

断层内含体积型缺陷的埋地管道错动反应分析

李鸿鹏¹ 刘 武² 丰晓红³ 张洪奇⁴ 许春林¹

1. 中国石油西气东输管道公司, 江苏 泰兴 225419;
2. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500;
3. 山东省天然气管道有限责任公司, 山东 济南 250001;
4. 中国石油天然气管道公司, 江苏 扬州 225261

摘 要:基于实体模型和土弹簧模型,分析了含体积型缺陷埋地管道在断层错动下的应力应变反应,探讨了断层内含缺陷管道和无缺陷管道在错动作用下应力应变分布的差异。研究了不同缺陷深度、面积和位置等因素对管道顶部和底部应力应变的影响;基于有限元计算的等效应力应变、ASME B 31 G 圆周断裂应力和管道的容许应变,建立了含缺陷管道错动反应的安全评判准则,分析了含体积型缺陷的埋地管道在断层错动下的安全性。当缺陷深度大于 30 % 管道壁厚时,对管道在断层错动下的安全性构成了威胁;当缺陷环向方向位于管底时,轴向方向位于管道的大变形段内时,对断层内管道错动反应的影响要高于其他位置;在一定数值范围内,缺陷面积对管道在断层错动下的安全性影响较小。

关键词:体积型缺陷;埋地管道;断层错动;抗震安全性

DOI:10. 3969 /j. issn. 1006 - 5539. 2015. 06. 001

0 前言

近年来,我国地震频发,对穿越活动断层段的埋地管道造成了极大影响。埋地管道的运行压力一般较高,一旦发生泄漏可能导致火灾甚至爆炸,对整个管道输送系统和周边环境带来巨大的危害^[1]。目前规范中采用了理论解析法计算埋地管道在断层错动下的应力应变反应,O'Rourke M 等人^[2]采用数值模型对跨断层管道的反应进行了分析,并将所得数值结果与已有理论解析结果进行对比,结果表明:管道受拉应力时 Kennedy 方法较为合理,但在逆断层作用下管道受压缩作用时则必须采用数值分析法进行分析。薛景宏等人^[3]提出了弹簧-管道-土体模型,用实体单元对断层面两侧的土体进行离散,管道大变形段之外的管土作用利用土弹簧单元进行模拟,利用该模型,算例的计算结果与目前规范中采用的经典解析法的计算结果相差较大,证实了目前规范

中采用的经典解析法相对于有限元方法的局限性。马业华等人^[4]在研究含体积型缺陷管道的安全评定技术过程中,利用 ANSYS 软件,结合 VS 2005、Access 及 ANSYS 中的 APDL 语言开发了一套含缺陷管道安全评定系统,该系统可实现对含缺陷管道数据库的管理,完成各种形状下缺陷的参数化建模、计算机安全评定工作,可用于在役管线的安全性评估工作,为含缺陷管道的安全评定研究工作提供了有力的工具。舒安庆等人^[5]利用数值分析研究了腐蚀缺陷的宽度、长度及深度对压力管道极限载荷的影响,并将有限元计算结果与 ASME B 31 G《腐蚀管道剩余强度评价手册》^[6]计算结果以及全尺寸爆破试验数据进行对比分析,验证了有限元方法对含缺陷管道计算分析的有效性。

利用有限元方法可以对含缺陷管道在断层错动下的反应实现更精确的模拟计算,但在实际应用中不可能

收稿日期:2015-04-20

基金项目:四川省应用基础研究项目(2013 JY 0098)

作者简介:李鸿鹏(1988-),男,江苏徐州人,助理工程师,硕士,主要从事长输天然气管道运行与安全技术研究工作。

对每一段管道都进行有限元建模计算,建模和计算过程将耗费大量的时间和物力,也非常不经济。为此,高田次郎、Nemat Hassani 和 Katsumi Fukuda 在有限元计算的基础上,提出了可用于工程设计的简化计算公式,刘爱文在高田次郎分析模型不足之处的基础上,结合跨断层埋地管道影响参数研究,给出了新的跨断层埋地管道地震反应计算公式^[7-10]。

