



弯曲作用下承插式管道柔性接口力学性能试验

朱 德¹, 赵 优¹, 任雪振²

(1. 焦作工贸职业学院, 河南 焦作 454550; 2. 中德新亚建筑材料有限公司, 河南 新密 452300)

摘要:为分析单调加载方式下不同加载速率对承插式柔性接口力学性能的影响规律,进行 DN150 mm 弯曲作用下球墨铸铁管道承插式柔性接口单调加载试验,并基于弯矩和转角、转角和拔出位移数据,建立柔性接口的弯矩-转角-轴向位移关系所服从的一般规律,给出形式简洁的数学表达式。试验结果表明:1)在接口转角位移未达到接触转角位移时,加载速率对接口弯矩值影响较小;接口转角位移在接触转角位移之后,接口弯矩值的大小受加载速率的影响显著;2)接触转角位移小于 2° 时,主要为挤压变形; $2^{\circ} \sim 4.7^{\circ}$ (接触转角位移)主要为摩阻力及部分挤压变形;接触转角位移大于 4.7° 至加载停止主要为摩阻力。本文成果可为柔性接口管道抗震设计和施工提供一定参考。

关键词:单调加载; 柔性接口; 弯曲作用; 力学性能

中图分类号: TU991.36

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)11-0009-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.11.142

Test on mechanical properties of flexible interface in socket-type pipelines under bending action

ZHU De¹, ZHAO You¹, REN Xuezheng²

(1. Jiaozuo Vocational College of Industry and Trade, Jiaozuo 454550, Henan, China;

2. Zhongde Xinya Building Materials Co., Ltd., Xinmi 452300, Henan, China)

Abstract: In order to analyze the influence of different loading rates on the mechanical properties of socket-type flexible interface under monotonous loading mode, the monotonous loading test of socket-type flexible interface of ductile iron pipelines under DN150 mm bending action is carried out, and based on the bending moment and rotation angle, rotation angle and pull-out displacement data, the general law of the bending moment-rotation angle-axial displacement relationship of the flexible interface is established, and a concise mathematical expression is given. The test results show that: 1) When the angular displacement of the interface does not reach the contact angular displacement, the loading rate has little influence on the bending moment value of the interface; After the interface angular displacement follows the contact angular displacement, the bending moment value of the interface is significantly affected by the loading rate. 2) When the contact angular displacement is less than 2° , it is mainly extrusion deformation; $2^{\circ} \sim 4.7^{\circ}$ (contact angular displacement) is mainly frictional resistance and partial extrusion deformation; The contact angular displacement is greater than 4.7° to the loading stop, which is mainly the frictional resistance. The results can provide some references for the seismic design and construction of flexible interface pipelines.

Key words: monotonous loading; flexible interface; bending action; mechanical property

收稿日期: 2024-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078125; 51578217)

作者简介: 朱 德(1994—),男,硕士研究生,从事防灾减灾方面的研究。

地下管道是城市供水、燃气、热力以及排污等生命线工程的重要组成部分,在强烈地震袭击下,生命线系统的地震破坏和由此产生的次生灾害,给城市人民的的生活和生命财产安全带来严重危害^[1]。震害资料表明^[2-3],接口破坏是承插式管道最为普遍的一种现象,例如唐山地震市区铸铁给水管接口处破坏高达79%。针对承插式管道接口破坏导致供水管网失效的反应机理,国内外学者做了大量研究工作及探讨。韩阳等^[4-6]对承插式球墨铸铁管道进行了系统的轴向拉拔和横向弯曲的试验研究,得出了有水压的接口抗震性能较好于无水压,管径越大接口的抗震效果越显著等结论;蔡志雄等^[7]对球墨铸铁管道接口进行了有水压的静力拉拔试验研究,得到了管道接口部位的轴向峰值拉力随着管径和加载速率的增加而增加,随着管内初始水压的增大而减小的结论;钟子蓝等^[8-11]对直径为150、200 mm的承插式管道柔性接口进行了无加载方式下轴向拉拔和竖向弯曲试验研究,并建立了跨断层作用下埋地管线有限元分析模型,分析有水压条件中是否加压条件下,接口在复杂荷载效应下的力学特征,得出加载方式对接口的力学性能影响较小,柔性接口的抵抗拉伸位移主要取决于承口深度;管道插口发生屈曲破坏时,管底产生较大残余应变;与穿越管段中部的断层形式相比,断层穿越管道接口处会导致比普通承插式接口管道更大的接口张开量和更小的接口转角。

