基于多种失效模式及其随机相关性的地下管道腐蚀可靠性分析

王晓敏，骆正山，高懿琼，孔玉磊

（西安建筑科技大学 管理学院，西安 710055）

摘要：目的 考虑不同时间点载荷效应过程的相关性以及不同失效模式之间的相关性，提出了一种确定受腐蚀影响的具有多种失效模式的地下钢管系统失效概率的方法。**方法** 失效钢管受腐蚀的形态包括断裂、强度破坏、挠度和屈曲，它们都是随机过程，并相互关联。采用高斯过程的第一通道概率理论对其进行量化，蒙特卡罗模拟在每个时间点计算均值函数 $\mu_L(t)$和标准差 $\sigma_L(t)$负载效应的过程，相关矩阵包含不同失效模式之间的相关系数作为时间的函数，计算了各失效模式的失效概率，然后通过考虑不同失效模式之间的相关性确定了系统的失效概率。通过一个案例研究来验证该方法的可靠性，并通过敏感性分析，研究关键变量对腐蚀钢管失效概率的影响。**结果** 不同失效模式之间的相关性以及失效事件在时间维度上的相关性，对单一模式的失效概率以及系统失效概率的量化评价具有较大的影响，在诸多影响因子中，腐蚀模型中的乘数常数 k、指数常数 n 和管厚 d 对失效概率的影响最大。随管道使用年限的增加，n 与 d 有增大的趋势，n 值的上限在不同的失效模式下均可达到 0.8 以上，d 则可增至–0.2 以上；同时，k 逐年减小，其最低值可降至 0.2 左右。**结论** 考虑时变因素的可靠性算法是腐蚀影响下的埋地钢管失效评估的有效工具，对腐蚀作用下的埋地钢管进行失效预测，确定时间维度上管道相关位置载荷作用过程的自相关系数和不同失效模式之间的相关性，能够提高管道失效概率预测的准确性。

关键词：腐蚀；失效模式；可靠性；相关性分析

中图分类号：TG172 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2022)04-0202-09

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.04.020

Reliability Analysis of Corrosion Affected Underground Steel Pipes Considering Multiple Failure Modes and Their Stochastic Correlations

WANG Xiao-min, LUO Zheng-shan, GAO Yi-qiong, KONG Yu-lei

(School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

收稿日期：2021-04-14；**修订日期：**2021-08-28

Received：2021-04-14；**Revised：**2021-08-28

基金项目：国家自然科学基金（41877527）；陕西省社科基金项目（2018S34）

Fund：National Natural Science Foundation of China (41877527); Shaanxi Social Science Fund Project (2018S34)

作者简介：王晓敏（1983—），女，博士研究生，主要研究方向为管道的腐蚀速率预测和油气管道风险评估。

Biography：WANG Xiao-min (1983—), Female, Ph. D., Research focus: pipeline corrosion rate prediction, oil and gas pipeline risk assessment.

通讯作者：骆正山（1969—），男，博士，教授、博士生导师，主要研究方向为管道腐蚀速率预测和油气管道风险评估。

Corresponding author：LUO Zheng-shan (1969—), Male, Doctor, Professor, Ph. D. supervisor, Research focus: pipeline corrosion rate prediction, oil and gas pipeline risk assessment.

引文格式：王晓敏，骆正山，高懿琼，等. 基于多种失效模式及其随机相关性的地下管道腐蚀可靠性分析[J]. 表面技术，2022，51(4)：202-210.

WANG Xiao-min, LUO Zheng-shan, GAO Yi-qiong, et al. Reliability Analysis of Corrosion Affected Underground Steel Pipes Considering Multiple Failure Modes and Their Stochastic Correlations[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 202-210.

ABSTRACT: This paper presents a methodology for determining the probability of system failure of corrosion affected steel pipelines with multiple failure modes, considering the correlation of the load effect process at different time points and the correlation between different failure modes. The failure modes included fracture, strength failure, deflection and buckling and they were all random process and correlations. The first passage probability theory was employed to quantify the probability of pipe failure. The Monte Carlo simulation calculated the mean function $\mu_L(t)$ and the standard deviation $\sigma_L(t)$ loading effect at each time point, and the correlation matrix contained the correlation coefficients between the different failure modes as a function of time, and calculated the failure probability of each failure mode, and then determined the failure probability of the system by considering the correlation between different failure modes. A case study was presented to illustrate the proposed methodology, followed by a sensitivity analysis to investigate the effects of key random variable son the probability of pipe failure. In many influencing factors, the multiplier constant *k*, the exponential constant *n* and the *d* thickness of the corrosion model had the greatest influence on the failure probability. With the increase of pipeline service life, *n* and *d* tend to increase. The upper limit of *n* value could reach more than 0.8 under different failure modes, and *d* could increase to more than –0.2; at the same time, *k* decreased year by year, and its lowest value could be reduced to about 0.2. The reliability algorithm considering time-varying factors is an effective tool for the failure evaluation of buried steel pipes under the influence of corrosion. The failure prediction of buried steel pipes under the action of corrosion and the determination of the autocorrelation coefficient of the load process at the relevant position of the pipeline in the time dimension and the correlation between different failure modes can improve the accuracy of pipeline failure probability prediction.

KEY WORDS: corrosion; failure mode; reliability; correlation analysis

地下管道主要由钢材构成，为工业生产和居民生活输送生产生活必需品。腐蚀是造成埋地钢质管道破坏的主要原因之一，腐蚀发生的影响因素众多，包括埋地管道外界因素、土壤腐蚀性、管道防腐层质量和管道本身的损伤程度等[1-2]。地下管道由于长期暴露在腐蚀性环境中，钢管的防护措施（涂漆、阴极保护或镀锌等）可能失效，不可避免地导致钢管变质和损坏。随着石油天然气工业的发展，管道布网增密，管道铺设环境复杂，运行时间增长，由管道腐蚀引发的生产事故时有发生，对社会经济以及生态环境产生了严重的影响，因此管道腐蚀对管道可靠性的影响成为研究热点[3]。1969 年，Folias 就提出了半经验断裂力学关系式。在这一理论背景下，德克萨斯州东部输气公司和美国天然气协会（AGA）的管道研究委员会，共同针对腐蚀影响下的管道剩余强度评价问题展开了研究，并提出了一项被称为 B31G 的准则，用于评价腐蚀管道的可用性。20 世纪 90 年代中期，管道失效检测与评价问题逐渐受到国内管道专家的重视，相关研究成果得到了相关企业的高度重视和积极应用，使得管道失效诊断和模型评价技术也得到了长足的发展。

