

跨断层埋地输油气管道抗震研究述评

张少春^{1,2} 范 锋¹ 丰晓红¹

1. 山东省天然气管道有限责任公司, 山东 青岛 266300;

2. 西南石油大学研究生学院, 四川 成都 610500

摘 要:埋地输油气管道地震破坏通常发生在活动断层,因此,有必要对目前国内外埋地管道的断层错动反应进行分析,以避免或减轻跨断层管道在未来地震中的破坏。综述了理论解析法、数值分析法和试验研究法等三种国内外近几年跨断层埋地输油气管道断层错动反应分析方法,比较三种方法的优缺点,指出各方法中存在的问题。从新建管道项目和已建管道两方面着手,分析目前常用的跨断层埋地管道的抗震措施,提出今后跨断层埋地管道的研究趋势。

关键词:跨断层;埋地;输油气管道;断层错动;研究进展;抗震措施

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2014.04.002

0 前言

近年来,我国实施的“西气东输”“川气东送”“海气登陆”以及“中亚管道”“中缅管道”等跨国天然气长输管道工程的建设,支撑着我国气源的多元供应,形成了全国天然气基干管网。我国处于环太平洋地震带和欧亚地震带之间,地震区域广,地震强度大,发震频率高,活动断层分布广泛,为世界上遭受地震灾害最为严重的国家之一^[1]。大量震害资料证明,埋地输油气管道地震破坏通常发生在活动断层^[2]。因此,有必要对跨断层埋地输油气管道的地震反应进行研究,以避免或减轻跨断层管道在未来地震中遭受破坏。

1 断层错动反应研究进展

1971年美国San Fernando地震对跨断层或沿断层一带输气管道造成的严重破坏引起了美国研究者对埋地管道地震反应的重视,而在这之前,埋地输油气钢质管道的设计是不考虑抗震要求的。接着1972年马那瓜地震、1975年海城地震、1976年唐山大地震和1978年日本Miyagi-ken-oki地震中,埋地管道受到严重破坏,使得跨断层埋地管道的研究成为全球热点,并在历经40年的研究过程中取得了很多成果。

目前的研究方法大致可分为理论解析法、数值分析法及试验研究法三类,本文将对近年来的研究进展进行综述,比较不同方法的优缺点,指出各方法中存在的问题。

1.1 理论解析法

刘爱文和张素灵等人^[3]基于Newmark方法和Kennedy方法提出一种研究跨越走滑断层埋地管道地震反应的计算方法,将远离断层的管段部分简化为弹性地基梁模型来分析,断层附近大变形管段部分看作受均布载荷的梁,管材应力应变本构关系采用Ramberg-Osgood模型,忽略了管道内压及温差引起的应力应变,同时假设断层两侧土体性质相同。该方法证明了断层错动较大时Kennedy法的正确性,得到断层位移较小时不能把管道看作悬索^[4]的结论。

苏欣等人^[5]对涩宁兰输气管道复线进行了抗震计算,分析了管土约束状态的两种形式,指出实际埋地管线不是总处于弹性状态,应在抗震设计前对管道的约束状态进行复核。

Karamitros D K等人^[6]仍将断层一侧的管道分为两部分,用弹性梁模拟管道的大变形段,用弹性地基梁模拟小变形段。在计算管道的最大设计应力时考虑了管材

和大位移的非线性关系,管道横截面的实际应力分布以及弹性梁和弹性地基梁连接点处剪力的连续条件。虽然该方法对 Wang L K 方法^[7]进行了改进,但没有考虑到大变形段的管土作用力,文献中也没有对所提到的最大弯矩处即管道最可能的破坏位置予以说明或证明。同时,该方法中所采用的弹性梁理论的弯曲应变以及受几何二次项影响的弯曲应变二者的组合形式没有任何物理意义。

Trifonov O V 等人^[8]提出一种对穿越活动断层的埋地钢质管道非线性应力-应变分析的半解析法,通过分析和计算取得如下成果:在断层两侧管道曲率较大的管段的平衡方程中直接引入轴向力对弯曲刚度的影响;对平衡方程的求解过程显示了随断层位移增大管道从梁到索的变化过程;提出了一个表征轴向力对弯曲刚度影响的参数,可以追踪管道反应并对其他简化模型的适用性进行评估;证明了横断面位移对轴向应变的影响。

