

含裂纹管道的失效评定曲线的实例验证^{*}

VALIDATION OF FAILURE ASSESSMENT CURVE OF LINEPIPE CONTAINING CRACKS

帅健^{**} 许葵

(石油大学(北京)机电学院, 北京 102249)

SHUAI Jian XU Kui

(School of Electrical and Mechanical Engineering, University of Petroleum, Beijing 102249, China)

摘要 验证含裂纹油气管道的失效评定曲线, 实例来源于某输油管线现场水压试验中爆裂的三个管段。给出基于 J 积分理论的含裂纹管道的失效评定曲线的基本方程, 并采用有限元方法计算裂纹管道的 J 积分。对三个破坏的含裂纹管段, 根据现场测量的裂纹尺寸和管材的力学性能试验数据, 建立失效评定曲线, 并与水压实验结果作比较, 表明所建立的失效评定曲线的准确性。

关键词 J 积分 有限元 轴向裂纹 失效评定曲线 安全评定 油气管道

中图分类号 TQ055.8 0346.1

Abstract The failure assessment curves of linepipe containing cracks are verified by a case that came from the three pipes burst in a proof test of an oil pipeline. The basic equation of failure assessment curve for a semi-elliptical flaw in a pipe surface is described. J integral and its elastic component obtained by line spring element method. For the three pipes the failure assessment curves are set up according to the size of a flaw and the data of material mechanical test. Comparison with the result in the proof test shows the failure assessment curves presented in this paper is accurate.

Key words J integral; Finite element method; Crack; Failure assessment curve; Safety assessment; Pipelines

Corresponding author: SHUAI Jian, E-mail: shuaij@bpeu.edu.cn, Fax: +86-10-89733271

The project supported by the Innovation Fund of the National Petroleum Corporation of China (No. CX98-27).

Manuscript received 20020228, in revised form 20020517.

1 引言

失效评定图方法是一种广泛用于含裂纹结构弹塑性断裂分析的方法, 已经有一些厚壁压力容器的试验结果验证了失效评定曲线的正确性^[1]。近年来, 这种先进的断裂力学分析方法开始应用于油气输送管道, 并有管环试验结果验证^[2]。但仍然没有公开文献介绍全尺寸油气输送管道断裂的试验结果和实例, 因此研究现场条件下管道断裂的实例, 对于裂纹管道的安全评定有着重要的现实意义。

2 失效评定曲线的基本方程

油气输送管道为薄壁结构, 管体上的裂纹多为表面裂纹, 规则化为表面半椭圆裂纹。文献[3]导出了管道半径与壁厚的比值 (R/t) 为 10 的情况下, 含表面半椭圆裂纹管道的失效评定曲线的基本方程。但对于油气输送管道, 径厚比 R/t 常大于 10, 因此有必要导出普遍意义下的失效评定曲线的基本方程。

采用 Ramberg-Osgood 应力—应变法则, 其公式如下

$$\epsilon/\epsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + \alpha(\sigma/\sigma_0)^n \quad (1)$$

式中 σ_0 为屈服应力, $\epsilon_0 = \sigma_0/E$ 为初始应变, n 为幂硬化指数, α 为硬化系数。

裂纹管道的 J 积分可以表示为

$$J = J_1^e(a_e, p) + J^p(a, p, n) \quad (2)$$

其中 $J_1^e(a_e, p)$ 是 Irwin 等效裂纹长度 a_e 上的 J 积分, J^p 是 J 积分的塑性分量。

根据失效评定图纵坐标的定义 $K_r = \sqrt{J^e(a, p)}/J$ (其中 a 为裂纹尺寸, p 为载荷), 方程(2)可以写成

$$J/J_1^e(a, p) = 1/K_r^2 = \frac{J_1^e(a_e, p)}{J_1^e(a, p)} + \frac{J^p(a, p, n)}{J_1^e(a, p)} = f(L_r) \quad (3)$$

L_r 为失效评定图的横坐标, 也称为载荷比。 J 积分塑

^{*} 20020228 收到初稿, 20020517 收到修改稿。中油集团公司创新基金资助项目(CX98-27)。

^{**} 帅健, 男, 1963年8月生, 湖北黄梅人, 汉族。石油大学(北京)机电学院教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为油气管道与储罐强度。

性分量的表达式可以写成

$$J^p = \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 a (1 - a/t) h(p/p_0)^{n+1} \quad (4)$$

式中 h 为与结构尺寸、裂纹尺寸和材料参数有关的待定函数, t 为管道壁厚, R 为管道内半径, p_0 为裂纹结构完全塑性状态下的极限载荷。

关于含表面半椭圆裂纹管道完全塑性状态下的极限压力, 可从含平直裂纹管道的极限压力导出, EPRI 手册给出的公式为^[3]

$$p_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \frac{t}{R} \frac{(1 - a/t)}{(1 + a/R)} \quad (\text{内表面裂纹}) \quad (5)$$

$$p_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{R} (1 - a/t) \quad (\text{外表面裂纹}) \quad (6)$$