研究表明，钢管失效主要是由材料变质（主要是腐蚀）和外加载荷共同作用造成的。大多数与管道失效相关的参数，如管道几何形状、材料特性、外部载荷和腐蚀过程，都表现出不同程度的变化，也可能随时间而变化。考虑到这些参数的不确定性和时变性，在评估管道失效时须采用随机方法。已有研究表明，一根钢管可能会在不同的模式下失效，其中包括强度破坏、泄漏或塑性崩溃等。针对不同失效模式下的钢管设计和失效评估，已经建立了不同的准则。Ahammed 等[4]不仅考虑了箍应力引起的腐蚀管道的强度破坏，并使用一阶可靠度方法来量化不确定性。De Silva 等[5]提出了一种基于概率分析的条件评估来估计故障率。在分析中，仅考虑环向应力，并结合条件评估数据采用一阶、二阶矩法确定失效概率。Melchers[6]应用定常理论对受点蚀的管道进行可靠性分析，认为当最大点蚀深度达到管道厚度时，就会发生失效。AWWA[7]采用蒙特卡罗模拟方法研究了韧性金属管道的失效概率，其极限状态函数由失效压力与工作压力之差定义。综上所述，以往的研究大多仅采用一阶可靠度法或蒙特卡罗模拟法来确定失效概率。有关管道的时变可靠度研究较少，这表明了相关性在时域退化过程中没有被考虑。

地下管道往往有多段，每一段可能包含多个腐蚀缺陷，其失效形式可能不同，有学者综合考虑了多种失效模式对管道可靠性的影响。Li 等[8]提出了一种综合评估管道段可靠性的方法，考虑了小泄漏、大泄漏和破裂等 3 种破坏模式，并通过蒙特卡洛方法对内部压力的随机变化过程进行模拟，并进一步计算失效概率。Yu 等[9]考虑了腐蚀引起的挠度、屈曲、壁推力和弯曲应力等失效模式，采用子集模拟方法进行地下柔性管道时变可靠性预测。Fu 等[10]对一段腐蚀埋地管道进行了基于分段的系统可靠性分析，该管道各分段存在多处腐蚀缺陷，并采用蒙特卡罗模拟技术对爆管进行可靠性分析，采用分裂系统方法对可靠性预测进行更新。然而，以上研究均认为失效模式是独立的，对不同失效模式下的概率进行累加导致系统失效概率被高估。

本文考虑不同时间点载荷效应过程的相关性以

及不同失效模式之间的相关性，提出了一种确定受腐蚀影响的具有多种失效模式（包括管道破裂）的地下钢管系统失效概率的方法。失效钢管受腐蚀的形态包括断裂、强度破坏、挠度和屈曲。所有失效模式下的载荷效应都被建模为高斯过程。利用高斯过程的第一通道概率理论计算了各失效模式的失效概率，然后通过考虑不同失效模式之间的相关性确定系统的失效概率，并通过一个案例来说明所提出的方法。将腐蚀钢管的各种失效模式假设为一个系统，计算腐蚀钢管的系统失效概率，然后进行敏感性分析，研究关键变量对腐蚀钢管失效概率的影响。

1 系统可靠性公式

在评估地下管道失效的风险时，应建立性能标准。在结构可靠度理论[11]中，各失效准则以极限状态函数（Limit State Function，LSF）的形式表示为：

$$G(R,L,t)=R(t)-L(t) \tag{1}$$

式中：$L(t)$为 t 时刻的荷载；$R(t)$为阻力。由式（1）的极限状态函数，可以确定地下管道失效概率如式（2）所示，其中 P 表示一个事件的概率。

$$p_{\mathrm{f}}(t)=P[G(R,L,t)\leqslant 0]=P[L(t)\geqslant R(t)] \tag{2}$$

一个管段可能包含 m 种失效模式，可以看作是一个系统[12]。根据基本集合理论，管段的失效概率可以表示为：

$$p_{\mathrm{f,sys}}(t)=P[G_1(R_1,L_1,t)\leqslant 0\cup G_2(R_2,L_2,t)\leqslant 0\cup\ldots\cup G_m(R_m,L_m,t)\leqslant 0] \tag{3}$$

式中：G_m 为 m 种失效模式的极限状态；R_m 为 m 种失效模式的电阻；L_m 为 m 种失效模式的载荷效应。

实际中，地下管道的失效模式之间有一定联系。考虑到其相关性，管道系统的失效概率[13]可以用式（4）近似方法计算。其中，$\boldsymbol{\beta}=(\beta_1,\beta_2,\beta_m)$是一个向量的分量，为 m 种失效模式的可靠性指标。

$$p_{\mathrm{f,sys}}(t)=1-\Phi_m(\boldsymbol{\beta},\boldsymbol{\rho}_{\mathrm{c}}) \tag{4}$$

每一种失效模式的失效概率可以用式（2）计算，这是一个典型的上行交叉问题，可以用时变可靠性方法处理。时变可靠性问题是指将所有或部分基本随机变量建模为随机过程的问题。在依赖时间的可靠度方法中，地下管道失效取决于在管道使用寿命中某一时刻，作用过程 $L(t)$向上跨越可接受的极限 $R(t)$之前预期的时间。同样地，这种偏移第一次发生的概率等于该时间段内管道失效的概率。这就是所谓的第一通道概率[14]，在泊松过程的假设下，它可以表示为：

$$p_{\mathrm{f}}(t)=1-[1-p_{\mathrm{f}}(0)]\mathrm{e}^{-\int_0^t \nu \mathrm{d}\tau} \tag{5}$$

式中：$p_{\mathrm{f}}(0)$为 t=0 时刻管道失效的概率；$p_{\mathrm{f}}(t)$为响应过程 $L(t)$向上越过阈值 $R(t)$的平均率。值得注意的是，对于可靠性问题，向上交叉通常很少发生，因此通常将单个向上交叉假设为独立事件，从而独立于任何早期的向上交叉的概率，包括 t=0 时的向上交叉。式(5)中的上交率可由公式（6）确定。

$$\nu=\nu_R^+=\int_{\dot{R}}^{\infty}(\dot{L}-\dot{R})f_{L\dot{L}}(R,\dot{L})\mathrm{d}\dot{L} \tag{6}$$