以上介绍的方法是基于索模型和梁模型的理论分析方法,管材的本构模型主要采用双折线或三折线模型、线弹性模型以及 Ramberg-Osgood 模型,这些方法存在以下的局限性:

a) 只能分析管道受拉伸作用的情况,也就是说这些方法只能用于穿越走滑断层或正断层的管道,无法对跨越逆断层的管道屈曲进行计算。

b) 上述所有方法都是针对均一场地土进行分析的,没有对非均一土体作相关研究。

c) 不能分析管截面中的大变形情况。

d) 在断层错动量较大的情况下,管道和土体的变形均表现出其非线性特征,从而使理论方法变得异常复杂。

1.2 数值分析法

随着当今计算机技术的飞速发展及数值分析法的日益成熟,采用数值模拟可以较快地对跨断层埋地管道的地震反应进行分析。研究者们也在该领域开展了很多相关研究,并取得了许多成果。

Tohidi R Z 等人^[9]将管道看作梁,用非线性弹簧模拟管道周围的土体,对跨断层管道进行了三维研究,并对管道与断层的交角、管土摩擦角、断层错动量及管道埋深等影响参数进行了研究。

Kuwata Y 等人^[10]使用离散单元法对铸铁管道在断层作用下的安全性进行了分析,评估出允许的最大断层错动量,分析得知管道与断层的交角较小时将威胁到管道的安全。

Cocchetti G 等人^[11]通过建立壳模型,分别采用大位移和小位移法对跨断层管道进行了研究,发现当管径较大时采用大位移和小位移方法得到的结论没有明显差

别(穿越角为 90°的情况除外),但当管径较小时,用小位移法分析得到的容许断层错动量则极其保守。

Liu M 等人^[12]采用梁-壳混合模型对管道最大应变和管道与断层的交角之间的关系进行了分析,并研究了管材和管道壁厚对管道完整性的影响。

Jiao Z L 等人^[13]考虑了管道埋深、回填土特性以及管土非线性相互作用,建立了壳有限元模型,对跨断层埋地管道进行了研究,并得出结论:管道轴向应力由弯曲应力和拉应力组成;管道与断层的穿越角决定着管道模型是否失效,90°为最佳穿越角;在理论分析与工程设计中回填土的密实度以及管道的椭圆现象是不可忽略的;应力、应变和位移按一定规律分布。

Gu X T 等人^[14]用三个方向的土弹簧来模拟管-土相互作用,对“西气东输”工程中某跨断层管道进行了分析,并提出一个可将管道应变降低到最小的合理设计方案。Zhao L 等人^[15]采用接触单元建立了三维管土非线性有限元模型,分析了基岩上覆土层的破裂模式、厚度以及刚度对埋地管线的影响,数值分析结果显示,土体破裂模式确定了管道大变形或失效的位置,管道塑性变形发生在覆土层塑性变形或破裂的区域,当断层倾角接近 90°时,管道的塑性变形随覆土层的破裂而发生,覆土层越厚,管道塑性变形区域越长,而应变越来越小,随着覆土层刚度的增大,管道塑性变形长度将变短,而最大应变会增大。

金浏等人^[16]将跨断层埋地管道及其周围土体从半无限地球介质中取出,分别以空间薄壳单元对管道进行模拟,用实体单元对土体进行模拟,管土相互作用则采用非线性接触方法模拟,断层错动通过对土体施加线性位移来实现,在考虑管道初始应力应变的基础上,对断层作用下并未开裂的土体,埋设其中的管道以及管土的相互作用进行了数值分析,得出一些有益结论。

闫相祯等人^[17]针对地震断层两侧场地相同和相异以及中间含有破碎带等不同条件建立了管土耦合的组合模型,即用 V lazov 模型模拟法向力,用摩擦片模拟剪应力,在该模型基础上将管道模型简化为薄壳单元,管土间连接三个定向土弹簧。

