

腐蚀燃气管道地震波作用下的可靠性分析

操 铮, 刘 茂, 李栋学

南开大学城市公共安全研究中心, 天津 300071

摘要 城市腐蚀燃气管道是震后恢复中重要的生命线工程之一, 因此对腐蚀燃气管道在地震条件下的可靠性分析具有重要的意义。根据地震波传播产生的轴向应力和腐蚀应力模型, 建立了城市腐蚀燃气管道可靠性评价的极限状态方程, 采用蒙特卡罗方法模拟了管道的失效概率。由淮南市燃气管道案例的分析结果发现, 地震对管道产生轴向应力作用主要归因于峰值地表速度; 地震和腐蚀作用对燃气管道的破坏作用较为严重, 并且因地震波传播的影响区域很大, 对两种因素进行综合分析具有重要意义; 减小管材屈服强度、工作压力等参数的变异程度, 能够有效地增加腐蚀燃气管道的可靠性; 由管道安全的变量重要性分析, 得出交通荷载、影响系数和弯曲惯量系数对管道安全最为重要。

关键词 公共安全; 地震; 腐蚀; 燃气管道

中图分类号 P315.9

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)16-0044-05

Reliability of Corrosive Gas Pipelines Under Seismic Wave Propagation

CAO Zheng, LIU Mao, LI Dongxue

Center for Urban Public Safety Research, Nankai University,
Tianjin 300071, China

Abstract Water supply pipeline is one of vital projects in the restoration work after earthquake. Against possible secondary disasters under an earthquake, the reliability analysis of gas pipelines under an earthquake is of great significance. In this paper, the axial stress generated by seismic wave propagation, the corrosion models and the pipes' characteristics are analyzed to derive a limit equation of gas pipelines' reliability for the earthquake evaluation. The probability of reliability is evaluated by Monte Carlo method. An analysis on Huainan's gas pipelines shows that the seismic axial stress in the pipeline mainly comes from the peak surface velocity; the seismic and corrosion damages to the gas pipeline are serious; due to the extended impact region of seismic wave propagation, a comprehensive analysis of the two factors is of great significance; the reliability of corrosion water supply pipeline can be effectively enhanced by reducing the variations of the pipe's

yield strength, working stresses and other parameters. From an analysis of relative importance of various variables, it is concluded that the wheel load in traffic, the impact factor and the bending moment coefficient are the most important for pipeline safety.

Keywords public safety; earthquake; corrosion; water supply pipeline

0 引言

地震波对管道的破坏是最普遍的, 地震波本身对于地下管道破坏影响相对较小, 但影响所涉及的区域相当大, 大多数地下管道的破坏是由于地震波造成的^[1]。

关于地下管道的地震反应和腐蚀破坏作用, 国内外学者已经做了大量的研究。刘威等采用弹性地基梁原理和余弦正交展开方法, 给出了管道在地震激励下的应力级数解, 并在其基础上建立了管道在地震作用下强度破坏的极限状态方程, 利用验算点法得到管道的可靠度^[2-3]。K. Pitilakis 等提出与管道风险相应的地震灾害评价、适当的脆弱性模型, 考虑地震灾害过程中采用概率模型方法对管道进行可靠性研究^[4]。A. Amirat 等根据管道的腐蚀和残余应力模型分析了城市燃气管道的可靠性^[5]。A. P. Teixeira 等亦建立了管道的腐蚀模型并计算了管道的可靠性, 对涉及的参数进行了敏感性分析^[6]。

因此, 从文献的研究内容来看, 对于城市腐蚀燃气管道的可靠性研究尚少。本文根据管道受力模型 (包括地震波传播

收稿日期: 2009-06-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAJ16B03-08)

作者简介: 操铮, 研究方向为地震条件下城市燃气管线风险分析, 电子信箱: czlnfx@yahoo.com.cn; 刘茂 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E520001127L), 教授, 研究方向为城市公共安全, 电子信箱: lmsafety@nankai.edu.cn

