

裂纹管道失效评定中的有限元方法 * *

帅 健* 许 葵

(石油大学(北京)机电学院)

帅 健 许 葵:裂纹管道失效评定中的有限元方法,油气储运,2003,22(3) 18~21。

摘 要 J 积分的精确计算是含缺陷结构安全评定的基础。对管道上的表面裂纹采用线弹簧单元,建立了裂纹管道 J 积分计算的有限元模型,给出了 J 积分的计算实例。基于 J 积分理论,利用这种有限元模型得到了裂纹管道的精确失效评定曲线,根据计算结果,讨论了影响失效评定曲线的各种因素。分析表明,裂纹尺寸和管材材料性能参数等都对失效评定曲线产生影响,用单一的失效评定曲线进行评定会出现精度较差的问题,因此,采用提出的有限单元方法对裂纹管道的失效进行精确评定具有重要意义。

主题词 油气管道 裂纹 J 积分 有限元方法 安全评定

一、前 言

含缺陷结构的安全评定普遍采用失效评定图的方法,这种方法最早是由英国中央电力局(CEGB)于 1976 年首先提出并采用的^[1],之后美国电力研究院(EPRI)提出用 J 积分取代窄条区屈服模型,给出了新的失效评定曲线,大大发展了这一方法^[2]。目前常提到的是 1986 年发表的 R6 修订版^[3],其失效评定曲线与较老的失效评定曲线在理论上有着本质的不同,典型的老 R6 是以 COD 理论为依据,并根据 D-M 模型推导出老 R6 失效评定曲线的方程。而新 R6 是对老 R6 的彻底修改,它考虑了材料的应变硬化效应,不再沿用由 D-M 模型得到的失效

评定曲线,而以弹塑性断裂力学的 J 积分理论为基础建立失效评定曲线。

近年来,先进的断裂力学分析法开始应用于油气管道,并有了管环试验结果的验证^[4],笔者采用水压试验中失效的管道验证了该方法的正确性。应用失效评定图方法的前提条件是能够准确计算表征裂纹尖端应力-应变场的断裂参量—— J 积分,其精确计算是在役管道安全评估关键技术研究的基础。

二、基于 J 积分的失效评定理论

失效评定曲线是按严格的弹塑性断裂理论建立的,且以 J 积分理论为基础,其基本方程为^[3]:

$$f(L_r) = (J^e/J)^{1/2} \tag{1}$$

参 考 文 献

- 1, 刘雯:天然气管道的运行可靠性评价技术,天然气工业,2001, 2(4)。
- 2, 曲慎扬:油气管道可靠性评价指标及计算,油气储运,1996, 15(4)。
- 3, 牟致忠等:机械可靠性设计,机械工业出版社(北京),1994。

较,当可靠度降低到允许值以下时,就应提出适当的维修策略,以恢复其可靠度。根据城市天然气管网不同时期运行的不同特点,应采用相应的方式对其进行评估。这样,管道管理才有针对性。同时,加强管网运行期间的可靠性管理,可最大限度地利用管道,以取得最佳的经济效益。

(收稿日期:2002-08-12)

编辑:刘春阳

* 102200,北京市昌平区水库路;电话:(010)89733271。
* * 中国石油天然气集团公司创新基金项目 CX98—27。

式中 J ——弹塑性 J 积分值；
 J^e —— J 积分值的弹性分量。

按照这种方法得到的失效评定曲线考虑的因素比较全面，因而更具合理性。

三、裂纹管道 J 积分计算的有限元方法

由于管道上主要应力是管内压力引起的环向应力，因此，对于管道断裂而言，最重要的是轴向裂纹，实际情况多为未穿透的表面裂纹，规则化为表面半椭圆裂纹。

按照表面裂纹的实际构形， 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，这样的方法必须对裂纹前缘进行复杂的单元划分，由于单元数量相当大，计算耗时多。对管道上未穿透裂纹的 J 积分进行计算，采用线弹簧单元可以达到快速和简便的目的。这种单元的最大优点是不需要对含裂纹的实体进行三维划分，而仅按薄壳处理即可，大大减少了单元数目和计算工作量。

1、线弹簧单元

图 1 给出了在裂纹上的每一个点上定义局部正交坐标 $(\vec{t}, \vec{q}, \vec{n})$ ，其中， \vec{t} 是沿裂纹并与壳相切的方向， \vec{n} 是与壳垂直的方向，则 $\vec{q} = \vec{t} \times \vec{n}$ 。以裂纹深度的正负号来定义裂纹位于壳体的外侧还是内侧。规定裂纹张开方向在法线 \vec{n} 的正方向，裂纹深度为正，反之为负。

