

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.03.018

基于超声的PE拉伸失效过程探究及前兆预测

赵民心, 李俊, 史君林, 李涛, 陈晔

(四川轻化工大学机械工程学院, 四川自贡 643000)

摘要: 为了探究聚乙烯(PE)管道拉伸失效过程中的声速变化规律,在5种不同形变速率的拉伸破坏实验基础上,采用脉冲反射法和4种频率对PE管材拉伸破坏过程中的声速分布规律进行了研究,结合幂函数法和超声声速模型建立了基于声速的PE材料失效预测模型。结果表明,PE管材在拉伸破坏过程中的声速与管材的失效程度和超声频率有很好的线性关系,而与形变速率关系并不显著;在弹性阶段的声速稳定在2 200 m/s以上,屈服阶段的声速范围维持在2 100~2 200 m/s之间,颈缩阶段的声速范围维持在1 900~2 100 m/s之间,断裂阶段材料声速范围维持在1 700~1 900 m/s之间;超声失效预测模型能很好地拟合PE材料的拉伸性能,发现拟合结果与实验结果基本一致,其误差在3.4%左右。最后在上述研究基础上提出了基于声速的PE管材失效前兆预测方法,验证结果表明基于声速的PE管材失效前兆预测方法是可行的。

关键词: 聚乙烯;力学响应;预测模型;超声检测;失效预测

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)03-0107-06

Investigation and Prediction of Tensile Failure Process of Polyethylene based on Ultrasound

Zhao Minxin, Li Jun, Shi Junlin, Li Tao, Chen Ye

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract : In order to investigate the change law of sound velocity in the process of tensile failure of polyethylene (PE) pipe, the distribution law of sound velocity in the process of tensile failure of PE pipe was studied by means of pulse reflection method and four frequencies on the basis of the tensile failure experiment of five different deformation rates. The failure prediction model of PE material based on sound velocity was established by combining the power function method and ultrasonic sound velocity model. The results show that the sound velocity has a good linear relationship with the failure degree and ultrasonic frequency of PE pipe in the process of tensile failure, but has no significant relationship with the deformation rate. The sound velocity is stable above 2 200 m/s in the elastic stage, 2 100–2 200 m/s in the yield stage, 1 900–2 100 m/s in the neck contraction stage, and 1 700–1 900 m/s in the fracture stage. The ultrasonic failure prediction model can well fit the tensile mechanical properties of PE material, and the fitting results are basically consistent with the experimental results, with an error of about 3.4%. Finally, on the basis of the above research, a prediction method of the failure precursor of PE pipe based on sound velocity is proposed. The verification results show that the prediction method of the failure precursor of PE pipe based on sound velocity is feasible.

Keywords : polyethylene ; mechanical response ; prediction model ; ultrasonic detection ; prediction of failure

聚乙烯(PE)塑料管道作为一种经济环保的绿色管道,由于其使用寿命长(可达50年)、综合性能好,已经被广泛用于世界各个行业领域^[1]。近年来,随着PE管道的使用范围和年限逐渐增加,PE管道失效事故频繁发生,对管道安全运输提出了巨大的挑

战。PE管材的失效程度是决定管道安全运输的关键^[2],为了能够快捷、高效地检测出PE管材的失效程度,笔者研究采用携带方便、操作简单、可靠性高的超声波检测方法。

与其它的无损检测相比,超声检测具有轻便、

基金项目: 国家质检总局科研项目(2017QK121),过程装备与控制工程四川省高校重点实验室项目(GK201809)

通信作者: 李俊,教授,主要从事智能化系统安全保障和低位能源利用以及非金属管道及压力容器监测技术研究

收稿日期: 2023-02-17

引用格式: 赵民心,李俊,史君林,等.基于超声的PE拉伸失效过程探究及前兆预测[J].工程塑料应用,2023,51(3):107–112.

Zhao Minxin, Li Jun, Shi Junlin, et al. Investigation and prediction of tensile failure process of polyethylene based on ultrasound[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3): 107–112.