式中：ν_R^+为随机过程 $L(t)$相对于阈值 $R(t)$的向上交叉率；$\dot{R}$ 为 R 相对于时间的斜率；$\dot{L}$ 为 L 的时间导数过程；$f_{L\dot{L}}$ 为 $\dot{L}$ 和 L 的联合概率密度函数。Rajabipour 等[15]推导了 $L(t)$为高斯过程且阈值 R 为确定性时式（6）的解析解，见式（7）。

$$\nu=\nu_{R=\det}^+=\frac{\sigma_{\dot{L}/L}}{\sigma_L}\phi\left(\frac{R-u_L}{\sigma_L}\right)\cdot\left\{\Phi\left(\frac{\dot{R}-u\dot{L}/L_L}{\sigma\dot{L}/L}\right)-\frac{\dot{R}-u\dot{L}/L_L}{\sigma\dot{L}/L}\Phi\left(-\frac{\dot{R}-u\dot{L}/L_L}{\sigma\dot{L}/L}\right)\right\} \tag{7}$$

式中：$\nu=\nu_{R=\det}^+$ 为阈值 R 确定时的上交叉率；$\phi(\cdot)$和 $\Phi(\cdot)$分别为标准正态密度函数和分布函数；μ 和 σ 分别为 L 和 $\dot{L}$ 的均值和标准差。计算失效概率 $p_{\mathrm{f}}(t)$的关键是建立基于失效准则的极限状态函数。基于所提出的方法计算系统故障概率的流程如图 1 所示。

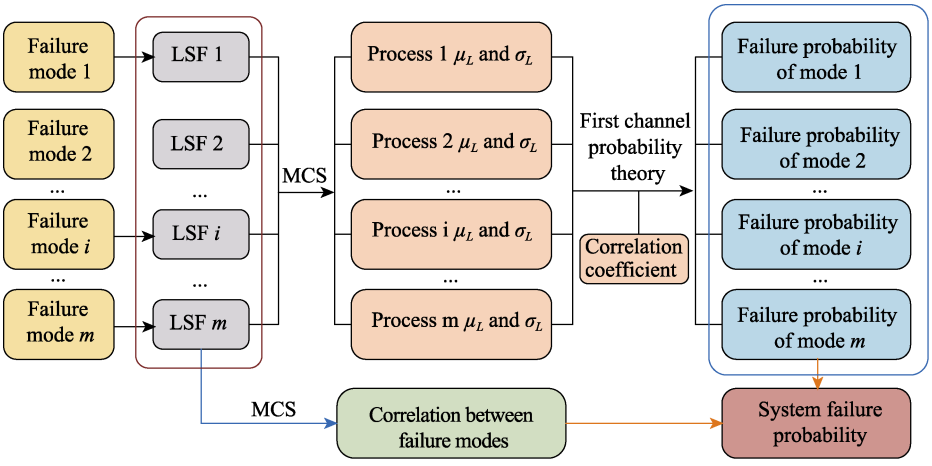


图 1 计算系统故障概率的流程

Fig.1 Flow chart for calculating the probability of system failure

2　钢管的失效模式

2.1　断裂

对于韧性材料，Lin 等[16]建立了倾斜裂纹诱导的混合模式断裂管道的弹性断裂韧性模型。利用所建立的模型评估韧性金属管道断裂条件的失效准则见式（8）。其中 K_e 为考虑所有断裂模式的等效应力强度因子，见式（9）。

$$K_e \geqslant K_c^e \tag{8}$$

$$K_e = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{K_{III}^2}{1-S}} \tag{9}$$

式中：K_I、K_{II}、K_{III} 是模式 I、II、III 的压力强度因子；S 为泊松比[17]。；K_c^e 为弹性断裂韧性，见式（10）。

$$K_c^e = K_c K_{rc} \tag{10}$$

假设 $K_c / \sigma_y < 0.2\sqrt{m}$，$K_{IIc} < K_c$，其中 K_c 为总断裂韧性，σ_y 为屈服应力，K_{IIc} 为 II 型断裂韧性。式（9）可改写为：

$$K_e = \sqrt{K_{I2}^2 + \frac{K_{III}^2}{1-S}} \tag{11}$$

K_{rc} 由式（12）计算[18]，其中 Q 是椭圆的形状因子，由第二类完全椭圆积分的平方给出。

$$K_c^e = K_c K_{rc} = \left[1+0.5\left(\frac{K_{rc}\sqrt{Q}}{\frac{R_i}{d}\sqrt{\pi a}\sqrt{F_I^2 + F_{II}^2 + \frac{F_{III}^2}{1-S}\frac{2}{\sqrt{3}}}\sigma_y \ln\frac{R_i+d}{R_i}}\right)^2\right]^{-0.5} \tag{12}$$

2.2　强度失效

埋地管道承受内部压力、外部土壤和交通荷载引起的应力[19]。如果假设地下管道沿长度均匀加载和支撑，则箍应力是最重要的。当环向应力 σ_h 超过屈服应力 σ_y 时，管道就会破裂，见式（13）。

$$\sigma_h \geqslant \sigma_y \tag{13}$$

对于薄壁管材，可以通过考虑外部土体和交通荷载产生的内压和弯曲应力来计算环向应力，其表达式为[20]：

$$\sigma_h = \frac{p(R_i+d)}{d} + \frac{6k_m C_d \gamma_s B_d^2 E d R_m}{Ed^3 + 24k_d p R_m^3} + \frac{12k_m I_c C_t \omega_L h(R_i+d)EdR_m}{L_e(Ed^3+24k_d p R_m^3)} \tag{14}$$

式中：p 是内部压力；k_m 是一个弯矩系数；C_d 是地球负荷；γ_s 是土壤单位质量；B_d 为管道顶部的沟渠宽度；R_m 是管道的平均半径；k_d 是偏转系数；I_c 是影响因子；C_t 是表面负载系数；ω_L 是车轮负载；h 是回填的高度；L_e 是计算荷载的管道的有效长度。

2.3　偏转失效

在外载荷作用下，柔性钢管有变形的倾向。在本研究中，挠度破坏采用的破坏准则[21]见式（15）。其中，Δ_x 是地下管道的水平挠度，可由公式（16）计算。

$$\Delta_x \geqslant \Delta_{xallowable} \tag{15}$$

$$\Delta_x = \frac{D_l K W R_m^3}{EI + 0.061 E R_m^3} \tag{16}$$

式中：D_l 为挠度滞后系数；K 为层理常数；W 为单位长度管道外荷载；EI 为管道壁刚度；I 为单位长度管道横向惯性矩；E 为土壤反体模量。允许的管道挠度为各种衬里和涂层系统范围的 2%~5%。在本文中，管道的允许挠度为管径的 3%。当水平挠度超过管道允许挠度时，就认为管道失效。

