

走滑断层作用下埋地充液钢质管道接口 应变特性的试验

陈艳华^{1,2}, 刘 洲¹, 刘 晓¹, 杨 梅¹, 蒋录珍³

(1. 华北理工大学建筑工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 河北省地震工程研究中心, 河北 唐山 063210;

3. 河北科技大学建筑工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘 要 目的 研究走滑断层作用下埋地充液管道不同接口的力学性能, 保证埋地管道的安全运行, 并为埋地管道抗震设计提供参考. 方法 利用自行研发的场地变形模拟箱体和千斤顶等设备, 对走滑断层作用下埋地管道不同接口的力学性能进行试验. 将接口形式分为焊接、螺纹连接、法兰连接, 接口位置分别在断层处与非断层处(距离断层处 500 mm)的管道埋于箱体内, 并向管道内充入常温自来水, 保持管内压力, 再利用试验设备模拟走滑断层作用. 结果 通过测量管道各处应变, 箱体及管道位移和管内水压变化, 得出只有焊接接口应变比相同位置直管段应变小; 管道上最大应变出现在断层附近(试验中为距断层 300 mm 处); 与螺纹连接管道相比, 当断层错动量小时, 焊接管道在断层处位移大, 而断层错动量大时管道位移小; 只有法兰连接管道内的水压有所下降. 结论 走滑断层条件下, 埋地管道接口适合用焊接, 不适合用法兰连接; 埋地管道接口在断层错动量小时适合采用螺纹连接, 错动量大时适合采用焊接; 在断层两侧一定距离处管道最容易破坏, 埋地管道接口不宜设在此处.

关键词 走滑断层; 埋地管道接口; 应变; 位移

中图分类号 TU96; P315

文献标志码 A

Experimental Study on Strain Properties of Buried Steel Pipeline Joint under Strike-slip Faults

CHEN Yanhua^{1,2}, LIU Zhou¹, LIU Xiao¹, YANG Mei¹, JIANG Luzhen³

(1. College of Civil and Architecture Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, China, 063210; 2. Earthquake Engineering Research Center of Hebei Province, Tangshan, China, 063210; 3. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, China, 050018)

Abstract: The purpose of this paper is to study the mechanical performance of different joints of buried pipeline with liquid-filled under the action of strike-slip fault, which is the basis for ensuring

收稿日期: 2016-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378172, 51308182); 河北省自然科学基金项目(E2014209089, E2014208143)

作者简介: 陈艳华(1972—), 女, 教授, 博士, 主要从事地下生命线工程防灾减灾研究.

the safe operation of buried pipelines and provides reference for seismic design of buried pipelines. The mechanical properties of different joints of buried pipelines under the action of strike-slip fault were simulated by using the experimental box, jack device and so on. The joints types were welded, screwed and flanged. Also, the joints locations were different, which were at the fault and the non-fault (500 mm from the fault) respectively. These pipelines were buried in the experimental box, and were filled with water at room temperature, which maintained the inner pressure. Then strike-slip fault movement was simulated by using the test equipments. By measuring the strain, the displacement of the box and the pipe, the water pressure within the pipe, it is found that only the strain at the welded joint is smaller than the straight pipe at the same position. The maximum strain of the pipeline happens near the fault (300 mm from the fault here). Compared with the screwed connection pipeline, the welded pipeline has a large displacement when the fault displacement is small, but the displacement of pipeline is small when the fault displacement is large. And the pressure drop is only in the flanged pipe. Under the strike-slip fault, the buried pipeline joint is the most suitable for welded, and not for flanged connection. The joint is suitable for screwed connection when the fault displacement is small. The pipeline would be damaged most possibly at a certain distance on both sides from the fault, in which the joints should not be located.

Key words: strike-slip faults; buried pipeline joint; strain; displacement

走滑断层作为断层的主要形式之一,一旦发生就会对场地产生永久变形,造成穿越管道的损伤和破坏。如1972年马那瓜地震,致使经过市中心区4条走滑断层的所有输水管道发生断裂^[1]。1995年日本神户地震时,走滑断层的最大水平位移达到2.1 m,使得跨越该断层的埋地供水及燃气管线大多破坏^[2]。有结果显示管道接口或其附近破坏最频繁,也最严重,所以说接口是抗震的薄弱环节^[2]。

目前在走滑断层对埋地管道和管道接口的作用方面研究很多,主要采用简化解析或半解析法,数值模拟法和试验方法。例如:在Newmark方法基础上,李小军^[3]等提出了基于管道埋土波速和断层错动量的改进Newmark方法;王滨^[4]等基于双折线钢本构及Ramberg-Osgood模型,提出了走滑断层作用下埋地钢管反应的理论分析方法;LIU Xiao-ben^[5]等通过大量的数值结果拟合出走滑断层下受压弯X80管道的峰值应变半经验模型。大量的数值模拟研究中,主要考虑材料非线性,大变形,管土相互作用,设定等效边界弹簧等分析各种土体和管道参数对管道反应

的影响^[6-14]。各国研究者还对球墨铸铁管道柔性接口的抗震性能等进行了试验研究,采用三点弯曲的试验方法模拟断层作用下管道的变形^[15-18]。J. BUCO^[19]等通过自制加载装置对混凝土管道接口进行了弯剪作用的试验研究。J. A. MASON^[20]等通过自平衡反力架对钢管的焊接接口进行了全尺试验和静力试验,对焊接接口的抗拉性和接口整个圆周上的变形进行了研究。