国内外针对跨断层埋地管道地震反应的研究,主要是针对无缺陷管道,而对于断层内带有缺陷的埋地管道在地震作用下反应的研究相对较少,本文利用有限元方法,分析断层内含有体积型缺陷的埋地管道在错动下的反应,研究不同的缺陷参数对管道应力应变反应的影响,结合 ASME B 31 G《腐蚀管道剩余强度评价手册》评价方法和抗震设计规范,对断层错动下含缺陷管道的安全性进行评估。

1 含缺陷管道在断层错动下的反应

管道缺陷类型以体积型缺陷最为常见,见表 1。

表 1 管道缺陷类型及表现形式

管道缺陷类型	表现形式
体积型	缺陷打磨时造成的局部减薄,沟槽状和片状腐蚀缺陷等
裂纹型	未熔合、未焊透、焊接裂纹、应力腐蚀裂纹
弥散损伤型	点蚀、氢鼓泡、氢致微裂纹
几何型	焊缝擦嘴、错边、管体不圆、壁厚不均匀等
机械损伤型	凹坑、沟槽、凹坑+沟槽

管道体积型缺陷见图 1。体积型缺陷的存在直接导致管壁减薄和管道承压能力下降,甚至导致管道发生塑性变形硬化。考虑到油气管线的重要地位和发生事故的危害性及事故后维修维护费用,对在地震作用下含缺陷埋地管道进行安全评定十分必要。

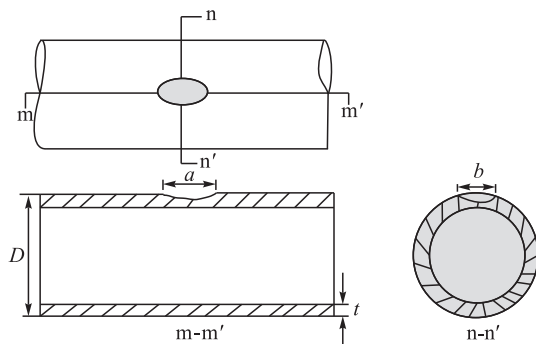


图 1 管道体积型缺陷示意图

根据某管线相关参数建立有限元实体模型:管线材质为 X 70 钢,管径 762 mm,壁厚 15 mm,管材密度 $7\ 850\text{ kg/m}^3$,管道埋深 1.5 m,管道内压 6 MPa,断层类型为正断层,对于管道的作用主要是拉伸破坏,断层交角为 45° ,错动量为 0.3~1.5 m,管道周围为砂黏土,土体密度 $1\ 900\text{ kg/m}^3$,

内摩擦角 20° 。

选用 Solide 45 单元对管道本体进行离散,Combin 39 土弹簧单元对管道-埋地土之间的相互作用进行模拟^[11];考虑到埋地管道在断层作用下的大变形段一般为 30~70 倍管径^[12-15],故有限元模型中管道和断层的长度选定为 100 m。在腐蚀缺陷处将网格适度加密,缺陷附近处管道的网格划分见图 2。

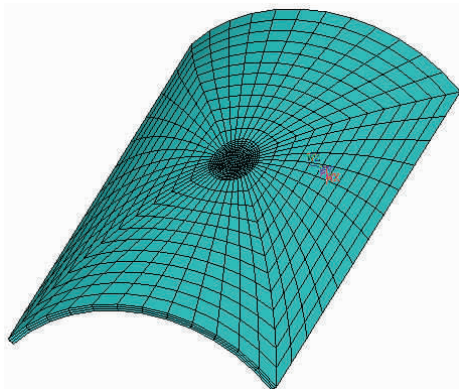


图 2 管道缺陷处的网格划分

在含体积型缺陷的模型中,腐蚀缺陷深度选定为 10%~60% 的管道壁厚,图 3 展示了含体积型缺陷的跨断层埋地管道在不同断层错动量下管道的纵向位移。为方便研究分析,设定管道轴向中心位置为横坐标原点,横坐标的数值表示距离管道中心点的距离,纵坐标表示管道的位移或应力应变值。

