

# 油气输送管道疲劳寿命分析及预测

李云龙\* 庄传晶 冯耀荣 霍春勇

(中国石油天然气集团公司管材研究所)

李云龙 庄传晶等:油气输送管道疲劳寿命分析及预测,油气储运,2004,23(12) 41~43。

**摘 要** 基于试验室小尺寸疲劳试样裂纹扩展速率( $da/dN$ )试验所测得的螺旋埋弧焊管疲劳裂纹扩展数据,对管道剩余寿命进行了评估和预测,同时进行了实物钢管全尺寸疲劳试验,对预测结果进行了验证。研究表明,采用小尺寸疲劳试验结果对管道剩余寿命进行预测的结果与实物试验结果基本一致,虽略微保守,但从工程应用的角度讲是可行的。此外还结合实物疲劳试验分析了油气输送管道中较常见的管体表面半椭圆裂纹类缺陷的扩展规律。

**主题词** 油气管道 疲劳裂纹 扩展速率 表面裂纹 疲劳寿命

## 一、前 言

钢管的疲劳断裂往往是由管道中存在的各种交变应力引起的。这种交变应力主要产生于在役管道输送介质的压力波动,多次停输或反复进行压力试验等,其应力比( $A$ )等于输送压力最小值与最大值之比,通常在 $0\sim 0.8$ 之间,当交变应力比( $A$ )接近于 $0$ 时,相当于多次停输和反复进行压力试验等情况;当交变应力比( $A$ )接近于 $0.8$ 时,相当于在正常输送过程中压力有波动的情况。此外,由于管道外部的变动载荷,如输送气体介质的分层结构、埋地管道上车辆引起的振动、沼泽地管道浮力的波动、沙漠管道流沙的迁移、穿越管段由于埋深不够形成的悬空段在水的冲击下产生的卡曼振动等,也会产生交变应力,使钢管内部和表面的缺陷发生扩展,最终造成管道的疲劳断裂。由于疲劳断裂往往是突然发生的而没有预先征兆,因此具有较大的危险性,尤其是对于天然气高压长输管道,其危害性更显而易见。

以往在对实际管道进行疲劳寿命分析时,均采用小尺寸疲劳试样试验结果进行评估,但是实际管道实物疲劳裂纹扩展规律与小试样试验结果到底有何差异,现尚未进行对比试验研究。在实物疲劳试

验和小尺寸疲劳试验结果对比基础上,对管道的疲劳寿命进行了分析和预测,同时结合实物疲劳试验分析了油气输送管道中较常见的管体表面半椭圆裂纹类缺陷的扩展规律。

## 二、研究方案

试验采用的试验样块及样管均取自国内同一厂家生产的规格为 $\phi 660\times 8.7$  mm,钢级 X60 的螺旋埋弧焊管。焊管母材屈服强度( $\sigma_s$ )为 430 MPa,焊管母材抗拉强度( $\sigma_b$ )为 540 MPa,焊缝抗拉强度( $\sigma_b$ )为 582 MPa。

小尺寸疲劳试验是在室温、环境介质为空气的条件下,采用德国 Amsler 高频疲劳试验机对紧凑拉伸(CT)试样施加等幅载荷,以获取一系列的裂纹深度( $a$ )和疲劳加载次数( $N$ )相应变化的数据,并据此做出裂纹深度( $a$ )和疲劳加载次数( $N$ )变化曲线,然后在曲线上用七点内插法,通过编程求出各测量点的疲劳裂纹扩展速率( $da/dN$ )。

实物疲劳试验采用实物钢管进行疲劳加载试验。为了消除端部效应对试验结果的影响,样管取长为 7 m,两端焊上堵头,并在两边堵头上分别焊上进水口与出水口。为了保证样管疲劳断裂后在指定

位置失效,在样管中间距较远处沿钢管轴向预制了一个外表面半椭圆型裂纹缺陷。疲劳试验采用恒幅加载,加载应力比(A)为 0.1,模拟了实际管道停输以及发生断裂事故后大的输送压力波动。最大载荷选取钢管母材屈服强度的 72%,约为 7.5 MPa,最小载荷为 0.75 MPa。在以上试验条件下,全尺寸疲劳试验系统疲劳加载频率约为 3 次/min。