综上所述,在走滑断层作用下,埋地直管道的力学反应研究多是采用数值模拟的方法,而管道接口的力学性能试验研究多是对铸铁管道,且由动力加载装置直接作用于管道本身,很难模拟管土相互作用情况。基于此,笔者以缩尺室内土箱试验为手段,以埋地充液且有一定内压的无缝钢管及其接口为对象,研究走滑断层作用下不同管道接口的力学性能,根据试验结果分析带有接口的管道和接口在断层场地不同位置时的应变,有助于得出断层条件下管道的主要失效形式,管道接口设计的安全位置,以及管道防护的主要区域,为长输埋地金属管道抗震设计与安全评价提供参考依据。

1 试验方案

1.1 试验装置及材料

试验装置如图 1 所示的用于模拟场地断层与沉降的 3 个无盖箱体,其中两侧箱体长宽高为 1 100 mm × 900 mm × 800 mm,中间箱体长宽高为 1 400 mm × 900 mm × 800 mm. 右侧箱体底部和侧面均有滑轮,可以前后移动;左侧箱体与地面固定. 本试验通过千斤顶使右侧箱体产生水平方向的位移,从而模拟走滑断层作用.

试验管道采用无缝钢管,基于相似分析,选取管道外径为 40 mm,壁厚为 4 mm,长度为 3.6 m. 接口形式分别采用常见的焊接、螺纹连接和法兰连接三种方式(见图2). 接口

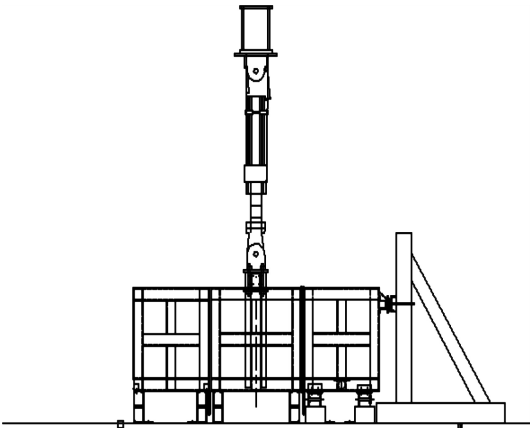
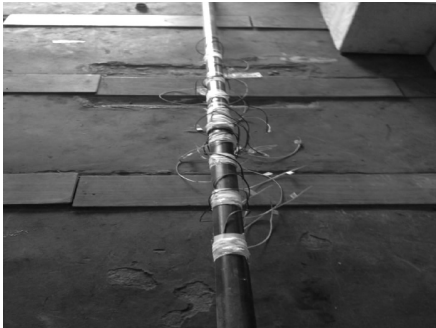


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment 位置分别在右侧箱体与中间箱体连接处(断层处)及右侧箱体中间(错动区中部). 土体采用黏性土,测得重力密度为 14.6 kN/m³.



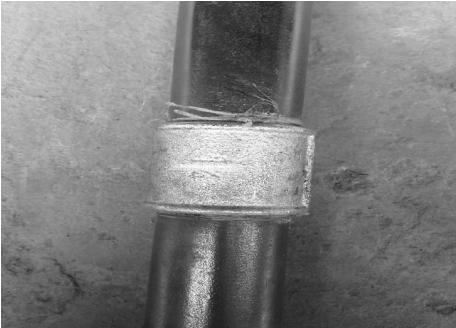
(a) 试验管道



(b) 法兰接口



(c) 焊接接口



(d) 螺纹接口

图 2 管道及接口示意图

Fig.2 Schematic diagram of pipe and joints

1.2 测量设备及仪器

通过在管道接口及附近设置应变片,箱体及管道设置位移计等,记录并观察管道及接口处的应变、位移和变形等试验数据或现象.

(1)测量管道的应变. 采用应变片、导线和动态应变仪等设备测量管道的应变. 考虑走滑断层的作用特点,将应变片贴于管道的前后两侧,具体位置见图 3、图 4. 图中用数字标出了应变片沿管轴方向的位置.