2.4　屈曲失效

埋在地下的管道由于外荷载和变形引起弹性失稳而发生倒塌或屈曲。因此，外载荷的总和不应大于许用屈曲压力。钢管上的外荷载[20]可以表示为：

$$q = \gamma_w h_w + \frac{R_w W_c}{2(R_i+d)} + \frac{W_L}{2(R_i+d)} \tag{17}$$

式中：γ_w 为水容重；h_w 为管道上方的水高度；R_w 为水浮力因子；W_c 为单位长度管道上的竖向土壤荷载；W_L 为单位长度管道上的活荷载。钢管弯曲的判别公式见式（18）。其中 q_a 为许用屈曲压力，可由式（19）确定。其中 B' 为弹性支撑的经验系数，可

表 1　随机变量的统计特性

Tab.1 Statistic properties of random variables

Characeristic	Description	Mean	Variable coefficient
R_i	Internal radius/mm	228.6	0.05
d	The thickness of the tube/mm	8.73	0.05
p	Internal pressure/MPa	6.0	0.1
k	Multiplying constant	0.3	0.3
n	The index of constant	0.6	0.2
E	Young's modulus of steel/GPa	207	0.02
E'	Soil reaction modulus/MPa	1	0.05
ω_L	Wheel load/kPa	20	0.25
h	Backfill height	1.2	0.01
h_w	The level above the pipe/m	1.0	0.01
L_e	Effective length of pipeline/m	1.0	0.1
k_m	Bending coefficient	0.24	0.15
C_d	Coefficient of soil load calculation	1.32	0.20
B_d	Width of trench at top of pipe/m	0.76	0.10
K_d	Flexibility factor	0.11	0.15
I_c	Influence coefficient	1.25	0.20
C_t	Surface load factor	0.12	0.15

以表示为 $B'=\frac{1}{1+4\mathrm{e}^{-0.065h}}$（$h$ 为回填体的高度）。

$$q \geqslant q_{\mathrm{a}} \tag{18}$$

$$q_{\mathrm{a}}=\frac{\sqrt{32R_{\mathrm{w}}B'E'\frac{EI}{8(R_{\mathrm{i}}+d)^3}}}{2} \tag{19}$$

3　载荷效应的随机模型

众所周知，腐蚀过程是一个非常随机的现象，取决于局部条件，如土壤类型、湿度和氧气含量、埋地管道材料的性质等。从现场调查观察到，腐蚀可能以均匀腐蚀或点蚀的形式发生。腐蚀速率是实时变化的，由于腐蚀产物在表面形成的保护性能较差，腐蚀速率的初始值较高。

本文采用幂律腐蚀模型来计算腐蚀坑深，见式（20）。其中 k 和 n 分别是乘法常数和指数常数，这取决于管材和周围环境。一般应通过试验来确定这 2 个常数。但是，在许多情况下，可以根据已发表的文献和过去的经验来估计这 2 个常数的值。采用的腐蚀模型，k 和 n 的均值分别为 0.3 和 0.6，变化系数分别为 0.3 和 0.2。

$$a(t)=kt^n \tag{20}$$

用于评估钢管失效条件的大多数参数不仅不确定，而且还随时间变化。因此，将它们建模为随机过程是合适的。由此可知，表 1 中定义的荷载效应 $L(t)$ 是基本变量 X_i (i=1, 2, …, nv)和时间 t 的函数，可以表示为：

$$L(t)=f(X_1,X_2,\cdots,X_{nv},t)=L_{\mathrm{c}}(t)\cdot\xi_L \tag{21}$$

假设每个基本随机变量 X_i 的统计信息是可用的，通过蒙特卡罗模拟，可以得到 $L(t)$的平均位移 $L(t)$和变分系数 cov(t)。考虑到载荷的随机性影响 $L(t)$，引入一个随机变量 ξ_L，$E(\xi_L)$=1 及其变异系数。$L_{\mathrm{c}}(t)$可视为 $L(t)$确定的纯时间函数，那么 $L(t)$的均值 μ_L 和自协方差 C_{LL} 函数见式（22）—（23），其中 ρ 为 t_i 和 t_j 两点间负荷效应 $L(t)$的自相关系数。

$$\mu_L(t)=E[L(t)]=E[L_{\mathrm{c}}(t)]\cdot\xi_L=L_{\mathrm{c}}(t) \tag{22}$$

$$C_{LL}(t_i,t_j)=\rho k_L^2L_{\mathrm{c}}(t_{i,})L_{\mathrm{c}}(t_j) \tag{23}$$

4　应用实例

选取某巷道下埋置的钢管，对其进行时变可靠度分析。假设保护层已经失效。本例考虑了倾角为 0°的断裂模式，即裂缝 1；倾角为 30°时的断裂模式，即裂缝 2；同时考虑了强度、挠度和屈曲破坏。假设断口尖锐腐蚀坑的长径比为 0.4，只考虑沿裂纹前沿的最深点，作为其应力强度的最大因子。钢的 I 型断裂韧性取值为 50 MPa，在沿裂纹前沿的最深处，仅存在 I 型和 III 型混合断裂韧性。利用非线性回归拟合试验结果，得到公式（24）。其中，M_{e}的取值范围为 0~1。

$$g(M_{\mathrm{e}})=\frac{K_{\mathrm{c}}}{K_{\mathrm{Ic}}}=0.402\,9M_{\mathrm{e}}^2-0.173\,5M_{\mathrm{e}}+0.781\,8\text{（I和III混合模式）} \tag{24}$$

另外，取挠度滞后因子 D_{l} 为 1.0，层理常数 K 为 0.1，水的 γ_{w}=9.81 kN/m^3，水浮力因子 R_{w} 由式（25）确定[21]。

$$R_{\mathrm{w}}=1-0.33\frac{h_{\mathrm{w}}}{h}\ (0\leqslant h_{\mathrm{w}}\leqslant h\text{ 但不小于 }0.67) \tag{25}$$

式（16）中的 W 可以表示为：

$$W=\gamma_{\mathrm{s}}\times h\times 2(R_{\mathrm{i}}+d)+W_{\mathrm{L}}\times 2(R_{\mathrm{i}}+d) \tag{26}$$

管道单位长度的横向惯性矩由 $I=\frac{d^3}{12}$、θ=30°、$\sigma(X_i)$ 计算，管道的有效长度 L_{e}=1 m。

4.1　失效的概率

按照图 1 所示的步骤来确定系统故障的概率。蒙特卡洛模拟是通过随机变量的统计试验或随机模拟进行数值求解的一种近似方法，由于其求解简单而广泛应用。蒙特卡洛模拟法计算管道失效概率和可靠度的具体方法和步骤如图 2 所示。

