

埋地灰口铸铁管失效预测模型及影响参数分析

邵煜, 张土乔, 俞亭超

(浙江大学 土木工程学系, 浙江 杭州 310058)

摘要: 针对研究解决早期埋设的灰口铸铁管存在的破损频繁、漏失严重等影响输配水安全问题, 运用管土相互作用受力模型得到管道应力, 结合灰口铸铁管的腐蚀模型、剩余强度评价方法和失效准则, 得到管道失效预测模型, 最终利用蒙特卡罗方法计算管道可靠度, 并进行影响参数分析. 计算结果表明: 大直径管道失效主要由环向应力控制, 而小直径管道失效多为纵向应力控制; 由于渗漏或不均匀沉降引起的管道基础局部流失在腐蚀深度超过一定深度时对失效概率的影响较大; 腐蚀模型参数、未支撑长度、剩余强度参数对安全因子分布具有重要影响. 腐蚀是影响灰口铸铁管失效的重要因素, 意在减缓腐蚀速度的管道防腐技术可以有效减少管道的失效频率, 延长管道使用寿命.

关键词: 管土相互作用; 腐蚀; 灰口铸铁管; 失效预测; 影响参数; 可靠度

中图分类号: TU 991.36; TB 114.3 **文献标识码:** A

Failure Prediction Model and Influence Parameter Analysis of Buried Cast Iron Water Mains

SHAO Yu, ZHANG Tujiao, YU Tingchao

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To resolve the serious breakage and leakage problems for the cast iron water mains buried in the early years in the water-supply system, pipe stresses were firstly calculated based on the pipe soil interaction model, and the failure prediction model for the cast iron pipe was developed, based on the corrosion model, the residual strength evaluation method and the failure criterion. Monte Carlo (MC) simulations were used to perform the probabilistic analysis, and the influence parameters analysis was given. Results show that pipes in large diameters are often broken because of circumferential stresses, and pipes in small diameters are prone to fail due to longitudinal stresses. The influence on the failure probability is large due to soil bedding lost induced by

the breakage or uneven settlement when the corrosion depth reaches a certain depth. The corrosion model parameters, unsupported bedding length, and the residual strength parameters have large influence on the distribution of the safety factors for the cast iron pipe. The corrosion is one of the most important factors leading to the pipe failure. Reducing corrosion pit depth growth by using corrosion control technique can be the most effective way to decelerate the breakage growth rate and prolong the service life.

Key words: pipe soil interaction; corrosion; cast iron pipe; failure prediction; influence parameter; reliability

供水管网是保障城市饮用水安全的重要环节, 破损频繁、漏失率高、二次污染等影响输配安全的问题亟待解决. Rajani 等人^[1]认为埋地管道的破坏失效最终是由外部荷载引起的应力和腐蚀等导致的抗力衰退引起的. 目前研究较多的主要有石油和天然气管线的失效可靠性问题^[2-3], 受力模型较为简单^[4], 对灰口铸铁管的研究较少, 如 Hammed^[2]和 Sadiq 等人^[4]分别采用一次二阶矩和蒙特卡罗法研究了埋地管道的腐蚀可靠性, 俞树荣等人^[3]建立基于 Shell-92 模型的管道腐蚀剩余寿命预测概率模型.

本文在前人研究^[1-4]的基础上, 综合考虑各种影响因素, 结合管土相互作用模型、腐蚀规律、剩余强度计算和灰口铸铁管失效准则, 计算管道的安全因子, 并运用蒙特卡罗法对模型和参数的不确定性进行随机模拟, 分析影响管道失效的主要参数.

1 灰口铸铁管的安全因子计算

埋地管道失效最终可以归结为荷载效应和结构抗力这两方面. 只有将两者有机地结合, 才能给出管道失效的有效预测和管道安全状态的准确评估. 联

收稿日期: 2009-03-23

基金项目: 国家水专项经费资助项目(2008ZX07425-008); 国家自然科学基金资助项目(50708091); 教育部博士后基金资助项目(20090461383)

作者简介: 邵煜(1979—), 男, 工学博士, 主要研究方向为埋地管道力学失效研究. E-mail: shaoyu1979@zju.edu.cn

合考虑外部荷载和腐蚀作用,灰口铸铁管安全因子的确定性计算方法如图1所示.通过管土相互作用受力模型计算外部荷载施加在管道上的应力,以及腐蚀模型预测管道腐蚀量,进而评估管道的剩余强度,最终结合失效准则计算管道安全因子.管道失效风险随着时间延长逐渐增大,一方面是由于服役期间受力环境恶化,如管道周围土体可能由于不均匀沉降或渗漏导致管道局部悬空,用户需水量提高导致供水压力提高;另一方面是金属管道不断腐蚀等因素导致管道材料抗力逐步下降.当安全因子 <1 时,管道处于失效状态.