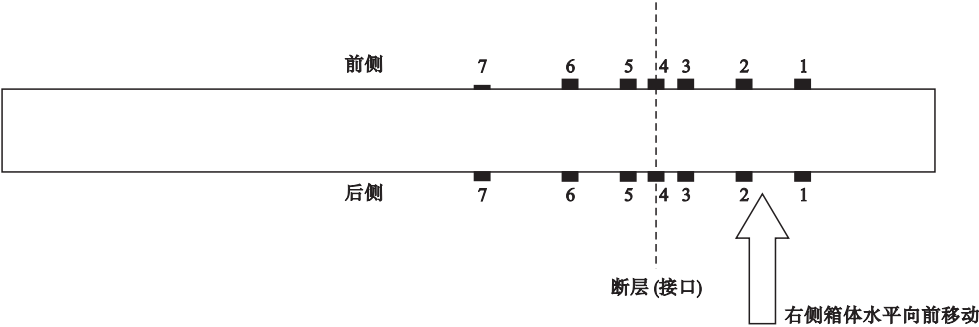


图 3 接口在断层处的应变贴片位置俯视示意图

Fig. 3 Platform sketch of strain patch position when joints located at the fault

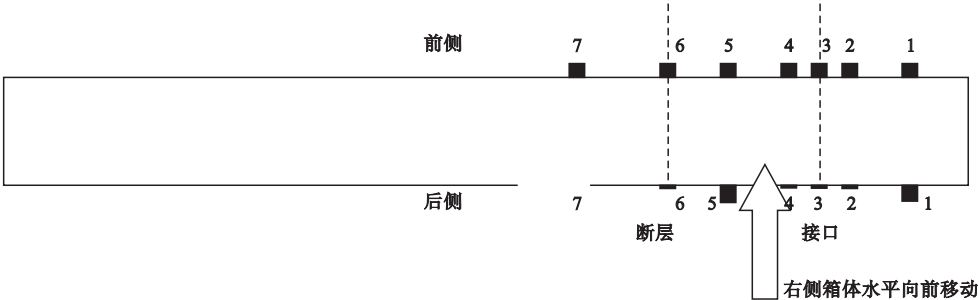


图 4 接口在错动区的应变贴片位置俯视示意图

Fig. 4 Platform sketch of strain patch position when joints located at fault zone

(2)测量箱体位移. 将 LVDT 测量仪(量程为 $-75\text{ mm} \sim +75\text{ mm}$) 固定在支架上, 另一头紧贴着右侧箱体(见图 5).

拉绳线位移传感器相连(见图 5).
(4)数据采集. 采用 7 台动态信号采集器, 通过电脑控制完成试验数据的采集.

1.3 加载系统

本试验通过两台千斤顶对图 1 右侧箱体施加水平向前的推力, 使箱体产生平行于地面的水平错动位移.

2 试验过程

将准备好的带有不同接头的三根试验管道埋置于试验装置内, 利用打压泵向其中充入压强为 2.5 MPa 的自来水, 再关闭阀门, 使其压强稳定(见图 6). 然后向箱体内填土, 并分层夯实. 三根试验管道上均有一个接口, 分别为焊接、螺纹连接和法兰连接. 利用千斤顶施加断层错动位移, 通过应变片和位移计的示数以及水压表的变化, 判定管道接口的受力和破坏情况. 试验分两组, 具体试件明细见表 1.



图 5 箱体及管道位移测量装置

Fig. 5 Measurement device of displacement for box and pipe

(3)测量管道位移. 在右侧箱体与中间箱体连接处, 钢绞线一头连接管道, 另一头与

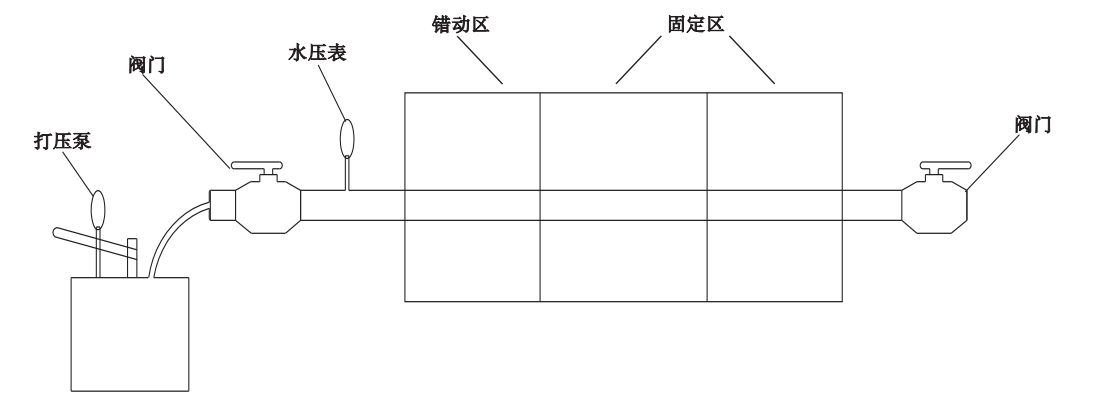


图6 整体试验装置纵剖面示意图

Fig.6 Profile of whole test device

表1 试件明细表

Table 1 List of specimens

| 试验组别 | 与断层面交角/(°) | 管道壁厚/mm | 管径/mm | 接口类型 | 接口位置 |
|------|------------|---------|-------|------|------------------|
| 一 | 90 | 4 | 40 | 焊接 | 断层处 |
| | | | | 螺纹连接 | 断层处 |
| | | | | 法兰连接 | 断层处 |
| | | | | 焊接 | 错动区内(距断层500 mm处) |
| 二 | 90 | 4 | 40 | 螺纹连接 | 错动区内(距断层500 mm处) |
| | | | | 法兰连接 | 错动区内(距断层500 mm处) |
| | | | | 法兰连接 | 错动区内(距断层500 mm处) |

