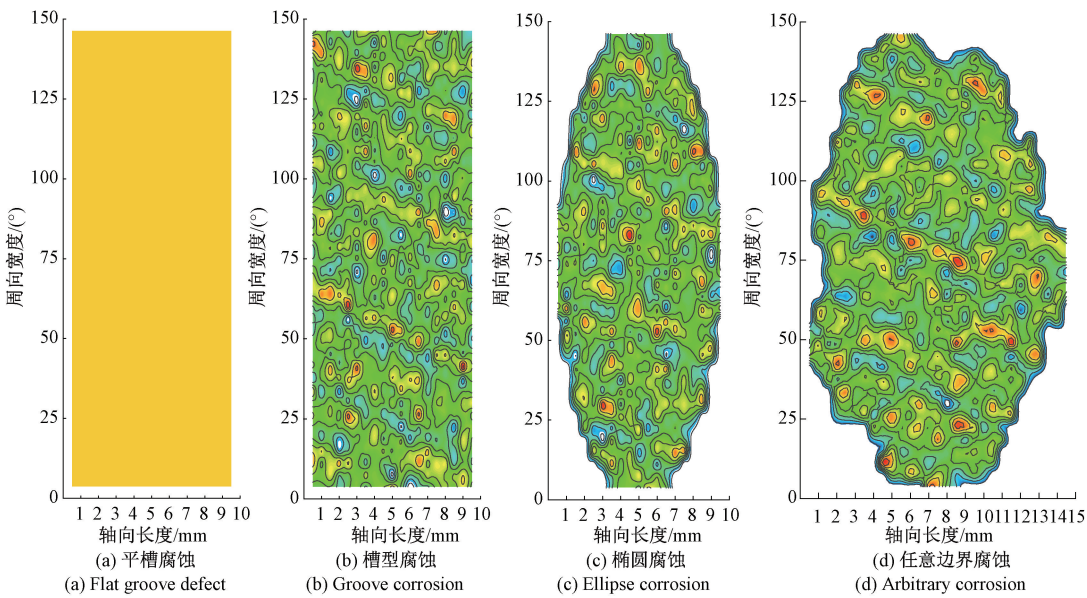


图 10 各典型管道腐蚀缺陷的总体形貌

Fig. 10 Surface morphology of all typical pipeline corrosion defects

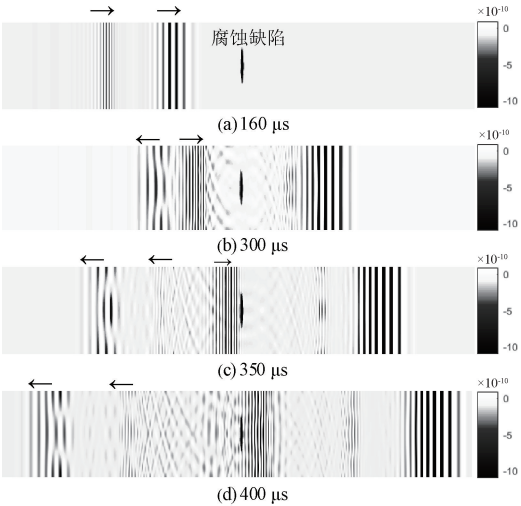


图 11 导波在腐蚀管道中传播及交互的位移场

Fig. 11 Displacement cloud diagram of propagating guided waves and interacting with corrosion in corroded pipeline

表 2 典型腐蚀缺陷的特征参数

Table 2 Characteristic parameters of typical corrosion defects

| 特征参数         | 平槽缺陷  | 槽型腐蚀  | 椭圆腐蚀  | 任意边界腐蚀 |
|--------------|-------|-------|-------|--------|
| (最大)轴向长度/mm  | 10    | 10    | 10    | 15     |
| (最大)周向宽度/(°) | 150   | 150   | 150   | 150    |
| (最大)径向深度/mm  | 2.00  | 2.51  | 2.47  | 2.60   |
| 平均径深/mm      | 2.00  | 1.83  | 1.86  | 2.11   |
| 材料损失率/%      | 46.31 | 30.47 | 23.39 | 21.68  |