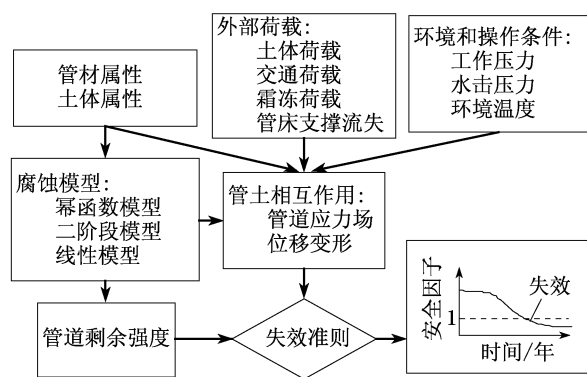


图1 管道安全因子计算流程图

Fig.1 Flowchart of safety factor calculation for water mains

管道的失效模型,包括埋地管道的受力计算、腐蚀管道的剩余强度、管道的失效准则可参考文献[5].

2 可靠度分析

2.1 极限状态函数

铸铁管道的极限状态方程为

$$F_s = 1 \quad (1)$$

若采用形状改变比能失效准则,则用应力和剩余强度表示的极限状态方程为

$$g(\mathbf{X}) = \begin{cases} \min(\sigma_u/\sigma_1, \sigma_u/\sigma_2) - 1, & \text{当 } \sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0 \text{ (拉伸-拉伸)} \\ 1/\sqrt{(\sigma_1/\sigma_u)^2 - \sigma_1\sigma_2/(3\sigma_u^2) + [\sigma_2/(3\sigma_u)]^2} - 1, & \text{当 } \sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0 \text{ (拉伸-压缩)} \\ 1/\sqrt{[\sigma_1/(3\sigma_u)]^2 - \sigma_1\sigma_2/(3\sigma_u^2) + [\sigma_2/(3\sigma_u)]^2} - 1, & \text{当 } \sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0 \text{ (压缩-压缩)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{X} 表示随机参数向量; σ_u 为剩余强度;双轴应力 σ_1 和 σ_2 对于埋地管道来说主要是纵向应力 σ_x 和环向应力 σ_θ .管道的失效概率可表示为 $P_f = P[g(\mathbf{X}) < 0]$.

2.2 蒙特卡罗随机模拟

蒙特卡罗法(MC)是一种用数值模拟来解决与随机变量有关的实际工程问题的方法,对随机变量的数值模拟相当于一种“试验”.在目前可靠度计算中,被认为是一种相对精确的方法,它不受极限状态方程非线性、随机变量非正态以及相关性的限制.蒙特卡罗法计算出结构失效概率,并以此换算出可靠度指标^[6].考虑到本文随机参数较多,极限状态函数复杂,采用蒙特卡罗方法较为合适.通过随机模拟次数 N ,得到相应安全因子,再经过统计安全因子 <1 的概率来计算管道的失效概率.在使用蒙特卡罗法时,失效概率 P_f 可表示为

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(X_i)] \quad (3)$$

式中: N 为模拟总次数;当 $g(X_i) < 0$ 时, $I[g(X_i)] = 1$;当 $g(X_i) > 0$ 时, $I[g(X_i)] = 0$.

2.3 秩相关系数敏感性分析法

利用秩相关系数的方法^[7]对参数进行敏感性分析.当输入参数与目标变量的相关系数越大,表示该输入参数对目标函数越重要. Pearson 秩相关系数 ρ_P 表示随机变量与目标变量具有线性关系时的相关性, Spearman 秩相关系数 ρ_S 则表示随机变量与目标变量具有单调关系时的相关性.对于输入变量与目标变量不具有线性或单调性关系时,用秩相关方法意义不大.本文管道失效模型各参数与目标变量 F_s 显然不是简单的线性关系,但是却基本上保持着单调关系,如温差增大,管道受到的纵向拉应力增大,使 F_s 减小,反之则增大;管道受到的竖向荷载增大,导致管道应力增大, F_s 减小;管道的断裂韧性增加,管道的腐蚀速率减小,导致管道的剩余强度增加,从而使得 F_s 增加.因此,采用 ρ_S 分析参数的敏感性是合适的.定义随机变量 i 对目标变量的贡献率(或称重要性) C_i 为

$$C_i = \rho_{Si} / \sum_{i=1}^n |\rho_{Si}| \quad (4)$$

式中, n 为模型中随机变量的总个数.