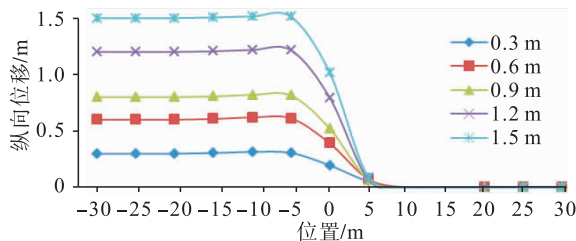
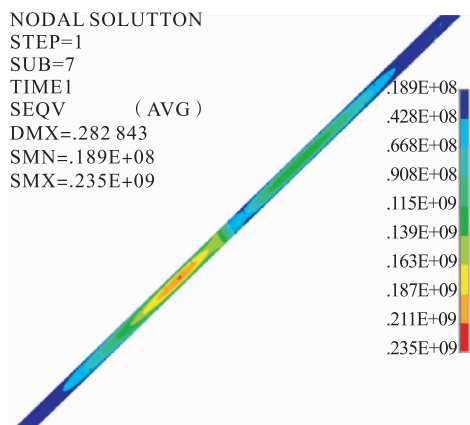


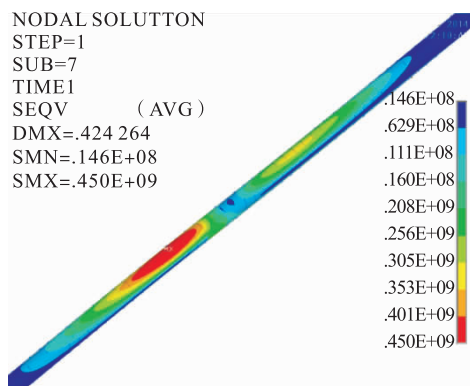
图 3 不同断层错动量下管道的纵向位移

由图 3 可以看出,埋地管道的纵向位移随着断层错动量的增加而增大,管道大变形段集中在断层面两侧较小范围内。图 4 和图 5 分别展示了有无缺陷管道在断层错动量 0.3 m 时的应力应变云图,管道应力集中现象主要出现在管道大变形段的顶部和底部位置,由于缺陷的存在,管道在断层错动下的应力应变集中区域明显增大,应力应变峰值增长较大。

图 6 和图 7 分别为有无缺陷管道的顶部应力和底部应变分布图,可以看出,管道的大变形区域集中在断层两侧 13~20 倍管径长度范围内。在大变形区域内,有无缺陷管道的应力应变分布规律基本相同,但数值差异较大,算例中含缺陷管道的最大应力约为无缺陷管道的 1.79 倍,最大应变约为无缺陷管道的 1.5 倍,缺陷的存在对管道在断层错动反应产生的影响不可忽略。