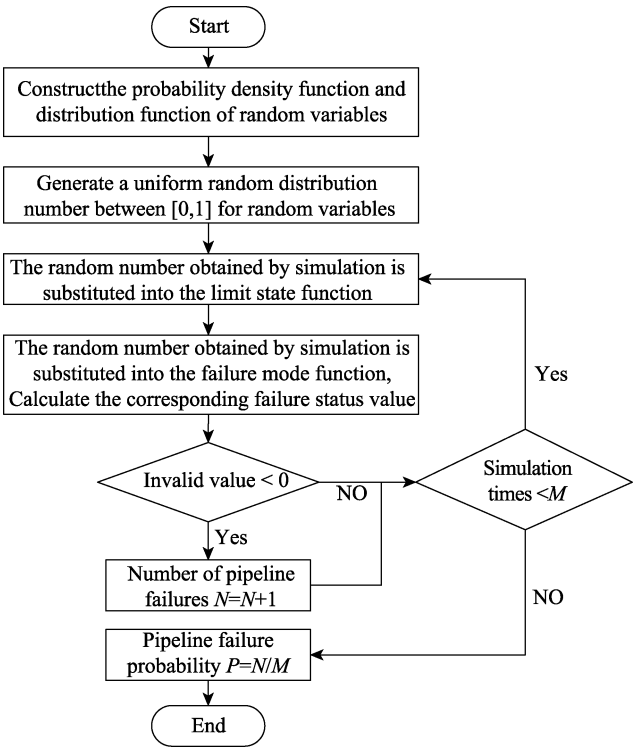


图 2　蒙特卡洛仿真算法流程

Fig.2 Monte Carlo simulation algorithm flow chart

1）收集相关数据，进行统计分析，确定随机变量的概率密度函数 $f(x)$和分布函数 $F(x)$。

2）针对每一个随机变量，在[0,1]之间生成许多

均匀的随机分布数 $F(x_{ij})$。

3）将每次模拟得到的随机数代入极限状态函数，对于每个随机变量的分布函数 $F(x_{ij})$解出相应的 x_{ij}，因此对于每个变量 x_{ij}模拟一次可得到一组随机数(x_{1j}, x_{2j}, …, x_{nj})。

4）将每次模拟得到的随机数代入失效模式函数中，计算相应的失效状态值。

5）若失效状态值小于 0，则管道失效 1 次，否则管道未失效。

6）重复步骤第 3、第 4、第 5 步，共计进行 N 次模拟，共计失效 M 次，根据大数理论，则失效概率为 $p_f=M/N$。

蒙特卡罗模拟在每个时间点计算均值函数 $\mu_L(t)$和标准差 $\sigma_L(t)$负载效应的过程，和相关矩阵包含不同失效模式之间的相关系数作为时间的函数。蒙特卡罗模拟的样本容量为 5 000。然后，对于每种破坏模式，通过公式(5)计算管道的破坏概率，给定自相关系数，通过公式(7)计算出上交率 v。

两点(t_i,t_j)在倾角为 θ=30°时断裂载荷效应过程的自相关系数拟合效果如图 3 所示。对于其他的失效模式，也可以得到类似的结果。由此可见，腐蚀对管道失效有相当大的影响。因为腐蚀对管道失效的影响取决于管道几何形状、腐蚀速率、水压等，这些在不同时间点是相互关联的。因此，载荷效应在时域上是相关的。基于首次通过概率的概念和随机过程理论，由于故障概率的巨大差异，有必要采用时变可靠度方法。在实际应用中，需要收集足够的荷载效应过程的时间历史数据，利用统计方法估计 2 个点(t_i, t_j)在时间上的荷载效应过程的自相关系数。

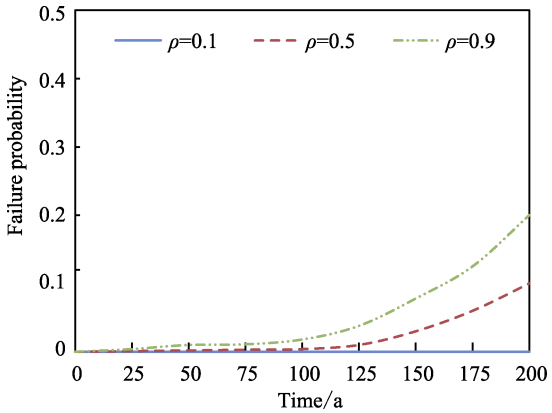


图 3　当 θ=30°时不同 ρ 值钢管的失效概率

Fig.3 Probability of steel pipe failure for different ρ values with θ=30°

将钢管的所有失效模式视为一个系统，如图 4 所示。对于具有上述 5 种失效模式的系统，系统的可靠性见式（27），其中 G_{f1}、G_{f2} 分别代表倾角为 0°和 30°时的模式，G_s、G_d、G_b 分别代表强度、挠度和屈曲的极限状态。

$$p_{f,sys}(t)=P[G_{f1}(R_{f1},L_{f1},t)\leqslant 0\cup G_{f2}(R_{f2},L_{f2},t)\leqslant 0\cup G_s(R_s,L_s,t)\leqslant 0\cup G_d(R_d,L_d,t)\leqslant 0\cup G_b(R_b,L_b,t)\leqslant 0] \tag{27}$$

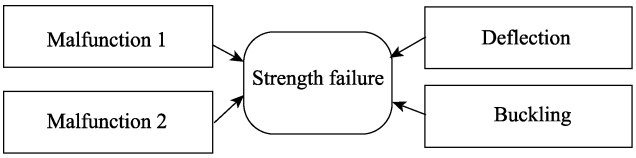


图 4　多种故障模式的系统

Fig.4 System for multiple failure modes

如果不考虑这些失效模式之间的相关性，则系统失效概率的上界由公式（28）计算。其中 $p_{f,f1}$、$p_{f,f2}$ 分别代表倾角为 0°和 30°时的模式，$p_{f,s}$、$p_{f,d}$、$p_{f,b}$ 分别为断裂的强度、挠度和屈曲的失效概率。

$$p_{f,sys}(t)=1-(1-p_{f,f1})(1-p_{f,f2})(1-p_{f,d})(1-p_{f,b}) \tag{28}$$

为了考虑这些失效模式之间的相关性，系统失效的概率可以写成：

$$p_{f,sys}(t)=1-\Phi_4(\boldsymbol{\beta},\boldsymbol{\rho}_c) \tag{29}$$

式中：$\boldsymbol{\rho}_c$ 为包含 4 种失效模式间相关系数的相关矩阵。通过蒙特卡罗模拟，对 4 种失效模式的式（1）的极限状态函数进行了模拟，并根据模拟值确定了它们之间的相关系数。