灵活、检测范围广和经济成本低的优势^[3]。随着PE管道的应用范围不断扩大,期间国内外大量的学者利用超声对PE管材失效展开了大量的研究。Frederick等^[4]使用多种超声相控阵低频探头检测PE管热熔接头中的未熔合、孔洞、夹杂物等人工缺陷,证明相控阵具有表征这些缺陷的能力。龙盛蓉等^[5]采用自制的纵波斜探头对PE管对接焊缝中人工缺陷进行超声检测,提取8个典型的特征量,建立线性表达式,并通过试验进行验证。张琳^[6]采用聚砷作为楔块材料,检测了模拟制备的典型热熔焊接缺陷,得出超声波对面积型和孔洞型缺陷有良好的检测能力。王海涛等^[7]采用2 MHz纵波对平底孔和夹渣缺陷的PE管热熔焊缝试样进行超声检测,得出超声纵波倾斜入射的方式对焊接接头内部缺陷有很好的检测灵敏度。王少军等^[8]提出超声相控阵动态聚焦和S扫描成像技术,对PE管热熔接头进行测试,验证了该方法的可行性。Gomes等^[9]使用非线性超声导波在PE样品屈服前评估其初期塑性行为,结果表明,随着弯曲变形的增加,超声参数的变化明显更高。李伟等^[10]采用非线性超声检测技术对轴向静力拉伸中的T700型碳纤维复合材料板进行试验研究,得出了非线性参数与超声衰减系数的关系。

目前,利用超声对PE管道的研究多是焊接缺陷检测,对PE管道拉伸破坏过程中的声速分布规律还没有深入研究。而现如今PE管道的失效原因主要是材料质量失效和老化失效^[11],这两种失效模式主要是由于管道内外压强不均匀导致的,进而使管道的轴向和周向受到拉伸破坏。除此之外,高分子管道和压力容器的事故预警和寿命预测一直存在问题。鉴于此,笔者研究通过拉伸试验得到不同形变速率下的PE管材参数,结合幂函数法和声速模型建立了基于超声的预测模型,并通过脉冲反射法得出了拉伸失效破坏过程中的声速分布规律。最后在上述研究的基础上提出了基于超声声速的PE管材失效预测方法,为解决高分子管道和压力容器失效预测及安全监测问题提供理论参考。

1 实验部分

1.1 原材料

线性低密度PE (PE-LLD): PE-LLD100, SDR11,成都川盛塑胶有限公司。

1.2 仪器与设备

微机控制电子万能试验机:CMT5504型,配套

控制软件为SANS Power-Test,美特斯工业系统(中国)有限公司;

数字超声式超声波探伤仪:HS-620型,配套HS&KW系列探伤管理软件,武汉中科创新科技股份有限公司;

哑铃型制样机:XYZ-12型,承德市金建检测仪器有限公司。

1.3 试样制备

根据GB/T 1040.1-2018,将外径为110 mm、壁厚为6 mm的PE水管制成1B型标准试样,并通过打磨消除残余应力。试样主要尺寸参数列于表1。

表1 试样主要尺寸参数

参数名称	参数值
总长度 L_3	150
窄部平均长度 L_1	60.0±0.5
宽平行部分长度 L_2	106~120
端部平均宽度 b_2	20±0.2
窄部平均宽度 b_1	10±0.2
标距 L_0	50±0.5
夹具间初始距离 L	110
半径 r	≥60
试样厚度 h	6±0.2

1.4 实验方案

根据GB/T 1040.2-2006,采用微机控制电子万能试验机对试样进行拉伸试验,拉伸过程中同时采用超声探伤仪对拉伸试样在不同时刻的超声回波信号进行采集并做好记录,最后对采集的数据进行声速计算。实验中按照10,20,30,40,50 mm/min的速度对PE试样进行恒速拉伸,每种拉伸速度下分别采用2.5,3,4,5 MHz四种频率的探头进行采集回波信号,每种拉伸速度下做3组相同试样的平行实验。

2 管材力学性能的超声表征

PE是典型的热塑性材料,其形变过程分为线性和非线性两部分。常规的比例定律只能反映线性的应力-应变关系,为了准确地描述应力-应变的非线性部分,采用幂函数法^[12]来描述材料的应力-应变曲线。

$$\sigma = \sigma_0 \left[A - B \left(\frac{\sigma_0}{E\varepsilon} \right)^c \right]^m \quad (1)$$

式中: σ_0 ——参考应力;

E ——弹性模量;

ε ——对应应力的应变;