目前,对于分段式承插口柔性接口的试验研究主要以轴向的静载拉拔试验为主。国内标准对于柔性接口的设计也仅是考虑单一的轴向接口位移,未考虑管线的横向弯曲等变形对分段式管道的影响。另外,受实验室的场地和一些试验条件的限制,无法制作成较长管道,管端约束条件的不同对其试验结果有所影响。因此,对于球墨铸铁管道柔性胶圈接口的试验研究不能局限在轴向拉拔上,需要进行弯曲作用下承插式管道柔性接口力学性能试验研究。

本文通过对国内市政供水常用的管径DN150 mm球墨铸铁柔性接口管道进行不同加载速率下的弯曲试验,重点观察和分析管道接口在弯曲作用下

的失效模式、极限受力状态和接口拔出位移等,同时分析在管道两端约束条件下,管道在弯曲作用下产生的轴向耦合位移和拉拔力,并基于试验数据分别建立柔性接口在不同加载速率下接口弯矩与转角,以及与轴向拔出位移的关系曲线,比较计算结果和试验结果的差异,为球墨铸铁管道胶圈柔性接口抗震设计理论和方法提供参考依据。

1 试验方案

1.1 试件设计

通过自制卡箍外连作动器对接口处施加横向荷载,实现承插式球墨铸铁管道胶圈柔性接口受弯变形。为使管道端部约束更符合真实工况,摒弃传统试验的端部自由约束,利用管道两端分别外接一组短管的方式实现端部的有限转动约束。接口弯曲产生的转角主要由长管接口与两组短管的接口共同承担,如图1所示。接口弯矩计算具体简化示意如图2所示,其中: F 为作动器施加的力值,kN; D_1 为拉线位移计与中间长管接口之间的水平距离,mm; D_2 为支座与拉线式位移计之间的水平值,mm; S_1 、 S_2 分别为支座两侧 D_1 和 D_2 对称位置处拉线位移计测量值,mm; θ_1 、 θ_2 分别为两端支座短管接口转角,(°); θ 为中间长管道接口的转角,(°)。

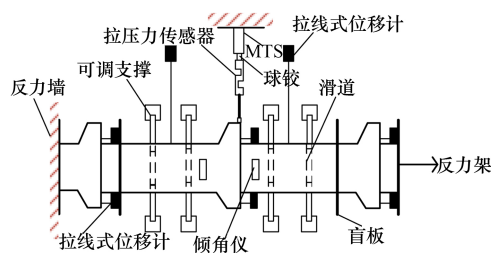


图1 管道试件加载平面示意

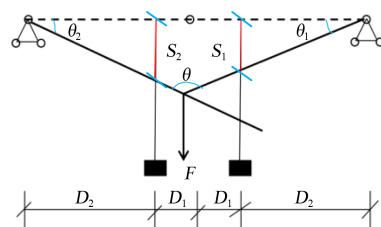


图2 弯矩及转角转化

结合图2承插式管道接口的弯矩 M (kN·m)通过式(1)进行计算转化,接口处产生的转角 θ (°)通过式(2)~(4)进行转化并通过倾角仪进行校核。

$$M = \frac{F \times (2D_1 + 2D_2)}{4} \quad (1)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{S_1}{D_2}\right) \quad (2)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{S_2}{D_2}\right) \quad (3)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (4)$$

1.2 试验加载方案

拟定加载方案: 每组试验均采用伺服电缸位移控制加载方式, 加载模式为单调加载, 加载速率分别为 0.5、1.0、2.5 mm/s, 加载至管道接口的承插管件发生严重碰撞, 即接口发生功能性失效。具体试验加载工况如表 1 所示。

