

带环向表面裂纹海洋管道的断裂计算与可靠性评估

李杰 秦太验

(中国农业大学 理学院, 北京 100083)

摘要 针对带环向表面裂纹海洋石油管道断裂可靠性问题,利用权函数方法,给出了计算裂纹前沿应力强度因子的积分表达式,进而导出了能满足工程精度要求的应力强度因子的实用计算公式。采用极限分析方法建立了带裂纹海洋石油管道断裂可靠性评估模型,给出了断裂失效概率和可靠度的计算公式。典型算例数值计算结果表明:应力强度因子随裂纹深度和长度的增大而增大,这与《应力强度因子手册》(科学出版社)的结果一致;当弯矩不变,裂纹深度和长度、管道壁厚和半径,及轴力为随机变量时,带裂纹海洋管道的可靠度随轴力均值的增大而减小。
关键词 海洋管道; 权函数法; 应力强度因子; 断裂可靠性

中图分类号 O 346.1; TE 973.1

文章编号 1007-4333(2006)04-0089-05

文献标识码 A

Fracture and reliability assessment on submarine pipelines with circumferential surface cracks

Li Jie, Qin Taiyan

(College of Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Using the weight function method, the fracture of a submarine pipeline with circumferential surface cracks is studied. A practical formula for evaluating the stress intensity factors is derived, which is important in ocean engineering. Based on the solutions of stress intensity factors and statistical models of uncertainties, a reliability assessment method for submarine pipelines with surface cracks is proposed and a computational formula for predicting the probability of fracture is given. Finally, a typical numerical example is presented to illustrate the proposed method. The results show that the calculated stress intensity factor value will augment as increases of the length and depth of the crack, and the conclusion is consistent with those from the existed references. Taking the length and depth of the cracks, the thickness and radius of the pipe, and the longitudinal stress as random variables, the reliability of the crack submarine pipe will be decreased as expanding of the mean of the longitudinal stress while the bending moment keeps constant.

Key words submarine pipeline; weight function method; stress intensity factor; reliability analysis

海底石油管线的可靠性直接影响海洋工程的发展和海洋生物的安全。石油管线在安装、渔业捕捞等人类海洋活动以及其他海洋事故中,难免会产生各种损伤和缺陷,如表面凹坑、微裂纹等;在生产过程中由于工作载荷等因素的影响,在缺陷局部产生应力集中,生成微裂纹和宏观裂纹,并导致裂纹扩展,最后使得管线失效破坏。因此,研究含裂纹海洋管道的断裂问题,以及对其进行可靠性评估,对海洋石油的发展和安全生产有现实意义。

关于海洋石油管线的断裂和可靠性研究国内外

已有文献报道。Croll^[1]给出了含有安装造成的缺陷的热变形海底管线的一种简化分析方法,并建议将其分析方法作为未来管线设计或现役管线强度评估的基础。Jiao^[2]提出了一种计算熔合焊接的最小断裂韧性的方法,利用现有的 Dn V 规范中的屈服及失效设计标准确定最大允许裂纹张开应力和最大疲劳损伤。Chen 等^[3]对具有焊接缺陷的海底管线的强度评估进行了研究,改进了美国 B31G 标准的局限性。Bai 等^[4]研究了带裂纹缺陷管线的断裂评估及安全因子的可靠性标准。Bjornoy 等^[5]对不同材

收稿日期: 2006-02-16

作者简介: 李杰,博士研究生;秦太验,教授,博士生导师,通讯作者,主要从事断裂力学、海洋工程的研究, E-mail: tyqin@cau.edu.cn

料及具有不同尺寸的凹陷、切痕及同时具有凹陷和切痕的管线进行试验,试验结果可用于研究受损管线的残余强度及发展和修正有关的标准。Pal^[6]采用美国结构研究与分析公司的 COSMOS/M 壳单元有限元软件对带有干性损伤的海底管线进行了用于强度评估的应力计算和分析。Shen^[7]使用权函数法研究了带半椭圆表面裂纹有限厚板的断裂问题,给出了应力强度因子计算方法。Wang^[8]用与文献[7]类似的方法研究了带轴向表面裂纹薄壁管的应力强度因子计算方法。但是,对带环向表面裂纹海洋管道的研究较少,在安全性评估方面不够全面,实用性较差。本研究针对带裂纹海洋管道,以环向半椭圆表面裂纹为假设模型,采用线弹性断裂力学方法和有限元,结合权函数理论,构造简单实用的应力强度因子计算公式。在此基础上,采用极限分析方法建立带裂纹海洋管道可靠性评估模型,以期为海洋石油管线的可靠性评估提供理论数据。

