

压力管道焊缝含环向表面裂纹 J 积分估算方法

杨新岐, 霍立兴, 张玉凤, 刘月丽

(天津大学 材料科学与工程学院 天津 300072)

摘 要: 基于 SC. ENG(表面裂纹工程估算)方法的基本原理, 建立了弯矩作用下压力管道焊接接头含有内表面、等深度及有限长度环向表面裂纹的 J 积分近似估算公式, 在计算公式中考虑了焊缝非匹配因素的影响。与 SC. ENG1 和 SC. ENG2 方法相对应, 在此分别称所推导的 J 积分估算方法为 SC. ENG3 和 SC. ENG4 方法。该方法建立在塑性形变理论、Ramberg—osgood 本构关系和等效原则基础上, 通过使裂纹存在时的结构柔度与壁厚局部减薄时模拟结构的柔度相等的方式建立 J 积分的估算公式。有限元数值解验证了上述 J 积分估算公式的有效性。

关键词: 管道; 焊缝非匹配; 表面裂纹; J 积分; 有限元模型

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2002)01-45-04



杨新岐

0 序 言

环向表面裂纹是压力管道中最为常见的一种缺陷, 它会导致压力管道的爆破和泄露, 产生严重的经济和财产损失。因此研究在役压力管道切实可行的安全评估技术是工程界迫切需要解决的问题。对于工程实际中广泛采用的低强度、高韧性管道材料而言, 许多试验和分析表明, 弹塑性断裂力学提供了更为合理的安全评定方法, J 积分是表征材料韧性断裂的有效断裂参量。通常可借助于有限元数值方法计算 J 积分。但有限元方法昂贵费时、工作量大并要求具备较深的专业知识。这对实际工程应用和推广带来许多不便, 因而建立简便易行的 J 积分工程估算方法十分必要^[1]。

在过去的 10 多年中, 许多研究者都为此进行了大量的工作^[2~4]。近年来, Rahmant^[3] 等人提出了两种计算压力管道含环向表面裂纹的 J 积分估算方法, 简称为 SC. ENG1 和 SC. ENG2。这些方法的理论基础为: (1) 塑性形变与传统梁理论; (2) 应力应变关系由 Ramberg—osgood 幂硬化规律表征; (3) 采用一段局部减薄的管道代替实际含环向表面裂纹的管道, 模拟由于焊缝中存在裂纹时管道结构柔度降低的等效原理。由此可以获得近似计算 J 积分的解析表达式。但所建立的 J 积分估算方法都是对均质管道材料而言的, 没有包括母材和焊缝金属非匹配对 J 积分驱动力的显著影响。对管道焊接接头, 尽管可以采用母材或焊缝金属的性能计算 J 积分,

但这样会导致过于保守或危险的评定。对含环向穿透裂纹的管道焊接接头, Rahman 和 Brust 建立了一种考虑母材和焊缝非匹配影响的压力管道含环向穿透裂纹的 J 积分估算公式^[4]。本文基于 Rahman 和 Brust 所提出的 SC. ENG 方法的基本原理, 建立了包含非匹配效应的管道焊缝含环向表面裂纹的 J 积分估算公式。通过有限元数值解验证了上述 J 积分估算公式的有效性。

1 计算模型

如图 1a 所示含环向表面裂纹管道^[4], 管道承受的弯曲载荷为 M , 且管道端面相对于另一端面的转角为 ϕ 。图 1b 给出含表面裂纹管道的横截面图和管道及其表面裂纹的几何形状参数, 一个等深度