表 1 加载工况

工况编号	加载模式	管径/mm	加载速率/(mm·s ⁻¹)
1	单调	150	0.5
2			1.0
3			2.5

2 试验结果

2.1 0.5 mm/s 速率下接口横向单调加载试验结果

0.5 mm/s 速率下管径为 DN150 mm 的接口横向单调加载试验的 $M-\theta$ 曲线如图 3(a) 所示。由图 3(a) 可知: 在加载初始阶段即转角小于 2° 时, 弯矩随转角增加而上升, 这一阶段主要依靠胶圈自身的挤压和剪切变形来抵抗接口弯矩; 继续加载, 接口弯矩上升速度减缓, 这一阶段主要是克服胶圈与管道之间的摩擦。当转角值达到 4.7° 左右之后, 接口弯矩的上升速度与前两阶段相比较突然增加, 这是由于承、插管壁发生了碰撞, 处于刚性接触阶段。本文定义该角度为管道接口弯曲的接触转角。图 3(b) 为接口转角与接口轴向拔出位移关系

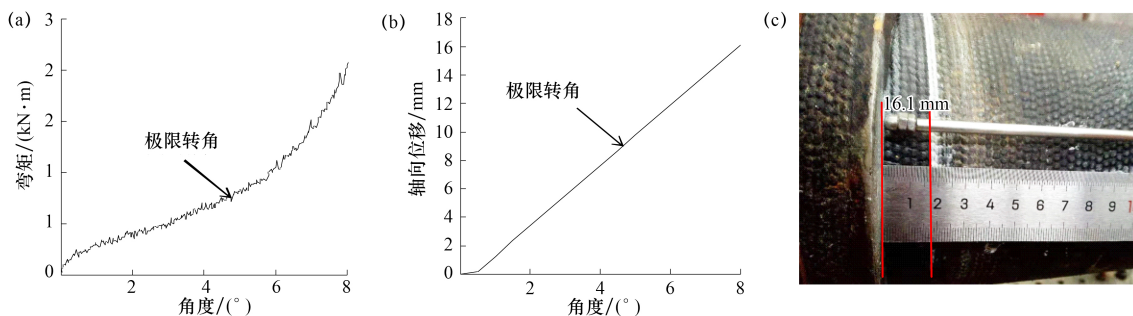
曲线。由图 3(b) 可知: 曲线呈线性增加趋势, 接口最大拔出位移为 16.15 mm。整个加载过程, 随着接口弯曲角度的增加, 接口出现一定轴向拔出位移现象。图 3(c) 为加载速率为 0.5 mm/s 时, 停止加载试验后的接口弯曲试验现象。

2.2 1.0 mm/s 速率下接口横向单调加载试验结果

1.0 mm/s 速率下管径为 DN 150 mm 的接口横向单调加载试验的 $M-\theta$ 曲线如图 4(a) 所示。由图 4(a) 可知: 曲线整体趋势与速率为 0.5 mm/s 的趋势变化类似。在转角小于 2° 时的弯矩变化速率较快; 随着继续加载, 接口转角位移随之增加; 在接口转角位移为 4.7° 左右时, 接口弯矩值骤增, 此时为接口接触转角位移。在此加载条件下的接口轴向拔出位移与接口转角位移曲线如图 4(b) 所示。由图 4(b) 可知: 随接口转角位移的增加, 接口轴向拔出位移增加, 呈现出线性变化趋势, 最终加载停止时接口轴向拔出位移为 17.95 mm。图 4(c) 为加载速率为 1.0 mm/s 时, 停止加载试验后的接口弯曲试验现象。

2.3 2.5 mm/s 速率下接口横向单调加载试验结果

2.5 mm/s 速率下管径为 DN150 mm 的接口横向单调加载试验的 $M-\theta$ 曲线如图 5(a) 所示, 在此加载条件下的接口轴向拔出位移与接口转角位移曲线如图 5(b) 所示。由图 5(a) 可知: 在加载整个过程, 曲线呈现趋势与 0.5、1 mm/s 的曲线趋势类似, 依然可以分为 3 个上升阶段。同样在接口转角位移达到接触转角位移时弯矩有所增加, 而且轴向拔出位移也略微增加, 最大转角位移对应的接口轴向拔出位移为 19.05 mm。图 5(c) 为加载速率为 2.5 mm/s 时, 停止加载试验后的接口弯曲试验现象。