3 试验结果与讨论

3.1 管道接口位置对管道应变的影响

综上,完成表1中的两组试验,绘制了

不同接口位置时接口前后侧应变随箱体位移(断层错动距离)的变化(见图7)以及管道在断层处的水平位移变化(见图8)。

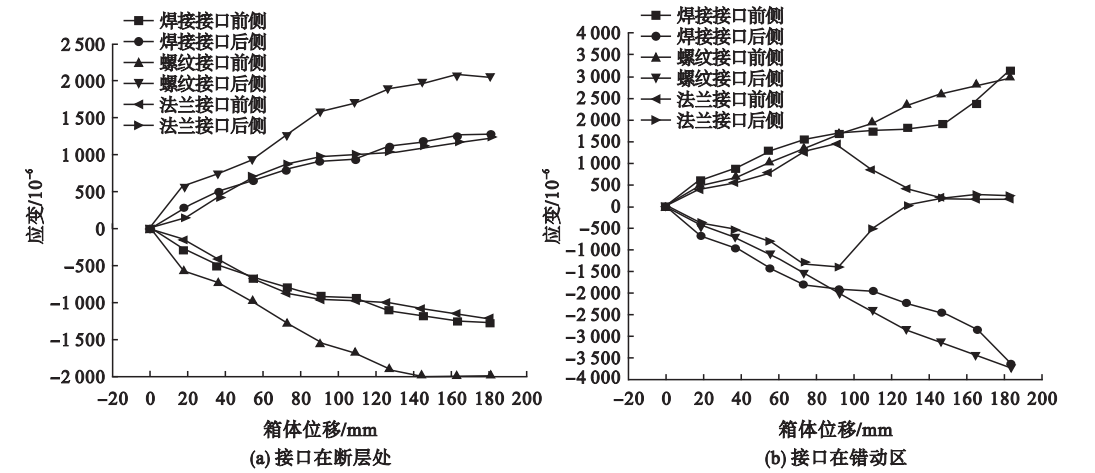


图7 走滑断层下不同接口位置对接口应变的影响

Fig.7 Influence of different joint location on joint strain under strike-slip faults

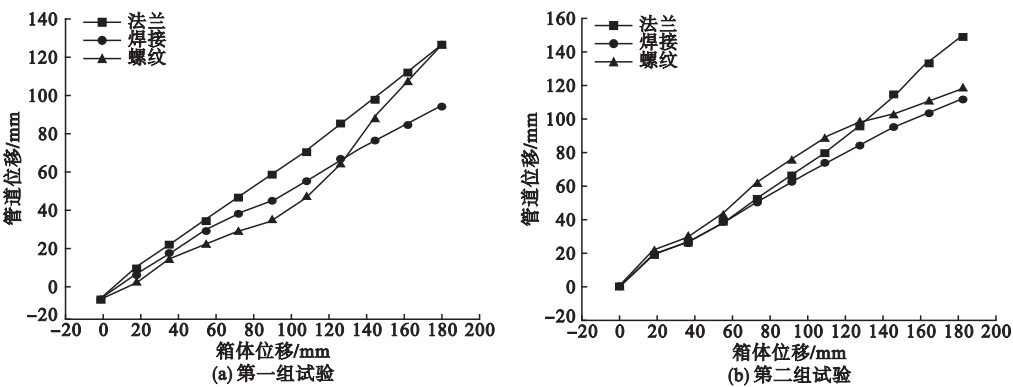


图8 管道在断层处水平位移

Fig. 8 Displacement of pipeline at the fault

由图 7(a)可知,管道接口在断层处时,接口处的应变随着断层错动位移的增加而增大,在相同的断层错动距离下,螺纹接口处应变大于焊接和法兰两种接口的应变,且焊接与法兰接口的应变值很接近.图 3 中的接口前侧处于压应变区(应变为负值),后侧处于拉应变区(应变为正值).而由图 7(b)看出,断层错动距离较小时(文中小于 90 mm),处于错动区(不在断层处)的三种接口应变随着错动距离的增大而增大,且在相同错动距离下,焊接接口的应变较大;当断层错动距离较大时,法兰接口应变迅速减小,焊接接口应变出现波动.这是因为在三种接口形式中,焊接接口与管道的整体性较好,在断层走滑过程中表现出了与管道协调的变形能力.

由图 8(a)可知,接口在断层处时,管道位移随着断层错动距离的增大而增大,且法

兰连接的管道在断层处的位移大于焊接和螺纹连接的管道.说明接口在断层处,随着断层错动距离的增大,法兰接口抵御变形的能力差,容易破坏.图 8(b)为接口在错动区(不在断层位置)时,断层处管道的位移变化图.可以看出,当断层错动距离较小时(文中小于 50 mm),断层处的管道(不同接口的)水平位移随错动距离的增加变化幅度一致;当错动距离增加到 50 ~ 120 mm,断层处焊接管道位移增加幅值大于其他两种接口方式的管道位移;而当断层错动距离大于 120 mm 时,断层处焊接管道位移小于螺纹连接的管道位移.说明在断层水平滑移过程中,错动区的三种接口表现出了不同的变形能力,从而影响了断层处管道的位移大小,与图 8(a)中的断层处接口位移变化相符.

两组试验过程中的水压变化如表 2 所示.

表 2 水压随箱体位移变化

Table 2 Hydraulic pressure under body displacement

| 箱体位移/mm | 第一组试验 | | | 第二组试验 | | |
|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 焊接管道 压强/MPa | 螺纹管道 压强/MPa | 法兰管道 压强/MPa | 焊接管道 压强/MPa | 螺纹管道 压强/MPa | 法兰管道 压强/MPa |
| 0 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| 20 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| 40 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.0 |
| 60 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 0.8 |
| 80 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 0 |
| 100 | 2.5 | 2.5 | 2.4 | 2.5 | 2.5 | 0 |
| 120 | 2.5 | 2.5 | 2.3 | 2.5 | 2.5 | 0 |
| 140 | 2.5 | 2.5 | 2.2 | 2.5 | 2.5 | 0 |
| 160 | 2.5 | 2.5 | 2.1 | 2.5 | 2.5 | 0 |
| 180 | 2.5 | 2.5 | 2.0 | 2.5 | 2.5 | 0 |