A, B, c, m ——应力-应变曲线中的4个常数。

2.1 拉伸实验

使用万能拉伸试验机分别以10,20,30,40,50

mm/min 速率做拉伸实验,图1为5种拉伸速度下的工程应力-应变曲线图。

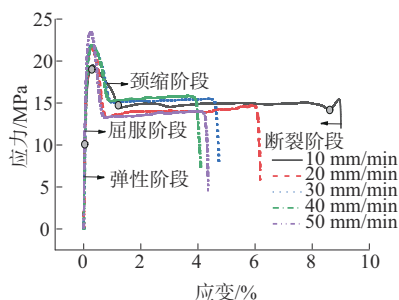


图1 不同拉伸速下的工程应力-应变图

由于试验过程中材料的长度和横截面积变化较大,因此按照公式(2)、公式(3)将实验数据转化为真实应力 σ_t -应变 ε_t 曲线^[13]。

$$\sigma_t = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0(1 - \mu\varepsilon_0)^2} = \frac{\sigma_0}{(1 - \mu\varepsilon_0)^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_0) \quad (3)$$

式中: F ——受力,N;

S_0 ——试样初始截面积, m^2 ;

S ——不同应变下的截面积, m^2 ;

σ_0 ——工程应力,MPa;

ε_0 ——工程应变,%;

l ——长度变化,m;

l_0 ——原始长度,m;

μ ——泊松比。

2.2 超声预测模型

波速法是超声波检测材料性能的常用方法,利用波在材料中的传播速度来反应其力学性能的一种方法。波的传播速度与材料的强度和软硬度有关,强度又与密度、弹性模量和泊松比有关。例如,在固体介质中纵波传播波速为^[14]:

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 + 2\mu)}} \quad (4)$$

式中: v_L ——超声纵波波速,m/s;

ρ ——介质密度, kg/m^3 ,取值为960。

μ ——0.45^[15]。

由(4)式可以看出,超声波声速直接表征了材料的弹性模量和密度,亦直接反映了材料的强度。当材料松软时,其强度小,说明其弹性模量和密度的综合结果较小,则材料的声速越小,反之则材料声速越大。

令 $\mu_0 = \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 + 2\mu)}$,根据式(1)、式(4)和拉伸

试验得到的应力-应变曲线数据可以算出 $B=0.49$, $c=1$, $m=0.34$, $A=1$ 。此时表达式(1)为:

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - 0.49 \left(\frac{\sigma_0 \mu_0}{\varepsilon \rho v^2} \right) \right]^{0.34} \quad (5)$$

将超声测得的 E 值带入式(5)拟合而成的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线与试验曲线结果对比,如图2所示。由图2可知,拟合结果与试验结果重合度较高,在合适的范围内,最大误差为3.4%,表明此超声预测模型可以精确地预测PE管道的力学性能,因此该模型对PE失效情况有较好的预测能力。

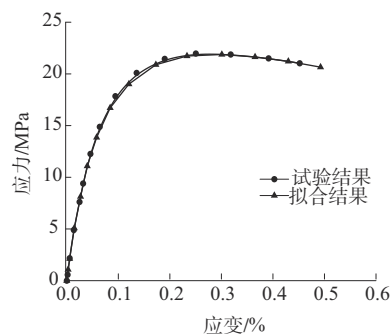


图2 试验与拟合结果对比

3 PE形变过程声速变化规律

3.1 整体形变声速变化规律

图3为材料50 mm/min拉伸速度下不同频率声速变化规律图。由图3可以看出,材料声速随频率增大而增大,随形变程度的加深而减小。上述声速变化规律可以根据超声波在固体介质中纵波声速式(4)和声波传播速度与频率之间的关系式来解释,超声波传播速度与频率之间的关系式如式(6)所示^[16]:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6)$$

式中: λ ——波长,nm;

c ——声波的传播速度;

f ——声波频率,MHz。

当形变增加时,材料的弹性模量和密度都会在一定程度上变小,弹性模量和密度的综合数值将会变小,所以根据式(4)可以证明材料声速随形变增加而减小。由式(6)可以看出波速与波长及频率有关,当频率较大时,超声的衰减比较严重,波长会增大,所以材料的声速随着频率的增加而增加。