160  $\mu\text{s}$  时刻云图显示  $L(0,2)$  模态和  $L(0,1)$  模态被激励并传播至腐蚀附近; $L(0,2)$  模态首先与腐蚀产生交互并发生非对称模态转换,如 300  $\mu\text{s}$  时刻云图所示;350  $\mu\text{s}$  时刻云图中, $L(0,2)$  模态与腐蚀交互产生对称转换模态,同时  $L(0,1)$  模态传播至腐蚀缺陷附近; $L(0,1)$  模态与腐蚀缺陷交互时导波能量被严重衰减,因此回波场中不易观测到反射  $L(0,1)$  模态,如 400  $\mu\text{s}$  时刻云图所示。

叠加各通道反射信号得到对应的回波数据,归一化处理的 4 种腐蚀缺陷回波信号如图 12 所示。图 12 (a)~(d) 分别为  $L$  模态超声导波在平槽缺陷、腐蚀槽缺陷、椭圆腐蚀缺陷和任意边界腐蚀产生回波信号。超声导波的管道腐蚀检测一般是通过分析腐蚀反射回波的幅值衰减程度进行腐蚀严重性的定性或定量评估。如 1.2 节所述,4 种不同的管道缺陷产生的反射

几种缺陷的具体参数,其中包括轴向长度、周向宽度、径向深度、平均径深和材料损失率(体积变化量/缺陷区原体积%)见表 2 中的总结。

仿真实验中管道样本参数与第 3 节所述管道模型参数一致。缺陷位于距离换能器 1 m 处,在换能器处沿轴向施加 175 kHz 的 toneburst 激励并接收轴向回波信号,即采用纵向  $L$  模态检测上述 4 种缺陷模型,进行有限元仿真对比实验。图 11 以任意边界腐蚀缺陷为例,给出了导波与腐蚀缺陷交互前后的位移场云图,图 11(a)~(d) 分别对应 160, 300, 350 和 400  $\mu\text{s}$  这 4 个时刻。其中,