由表2可以看出,在断层错动过程中,两组试验的焊接与螺纹连接管道水压一直保持初始压力 2.5 MPa 不变.而法兰连接管道在 第一组试验中,即接口在断层处,当断层错动位移到达一定值(文中为 80 mm)时,水压开始下降,直到试验结束水压降为 2.0 MPa;在第二组试验中,即接口在错动区(不在断层处),法兰连接管道在断层错动距离较小时(文中为 40 mm),水压开始很快下降,当断层错动距离达到一定值时(文中为 80 mm),水压已经降为 0 MPa,这是因为试验管道与实际工程中的长输管道相比短得多,在断层错动过程中,埋地管道与法兰接口变形非常不协调,造成接口开裂、漏水,使得水压表急降,直至为零,所以实际工程中埋地钢质管

道,特别是小管径管道不适合用法兰连接.结合试验后管道的变形如图9所示.图9(a)中从左至右依次为法兰连接管道、焊接管道、螺纹连接管道;图9(b)从左至右依次为螺纹连接管道、焊接管道、法兰连接管道.可以看出,在断层走滑过程中,错动区内的各管道都已发生无法回复的变形,且图9(b)中法兰接口处发生断裂,说明法兰接口容易发生破坏,这也是造成水压急降的主要原因.由此得出,在断层错动距离较小时,焊接管道在断层处位移大于螺纹连接的管道;而断层错动距离增大后,情况相反,所以断层错动量较小时适用螺纹连接,较大时适用焊接.而地震断层错距往往很大,所以焊接接口是管道连接的首选.

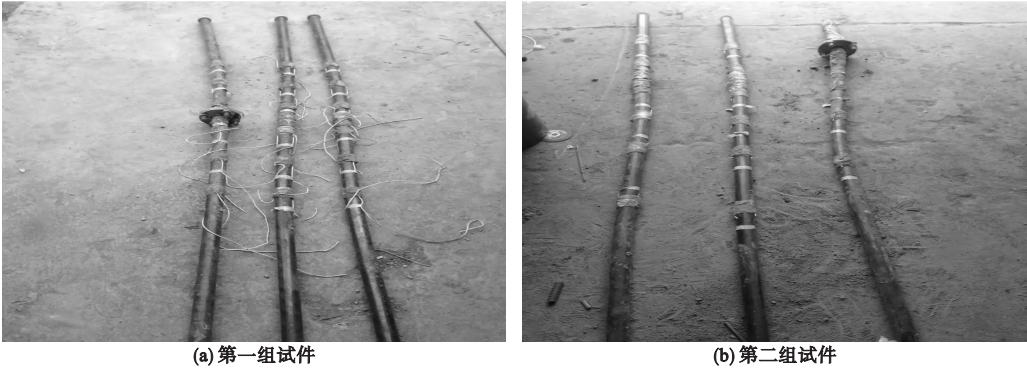


图9 试验后管道变形情况

Fig.9 Deformation of pipes after test

3.2 相同位置接口与直管应变比较

将两组试验在断层处的应变进行对比 (见图10).其中第一组为接口(图3中编号为4的位置),第二组为对应不同接口的直

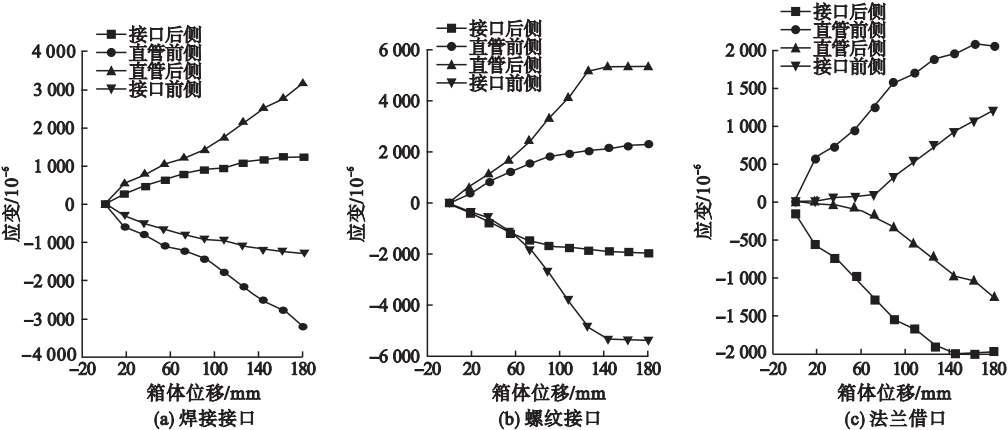


图10 不同接口与直管在两组试验相同位置处(断层)应变对比

Fig.10 Comparison on strains of joints and straight pipe segments at the fault in two tests

管段(图4中编号为6的位置);另外,将两组试验在非断层处(位于错动区,距断层处500 mm)的应变进行对比(见图11). 其中第

一组为对应不同接口的直管段(图3中编号为1的位置),第二组为接口(图4中编号为3的位置).