3 算例

本文计算参数主要涉及2类不确定性:一是模型不确定,如腐蚀模型参数 a, b, c 等;二是参数本身的变异性,如土体和管材等参数.通常需对参数的概率分布规律进行细致的研究.然而,获取合理的随机分布不是一件容易的事情,文献[4-5],给出参数的分布类型和确定分布所需的特征参数(表1).输入参数包括常数、正态分布、均匀分布、对数正态分布4种类型.对于均匀分布

给定均值、最小值和最大值;正态分布和对数正态分布采用截断的正态分布和正态对数分布,即对有些参数进行截断,即给定最小值和最大值.

表1 随机参数分布^[4-5]

参数名称	均值	分布类型	最小值	方差	最大值
土体弹性模量 E_s/MPa	100	正态		10	
土体泊松比 ν_s	0.3	常数			
韧度修正系数 α	0.1	均匀	0.1		0.135
韧度指数 s	1	常数			
几何因子参数一 a_1	0.4	均匀	0.3		0.5
几何因子参数二 b_1	-0.25	正态	-0.3	0.03	-0.2
侧向乘子 L_s	3	均匀	2		4
断裂韧度 $K_{Ic}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1/2})$	10	常数			
最终腐蚀率常数 $a/(\text{mm} \cdot \text{年}^{-1})$	0.014	正态	0.004 2	0.01	0.02
腐蚀坑比例常数 b/mm	7.75	正态	1.95	1	8
腐蚀率抑制因子 $c/\text{年}^{-1}$	0.058 6	正态	0.04	0.005	0.07
管道 1/2 长度 L/mm	3 050	常数			
未支撑长度 B/mm	250	均匀	0		500
温度膨胀系数 α_n/C^{-1}	1.1×10^{-5}	常数			
温差 $\Delta T/\text{C}$	-10	均匀	-20		0
管道内压 P/MPa	0.45	正态	0.1	0.12	0.8
管道外径 D/mm	200	正态	190	10	210
	500	正态	490	25	510
管道壁厚 t/mm	11	正态	10	0.45	12
	17	正态	15	0.75	19
管道弹性模量 E_p/MPa	1.65×10^5	正态	13×10^4	33×10^3	20×10^5
管道泊松比 ν_p	0.26	常数			
弯矩弯曲系数 K_m	0.235	对数正态		0.05	
冲击系数 I_c	1.5	正态		0.375	
表面荷载系数 C_s	0.12	对数正态		0.024	
轮压荷载 F/kN	41.2	正态	30	20	100
管道有效长度 l/mm	941	正态	500	90	1 000
形状弯曲系数 K_d	0.108	对数正态		0.021 6	
土体重度 $\gamma/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	1.885×10^{-5}	正态		1.885×10^{-6}	
沟槽宽度 B_d/mm	500	正态	400	100	800
	1 000	正态	800	150	1 200
Marston 计算系数 C_d	1.32	对数正态		0.2	
冰冻荷载系数 f_i	0.5	均匀	0		1

虽然参数之间可能具有一定的相关性,但是由于对这些参数的相关性认识不够,暂时假定所有的输入参数是相互独立的.腐蚀模型采用二阶段模型,模拟次数 N 取 10^6 次.

3.1 安全因子的概率分布

通过对不同时间点 T_i ($T_i = 5i, i = 1, 2, \dots, 40$) 分别进行蒙特卡罗模拟,可得管道在 T_i 时刻安全因子 F_s 的概率分布,如图 2 所示.纵坐标值为管道在对应时间的安全因子,是一具有对数正态分布特征的随机变量.管道安全因子在前 50 年衰减很快,之后安全因子减小的速度由快减慢.在初期,安全因子置信水平为 90% 的置信区间较宽(在 $T = 10$ 年时,大致为 1.2~8.0 左右),这主要是由于力学设计参数对管道的安全性起主导作用,变异性较大,但是这种变异性主要在 $F_s > 1$ 的区间内.而在晚期,安全因子置信水平为 90% 的置信区间变窄(在 $T = 100$ 年时,大致为 0.55~2.00 左右).这是由于力学设计因素对管道的安全性不起主导作用,而由腐蚀因素起决定作用,而且由于腐蚀的自我抑制特性,在后期 F_s 减小得较慢.