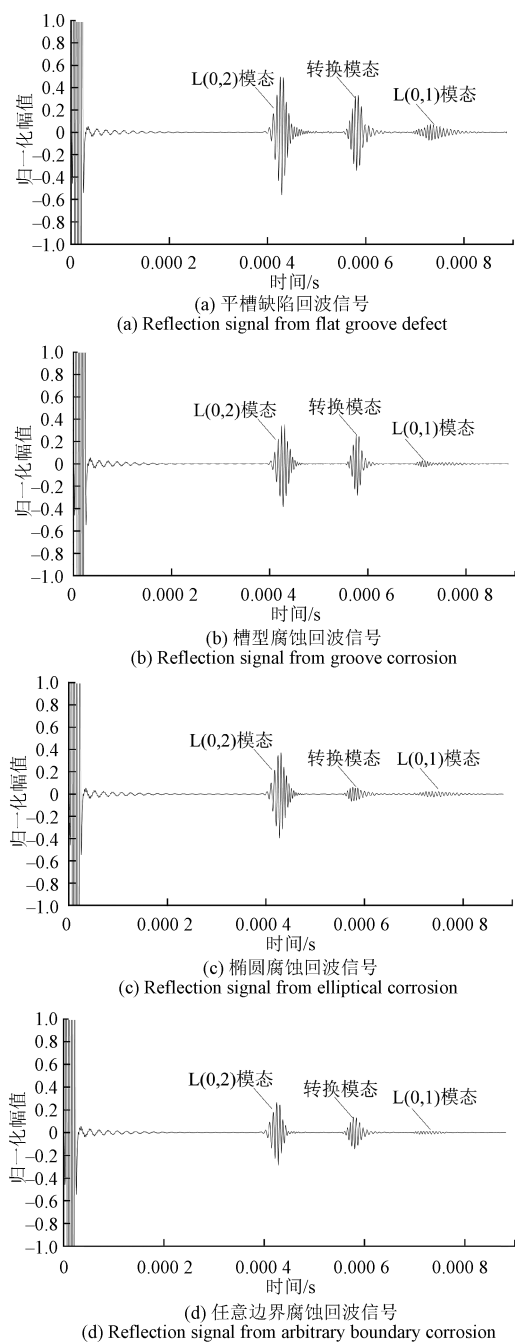


图12 不同缺陷产生的回波信号

Fig. 12 Refection signals from different defects

信号均主要包含3个波包,分别对应 $L(0,2)$ 模态、转换模态和 $L(0,1)$ 模态,计算反射回波中各个模态在不同管道缺陷情况下的能量变化并进行归一化处理,结果如图11所示。对数据进行分析可知,图12(b),(c)和(d)中由腐蚀缺陷所产生回波的各模态能量均小于平槽型缺陷,说明导波于腐蚀缺陷交互后,缺陷的腐蚀特征会造成导波能量的衰减,这也与大部分关于导波检测腐蚀文献中的结论一致。但不同模态在不同腐蚀区域内的衰减程度不同。其中, $L(0,2)$ 模态在任意边界

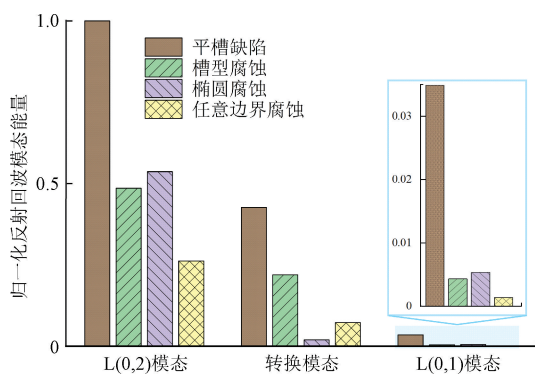


图13 各缺陷反射回波的归一化模态能量  
Fig. 13 Normalized mode energy of reflection signals from different defects

腐蚀缺陷处的衰减要比在其它两种腐蚀缺陷处的衰减更强,而相对更多的导波能量在椭圆腐蚀处被反射回接收端。回波中的 $L(0,1)$ 模态与腐蚀缺陷的交互过程与 $L(0,2)$ 模态类似,但腐蚀特性对 $L(0,1)$ 模态的影响更大, $L(0,1)$ 模态与腐蚀缺陷的交互产生了更强的能量衰减,而在不同形貌腐蚀缺陷处反射能量的变化规律则和 $L(0,2)$ 模态相同。转换模态的能量变化更为复杂,同时也提供了有益的数据,因为模态的转换及模态能量的分配与腐蚀缺陷边界有密切关系,对回波数据进行深入分析可获得更多关于腐蚀形貌的信息。

#### 4.2 不同严重性的管道腐蚀模型

如第3节所述,基于分形函数建立的腐蚀模型可以通过分形维数这一参数表征腐蚀缺陷的严重程度。为了进一步验证本文所提建模方法对于不同特征的腐蚀缺陷的表征能力,取不同分形维数值建立腐蚀缺陷模型,模型的其它参数保持不变。可将基于不同分形维数形成的腐蚀模型近似为轻度腐蚀、一般腐蚀、中度腐蚀以及重度腐蚀4种不同严重程度的管道缺陷类型,进一步研究其回波信号并进行分析讨论。

为便于比较不同严重性腐蚀缺陷对导波的影响,将各腐蚀缺陷模型在管道表面所占面积设置为一致,即所有缺陷的轴向长度均设置为10 mm,周向宽度均设置为 $120^\circ$ ,径向深度方向上的数据由分形函数生成。取分形维数 $D$ 分别为2.2,2.4,2.6和2.8建立4种腐蚀模型,这4种对应不同严重程度的管道腐蚀缺陷的有限元实体模型如图14(a)~(d)所示,所有缺陷的总体形貌见图15。从图14和15可清楚地看到,随着分形维数的增大,腐蚀深度方向的幅值起伏逐渐加强,腐蚀区域内的结构逐渐致密,整体形貌变得越来越复杂,这也符合绝大多数腐蚀缺陷严重程度发展变化过程的基本规律。以上4种腐蚀缺陷的其它参数,包括径向深度、平均径深和材