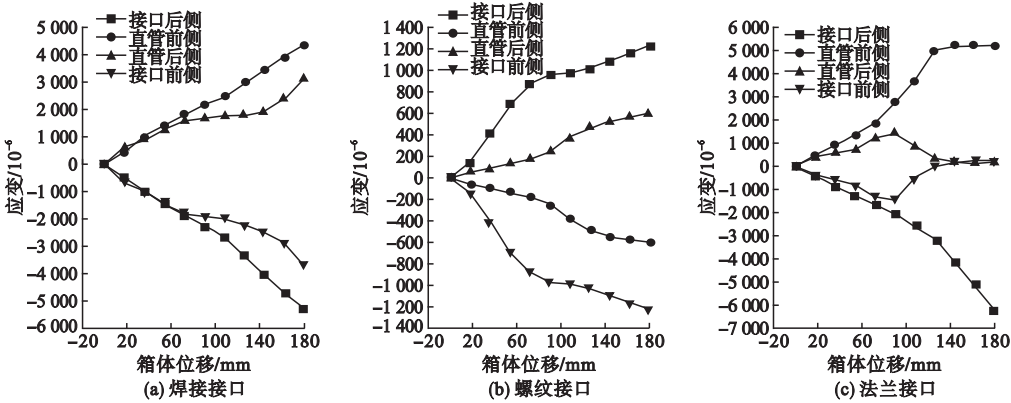


图 11 不同接口与直管在两组试验相同位置处(非断层)应变对比

Fig. 11 Comparison on strains of joints and straight pipe segments at the same position(slipping zone) in two tests

由图10可知,无论是接口还是直管,只要位于断层处,其应变就会随着断层错动距离的增大而增大,不同之处是增长的速率不同.图10(a)中,焊接接口处应变随着错动距离的增大缓慢增大,后期增长平缓,而直管段应变随错距增大以较大的增长速率增大,使得断层处直管段应变始终大于接口处应变,说明焊接接口强度通常大于原管道.图10(b)中,随着断层错距的增大,螺纹连接接口处应变急剧增大,且远大于同位置的直管道,持续增大的应变在错距达到130 mm时,达到试验用应变片的极值,所以后段应变曲线呈直线,说明螺纹接口在断层水平滑移过程中抵御剪切变形能力差,会产生较大的变形,此结果也可由图9看出.图10(c)是法兰接口情况下,在断层处的管道相应部位应变比较.可以看出,随着断层错距的增大,法兰连接接口与相应位置直管段应变都增大,但在断层错距较小时(文中为70 mm),直管段应变增长速率很小,之后增长速率有所增大,但接口处应变始终大于直管段应变.说明法兰接口在断层处比直管段易破坏.

由图11可知,当接口或管段位于非断层处时,除法兰接口形式,其他接口或相应位置

管段应变都表现出随断层错距增大而增大的特点.图11(a)中,焊接接口和相应位置直管段应变都持续增大,并且在断层错距较小时(文中为70 mm),二者应变幅值相差不多,但断层错距较大时,接口处应变增大速率小于相应位置直管段应变,与图10(a)中断层位置处的焊接接口和相应位置直管段应变变化情况一致,但非断层处的应变变化幅值大于断层处的.由图11(b)可以看出,随着断层错距的增大,螺纹连接接口处和相应位置直管段的应变都持续增大,在断层位移较小时(文中为80 mm),接口处应变增长速率明显大于直管段,但断层位移较大时,接口处与直管处应变增大速率基本一致,但接口处应变一直大于直管段应变.应变变化趋势与图10(b)中断层处的螺纹接口和相应位置直管段的大体一致,但应变变化幅值小于断层处的,说明断层处管道不易采用螺纹连接.由图11(c)可看出,随着断层错距的增大,法兰连接接口处应变在断层错距达到90 mm之前缓慢增大,之后迅速减小到0,直至试验结束(结合图9(b)所示的试验后管道的变形),说明此时法兰接口已断裂,变形停止.而此时对应位置处的直管段应变急剧增大,达到应变

片最大量程不再增大.说明在错动区,即使断层错距不大,但处于中心区的法兰接口也容易断裂,所以说无论是断层处,还是错动区,都要避免法兰连接,这与实际工程中复杂场地较少采用法兰连接一致.

3.3 沿管轴方向的管道应变变化

在箱体位移达到 220 mm 时,管道上各

点应变达到最大值,绘制此时沿管轴方向的管道应变变化(见图 12、图 13).图中横坐标中心处“0”点为各管道接口处.图 12 中每条线上的各关键数据点从左到右分别对应图 3 中的测点 1~7;同理图 13 中每条线上的各关键数据点从左到右分别对应图 4 中的测点 1~7.