1 应力强度因子的计算公式

考虑带环向半椭圆表面裂纹管道(图1),其轴向应力对裂纹尖端的应力强度因子影响很大,而环

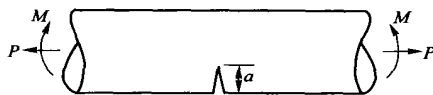


图1 带环向外表面裂纹管道示意图
Fig.1 Pipeline with a circumferential external surface crack

向应力影响很小。因此,对于带环向半椭圆表面裂纹的管道,只考虑轴力和弯矩载荷,不考虑内压载荷。由于含半椭圆环向外表面裂纹,其最大应力强度因子发生在裂纹前沿表面点和最深点,故这里只讨论这两点的应力强度因子。由权函数理论,裂纹前沿最深点 A 或表面点 B 的应力强度因子可由加权积分求得

$$K = \int_0^a \sigma(x) m(a, x) dx \quad (1)$$

其中: $\sigma(x)$ 为无裂纹体中假象位置处的“裂纹面应力”; $m(a, x)$ 为权函数; a 为裂纹深度。对外表面半椭圆裂纹,裂纹前沿最深点 A (图2)的权函数可表示为^[7]

$$m_A(a, x) = \frac{2}{\sqrt{2(a-x)}} \left[1 + M_{A1} \left(1 - \frac{x}{a} \right)^{1/2} + M_{A2} \left(1 - \frac{x}{a} \right) + M_{A3} \left(1 - \frac{x}{a} \right)^{3/2} \right] \quad (2)$$

对于裂纹前沿表面点 B 的权函数可表示为^[7]

$$m_B(a, x) = \frac{2}{\sqrt{x}} \left[1 + M_{B1} \left(\frac{x}{a} \right)^{1/2} + M_{B2} \left(\frac{x}{a} \right) + M_{B3} \left(\frac{x}{a} \right)^{3/2} \right] \quad (3)$$

其中 M_{A1} 、 M_{A2} 和 M_{A3} , 以及 M_{B1} 、 M_{B2} 和 M_{B3} 为待定常数,可由 2 个参考应力强度因子和 1 个第 3 个条件得到。采用均匀和线性拉伸载荷时的应力强度因子值为参考应力强度因子。由权函数的性质,对于裂纹前沿最深点 A,第 3 个条件为: $x=0$ 处,权函数为 0;对于裂纹表面点 B 第 3 个条件为:在 $x=a$ 处,权函数为 0。

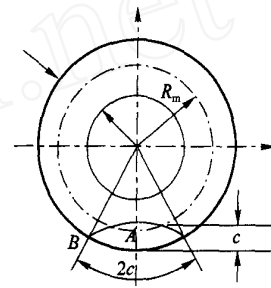


图2 环向外表面裂纹管道横截面
Fig.2 Section of pipeline with a circumferential external surface crack

轴力和弯矩共同作用时,设裂纹位于受拉的一侧,对于薄壁管道,管道内的应力为

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_m \quad (4)$$

其中: σ_t 为轴力产生的应力, $\sigma_t = \frac{P}{2R_m t}$; σ_m 为弯矩产生的应力, $\sigma_m = \frac{M}{R_m^3 t} (R - x)$; P 为轴力; M 为弯矩; R_m 和 R 分别为管道平均半径和外半径; t 为管道壁厚; x 为裂纹深度方向坐标。

