

文章编号:1000-582X(2002)07-0133-04

天然气管道的疲劳可靠寿命计算*

冯贤桂

(重庆大学 资环学院, 重庆 400044)

摘要:天然气管道在制造过程中,由于焊接工艺会产生各种缺陷及裂纹。在天然气波动压力作用下,裂纹会发生疲劳扩展,导致管道破裂及失效,其中以内表面裂纹的影响较为严重。文章研究了天然气管道中的内表面裂纹沿管道径向扩展的问题,计算了含裂纹管道的疲劳寿命。另一方面考虑到裂纹尺寸、天然气压力及材料性质等参量都是具有不确定性的随机变量,因此还引入可靠性计算方法,通过分析计算,确定了天然气管道的疲劳可靠寿命。研究结果对天然气管道的设计、运行及检修有一定工程实用价值。

关键词:管道;裂纹扩展;疲劳可靠寿命

中图分类号:0346.1

文献标识码:A

工业生产中的各种压力管道,担负着气相、液相介质的输送任务。压力管道由于制造、安装中的各种原因,焊缝中往往会含有许多裂纹及缺陷。这些裂纹以及可以简化为裂纹处理的平面缺陷(未熔合、咬边、未焊透等),严重地影响着压力管道的正常使用及工作寿命。

由于压力管道中介质的压力波动,导致管道工作应力的变化,在交变应力作用下,裂纹有可能产生扩展,因此计算含裂纹压力管道的疲劳寿命有重要的工程意义。某维尼纶厂乙炔车间的天然气管道,在检修过程中通过X射线对焊缝进行探伤时,发现焊缝中存在多处裂纹,其中以纵焊缝上的纵向内表面裂纹对管道的危害最大。文章利用断裂力学方法来计算天然气管道的疲劳寿命,这对管道的使用与维修十分重要。天然气管道尺寸为 $\phi 315\text{mm} \times 8\text{mm}$,材料为20g钢,工作温度为常温,天然气经过脱硫处理后,硫化氢(H_2S)含量很低,因此计算中不考虑蠕变和应力腐蚀。

1 基本公式

利用断裂力学方法计算表面裂纹尖端的应力强度因子,以及裂纹在亚临界阶段扩展过程中的疲劳寿命。

1.1 疲劳裂纹扩展公式

裂纹在交变应力作用下的扩展速度,与构件中的应力、裂纹尺寸、材料性能等因素有关。疲劳裂纹扩展

速度的表达式有多种形式,其中Paris提出的公式简洁、与实验吻合较好,在工程中应用广泛。Paris公式如下^[1]

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (1)$$

式中 $\frac{da}{dN}$ 为裂纹扩展速度, $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ 为裂纹尖端应力强度因子幅度, A 和 m 为材料常数,可由试验确定。

采用20g钢管的焊板来制作紧凑拉伸CT试件,在常温、大气环境下,应力比 $R = 0.1$,按照GB6398-86《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》,由实验测得了20g钢焊缝的裂纹扩展速率

$$\frac{da}{dN} = 1.44 \times 10^{-13} (\Delta K)^{3.72} \quad (2)$$

式中 $\frac{da}{dN}$ 的单位为 mm/cycle , ΔK 的单位为 $\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ 。

1.2 表面裂纹应力强度因子

天然气管道内表面焊缝上的纵向表面裂纹可简化为长为 $2c$, 深度为 a 的半椭圆形裂纹(图1)。工作应力为环向应力,因此在交变应力作用下,纵向表面裂纹最危险。

表面裂纹尖端任一点的应力强度因子可按式计算^[2]

* 收稿日期:2002-01-10

作者简介:冯贤桂(1946-),男,武汉市人,重庆大学副教授,主要从事固体力学研究。

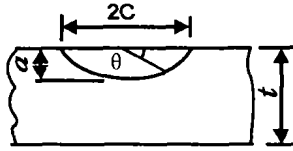


图1 表面裂纹

$$K_I = \frac{F}{\phi} \sigma \sqrt{\pi a} (\sin^2 \theta + \frac{a^2}{c^2} \cos^2 \theta)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

式中 a 为裂纹深度, θ 为裂纹尖端上的点所处的角度, σ 为管道环向工作应力, F 为形状因子, ϕ 为第 2 类完全椭圆积分, 计算式为

$$F = 1.10 + 5.2 \times (0.5)^{5\frac{a}{c}} \times \left(\frac{a}{t}\right)^{1.8+\frac{a}{c}} \quad (4)$$

$$\phi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(1 - \frac{c^2 - a^2}{c^2} \sin^2 \theta\right)^{\frac{1}{2}} d\theta \approx \left[1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中 t 为管道壁厚, c 为裂纹半长。