产生的主要应力)建立腐蚀燃气管道的可靠性模型,采用蒙特卡罗模拟方法模拟管道的失效后果。

1 力学模型

在考虑管道受力的力学模型时,主要是把外加荷载定义为这些压力的函数。机械压力直接由 Mises 方程、环向应力 σ_c 和轴向应力 σ_l ^[5-6],再考虑到地震波传播产生的轴向应力 σ_a 得到:

$$\sigma_{\text{equiv}} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_c^2 + \sigma_l^2 - \sigma_a \sigma_c - \sigma_a \sigma_l - \sigma_c \sigma_l} \quad (1)$$

地震波在传播过程中必然发生衰减,目前一般以地表运动衰减公式描述其衰减过程。峰值地表加速度或强度是研究所关心的量;相应地,衰减模型将这些量和具体地点到地震源的“特征”距离 R 、地震震级 M 联系在一起。应用得比较广泛的衰减模型方程为^[7]

$$PGA = b_1 e^{\frac{b_2 M}{R}} \quad (2)$$

其中, PGA 为峰值地表加速度; b_1, b_2, b_3 为经验常数。较常见的 PGA 衰减公式有 Kanai 公式^[8]、Campbell 公式^[9]、Joyner 和 Boore 公式^[10]等。

一般地, PGA 常用于分析地表以上的结构物, PGV 则多用于分析地下结构物。为将 PGA 衰减公式应用于地下燃气管道的地震损害评价之中,需要建立 PGA – PGV 转换关系。

PGA – PGV 转换关系与土壤性质(硬质、普通及松软等)密切相关,其相关系数通常用 β 表示,有

$$V_{PGV} = \beta \cdot PGA \quad (3)$$

转换系数 β 值与土壤性质密切相关,通常在 0.9~2.0 之间,一般由历史地震数据统计回归分析得到。

地震波传播效应通常用轴向应力表示,轴向应力即为由于地应变导致的平行于管道轴线的张力。地震波传播产生的轴向应力 σ_a 通常由轴向应变转化得到,即^[11]

$$\sigma_a = \frac{E V_{PGV}}{\omega c_s} \quad (4)$$

其中, V_{PGV} 为地震动产生的峰值地表速度; E 为钢材的弹性模量; c_s 为地震波表面传播速度,根据美国生命线联盟^[11]推荐,本文取 1 000 m/s;对于剪切波,地应变相关系数 ω 取 2.0,否则取 1.0。

2 管道腐蚀模型

管道的总环向与纵向应力分别为 σ_c 和 σ_l ,由 3 个基本应力组合确定。

$$\sigma_c = \sigma_{pc} + \sigma_{sc} + \sigma_{tc} \quad (5)$$

$$\sigma_l = \sigma_{pl} + \sigma_{al} + \sigma_{il} \quad (6)$$

其中, σ_{pc} 和 σ_{pl} 为内压产生的应力; σ_{sc} 和 σ_{sl} 为由于土壤荷载产生的应力; σ_{tc} 和 σ_{tl} 为弯曲应力;下脚标 c 和 l 分别表示环向和纵向成分。对于薄壁管道,应力成分的计算模型如式(7)~(12)^[5-6,11-12]:

1) 内压产生的应力成分

$$\sigma_{pc} = \frac{pr}{t} \quad (7)$$

其中, σ_{pc} 为内压产生的环向应力,MPa; p 为内压,MPa; r 为管道内径,mm; t 为管道壁厚,mm。

$$\sigma_{pl} = \frac{\nu pr}{t} \quad (8)$$

其中, σ_{pl} 为泊松比 ν 产生的纵向拉伸力,MPa。

2) 土壤荷载产生的应力成分

$$\sigma_{sc} = \frac{6k_m C_d \gamma B^2 E t r}{E t^3 + 24k_d p r^3} \quad (9)$$

其中, σ_{sc} 为覆盖土壤产生的环向弯曲应力,MPa; B 为管道顶部水平线处的管沟宽度,mm; C_d 为土壤压力系数; E 为弹性模量,MPa; k_m 为取决于荷载和土壤反应的弯曲系数; k_d 为挠曲系数; γ 为土壤密度, kN/mm³。

$$\sigma_{sl} = \alpha E \Delta \theta \quad (10)$$

其中, σ_{sl} 为由于温度变化产生的纵向热应力,MPa; α 为热膨胀系数, m/°C; $\Delta \theta$ 为温度变化, °C。

3) 弯曲应力成分

$$\sigma_{tc} = \frac{6k_m I_c C_l \gamma F E t r}{L_c (E t^3 + 24k_d p r^3)} \quad (11)$$

