

引文: 刘玉卿, 张振永, 吴圣思, 等. 水网地区大口径X80管道环焊缝安全评价[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1128-1136.

LIU Yuqing, ZHANG Zhenyong, WU Shengsi, et al. Safety assessment on girth welds of large-diameter X80 pipelines in water network area[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1128-1136.

## 水网地区大口径 X80 管道环焊缝安全评价

刘玉卿<sup>1</sup> 张振永<sup>1</sup> 吴圣思<sup>2</sup> 季蓓蕾<sup>2</sup> 张宏<sup>2</sup> 刘啸奔<sup>2</sup>

1. 中国石油天然气管道工程有限公司; 2. 中国石油大学(北京)·油气管道输送安全国家工程研究中心·石油工程教育部重点实验室·城市油气输配技术北京市重点实验室

**摘要:** 水网地区土壤含水量大、土质松软, 极易发生沉降, 管道在沉降作用下受到轴向载荷的作用, 受拉伸载荷作用的环焊缝具有较高的失效风险。为保障管道的本质安全, 针对水网地区直径 1 422 mm 的 X80 管道, 采用非线性有限元方法建立了突变型软土沉降下管道轴向应力-应变数值计算模型, 得到了最危险的突变型沉降工况下不同软土沉降位移对管道轴向载荷大小与分布的影响。在此基础上, 采用 BS 7910-2019《金属结构中缺陷可接受性评定方法导则》对软土沉降区不同位置管道焊缝的安全性进行评价, 分析外部载荷条件及焊缝错边的影响, 发现错边量增加将导致评估所用载荷比与韧性比增大, 管道安全保守性降低。在临界裂纹尖端张开位移 (Crack Tip Opening Displacement, CTOD) 值取现有准则 0.25 mm 的条件下, 采用一级评估曲线, 水网地区 X80 管道焊缝始终处于安全状态。若采用二级评估曲线, 当临界 CTOD 值减小至 0.08 mm、沉降位移取最大值 1 m 时, X80 管道焊缝处于安全临界状态。(图 11, 参 25)

**关键词:** X80 管道; 水网地区; 环焊缝; 有限元分析; 失效评估图; 适用性评价

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)10-1128-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.006

## Safety assessment on girth welds of large-diameter X80 pipelines in water network area

LIU Yuqing<sup>1</sup>, ZHANG Zhenyong<sup>1</sup>, WU Shengsi<sup>2</sup>, JI Beilei<sup>2</sup>, ZHANG Hong<sup>2</sup>, LIU Xiaoben<sup>2</sup>

1. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation; 2. China University of Petroleum (Beijing)/National Engineering Research Center for Pipeline Safety/MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering/Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology

**Abstract:** As the soil in the water network area is soft and has large water content, it is very easy to settle, which applies an axial load to the pipeline, and the girth weld under the action of tensile load has a higher risk of failure. In order to ensure the intrinsic safety of the pipeline, a nonlinear finite element method was adopted to establish a numerical calculation model for the axial stress and strain of the pipeline under sudden settlement of soft soil based on the X80 pipeline with a diameter of 1 422 mm in the water network area, and thus the influence of different settlement displacements of soft soil on the size and distribution of the axial load of pipeline under the most unfavorable sudden displacement condition was studied. On this basis, the safety of pipeline welds at different locations in the soft soil settlement area was evaluated according to the *Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures* (BS 7910-2019). Meanwhile, the influence of external load conditions and weld misalignment was analyzed, which indicates that the increase of misalignment leads to an increase in the load ratio and toughness ratio used in the assessment, with the conservativeness reduced for the safety of pipeline. If the critical Crack Tip Opening Displacement (CTOD) is taken to be 0.25 mm in the current standard, and the level-1 assessment curve is adopted, the welds of X80 pipeline in the water network area are always in a safe state. If the level-2 assessment curve is used, the X80 pipeline weld is in a critical safe state when the critical CTOD is reduced to 0.08 mm and the settlement displacement takes the maximum value of 1 m. (11 Figures, 25 References)

**Key words:** X80 pipeline, water network area, girth weld, finite element analysis, Failure Assessment Diagram (FAD), applicability assessment

近年来,随着中国油气资源消费量与进口量的快速增长,以中俄东线天然气管道为典型代表,大口径高钢级管道的建设规模逐年提升。中国幅员辽阔,地质环境复杂,油气长输管道面临沉降、冻胀、滑坡等多种地质灾害的威胁。中俄东线天然气管道中国境内段北起黑龙江省黑河市,南至上海市,其南段需通过江南水网地区。水网地区地表、地下水丰富,土壤受水浸泡后抗剪强度降低,具有明显的流变性,在管道自重等作用下,土体孔隙水压力随时间逐步消散<sup>[1-3]</sup>,导致水网地区的软土地基易发生不均匀沉降,这种软土沉降是威胁水网地区大口径油气管道安全的主要地质灾害之一。

针对地质灾害位移载荷作用下的管道,国内外学者进行了一系列研究。Yatabe 等<sup>[4]</sup>通过有限元软件分析了横向滑坡灾害下管土关键参数对管道偏移量的影响,并从保障管道安全角度提出相应的预防措施。Joshi 等<sup>[5]</sup>建立了一种考虑管道质量的逆断层作用下管道整体屈曲响应数值分析模型,发现松砂回填管沟、管道浅埋敷设能有效降低管道失效可能性。Shah 等<sup>[6]</sup>研究了冻土区埋地天然气冷管的应力与变形,其利用二维刚性冰模型对土壤冻结过程中的热-水过程进行分析,并采用有限元法计算了管道和土壤的力学响应。Liu 等<sup>[7-9]</sup>用数值仿真方法研究了不同形式断层作用下管道的应变响应,并提出了简化的管道地质灾害综合位移模型及管道设计应变计算模型。马小明等<sup>[10]</sup>采用 ANSYS 软件建立了管土非线性接触模型,分析了不均匀沉降作用下埋地管道的应力水平及其影响因素。Zhang 等<sup>[11]</sup>围绕采空沉陷区管道的设计应变开展了案例分析,探明了沉陷等多种载荷作用下管道的应变响应状态。可见,基于非线性有限元的数值仿真方法可以准确模拟管土相互作用,是获取土壤位移作用下管道应力-应变响应的重要途径。