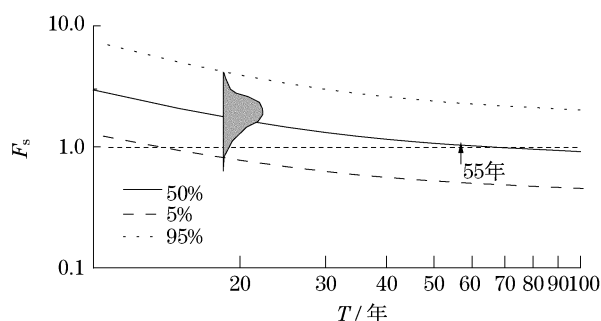


图2 安全因子随时间变化曲线

Fig.2 Curve of safety factor with time

3.2 总体敏感性分析

当腐蚀深度 $d = 0.25t$ 时,土体未支撑长度 $B = D$; $d = 0.50t$ 时, $B = 2D$.图 3 和图 4 分别对应小管径和大管径灰口铸铁管根据秩相关系数法得到的随机参数对安全因子的贡献率.位于正半轴时表示参数代数值增加会导致管道安全因子增加,位于负半轴则反之.一些导致管道应力增加的因素(如土体重度、管道内压等)和导致管道抗力衰退的因素(如几何因子参数 a_1 等)位于负半轴,其代数值增加导致管道安全因子减小.各参数贡献率大小在图中用柱长表示.

由图 3 可见,对 150 mm 管来说,未支撑长度、几何因子参数 a_1 和沟槽宽度是影响较大的随机变量,其次是温差、冲击系数、冰冻荷载系数、轮压荷载,土体和管材弹性模量等参数影响较小.沟槽宽度、冲击系数、轮压荷载和冰冻荷载系数这些参数主要通过增加管道的竖向荷载增大管道的平面内弯曲应力使管道安全因子下降.因此,在腐蚀初期,未支撑长度

较短时,上述因素占有较大的比重,但随着未支撑长度的增加,尤其是在温差较大的时候,纵向应力在管道失效中占据了主动,未支撑长度和温差的贡献率逐渐增加,而环向应力的重要性有所减少.几何因子参数 a_1 是确定腐蚀管道剩余强度的参数,Rajani在推导剩余强度的经验公式^[1]时,实验数据是很分散的,几何因子上界和下界之间包含很大的范围,注定剩余强度计算包含了较大的不确定性.当管径为500 mm时(图4),与竖向荷载有关参数的重要性比150 mm管道大,未支撑长度和温差的重要性显著减小,这主要是由于大直径管道的纵向应力相比环向应力要小得多,管道失效主要由环向应力控制,而小直径管道的失效破坏多为纵向应力控制,增加温差和未支撑长度可使纵向应力增大.几何因子参数 a_1 对大管径和小管径管道同样重要.

