

波浪作用下环形管的塌陷

孙明光, 赵 陶, 胡由展, 詹杰民
(中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 讨论截面为圆形的环形管, 在波浪作用下, 以及因初始裂缝, 初始变形, 外部超压的联合影响而产生的局部塌陷问题, 并给出算例。

关键词: 环形管; 波浪力; 局部塌陷

中图分类号: P751 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 03-0111-03

管状结构在波浪作用下会发生塌陷及裂开或其它形式的破坏, 见文 [1, 2]。本文应用文 [1] 的方法, 讨论一条环形圆管在波浪弯矩, 初始裂缝, 初始变形, 以及外部超压的联合影响下, 可能产生的局部塌陷现象。

1 管壁存在初始裂缝情况下圆管的极限抗弯能力

假设所讨论的环形管为完全的塑性体, 管截面已达到屈服状态, 但仍然保持圆形。为简化起见, 同时假设初始裂缝以弯曲平面为对称面, 壁厚在一个适中的范围。如图 1 所示, 截面中的 I 区, 以及 II 区为受压区, 应力记为 $(\sigma_{LC}, \sigma_\theta)$, III 区为拉伸区, 应力记为 $(\sigma_{LT}, \sigma_\theta)$ 。记 I 区面积为 A_1 , II 区面积为 A_2 , III 区面积为 A_3 , r_a 为半径, 等于 $\frac{1}{2}(D-t)$ 。

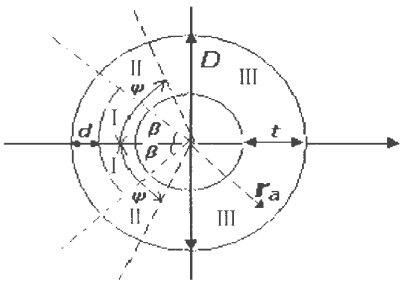


图 1 全塑性管截面

Fig 1 Fully plasticified pipe cross-section

ψ 为划分压缩区与拉伸区的角度, β 为初始裂缝的角度, t 为管厚, d 为初始裂缝深度, D 为管外径。故作用在截面的轴向力 F 为

$$F = \sigma_{LC}(A_1 + A_2) + \sigma_{LT}A_3 = 2\sigma_{LC}at \left[\beta \left(1 - \frac{d}{2r_a} \right) \left(1 - \frac{d}{t} \right) + (\psi - \beta) \right] +$$

$$2\sigma_{LT}rat(\pi - \psi)$$

由上式得:

$$\psi = \frac{F - 2\beta rat\sigma_{LC} \left[\left(1 - \frac{d}{2r_a} \right) \left(1 - \frac{d}{t} \right) - 1 \right]}{2rat(\sigma_{LC} - \sigma_{LT})} - \frac{2\pi rat\sigma_{LT}}{2rat(\sigma_{LC} - \sigma_{LT})} \quad (1)$$

根据 Von Mises 屈服准则, 屈服应力 σ_y 与管的纵向应力 σ_L 及周向应力 σ_θ 有如下关系

$$\sigma_L = \frac{1}{2}\sigma_\theta \pm \sigma_y \sqrt{1 - \frac{3}{4}\left(\frac{\sigma_\theta}{\sigma_y}\right)^2}$$

其中, +号对应于拉应力, -号对应于压应力, 即

$$\sigma_{LT} = \frac{1}{2}\sigma_\theta + \sigma_y \sqrt{1 - \frac{3}{4}\left(\frac{\sigma_\theta}{\sigma_y}\right)^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{LC} = \frac{1}{2}\sigma_\theta - \sigma_y \sqrt{1 - \frac{3}{4}\left(\frac{\sigma_\theta}{\sigma_y}\right)^2} \quad (3)$$