(a) $M-\theta$ 曲线; (b) $\theta-S$ 曲线; (c) 接口拔出现象

图 3 0.5 mm/s 速率下接口横向单调加载试验结果

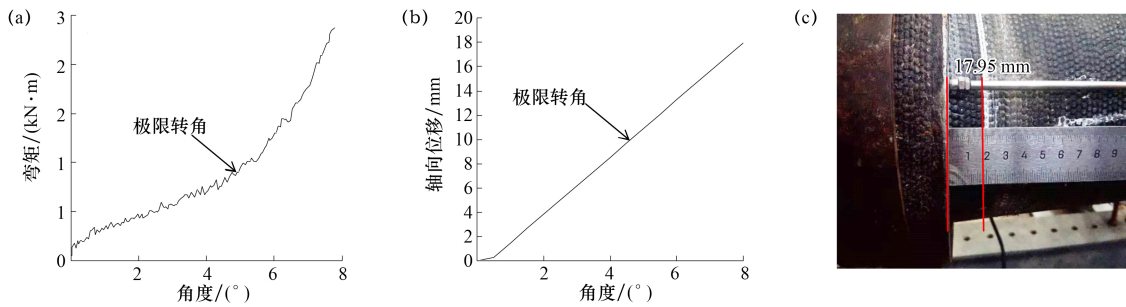
(a) $M-\theta$ 曲线; (b) $\theta-S$ 曲线; (c) 接口拔出现场

图 4 1.0 mm/s 速率下接口横向单调加载试验结果

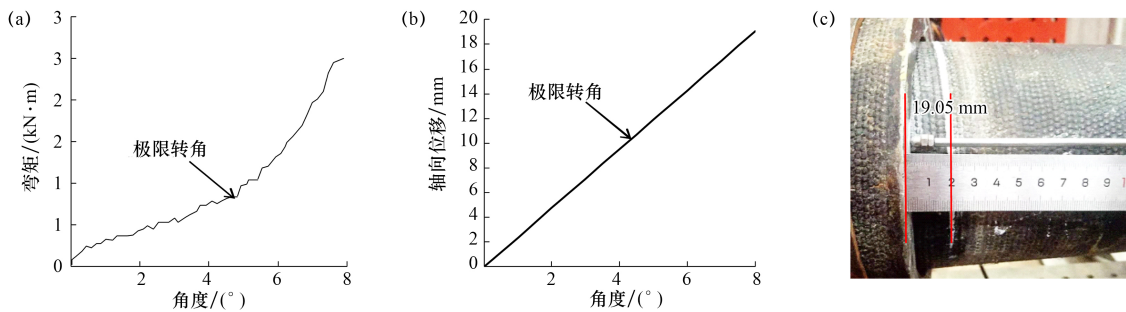
(a) $M-\theta$ 曲线; (b) $\theta-S$ 曲线; (c) 接口拔出现场

图 5 2.5 mm/s 速率下接口横向单调加载试验结果

3 分析与讨论

3.1 加载速率的影响

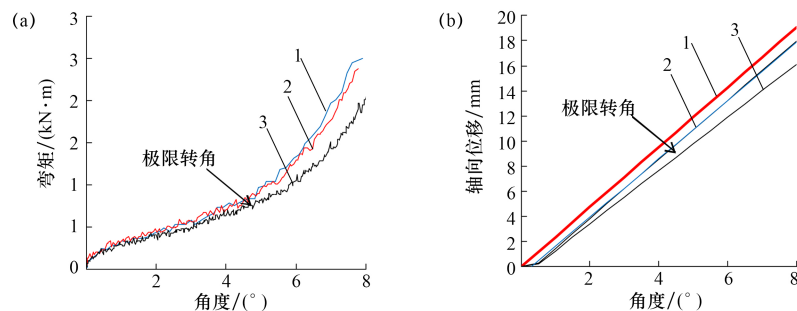
3 种速率下承插式柔性接口横向单调加载试验的 $M-\theta$ 和 $\theta-S$ 曲线如图 6 所示。

由图 6(a) 可知: 在接口接触转角位移前, 3 种加载速率的弯矩与转角关系曲线基本重合, 加载速率对接口的弯曲力学性能基本无影响。在接口转角位移到达极限转角位移后, 加载速率的增加接口弯矩值有所增加, 说明在极限转角位移后由于管壁之间的相互接触, 处于硬接触阶段, 建议接口安全值设为 4° 。