除此之外,通过图3可以看出在4,5 MHz检测出来的声速值比2.5,3 MHz测出的值要多出100左

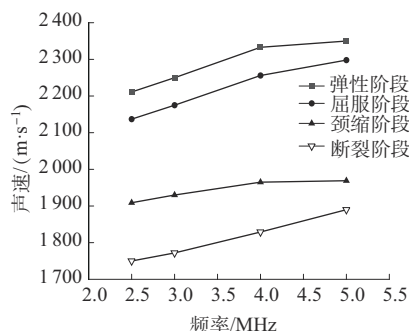


图3 50 mm/min拉伸速度下不同频率各阶段声速图

右。这是由于高频的衰减系数较大,导致不同频率之间的声速有一定的差异。为了保证实验数据的准确性,通过查阅文献发现PE材料的声速值更接近2 200 m/s,这说明2.5 MHz和3 MHz的检测效果更好,因此后面的试验都以频率为2.5和3 MHz进行。

图4是材料在2.5 MHz频率下不同拉伸速度时声速变化图。由图4可以看出,不同拉伸速度下材料声速基本没有变化,声速分布均匀,说明拉伸速度对材料声速没有影响。这是因为材料的声速只是与材料本身的性能有关,与拉伸速度没有直接的

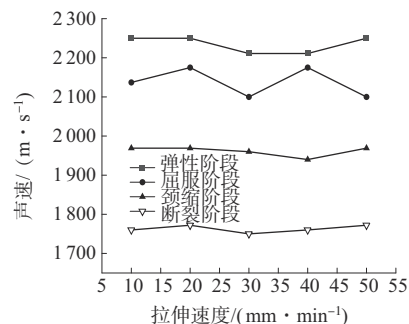


图4 2.5 MHz频率下不同拉伸速度各阶段声速图

表2 50 mm/min拉伸速度下不同频率各阶段的声速

测量频率 /MHz	弹性阶段		屈服阶段		颈缩阶段		断裂阶段	
	声速范围	平均声速	声速范围	平均声速	声速范围	平均声速	声速范围	平均声速
2.5	[2.2~2.3]	2.210	[2.1~2.2]	2.137	[1.9~2.0]	1.900	[1.7~1.8]	1.750
3	[2.2~2.3]	2.250	[2.1~2.2]	2.175	[1.9~2.0]	1.930	[1.7~1.8]	1.772

表3 2.5 MHz频率下不同拉伸速度各阶段声速

拉伸速度 /(mm·min ⁻¹)	弹性阶段		屈服阶段		颈缩阶段		断裂阶段	
	声速范围	平均声速	声速范围	平均声速	声速范围	平均声速	声速范围	平均声速
10	[2.2~2.3]	2.25	[2.1~2.2]	2.137	[1.9~2.0]	1.969	[1.7~1.8]	1.760
20	[2.2~2.3]	2.25	[2.1~2.2]	2.175	[1.9~2.0]	1.969	[1.7~1.8]	1.772
30	[2.2~2.3]	2.21	[2.1~2.2]	2.100	[1.9~2.0]	1.960	[1.7~1.8]	1.750
40	[2.2~2.3]	2.21	[2.1~2.2]	2.175	[1.9~2.0]	1.940	[1.7~1.8]	1.760
50	[2.2~2.3]	2.25	[2.1~2.2]	2.100	[1.9~2.0]	1.960	[1.7~1.8]	1.772

4 失效预测与验证

4.1 前兆预测

根据上述PE形变过程中声速变化规律,提出了如下所示的基于超声声速的PE燃气管材拉伸失效

关系,只能说拉伸速度加快了形变的速率,并没有改变材料固有的性质。

3.2 阶段形变声速分布规律

表2和表3分别是不同频率和不同拉伸速度下形变各阶段声速分布范围统计表,由表可以得出以下各形变阶段声速分布规律:

(1)在弹性阶段,由于材料组织结构和强度没有发生大的变化,其声速值与材料标准声速值较为接近。在2.5和3 MHz频率下检测出材料的声速范围在2 200~2 300 m/s之间,平均声速为2 230 m/s。

(2)在屈服阶段,由于材料在拉伸过程中产生了银纹,其组织结构和强度有所降低,所以材料的声速开始降低。在2.5,3 MHz频率下声速范围保持在2 100~2 200 m/s之间,平均声速为2 156 m/s。