将 (2), (3) 式代入 (1) 式, 得

$$\psi = \frac{F - \sigma_\theta \beta rat \left[\left(1 - \frac{d}{2r_a} \right) \left(1 - \frac{d}{t} \right) - 1 \right] - \sigma_\theta \pi rat}{-4\sigma_y rat \sqrt{1 - \frac{3}{4}\left(\frac{\sigma_\theta}{\sigma_y}\right)^2}} + \frac{\pi - \beta \left[\left(1 - \frac{d}{2r_a} \right) \left(1 - \frac{d}{t} \right) - 1 \right]}{2}$$

因此所讨论的圆管可以承受的弯矩为

$$M_c = \sigma_{LT}A_3y_3 - \sigma_{LC}A_2y_2 - \sigma_{LC}A_1y_1$$

其中, $A_{ij}y_j$ 是面积 I, II, III 分别到中性轴的面积矩, 上式也可以表示为

$$M_c = 2tr_a^2 \left\{ \left[1 - \left(1 - \frac{d}{2r_a} \right)^2 \left(1 - \frac{d}{t} \right) \right] \right\}.$$

* 收稿日期: 2001-09-21

基金项目: 国家十五科技攻关计划资助项目 (2001BA505B02); 广东省重大科技兴海资助项目 (A20099C01); 广东省十五科技计划资助项目 (A3050305)

作者简介: 孙明光 (1938-), 男, 教授, E-mail: stssmg@zsu.edu.cn

$$\sin \beta \left[\frac{1}{2} \sigma_0 - \sigma_y \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_y} \right)^2} \right] + \sin \psi \left[2 \sigma_y \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_y} \right)^2} \right] \quad (4)$$

而允许的载荷弯矩 M 应满足: $M < M_c$ 。

2 外部超压及初始变形对管极限抗弯能力的影响

设截面存在初始径向变形:

$$w_i = w_1 \cos 2\theta \quad (5)$$

在外部超压 $\bar{p}_e$ 作用下所产生的径向位移 w 应满足方程

$$\frac{d^2 w}{d\theta^2} + w = -\frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} M_e \frac{D}{2} \quad (6)$$

其中, ν 为泊松比, E 为杨氏模量, M_e 为单位管长时外压 $\bar{p}_e$ 作用产生的弯矩,

$$M_e = \bar{p}_e \frac{D}{2} (w + w_1 \cos 2\theta) \quad (7)$$

将 (5), (7) 式代入 (6) 式, 得

$$\frac{d^2 w}{d\theta^2} + w \left[1 + \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} \bar{p}_e \left(\frac{D}{2} \right)^3 \right] = -\frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} \bar{p}_e \left(\frac{D}{2} \right)^3 w_1 \cos 2\theta$$

上式定解条件是:

$$w = 0 \text{ 及 } \frac{d^2 w}{d\theta^2} = 0, \left(\theta = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4} \right)$$

故解为:

$$w = \frac{w_1 \bar{p}_e}{p_{eL} - \bar{p}_e} \cos 2\theta \quad (8)$$

其中, $p_{eL} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{2t}{D} \right)^3$

将 (8) 式代入 (7) 式后, 可知其在 $\theta=0$ 及 $\theta=\pi$ 处取最大值 $M_{c \max}$:

$$M_{c \max} = \bar{p}_e \left(\frac{D}{2} \right) \frac{w_1}{1 - \bar{p}_e / p_{eL}}$$

管屈服应力 σ_y 应由均匀压缩应力 σ_a 与弯曲应力 σ_b 之和所平衡, 因此

$$\sigma_y = \frac{\bar{p}_e}{t} \left(\frac{D}{2} \right) + 6 \frac{\bar{p}_e}{t^2} \left(\frac{D}{2} \right) \frac{w_1}{1 - \bar{p}_e / p_{eL}}$$

或

$$\bar{p}_e^2 - \left[\frac{2\sigma_y t}{D} + \left(1 + 6 \frac{w_1}{t - d} p_{eL} \right) \right] \bar{p}_e + \frac{2\sigma_y t}{D} p_{eL} = 0 \quad (9)$$