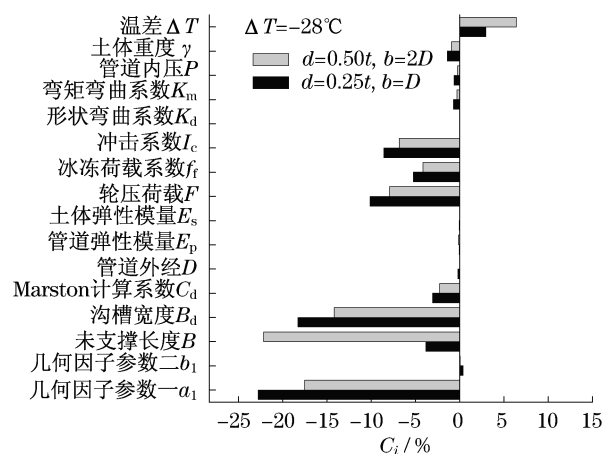


图3 150 mm 管道随机参数对安全因子的贡献率

Fig.3 Random variable influence on the 150 mm pipe failure

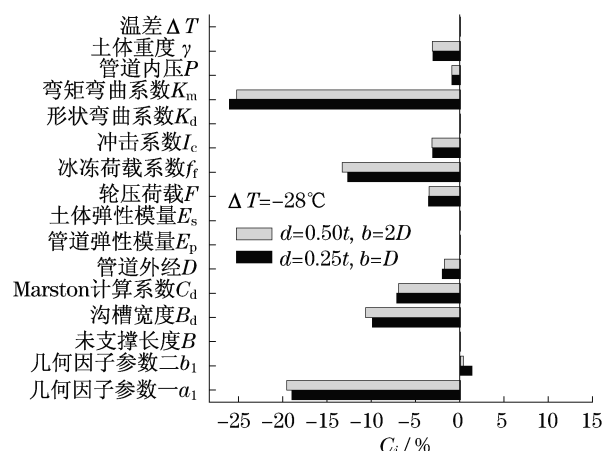


图4 500 mm 管道随机参数对安全因子的贡献率

Fig.4 Random variable influence on the 500 mm pipe failure

3.3 各参数分析

3.3.1 导致应力变化参数

对长期运行的管道而言,其土体支撑是否完好是很难确定的.未支撑长度 B 的大小与管理土质条件、施工质量和服役时间相关,最大时可能会达到管道直径的3~4倍.依据机会均等原则,假定未支撑长度是0到可能的最大值之间的均匀分布.由前面分析可知,对150 mm管道来说,未支撑长度导致的纵向弯曲应力极易导致管道的环向断裂失效.由图5可知,不考虑未支撑长度比考虑未支撑长度时的失效概率小,尤其是在管道的腐蚀坑深度超过0.3倍壁厚之后,未支撑长度的出现增加了管道的失效概率,未支撑长度越大,失效概率越高.由图6可见,当服役时间在10年以下时,未支撑长度对失效概率影响较小;未支撑长度对管道失效的贡献随时间增大,在服役时间为40年时,考虑4倍管径的未支撑长度比不考虑时失效概率增加了近50%.

温差、内压以及竖向荷载参数对管道失效的影响与未支撑长度存在类似的规律.在寒冷地区,温差导致的拉伸应力加剧了管道的失效概率;管道水击波的存在使管内瞬间压力提高,腐蚀较严重的老龄管道失效概率大大提高;此外,沟槽宽度、冲击系数、轮压荷载通过改变作用在管道上的竖向荷载对管道失效产生影响.限于篇幅,此处不再一一阐述.

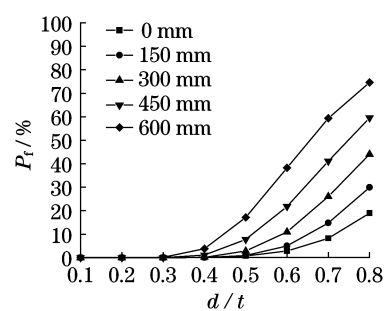


图5 不同腐蚀深度和未支撑长度的失效概率

Fig.5 Failure probability versus corrosion depth and unsupported bedding

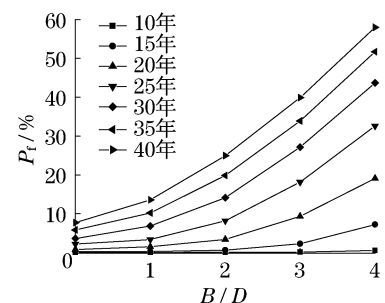


图6 不同服役时间和未支撑长度的失效概率

Fig.6 Failure probability versus time and unsupported bedding

3.3.2 腐蚀模型参数

二阶段腐蚀模型三参数对安全因子 F_s 的贡献率随时间的分布如图7所示. 由于腐蚀速率 $a + bce^{-ct}$ 是随时间降低的, 降低的趋势与图中三参数总贡献率曲线一致. 腐蚀率常数 a 的重要性随时间增加, 在刚开始时线性腐蚀不占优势, 到腐蚀后期才逐步体现出来. 腐蚀率抑制因子 c 的重要性随时间减小, 但其在腐蚀前期占较大的比重. 腐蚀坑比例常数 b 的重要性体现在中期. 三参数对结果总的贡献率在30%以上, 因此进一步研究和确定腐蚀参数尤其是参数 b, c 的分布规律对减小结果的不确定性具有明显的意义. 比较150 mm和500 mm管道可以看出, 腐蚀对小直径管道的作用要稍大于大管径, 这主要是由于大直径管道具有较大的壁厚.