(3)在颈缩阶段,由于材料发生快变形,材料内部分子链断裂,微晶结构重组,快速裂纹产生,材料强度快速下降,因此声速也随着下降。在2.5,3 MHz频率下声速范围保持在2 000~1 900 m/s之间,平均声速为1 920 m/s。

(4)在断裂阶段,材料的内部结构遭到完全破坏,强度降到最低。在2.5,3 MHz频率下声速范围保持在1 700~1 800 m/s之间,平均声速为1 761 m/s。

根据上述结果看出,声速与材料形变过程有很好的线性关系,并且材料形变各阶段声速分布规律明显,说明声速对材料的形变阶段有一定的预测能力。

前兆预测方法。

(1)在PE管材服役过程中,当测量出超声声速低于2 200 m/s时,即PE管材损伤已经开始。

(2)对监测到的PE损伤过程中的超声数据进行

分析,并根据超声特性按以下方法分类,以此来评估失效阶段并发出以下相应的等级预警。

A 当超声声速在 2 100 ~ 2 200 m/s 时,PE 材料进入屈服阶段,损伤已经开始了,需要有一定的示警信号,并对相关管道进行评估;

B 当超声声速在 1 900 ~ 2 100 m/s 时,PE 材料进入颈缩阶段,需要较高级别的预警,并及时检修更换相关设备;

C 当超声声速在 1 700 ~ 1 900 m/s 时,PE 管道处于断裂阶段,需要发出更高级别的预警信号,甚至无关人员撤离。

4.2 实验验证

为了验证上述前兆预测方法,为此做了验证性实验。任意选取了 5 个 PE 试样分别在 10 ~ 50 mm/min 的拉伸速度下进行实验,同时用超声波探伤仪进行测量。将 5 个试样分别用 5 个拉伸速度任意拉伸,在每一个试样上随机选点测量超声声速,根据声速值的分布范围和预测结果,对比抽样点拉伸应力-应变曲线,判断预测结果是否处于相应的阶段,从而验证前兆预测方法的准确性。5 个 PE 试样抽样点声速及预测和对比结果列于表 4。

表 4 5 个试样声速值及预测和对比结果

PE 试样	声速/(m·s ⁻¹)	预测结果	对比结果
试样 1	2 162	屈服阶段	√
	2 032	颈缩阶段	√
	1 890	断裂阶段	√
试样 2	2 180	屈服阶段	√
	1 930	颈缩阶段	√
	1 850	断裂阶段	√
试样 3	2 133	屈服阶段	√
	1 980	颈缩阶段	√
	1 750	断裂阶段	√
试样 4	2 155	屈服阶段	√
	2 056	颈缩阶段	√
	1 865	断裂阶段	√
试样 5	2 172	屈服阶段	√
	2 042	颈缩阶段	√
	1 838	断裂阶段	√

试验结果表明,PE 试样在拉伸的整个过程中,根据对超声测量的数据来分析,按照失效前兆预测的方法,可以判断出超声特性对应的材料失效阶段。对比测量点的表面形貌图,两者都能一一对应,验证了 PE 拉伸过程中变形失效破坏前兆预测方法的准确性。

5 结论

(1)建立的超声预测模型可以比较准确地描述拉伸失效过程中 PE 管材力学性能变化情况,试验曲

线与拟合曲线最大相对误差为 3.4% 左右。

(2)针对 PE 材料,采用 2.5 MHz 效果比其它频率的效果好,频率越大声速值误差越大,拉伸速度对声速值没有影响。

(3) PE 形变程度越深声速值越小,弹性阶段的声速稳定在 2 200 m/s 以上,屈服阶段的声速范围维持在 2 100 ~ 2 200 m/s 之间,颈缩阶段的声速范围维持在 1 900 ~ 2 100 m/s 之间,断裂阶段材料声速范围维持在 1 700 ~ 1 900 m/s 之间。

(4)根据 PE 材料拉伸变形失效的前兆预测实验验证显示,通过声速变化来预测 PE 材料失效阶段的方法准确性高,对于 PE 燃气管道的安全监测的工程运用具有很强的实用性。