近年来,管道环焊缝问题日益突显,中国发生多起焊缝裂纹起裂破坏事故<sup>[12]</sup>,其原因是管道整体轴向变形超过管道环焊缝应变能力。因此,准确评价轴向载荷作用下管道环焊缝缺陷的适用性对于保障管道安全运行具有重要的意义。目前,针对环焊缝评价有基于塑性破坏的强度准则、基于单参数准则与双参数准则的断裂评估方法、基于有限元分析的数值仿真方法及基于应变的评价方法等多种评价方法<sup>[13]</sup>,其中以失效评估图(Failure Assessment Diagram, FAD)方法应用最为广泛。FAD 方法是一种基于塑性破坏和断裂双判据的评

价方法。1976 年,英国中央电力局提出 R/H/R6《含缺陷结构完整性评定方法》,最早给出了 FAD 的概念,后来逐渐发展并被多个标准引用,不断更新完善<sup>[14]</sup>。此后,不断有学者对各类特定管道的适用性评价进行分析,如 Zhang 等<sup>[15]</sup>基于 3D 弹塑性有限元分析,给出了一种用于应变断裂的 FAD,适用于在大塑性弯曲下有特定几何形状和材料特性的半椭圆形表面裂纹的特定管道。中国亦陆续有学者对热油管道<sup>[16]</sup>、输气管道<sup>[17]</sup>、海底管道<sup>[18]</sup>、斜接管道<sup>[19]</sup>等进行了焊缝适用性评估,但这些管道建成较早,其管径相对较小,且管材多为中低钢级。此外,由于水网地区软土沉降的特殊性,相关的评估结果均无法适用于水网地区焊缝评价。

对于应力集中较严重的环焊接头而言,轴向载荷是导致环焊缝起裂的重要原因,非线性有限元数值仿真方法可用于准确分析位移载荷作用下管道轴向载荷分布,FAD 方法也广泛用于外载荷作用下含缺陷结构的适用性评定。但目前针对软土沉降作用下大口径高钢级管道环焊缝安全评定鲜有相关研究,有必要对水网地区大口径 X80 管道开展管道环焊缝安全评价,以期为保障水网地区大口径管道本质安全提供参考。

## 1 软土作用下管道受力状态分析

软土地基沉降可能引起连续型、突变型、不均匀连续型、阶梯型等多种分布形式的地表位移<sup>[20]</sup>。其中,突变型位移载荷作用下管道所受轴向应力最大,在此主要针对突变型位移载荷作用下的管道环焊缝开展安全评价。

### 1.1 突变型位移作用数值模型

以中俄东线天然气管道为研究对象,建立地面变形作用下管道应力-应变数值仿真模型,采用弯管单元 ELBOW31 模拟管道,管材选用 X80 管线钢,材料弹性模量为 210 GPa,泊松比 0.3,最小屈服强度为 555 MPa。通过与 GB/T 50470—2017《油气输送管道线路工程抗震技术规范》中受约束埋地直管道在内压和温度载荷作用下的管道轴向应力计算公式相比,两种计算结果吻合良好,表明管道应力-应变模型具有准确性。依据美国土木工程师协会(The American Society of Civil Engineers, ASCE)给出的土弹簧模型,参照中国南方地区土壤类型取值,计算土弹簧参数;采用 ABAQUS 管土耦合特殊单元 PSI34 模拟管土相互作用,通过给沉降段土壤节点

施加土壤位移载荷,模拟沉降作用下软土对管道的作用。模型两端采用固定边界条件,为准确描述管道在土壤位移作用下的结构响应,对地面变形区及相邻两侧的网格进行加密,加密区管道单元长度为0.1 m、非加密区管道单元长度为1 m(图1)。

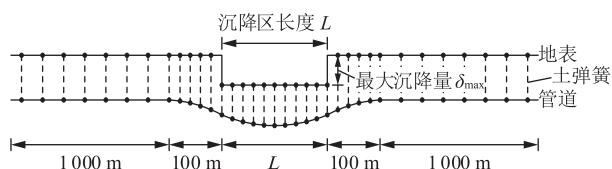


图1 突变型位移形式作用下管道数值仿真模型示意图

Fig. 1 Numerical simulation model of pipeline under the action of sudden displacement

## 1.2 管道应力状态分析

软土沉降区管道在垂直面内受到弯曲作用,管道最大拉应力可能处于管顶,也可能处于管底(图2)。因此分别分析不同沉降位移下管顶与管底的轴向应力分布情况。

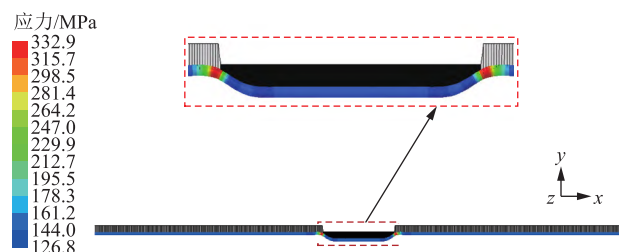
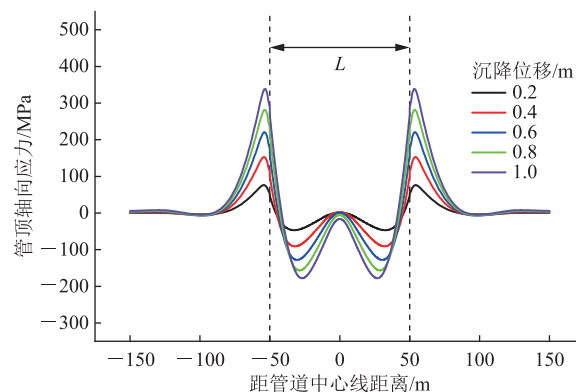