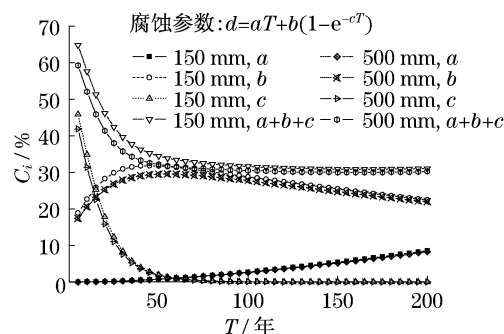


图7 二阶段腐蚀模型三参数对 F_s 贡献率随时间的分布
Fig.7 Influence of corrosion model parameters to failure probability

3.3.3 剩余强度模型参数

剩余强度模型参数也对管道的安全因子起着重要的作用. 剩余强度模型中几何因子 ($\beta = a_1 (d/t)^{b_1}$) 计算系数 a_1 对剩余强度计算有着较大的影响, 由图8可见, 该参数的影响随着时间的增加而增

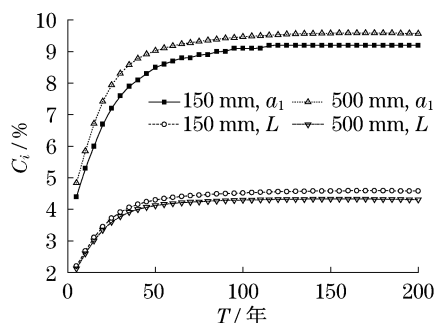


图8 几何因子参数和侧向乘子对 F_s 贡献率随时间的分布
Fig.8 Influence of geometric factor and lateral multiplier parameters to failure probability

大, 影响值为10%左右. 腐蚀坑侧向乘子 L_s 对安全因子的贡献度在5%以内. 比较150 mm和500 mm管道可知, a_1 对大直径管道影响比小直径管道大, 而侧向乘子则反之.

4 结论

(1) 大直径管道纵向应力相比环向应力要小得多, 管道失效主要由环向应力控制. 而小直径管道的失效破坏多为纵向应力控制, 温差和纵向弯曲应力是造成小管径管道破坏的主要原因.

(2) 由于渗漏引起的管道基础局部流失恶化了管道的受力条件, 悬空段的出现增加了管道的失效概率, 对小直径管道而言尤其严重.

(3) 腐蚀参数、未支撑长度、几何因子计算系数对安全因子分布具有重要影响. 腐蚀是影响灰口铸铁管失效的重要因素, 意在减缓腐蚀速度的管道防腐技术可以有效减少管道的失效频率, 延长管道使用寿命.

参考文献:

- [1] Rajani B, Makar J, McDonald S, et al. Investigation of grey cast iron water mains to develop a methodology for estimating service life[R]. Denver CO: AwwaRF, 2000.
- [2] Hamed M, Melchers R E. Probabilistic analysis of underground pipelines subject to combined stresses and corrosion [J]. Engineering Structures, 1997, 19(12): 988.
- [3] 俞树荣, 李建华, 李淑欣, 等. 埋地管道腐蚀剩余寿命预测概率模型[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(6): 11.
YU Shurong, LI Jianhua, LI Shuxin, et al. Probability model for the prediction of corrosion remaining life of underground pipelines[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(6): 11.
- [4] Sadiq R, Rajani B, Kleiner Y. Probabilistic risk analysis of corrosion associated failures in cast iron water mains [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 86(1): 1.
- [5] 邵煜, 张士乔, 俞亭超. 考虑腐蚀的埋地灰口铸铁管失效预测及可靠度分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(1): 160.
SHAO Yu, ZHANG Tuqiao, YU Tingchao. Failure prediction and reliability analysis of buried cast iron water mains considering corrosion [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(1): 160.
- [6] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
ZHAO Guofan, JIN Weiliang, GONG Jinxin. Theory of structural reliability [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000.
- [7] OpenTURNS software. OpenTurns reference guide [EB/OL]. (2007-11-07)[2009-03-20]. <http://trac.openturns.org/wiki/Documentation>.