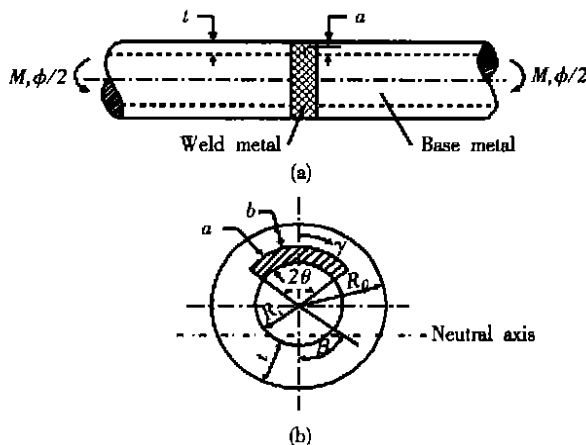


图 1 在弯曲载荷作用下的含内表面裂纹管道

Fig. 1 Pipe with internal surface crack under bending

为 a 的环向表面裂纹位于壁厚为 t 的管道内壁上, 且远离管端, 裂纹的中心角为 2θ , γ 为参考角, 用 γ 可确定沿裂纹前沿的位置。管道中性面的位置由角度 β 确定, R_i 、 R_o 、 R_m 分别是管道的内径、外径和平均半径, b 是位于 $0 \leq \gamma \leq \theta$ 的范围内的无裂纹剩余韧带长度。

如图 2 所示为 SC. ENG2 方法的简化管道模型^[5]。考虑用一段局部减薄的管道代替实际含环向表面裂纹的管道, 模拟由于焊缝中存在裂纹时管道结构柔度的降低。管道长度为 L , 局部壁厚减薄的管道长度为 $;$ 等效壁厚为 t_e , 焊缝平均宽度为 L_w , 一般假定其尺寸为管道壁厚。通过使裂纹存在时的结构柔度与壁厚局部减薄时模拟结构的柔度相等的方式建立 J 积分的估算公式。这种方法适用于弹性和全塑性整个范围。

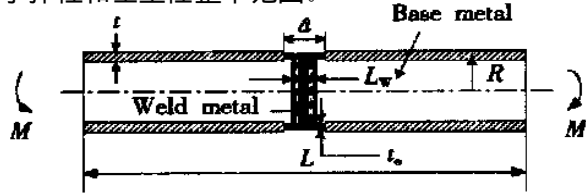


图 2 包括焊缝非匹配效应的管道模型
Fig.2 Pipe model including weld mis-match effects

在 J 积分估算方法中, 通常假设由于裂纹的存在引起的载荷转角 ϕ^c 和相应的裂纹扩展力 J 均可分解为弹性和塑性两部分, 即

$$\phi^c = \phi_e^c + \phi_p^c. \tag{1}$$

$$J = J_e + J_p. \tag{2}$$

在弹性范围内, 弹性转角 ϕ_e 和力矩 M 存在唯一的。如果塑性变形理论成立, 塑性转角 ϕ_p 和 M 也存在唯一关系, 一旦这些关系确定, 弹性分量 J_e 、塑性分量 J_p 和总的能量释放率 J 就能够得到。

2 J 积分估算方法的弹性解

在裂纹最深处的弹性能量释放率定义为

$$J_e = \partial U^T / \partial A = \frac{\partial (U^c + U^{nc})}{\partial A} = \frac{\partial U^c}{\partial A}, \tag{3}$$

式中: U^T 为总的应变能; U^{nc} 为在无裂纹存在情况下的应变能; U^c 与 U^T 和 U^{nc} 是不同的, 它是由于管道中有裂纹存在时而增加的应变能; A 为裂纹面积, 即 $A = 2a\theta(R_m - t/2 + a/2)$ 。对于 I 型裂纹的薄壁管道在裂纹最深处的 J_e 为

$$J_e = K_I^2 / E', \tag{4}$$

式中: $E' = E / (1 - \nu^2)$, E 和 ν 分别代表金属材料的弹性模量和泊松比; K_I 为 I 型裂纹的应力强度因子, 由线弹性断裂力学(LEFM)理论知, 在裂纹最深