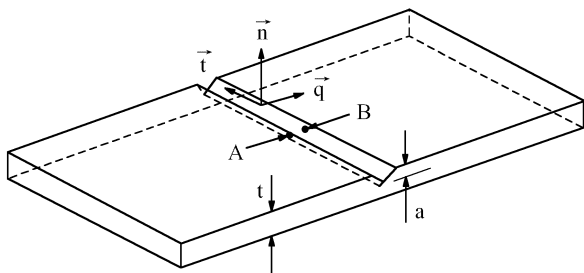
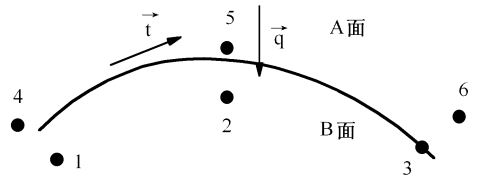


图 1 线弹簧单元

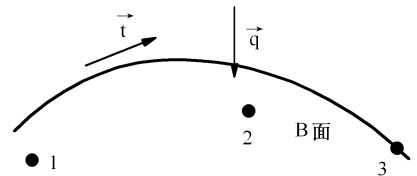
线弹簧单元包含三节点线弹簧单元和六节点线弹簧单元两种类型^[6]（见图 2）。

图 2 中六节点线弹簧单元是一种通用单元，可用于任意壳体中的裂纹，而三节点单元仅限于对称几何体的 I 型裂纹，且变形对同一平面对称，图 2

中 A、B 面位于裂纹两侧相对的位置，B 面包含线弹簧单元的 1、2、3 节点，而对于六节点线弹簧单元在 A 面上还包含 4、5、6 节点。



(a) 六节点单元



(b) 三节点单元

图 2 线弹簧单元的节点布置

2、含表面半椭圆裂纹管道的有限元模型

考虑到对称性，选取 1/4 含裂纹的管道作为分析对象，应用 ABAQUS 有限元分析软件建立几何模型并完成前后处理。

(1)离散方案 壳体采用 8 节点壳体单元离散，沿着裂纹采用 3 节点的线弹簧单元。由于裂纹尖端区域附近的应力梯度很大，为了保证 J 积分的精确性，在裂纹的尖端附近区域单元网格内加密（见图 3）。在图 3 中，沿裂纹长度分布 8 个壳单元和 8 个 3 节点的线弹簧单元，在裂纹尖端以外，按照距离裂纹尖端由近到远，单元的尺寸则由小变大，即网格由密到疏。

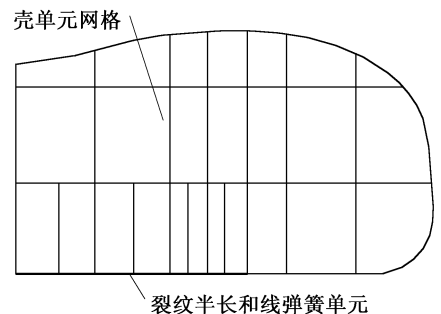


图 3 管道表面裂纹的 J 积分计算的有限元网格

(2)材料模式 考虑到管道材料的硬化效应，采用 Ramberg-Osgood 应力-应变法则，其计算式为：

$$\begin{aligned} \epsilon / \epsilon_0 &= \sigma / \sigma_0 + \alpha (\sigma / \sigma_0)^n & (2) \\ \epsilon_0 &= \sigma_0 / E \end{aligned}$$

式中 σ_0 ——屈服应力；
 ϵ_0 ——初始应变；
 n ——幂硬化指数；
 α ——硬化系数；
 E ——弹性模量。

(3) 载荷 由施加在所有壳单元上的均匀内压组成, 根据需要, 可在端面施加轴向载荷。

(4) 约束条件 按照对称性条件, 在含裂纹的一边、邻边及其相对的一边施加约束条件。

3、算例

已知管道的内径 $R = 181.5 \text{ mm}$, 壁厚 $t = 7.0 \text{ mm}$, 管道材料的应力-应变关系符合 Ramberg-Osgood 应力-应变准则, 材料常数为 $\alpha = 2.036$ 和 $n = 7.779$, 屈服极限 $\sigma_0 = 381.3 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$, 泊桑比 $\mu = 0.3$ 。 a 为椭圆裂纹深度, c 为裂纹半长, p 为管道内压, 3 个算例的参数和 J 积分计算结果见表 1。