天然气管道中气体压力变化幅度 Δp 引起的环向工作应力变化幅度为

$$\Delta \sigma = \frac{\Delta p D_i}{2t} \quad (6)$$

式中 $D_i = D - 2t$, 为管道内径。

用 Paris 公式计算疲劳寿命时, 裂纹尖端应力强度因子应取最大值。表面裂纹短半轴端点即 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 处, 应力强度因子最大, 由式(3)、式(6) 可得应力强度因子变化幅度

$$\Delta K = \frac{\Delta p D_i}{2t} \frac{F}{\phi} \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

由 X 射线探伤结果, 危险表面裂纹尺寸为 $2c = 28 \text{ mm}$, $a = 2.5 \text{ mm}$ 。管道壁厚 $t = 8 \text{ mm}$, 内径 $D_i = 299 \text{ mm}$ 。天然气管道工作压力 $p = 3.5 \text{ MPa}$, 在实际运行中, 最低压力可取为零, 即气体压力在 $0 \sim 3.5 \text{ MPa}$ 间变化, 故 $\Delta p = 3.5 \text{ MPa}$, 由式(4)、式(5) 及式(7) 可计算得 $\Delta K = 7.68 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 。

20 g 钢疲劳裂纹扩展的应力强度因子门槛值 $\Delta K_{th} = 6.68 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, 可见应力强度因子幅值 $\Delta K > \Delta K_{th}$, 天然气管道中的表面裂纹会发生亚临界扩展。

2 天然气管道疲劳寿命计算

2.1 疲劳寿命的常规计算

利用 Paris 公式可算得裂纹亚临界扩展阶段的疲劳寿命, 由式(1) 可得

$$dN = \frac{da}{A(\Delta K)^m}$$

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{A(\Delta K)^m} \quad (8)$$

式中 a_0 为初始裂纹深度尺寸, a_c 为临界裂纹尺寸, 由式(7), ΔK 可改写如下

$$\Delta K = \Delta \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

式中 $Y = \frac{F}{\phi}$, 按式(4)、式(5) 计算。

对于表面半椭圆裂纹, 形状因子 Y 与裂纹尺寸 a 有关, 式(8) 不易直接积分求得疲劳寿命 N 。我们可将裂纹从 a_0 扩展到 a_c 的过程划分为很多微小的裂纹扩展过程 $\Delta a = a_{i+1} - a_i$, 当裂纹从 a_i 扩展到 a_{i+1} 时, 可认为形状因子 Y_i 为常数, 相应的疲劳寿命 N_i 即可由式(8) 直接积分得到, 积分限分别取 a_i 与 a_{i+1} , 当 $m \neq 2$ 时可得

$$N_i = \frac{2}{(m-2)A\pi^{\frac{m}{2}} Y_i^m (\Delta \sigma)^m} (a_{i+1}^{1-\frac{m}{2}} - a_i^{1-\frac{m}{2}}) \quad (10)$$

从 a_0 扩展到 a_c 的疲劳寿命总值

$$N = \sum N_i \quad (11)$$

式(10) 中 $Y_i = \frac{F_i}{\phi_i}$, 应取裂纹尺寸 a_i 、 c_i 接式(4)、式(5) 计算。

研究资料表明, 对于碳素钢及低合金钢, 半椭圆形表面裂纹在扩展过程中, 其形状基本上保持不变。当裂纹为 $\frac{a}{c} = 0.8 \sim 1.0$ 的均衡裂纹时, 裂纹尺寸 c 与 a 几乎保持同一比例, 同时沿裂纹长度及深度方向扩展。对于 $\frac{a}{c} < 0.8$ 的浅长裂纹, 在裂纹扩展的初期, a 沿深度方向的扩展要快于 c 沿长度方向的扩展, 但在裂纹扩展的后期, c 与 a 近似地保持一定的比例同时扩展^[3]。因而对于浅长裂纹, 我们可近似地认为在裂纹亚临界扩展过程中, a 与 c 按同一比例沿深度和长度方向扩展。计算结果表明, 这种近似处理方法在工程上是偏于安全的。在天然气管道计算中取 $\frac{a}{c} = \frac{2.5}{14} = 0.1786$, 裂纹沿深度方向和长度方向扩展时, 近似地保持此值不变。 $a_{i+1} = a_i + \Delta a$, 取增量 $\Delta a = 0.3 \text{ mm}$, 计算初值为初始裂纹尺寸 $a_0 = 2.5 \text{ mm}$, 计算终值为临界裂纹尺寸 a_c , 可以取为管道壁厚的 70%, 即 $a_c = 5.5 \text{ mm}$ 。由式(6) 算得交变应力幅值 $\Delta \sigma = 65.4 \text{ MPa}$, 再利用式(10) 及式(11) 便可求得天然气管道的疲劳寿命 $N = 7884$ 。