点的 K_I 为

$$K_I = \frac{M}{\pi R_m^2 t} F_B(a/t, \theta/\pi) \sqrt{\pi a}, \tag{5}$$

式中: $F_B(a/t, \theta/\pi)$ 是与管道的几何形状参数 a/t , θ/π 有关的无量纲函数。根据 ASME XI 的 IWB-3650 规范^[6], F_B 函数为

$$F_B(a/t, \theta/\pi) = 1.1 + \frac{a}{t} \cdot \left[1 - 0.09967 + 5.0057 \left(\frac{a}{t} \cdot \frac{\theta}{\pi} \right)^{0.565} - 2.8329 \left(\frac{a}{t} \cdot \frac{\theta}{\pi} \right) \right]. \tag{6}$$

将式(4)~式(6)代入式(3)中, U^c 可写为

$$U^c = \frac{M^2}{\pi R_m^4 t^2 E} I_B(a/t, \theta/\pi). \tag{7}$$

$$I_B(a/t, \theta/\pi) = 2\theta \left[R_m - \frac{t}{2} \right] \cdot \int a F_B^2(a/t, \theta/\pi) da + 2\theta \int a^2 F_B^2(a/t, \theta/\pi) da. \tag{8}$$

由于

$$\phi_e^c = \frac{\partial U^c}{\partial M}. \tag{9}$$

与式(7)合并后得到

$$\phi_e^c = \frac{2M}{\pi R_m^4 E} I_B(a/t, \theta/\pi). \tag{10}$$

上式表明在弹性范围内弯矩与弹性转角之间存在唯一的。其中 $I_B(a/t, \theta/\pi)$ 函数表达式详见文献[4]。

3 J 积分估算方法的塑性解

在裂纹最深处的塑性能量释放率 J_p 的定义为

$$J_p = \int_0^M \partial \frac{\phi_p}{\partial A} dM = \frac{\partial}{\partial A} \int_0^M \phi_p dM. \tag{11}$$

上式中如果确定了 M 和 ϕ_p^c 之间的关系, J_p 就很容易确定。采用 Ramberg-Osgood 本构关系(只考虑塑性部分), 假设弯矩与转角的关系为

$$\phi_p^c = \hat{\Theta} M^{n_1}, \tag{12}$$

式中: $\hat{\Theta}$ 为与管道几何尺寸和母材与焊缝性能有关的一个比例常数; n_1 为母材的硬化指数。用幂硬化材料的传统梁理论可得 ϕ_p 与 ϕ_e 的关系^[6] 为

$$\phi_p^c = \frac{\left(\frac{M}{M_{01}} \right)^{n_1} \left(\frac{L_w}{2} - \frac{L_w}{2} \right) \left(\frac{t}{t_e} \right)^{n_1} + \left(\frac{M}{M_{02}} \right)^{n_2} \frac{L_w}{2} \left(\frac{t}{t_e} \right)^{n_2}}{\left[\frac{M}{M_1} \right]^{\epsilon_{01}} \left(\frac{L_w}{2} - \frac{L_w}{2} \right) \frac{t}{t_e} + \left[\frac{M}{M_2} \right]^{\epsilon_{02}} \frac{L_w}{2} \frac{t}{t_e}} \phi_e^c, \tag{13}$$

式中: t_e 分别为局部减薄管道的宽度和等效壁厚; L_w 为焊缝宽度。 M_i 和 M_{0i} 的定义如下述, ϵ_{0i} 和 n_i 的下标 $i = 1, 2$ 时分别表示管道母材和焊缝金属的屈服应变和硬化指数。将式(10)代入式(13)并结合式(12), 可推导 $\hat{\Theta}$ 为

$$\begin{aligned} \dot{\Theta} = & \frac{\sigma_w L_w}{2 B M_{01}^{n_1}} H(a/t)^{n_1-1} G(a/t) + \\ & \frac{L_w M^{n_2-n_1}}{2 B M_{02}^{n_2}} H(a/t)^{n_2-1} G(a/t), \end{aligned} \quad (14)$$