将式(5)和(6)中的 a 用 a^* 取代

$$a^* = \frac{a [1 - (1 + 2c^2/t^2)^{-1/2}]}{[1 - a/t(1 + 2c^2/t^2)^{-1/2}]} \quad (7)$$

即可得到含表面半椭圆裂纹管道的塑性极限压力。式(7)中 a 为半椭圆裂纹的深度, $2c$ 为半椭圆裂纹的长度。

弹性 J 积分由线弹性应力强度因子导出

$$J^e = \frac{(1 - \nu^2)}{E} K_I^2(a, p) \quad (8)$$

管道轴向表面半椭圆裂纹的应力强度因子 K_I 的计算公式如下

$$K_I = \frac{pR}{t} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F(a/c, a/t) \quad (9)$$

其中 $Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65}$ 为椭圆裂纹的形状参数, F 是裂纹的边界修正参数, 表示为

$$F = 0.97 [M_1 + M_2(a/t)^2 + M_3(a/t)^4] g f_1 f_c \quad (10)$$

在裂纹最深点($\phi = \pi/2$)取 $g = 1$ 和 $f_1 = 1$, M_1 、 M_2 、 M_3 分别如下

$$M_1 = 1.13 - 0.09a/c$$

$$M_2 = -0.54 + 0.89/(0.2 + a/c)$$

$$M_3 = 0.5 - 1/(0.65 + a/c) + 14(1 - a/c)^4$$

$$f_c = \left[\frac{R_0^2 + R^2}{R_0^2 - R^2} + 1 - 0.5 \sqrt{\frac{a}{t}} \right] \frac{t}{R} \quad (\text{内表面裂纹})$$

$$f_c = \left[\frac{R_0^2 + R^2}{R_0^2 - R^2} - 1 + 0.5 \sqrt{\frac{a}{t}} \right] \frac{t}{R} \quad (\text{外表面裂纹})$$

式中 R_0 为管道外半径, 其余符号意义同上。

有效裂纹长度 a_e 也可以由应力强度因子的表达式求出, 为

$$a_e = a + \varphi r_y \quad (11)$$

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \frac{[n-1] K_I(a, p)^2}{[n+1] \sigma_0^2} \quad (12)$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + (p/p_0)^2} \quad (13)$$

因此, 对于管道上的内表面半椭圆裂纹, 失效评定

曲线的方程为

$$\frac{1}{K_I^2} = \frac{a_e}{a} \left[\frac{F(a_e)}{F(a)} \right]^2 + \frac{3\alpha(1 - a/t)hL_r^{(n-1)}}{4\pi(1 - \nu^2) \left[\frac{tF(a/c, a/t)(1 - a^*/t)}{R\sqrt{Q}(1 + a/R)} \right]^2} \quad (14)$$

上式中 $h = h(a/t, a/c, t/R, n)$ 为待定函数, 通过拟合确定。拟合的数据点由有限元分析结果得到。采用上述方程, 可以仅计算少量的 J 积分值, 就可以得到精确而完整的失效评定曲线。

3 轴向裂纹 J 积分计算的有限元方法

按照管道轴向椭圆裂纹的实际构形, J 积分的计算需要对包括裂纹前缘在内的三维实体结构进行离散, 这样的方法相当复杂, 而且计算耗时较多。为了快速而简便地计算管道上未穿透裂纹的 J 积分, 采用线弹簧单元^[4]; 这种单元是沿裂纹放置的一系列一维单元, 单元按等效单边缺口的裂纹模型估算刚度, 并将单元的弹塑性分析的局部解引入到整体解答中。采用线弹簧单元的明显好处是不需要对含裂纹的实体进行三维划分, 仅按薄壳处理, 大大减少了单元数目, 减少了计算工作量。

采用 ABAQUS 有限元分析软件^[4], 编制管道轴向裂纹 J 积分计算的用户程序。管体采用 8 节点壳单元离散, 沿着裂纹采用 3 节点的线弹簧单元。全部壳单元上作用有均匀内压载荷。

4 实际管段的失效评定曲线及其验证

某输油管线在水压实验中发生了管子开裂的事故, 事后检查管子开裂处有裂纹存在, 其中三根管段的裂纹尺寸、管材性能和破坏情况的原始数据见表 1, 管道材质为 X52 钢。

根据管道的上述已知参数, 利用编制的 ABAQUS 用户程序, 计算得到若干载荷下的 J 积分及其弹性分

表 1 失效管段的原始数据

Tab. 1 Data about failed pipes

管 段	1	2	3
管子外径 D_0 /mm	377	377	377
壁厚 t /mm	6.0	7.0	6.0
失效压力 /MPa	7.10	8.90	9.23
失效类型	爆裂	爆裂	爆裂
裂纹尺寸 a mm \times $2c$ mm	3.0 \times 205	2.5 \times 560	2.3 \times 162
屈服强度 σ_0 /MPa	519.2	488.2	381.3
抗拉强度 σ_b /MPa	635.7	572.3	528.8
硬化系数 α	1.723	1.760	2.036
硬化指数 n	10.412	12.403	7.779