其中, σ_{tc} 为交通荷载产生的弯曲应力,MPa; I_c 为影响系数; C_l 为表面荷载系数; F 为表面旋转荷载, kN; L_c 为计算荷载时的有效管道长度^[5], mm。

$$\sigma_{tl} = E r \chi \quad (12)$$

其中, σ_{tl} 为外部弯曲荷载产生的纵向应力,MPa; χ 为弯曲管道的纵向曲率, rad/mm。

在工程实际中,燃气管道随暴露时间推移通常会造成管道壁厚的损失,一般采用指数模型表示其腐蚀过程^[6]:

$$t_c = k T^n \quad (13)$$

其中, t_c 为腐蚀层厚度; T 是消逝时间; k 和 n 为腐蚀常数,通过腐蚀数据进行估计。根据文献^[13]中相关数据分析, k 的均值和标准偏差分别是 0.066 和 0.037, 指数 n 分别是 0.53 和 0.14^[5]。由于腐蚀,在原始管道壁厚的基础上需要考虑净壁厚;因此,对于腐蚀管道,环向应力表达形式为^[5-6]

$$\sigma_{pc} = \frac{pr}{t - k T^n} \quad (14)$$

$$\sigma_{sc} = \frac{6k_m C_d \gamma B^2 E r (t - k T^n)}{E (t - k T^n)^3 + 24k_d p r^3} \quad (15)$$

$$\sigma_{tc} = \frac{6k_m I_c C_l \gamma F E r (t - k T^n)}{L_c [E (t - k T^n)^3 + 24k_d p r^3]} \quad (16)$$

3 可靠性模型

本文采用淮南市城市燃气专项规划提供的数据进行可靠性计算。淮南市燃气供应为天然气供应,而天然气输配系统中包括下述 4 种压力级管道(未考虑长输管道)。

1) 次压管道:淮南市天然气利用工程已建次高压输气管道,设计压力 1.6 MPa,采用 L290 埋弧焊钢管,管道规格为 $\phi 404.6 \times 7.1$,管道壁厚为 7.1 mm;采用埋地敷设,最小埋设深度不小于 1 m。

2) 中压 A 管道:设计压力 0.40 MPa(运行 0.25 MPa),中

表 2 燃气管道几何参数
Table 2 Geometrical parameters of gas pipelines

符号	描述	分布类型	均值					变异系数
			T1	T2	T3	T4	T5	
L_e	管道有效长度/mm	N	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	0.10
B	管沟宽度/m	N	0.7	0.7	0.8	1.0	1.0	0.10
r	管道内径/mm	N	159.1	207.6	260.6	311	390.4	0.01

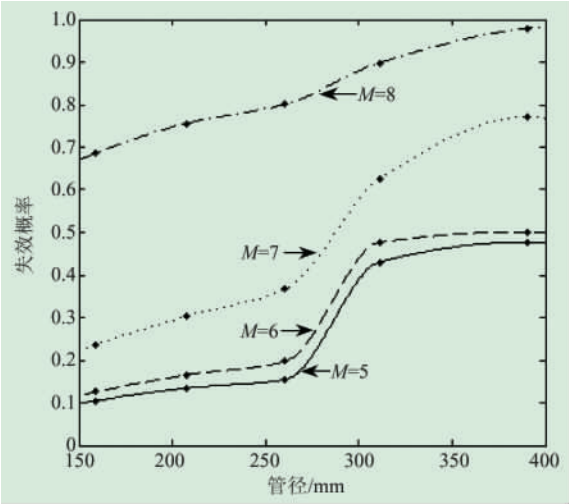


图 1 不同震级下燃气管道失效概率与管径的关系
Fig. 1 Relationship between failure probability and gas pipelines' diameter under different magnitudes

3) 震级大于 7 级时,管道失效概率显著增大,明显得到相同管道在大震级地震下破坏程度是小震级地震破坏的数倍。这也与地震震级增加,使得地震波对管道产生的应力急剧增加相关。