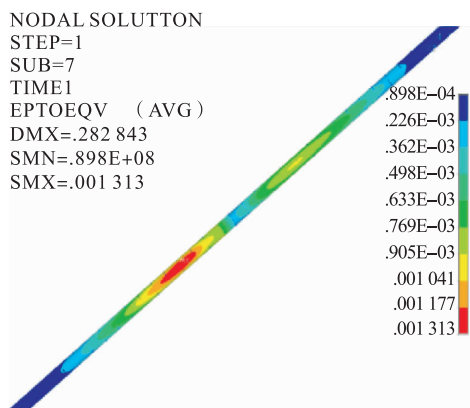


a) 无缺陷管道

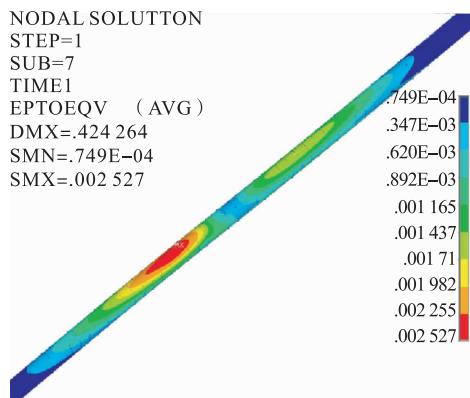


b) 含缺陷管道

图 4 有无缺陷管道在断层错动下的应力云图



a) 无缺陷管道



b) 含缺陷管道

图 5 有无缺陷管道在断层错动下的应变云图

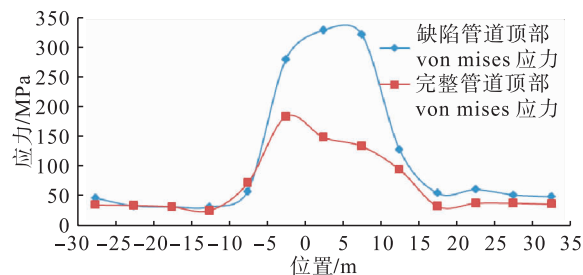


图 6 有无缺陷管道的顶部应力分布

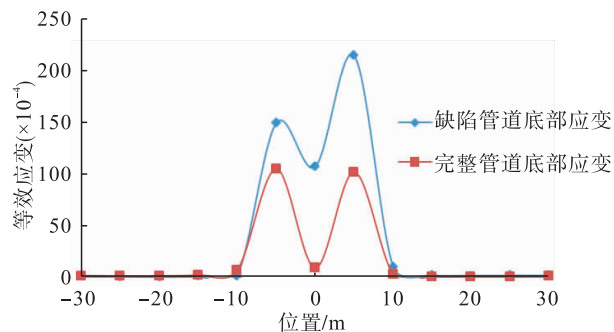


图 7 有无缺陷管道的底部应变分布

2 缺陷参数对埋地管道错动反应的影响

2.1 缺陷深度对管道错动反应的影响

根据 ASME B 31 G《腐蚀管道剩余强度评价手册》规定:腐蚀缺陷深度应当介于 10 % ~ 80 % 壁厚范围内,低于 10 % 壁厚的缺陷可视作无缺陷,高于 80 % 壁厚的管段可视作报废处理^[16]。图 8 列举了 30 %、60 % 壁厚深度的体积型缺陷。

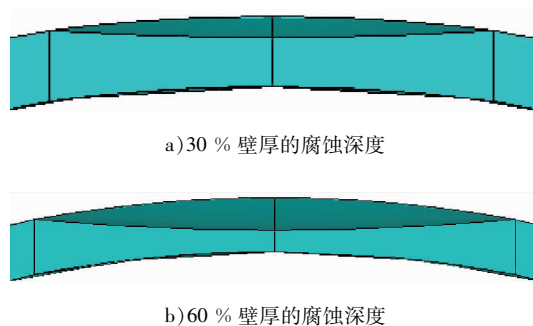


图 8 不同腐蚀深度的缺陷示意图

由图 9 管道的应力应变云图和图 10 管道不同缺陷深度的应力应变分布可知,当缺陷位于管道中心时,缺陷的存在对于管道应力应变的影响范围集中在管道中心两侧约 6.6 倍管径范围内;当管道的体积型缺陷深度低于 30 % 壁厚时,含缺陷管道的应力应变分布规律与无缺陷管道的应力应变分布基本相同,管道顶部的最大应力值基本一致,当体积型缺陷深度高于 40 % 壁厚时,管道的最大应力点由管道两侧转移至管道缺陷位置,且管道的最大应变值急剧增长,管材已进入弹塑性阶段,对于管道的错动反应产生了较大影响。