Vazouras P 等人^[18]对穿越走滑断层的埋地钢质管道进行了研究。文献中假设管道水平铺设,并与断层面垂直,利用 ABAQUS 模拟软件基于壳有限元模型对管、土力学性能及管土相互作用进行了模拟。通过对土体和管道的不同参数的分析,得到管道失效的断层临界错动量,得出结论:断层破碎带宽度并不影响管道力学性能;管道内压会轻度影响管道的变形能力;管材强度越大,变形能力越强;厚壁管道通常不会发生屈曲,在过度拉应变的作用下可能发生断裂;土壤特性也会在一定程度上

上影响管道的变形能力。

Bolvardi V 等人^[19]建立三维模型对跨断层埋地钢质管道的抗震性能进行研究,其中管道选择壳单元,土体选择实体单元,管土间采用接触模型来模拟。通过对管径、穿越角、壁厚、埋深及锚固长度等不同参数的影响以及不同模型间计算结果的比较,得出相关结论。

赵雷等人^[20]通过有限元程序建立了埋地管道地震反应的有限元模型,用拟动力方法分析了管道跨逆断层时的失效模式。管道两侧边界采用刘爱文^[21]的等效弹簧边界,管道采用壳单元模拟,用三个定向土弹簧模拟管土作用并得出结论:当逆断层倾角接近 90° 时等效弹簧失去作用,计算结果不收敛。

Joshi S 等人^[22]用梁单元模拟管道,离散非线性弹簧模拟管道周围土体,对穿越逆断层的埋地管道进行分析,考虑了与管材和土体有关材料非线性,与大变形有关的几何非线性。用所建三维有限元模型对断层作用下的管道反应进行模拟,研究了不同参数的影响,最后得出结论:对于穿越逆断层的管道,最大总压缩应变总比最大总拉伸应变起到更为关键的作用;管道穿越角是管道最大压应变和管道屈曲最重要的影响因素;当穿越角较小时,管道局部屈曲由管壁褶皱引起;管道以垂直或近乎垂直的方向穿越断层带时在很小的断层位移下便会产生梁屈曲,并导致管道早期失效的发生;逆冲断层容许的断层错动量要比陡峭的逆断层容许错动量小;通过选择较松散的粗粒回填土,较浅的管道埋深,光滑而坚硬的表面覆盖层,增加管壁厚度或使用屈服强度较大的管材都可以增大断层容许位移量。

从以上对跨断层埋地管道反应的研究历程可以发现,埋地管道模型从最初较为简单的线弹性解析模型发展为目前的非线性壳有限元模型。其中,梁模型构造简单,节省计算时间,壳模型虽然分析过程复杂,计算时间长,但可以对管道的大变形如管道屈曲进行模拟,因此,在分析过程中要分情况对模型进行选择。对跨断层埋地管道的研究方法则经历了由最初的半理论、半经验分析方法发展为如今的理论与数值模拟相结合的综合解决问题的方法。但是,在目前的研究方法中,多数学者没有考虑管道内压、温度等参数的影响,因此建议在今后研究中,应考虑到埋地输气管道在高压荷载与断层错动耦合作用下的反应。

1.3 试验研究法

目前,由于各种局限性,国内外对跨断层管道的抗震试验的研究工作较少^[23-26],对跨断层埋地管道进行的试验主要有土箱模型试验和离心试验两种。由于受试验中管道模型尺寸的限制,以及试验装置中加载同步性、设备造价及维护等的影响,土箱模型试验的局限性主要

体现在试验规模上,无法进行管道的足尺试验,同时也无法满足比尺试验的相似性。离心试验凭借设备的重力加速度很容易实现弹力和重力的相似性,但由于试验设备尺寸较小,故也不能满足边界条件的相似性,只能进行小比尺试验,而且在模拟土体剪切破坏的时候若采取与原型相同的砂土,将会使剪切带宽度变大,使试验结果产生较大误差。因此,鉴于上述局限性,目前跨断层管道的试验只能得到定性结论,为理论研究提供相应的参考或验证,并不能得到精确的结果,同时由于试验过程不能保证土壤密实度的一致性,也会造成较大误差。