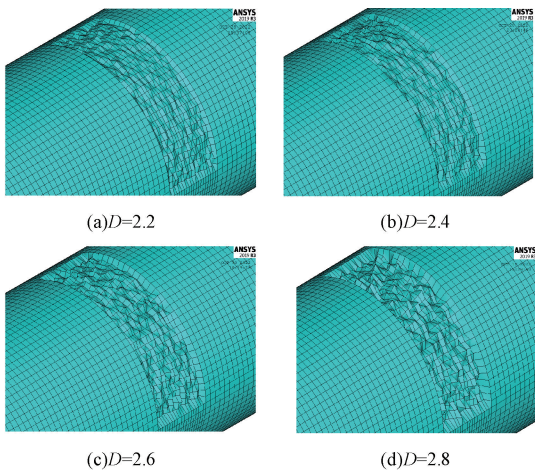


图 14 不同严重程度的管道腐蚀模型

Fig. 14 Pipeline corrosion models with different severities

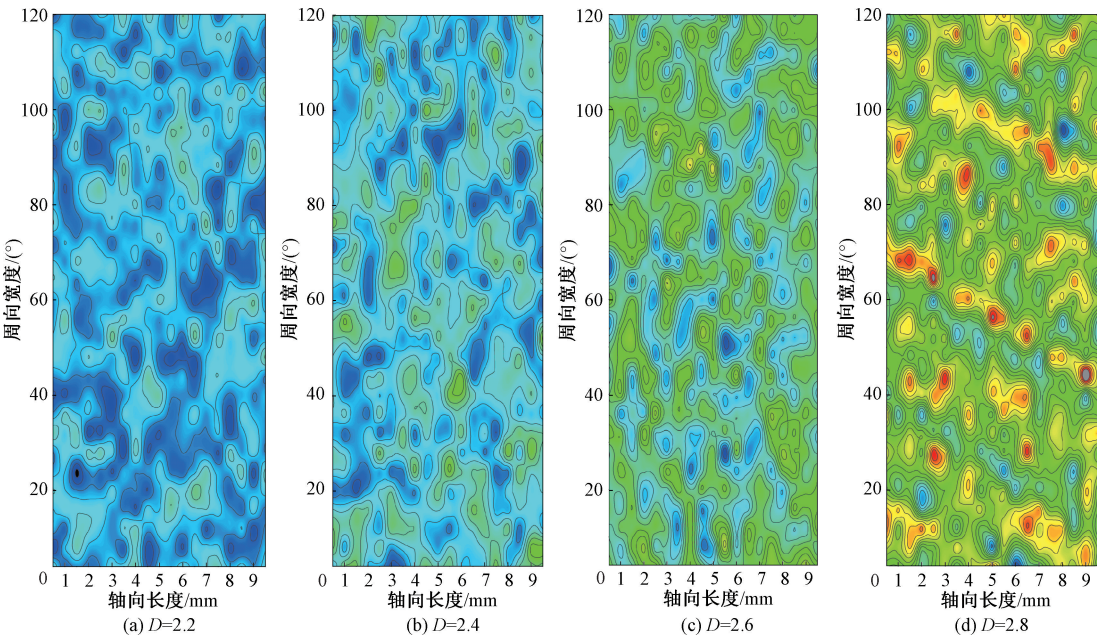


图 15 不同严重程度的腐蚀缺陷总体形貌

Fig. 15 Surface morphology of corrosion defects with different severities

图 16 中可见,不同严重程度的腐蚀缺陷产生的回波信号中均包含  $L(0,2)$  模态、转换模态和  $L(0,1)$  模态,其中  $L(0,2)$  模态为主模态。随着分形维数的增大或腐蚀严重程度的增加,回波信号各模态的幅值均逐渐增强,这与检测评估其它形式的管道缺陷所得到的结论或规律类似。进一步计算反射回波中各个模态在不同严重程度管道缺陷情况下的能量变化并进行归一化处理,结果如图 17 所示。对数据进行分析可知,腐蚀缺陷回波能量与腐蚀严重程度间呈现非线性关系,其中  $L(0,2)$  模态的变化更为明显。如当分形维数由 2.6 增大到 2.8,对应腐蚀严重程度