由式(1)可得裂纹前沿最深点 A 和表面点 B 的应力强度因子

$$K^A = K_t^A + K_m^A \quad (5)$$

$$K^B = K_t^B + K_m^B \quad (6)$$

其中: K_t^A 和 K_m^A 分别为轴力和弯矩在最深点产生的应力强度因子

$$K_t^A = \frac{\sqrt{2} a P}{12 \cdot 2 R_m t} (12 + 6 M_{A1} + 4 M_{A2} + 3 M_{A3})$$

$$K_m^A = \frac{\sqrt{2} a M}{60 \cdot 2 R_m^3 t} [5 R (12 + 6 M_{A1} + 4 M_{A2} + 3 M_{A3}) - a (40 + 15 M_{A1} + 8 M_{A2} + 5 M_{A3})]$$

K_t^B 和 K_m^B 分别为轴力和弯矩在表面点产生的应力

强度因子

$$K_t^B = \frac{\sqrt{aP}}{3^2 R_m t} (12 + 6 M_{B1} + 4 M_{B2} + 3 M_{B3})$$

$$K_m^B = \frac{\sqrt{aM}}{15^2 R_m^3 t} [5 R (12 + 6 M_{B1} + 4 M_{B2} + 3 M_{B3}) - a(20 + 15 M_{B1} + 12 M_{B2} + 10 M_{B3})]$$

利用文献[9]应力强度因子的数值结果,可将式(5)和(6)简化为

$$K_t^A = \frac{t \sqrt{a}}{\sqrt{Q}} Y^t + \frac{m \sqrt{a}}{\sqrt{Q}} Y^m \quad (7)$$

$$K^B = \frac{t \sqrt{a}}{\sqrt{Q}} F^t + \frac{m \sqrt{a}}{\sqrt{Q}} F^m \quad (8)$$

其中: Q 为椭圆修正系数, $Q = 1 + 1.464 (a/c)^{1.65}$ 。
 Y^t 、 Y^m 、 F^t 和 F^m 分别为 A 和 B 点轴力和弯矩的几何影响因子,由式(9)和(10)决定

$$\begin{cases} Y^t = A_0 + A_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + A_2 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \\ Y^m = B_0 + B_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + B_2 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} F^t = \sqrt{\left[C_0 + C_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + C_2 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right]} \\ F^m = \sqrt{\left[D_0 + D_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + D_2 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right]} \end{cases} \quad (10)$$

式中: a/c ; 其他各因子为

$$\begin{cases} A_0 = 1.1911 - 0.1930 \left(\frac{a}{c}\right)^2 - 0.0009 \left(\frac{a}{c}\right)^3 \\ A_1 = 1.1137 - 1.5046 \left(\frac{a}{c}\right)^2 \\ A_2 = -0.5948 - 0.0901 \left(\frac{a}{c}\right)^2 + \frac{1.0}{3.766 + 2.09 \left(\frac{a}{c}\right)^2} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} B_0 = 1.1556 - 0.1678 \left(\frac{a}{c}\right)^2 - 0.0032 \left(\frac{a}{c}\right)^3 \\ B_1 = 1.139 - 1.6334 \left(\frac{a}{c}\right)^2 \\ B_2 = -0.938 + 0.0754 \left(\frac{a}{c}\right)^2 + \frac{1.0}{2.097 + 1.96 \left(\frac{a}{c}\right)^2} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} C_0 = 1.3732 - 0.4896 \left(\frac{a}{c}\right)^2 \\ C_1 = 4.4110 - 7.7425 \left(\frac{a}{c}\right)^2 + 4.1226 \left(\frac{a}{c}\right)^3 + 2.0262 \left(\frac{a}{c}\right)^4 - 3.1224 \left(\frac{a}{c}\right)^5 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} C_2 = -1.8651 + 3.9768 \left(\frac{a}{c}\right)^2 - 2.1343 \left(\frac{a}{c}\right)^3 \\ D_0 = 1.3395 - 0.4603 \left(\frac{a}{c}\right)^2 \\ D_1 = 4.3917 - 7.6679 \left(\frac{a}{c}\right)^2 + 4.0665 \left(\frac{a}{c}\right)^3 + 2.0094 \left(\frac{a}{c}\right)^4 - 3.0637 \left(\frac{a}{c}\right)^5 \\ D_2 = -2.0502 + 4.2956 \left(\frac{a}{c}\right)^2 - 2.3158 \left(\frac{a}{c}\right)^3 \end{cases} \quad (14)$$