天然气管道气体压力波动幅度 $\Delta p = 3.5 \text{ MPa}$, 每年变化 80 次, 取疲劳安全系数 $n = 20$, 则管道的安全使用年限为 $\frac{7884}{80 \times 20} = 5 \text{ a}$ 。

2.2 疲劳寿命的可靠性计算

以上计算过程中,认为影响裂纹扩展速度的交变应力幅度 $\Delta\sigma$ 、裂纹尺寸 a 、材料常数 A 等,都是具有确定数值的量。实际上这些几何参量和物理参量并不是确定不变的量,而是服从某一统计分布规律的随机变量,所以疲劳裂纹的扩展不是一个确定性过程,而是随机过程。

为了提高工程问题的分析精度,有必要引入可靠性计算方法,将概率统计理论用于构件的疲劳寿命计算。对天然气管道,也就是用概率断裂力学方法,将裂纹尺寸、管道交变应力幅度、材料物理性能等都作为随机变量,计算管道对应于某一可靠度的剩余寿命,也称为疲劳可靠寿命。

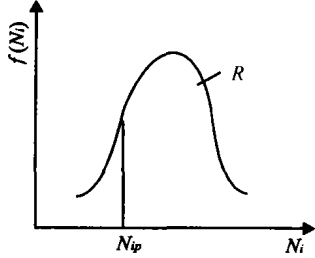


图 2 疲劳可靠度 k

由于 a_0 、 $\Delta\sigma$ 、 A 等为随机变量,由式(10)可知,疲劳寿命 N_i 为多维随机变量。若已知 N_i 的分布函数,则对应于疲劳寿命 N_p 的疲劳可靠度 R 可以表示为^[4]

$$R = \int_{N_p}^{\infty} f(N_i) dN_i \quad (12)$$

$f(N_i)$ 为随机变量 N_i 的概率密度函数,可靠度 R 为图 2 中 N_p 右的曲线与横轴所围的面积。

式(10)中,初始裂纹尺寸 a_0 为随机变量,其余 a_i 由于是人为控制的计算尺寸,可作为普通变量。形状因子 Y_i 近似地认为是普通变量, $\Delta\sigma$ 为随机变量,材料性能参数 A 与 m ,根据已有的研究表明, m 可看作常量, A 为随机变量^[5]。所以疲劳寿命 N_i 是随机变量 a_0 、 $\Delta\sigma$ 、 A

的函数,设 $B_i = \frac{2}{(m-2)\pi^{\frac{m}{2}} Y_i^m}$,将式(10)两边取对数

$$\begin{aligned} \lg N_i &= \lg B_i - \lg A - m \lg \Delta\sigma + \\ & (1 - \frac{m}{2}) \lg a_i + \lg(1 - \beta_i^{1-\frac{m}{2}}) \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\beta_i = \frac{a_{i+1}}{a_i}$ 可视为普通变量。

设 x_1, x_2, \dots, x_n 为相互独立的随机变量,则函数 $y = f(x_1, x_1, \dots, x_n)$ 为多维随机变量, y 的均值与标准差可按式计算^[6]

$$\begin{aligned} \mu_y &= f(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}) \\ \sigma_y &= \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (14)$$

式中 μ_{x_i}, σ_{x_i} 为随机变量 x_i 的均值与标准差。

根据天然气管道焊缝表面裂纹探伤资料分析,以及乙炔车间管道操作压力的记录统计,经过统计分析和 $K-s$ 检验,初始裂纹尺寸 a_0 和管道交变应力幅度 $\Delta\sigma$ 都服从对数正态分布

$$\lg a_0 \sim N(0.3875, 0.12^2)$$

$$\lg \Delta\sigma \sim N(1.8231, 0.09^2)$$

在 20 g 焊板 CT 试件疲劳试验中,对材料常数 A 的样本值作统计计算及 $k-s$ 检验, A 亦服从对数正态分布。

$$\lg A \sim N(-12.78, 0.23^2)$$

由于 $a_0, \Delta\sigma, A$ 都服从对数正态分布,根据随机变量函数的分布理论,由式(13)可知,疲劳寿命 N_i 也服从对数正态分布。利用式(14)可得到 N_i 的均值与标准差