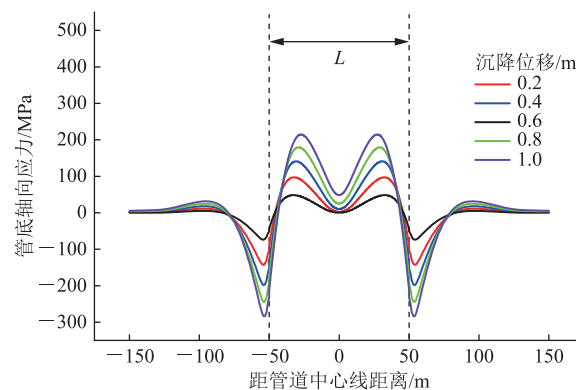
图2 突变型位移作用下管道有限元模型 Mises 应力云图

Fig. 2 Mises stress of pipeline finite element model under sudden displacement

由不同土壤沉降量下管顶、管底轴向应力分布曲线(图3)可见,突变型位移载荷形式下,管顶在沉降区受轴向压应力,在非沉降区受轴向拉应力。软土地区沉降位移有限,一般不超过1 m,因此重点分析沉降位移1 m以下时管道轴向应力的变化规律。在沉降位移载荷作用下,管顶所受拉应力在非沉降区两侧距沉降区边界约4 m处出现峰值,随沉降位移增大,拉应力峰值增大,其位置基本无变化,而压应力峰值位置逐渐向沉降区中心靠近。当沉降位移达到1 m时,管顶所受拉应力达338 MPa。管底在沉降区受轴向拉应力,非沉降区受轴向压应力。在管顶所受压应力达到峰值的位置,管底相应出现受到拉应力峰值,最大可达214 MPa。随着沉降位移的增加,轴向应力增大,最大压应力位置基本无变化,而最大拉应力位置逐渐向沉降区中心靠近。在数值上,管顶、管底所受拉应力峰值与土壤沉降位移近似呈线性关系(图4)。软土沉降下管道受到的最大轴向应力小于X80 管材屈服强度的0.9倍,符合基于应力的评价条件。

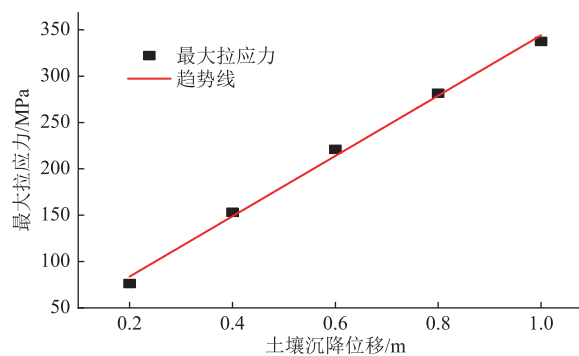


(a) 管顶

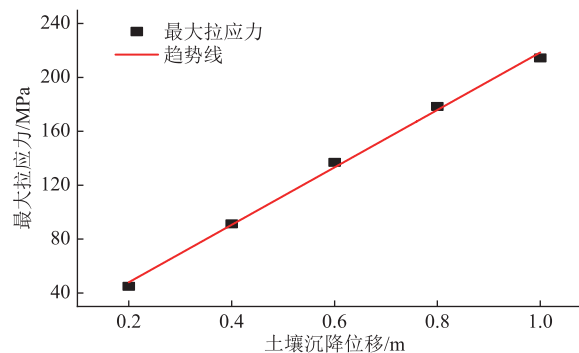


(b) 管底

图3 不同沉降位移载荷下管道轴向应力分布曲线  
Fig. 3 Axial stress distribution curve of pipeline under different settlement displacement loads



(a) 管顶



(b) 管底

图4 管顶、管底所受最大拉应力与土壤沉降量关系曲线  
Fig. 4 Relationship of the maximum tensile stress on the top and bottom of pipeline with soil settlement



因此,可采用 BS 7910-2019《金属结构中缺陷可接受性评估方法指南》开展水网地区 X80 管道环焊缝的适用性评估。

## 2 基于 FAD 的管道环焊缝安全评价

### 2.1 BS 7910-2019 中的 FAD 方法

目前,国内外相关标准对于管道环焊缝的评价普遍采用 FAD 方法。FAD 方法是一种含裂纹结构的安全性评价方法,其同时考虑了结构断裂失效以及塑性失稳的失效形式,通过利用材料特性以及载荷参数,构建评估所使用的失效评估曲线(Failure Assessment Curve, FAC),并根据评估点与失效评估曲线的位置关系(图 5,  $K_r$  为韧性比,  $L_r$  为载荷比)确定最终评价结果。

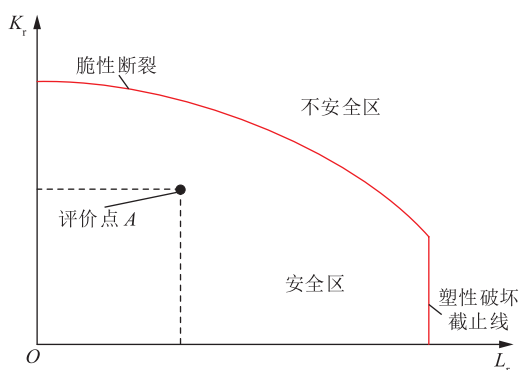


图 5 失效评估曲线原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of failure assessment curve

BS 7910-2019 是目前管道工业界开展含裂纹管道评估主要参考的标准方法,该评定方法以弹塑性断裂力学为基础,对于平面状缺陷,主要采用 FAD 方法进行安全评定。BS 7910-2019 中共有 3 个评定等级,分别为 Option1、Option2、Option3,与可提供的数据及数据精确程度有关,要求的材料及应力分析数据越复杂,结果越精确。Option1 不需要具体的应力-应变数据,评定结果最为保守;Option2 需要母材的真实应力-应变曲线数据;Option3 则需要利用有限元方法对含裂纹结构进行弹性分析或弹塑性分析以得到精确的评估曲线,其保守性最低。