由图 6(b) 可知: 轴向拔出位移在 12 mm 以前为弹性阶段, 此类阶段与加载速率的大小无明显关系, 但在接口轴向拔出位移范围为 12 ~ 30 mm 时, 处于弹塑性阶段, 与加载速率有关。结合试验结果分析, 得到接口接触转角值以及最大转角位移对应的接口轴向拔出位移等数据, 如表 2 所示。

表 2 极限转角位移结果

速率/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	极限转 角/ $(^\circ)$	极限弯矩/ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	轴向位 移/mm
0.5	4.7	0.71	16.10
1.0	4.7	0.80	17.95
2.5	4.7	0.84	19.05



(a) 弯矩 - 转角曲线; (b) 转角 - 接口拔出曲线

速率/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$: 1—2.5; 2—1.0; 3—0.5。

图 6 不同速率单调加载分析

3.2 弯矩 - 转角 - 轴向位移相互关系

采用 Matlab 对试验数据进行多元非线性回归分析, 得出在不同加载速率下, 柔性接口的弯矩 - 转角 - 轴向位移关系所服从的一般规律, 并给出数学表达式(5) ~ (7)。其中试验结果拟合度分别为 97.5%、99.5% 和 99.3%。弯矩 - 转角 - 轴向位移 3 者的关系如图 7 所示。

$$M = 0.064 + 0.04 \cdot S + 0.20 \cdot \theta - 0.001 \cdot S \cdot \theta - 0.06 \cdot \theta^2 - 0.0007 \cdot S \cdot \theta^2 + 0.008 \cdot \theta^3 \quad (5)$$

$$M = 0.013 + 0.161 \cdot S + 0.01 \cdot \theta + -0.042 \cdot S \cdot \theta + 0.0025 \cdot \theta^2 + 0.0029 \cdot S \cdot \theta^2 + 0.0039 \cdot \theta^3 \quad (6)$$

$$M = 0.019 + 0.0829 \cdot S + 0.171 \cdot \theta + 0.0007 \cdot S \cdot \theta - 0.0835 \cdot \theta^2 + 0.001 \cdot S \cdot \theta^2 + 0.007 \cdot \theta^3 \quad (7)$$

分别取 M 、 θ 、 S 试验值代入式(5) ~ (7)可得不同加载速率下的管件接口弯矩 - 转角的拟合曲线, 如图 8 所示。由图 8 可知: 与试验中实际的 $M - \theta$ 曲线进行对比, 发现拟合结果与试验结果基本一致。