由于常见的随机变量，这些失效模式是相互关联的。图 5 显示了不同破坏模式随时间的相关性变化。值得注意的是，由于所使用的随机变量是相同的，这 2 种破裂破坏模式是完全相关的。

基于所有失效模式的系统失效概率有或没有相关性使用方程式。式（29）和式（28）分别绘制在图 6 中，对应于每个单独失效模式的失效概率。可以看出，如果不考虑失效模式之间的相关性，系统失效的概率会被大大高估。这证明了在确定具有多种失效模式的受腐蚀钢管的系统失效概率时，需要考虑不同失效模式之间的相关性。

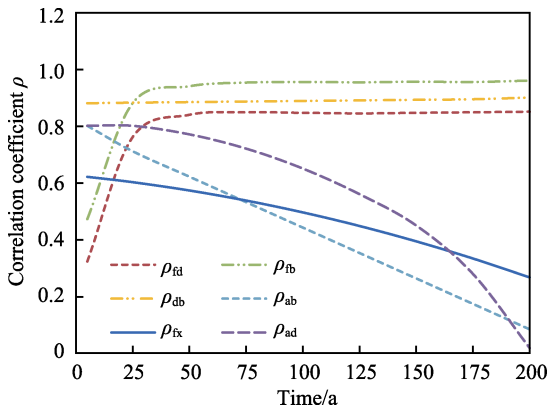


图 5　不同失效模式之间的相关性

Fig.5 Correlation among different failure modes

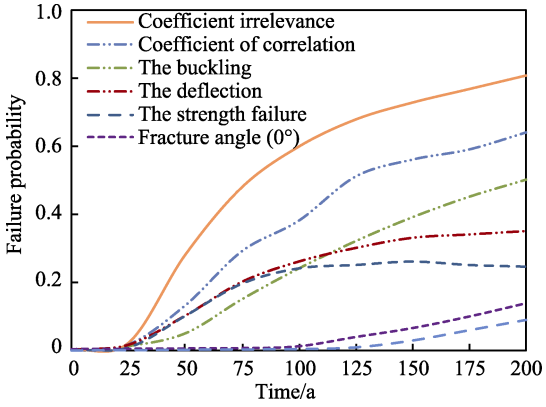


图 6　每种失效模式的失效概率和系统之间存在或不存在相关性的概率

Fig.6 Probability of failure for each failure mode and the system with and without correlation

4.2　敏感性分析

随机变量的统计量是可靠性分析的基础。由于一些随机变量缺乏完整的统计数据，需要进行敏感性分析，找出最具影响力的随机变量，以便对这些变量的随机性进行进一步的研究。在本文中，使用 Nowak 和 Collins 提出的概率灵敏度指数来证明每个随机变量对所有失效模式的失效概率的贡献。概率灵敏度指数[22]可表示为：

$$\alpha_i=\frac{-\dfrac{\partial G}{\partial X_i}\sigma(X_i)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n}\left[\dfrac{\partial G}{\partial X_k}\sigma(X_k)\right]^2}} \tag{30}$$

式中：X_i 为随机变量（$i=1, 2, \cdots, n$），n 为设计变量个数，$\sigma(X_i)$为随机变量 X_i 的标准差。根据表 1 所示的统计信息，计算并绘制出倾斜角为 30°时，裂缝的不同随机变量的概率敏感性指数，如图 7a 所示。当倾角为 0°时也有类似的变化趋势。对于埋地管道破裂，在 5 个随机变量中，只有管道厚度指数为负，其他变量为正，说明管道破裂的概率随着指数为正的变量的增加而增加，反之亦然。一般来说，在整个管道使用寿命中，只有系数 n 对失效概率的贡献大小持续增加，而其他系数的贡献大小则不断减小。

强度、挠度和屈曲的概率灵敏度指数见图 7b—d。对于强度破坏，如图 7b 所示，只有管壁厚度指数为负，其他均为正，这一点类似于断裂。在这 15 个变量中，乘常数 k、指数常数 n、内半径 R_i、内压 p 和管厚 d 对强度破坏概率的影响较大，其他变量对强度破坏概率的影响可以忽略不计。对于屈曲和挠度，除管材厚度外，钢的杨氏模量和土的反力模量均为负值，其余均为正值（图 7c、图 7d）。在所有变量中，