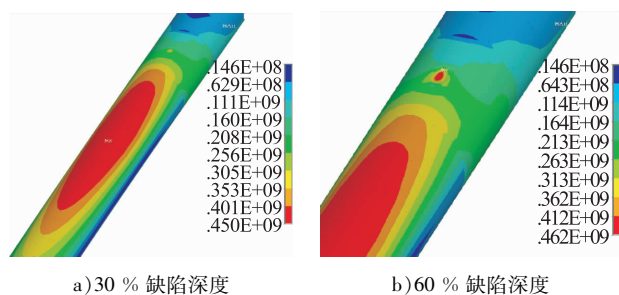
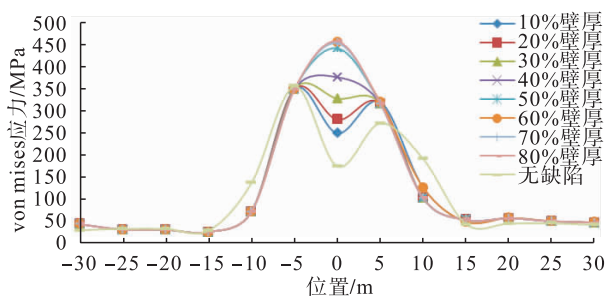


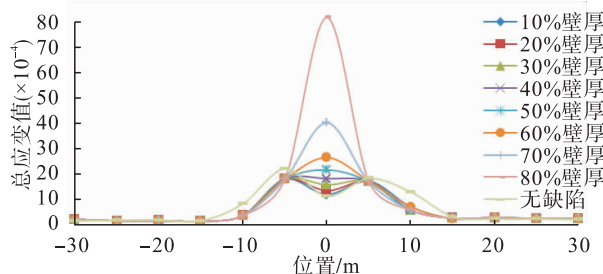
图9 不同缺陷深度下最大应力点

2.2 缺陷面积对管道错动反应的影响

设定体积型缺陷深度为30%管道壁厚,断层错动量为0.3 m,缺陷位置选择在管道顶部,缺陷面积分别选0.007 5、0.015 9、0.024 2、0.030 6 m²。

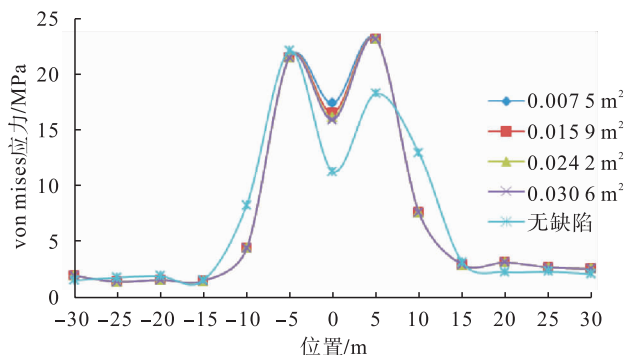


a) 不同缺陷深度下管道应力曲线

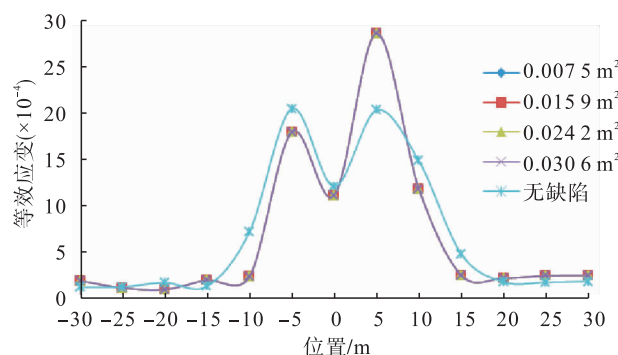


b) 不同缺陷深度下管道应变曲线

图10 不同缺陷深度下管道应力应变分布曲线



a) 不同缺陷面积下管道应力分布曲线



b) 不同缺陷面积下管道应变分布曲线

图11 不同缺陷面积下管道的应力应变分布曲线

2.3 缺陷位置对管道错动反应的影响

缺陷位置分布主要考虑了轴向和环向分布两种工况。轴向分布为两种形式:缺陷位于断层中心,设定为位置1,缺陷位于管道大变形段时设定为位置2;环向分布为管顶、管侧和管底三种分布形式,共计6种位置分布。缺陷深度均为30%管道壁厚,缺陷面积相同。图12分别展示了缺陷位于管顶和管侧的管段模型。