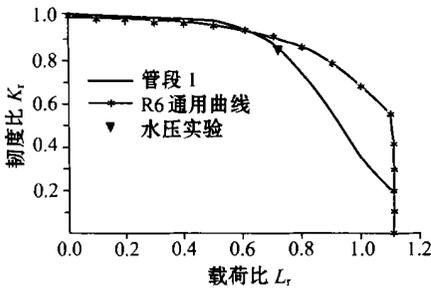


图 1 管段 1 的失效评定图

Fig. 1 Failure assessment diagram of pipe 1

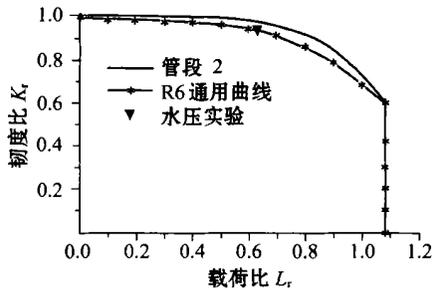


图 2 管段 2 的失效评定图

Fig. 2 Failure assessment diagram of pipe 2

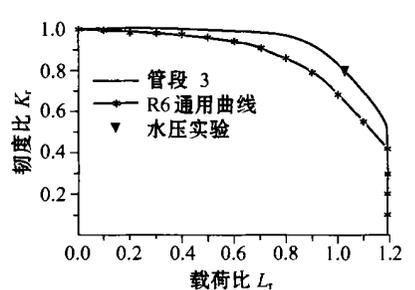


图 3 管段 3 的失效评定图

Fig. 3 Failure assessment diagram of pipe 3

量 J_I^c ，由基本方程(14)拟合得到失效评定曲线如图 1~图 3。其中的截断点位置由管材的流变应力和屈服强度的比值确定，三个图中的截断点坐标分别为 $L_{rmax} = 1.112, 1.086, 1.193$ 。为了便于比较，图中也画出了 R6 标准中的通用曲线^[5]。图 2 中，对管段 2 建立的失效评定曲线高于 R6 标准中的通用曲线，但两者已相当接近。图 1 中对管段 1 建立的失效评定曲线明显低于 R6 标准中的通用曲线，而图 3 中对管段 3 建立的失效评定曲线明显高于 R6 标准中的通用曲线。

然后根据管道爆裂失效时的压力和管材的断裂韧度等，计算评定点的坐标如表 2；在图 1~图 3 中也标出了评定点，表明三个评定点和本文建立的失效评定曲线相接近。由图还可以看出，在图 1 中的管段 1，按照本文建立的评定曲线，认为评定点已经失效，但应用 R6 通用曲线，则给出管道安全的评定结果。而对于图 3 的管段 3，R6 通用曲线则给出比较保守的结论。一般认为，R6 通用曲线是偏于保守的，但上述三个爆裂管段的失效评定结果表明，并不是在所有的情况下

表 2 现场失效管段的评定点

Tab. 2 Assessment Point for these three pipe

管段	J_{Ic} kN/m	评定点	
		L_r	K_r
1	18.84	0.71689	0.84854
2	9.23	0.64137	0.93762
3	35.19	1.02563	0.80343

都是这样，使用 R6 通用曲线有时也会偏于不安全。因此对于精确的失效评定来讲，对于不同裂纹尺寸和材料参数应该建立不同的失效评定曲线。

5 结论

1) 推导适用于油气输送管道的失效评定曲线的基本方程，利用这个方程，可以进行少量的 J 积分及其弹性分量的计算，并得到失效评定曲线。

2) 三个爆裂管段的失效评定结果证明，本文提出的建立油气输送管道的失效评定曲线方法是准确的。

3) 并不是所有情况下，R6 通用曲线都是偏于安全的。为了提高评定的准确性，应根据裂纹尺寸和材料性能的具体情况建立失效评定曲线。

References

- Bloom J M. Validation of the deformation plasticity failure assessment diagram (DPFAD) approach—The case of an axial flaw in a pressurized cylinder. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1990, 112: 213~217.
- Balsara M. Application of advanced fracture mechanics to the assessment of linepipe defects. OMAE-1996 Volume V; Pipeline Technology, Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, Los Angeles, 1996. 569~585.
- Bloom J M. Extensions of assessment diagram approach semi-elliptical flaw in pressurized cylinders. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1985, 107: 25~29.
- HKS. ABAQUS user's manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc. Version 6.1, 2001.
- CEGB R 6/R6-Revision 3. Assessment of the integrity of structures containing defects. U. K.; Central Electricity Generating Board, 1988.