如果考虑到有初始裂缝, 则以 $(t-d)$ 代替 t , 上式变为

$$\bar{p}_e^2 - \left[\frac{2\sigma_y (t-d)}{D} + \left(1 + 6 \frac{w_1}{t-d} p_{eL} \right) \right] \bar{p}_e + \frac{2\sigma_y (t-d)}{D} p_{eL} = 0 \quad (10)$$

允许的外压 p_e 应满足 $p < \bar{p}_e$, 而在弯曲及外压联合作用下, 所允许的弯矩 M 应满足^[1]

$$\frac{M}{M_c} < \sqrt{1 - \left(\frac{p_e}{\bar{p}_e} \right)^2} \quad (11)$$

3 环形圆管在波浪中所承受的弯矩

设环形管水平系泊于水中, 受到沿 z 负方向波浪作用, 为简化, 只考虑作用在管上的水动力阻力。

设 $AEBF$ 为环状管, E 为一系泊点 (图 2)。为了方便理解, 不考虑流-固相对运动, 波浪产生的周期流作用于 H 点一微元段的法向阻力为^[3]

$$C_d \frac{1}{2} \rho_w (\nu \cos \alpha)^2 D R d\alpha$$

其中, C_d 为阻力系数, ρ_w 为水密度, ν 为质点 z 向流速, D 为管外径, R 为环半径。故作用在 FB 段的合力在 x 向分量为:

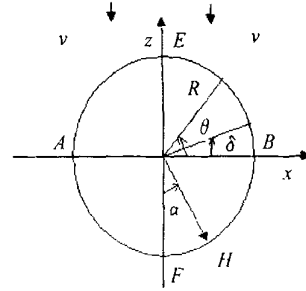


图 2 在波浪力作用下的环形管

Fig 2 Pipe-ring under wave forces

$$T_{Bx} = - \int_0^{\pi/2} C_d \frac{1}{2} \rho_w (\nu \cos \alpha)^2 D R \sin \alpha d\alpha = -\frac{1}{3} C_d \frac{1}{2} \rho_w \nu^2 D R$$

作用在 FB 段的合力在 z 分量为

$$T_{Bz} = \int_0^{\pi/2} C_d \frac{1}{2} \rho_w (\nu \cos \alpha)^2 D R \cos \alpha d\alpha = -\frac{2}{3} C_d \frac{1}{2} \rho_w \nu^2 D R$$

类似的推导可知, 作用在 BE 段的合力在 x 向分量为

$$-\frac{1}{3} C_d \frac{1}{2} \rho_w \nu^2 D R$$

z 向分量为

$$-\frac{2}{3} C_d \frac{1}{2} \rho_w \nu^2 D R$$

因此, 作用在右半环的水动力合力的 x 分量为零,

z 分量为

$$-\frac{4}{3} C_d \frac{1}{2} \rho_w \nu^2 D R$$

记

$$T_0 = C_d \frac{1}{2} \rho_w \nu^2 D R$$

则右半环合力 $T_{z(\text{右})} = \frac{4}{3} T_0, T_{x(\text{右})} = 0$

类似地 $T_{z(\text{左})} = -\frac{4}{3}T_0$, $T_{x(\text{左})} = 0$
因环形管的水动力为 E 点的系泊力所平衡, 故在 E 点的系泊力为

$$T_E = -(T_{z(\text{右})} + T_{z(\text{左})}) = \frac{8}{3}T_0$$

现将右半环的水动力简化到 B 点, 则在该点除作用有合力之外, 还有合力矩 $M_{\text{右}}$:

$$M_{\text{右}} = \frac{4}{3}T_0R, \text{方向为逆时针}$$

类似的, 将左半环的水动力简化到 A 点, 则在该点除了有合力 $T_{z(\text{左})}$ 之外, 还有合力矩 $M_{\text{左}}$:

$$M_{\text{左}} = -\frac{4}{3}T_0R, \text{方向为顺时针}$$

在水动力及系泊力作用下, 管某点 C 弯矩 $M_{(C)}$:

当 C 处于 BE 段 $\left(0 < \theta < \frac{\pi}{2}\right)$:

$$M_{(C)} = M_{\text{右}} + \frac{4}{3}T_0R(1 - \cos \theta) = \frac{4}{3}T_0R(2 - \cos \theta)$$

当 C 处于 AE 段 $\left(\frac{\pi}{2} < \theta < \pi\right)$:

$$\begin{aligned} M_{(C)} &= M_{\text{右}} + \frac{4}{3}T_0R(1 - \cos \theta) - T_ER \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= \frac{4}{3}T_0R + \frac{4}{3}T_0R(1 - \cos \theta) + \frac{8}{3}T_0R \cos \theta = \\ &= \frac{4}{3}T_0R(2 + \cos \theta) \end{aligned}$$

在 E 点的弯矩最大, 它等于

$$M_{(E)} = \frac{4}{3}T_0R \tag{12}$$

4 算 例

已知

- (a) $D = 0.2 \text{ m}$, $t = 0.015 \text{ m}$, $\beta = \frac{\pi}{4}$, $\sigma_y = 60 \text{ MPa}$, $p_e = 0.135 \text{ MPa}$, 轴向应力 $F = -60 \text{ KN}$ 。
- (b) 材料密度 $\rho = 970 \text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E =$

600 MPa , 泊松比 $\nu = 0.45$, 非圆度 $f_0 = \frac{D_{\text{max}} - D_{\text{min}}}{D} = 0.2$, $w_1 = \frac{f_0 D}{4} = -0.01$ 。

(c) 流体质点速度 $v = 2.1 \text{ m/s}$, 水密度 $\rho_w = 1\,000 \text{ kg/m}^3$, $R = 5 \text{ m}$ 。

解: 由(a), (b) 及(4), (11) 式知, 允许极限弯矩 M 随裂纹深度 d 的增加而减少, 如图(3) 所示。如果 $d/t = 0.1$, 则 $M = 33 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 由(c) 及式(12) 可知, 实际在系泊点 E 处的外载荷弯矩 $M_{(E)} = \frac{3}{8}T_0R = 35 \text{ kN} \cdot \text{m} > 33 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

可以预估, 环形管将塌陷, 这与实践观察相符。在此算例中, 波浪力影响是导致塌陷的主要因素。

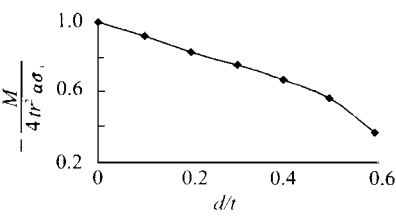


图 3 极限弯矩随裂纹深度的变化规律

ig. 3 Bending moment capacity as a function of defect depth

5 结 论

本文对于遭受波浪力及因初始裂缝, 初始变形, 外部超压的联合作用下的环形管的塌陷提出了 1 种估算方法, 通过计算可以预估各因素影响轻重, 为工程设计提供 1 条途径。

参考文献:

- [1] BAO Y, HANCH S. Collapse capacity of corroded pipes under combined pressure, longitudinal force and bending [J] . Int J Offshore and Polar Eng, 2001, 11(1): 55—63.
- [2] BAI Y, IGLAND R, MOAN T. Tube collapse under combined external pressure, tension and bending[J] . J Marine Struct, 1997, 10(5): 389—410.
- [3] SARPKEYA T, ISAACSON M. Mechanics of wave forces on offshore structures[M] . New York: Litton Educational Pub, 1981.

Collapse of a Pipe Ring under Wave Force

SUN Ming guang, ZHAO Tao, HU You zhan, ZHAN Jie min

(Department of Applied Mechanics and Engineering,

Sun Yat sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The local collapse of a ring of pipe with circular cross section subjected to wave forces and combining effects of initial fracture, initial out of roundness, and external overpressure, is discussed in the present paper. A case is also given numerically.

Key words: pipe ring; wave force; local collapse