根据小尺寸疲劳试样试验结果,对管道的剩余疲劳寿命进行预测,再通过钢管全尺寸实物疲劳试验对预测结果进行验证,并对两种不同的试验方法进行对比研究。

### 三、算例分析

对于承受内压的钢管,其环向应力是轴向应力的两倍,而对于油气输送管道,轴向裂纹承受的应力更高,其危险性也更大。由 Paris 公式可知:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

式中 da —— 裂纹增量;

dN —— 载荷循环周次;

da/dN —— 裂纹扩展速率;

C —— Paris 系数;

$\Delta K$  —— 裂纹尖端在疲劳载荷作用下的应力强度变化量;

m —— 应力强度因子指数。

根据 Zahoor 等<sup>[1]</sup>的研究结果,对于承受内压(P)的压力容器和管道,当含有轴向外表面半椭圆裂纹时,裂纹尖端应力强度因子的表达式为:

$$K_I = \frac{PR}{t} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F \tag{2}$$

$$F = 1.12 + 0.053 \omega + 0.0055 \omega^2 + \left(1 + 0.02 \omega + 0.0191 \omega^2\right) \left[\frac{(20 - R/t)^2}{1400}\right]$$

$$\omega = (a/t)/(a/2c)$$

式中  $K_I$  —— 裂纹尖端应力强度;

P —— 压力;

R —— 钢管半径;

t —— 钢管壁厚;

a —— 裂纹深度;

Q —— Folias 膨胀系数;

F —— 裂纹尖端应力强度因子;

c —— 裂纹半长度。

在采用式(2)计算钢管裂纹尖端应力强度因子时,还应注意其适用范围。由于油气输送用钢管基本上是薄壁大口径,裂纹尖端主要是平面应力状态,采用式(2)计算可得到偏于保守的结果。

将式(2)代入式(1),并对式(1)由预制裂纹尺寸裂纹深度( $a_0$ )到最大临界裂纹深度( $a_c$ )积分,得到含裂纹类钢管疲劳寿命为:

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{C(Y)^m} \frac{da}{a^{m/2}}$$

$$Y = \frac{R}{t} F \cdot \Delta P \sqrt{\frac{\pi}{Q}}$$

式中 N —— 疲劳加载次数;

$\Delta P$  —— 管道压力的波动范围。

当应力强度因子指数  $m=2$  时,含裂纹类钢管疲劳寿命为:

$$N = \frac{1}{C(Y)^m} \ln \frac{a_c}{a_0} \tag{3}$$

当应力强度因子指数  $m \neq 2$  时,含裂纹类钢管疲劳寿命为:

$$N = \frac{2}{(2-m)C(Y)^m} \left[ a_c^{(2-m)/2} - a_0^{(2-m)/2} \right] \tag{4}$$

以轴向外表面裂纹为例,计算钢级为 X60,规格为  $\phi 660 \times 8.7$  mm 的螺旋埋弧焊管的疲劳剩余寿命。计算所用疲劳裂纹扩展数据采用小尺寸试验结果,加载应力比(A)为 0.1,预制裂纹尺寸裂纹深度( $a_0$ )为 0.003 m,裂纹全长(2c)为 0.05 m,最大临界裂纹深度( $a_c$ )为 0.0076 m。选取管体的疲劳裂纹扩展材料参数,其中  $C=2.15 \times 10^{-10}$ ,  $m=2.61$ 。计算取加载应力比(A)为 0.1,主要是预测管道在服役过程中停机检修以及管道事故引起的大压力波动对钢管疲劳寿命的影响。由于是表面未穿透裂纹,研究裂纹沿壁厚方向的扩展比裂纹沿管体轴向的扩展更有意义。在进行实验室标准疲劳裂纹扩展试验时,测量结果是裂纹沿管体轴向的扩展速率,为了更接近工程实际,现采用 Newman 与 Raju<sup>[2]</sup>提出的修正系数  $C=(0.9)^m C'$ ,即可得到裂纹沿管体壁厚方向的扩展速率,其中  $C'$  为裂纹沿钢管壁厚方向扩展的 Paris 常数。计算结果见表 1。

在计算过程中,只是单纯考虑了裂纹尺寸大小对钢管疲劳裂纹扩展寿命的影响。然而实际管道中

的影响因素要复杂得多,其中诸如焊接残余应力、环境温度变化、地层移动以及土壤和输送介质的腐蚀等,对管道中裂纹的疲劳扩展都有较大的促进作用。

因此,对该管道的实际疲劳寿命有必要考虑一定的安全裕度。取安全裕度为 2.4,则该管道在当前操作工况下的疲劳扩展寿命约为 16.9 年。

表 1 含裂纹类钢管疲劳寿命计算结果

材料	裂纹形状因子	压力范围 (MPa)	压力变化周次 (次/月)	裂纹尖端应力强度的变化量 (MPa · m <sup>1/2</sup> )	疲劳加载次数 (次)	工作寿命 (a)
X60 钢管	0.12	0.7~7	3	14.3	1 465	40.7