式中:

$$\begin{aligned} H(a/t) = & t/t_e, \quad G(a/t) = \frac{2}{\pi R_m t^4 E'} I_B(a/t, \theta/\pi), \\ B = & \frac{\epsilon_{01}}{M_1} \left(\frac{\sigma_w L_w}{2} \right) + \frac{\epsilon_{02}}{M_2} \frac{L_w}{2}, \\ M_i = & \frac{\sigma_{0i} I}{R}, \quad I = \pi R^3 t, \\ M_{0i} = & \frac{4 K_i I \hat{K}_i}{\pi R}, \quad K_i = \frac{\sigma_{0i}}{(\alpha_i \epsilon_{0i})^{1/n_i}}, \\ \hat{K}_i = & \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{2n_i}\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{2} + \frac{1}{2n_i}\right)}. \end{aligned}$$

上述公式中, 参数 σ_{0i} , ϵ_{0i} , α_i 和 n_i 的下标 $i=1, 2$ 时分别表示管道母材和焊缝金属所对应的材料性能。对 $\partial \dot{\Theta} / \partial a$ 进行推导, 可得 J_P 的表达式为式(15), 即

$$\begin{aligned} J_P = & \frac{M^{n_1+1}}{4 t B \theta (R_m - t/2 + a) (n_1 + 1)} \left\{ \frac{\sigma_w L_w}{M_{01}^{n_1}} \right. \\ & \left[H(a/t)^{n_1-1} \frac{dG(a/t)}{d(a/t)} + (n_1 - 1) G(a/t) \cdot \right. \\ & \left. \left. H(a/t)^{n_1-2} \frac{dH(a/t)}{d(a/t)} \right] + \frac{L_w M^{n_2-n_1}}{M_{02}^{n_2}} \right. \\ & \left. \left[H(a/t)^{n_2-1} \frac{dG(a/t)}{d(a/t)} + (n_2 - 1) G(a/t) \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. H(a/t)^{n_2-2} \frac{dH(a/t)}{d(a/t)} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (15)$$

应该指出利用式(15)求解 J_P 时, 根据 $H(a/t)$ 定义还需要估算管道简化模型的等效厚度 t_e 。分别基于原始 NSC(净截面屈服)公式和 Kurihara 的修正公式两种方法来求解 J_P 。这样可以推导出两种不同的包括焊缝非匹配效应的表面裂纹 J 积分工程估算方法, 在此与 SC.ENG1 和 SC.ENG2 方法相对应, 分别称为 SC.ENG3 和 SC.ENG4 方法。 $H(a/t)$ 和 $dH(a/t)/d(a/t)$ 详细的函数形式可见文献[4]。

4 J 积分估算方法与数值结果的验证

采用不同匹配管道焊接接头数值结果对 J 积分估算方法的有效性进行了验证。为简化计算, 假设实际管道接头为母材与焊缝金属组成的接头, 在焊缝中心存在一表面裂纹(图 1)^[7, 8]。选定母材的

材料参数不变, 焊缝屈服强度则根据强度匹配因子 $P_M = \sigma_{0w} / \sigma_{0b}$ 的大小来调整, 不计残余应力和 HAZ(热影响区)性能影响。管道尺寸为 $\phi 108 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 表面裂纹半角 θ 为 45° , 裂纹深度 $a/t = 0.5$ 。有关参数如下, 母材: $\sigma_{0b} = 327.6 \text{ MPa}$, $E = 202 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $n = 4.245$, $\alpha = 8.77$; 焊缝: $\sigma_{0w} = P_M \sigma_{0b}$, $E = 200 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $n = 7.0$, $\alpha = 1.0$, 其中: σ_0 为屈服强度; E 为弹性模量; ν 为泊松比; n 为材料的应变硬化指数; α 为材料的应变硬化常数。下标 w 表示焊缝材料的性能; b 表示母材材料的性能。对匹配因子为 $P_M = 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3$ 进行了分析, $P_M = 0.7, 0.8, 0.9$ 为低匹配情况, $P_M = 1.1, 1.2, 1.3$ 为高匹配情况。