当缺陷位于管道中心时,管道的应力峰值出现在断层层面两侧约6.6倍管径长度位置,且数值相对较小;当缺陷位于管道的大变形段时,在断层错动作用下,管道的应力应变峰值点出现在缺陷位置,且管道的最大应力值相对于缺陷位于管道中心时增大了约1.3倍。同等条件

由图11不同缺陷面积下管道的应力应变分布曲线可知,相较于无缺陷管道,含缺陷管道在相同位置上的应力值约为无缺陷管道应力值的1.25~1.37倍。在同一缺陷深度下,缺陷面积越大,管道的最大应力值越大,管道的最大应变则随着缺陷面积的增大而减小。缺陷的存在对管道轴向产生的影响较大,在距离管道缺陷中心20倍管径长度以外的管段已基本不受缺陷的影响。由计算结果可以看出,缺陷面积对于管道应力应变的影响较小,当管道的最大应力小于管道的圆周断裂应力时,在一定范围内,同等条件下含较大缺陷面积管道的最大应变值反而较小,对管道错动反应的影响越小。

下,缺陷位于管道底部时,对管道错动反应的影响最大,缺陷位于管道侧面时对管道错动反应的影响最小。不同缺陷位置的管道在断层错动下的应力应变分布曲线见图13。

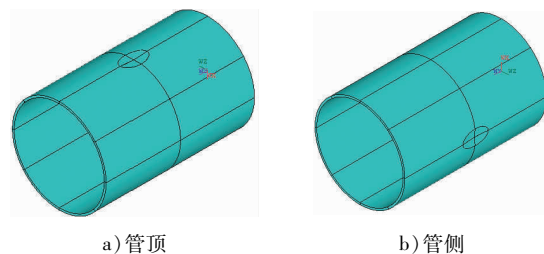
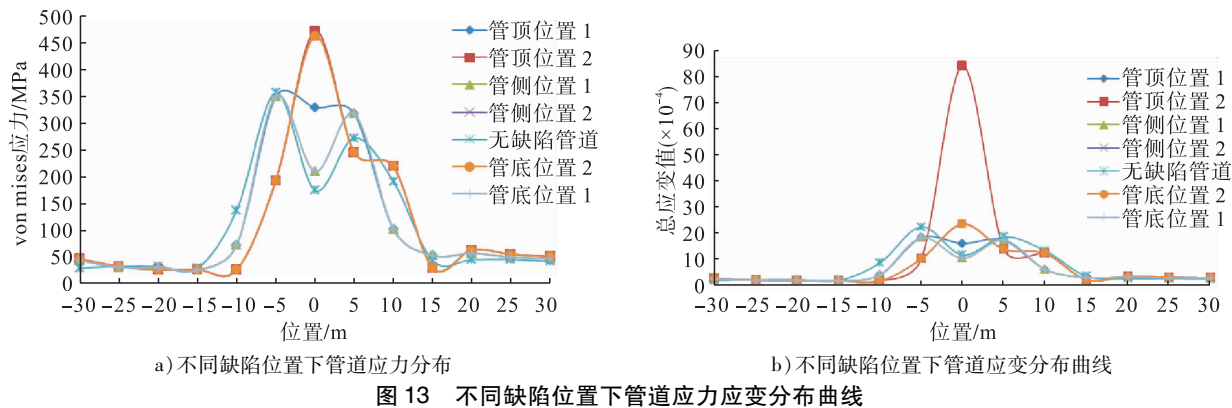


图12 不同缺陷位置的管段模型示意图



3 断层内含缺陷管道的安全性分析

在正断层错动作用下,埋地管道主要受拉伸作用。本文根据模型计算结果与 ASME B 31 G《腐蚀管道剩余强度评价手册》中的管道圆周断裂应力进行对比,结合简化计算公式计算结果,对断层错动作用下埋地管道的安全性进行评价。GB 50470-2008《油气输送管道线路工程抗震技术规范》^[12]中针对组焊管道材料的容许拉伸