## 四、分析与讨论

### 1、表面裂纹形态的疲劳扩展规律

表面裂纹可以根据其形状因子( $a/c$ )大小不同分为不同的类型。Burande<sup>[3]</sup>等分别对不同形式的表面裂纹扩展规律进行了计算分析,并在研究中预制了裂纹形状因子( $a/c$ ) $<1$ ,  $\frac{\text{裂纹全长}(2c)}{\text{裂纹深度}(a)} > 12$ , 该裂纹类型是浅表面长裂纹。从试验后疲劳断口宏观形貌可见,疲劳试验过程中疲劳裂纹沿长度方向基本上没有发生扩展,而沿深度方向则扩展较快,直至泄漏失效。这一试验结果与 Burande 的理论分析结果是一致的。

对于表面裂纹,其显著的特点就是裂纹前沿是不规则的,而且裂纹前沿各点处的扩展速率各不相同。一般情况下,裂纹前沿最深点处的裂纹扩展速率最高,其它各点则各不相同。裂纹前沿各点扩展速率的差异,又使得裂纹扩展过程中的形状也具有不确定性。在 ASME XI 以及 BSI PD6493 标准中规定,表面裂纹扩展前沿按近似半椭圆形状对待。这种方法在工程实际中是适用的,但存在一定的保守性。Newman<sup>[2]</sup>和 Lin 等人<sup>[4]</sup>分别采用双自由度法和多自由度法对不同形状因子的表面裂纹前沿扩展规律进行了研究。结果表明,在疲劳裂纹贯穿以前,表面裂纹形状一般用半椭圆来描述。类似地,在贯穿后,裂纹前沿也可以用椭圆的一部分来近似代替,并随着裂纹的扩展,逐渐过渡到用直线来代替。在试验中,裂纹基本上沿深度方向扩展,直至裂纹最深点达到管体内表面,形成贯穿裂纹。

### 2、试验与计算结果对比分析

实物疲劳试验一共进行了约 50 h,其中预制疲劳裂纹加载周次为 5 200 次,最后在预制裂纹处裂纹萌生。随后加大疲劳载荷,萌生裂纹经过缓慢扩展、稳定扩展以及失稳扩展阶段后由外表面裂纹扩

展至内表面,并形成穿透裂纹,导致该处发生泄漏,并产生压力降低现象,遂停止试验。疲劳扩展及失稳过程加载周期约为 1 620 次,而采用小尺寸疲劳试样试验结果计算的疲劳寿命为 1 465 次。可见小尺寸试样计算结果偏保守,但是从实际工程应用角度出发,采用小尺寸试样预测的结果与实际情况十分接近,而且偏于保守的评估结果可以更好地保证管道的安全可靠。

## 五、结 论

(1)采用小尺寸疲劳试验结果对管道剩余寿命进行预测的结果与实物试验结果基本一致,但略显保守,经过适当调整,可以在实际工程中应用。

(2)油气输送管道中压力波动范围对管道的疲劳工作寿命有显著的影响。在实际操作中,应尽量减少压力变化次数,特别是压力变化范围。

(3)取安全裕度为 2.4 的操作工况下,油气输送管道(API X60 螺旋埋弧焊管)的疲劳工作寿命至少为 16.9 年。

### 参 考 文 献

- 1, Zahoor: Closed form expressions for fracture mechanics analysis of cracked pipes, Journal of Pressure Vessel Technology, May 1985, 107, 203~205.
- 2, Newman J C & Raju I S: An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack, Engineering Fracture Mechanics, 1981, 15(1~2)185~192.
- 3, Ahammed M: Prediction of remaining strength of corroded pressurized pipelines, Int. Journal of Pressure Vessels and Piping, 1997(71) 213~217.
- 4, Lin X B and Smith R A: Numerical analysis of fatigue growth of external surface cracks in pressurized cylinders, Int. Journal of Pressure Vessels and Piping, 1997(71) 293~300.

(收稿日期:2004-03-17)

编辑:孟凡强