表 1 含裂纹管道 J 积分计算的算例数据

算例	裂纹深度 $a(\text{mm})$	裂纹长度 $2c(\text{mm})$	内压 p (MPa)	J^e (kN/m)	J (kN/m)
1	6.0	24.0	5.8	1.577	4.495
2	2.0	20.0	9.6	2.886	2.886
3	3.5	21.0	11.2	4.163	6.696

四、失效评定曲线的影响因素分析

使用上述有限单元模型, 可以建立基于 J 积分的失效评定曲线(见式(1))。在理论上, 这是一种精确的失效评定方法。由于基于 J 积分建立失效评定曲线涉及的因素较多, 因此, 有必要根据计算结果进行单因素影响分析。

1、裂纹深度的影响

图 4 表示了同一材料中裂纹深度的影响, 所用的管道和管材的基本数据与上述算例相同。图 4 是在裂纹形状满足 $a/c = 0.33$ 的条件下得到的。由图 4 可知, 随着裂纹深度的增加, 失效评定曲线随之降低, 即安全区减小。这是因为随着裂纹深度的增加, J 积分变得对载荷非常敏感, 即载荷稍微增加, J 积分值便迅速增加, 而且对大范围屈服而言, 塑性 J 积分值相对弹性 J 积分值的增加要快得多, 这使得在几乎相同的横坐标下, 裂纹深度大的纵坐标要比裂纹深度小的纵坐标值小。

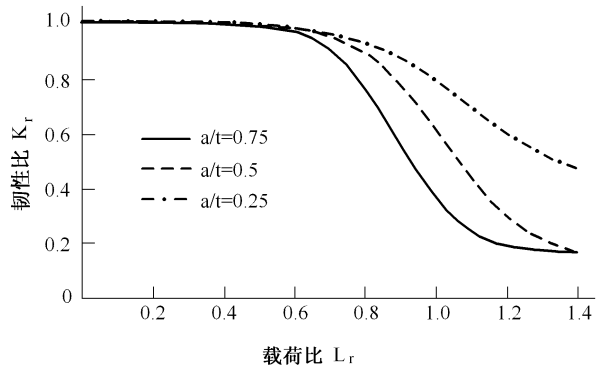


图 4 不同 a/t 值对失效评定曲线的影响

2、裂纹形状的影响

图 5 示出了裂纹形状 a/c 对失效评定曲线的影响。由图 5 可以看出, 随着裂纹的形状接近于圆形 ($a/c \rightarrow 1$), 失效评定曲线在靠近纵坐标的区域降低, 但随着横坐标的增大, 失效评定曲线又随之升高。其原因是在靠近纵坐标的区域, 失效评定曲线主要由 J 积分控制, 随着载荷的增大, 失效评定曲线转而由外加载荷控制。

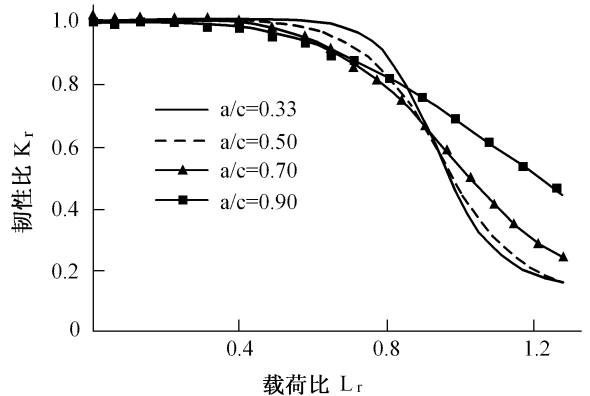


图 5 裂纹形状对失效评定曲线的影响

3、硬化系数 α 的影响

为了讨论硬化系数 α 对失效评定曲线的影响, 假设材料实际可能的硬化系数分别为 $\alpha = 0.92$ 、 $\alpha = 2.036$ 和 $\alpha = 4.20$, 在满足 $a/t = 0.5$ 和 $a/c = 0.33$ 的条件下得出了三条失效评定曲线(见图 6)。由图 6 可见, 硬化系数 α 越大, 安全区域的范围越小, 即失效评定曲线随着硬化系数 α 的增大而降低。这是因为在裂纹尺寸、裂纹形状和结构尺寸相同的条件下, 极限载荷亦相同, 在相同的外加载荷下, 对于硬化系数 α 大的材料, 其塑性应变亦大, 即 J 积分值中塑性分量所占比例大, 从而造成在横坐标相同的条