以上为近几年跨断层埋地管道断层错动反应不同方法的研究进展,此外,目前使用的 GB 50470-2008《油气输送管道线路工程抗震技术规范》虽然规定对重要区段的管道和位于强震区的一般区管道应使用有限元方法进行管道的抗震校核,但其他情况下的管道抗震校核仍然沿用 Newmark N M 等人^[27]在 1975 年提出的高度简化模型,尽管采用 Newmark-Hall 计算结果的 2 倍作为修正值,但由于管道埋设场地土壤环境的不确定性等原因,仍然不确定能够保证管道设计的安全性,而且管道受压时也无法计算。规范推荐的有限元方法为刘爱文^[21]提出的含等效非线性弹簧边界的分析方法,管土间的作用采用三向土弹簧进行模拟,无法对管道与土体的滑移、分离和闭合等现象进行模拟。因此提出能够合理模拟跨断层管道断层错动反应特性的计算模型是当前迫切需要研究的课题。

2 抗震措施

经多年研究,我国学者对跨断层埋地管道的抗震措施主要从新建管道项目和已建管道两方面着手,对新建管道项目采取的抗震措施主要考虑选择合适的管道穿越断层的位置,选择合适的穿越角度,特殊的管沟敷设,减小管土间的摩擦系数,选择合适的管材,合理确定管道尺寸,选择合适的管道埋深,使用大口径的套管;设置一定数目的弯头或采用大曲率半径弹性敷设方式。对已建管道的抗震改造,则主要从降低管土相互作用的角度出发。如回填土的松散,采用光滑的外包层,为管道设置套管,浅埋(去掉部分覆盖土层),不埋(清除全部覆盖土层),采用管沟敷设,管沟用可压缩或破碎的填料进行回填等。此外,以下通用措施也适用于跨断层管道的抗震改造。

2.1 常见措施

a) 加固管道本体。对断层附近的管道进行环焊缝、损伤、腐蚀检测,如发现缺陷则进行修复,加固管道,确保管体的强度和变形性能。这可能是最简单但实用性有限的抗震改造手段。

b) 管道改线。尽量避开产生大位移的活动断层区。由于管道路权常会受地方经济社会发展规划的限制,有些断层分布较长,管道绕避将会使管道长度大幅度增加,不经济。

c) 更换管道。用等级较高或壁厚更厚的管道置换原管道。钢材等级越高,抗应变能力越强;另外,同样的断层位移,管壁越厚管道发生的变形越小。

d) 设置截断阀室。在断层区一端设置截断阀室,以降低管道事故发生破裂后天然气泄漏引起的损失及次生灾害。

2.2 加强管道的智能监测

虽然采取以上措施可以减轻管道在断层错动时所受到的破坏,但是在地震发生后,管道产生的应变值是否超过了最大容许应变值,管道是否需要停输或降低输量?哪些管段需要重点检修等问题则必须采用地震监测预警系统来作答。在当今信息化时代,随着科技进步和新技术的广泛应用,加强对管道的智能监测,建立管道的地震监测预警系统,及时发现管道的薄弱环节,为在第一时间采取措施提供数字依据,已经成为评估已建和在建管道系统抗震能力的最有效手段。然而目前,管道设计人员对地震监测预警系统并不熟悉,下面将目前管道地震监测预警系统的应用及采用的方法和技术进行总结,以期在我国的油气管道事业中得到更为广泛的应用。

管道地震监测预警系统的目的在于紧急地震速报,采用的技术手段主要有大地强烈震动加速度计,SI 地震传感器,GPS 位移监测,基于光纤传感的管道应变和温度监测,中心控制站或 SCADA 系统集成技术以及相关的软件技术。对于跨断层管道,系统主要通过 GPS 位移监测系统对管道所穿越的断层位移进行监测,在断层两侧各设置一套高精度 GPS 监测系统,可以得到断层的水平和竖直位移量。