### 2.2 断裂韧性的定义与取值

断裂韧性表征材料阻止裂纹扩展的能力,是判断材料韧性好坏的一个定量指标。断裂韧性值可用应力强度因子  $K$ 、裂纹尖端张开位移(Crack Tip Opening Displacement, CTOD)及  $J$  积分等描述裂纹尖端的力

学状态的单一参量表示,BS 7910-2019 规定,FAD 中材料临界强度因子  $K_{mat}$  可通过临界 CTOD 值换算:

$$K_{mat} = \sqrt{\frac{1.517(\sigma_Y/\sigma_u)^{-0.3188} \sigma_Y \delta_{mat} E}{1-\nu^2}} \quad (1)$$

式中: $E$  为弹性模量,MPa;  $\sigma_Y$  为材料屈服强度,MPa;  $\sigma_u$  为材料抗拉强度,MPa;  $\delta_{mat}$  为以 CTOD 形式表示的断裂韧性值,mm;  $\nu$  为泊松比。

### 2.3 基于 FAD 的管道环焊缝安全评价

管道焊接接头受焊接工艺、技术、人工等因素影响,容易出现错边、裂纹等各种缺陷<sup>[21]</sup>。近年来,多起管道失效事故表明,轴向载荷是含裂纹缺陷管道环焊缝起裂的直接诱因<sup>[12]</sup>。但焊缝裂纹评价采用的局部载荷既包含水网地区软土沉降导致的轴向应力等外部载荷,又包括焊接接头错边结构不连续导致的局部结构性应力集中<sup>[22]</sup>。因此,有必要针对工程可能的管道轴向载荷与环焊接头错边量进行取值,讨论两种参数变化条件下含裂纹管道的安全性。

在对含裂纹结构进行适用性评价之前,需要获取材料性能、裂纹尺寸位置及局部载荷等相关数据。根据中俄东线天然气管道环焊接头性能,发现该管道的环焊缝大多为等强或高强匹配,环焊缝拉伸试样全部于母材处断裂,即管段的承载能力主要取决于母材性能。按照 BS 7910-2019 的要求,应选择较弱性能的材料进行计算,因此屈服强度取标准规定最低值 555 MPa,抗拉强度取最低值 625 MPa;X80 焊接接头裂纹处材料的断裂韧性取目前工程中给出的 CTOD 起裂韧性建议值 0.25 mm,并假定有一裂纹位于焊接接头熔合线位置,形状为半椭圆形,裂纹尺寸取工程允许最大尺寸 25 mm×3 mm(长度×深度)<sup>[23-25]</sup>(图 6,其中  $e$  为错边量; $B_i$  为错边两侧壁厚, $i$  为错边某侧( $i=1,2$ ); $R_i$  为错边两侧管道外半径; $D_1$ 、 $D_2$  为错边两侧管道外直径; $a$  为裂纹深度; $2c$  为裂纹宽度)。此外,还需获取环焊接头局部所受轴向载荷数据,但由于接头位置未知,故需假定接头在沉降地区可能存在的位置。

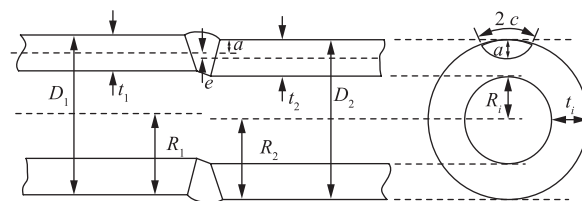


图 6 含错边管道环焊缝几何示意图

Fig. 6 Geometry of girth welds in pipelines with misalignment

由图3可见,在非沉降区距沉降边界4 m处,管顶所受轴向拉应力达到峰值,并于靠近沉降边界处迅速转变为受压状态,远离沉降边界侧变化相对平缓,故选取管顶非沉降区距沉降边界4 m及距沉降边界14 m处作为环焊缝可能存在位置。同理,在对管底开展安全评价时,选取管底沉降区距沉降边界22 m及距沉降边界32 m处作为环焊缝可能存在位置。针对以上4个环焊缝可能存在位置,利用BS 7910-2019的一级、二级评定方法对可能存在的含裂纹环焊缝接头结构进行安全评价,分析轴向载荷与错边量对管道环焊缝适用性评价的影响规律。

### 2.3.1 轴向载荷

含有环向裂纹型缺陷的管道在轴向拉伸作用下的变形承载能力最小,相较于轴向压缩作用更容易发生破坏。因此,针对突变型软土沉降作用下管道环焊缝适用性评价,可忽略压应力的影响,只考虑管道拉伸载荷。由第1.2节中水网地区不同土壤沉降位移下管道沿线轴向载荷分布情况,根据BS 7910-2019可得到管顶及管底距离沉降边界不同位置处的裂纹在轴向拉伸载荷作用下的评估结果(图7、图8)。可见,随着沉降位移导致的管道拉伸载荷增大,评估点的载荷比与

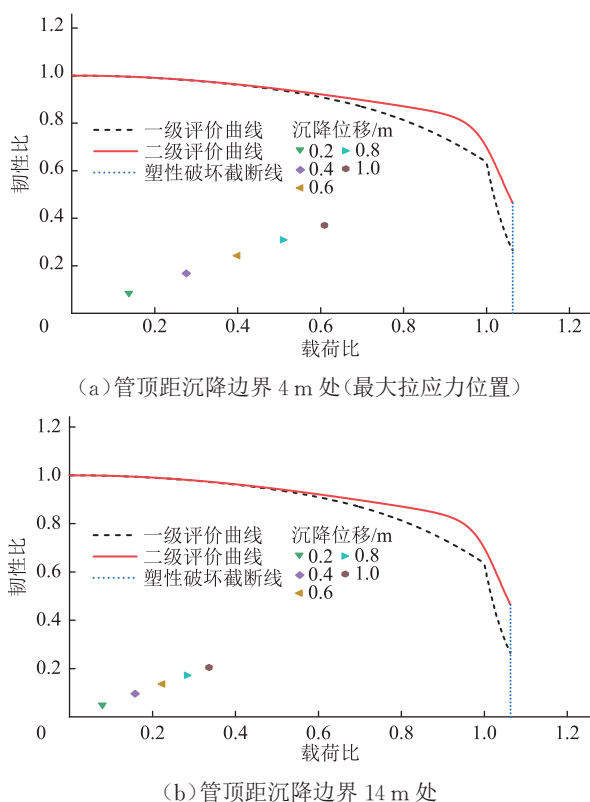


图7 不同沉降位移下管顶焊缝失效评估曲线

Fig. 7 Failure assessment curve of pipeline top weld under different settlement displacements