料损失率如表 3 中所示。

表 3 不同严重程度腐蚀缺陷的特征参数  
Table 3 Parameters of corrosions with different severities

| 特征参数        | $D=2.2$<br>腐蚀 | $D=2.4$<br>腐蚀 | $D=2.6$<br>腐蚀 | $D=2.8$<br>腐蚀 |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| (最大)径向深度/mm | 0.93          | 1.22          | 1.76          | 2.80          |
| 平均径深/mm     | 0.48          | 0.62          | 0.89          | 1.31          |
| 材料损失率/%     | 11.02         | 14.19         | 20.46         | 30.24         |

这部分仿真实验所用管道样本的参数与上述实验所用参数相同,激励 175 kHz 纵向 L 模态超声导波对 4 种不同严重程度的腐蚀缺陷进行检测。所得数据进行归一化处理后的回波信号如图 16 所示。

依次递增时,回波中  $L(0,2)$  模态能量出现较大增长。由于  $L(0,1)$  模态在管道厚度方向上的径向位移较大,对腐蚀缺陷在径向上的变化更为敏感,因此随着腐蚀严重程度的增大, $L(0,1)$  回波能量呈现出较为均匀的增长趋势。结合 4.1 节的分析结果说明,管道腐蚀缺陷的导波回波与腐蚀深度、材料损失率和腐蚀区内缺陷的复杂度等均有关系,因为有以下多种因素的影响,管道腐蚀缺陷的导波回波呈现出更多的复杂性。而利用可反映实际腐蚀形貌及腐蚀更多特性信息的缺陷模型,研究腐蚀缺陷随各种影响因素变化下的规律可为进一步准确量化腐蚀特征提供有用信息。

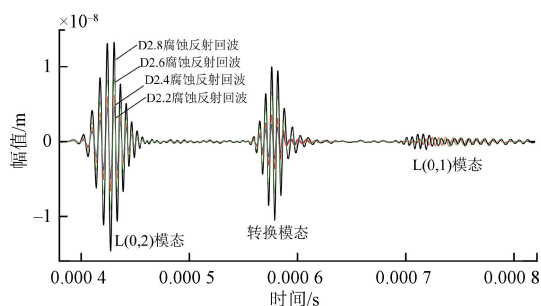


图16 不同严重程度的腐蚀缺陷回波信号

Fig. 16 Reflection signals from corrosion defects with different severities

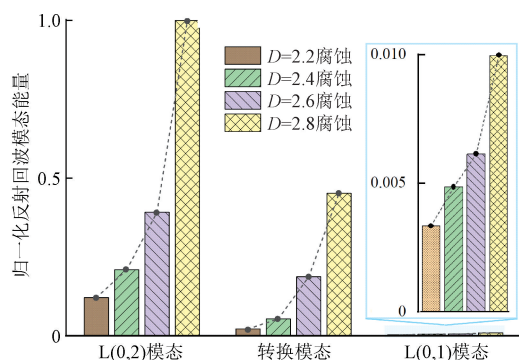


图17 各腐蚀反射回波的归一化模式能量

Fig. 17 Normalized mode energy of reflection signals from different corrosions

## 5 结 论

本文研究了管道超声导波领域腐蚀缺陷的模型及其有限元建模仿真问题。为了在管道导波检测研究中更准确地反映腐蚀缺陷的复杂形貌并在此基础上获得更为准确的腐蚀回波信号,提出了基于W-M分形函数设计管道腐蚀形貌模型并对模型参数进行了讨论,进一步设计实现了腐蚀管道导波检测的自动化建模及仿真过程。为验证本文提出的腐蚀缺陷模型及建模方法,讨论了不同特征管道腐蚀及不同严重程度管道腐蚀产生的回波信号。所得结果也说明基于本文提出的腐蚀模型所得缺陷回波可反映出更丰富的缺陷信息,如衰减特性、多种模式的不同敏感性等等。本文工作可为充分理解超声导波在管道腐蚀的复杂散射,建立有效管道腐蚀缺陷量化评估技术提供理论基础。

## 参考文献

[1] 杨理践,耿浩,高松巍.长输油气管道漏磁内检测技术[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1736-1746.

YANG L J, GENG H, GAO S W. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8):1736-1746.

[2] 黄松岭,王哲,王坤,等.管道电磁超声导波技术及其应用研究进展[J].仪器仪表学报,2018,39(3):1-12.