目前,国内外比较著名的几条输油气管道已经建立了管道地震预警系统。冀宁管道工程首次在国内建立了管道地震监测预警系统。该工程穿越 19 条主要断裂带,为确保地震发生后能够及时有效地为应急管理部门提供决策依据并实现输气阀门的远程关闭,在部分输气站布设了数字强震动仪,同时在 2 条全新世活动断裂两侧设置高精度 GPS 检测系统,根据地震时断层的相对位移量的大小进行报警。此外,阿拉斯加管道、俄罗斯萨哈林 2 号管道工程、东京煤气公司等也建立了地震检测系统^[28]。

3 结论

本文对跨断层埋地输气管道抗震方法的沿革进行了综述,指出了前人在理论方法和试验研究方面取得的

研究成果,对不同方法进行了比较,同时总结了目前常用的抗震措施,并指出管道智能检测的必要性。今后对跨断层埋地管道的研究主要应从以下几个方面开展:

a) 提出更加符合实际的高精度数值计算模型模拟管土的接触作用。

b) 断层错动引发的地震会伴随有砂土液化、滑坡等其他地震灾害的发生,地震波对钢制管道也存在一定的影响。在分析过程中应综合考虑各方面的影响因素展开研究。

c) 针对断层错动作用下的下卧基岩位移引起的土体反应进行研究,从而计算地面的永久变形量。

参考文献:

- [1] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,1988.1-4.
Hu Yuxian. Earthquake Engineering [M]. Beijing:Seismological Press,1988.1-4.
- [2] 亢会明,曹润苍,李束为. 油气管道通过活动断层抗震设防安全性探讨[J]. 天然气与石油,2011,29(6):1-3.
Kang Huiming, Cao Runcang, Li Shuwei. Considerations in Earthquake Fortification Safety of Oil and Gas Pipelines Passing Through Active Faults [J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29(6) : 1-3.
- [3] 刘爱文,张素灵,胡聿贤,等. 地震断层作用下埋地管线的反应分析[J]. 地震工程与工程振动,2002,22(2):22-27.
Liu Aiwen, Zhang Suling, Hu Yuxian, et al. A Method for Analyzing Response of Buried Pipeline due to Earthquake Fault Movement[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(2):22-27.
- [4] Kennedy R, Darrow A C, Short S A. Seismic Design of Oil Pipeline Systems [J]. Journal of Technical Councils of ASCE, 1979: 119-205.
- [5] 苏欣,陈静,杨汗青,等. 涩宁兰输气管道复线抗震设计探讨[J]. 天然气与石油,2009,27(3):14-18.
Su Xin, Chen Jing, Yang Hanqing, et al. Discussion on Seismic Design of Se-Ning-Lan Double Gas Pipelines [J]. Natural Gas and Oil, 2009, 27(3) : 14-18.
- [6] Karamitros D K, Bouckovalas G D, Kouretzis G P. Stress Analysis of Buried Steel Pipelines at Strike-slip Fault Crossings [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27: 200-211.
- [7] Wang L R, Wang L J. Parametric Study of Buried Pipeline due to Large Fault Movement[A]. Proceedings of Third China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering [C]. Beijing: CSB, 1998.165-172.
- [8] Trifonov O V, Cherniy V P. A Semi-analytical Approach to a Nonlinear Stress-strain Analysis of Buried Steel Pipelines