应变的规定见表 2;针对不同缺陷参数下管道的安全性评价数据见表 3~4。

表 2 管道材料容许的拉伸应变

拉伸强度极限 /MPa	容许拉伸应变 /(%)
$\sigma_b < 552$	1.00
$552 < \sigma_b < 793$	0.90
$793 < \sigma_b < 896$	0.80

表 3 不同缺陷深度管道最大应力应变

缺陷深度	圆周断裂应力 /MPa	基于有限元方法计算结果					
		缺陷位于管顶		缺陷位于管侧		缺陷位于管底	
		最大应力 /MPa	最大应变 /(%)	最大应力 /MPa	最大应变 /(%)	最大应力 /MPa	最大应变 /(%)
20 % 壁厚	486	412	0.91	364	0.73	424	0.92
30 % 壁厚	459	454	1.01	365	0.82	461	1.02
40 % 壁厚	399	464	1.18	365	0.95	465	1.20
50 % 壁厚	346	464	1.48	365	1.19	463	1.49
60 % 壁厚	287	466	1.97	436	1.59	466	1.99

表 4 含缺陷管道不同埋地土质下的最大应力应变

埋地土质	圆周断裂应力 /MPa	基于有限元方法计算结果			
		缺陷位于管顶		缺陷位于管底	
		最大应力 /MPa	最大应变 /(%)	最大应力 /MPa	最大应变 /(%)
砂黏土	458.8	454	1.01	461	1.02
中砂	458.8	462	1.53	463	1.52

由表 3 可知,当体积型缺陷位于管顶,缺陷深度不高于 30 % 壁厚时,管道的最大应力值低于管道的圆周断裂应力,最大应变基本上低于 1 %,缺陷位于管顶和管底时拉伸应变稍大于 1 %,考虑到简化模型模拟计算与现场实际仍有一定的误差,可认为 30 % 壁厚下缺陷位于管顶和管底时仍处于安全状态,但应加强监测;当缺陷深度高于 30 % 壁厚时,管道最大应变均已高于管材 1 % 的最大容许拉伸应变,有限元方法计算的管道最大应力已高于相对应的圆周断裂应力,在断层错动作用下管道有断裂的危险;当同样的缺陷位于管道侧面位置时,对管道的影响相对较小,缺陷深度高于 40 % 壁厚时管道才处于危险状态,

而位于管底时,缺陷深度高于 30 % 壁厚时已处于不安全状态。通过数据对比可以看出,同样的缺陷位于管底位置时对管道安全威胁最大,位于管顶次之,位于管侧最小。

表 4 中列出了 30 % 壁厚深度下的缺陷在不同埋地土质下的最大应力应变,可以看出,在同样的断层错动下,埋置于中砂土质下的管道更容易受到破坏。此外,由表 3~4 可以看出,ASME B 31 G《腐蚀管道剩余强度评价手册》中的方法计算圆周断裂应力考虑了不同缺陷深度的影响,但对于缺陷位置和埋地土质对管道安全性的影响考虑不足,因此,对于跨断层埋地管道的抗震分析,应尽量考虑应用数值分析方法。

4 结论

- 1) 基于 Solid 45 和 Combin 39 单元建立了断层内含体积型缺陷的埋地管道错动反应模型。管道的纵向位移随断层量的增大而增大,管道的大变形段集中在断层面两侧约 40 倍管径长度范围内。
- 2) 埋地管道在断层错动作用下的应力应变随着缺

陷深度的加深而增大,当缺陷位于管顶或管底时,应力应变值较大,当缺陷深度高于30%壁厚时,对管道在断层错动下的安全构成威胁。

3)在管道轴向方向上,缺陷位于管道大变形段内时对管道的错动反应影响最大;在管道环向方向,缺陷位于管道底部对管道的影响高于缺陷位于管顶和管侧。

4)基于具体管段的数值模拟、ASME B 31 G《腐蚀管道剩余强度评价手册》中的圆周断裂应力和现行的抗震规范,建立了断层内含体积型缺陷的埋地管道在断层错动下的安全性评判准则。针对具体管道在断层错动下的安全性进行了分析评判。