根据文献[2]提出的根据管道失效概率进行管道地震破坏程度的矩阵分类方法,如表 3^[2]所示。对上述 T1~T5 管道失效概率的模拟结果,以及管道的地震破坏程度如表 4 所示。

5 结果与讨论

针对上述案例,根据随机参数分析其变异系数对可靠性影响程度是必要的,因此需要对某些随机变量变异系数进行敏感性分析。本文选择钢材的屈服强度 σ_y ,燃气管道的工作压力 p ,分析失效概率对这些参数变异程度的敏感程度,其中地震震级为 V,管道内径取 390.4 mm,分析某一参数时,其他参数取值同表 1 和表 2。图 2 和图 3 分别为 σ_y , p 在变异系数 COV 波动范围内,管道失效概率的变化情况。

表 3 管道地震破坏程度分类
Table 3 Classification of pipelines damaged by earthquake

震害程度	破坏现象	评价指标	图例
基本完好	管体完好,无裂缝	$P \leq 0.2$	
轻微破坏	管体基本无损坏,部分位置有较小裂缝	$0.2 < P \leq 0.4$	
中等破坏	管体基本无损坏,有一定数量较小裂缝,发生漏气,较易修复	$0.4 < P \leq 0.6$	
严重破坏	管体产生裂缝,局部缺陷处发生孔漏,漏气严重,修复困难	$0.6 < P \leq 0.9$	
毁坏	管体严重开裂、折断、配件破裂,供气中断	$0.9 < P$	

表 4 T1~T5 管道的地震破坏程度
Table 4 Seismic destroy level of pipe T1 to T5

震级	管径/mm				
	T1: $\phi 168.3 \times 4.6$	T2: $\phi 217.8 \times 5.1$	T3: $\phi 271.6 \times 5.5$	T4: $\phi 323.4 \times 6.2$	T5: $\phi 404.6 \times 7.1$
V(5)	0.104 75	0.134 70	0.154 35	0.430 35	0.477 70
VI(6)	0.125 65	0.165 30	0.196 85	0.476 35	0.501 25
VII(7)	0.236 75	0.303 45	0.366 85	0.625 05	0.771 45
VIII(8)	0.686 00	0.755 80	0.800 80	0.898 00	0.979 10

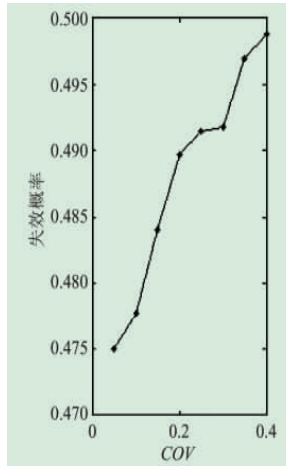


图2 σ_y 变异系数与失效概率的关系

Fig. 2 Relationship between σ_y 's COV and FP

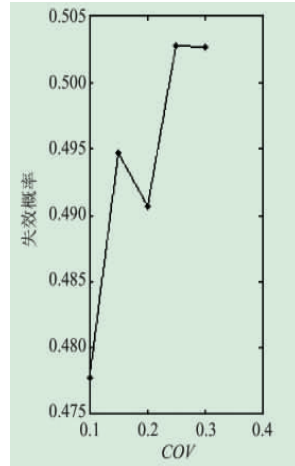


图3 p 变异系数与失效概率的关系

Fig. 3 Relationship between p 's COV and FP

由图2、图3可以得出,钢材屈服强度 σ_y 在变异系数范围内,燃气管道的失效概率在 0.475~0.498 85 之间变化;工作压力 p 在其变异系数范围内,失效概率在 0.477 7~0.502 65 之间变化。因此,从敏感性角度分析,钢材的屈服强度和管道内压 p 的变异系数分别在 0.1~0.4 和 0.1~0.3 范围内变化时,管道的失效概率变化呈缓慢上升趋势,但也说明城市燃气管道内压与钢材屈服强度对于震害和应力破坏影响程度甚低,说明管道失效原因主要为腐蚀和地震应力破坏作用。下面以相同的管道,讨论几个相关变量对管道安全的重要性。使用的变量分别为 E, σ_y, p, PGV, k_m 和 F ,如图4所示。可以看出,交通荷载 F 、影响系数 I_c 和弯曲惯量系数 k_m 对管道安全最为重要。