- Crossing Active Faults [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30: 1298–1308.
- [9] Tohidi R Z, Shakib H. Response of Steel Buried Pipeline to the Three-Dimensional Fault Movements [J]. *Journal of Science and Technology*, 2003, 14(56B): 1127–1135.
- [10] Kuwata Y, Takada S, Ivanov R. Estimation of Allowable Fault Displacement for Pipelines and Countermeasures [A]. *Proceedings of the Pipeline Division Specialty Conference* [C]. Houston: ISCE, 2005. 674–685.
- [11] Cocchetti G, Di Prisco C, Galli A. Soil-pipeline Interaction along Active Fault Systems[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2008,18(3): 211–219.
- [12] Liu M, Wang Y Y, Yu Z F. Response of Pipelines under Fault Crossing [A]. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*[C]. Vancouver: ISOPE, 2008. 162–165.
- [13] Jiao Z L, Shuai J, Han K J. Response Analysis of Buried Pipeline Subjected to Fault Movements [A]. *International Conference on Pipelines and Trenchless Technology 2009: Advances and Experiences with Pipelines and Trenchless Technology for Water, Sewer, Gas, and Oil Applications*[C]. Shanghai: ISCE, 2009. 1212–1218.
- [14] Gu X T, Zhang H. Research on Aseismic Measures of Gas Pipeline Crossing a Fault for Strain-based Design [A]. *2009 ASME Pressure Vessels and Piping Conference*[C]. New York: ASME, 2009. 571–580.
- [15] Zhao L, Cui C, Li X. Response Analysis of Buried Pipelines Crossing Fault due to Overlying Soil Rupture[J]. *Earthquake Science*, 2010, 23(1): 111–116.
- [16] 金浏, 李鸿晶. 穿越逆冲断层的埋地管道非线性反应分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2010, 30(2): 130–134.
Jin Liu, Li Hongjing. Nonlinear Response Analysis of Buried Pipeline Crossing Thrust Fault [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30(2): 130–134.
- [17] 闫相祯, 张立松, 杨秀娟. 管道穿越地震断层管土耦合大变形壳模型的应变响应规律研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(8): 132–139.
Yan Xiangzhen, Zhang Lisong, Yang Xiujuan. Strain Response Study of Oil-Gas Pipeline Crossing Earthquake Fault Based on Pipeline-soil Coupling and Large Deformation Shell Model [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(8): 132–139.
- [18] Vazouras P, Karamanos S A, Dakoulas P. Finite Element Analysis of Buried Steel Pipelines under Strike-slip Fault Displacements[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(11): 1361–1376.
- [19] Bolvardi V, Bakhshi A. A Study on Seismic Behavior of Buried Steel Pipelines Crossing Active Faults [A]. *Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability* [C]. Keystone: ECEE 2010. 1–12.
- [20] 赵雷, 唐晖, 彭小波, 等. 埋地钢管在逆断层作用下失效模式研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(增刊): 111–118.
Zhao Lei, Tang Hui, Peng Xiaobo, et al. Failure Modes of Steel Buried Pipeline Crossing Reverse Fault [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(S): 111–118.
- [21] 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. Response Analysis of a Buried Pipeline Crossing the Fault Based on Shell-model [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. 2002.
- [22] Joshi S, Prashant A, Deb A, et al. Analysis of Buried Pipelines Subjected to Reverse Fault Motion [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, (31): 930–940.
- [23] Abdoun T H, Ha D, O'Rourke M J, et al. Factors Influencing the Behavior of Buried Pipelines Subjected to Earthquake Faulting [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(3): 415–427.
- [24] O'Rourke M, Gadicherla V, Abdoun T. Centrifuge Modeling of Buried Pipelines [A]. *Conference and Workshop on Lifeline Earthquake Engineering*[C]. Long Beach, 2003. 757–768.
- [25] Karimian H, Wijewickreme D, Doug H. Buried Pipelines Subjected to Transverse Ground Movement: Comparison between Full Scale Testing and Numerical Modeling [A]. *Proceedings of the 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* [C]. Hamburg: OMAE, 2006. 73–79.
- [26] Ha D, Abdoun T H, O'Rourke M J, et al. Earthquake Faulting Effects on Buried Pipelines-Case History and Centrifuge Study [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2010, 14(5): 646–669.
- [27] Newmark N M, Hall W J. Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement [A]. *Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering* [C]. Ann Arbor: Earthquake Engineering Research Institute, 1975. 416–425.
- [28] 刘建平, 付立武, 郝建斌, 等. 长输油气管道地震监测预警的应用与技术[J]. *世界地震工程*, 2010, 26(2): 176–181.
Liu Jianping, Fu Liwu, Hao Jianbin, et al. Application and Technology of Earthquake Monitoring and Early-Warning for Long-Distance Oil and Gas Pipeline [J]. *World Earthquake Engineering*, 2012, 26(2): 176–181.