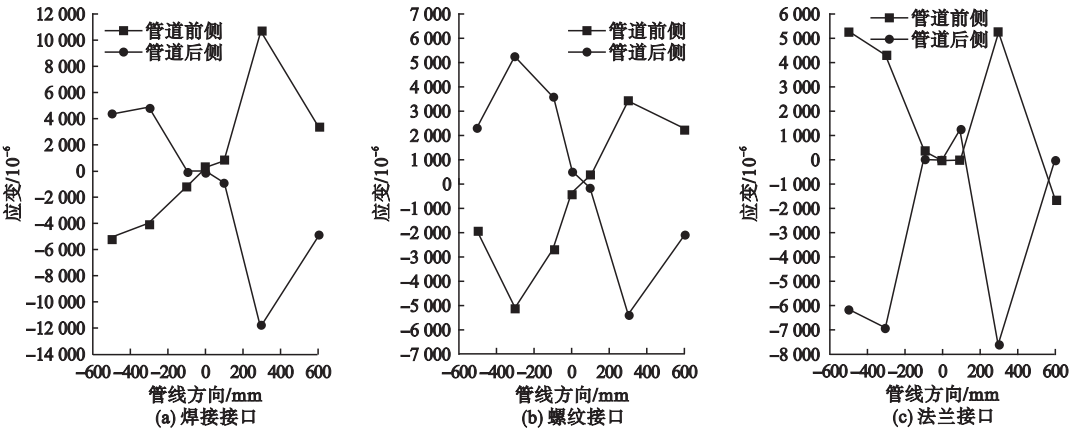


图 12 第一组试验沿管轴方向峰值应变

Fig. 12 Peak strain along pipeline axial direction of first group test

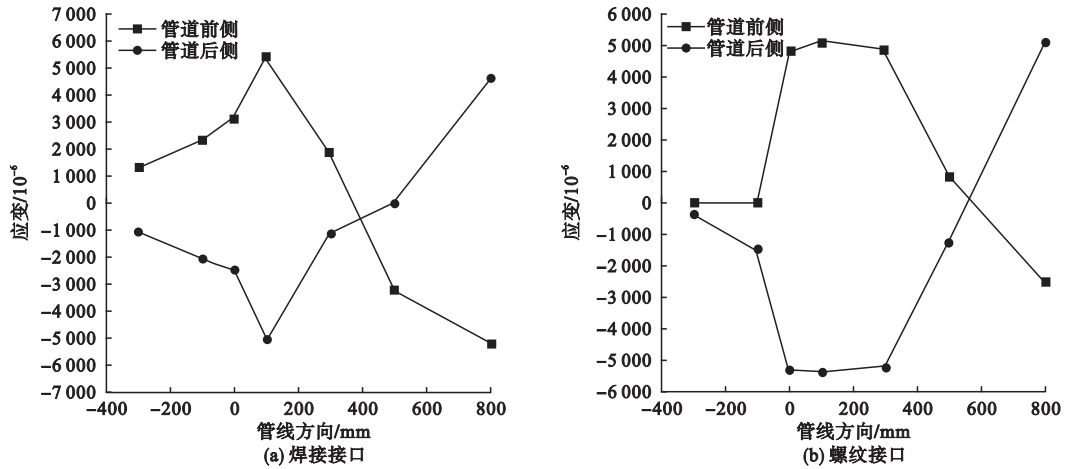


图 13 第二组试验沿管轴方向峰值应变

Fig. 13 Peak strain along pipeline axial direction of second group test

图 12 给出不同接口形式在断层位置处时,管道上各点的应变变化.图中“0”是接口位置,也是这组试验的断层位置,“0”点左侧表示错动区,右侧表示固定区.从图中可以看出,无论什么接口,断层附近管道应变最小,而应变最大值出现在断层两侧的一定距离处.这是因为在断层运动过程中,断层两侧对

该处管道施加了大小接近,方向相反的作用,所以一定程度上两种作用相互抵消,使得此处管道的应变比其他位置处要小.且接口不如连续管道整体性好,变形能力较差,所以也使得接口应变很小.由图 12(a)可知,焊接接口在断层处时,应变最大的点位于断层右侧固定区的一定距离(文中为 300 mm 左右),

且在此区沿管线两侧应变减小,在断层处达到最小值,而在断层左侧错动区沿管线逐渐增大,在一定距离(文中取300 mm左右)后,应变趋于稳定,但应变幅值小于固定区的最大应变幅值,说明错动区的管道变形受断层处的接口影响,同理可以说明图12(b)、(c)中固定区和错动区管道最大应变幅值的不同。另外,由图12(b)和图12(c)可以看出,螺纹连接接口和法兰连接接口在断层处时,应变最大的点位于断层两侧一定距离(文中为300 mm左右),并沿管线向两侧逐渐减小,在断层处时,法兰接口应变达到最小值,而螺纹接口应变在固定区距离断层约80 mm的位置达到最小,说明螺纹连接管道的应变在接口处会有一定的滞后,这与螺纹具有间隙的特点有一定关系。由图12(c)可以看出,错动区法兰连接管道前侧的应变沿管线长度方向越来越大,这与测点布置数量少有关,即远离断层处的管道应变会非常小。

图13给出接口在非断层处(错动区)时,管道沿线各点的应变变化,因法兰接口在该组试验中断裂,所以无其应变变化图。图中横坐标“0”点为接口处,横坐标500 mm处是断层位置,该位置左侧为错动区(包含接口位置),右侧为固定区。由图看出,最大应变位于断层两侧一定距离,断层处及其附近管道应变很小。由图13(a)可以看出,焊接接口在非断层处时,应变最大点位于断层左侧400 mm(图中横坐标100 mm处),右侧300 mm(图中横坐标800 mm)处,沿管线应变最大点两侧应变逐渐减小,在断层处时达到最小值。由图13(b)可以看出,螺纹连接接口在非断层处时,应变最大点位于断层左侧400 mm(图中横坐标100 mm处)和右侧300 mm(图中800 mm)处,在错动区横坐标0~300 mm范围内管道应变也很大,包括接口位置,而断层右侧50 mm(图中横坐标550 mm)处及接口左侧100 mm以外(图中横坐标-400~-100 mm范围)的管道应变

最小。再次说明螺纹连接管道应变滞后。

4 结 论

(1)走滑断层条件下,管道接口在不同位置时,各接口应变大小不同,且影响整个管线上的各点应变和位移,以及管内的水压。法兰连接的接口最容易发生破坏,在断层错动量并不大时就有可能发生断裂,所以埋地管道接口不适合使用法兰连接。