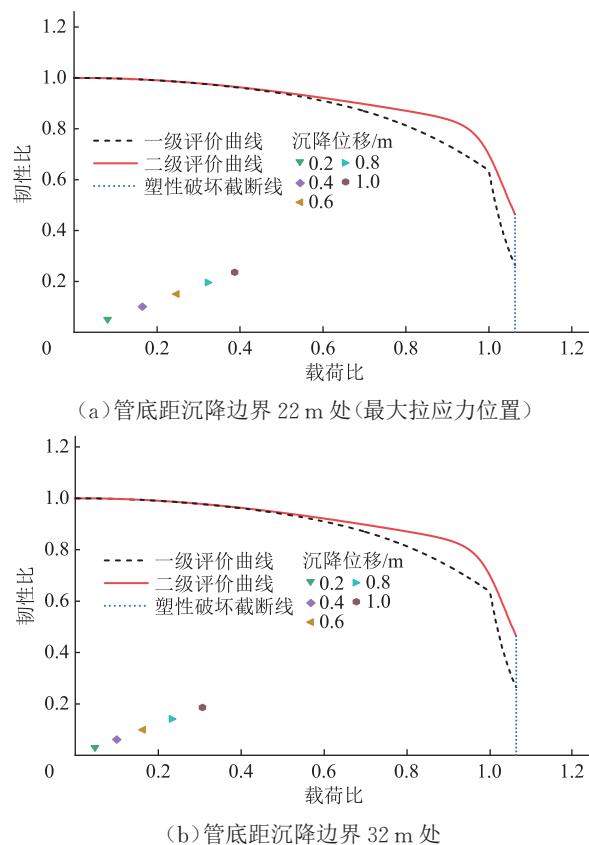


图8 不同沉降位移下管底焊缝失效评估曲线

Fig. 8 Failure assessment curve of pipeline bottom weld under different settlement displacements

韧性比均增大,评估点向右上方移动;当沉降位移为1.0 m时,管道含裂纹环焊缝结构危险性最高,但此时对应的评估点仍位于一级评价的安全范围内,说明管道在水网地区软土可能的沉降位移下满足安全要求。对于管体的同一位置,当沉降位移相同时,随着管道环焊缝位置距沉降边界距离增加,轴向拉伸载荷减小,对应评估点向左下方移动,管道安全性提高。当沉降位移及环焊缝所处位置相同时,突变型软土沉降作用下管顶的轴向拉伸载荷远高于管底,管顶处的评估点比管底更靠近评估曲线,因此管顶环焊接头的裂纹相对于管底更加危险。

### 2.3.2 错边量

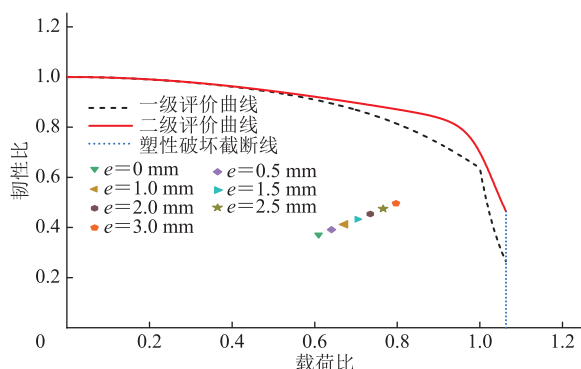
错边量是影响管道焊缝安全评估的重要因素。错边的存在会使环接头在受到轴向拉伸载荷时产生额外的弯曲应力,故在计算载荷比和韧性比时,需要考虑弯曲应力的大小及由错边引起的应力集中系数 $k_m$ 。其计算公式如下:

$$k_m = 1 + \frac{6e}{t_1(1-v^2)[1+(t_2/t_1)^{1.5}]} \quad (2)$$

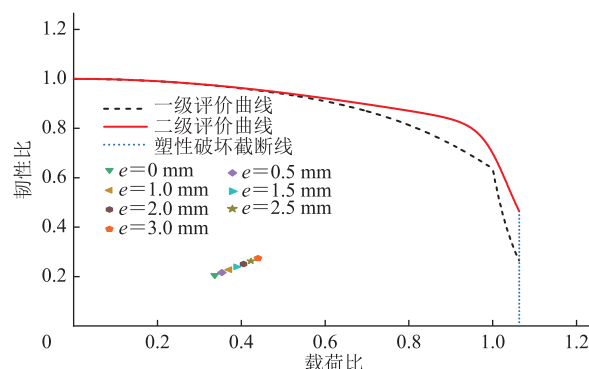
环接头允许的最大错边量为3 mm,在此以

0.5 mm 为间距设置 7 个不同的错边量开展影响规律分析。当管道沉降位移为 1 m 时,管道所受轴向拉伸载荷最大,管顶、管底分别约为 338 MPa、214 MPa。由此,可求得软土沉降量为 1 m 时管顶及管底距离沉降边界不同位置处的裂纹在最大轴向拉伸载荷作用下的评估结果(图 9、图 10)。可见,随着错边量增加,评估点的载荷比和韧性比均增大,评估点向右上方移动,当错边量为 3 mm 时,含裂纹结构最危险,但此时仍处

于一级评价的安全范围内,即在最大错边量 3 mm 下,含裂纹管道环焊缝结构依然符合安全评定要求,管道可以正常运行。对比图 9a 与图 9b、图 10a 与图 10b 可见,当错边量相同时,随着管道环焊缝位置距沉降区边缘的距离增大,轴向拉伸载荷减小,相应评估点向左下方移动,安全性更高;此外,等间距错边量下对应的评估点间距更加紧凑,这是由于轴向载荷降低后,错边对评估点的影响程度降低所致。



