

输油管道断裂失效分析的基本理论探讨

刘 超 (辽宁地质工程职业学院, 辽宁 丹东 118008)

摘 要: 世界经济的发展对能源的需求日益增加, 这就从客观上对油气输送管道建设提出了更高的要求。于是油气管道系统的正常性、有效性问题成为了目前国内外学者讨论的焦点。由于管道传输的介质以及所处不同环境的影响, 在长期运行期间难免会受到各种形式的腐蚀损伤, 为保证受腐蚀后的管道安全可靠的运行, 我们需要对其进行精确的检测, 正确的对其承载能力及其适用性进行评估, 最后提出合理的维护计划。因此, 对含腐蚀管道进行断裂力学的失效分析的基本理论研究非常必要的、是进行合理的维护修理的指导前提, 也是保证油气管道有效运营的重要手段。

关键词: 断裂力学; 失效分析; 基本理论

断裂力学是在生产实践中产生和发展的, 是最近才发展起来的一门新兴学科。它应用力学成就, 研究含缺陷材料和结构的破坏问题。由于它和材料或结构的可靠性直接有关, 因此尽管它出现的时间很短, 但实践和理论均有迅速的发展, 并已开始为生产服务。断裂力学就是从材料或构件中存在宏观裂纹这一点出发, 应用弹性力学和弹塑性力学理论, 研究材料或构件中裂纹产生和扩展的条件及规律的学科。断裂力学研究的理论主要有:

线弹性断裂理论:

线弹性断裂理论是以各向同性、均质的变形构件的二维线弹性理论作为基础, 利用连续体力学分析构件内的裂纹为主要内容; 它又是以研究高强度钢等脆性材料的低应力脆性断裂为主要目的; 它又可以用来研究中、低强度钢等塑性材料不出现明显的塑性变形的一些脆性断裂问题。

设有一厚度为 B 的无限大板。将板拉长后, 两端固定, 板受均匀拉伸应力 σ 作用, 若板中心有一裂纹长为 $2a$, 由于裂纹表面应力消失, 放出弹性应变能以 U 表示, 另一方面裂纹扩展形成新的表面需要吸收的能量以 S 表示。

如果应变能释放率 dU/dA 等于形成新表面所需要吸收的能量率 dS/dA , 则裂纹达到临界状态, 此时稍有干扰, 裂纹就自行扩张, 成为不稳定状态; 如果吸收的能量释放率大于应变释放能, 则裂纹稳定; 如果应变能释放率大于吸收的能量率, 则裂纹不稳定;

$$\frac{d}{dA}(U-S) > 0 \text{ 裂纹不稳定}$$

$$\frac{d}{dA}(U-S) = 0 \text{ 临界状态}$$

$$\frac{d}{dA}(U-S) < 0 \text{ 裂纹稳定}$$

以 $G_I = dU/dA$ 代表能量释放率, $G_{IC} = dS/dA$ 代表吸收的能量率, 则裂纹的临界条件为: $G_{IC} = G_I$ 。

对于无限大板中心裂纹受拉伸作用, 而且两端固定边界的情况, 有:

$$G_{IC} = \frac{dS}{dA} = 2\gamma$$

根据临界条件:

$$\frac{\sigma_c^2 \pi a}{E} = 2\gamma$$

写成临界应力的形式为:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}$$

表示无限大板在平面应力状态下, 长为 $2a$ 的裂纹失稳扩展时拉应力的临界值, 称为裂纹平板的剩余强度, 写成临界裂纹长度的形式为:

$$a_c = \frac{2E\gamma}{\pi \sigma^2}$$

表示无限大板在工作应力 σ 作用下, 裂纹的临界长度。 G_{IC} 是材料常数, 表示材料对裂纹扩展的抵抗能力, 有试验来确定; G_{IC} 是裂纹长度 a 和工作应力 σ 的函数。只有 G_I 大于 G_{IC} 时, 裂纹才会扩展。如果工作应力不变, 当 $a=a_c$ 时 $G_{IC}=G_I$, 我们称 a_c 为临界裂纹长度; 如果裂纹长度不变, 当 $\sigma=\sigma_c$ 时 $G_{IC}=G_I$, 我们称 σ_c 为剩余强度。将能量释放率应用于金属材料, 即材料抵抗裂纹扩展能力这个概念, 包括两个部分: 形成裂纹新表面所需的表面能; 裂纹扩展所需的塑性变形能。对金属材料来说, 抵抗裂纹扩展的能力是一个常数, 只有应变能释放率大于此常数时, 裂纹才扩

展。^[1]

依据沿构件厚度方向分布的不同位置, 构件或材料中常见的裂纹分为穿透裂纹、埋藏裂纹、表面裂纹。

依据构件中裂纹的扩展由于外力的不同, 可以分为以下三种: 张开型 (I 型) - 垂直于裂纹表面的拉应力的作用, 使裂纹张开而扩展; 滑开型 (II 型) - 平行于裂纹面而垂直于裂纹前端的剪应力的作用, 使裂纹滑开而扩展; 撕开型 (III 型) - 平行于裂纹前端的剪应力作用, 使裂纹撕开扩展。

各种类型的裂纹受力的特点各不相同, 这三种类型的裂纹表面, 对应着三种不同的相对位移; I 型裂纹上下两表面相对张开, II 型裂纹上下两表面沿裂纹面的剪应力方向相对滑开, III 型裂纹上下两表面沿裂纹面的剪应力方向相对滑开。其中以张开型裂纹最为常见, 而且容易产生低应力脆断。本文主要研究了管道试样中常见的张开型半椭圆表面裂纹。

设有一无限大板, 中心有一裂纹, 长为 $2a$, 受双轴拉应力作用, 如图 1。

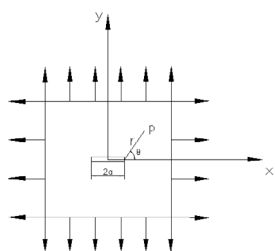


图 1 I 型裂纹模型

其边界条件为:^[2] ① $y=0, x \rightarrow \pm \infty$ 时, $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ 。因为远离裂纹, 裂纹造成的应力集中效应消失, 应力就与外加应力相等; ② $y=0, |x| > a$ 时, $\sigma_y > \sigma$ 且愈接近 a , σ_y 愈大。这是因为裂纹尖端有高应力集中; ③ $y=0, -a < x < a$ 时, $\sigma_y=0$ 。因为裂纹内部与空气接触, 不受力。

对于张开型裂纹, 应变能释放率 G_I 表示裂纹扩张单位面积所释放的应变能。由裂纹尖端附近的应力场和位移场, 就可以计算时裂纹闭合单位面积所作的功, 这部分功应该等于裂纹扩张单位面积所释放的能量。应力强度因子和应变能释放率有对应关系, K_I 不仅表示裂纹尖端附近弹性应力场的强度, 而且它的平方也确定裂纹扩展时所释放出的能量率。所以讨论断裂问题, 应用 K_I 和 G_I 为参数都是等价的。

脆性断裂材料裂纹失稳扩展的临界条件为: $G_{IC} = G_I$ 。以应力强度因子表示的裂纹失稳扩展的临界条件为: $K_I = K_{IC}$ 。式称为脆性断裂的 K 准则, 它表示裂纹