件下,硬化系数 α 大的材料纵坐标值小,失效评定曲线降低。

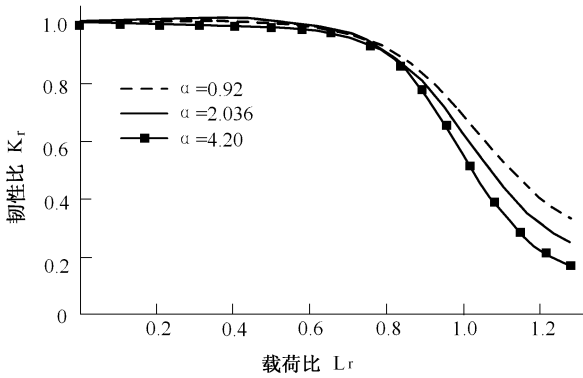


图 6 不同的硬化系统 α 对失效评定曲线的影响

4、材料幂硬化指数 n 的影响

图 7 表示了材料幂硬化指数 n 的影响。在 $\alpha = 2.036$ 、 $a/t = 0.5$ 和 $a/c = 0.33$ 的条件下,假设材料实际可能的幂硬化指数 n 分别为 $n = 4.22$ 、 $n = 7.779$ 和 $n = 11.0$ 。另外,还考虑了弹性材料($n = 1$)和塑性材料($n = \infty$,在此取 $n = 30$)的影响,得出如图 7 所示的 5 条失效评定曲线。由图 7 可见,随着幂硬化指数 n 的增大,安全区域的范围减小,即失效评定曲线随着幂硬化指数 n 的增大而降低,其原因与硬化系数 α 近似。

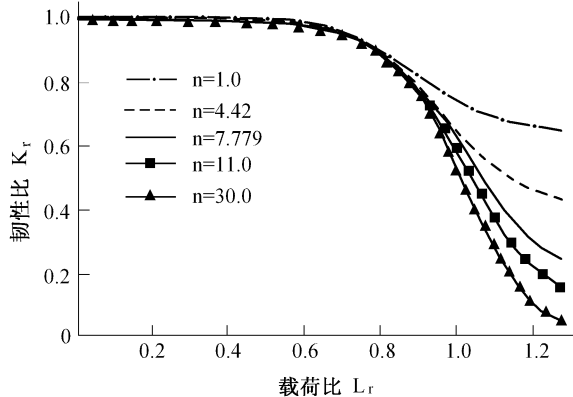


图 7 幂硬化指数 n 对失效评定曲线的影响

综上所述,可得出以下结论。

(1)对于含表面裂纹管道的断裂分析,采用线弹簧单元模型能大大减少计算工作量,并且有满意的精度,便于工程应用。

(2)管道裂纹失效评定曲线的影响因素表明,裂纹的几何尺寸与形状、管材的硬化常数等都有很大影响,如果采用单一的失效评定曲线,可能会降低精

度,因此,应根据裂纹和管材性能的具体情况,建立精确的失效评定曲线。

(3)提出的有限单元方法为精确评定含裂纹的失效油气管道奠定了基础。

参 考 文 献

- 1, Harrison R P, Loosemore K, Milne I, Dowling A R: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, CEBG Report, No. R/H/6, 1976.
- 2, Kumar V, German M D, Shih C F: An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis, EPRI Topical Report NP, 1931, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA., 1981.
- 3, Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, CEBG R/H/R6, Revision 3, 1988.
- 4, Balsara M: Application of Advanced Fracture Mechanics to the Assessment of Pipeline Defects, OMAE, 1996, Volume V: Pipeline Technology, Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, Los Angeles.

(收稿日期:2002-07-18)

编辑:刘春阳

下 期 要 目

不同约束值变化对输油管道		
优化运行的影响	■■■■■■■■■■	孟振虎等
魏荆输油管道加降凝剂低输量		
运行工艺研究	■■■■■■■■■■	李 立等
一种新的混油浓度计算方法	■■■	朱平辉等
两种管道线路工程施工及验收		
规范的比较	■■■■■■■■■■	陈安利等
任意流动体泄漏自动检测方法	■■■	周祖荣
输油气站埋地管道的腐蚀分析		
与防护	■■■■■■■■■■	张立忠等
一种新型油罐防腐涂料的研制	■■■	吴 迪等
钢质储油罐底板腐蚀调查与		
分析	■■■■■■■■■■	杨占品等
管道超声波检测器的应用与		
发展趋势	■■■■■■■■■■	于喜元等
管道计算机辅助断裂评定系统		
研究	曲文卿等