$i = 0$ 时,

$$\begin{aligned} \mu_{N_0} &= \lg B_0 - \mu_A - m \mu_{\Delta\sigma} + \left(1 - \frac{m}{2}\right) \mu_{a_0} + \\ & \lg(1 - \beta_0^{1-\frac{m}{2}}); \end{aligned}$$

$$\sigma_{N_0} = \left[\sigma_A^2 + m^2 \sigma_{\Delta\sigma}^2 + \left(1 - \frac{m}{2}\right)^2 \sigma_{a_0}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$i = 1, 2, \dots$ 时,

$$\mu_{N_i} = \lg B_i - \mu_A - m \mu_{\Delta\sigma} + \left(1 - \frac{m}{2}\right) \lg a_i + \lg(1 - \beta_i^{1-\frac{m}{2}});$$

$$\sigma_{N_i} = (\sigma_A^2 + m^2 \sigma_{\Delta\sigma}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

如果设 $N'_i = \lg N_i$,则 N'_i 服从正态分布,通过变量代换 $u_i = \frac{N'_i - \mu_{N_i}}{\sigma_{N_i}}$,可将 N'_i 的分布变换为标准正态分布。由式(12)天然气管道的疲劳可靠度 k 可用随机变量 u_i 来表示

$$\begin{aligned} R &= \int_{N_p}^{\infty} f(N'_i) dN'_i = \\ & \int_{u_p}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}u_i^2} du_i = 1 - \phi(u_p) \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。 $u_p = \frac{N'_p - \mu_{N_i}}{\sigma_{N_i}} =$

$\frac{\lg N_p - \mu_{N_i}}{\sigma_{N_i}}$, u_p 称为可靠性系数或安全指数,与可靠度 R 有关。

给定可靠度 R 后,即可由式(17)求得可靠性系数 $u_p = \phi^{-1}(1 - R)$,于是疲劳寿命 N_p 为

$$N_{\varphi} = 10^{\mu N_i + u_{\varphi} \sigma N_i} \quad (18)$$

整个裂纹亚临界扩展过程的疲劳寿命

$$N_p = \sum_{i=1}^n N_{\varphi} \quad (19)$$

此式即为疲劳可靠寿命 N_p 的计算公式,它表示天然气管道的寿命为 N_p 时,其失效概率为 $1 - R$ 。

对于不同的可靠度 R ,可按式(15)、(16)、(18)及式(19)计算出含裂纹天然气管道的疲劳可靠寿命 N_p 。当 $R = 0.999$ 时, $N_p = 362$; $R = 0.9999$ 时, $N_p = 200$ 。

3 结 论

表面裂纹对压力管道的操作运行及使用寿命影响较大。利用 Paris 公式计算了含表面裂纹管道的疲劳寿命,引入可靠性计算,利用概率断裂力学方法确定了天然气管道的疲劳可靠寿命。计算结果表明管道剩余疲劳寿命为 $\frac{200}{80} = 2.5$ a 时,管道失效概率为 0.000 1。可靠性计算比常规断裂力学计算合理得多,不仅能够定量地表示天然气管道安全、可靠的程度,还能使管道

有可以预测的使用寿命。当气体压力变化幅度减小,或初始裂纹尺寸较小时,管道的疲劳寿命将增大。本文研究方法对压力管道的运行、检修等方面有一定实用价值。

参 考 文 献:

- [1] 丁遂栋,孙利民.断裂力学[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 压力容器缺陷评定规范编制组.压力容器缺陷评定规范(CVDA-1984)[J].机械强度,1985,7(1):1-24.
- [3] 崔振源.表面裂纹理论及其应用[M].西安:西北工业大学出版社,1987.
- [4] 牟致忠.机械零件可靠设计[M].北京:机械工业出版社,1988.
- [5] PROVAN J W. 概率断裂力学和可靠性[M].航空航天工业部 AFFD 系统工程办公室译.北京:航空工业出版社,1989.
- [6] 李庆芬,胡胜海,朱世范.断裂力学及其工程应用[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1998.

Calculation of Fatigue Reliable Life of Natural Gas Pipeline

FENG Xian-gui

(College of Resource and Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Various defects and cracks may be produced in the welding process in natural gas pipeline. Under variable pressure of natural gas, the cracks will be propagated it may lead to break and invalidity. The effect of internal surface cracks are more serious. It has been researched that the propagation along radial direction of internal surface cracks in the natural gas pipeline. The fatig life of pipeline has been calculated. On the other hand, considering the size of cracks, pressure of gas and character of material are random variable, and by using reliability method, the fatig reliable life of pipeline has been determined. This method has some practical value in design, working and overhaul of pipeline.

Key words: pipeline; crack propagation; fatig reliable life

(责任编辑 刘道芬)