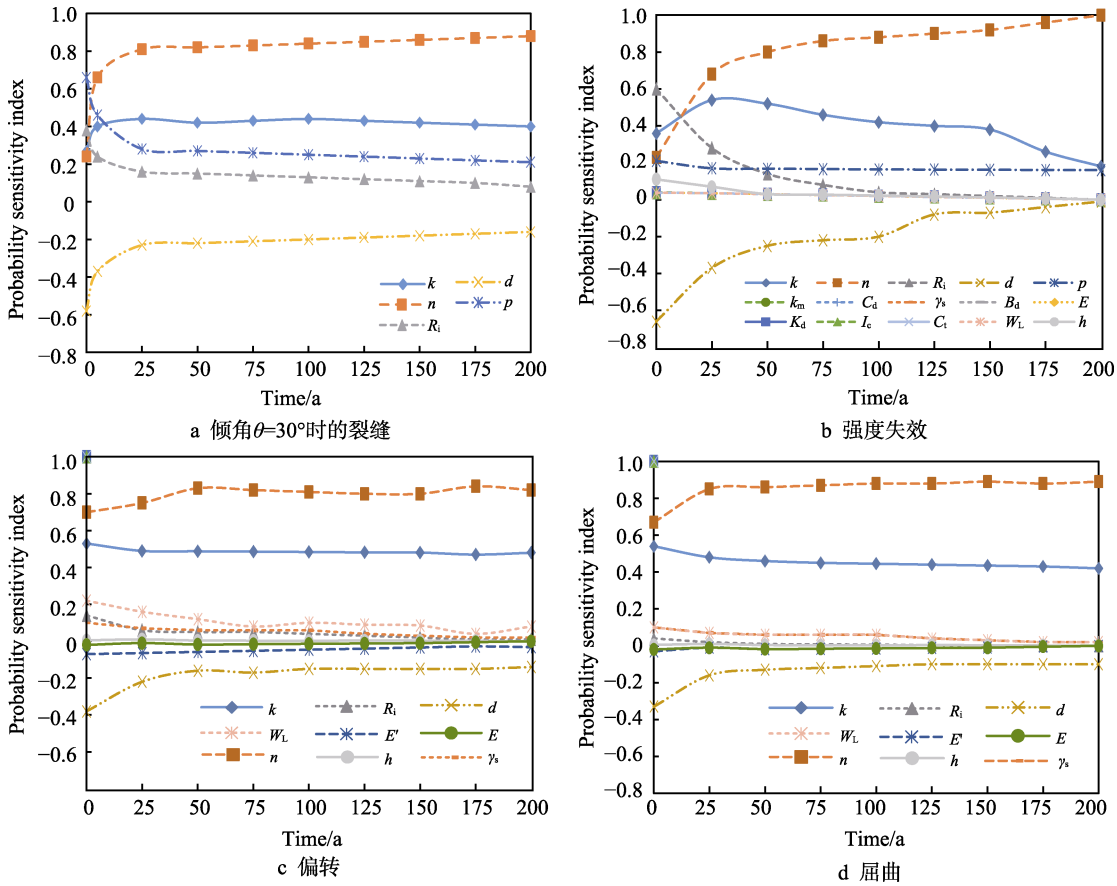


图 7　概率灵敏度指数随时间的变化

Fig.7 Change of probability sensitivity index with time: a) fracture with inclination angle $\theta = 30°$; b) strength failure; c) deflection; d) buckling

腐蚀模型中的乘数常数 k、指数常数 n 和管厚 d 对失效概率的影响较大，分别为正指数和负指数。腐蚀模型系数 k 和 n 产生的影响较为显著，这一点也与实际经验相符。对于管道的厚度，已知对于给定的管道直径，d 值越大，管道强度越大，失效概率越小。

概率灵敏度指数随时间的变化，从而得到了与时间相关的腐蚀管道损伤概率模型，得出了不同年限下腐蚀管道的概率灵敏度指数。研究结果显示，倾角、强度、挠度和屈曲的概率灵敏度指数径向腐蚀速率的分散性对管道失效概率具有双向扰动作用，其机理在于随机变量的分散性和腐蚀速率同时影响失效概率的波动，开始阶段随机变量分散性起主导作用，两者在管道失效概率达到一定程度会趋于一个平衡状态，之后腐蚀速率起主要支配作用。另外，管材的抗拉强度对腐蚀管道失效概率的影响较屈服强度的影响更大，可靠性分析时采用只考虑屈服强度的强度模型将存在一定的局限性，建议同时考虑管材抗拉强度的影响。

5　结论

1）不同时间点的过程相关性对每种失效模式的失效概率有较大的影响。管道几何形状、腐蚀速率、水压等，在不同时间点是相互关联的，以致载荷效应在时域上相互关联，从而影响腐蚀过程。

2）不同失效模式之间的相关性对系统失效概率估算结果具有较大的影响。不考虑失效模式相关性的埋地管道失效概率估算结果相比于考虑相关性的估算结果偏高。

3）腐蚀模型中的乘数常数 k、指数常数 n 和管厚 d 对失效概率的影响较大。k 和 n 对失效概率的概率灵敏度指数为正值，d 与失效概率间的概率灵敏度指数为负值。随管道使用年限的增加，n 与 d 有增大的趋势，n 值的上限在不同的失效模式下均可达到 0.8 以上，d 则可增至–0.2 以上。同时，k 逐年减小，其最低值可降至 0.2 左右。上述规律对不同的失效模式均适用。

参考文献：

[1] 张鹏, 彭杨. 考虑随机变量相关性的腐蚀管道失效概率[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1293-1301.
ZHANG Peng, PENG Yang. Failure Probability of Corroded Pipeline Considering Random Variables Correlation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1293-1301.

[2] 张杰, 张佩颖, 虞维超, 等. 引入失效数据的腐蚀管道结构可靠性评价方法[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(3): 185-192.
ZHANG Jie, ZHANG Pei-ying, YU Wei-chao, et al. Structural Reliability Evaluation Method of Corroded Pipelines with Failure Data[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(3): 185-192.

[3] 帅健, 许葵. 腐蚀管线失效概率的评定方法[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 86-89.
SHUAI Jian, XU Kui. Assessment Method for Failure Probability of Corroded Pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 86-89.

[4] AHAMMED M, MELCHERS R E. Probabilistic Analysis of Underground Pipelines Subject to Combined Stresses and corrosion[J]. Eng Struct, 1997, 19(12): 988-994.

[5] DE SILVA D, MOGLIA M, DAVIS P, et al. Condition Assessment to Estimate Failure Rates in Buried Metallic Pipelines[J]. J Water Supply Res Technol, 2006, 55(3): 179-191.

[6] MELCHERS R E. The Effect of Corrosion on the Structural Reliability of Steel Offshore Structures[J]. Corrosion Science, 2005, 47(10): 2391-2410.

[7] AWWA. Steel Pipe - A Guide for Design and Installation - Manual of Water Supply Practices[M]. Colorado: American Water Works Association, 2004.

[8] LI Q, SUN C, HUANG Z, et al. Reliability Analysis of Lan Chengyu Corroded Pipeline with Associated Defects[J]. Petroleum, 2015(1): 244-250.

[9] YU Xu-chao, LIANG Wei, ZHANG Lai-bin, et al. Dual-Tree Complex Wavelet Transform and SVD Based Acoustic Noise Reduction and Its Application in Leak Detection for Natural Gas Pipeline[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72-73: 266-285.

[10] FU Guo-yang, YANG Wei, LI Chun-qing. Stress Intensity Factors for Mixed Mode Fracture Induced by Inclined Cracks in Pipes under Axial Tension and Bending[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2017, 89: 100-109.

[11] ABDULLA M B, HERZALLAH R. Probabilistic Multiple Model Neural Network Based Leak Detection System: Experimental Study[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 36: 30-38.

[12] VOIGT C, STORM J, ABENDROTH M, et al. The Influence of the Measurement Parameters on the Crushing Strength of Reticulated Ceramic Foams[J]. J Mater Res, 2013, 28: 2288-2299.

[13] 封子艳, 南蓓蓓, 杨志刚, 等. 不同尺寸双腐蚀缺陷管道剩余强度研究[J]. 油气田环境保护, 2015, 25(3): 4-8, 72.
FENG Zi-yan, NAN Bei-bei, YANG Zhi-gang, et al. The Study on the Residual Strength of the Pipeline with Double Corrosion Defects in Different Sizes[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2015, 25(3): 4-8, 72.