2 应力强度因子的数值结果

设管道受轴力或弯矩作用,当管道上有一长度

为 $2c$, 深度为 a 的环向表面裂纹时,最大应力强度因子发生在裂纹最深点 A 或表面点 B 处,表 1 和 2

表 1 受轴力作用环向外表面裂纹应力强度因子计算值

Table 1 Dimensionless stress intensity factors of a circumferential external surface crack under longitudinal force

| 位置 | 裂纹深度 a / 管道壁厚 t | 出处 | 裂纹深度 a /裂纹半长 c | | | |
|-------|------------------------|-------|--------------------|-------|-------|-------|
| | | | 0.2 | 0.6 | 0.8 | 1.0 |
| 最深点 A | 0.2 | 本文 | 1.186 | 1.097 | 1.057 | 1.020 |
| | | 文献[9] | | 1.097 | 1.057 | 1.020 |
| | 0.5 | 本文 | 1.341 | 1.167 | 1.101 | 1.049 |
| | | 文献[9] | | 1.167 | 1.101 | 1.049 |
| | 0.8 | 本文 | 1.552 | 1.247 | 1.159 | 1.116 |
| | | 文献[9] | | 1.247 | 1.144 | 1.074 |
| 表面点 B | 0.2 | 本文 | 0.626 | 0.936 | 1.045 | 1.154 |
| | | 文献[9] | | 0.930 | 1.051 | 1.152 |
| | 0.5 | 本文 | 0.870 | 1.070 | 1.151 | 1.235 |
| | | 文献[9] | | 1.075 | 1.156 | 1.233 |
| | 0.8 | 本文 | 1.200 | 1.288 | 1.336 | 1.379 |
| | | 文献[9] | | 1.290 | 1.335 | 1.380 |

注:管道壁厚 t 与管道平均半径 R_m 比值为 0.1;泊松比 $\nu = 0.3$;应力强度因子 $Y^t = (K_t / (t \sqrt{a})) \sqrt{Q}$; Q 为椭圆形状修正系数, $Q = 1 + 1.464 (a/c)^{1.65}$ 。表 2 同。

表 2 受弯矩作用环向外表面裂纹应力强度因子计算值

Table 2 Dimensionless stress intensity factors of a circumferential external surface crack under bending moment

| 位置 | 裂纹深度 a / 管道壁厚 t | 出处 | 裂纹深度 a /裂纹半长 c | | | |
|-------|------------------------|-------|--------------------|-------|-------|-------|
| | | | 0.2 | 0.6 | 0.8 | 1.0 |
| 最深点 A | 0.2 | 本文 | 1.155 | 1.071 | 1.032 | 0.995 |
| | | 文献[9] | | 1.071 | 1.032 | 0.995 |
| | 0.5 | 本文 | 1.304 | 1.167 | 1.064 | 1.049 |
| | | 文献[9] | | 1.130 | 1.064 | 1.012 |
| | 0.8 | 本文 | 1.481 | 1.188 | 1.114 | 1.090 |
| | | 文献[9] | | 1.188 | 1.088 | 1.019 |
| 表面点 B | 0.2 | 本文 | 0.613 | 0.919 | 1.026 | 1.133 |
| | | 文献[9] | | 0.913 | 1.032 | 1.131 |
| | 0.5 | 本文 | 0.853 | 1.056 | 1.131 | 1.214 |
| | | 文献[9] | | 1.051 | 1.136 | 1.212 |
| | 0.8 | 本文 | 1.163 | 1.255 | 1.306 | 1.347 |
| | | 文献[9] | | 1.257 | 1.303 | 1.348 |