图 3 表示低匹配接头中分别用 FEM(有限元

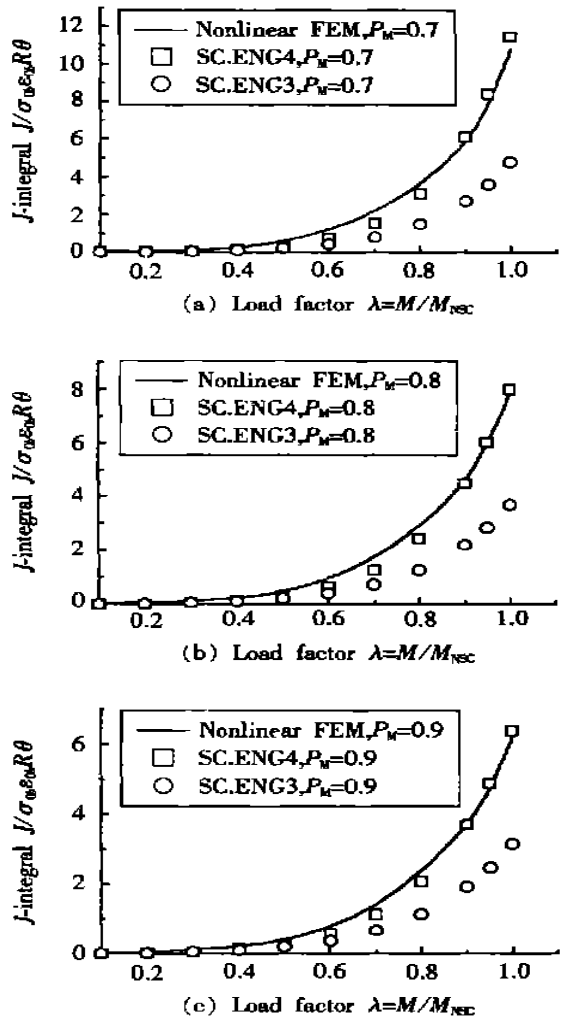


图 3 低匹配下 FEM 解与 J 积分估算值的比较

Fig. 3 Comparison of J -estimation and FEM solutions for undermatching joints

法)和 SC.ENG3 与 SC.ENG4 方法计算的无量纲参数 $J / \sigma_{0b} \epsilon_{0b} R \theta$ 和 M / M_{NSC} 的关系曲线。由图可见, 对低匹配接头 SC.ENG4 方法提供了合理的 J 积分

估算值, 在高载荷范围 SC.ENG3 方法计算的 J 积分值明显低于 FEM 的计算结果。这是由于在 SC.ENG3 方法中, 采用 Kanninen 净截面(NSC)方程将过高地估算等效厚度 t_e 的值, 而 SC.ENG4 方法中的 Kurihara 修正的净截面(NSC)方程能够给出合理的等效厚度的 t_e 估算值, 因而其 J 积分估算值也比较合理。

图 4 表示高匹配接头中分别用 FEM 和 SC.ENG3 与 SC.ENG4 方法计算的无量纲参数 $J/\sigma_0 b R \theta$ 和 M/M_{NSC} 的关系曲线。同样可得对不同匹配因子 SC.ENG4 方法给出较为合理的 J 积分估算值。