[14] LAYOUNI M, HAMDI M S, TAHAR S. Detection and Sizing of Metal-Loss Defects in Oil and Gas Pipelines Using Pattern-Adapted Wavelets and Machine Learning[J]. Appl Soft Comput, 2017, 52: 247-261.

[15] RAJABIPOUR A, MELCHERS R E. A Numerical Study of Damage Caused by Combined Pitting Corrosion and Axial Stress in Steel Pipes[J]. Corros Sci, 2013, 76: 292-301.

[16] LIN Y C, DENG J, JIANG Y, et al. Effects of Initial δ

Phase on Hot Tensile Deformation Behaviors and Fracture Characteristics of a Typical Ni-Based Superalloy[J]. Materials Design, 2014, 55: 949-957.

[17] TEE K F, PESINIS K. Reliability Prediction for Corroding Natural Gas Pipelines[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 65: 91-105.

[18] 王勇, 李洋, 孙世斌, 等. 腐蚀缺陷管道剩余强度 ANSYS 有限元模拟可行性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(3): 12-16.
WANG Yong, LI Yang, SUN Shi-bin, et al. Feasibility of Finite Element Analysis on Residual Strength of Pipeline with Corrosion Defects[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(3): 12-16.

[19] CHEN Zhong, ZHAO Lian-wen. Application of Small and Medium Wave Analysis for Signal Singularity Detection[J]. Journal of Chongqing Normal University, 2004, 21(2): 15-17

[20] FU G Y, YANG W, LI C Q. Stress Intensity Factors for Mixed Mode Fracture Induced by Inclined Cracks in Pipes under Axial Tension and Bending[J]. Theor Appl Fract Mech, 2017, 89: 100-109.

[21] 张日向, 顾孜昌, 姜萌. 考虑双腐蚀缺陷影响的内压钢管有限元分析[J]. 钢结构, 2010, 25(2): 79-81.
ZHANG Ri-xiang, GU Zi-chang, JIANG Meng. Finite Element Analysis on Pressured Pipeline with Double Corrosion Defects[J]. Steel Construction, 2010, 25(2): 79-81.

[22] 张晓, 帅健. 基于 FITNET FFS 模型的腐蚀管道失效概率敏感性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(8): 80-85.
ZHANG Xiao, SHUAI Jian. Sensitivity Analysis on Failure Probability of Corroded Pipeline Based on FITNET FFS Model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(8): 80-85.

责任编辑：万长清

（上接第 201 页）

[7] WANG H C, SHEU H H, LU Chen-en, et al. Preparation of Corrosion-Resistant and Conductive Trivalent Cr-C Coatings on 304 Stainless Steel for Use as Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells by Electrodeposition[J]. Journal of Power Sources, 2015, 293: 475-483.

[8] YI Pei-yun, PENG Lin-fa, ZHOU Tao, et al. Cr-N-C Multilayer Film on 316L Stainless Steel as Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using Closed Field Unbalanced Magnetron Sputter Ion Plating[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(3): 1535-1543.

[9] JIN Jie, HE Zhen, ZHAO Xiao-hua. Effect of Al Content on the Corrosion Resistance and Conductivity of Metal Nitride Coating in the Cathode Environment of PEMFCs[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 245: 122739.

[10] ZHANG Dong-ming, DUAN Liang-tao, GUO Lu, et al. TiN-Coated Titanium as the Bipolar Plate for PEMFC by Multi-Arc Ion Plating[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(15): 9155-9161.

[11] PARK J H, BYUN D, LEE J K. Employment of Fluorine Doped Zinc Tin Oxide ($ZnSnO_x$:F) Coating Layer on Stainless Steel 316 for a Bipolar Plate for PEMFC[J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 128(1-2): 39-43.

[12] SONG Miao, GUO Jun-jie, YANG Ya-feng, et al. Fe_2Ti Interlayer for Improved Adhesion Strength and Corrosion Resistance of TiN Coating on Stainless Steel 316L[J]. Applied Surface Science, 2020, 504: 144483.

[13] GAO Ping-ping, XIE Zhi-yong, WU Xiao-bo, et al. Development of Ti Bipolar Plates with Carbon/PTFE/TiN Composites Coating for PEMFCs[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(45): 20947-20958.

[14] BOYER R R. An Overview on the Use of Titanium in the Aerospace Industry[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 213(1-2): 103-114.

[15] 李金龙, 周艳文, 滕越, 等. TC4 钛合金表面的多层素 CrN 涂层[J]. 辽宁科技大学学报, 2019, 42(4): 263-268.
LI Jin-long, ZHOU Yan-wen, TENG Yue, et al. Multilayer CrN Coatings on surface of TC4 Titanium Alloy[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2019, 42(4): 263-268.

[16] WANG He-li, SWEIKART M A, TURNER J A. Stainless Steel as Bipolar Plate Material for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells[J]. Journal of Power Sources, 2003, 115(2): 243-251.

[17] ZHANG Jian-min, XU Ke-wei, JI V. Dependence of Strain Energy on the Grain Orientations in an FCC-Polycrystalline Film on Rigid Substrate[J]. Applied Surface Science, 2002, 185(3-4): 177-182.

[18] GAUTIER C, MACHET J. Study of the Growth Mechanisms of Chromium Nitride Films Deposited by Vacuum ARC Evaporation[J]. Thin Solid Films, 1997, 295(1-2): 43-52.

[19] PELLEG J, ZEVIN L Z, LUNGO S, et al. Reactive-Sputter-Deposited TiN Films on Glass Substrates[J]. Thin Solid Films, 1991, 197(1-2): 117-128.

[20] 张大同. 扫描电镜与能谱仪分析技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2009.
ZHANG Da-tong. Scanning Electron Microscope and Energy Spectrometer Analysis Technology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2009.

[21] 门海泉, 周灵平, 刘新胜, 等. 双靶磁控溅射聚焦共沉积 AlN 薄膜生长速率研究[J]. 人工晶体学报, 2006, 35(5): 1141-1145, 1150.
MEN Hai-quan, ZHOU Ling-ping, LIU Xin-sheng, et al. Growth Rate of AlN Thin Films Deposited by Direct Current Dual Targets Magnetron Sputtering Co-Deposition[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2006, 35(5): 1141-1145, 1150.

[22] WANG Z B, HU H X, LIU C B, et al. The Effect of Fluoride Ions on the Corrosion Behavior of Pure Titanium in 0.05 M Sulfuric Acid[J]. Electrochimica Acta, 2014, 135: 526-535.

责任编辑：万长清