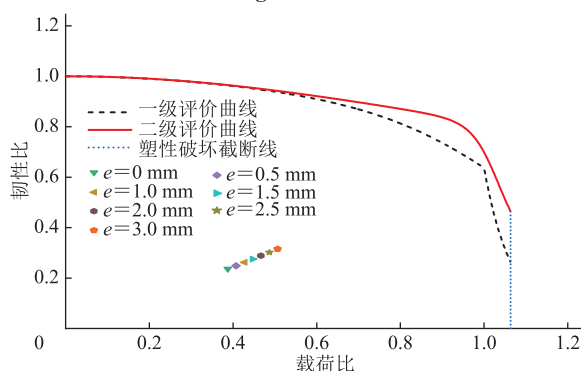
(a) 管顶距沉降边界 4 m 处(最大拉应力位置)



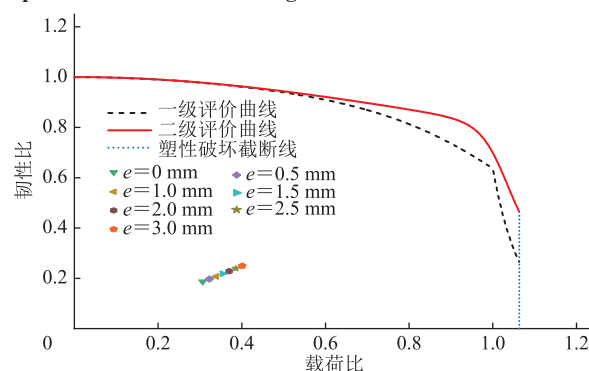
(b) 管顶距沉降边界 14 m 处

图 9 不同错边量下管顶焊缝失效评估曲线

Fig. 9 Failure assessment curve of pipeline top weld with different misalignments



(a) 管底距沉降边界 22 m 处(最大拉应力位置)



(b) 管底距沉降边界 32 m 处

图 10 不同错边量下管底焊缝失效评估曲线

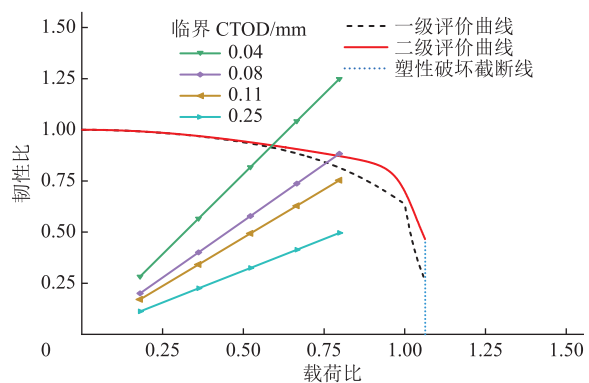
Fig. 10 Failure assessment curve of pipeline bottom weld with different misalignments

综上,基于 BS 7910-2019 与工程相关缺陷及材料参数,直径 1 422 mm 的大口径 X80 管道在水网地区可能的软土沉降量及环焊缝错边量条件下处于安全服役状态。

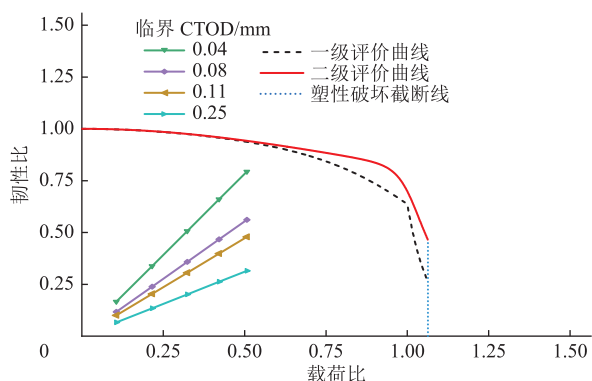
## 2.4 管材临界断裂韧性对环焊缝安全的影响

国内外工程实践表明,管道焊接接头的断裂韧性指标存在一定离散性,2.3 节得到了断裂韧性指标满足现有标准 0.25 mm 条件下的评价结果。在此,设置 0.04 mm、0.08 mm、0.11 mm、0.25 mm 共 4 个不同的临界 CTOD 值,对比不同韧性要求下的环焊缝适用性评估结果,探讨水网载荷条件下管道安全运行的最低韧性控制值。由不同临界 CTOD 取值条件下

管顶及管底应力最大位置的评估曲线(图 11)可见:相同沉降位移下,临界 CTOD 值减小时,拉伸载荷下的评估点载荷比不变、韧性比增大,评估点向上移动,更加靠近一级评价曲线。由图 11a 可知,当沉降位移为 1 m、临界 CTOD 值为 0.04 mm 或 0.08 mm 时,管顶最大拉应力位置的评估点落在二级评估曲线之外,此时管道不符合安全要求,建议利用有限元结果进一步进行第三级评价或直接返修。若要使管顶最大拉应力位置的环焊缝符合二级评估曲线评定要求,当沉降位移为 1 m 时,材料的 CTOD 值需大于 0.11 mm;当沉降位移为 0.8 m 时,材料的 CTOD 值需大于 0.08 mm。



(a) 管顶最大拉应力位置



(b) 管底最大拉应力位置

图 11 不同临界 CTOD 值下管道焊缝失效评估曲线  
Fig. 11 Failure assessment curve of pipeline weld with different critical CTODs

### 3 结论

针对水网地区大口径 X80 管道环焊缝开展适用性评估,利用有限元分析方法获取了突变型沉降不同土壤位移量下管道轴向载荷分布。同时,针对管顶及管底受最大拉伸载荷及附近位置处可能存在的含裂纹环焊接头,利用 FAD 进行安全评定。经过计算分析,得到以下结论:

(1) 突变型位移载荷作用下随着沉降位移的增大,管顶最大拉应力及管底最大压应力位置基本无变化,而管顶最大压应力及管底最大拉应力位置逐渐向沉降区边缘靠近。

(2) 分析外部载荷条件与焊缝错边对评估结果的影响,沉降位移与错边量增大均会导致评估所用载荷比、韧性比增大,管道安全保守性降低。为保证管道安全运行,在焊接工艺过程中,应严格控制错边量,避免由错边产生过大的弯曲应力与管道轴向载荷叠加造成环焊缝开裂。

(3) 在临界 CTOD 值取现有准则 0.25 mm 的条件

下,采用一级评估曲线,水网地区 X80 管道焊缝始终处于安全状态。若采用二级评估曲线,当临界 CTOD 值减小至 0.08 mm、沉降位移取最大值 1 m 时, X80 管道焊缝处于安全临界状态;当沉降位移取 0.8 m 时,临界 CTOD 值应不小于 0.08 mm,方可保证环焊缝满足安全评估要求。


### 参考文献:

- [1] 周圆圆. 水闸软土地基沉降成因及处理[J]. 河南水利与南水北调, 2019, 48(5): 42-44. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8853.2019.05.023.  
ZHOU Y Y. Causes of soft soil foundation settlement of sluice and corresponding treatment[J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion, 2019, 48(5): 42-44.
- [2] 江金进, 刘佳, 吴舒天, 江山, 赖波, 李俊生. 珠海市软土分布特征及软土沉降风险评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, 31(2): 68-74. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4362.2020.02.012.  
JIANG J J, LIU J, WU S T, JIANG S, LAI B, LI J S. Distribution characteristics of soft soil and risk assessment of soft soil subsidence in Zhuhai[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2020, 31(2): 68-74.
- [3] 万友元. 珠三角地区软土沉降特性及工程应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(6): 136-137.  
WAN Y Y. Study on the settling characteristics and engineering application of soft soil in pearl river delta region[J]. Highway Traffic Technology (Applied Technology Version), 2017, 13(6): 136-137.
- [4] YATABE H, FUKUDA N, MASUDA T, TOYODA M. Analytical study of appropriate design for high-grade induction bend pipes subjected to large ground deformation[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2004, 126(4): 376-383. DOI: 10.1115/1.1839881.
- [5] JOSHI S, PRASHANT A, DEB A, JAIN S K. Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(7): 930-940. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.02.003.
- [6] SHAH K R, GHANI RAZAQPUR A. A two-dimensional frost-heave model for buried pipelines[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1993, 36(15): 2545-2566. DOI: 10.1002/nme.1620361504.
- [7] LIU X B, ZHANG H, WU K, XIA M Y, ZHENG Q, LI Y, et al. A refined analytical strain analysis method for offshore pipeline



- under strike-slip fault movement considering strain hardening effect of steel[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2020, 15(2): 215-226. DOI: 10.1080/17445302.2019.1611722.
- [8] LIU X B, ZHENG Q, WU K, YANG Y, ZHAO Z Q, ZHANG H. Development of a novel approach for strain demand prediction of pipes at fault crossings on the basis of multi-layer neural network driven by strain data[J]. *Engineering Structures*, 2020, 214: 110685. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110685.
- [9] LIU X B, ZHANG H, NDUBUAKU O, XIA M Y, CHENG J J R, LI Y, et al. Effects of stress-strain characteristics on local buckling of X80 pipe subjected to strike-slip fault movement[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2018, 140(8): 041408. DOI: 10.1115/1.4040314.
- [10] 马小明, 康逊. 埋地管道不均匀沉降的应力及影响因素分析[J]. *重庆大学学报*, 2017, 40(8): 45-52. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2017.08.006.
- MA X M, KANG X. Analysis on stress and influence factors of buried pipelines under uneven settlement[J]. *Journal of Chongqing University*, 2017, 40(8): 45-52.
- [11] ZHANG F, LIU M, WANG Y Y, YU Z F, TONG L. Strain demand in areas of mine subsidence[C]. *Calgary: 2012 9th International Pipeline Conference*, 2012: 391-401.
- [12] 张宏, 刘啸奔. 地质灾害作用下油气管道设计应变计算模型[J]. *油气储运*, 2017, 36(1): 91-97. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.01.012.
- ZHANG H, LIU X B. Design strain calculation model for oil and gas pipelines subject to geological hazards[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(1): 91-97.
- [13] 杨辉, 王富祥, 陈健, 雷铮强, 玄文博, 考青鹏. 油气管道环焊缝缺陷适用性评价现状与展望[J]. *天然气工业*, 2020, 40(2): 135-139. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.02.016.
- YANG H, WANG F X, CHEN J, LEI Z Q, XUAN W B, KAO Q P. Current status and prospect of fitness-for-service evaluation on the girth weld defects in oil and gas line pipes[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(2): 135-139.
- [14] MILNE I, AINSWORTH R A, DOWLING A R, STEWART A T. Assessment of the integrity of structures containing defects[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1988, 32(1/2/3/4): 3-104. DOI: 10.1016/0308-0161(88)90071-3.
- [15] ZHANG Y M, YI D K, XIAO Z M, HUANG Z H, KUMAR S B. Elastic-plastic fracture analyses for pipeline girth welds with 3D semi-elliptical surface cracks subjected to large plastic bending[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2013, 105/106: 90-102. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.03.009.
- [16] 白强, 罗金恒, 武刚, 李德君. 冷热交替输送管道适用性评价[J]. *石油管材与仪器*, 2017, 3(2): 32-37. DOI: 10.19459/j.cnki.61-1500/te.2017.02.008.
- BAI Q, LUO J H, WU G, LI D J. Fitness for service assessment on a pipeline for cold-hot oil alternating transportation[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2017, 3(2): 32-37.
- [17] 李丽锋, 罗金恒, 朱辉, 常大伟, 张皓. 输油改输气管道适用性评价[J]. *石油管材与仪器*, 2016, 2(3): 40-44. DOI: 10.19459/j.cnki.61-1500/te.2016.03.012.
- LI L F, LUO J H, ZHU H, CHANG D W, ZHANG H. Fitness for service assessment on a pipeline for transmitting gas instead of oil[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2016, 2(3): 40-44.
- [18] 周声结, 王文龙, 邓彩艳, 王东坡. 基于 BS 7910 复合管海底管道对接焊缝 ECA 评估研究[J]. *焊管*, 2013, 36(12): 28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3938.2013.12.009.
- ZHOU S J, WANG W L, DENG C Y, WANG D P. Engineering critical assessment (ECA) of composite pipe submarine pipeline butt weld based on BS 7910[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2013, 36(12): 28-31.
- [19] 武刚, 贾海东, 徐春燕, 杨钊, 尧宗伟, 朱大江. 长输管道斜接环焊缝安全评定研究[J]. *石油管材与仪器*, 2019, 5(3): 16-19. DOI: 10.19459/j.cnki.61-1500/te.2019.03.004.
- WU G, JIA H D, XU C Y, YANG Z, YAO Z W, ZHU D J. Study on safety assessment of miter girth welds of the long-distance pipeline[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2019, 5(3): 16-19.
- [20] 季蓓蕾, 刘啸奔, 江金旭, 易斐宁, 武学健, 刘玉卿, 等. 软土沉降位移作用下大口径管道轴向应力状态研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(6): 85-90. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2021.06.014.
- Ji B L, LIU X B, JIANG J X, YI F N, WU X J, LIU Y Q, et al. Study on longitudinal stress state of large diameter pipeline under effect of soft soil settlement displacement[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(6): 85-90.
- [21] 隋永莉, 吴宏. 我国长输油气管道自动焊技术应用现状及展