4 结 论

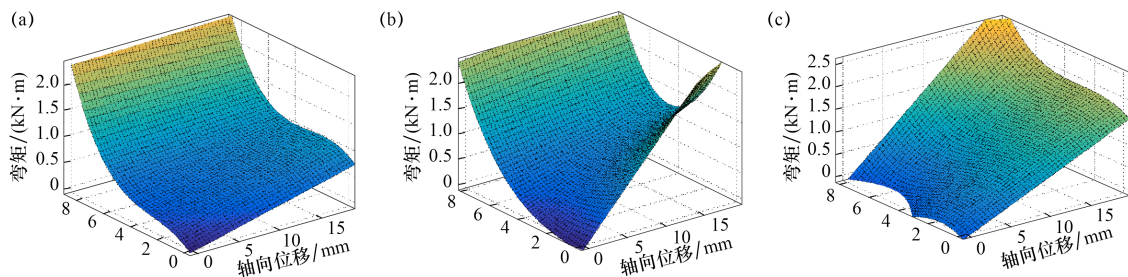
本文采用国内供水管网中常见的球墨铸铁管

柔性接头进行管道接口在单调荷载作用下的接口弯曲试验研究, 得出结论如下。

(1) 加载速率在接口转角位移达到接触转角位移以前影响较小, 但在接触转角位移之后接口弯矩值的大小受到加载速率的影响显著。

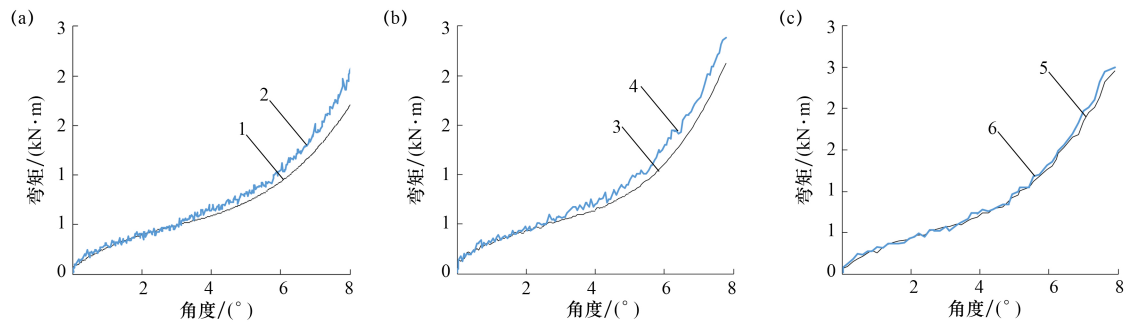
(2) 胶圈在加载过程中的 3 个阶段所承担的力学特性有所变化: 当接触转角位移小于 2° 时, 主要为挤压变形; 当接触转角位移范围为 $2^\circ \sim 4.7^\circ$ 时, 主要是由于一定程度上克服接口的摩阻力以及部分挤压变形; 接触转角位移大于 4.7° 至加载停止主要是由于承插管壁碰撞, 克服刚性接触产生的摩阻力。

(3) 采用 Matlab 进行多元非线性回归分析, 给出了接口转角、弯矩、轴向拔出位移形式简洁的数学表达式。将 M 、 θ 、 S 试验值代入数学表达式可得不同加载速率下的管件的弯矩 - 转角的拟合曲线, 并与试验中实际的 $M - \theta$ 曲线进行对比, 拟合结果与试验结果一致性较好。



速率/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 0.5; (B) 1.0; (C) 2.5

图 7 不同加载速率下 $M - \theta - S$ 拟合结果



速率/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 0.5; (B) 1.0; (C) 2.5

1—0.5 mm/s 拟合值; 2—0.5 mm/s 试验值; 3—1.0 mm/s 拟合值;

4—1.0 mm/s 试验值; 5—2.5 mm/s 拟合值; 6—2.5 mm/s 试验值;

图 8 不同速率下拟合与试验值对比

参考文献:

- [1] 孙绍平. 国外生命线地震工程的研究概况[J]. 地震工程动态, 1984(1): 8 - 13.
- [2] 韩阳. 城市地下管网系统的地震可靠性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [3] 侯本伟, 徐倩怡, 张亚波, 等. 土体参数随机场中承插式地下直线管道地震响应分析[J/OL]. 工程力学, 2024, 1 - 13 [2024 - 05 - 22]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=WYPw_9jmhsLZGfSRqxxxC04EC0D8oTVMxsp-q7RczybRJ7LCgtY3lgYNNTQ5uwArLzf0ONyL5tAW0l8DPGkwssSy7hAVI-Ap8f4tVjr8kdDUejI_V-qYphMH6OIv-NmJk21iMx1dCCcDyTe4yNMcaWD2MMfq9rAM&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [4] 韩阳, 李冠潮, 李东桥, 等. 管道承插式柔性接口轴向力学性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(5): 8.
- [5] 李冠潮, 韩阳, 任雪振. 往复荷载下管道承插式柔性接口力学性能试验研究[J]. 河南城建学院学报, 2020, 29(1): 5.
- [6] HAN Y, DUAN J F, CHEN J H. An experimental study on the mechanical capability of a rubber gasket joint in a ductile cast iron pipeline under stretch-bending [C]// Annual Meeting of American Civil Engineers. Chicago: ASCE, 2016.
- [7] 蔡志雄. 承插式球墨铸铁管道柔性接口力学性能影响的试验研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(2): 22 - 24.
- [8] ZHONG Z, FILIATRAULT A, AREF A. Numerical simulation and seismic performance evaluation of buried pipelines rehabilitated with cured-in-place-pipe liner under seismic wave propagation [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(5): 811 - 829.
- [9] 钟紫蓝, 张亚波, 李锦强, 等. 球墨铸铁管道接口弯曲性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(9): 143 - 150.
- [10] 钟紫蓝, 赵鑫, 张亚波, 等. 强震作用下跨断层管道柔性接口抗震加固研究[J]. 世界地震工程, 2024, 40(1): 25 - 33.
- [11] 张亚波, 钟紫蓝, 李锦强, 等. 球墨铸铁供水管道承插式接口力学性能试验及失效概率预测模型[J]. 工程力学, 2024(41): 1.