参考文献:

- [1] 帅 健. 管线力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Shuai Jian. Pipeline Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] O'Rourke M, Liu X J. Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects[J]. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research of Buffalo University, 1999, 4 (13): 8-13.
- [3] 薛景宏, 张 超, 吕培培. 跨断层埋地管道抗震分析[J]. 压力容器, 2009, 26(9): 26-30.
Xue Jinghong, Zhang Chao, Lv Peipei. Earthquake Resistance Analysis for Buried Pipelines across Fault[J]. Pressure Vessel, 2009, 26 (9): 26-30.
- [4] 马业华, 何东升, 陈星明, 等. 基于VC、ANSYS和Access的含缺陷管道安全评定系统[J]. 管道技术与设备, 2010, 18(1): 21-24.
Ma Yehua, He Dongsheng, Chen Xingming, et al. Safety Assessment System for Pipelines with Defects Based on VC, ANSYS and Access[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2010, 18 (1): 21-24.
- [5] 舒安庆, 王伟华, 魏化中. 带体积型缺陷压力管道极限载荷的有限元分析[J]. 化工设备与管道, 2008, 45(1): 55-57.
Shu Anqing, Wang Weihua, Wei Huazhong. Finite Element Analysis on Limite Load in Pressure Piping with Volumetric Defect[J]. Chemical Equipment and Pipeline, 2008, 45 (1): 55-57.
- [6] 美国机械工程师协会. 腐蚀管道剩余强度评价手册: ASME B31G-2009[S]. 纽约: 美国机械工程师协会, 2009: 3-6.
American Society of Mechanical Engineers. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipeline: ASME B31G-2009 [S]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2009: 3-6.
- [7] Takada S, Hassani N, Fukuda K. A New Proposal for Simplified Design of Buried Steel Pipes Crossing Active Faults [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, 30: 1243-1257.
- [8] 刘爱文. 基于壳模型的埋地管线抗震分析[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2002.
Liu Aiwen. Analysis on Earthquake Resistance of Buried Pipeline Based on Shell Model[D]. Beijing: China Seismological Bureau Geophysics Institute, 2002.
- [9] Takada S, Liang J W, Li T Y. Shell Model Response of Buried Pipelines to Large Fault Movements[J]. Journal of Structural Engineering, JSCE, 1998, 44a (11): 1637-1646.
- [10] 丰晓红. 跨断层埋地输气管道断层错动反应分析方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
Feng Xiaohong. Study on Analysis Method for Rupture Response of Buried Pipeline across Fault [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [11] 国家发展和改革委员会. 输油(气)钢质管道抗震设计规范: SY/T 0450-2004[S]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2004: 10-19.
National Development and Reform Commission. Code for Seismic Design of Oil and Gas Steel Pipeline: SY /T 0450 - 2004 [S]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2004: 10-19.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 油气输送管道线路工程抗震技术规范: GB 50470-2008[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2009: 16-30.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Seismic Technical Code for Oil and Gas Transmission Pipeline Engineering: GB 50470 - 2008 [S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Construction, 2009: 16-30.
- [13] Eduardo K. Early History of Soil Structure Interaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30 (9): 822-832.
- [14] 贺星新, 李爱群, 李建慧, 等. 土-桩-结构相互作用对独塔自锚式悬索桥地震响应的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(1): 150-154.
He Xingxin, Li Aiqun, Li Jianhui, et al. Influence of soil-pile-structure interaction on seismic response on self-anchored suspension bridge with single-tower [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44 (1): 150-154.
- [15] 金 浏, 李鸿晶, 姚保华. 埋地管线-土体相互作用分析计算区域的选取[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2009, 31(3): 37-41.
Jin Liu, Li Hongjing, Yao Baohua. Determination of Interaction Area in Pipeline-Soil System under Ground Permanent Deformation [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 31 (3): 37-41.
- [16] 吴晓丹. 含腐蚀缺陷输油管道的抗震安全性研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.
Wu Xiaodan. Seismic Security Study on Corroded Oil Pipeline[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012.