分别给出了用式(5)和(6)求得的不同裂纹尺寸的应力强度因子,与文献[9]相比两者计算结果基本一致:应力强度因子随裂纹宽度和深度的增大而增大。

3 断裂可靠性评估方法

以断裂分析结果为基础,基于概率统计理论,采用极限分析等方法进行断裂可靠性分析。为进行结构的可靠性评估,需计算管道系统的承载能力。估算承载能力的方法都是基于各种失效准则的定义而建立的。基于 ASME XI IWB-3650 有 3 种基本失效模式:裂纹初始扩展、弹塑性非稳定扩展及极限载荷分析中的有效截面失效。这里只考虑裂纹初始扩展中的脆性断裂范围,管道失效准则为:

$$K_{IC} - K_I < 0 \quad (15)$$

其中 K_{IC} 为断裂韧性参数。

考虑随机载荷作用下机械与几何特性不确定的裂纹管道。定义有 N 个随机变量的矢量 X , 其分量 X_1, X_2, \dots, X_N 代表系统和载荷参数中的不确定量。对于裂纹管道这些随机参数可能是:裂纹深度 a 和裂纹半长 c 、管道半径与壁厚比 (R/t)、弹性模量 E 、基本强度参数 σ_y 和 σ_u 、断裂韧性参数 K_{IC} 或 J_{IC} 、材料常数 C 或 m , 以及作用载荷等。部分或所有这些变量可以用随机变量模拟。极限状态函数为

$$g(X) = K_{IC} - K_I \quad (16)$$

其中 $X = \{J_{IC}, \sigma_y, a, c, \dots\}$ 为随机变量矢量。对于带环向表面裂纹管道,应力强度因子可由式(12)和(13)决定。 $g(X) = 0$ 为极限状态,当 $g(X) > 0$ 时,系统处于安全状态,当 $g(X) < 0$ 时,系统失效。则含环向裂纹管道的失效概率为

$$P_F(t) = P[g(X) < 0] \quad (17)$$

可靠度为

$$R(t) = P[g(X) > 0] = 1 - P[g(X) < 0] \quad (18)$$

在可靠性分析中,由于对多数随机变量很难准确地由实验或现场数据获取真实的摄卒分布函数,因此必须在部分统计数据的基础上,或直接地对概率分布函数提出假设。如果这种假设不恰当,必将导致可靠性分析的误差。随机变量的各类数字特征比较容易从统计数据中获得,因此在可靠性分析中具有重要的意义;但一个数字特征仅反映随机规律某一侧面的特征,因此,仅仅选择个别数字特征描述随机变量也将导致可靠性分析的误差。现行可靠性分析法大多假设随机变量服从正态分布。采用正态

分布假设,除具有一定物理意义外,简便的概率运算(线性运算)是一个重要因素。正态分布为一种二参数分布,这 2 个参数分别对应随机变量的均值和方差。正态分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (19)$$

式中: μ 和 σ^2 分别为随机变量的均值和方差。假定极限状态函数 $g(X)$ 服从正态分布,则带环向裂纹管道的可靠度为

$$R(t) = 1 - P[g(X) < 0] = 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_g}{\sigma_g}\right) \quad (20)$$

其中: μ_g 和 σ_g^2 分别为 $g(X)$ 的均值和方差; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du \quad (21)$$

状态函数 $g(X)$ 的均值和方差按式(22)和(23)计算

$$\mu_g = (g)_\mu + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial^2 g}{\partial X_i^2} \right] \mu_i^2 \quad (22)$$

$$\sigma_g^2 = (g)_\mu^2 + \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 + g \frac{\partial^2 g}{\partial X_i^2} \right] \mu_i^2 - \mu_g^2 \quad (23)$$

式中: σ_i^2 为各随机变量 X_i 的方差; $\Phi(\cdot)$ 为函数在点 $X_1 = \mu_1, X_2 = \mu_2, \dots, X_n = \mu_n$ 的值; μ_i 为 X_i 的均值。

带环向裂纹海洋管道断裂可靠度计算过程为:

1) 确定各基本随机变量(内压 p 、轴力 P 、弯矩 M 、裂纹深度、材料断裂韧性参数 K_{IC} 或 J_{IC}) 的均值和均方差; 2) 确定状态函数 $g(X)$ 的均值 μ_g 和方差 σ_g^2 ; 3) 计算可靠度 $R(t)$ 。

4 可靠性评估算例

评价一批钢管的可靠性。断裂强度因子 $K_{IC} = 126.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$, 管道尺寸 $\phi 720 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$, $\sigma_s = 413.7 \text{ MPa}$, 最高试验压力为 90% 的规定的最低屈服极限,并设这一压力为正态分布,钢管管径及壁厚也符合正态分布,表面裂纹长度和深度的概率符合正态分布。

为便于分析,只考虑的不确定因素为管道尺寸、裂纹尺寸、及承受的载荷。假定管径及壁厚、裂纹长度、表面裂纹深度及载荷为正态分布;材料常数取为

一确定值,用 Monte-Carlo 法随机抽取若干组数据,采用计算机产生若干组随机数,按其分布形式得出

随机变量的若干组数据,进行可靠性评估计算。计算结果见表3。

表3 环向表面裂纹各随机变量的统计值及管道可靠度

Table 3 Statistic values of random variables and probability for circumferential surface crack

| 统计项 | 管径/mm | 壁厚/mm | 裂纹深度/mm | 裂纹长度/mm | 统计项 | 轴力/kN | | | |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 均值 | 359.100 | 8.010 | 3.225 | 13.105 | 均值 | 13 006 | 13 897 | 14 374 | 15 080 |
| 方差 | 0.00 ² | 0.00 ² | 0.27 ² | 1.22 ² | 方差 | 98.34 ² | 134.60 ² | 347.50 ² | 120.30 ² |
| 弯矩 | 200 kN·m | | | | 可靠度 | 0.996 | 0.805 | 0.494 | 0.109 |

5 结束语

本研究针对带环向表面裂纹的海洋管道,利用权函数方法给出了简单实用的应力强度因子计算公式。在此基础上,基于概率统计理论,采用极限分析等方法,提出了海洋管道的断裂可靠性分析方法,给出了断裂失效概率和可靠度的计算公式。这些方法为海洋管道的断裂计算和可靠性评估提供了一定的理论依据。

1) 对带有环向外表面裂纹的海洋管道,计算结果表明,应力强度因子随着裂纹深度和长度的增大而增大,同文献[9]结果一致。与传统的有限元和边界元方法相比,此方法更简单、实用。

2) 基于断裂失效准则和概率统计理论,构造了带裂纹海洋管道的断裂失效概率和可靠度评估模型。算例结果表明,可靠度对轴力比较敏感,随着轴力均值的增大而减小。

参 考 文 献

[1] Croll J G A. Simplified analysis of imperfect thermally buckled subsea pipelines[J]. Int J Offshore and Polar Engineering, 1998, 8(4): 283-291

[2] Jiao G Y. Minimum fracture toughness calculation for fusion weld offshore structures[J]. Third International Offshore and Polar Engineering Conference, 1993(2): 211-

215

[3] Chen M J, Dong G, Jakobsen R A. Assessment of pipeline girth weld defects[J]. 10th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2000(2): 263-274

[4] Bai Y, Song R. Fracture assessment of dented pipes with cracks and reliability-based calibration of safety factors[J]. Int J Pressure Vessels and Piping, 1997, 74: 221-229

[5] Bjornoy O H, Rengard O, Fredheim S, et al. Residual strength of dented pipelines, DNV test results[J]. 10th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2000(2): 182-188

[6] Pal B, Salpekar V Y. Stress analysis of damaged submarine pipeline using finite element method[J]. 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, 1999(2): 153-159

[7] Shen G, Glinka G. Weight function for a surface semi-elliptical crack in a finite thickness plate[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1991, 15(3): 247-255

[8] Wang X, Lambert S B. Stress intensity factors and weight functions for longitudinal semi-elliptical surface cracks in thin pipes[J]. Int J Pres Ves Piping, 1996, 65: 75-87

[9] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983