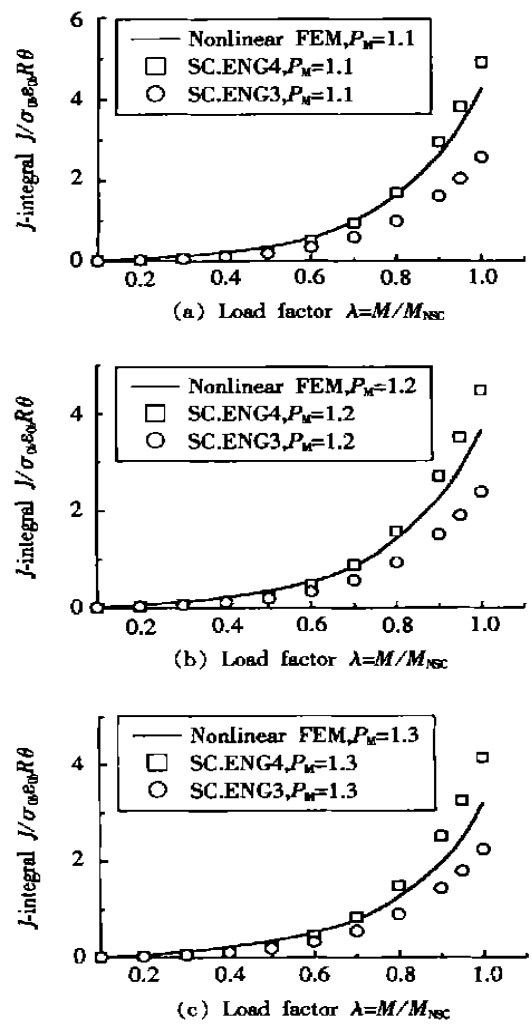


图 4 高匹配下 FEM 解与 J 积分估算值的比较
Fig. 4 Comparison of J -estimation and FEM solutions for overmatching joints

5 结 论

(1)本文基于 SC.ENG 方法的基本原理, 建立了弯矩作用下压力管道焊接接头含有内表面、等深度及有限长度环向表面裂纹的 J 积分近似估算公

式, 在计算公式中考虑了焊缝非匹配因素的影响。该方法建立在塑性形变理论、Ramberg—osgood 本构关系和等效原则基础上, 通过使裂纹存在时的结构柔度与壁厚局部减薄时模拟结构的柔度相等的方式建立 J 积分的估算公式。

(2)有限元数值结果表明, 对不同强度匹配情况 SC.ENG4 方法提供了更为合理及准确的 J 积分估算值, SC.ENG3 方法的计算结果一般低于有限元数值解。这两种 J 积分估算公式为定量考虑非匹配效应对管道焊接接头表面裂纹 J 积分驱动力的影响提供了依据。

参考文献:

[1] Kumar V , Geman M D . Elastic — plastic fracture analysis of through — wall and surface flaws in cylinders[R] . EPRI NP — 5596, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1988.

[2] Ahmad J, Papaspyropoulos V, Brust F W, *et al.* A predictive J — estimation method for circumferentially surface cracked pipes of power — law hardening materials in pure bending[A] . Proceedings of the 1989 ASME pressure vessels and piping conference (2)[C] . New York: American Society of Mechanical Engineers, 1989. 71 ~ 85.

[3] Rahman S, Brust F W. Approximate methods for predicting J — integral of a circumferentially surface — cracked pipe subjected to bending[J] . International Journal of Fracture, 1997, 85: 111 ~ 130.

[4] Rahman S, Brust F W. An estimation method for evaluating energy release rates of circumferential through — wall cracked pipe welds[J] . Engineering Fracture Mechanics, 1992, 43 (3): 417 ~ 430.

[5] Rahman S, Brust F W. Elastic — plastic fracture of circumferential through — wall cracked pipe welds subjected to bending[J] . Journal of Pressure Vessel Technology, 1992, 114(3): 410 ~ 416.

[6] ASME B, PV Code Section XI IWB 3650 and Appendix H, Evaluation procedures and acceptance criteria for ferritic piping[S] . The ASME, 1992. 449 ~ 473.

[7] 杨新岐. 非均质焊接 J 积分虚拟裂纹扩展计算方法研究[J] . 机械工程学报, 1995 31(5): 109 ~ 115.

[8] 刘月丽. 在役含缺陷管道及其焊接接头 J 积分理论和估算方法研究[D] . 天津: 天津大学, 2000.

作者简介: 杨新岐, 男, 1962 年 8 月出生, 博士后, 副教授。主要从事焊接结构强度与断裂、断裂力学及数值模拟等方面的教学与科研工作。发表论文 20 余篇。

Email: yangxing@tj.cnurnet.net

(编辑: 成炳煌)