HUANG S L, WANG ZH, WANG K, et al. Review on advances of pipe electromagnetic ultrasonic guided waves technology and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3):1-12.

[3] 谭冰芯,戴波.管道腐蚀缺陷超声导波检测数值模拟[J].控制工程,2015,22(2):334-341.

TAN B X, DAI B. Numerical simulation of corrosion inspection in pipeline using ultrasonic guided waves[J]. Control Engineering of China, 2015, 22(2):334-341.

[4] RIBEIRO M, KUBRUSLY A, AYALA H, et al. Machine learning-based corrosion-like defect estimation with shear-horizontal guided waves improved by mode separation[J]. IEEE Access, 2021, 9: 40836-40849.

[5] HOWARD R, CEGLA F. Detectability of corrosion damage with circumferential guided waves in reflection and transmission[J]. NDT & E International, 2017, 91: 108-119.

[6] LØVSTAD A, CAWLEY P. The Reflection of the fundamental torsional guided wave from multiple circular holes in pipes [J]. NDT & E International, 2011, 44: 553-562.

[7] LØVSTAD A, CAWLEY P. The reflection of the fundamental torsional mode from pit clusters in pipes [J]. NDT & E International, 2012, 46: 83-93.

[8] 王晓娟,秦晨,刘君.管道点蚀检测的导波仿真优化研究[J].仪器仪表学报,2019,40(1):166-174.

WANG X J, QIN CH, LIU J. Study on the simulation optimization of guided waves for the inspection of the pitting in pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1):166-174.

[9] 翁永基,李相怡.腐蚀预测和计量学基础—从试验到数据分析,建模与预测[M].石油工业出版社,2011. WENG Y J, LI X Y. Corrosion prediction and basic chemometrics—From experiments to data analysis,

- modeling and prediction[M]. Petroleum Industry Press, 2011.
- [10] WASIM M, DJUKIC M. 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):104467.
- [11] 王晓娟, 赵锴, 郑毅. 管道纵向超声导波的对称模式转换特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 151-160.
- WANG X J, ZHAO K, ZHEN Y. Characteristics of symmetric mode conversion of longitudinal guided-wave modes in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 151-160.
- [12] 林建辉, 任呈强, 刘丽, 等. 金属腐蚀形貌的分形特性研究综述[J]. 材料导报, 2013(9): 107-111.
- LIN J H, REN CH Q, LIU L, et al. A review on fractal character of metal corrosion morphology[J], Materials Reports, 2013(9): 107-111.
- [13] DEO R, RATHNAYAKA S, ZHANG C, et al. Characterization of corrosion morphologies from deteriorated underground cast iron water pipes[J]. Materials and Corrosion, 2019(1): 1-15.
- [14] 邓可月, 刘政, 邓居军, 等. W-M 函数模型下表面轮廓形貌的变化规律[J]. 机械设计与制造, 2017(1): 47-50.
- DENG K Y, LIU ZH, DENG J J, et al. Variation of surface profile topography based on W-M function model[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(1): 47-50.
- [15] CUI W, WANG L, LUO Y. Modeling of three-dimensional single rough rock fissures: A study on flow rate and fractal parameters using the Weierstrass-Mandelbrot function[J]. Computers and Geotechnics, 2022(144): 104655.
- [16] DOBSON J, CAWLEY P. The scattering of torsional guided waves from Gaussian rough surfaces in pipework[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(3): 1852-186.

## 作者简介



王晓娟(通信作者), 2011 年于香港城市大学获得博士学位, 现为西安理工大学讲师, 主要研究方向为结构无损检测等。

E-mail: xjwang@xaut.edu.cn

**Wang Xiaojuan** (Corresponding author)

received her Ph. D. degree from City University of Hong Kong in 2011. She is currently a lecture at Xi'an University of Technology. Her main research interests include NDT, etc.



杨帆, 2020 年于西安理工大学获得学士学位, 现为西安理工大学机仪学院硕士研究生, 主要研究方向为超声无损检测。

E-mail: 1193971184@qq.com

**Yang Fan** received his B.Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2020. He is currently a master student in the School of Mechanical and Precision Instrument Engineering at Xi'an University of Technology. His main research interests include NDT, etc.