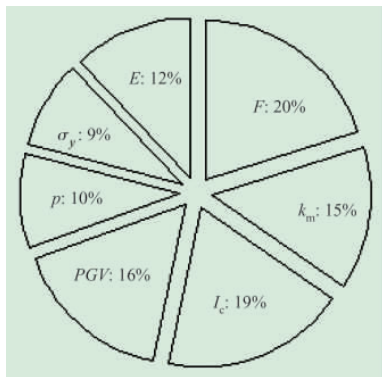


图4 变量对管道安全的重要性

Fig. 4 Importance of various variables

6 结论

本文结合地震波产生的轴向应力和管道的腐蚀应力破坏模型,建立腐蚀燃气管道的地震可靠性评价极限方程,并采用蒙特卡罗方法模拟管道的失效概率,得到结论如下。

1) 地震对管道产生轴向应力作用主要归因于峰值地表速度 PGV ,而采用蒙特卡罗方法能够有效模拟地震的随机性

质,较好地反映燃气管道在地震条件下的破坏情况。

2) 对淮南市案例失效概率的计算表明,地震和腐蚀作用对燃气管道的破坏作用较为严重,此外由于地震波传播的影响区域很大,对两种因素进行综合分析具有重要意义。

3) 由淮南市案例的敏感性分析,得出管材屈服强度、工作压力等参数的变异程度对于地震波作用下腐蚀管道可靠性影响较小,此外由变量重要性分析可知,交通荷载 F 、影响系数 I_c 和弯曲惯量系数 k_m 对管道安全最为重要。

4) 本文所讨论的管道破坏程度矩阵表示方法,可以有效区分腐蚀管道的地震易损程度,而且能够在 GIS 等平台上进一步表达。

参考文献 (References)

- [1] 吴少艳, 吴德军, 陈东. 地震对市政管道的破坏及管道的抗震处理[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 200-202.
Wu Shaoyan, Wu Dejun, Chen Dong. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, 26(3): 200-202.
- [2] 刘威, 李杰, 卫书麟, 等. 供气管道抗震可靠性分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(6): 95-100.
Liu Wei, Li Jie, Wei Shulin, et al. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2005, 27(6): 95-100.
- [3] Shibata A. Estimation of earthquake damage to urban systems [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2006, 13: 454-471.
- [4] Pitilakis K, Alexoudi M, Argyroudis S, et al. Earthquake risk assessment of lifelines[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2006, 4(4): 365-390.
- [5] Amirat A, Mohamed-Chateaufneuf A, Chaoui K. Reliability assessment of underground pipelines under the combined effect of active corrosion and residual stress [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2006, 83(2): 107-117.
- [6] Teixeira A P, Guedes Soares C, Netto T A, et al. Reliability of pipelines with corrosion defects [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85(4): 228-237.
- [7] Toprak S, Taskin F. Estimation of earthquake damage to buried pipelines caused by ground shaking[J]. *Natural Hazards*, 2007, 40: 1-24.
- [8] Kanai K. An Empirical formula for the spectrum of strong earthquake motion[J]. *Bulletin of Earthquake Research Institute*, 1961, 39: 85-95.
- [9] Joyner W B, Boore D M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, 71: 2011-2038.
- [10] Campbell K W. Near source attenuation of peak horizontal acceleration [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, 71: 2039-2070.
- [11] American Lifelines Alliance. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe[S]. New York: ASCE, 2001.
- [12] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50251-2003 输气管道工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
Ministry of Construction of People's Republic of China, State Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of People's Republic of China. GB 50251-2003 Gas Pipeline Design Code [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [13] Kucera V, Mattsson E. Atmospheric corrosion [M]/Mansfeld F ed. Corrosion Mechanics. New York: Marcel Dekker, 1987.
- [14] 梁国业, 廖建平. 数学建模[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 113-142.
Liang Guoye, Liao Jianping. Mathematical modeling [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 113-142.

(责任编辑 朱宇)