参考文献

- [1] Ahmad S, Mohammed H, Shah J, et al. The influence of Ziegler natta and metallocene catalysts on polyolefin structure properties and processing ability[J]. Materials, 2014, 7(7). DOI: 10.3390/ma7075069.
- [2] 伍树坤. 燃气用聚乙烯管热熔对接接头的 X 射线检测和超声波检测应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
Wu Shukun. Research on X-radiographic test of fusion-butt welds of polyethylene gas pipe[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [3] 陈庆东. 超声波检测技术[J]. 城市道桥与防洪, 2010(10): 190–192, 212.
Chen Qingdong. Ultrasonic testing technology[J]. Urban roads and bridges and flood control 2010(10): 190–192, 212.
- [4] Frederick C, Porter A, Zimmerman D. High-density polyethylene piping butt-fusion joint examination using ultrasonic phased array[J]. Journal of pressure vessel technology, 2010, 132(5). DOI: 10.1115/1.4001212.
- [5] 龙盛蓉, 于润桥, 马娟. PE 管对接焊缝超声波检测信号特征量提取与分析[J]. 无损检测, 2009, 31(6): 442–444.
Long Shengrong, Yu Runqiao, Ma Juan. The extraction and analysis on the features of ultrasonic testing signal getting from PE butt weld[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(6): 442–444.
- [6] 张琳. 超声波检测 PE 管道热熔焊接缺陷的实验研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(2): 90–94.
Zhang Lin. Experimental study on ultrasonic detection of hot melt welding defects of PE pipeline[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(2): 90–94.
- [7] 王海涛, 吴琼, 康正亮. 聚乙烯管热熔对接焊缝超声检测实验研究[J]. 失效分析与预防, 2016, 11(4): 203–207.
Wang Haitao, Wu Qiong, Kang Zhengliang. Research on ultrasonic

- testing method for PE pipe hot melt butt weld seam[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2016, 11(4): 203–207.
- [8] 王少军, 裴爱东, 宋盼, 等. 埋地聚乙烯管道热熔接头的超声相控阵检测[J]. *无损检测*, 2017, 39(5): 21–23, 69.
- Wang Shaojun, Qiu Aidong, Song Pan, et al. Ultrasonic phased array testing for hot melt Joint of buried polyethylene pipeline[J]. *Nondestructive Testing*, 2017, 39(5): 21–23, 69.
- [9] Gomes F, West W, Thompson M R. Effects of annealing and swelling to initial plastic deformation of polyethylene probed by nonlinear ultrasonic guided waves[J]. *Polymer*, 2017(131): 160–168.
- [10] 李伟, 黄远航, 刘鑫, 等. 非线性超声检测技术在 T700 型碳纤维复合材料早期力学性能测试方面的应用[J]. *理化检验(物理分册)*, 2018, 54(7): 487–491.
- Li Wei, Hang Yuanhang, Liu Xin, et al. Application of nonlinear ultrasonic testing technology in early mechanical properties of T700 carbon fiber composites[J]. *Physical and Chemical Tests (Physical Volume)*, 2018, 54(7): 487–491.
- [11] 华晔, 武志军, 熊志敏, 等. 聚乙烯(PE)燃气管道近期发展动态[J]. *全面腐蚀控制*, 2014, 28(4): 34–40, 44.
- Hua Ye, Wu Zhijun, Xiong Zhimin, et al. Recent development of polyethylene (PE) gas pipeline[J]. *Comprehensive corrosion control*, 2014, 28(4): 34–40, 44.
- [12] 张志平. 广义切线模量理论及其应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- Zhang Zhiping. Generalized tangent modulus theory and its applications[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [13] 殷鹰, 蓝朝逊, 李俊, 等. 埋地 PE 燃气管道地质沉降破坏数值分析[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(10): 18–23.
- Yin Ying, Lan Chaoxun, Li Jun, et al. Numerical analysis of geological settlement failure of buried PE gas pipeline[J]. *Chinese Journal of Safety Science*, 2019, 29(10): 18–23.
- [14] 杭纲领. 灌注桩超声波透射法质量评价的可靠性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.
- Hang Gangling. The research on application of ultrasonic transmission method for testing bored piles[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2010.
- [15] Luo X, Lu S, Shi J, et al. Numerical simulation of strength failure of buried polyethylene pipe under foundation settlement[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 48: 144–152.
- [16] 张全兴. 超声波非均匀介质传播衰减特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- Zhang Quanxing. Study on the attenuation laws of ultrasonic propagation in the inhomogeneous media[D]. Shenyang: Shenyang University of technology, 2015.