(2)走滑断层条件下,焊接接口与管道的整体性最好,变形小于相同位置的直管变形,所以埋地钢质管道接口适合使用焊接。

(3)走滑断层条件下,断层两侧一定距离处管道应变最大,破坏的可能性也最大,所以接口不适宜设置在此处;而在断层处以及无穷远处,管道应变很小,破坏的可能性也很小,所以适宜设置接口。

参考文献

- [1] 王政. 西气东输二线工程(龙岗-西峡支干线)地质灾害危险性综合分区研[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
(WANG Zheng. The study of the comprehensive partition about the geological hazard of the Longgang-Xixia branch pipeline project[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.)
- [2] 沈显超. 长输管线管道抗震设计要点[J]. 化学工程与装备, 2013(3): 94-97.
(SHEN Xianchao. Seismic design of long distance pipeline[J]. Chemical engineering & equipment, 2013(3): 94-97.)
- [3] 李小军, 侯春林, 赵雷, 等. 跨断层埋地管道反应分析改进的Newmark方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1210-1216.
(LI Xiaojun, HOU Chunlin, ZHAO Lei, et al. An improved Newmark method for analyzing response of buried pipeline crossing fault[J]. Rock and soil mechanics, 2008, 29(5): 1210-1216.)
- [4] 王滨, 李昕, 周晶. 走滑断层作用下埋地钢制管道反应的改进解析方法[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 51-58.
(WANG Bin, LI Xin, ZHOU Jing. An improved analytical method of buried steel pipeline response under strike-slip fault movement

- [J]. Engineering mechanics, 2011, 28 (12): 51–58.)
- [5] LIU X B, ZHANG H, HAN Y S, et al. A semi-empirical model for peak strain prediction of buried X80 steel pipelines under compression and bending at strike-slip fault crossings[J]. Journal of natural gas science and engineering, 2016(32):465–475.
- [6] 钟伟,刘铁林. 冲断层作用下近场框架结构群的地震响应[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(6):989–997.
(ZHONG Wei, LIU Tielin. Earthquake responses of near-field frame structure cluster due to thrust fault[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29 (6): 989–997.)
- [7] VAZOURAS P, KARAMANOS S A, DA-KOULAS P. Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2012(41):1361–1376.
- [8] ZHANG J, LIANG Z, HAN C J. Buckling behavior analysis of buried gas pipeline under strike-slip fault displacement[J]. Journal of natural gas science and engineering, 2014 (21):921–928.
- [9] VAZOURAS P, KARAMANOS S A, DA-KOULAS P. Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2010(30):1361–1376.
- [10] 郝二通,柳英洲,柳春光. 钢质埋地管线在不同场地走滑断层下的可靠性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(2):215–222.
(HAO Ertong, LIU Yingzhou, LIU Chunguang. Reliability research for buried pipeline subjected to strike-slip fault on different soil sites[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2015, 35(2):215–222.)
- [11] MELISSIANOS V E, KORAKITIS G P, GANTES C J, et al. Numerical evaluation of the effectiveness of flexible joints in buried pipelines subjected to strike-slip fault rupture[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2016 (90):395–410.
- [12] ZHANG L S, ZHAO X B, YAN X Z, et al. A new finite element model of buried steel pipelines crossing strike-slip faults considering equivalent boundary springs[J]. Engineering structures, 2016(123):30–44.
- [13] 赵颖,郭恩栋,林晓东. 正断层位错作用下城市地铁隧道损伤分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(1):60–68.
(ZHAO Ying, GUO Endong, LIN Xiaodong. Damage analysis of urban metro tunnel under normal fault[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32 (1): 60–68.)
- [14] ERAMI M H, MIYAJIMA M, KANEKO S, et al. Pipe-soil interaction for segmented buried pipelines subjected to dip faults[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2014, 44 (3):403–417.
- [15] 周静海,李宏男,宋阳. 埋地球墨铸铁供水管道轴向拉拔试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(3):474–477.
(ZHOU Jinghai, LI Hongnan, SONG Yang. Pullout test research on the underground water pipelines[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2009, 25 (3): 474–477.)
- [16] 段君峰. 球墨铸铁管道胶圈柔性接口的力学性能试验研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2011.
(DUAN Junfeng. Experimental study on mechanical behavior of rubber gasketed joint with ductile cast iron pipe[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011.)
- [17] 陈春光,杨庆华,孔杰,等. 铸铁管道胶圈承插接口抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(3):104–108.
(CHEN Chunguang, YANG Qinghua, KONG Jie, et al. Experimental research on seismic capability of cast-iron pipe with rubber gasket joints[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2012, 32(3):104–108.)
- [18] MELISSIANOS V E, LIGNOS X A, BACHAS K K, et al. Experimental investigation of pipes with flexible joints under fault rupture[J]. Journal of constructional steel research, 2017 (128):633–648.
- [19] BUCO J, EMERIAULT F, KASTNER R. Full-scale experimental determination of concrete pipe joint behavior and its modeling[J]. Journal of infrastructure systems, 2008, 14 (3): 230–240.
- [20] MASON J A, O'ROURKE T D, JUNG J K. Direct tension performance of steel pipelines with welded slip joints[J]. Journal of pipeline systems engineering and practice, 2010, 1(1): 133–140.