尖端的应力强度因子 K_I 达到某一临近值 K_{IC} 时, 裂纹失稳扩展。

断裂准则的应用步骤: ①确定构件的裂纹尺寸 a 及位置; ②确定应力强度因子 K_I 表达式; ③测定 K_{IC} 值; ④根据 K 准则进行断裂力学分析。

断裂准则的应用范围为: 当含有裂纹的构件受力后, 在原裂纹尖端沿垂直裂纹方向所产生的位移, 通常以 COD 或 δ 表示。设有一无限大板有一长为 $2a$ 的穿透裂纹如图 2 所示, 在裂纹面垂直的方向上于远处作用均布拉伸应力 σ 。按照 D-M 模型, 裂纹尖端的塑性区呈窄条状, 作用均布应力 σ_s 。设塑性区长度为 R , 则 D-M 模型实际上是如下模型: 无限大板远处受均布拉应力 σ , 在与拉应力垂直的方向上有一长为 $2c$, ($2c=2a+2R$) 的穿透裂纹在裂纹上、下表面长为 $2a$ 的范围不受力, 是自由表面, 而在两端长为 R 的区域上, 裂纹上、下表面都受均布拉应力 σ_s 作用。

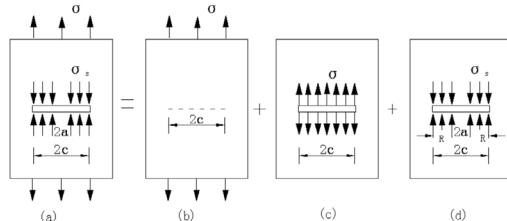


图 2 D-M 模型

①在图 1.2 (b) 所示无裂纹无限大板, $\delta'=0$; ②在图 1.2 (c) 所示含有长为 $2c$ 裂纹的无限大板, 远处不受力, 裂纹表面作用均布压应力 σ , 裂纹表面 $x=a$ 出位移为:

$$\frac{\delta''}{2} = \frac{2\sigma}{E} \sqrt{c^2 - a^2}$$

Wells 提出弹塑性断裂力学的 COD 准则, 该准则可表述为, 当裂纹张开位移 δ 达到临界值 δ_c 时, 裂纹开裂, 即 $\delta = \delta_c$ 。

在材料全屈服区中小裂纹的 COD 与名义应变 e 的关系, Wells 经过大量宽板试验, 归纳出经验公式为:

$$\delta = 2\pi ea \text{ 或 } \delta = 2\pi ea \text{ 或 } \delta / 2\pi ea = e/e_s$$

式中, a 为宽板试样的裂纹一半长度; $e_s=0.002$ 是屈服应变。

Burdekin 等采用中心裂纹和双边裂纹两种宽板试样, 建议经验公式为:

$$\frac{\delta}{2\pi e_s a} = \left(\frac{e}{e_s} \right)^2 \quad \text{当 } \frac{e}{e_s} \leq 0.5 \text{ 时}$$

$$\frac{\delta}{2\pi e_s a} = \frac{e}{e_s} - 0.25 \quad \text{当 } \frac{e}{e_s} > 0.5 \text{ 时}$$

我国压力容器缺陷评定规范 CVDA-1984 中使用的计算公式:

$$\frac{\delta}{2\pi e_s a} = \begin{cases} \left(\frac{e}{e_s} \right) \left(\frac{e}{e_s} \leq 0.5 \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{e}{e_s} + 1 \right) \left(\frac{e}{e_s} > 1 \right) \end{cases}$$

其中: e 为屈服区域中的名义应变, e_s 为材料屈服应变。¹

对于韧性好的材料, 工程断裂分析包括弹塑性断裂力学分析和塑性极限载荷分析两方面内容, 分别用于防止断裂失效和塑性破坏失效。为了同时考虑这两种破坏的可能性, 英国中央电力局 (CEGB) 首先推出了双判据准则。采用失效评定图的方法对裂纹结构进行安全评定。由于物理意义明确, 应用起来简单可靠, 使得失效评定图得到了广泛的应用。随着研究工作的不断深入, 其思想和方法不断完善, 日趋成熟。目前国内外失效评定图的形式多有不同, 呈现出多元化的趋势。下面主要介绍一下 R6 失效评定图:

英国中央电力局 (CEGB) 在 1976 年发表《带缺陷结构的完整性评定》的 R/H/R6 (即 R6 方法) 报告, 给出一条失效评定曲线即失效评定曲线法。其基本思路是: ①当材料处于完全弹性状态时, 结构的失效形式属于脆性断裂控制; ②当材料处于完全塑性状态时, 结构的破坏形式属于韧带材料的流变破坏控制, 此时结构的安全裕度可用塑性极限理论进行计算; ③介于上述两种极限情况之间的状态, 用公式来评定;

$$K_r = S_r \left\{ \frac{8}{\pi^2} \ln \left[\sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{式中, } K_r = \frac{K_I}{K_{IC}}, S_r = \frac{\text{施加载荷}}{\text{失稳载荷}}$$

然而, 此 R6 评定标准有其局限性。首先, 该标准是建立在以 D-M 模型为基础的 COD 理论基础上的。D-M 适用于小范围屈服, 不适用于全面屈服情况, 而 COD 本身并不是一个严密的应变场参量, 物理意义勉强, 不很严格。其次, 公式中的施加载荷采用的是流变应力, 会对评定结果产生一定的影响。

英国 CEGB 与 1986 年修改的 R6 标准, 一般称为新 R6 标准, 定义失效评定曲线为 $K_r=f(L_r)$ 。一般通用的失效曲线为:

$$K_r = (1 - 0.14L_r^2) [0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6)]$$

$$\text{式中, } L_r = \frac{P}{P_0}, K_r = \frac{K_I}{K_{IC}}$$

在图 3 定点的坐标用 (L_r , K_r) 表示; L_r 表示有

裂纹的结构接近塑性屈服程度的度量, 它的定义是评定的载荷条件与引起结构塑性屈服的载荷比, 即 $L_r=P/P_0$; 式中 P 为外加载荷, 对于管道来说为内压, MPa; P_0 为完全塑性状态下构建的极限压力, 其下限值为:

$$P_0 = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \frac{t}{R} \frac{1 - \frac{a}{t}}{1 + \frac{a}{R}}$$

式中, σ_s 为管道材料的屈服极限, MPa; a 为管壁上轴向裂纹长度, m; t 为管道壁厚, m; R 为管道外径, m。

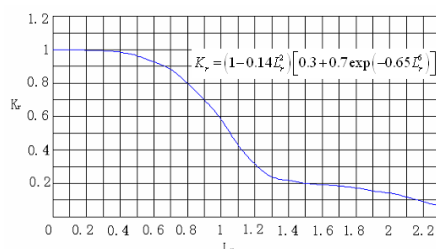


图 3 评定图

失效评定图中的 K_r 表示构件接近断裂失效程度的度量, 它的定义是应力强度因子与材料断裂韧性的比值, 即:

$$K_r = K_I / K_{IC}$$

式中, K_{IC} 为材料的断裂韧性, 可有试验得出; K_I 为对应与构件裂纹尺寸 a 的线弹性应力强度因子, 对于含轴向裂纹的内压管道其值为:

$$K_I = \frac{2PR^2\sqrt{\pi}}{R^2 - R_i^2} F \left(\frac{a}{t}, \frac{R_i}{R} \right)$$

式中, P 为管道内压, MPa; R 为管道外径, m; R_i 为管道内径, m; F 值由下表得出:

表 1 F 值

t/R_i	a/t			
	1/8	1/4	1/2	3/4
1/5	1.19	1.38	2.10	3.30
1/10	1.20	1.44	2.36	4.23
1/20	1.20	1.45	2.51	5.25

新 R6 标准是现在国际上较为先进标准, 能够辨别含有缺陷结构的失效模式、结构的脆性断裂、弹塑性断裂、及塑性失稳分析, 所以被广泛应用于管道的断裂评定。

参考文献:

- [1] 付勇. 海底管线断裂疲劳分析及软件开发 [D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2004(2).
- [2] 胡传炘. 断裂力学及其工程应用 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1989:125-146.