- 望[J]. 油气储运, 2014, 33(9): 913-921. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.09.001.
- SUI Y L, WU H. Current and future applications of automatic welding technology for long-distance oil/gas pipeline in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(9): 913-921.
- [22] 任俊杰, 马卫锋, 惠文颖, 罗金恒, 王珂, 马秋荣, 等. 高钢级管道环焊缝断裂行为研究现状及探讨[J]. 石油工程建设, 2019, 45(1): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2206.2019.01.001.
- REN J J, MA W F, HUI W Y, LUO J H, WANG K, MA Q R, et al. Research status and prospect on fracture behaviour of butt girth welds in high grade steel pipelines[J]. Petroleum Engineering Construction, 2019, 45(1): 1-5.
- [23] 张宏, 吴锴, 刘啸奔, 杨悦, 隋永莉, 张振永. 直径 1 422 mm X80 管道环焊接头应变能力数值模拟方法[J]. 油气储运, 2020, 39(2): 162-168. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.02.005.
- ZHANG H, WU K, LIU X B, YANG Y, SUI Y L, ZHANG Z Y. Numerical simulation method for strain capacity of girth welding joint on X80 pipeline with 1422 mm diameter[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(2): 162-168.
- [24] 蒋庆梅, 张小强, 张弥, 李朝. 中俄东线天然气管道环焊缝断裂韧性的确定[J]. 焊接技术, 2017, 46(9): 82-85. DOI: 10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2017.09.027.
- JIANG Q M, ZHANG X Q, ZHANG M, LI Z. Determination of fracture toughness for girth weld in China-Russia Eastern Natural Gas Pipeline[J]. Welding Technology, 2017, 46(9): 82-85.
- [25] 张振永. 中俄东线 X80 钢级  $\Phi$  1422 mm 管道工程设计关键技术应用[J]. 焊管, 2019, 42(7): 64-71. DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2019.7.007.
- ZHANG Z Y. Application of key technologies in design of X80  $\Phi$  1422 mm pipeline engineering of China-Russia East Natural Gas Pipeline Project[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(7): 64-71.
- (收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2023-08-23; 编辑: 张腾)
- 
- 作者简介:** 刘玉卿, 男, 1986 年生, 高级工程师, 2012 年硕士毕业于天津大学船舶与海洋工程专业, 现主要从事油气长输管道线路设计、应力分析与安全评价工作。地址: 河北省廊坊市广阳区和平路 146 号, 065000。电话: 0316-2074544。Email: liu\_yuqing@cnpc.com.cn
- 开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

(上接第 1127 页)

- simulations: developing comprehensive soil classified leakage models[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 102: 104583. DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104583.
- [18] 王晓峰, 蒲明, 宋磊, 陈嘉琦, 郭杰, 孙骥妹, 等. 氢气与天然气长输管道设计对比探讨[J]. 油气与新能源, 2022, 34(5): 21-26. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2022.05.004.
- WANG X F, PU M, SONG L, CHEN J Q, GUO J, SUN J S, et al. Analysis on the comparison between hydrogen and natural gas long-distance pipeline design[J]. Petroleum and New Energy, 2022, 34(5): 21-26.
- [19] LIU C W, LIAO Y H, LIANG J, CUI Z X, LI Y X. Quantifying methane release and dispersion estimations for buried natural gas pipeline leakages[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 146: 552-563. DOI: 10.1016/j.psep.2020.11.031.
- (收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-06-30; 编辑: 张雪琴)
- 基金项目:** 国家重点研发计划“氢能技术”重点专项“中低压纯氢与掺氢燃气管道系统事故特征演化及完整性管理”, 2021YFB4001603; 国家重点研发计划项目“质子交换膜燃料电池与氢基内燃机混合发电系统技术-氢基燃料改质、纯化及现场氢源总成”, 2022YFB4003701; 国家自然科学基金资助项目“基于表面张力/压力差驱动的低温推进剂在轨加注过程的气液高效分离机理研究与技术开发”, 52176161。
- 作者简介:** 胡玮鹏, 男, 1998 年生, 在读硕士生, 2021 年毕业于西安交通大学电气工程及其自动化专业, 现主要从事天然气管道泄漏快速仿真预测技术的研究工作。地址: 陕西省西安市长安区思源环北路中国西部科技创新港西安交通大学, 710049。电话: 15877652271。Email: hu1098324138@stu.xjtu.edu.cn
- 开放科学(资源服务)标识码(OSID): 