

自紧炮管的疲劳寿命分析

王志群 查子初 朱务学

(华东工学院)

摘要 本文用有限单元法计算了自紧残余应力对应的炮管的应力强度因子。自紧残余应力采用了符合炮管材料具有强化和包辛格效应性能推导的公式计算,根据工作内压和残余应力共同作用下炮管的总应力强度因子和测定的炮钢断裂韧度及疲劳裂纹扩展性能,分析了自紧炮管的疲劳寿命及自紧度和裂纹构形对疲劳寿命的影响。

关键词 自紧炮管,疲劳寿命

1. 引言

炮管多次发射后炮膛内壁将产生龟裂,继续射击可能因疲劳而产生灾难性事故,国外已将疲劳寿命列为鉴定炮管安全的内容^[1],并探求用断裂力学理论来预测炮管的疲劳寿命,然而现有的工作在炮管自紧残余应力、断裂力学参量 K_I 和疲劳寿命等计算方法上仍比较近似^[2-4]。

为提高自紧炮管疲劳寿命计算精度,本文用符合炮钢具有强化和包辛格效应真实性能的混合强化材料模型,推得的自紧炮管残余应力的精确解析式,用合理的有限单元法方案求解自紧残余应力对应的应力强度因子,得到了工作内压与自紧残余应力共同作用下的应力强度因子公式。通过实验测定的炮管钢的断裂韧度及疲劳裂纹扩展速率,计算了自紧炮管的疲劳寿命,研究了裂纹构形和自紧度对寿命的影响。

2. 自紧炮管的残余应力公式

我们根据炮管钢的实际性能,推导了炮管自紧后的周向残余应力 σ_θ^R 的精确解析式为^[5]:

$$\frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{1}{1+\alpha_1} \left(1 + \ln \frac{r}{\rho} \right) - \frac{2[\iota(1+\alpha_1)+\alpha_2]}{(1+\alpha_1)(1+\alpha_3)} \left(1 + \ln \frac{r}{\rho^*} \right) \right\}$$

$$\sigma_\theta^R = \begin{cases} -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{R_2^2} \right) + \frac{\alpha_1}{2(1+\alpha_1)} \\ \times \left(1 + \frac{\rho^2}{r^2} \right) - \left[\iota - \frac{\alpha_2}{1+\alpha_1} \right. \\ \times \left. \left(\frac{\rho^2}{\rho^{*2}} - 1 \right) - \frac{\iota(1+\alpha_1)+\alpha_2}{(1+\alpha_1)(1+\alpha_3)} \right] \\ \times \left(1 + \frac{\rho^{*2}}{r^2} \right) + \left[\iota - \frac{\alpha_2}{1+\alpha_1} \right. \\ \times \left. \left(\frac{\rho^2}{\rho^{*2}} - 1 \right) \right] \left(1 - \frac{\rho^{*2}}{R_2^2} \right) \} \\ R_1 \leq r \leq \rho^* \quad (1) \\ \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{1}{1+\alpha_1} \left(1 + \ln \frac{r}{\rho} \right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{R_2^2} \right) + \frac{\alpha_1}{2(1+\alpha_1)} \left(1 + \frac{\rho^2}{r^2} \right) - \left[\iota - \frac{\alpha_2}{1+\alpha_1} \left(\frac{\rho^2}{\rho^{*2}} - 1 \right) \right] \times \frac{\rho^{*2}}{R_2^2} \left(\frac{R_2^2}{r^2} + 1 \right) \right\} \quad \rho^* \leq r \leq \rho \\ \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{\rho^2}{2R_2^2} - \frac{\rho^{*2}}{R_2^2} \left[\iota - \frac{\alpha_2}{1+\alpha_1} \right. \right. \\ \times \left. \left. \left(\frac{\rho^2}{\rho^{*2}} - 1 \right) \right] \right\} \left(\frac{R_2^2}{r^2} + 1 \right) \\ \rho \leq r \leq R_2 \end{cases}$$

式中, R_1 和 R_2 为炮管的内和外半径, ρ 和 ρ^* 为自紧加压时管壁屈服区外半径和卸压后反向屈服区的外半径, α_1 、 α_2 、 α_3 和 ι 是材料常数,可由炮钢单轴拉压 σ - ϵ 曲线求得。

根据设计规定的自紧度可求得 ρ , 再按下式计算 ρ^* ,

$$\frac{\rho^{*2}}{R_1^2} = e^{\left\{ -1 + \frac{1+\alpha_3}{2[\iota(1+\alpha_1)+\alpha_2]} \left[\ln \frac{\rho^4}{R_1^4} + \left(1 - \frac{\rho^4}{R_2^4} \right) + (\alpha_1 + 2\alpha_3) \left(\frac{\rho^4}{R_1^4} - \frac{\rho^4}{R_2^4} \right) - \left[(1+\alpha_3) \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right) - \iota \right] \frac{\rho^{*4}}{R_1^4} \right] \right\}} \quad (2)$$

对于炮管开端自紧(1)式中 $\frac{2\sigma_2}{\sqrt{3}}$ 应改为 $1.11\sigma_2$ 。

3. 自紧残余应力对应的炮管内壁裂纹尖端的应力强度因子

炮管壁内残余应力为自相平衡的分布力系,通过迭加原理及等效节点载荷移置,用有限单元法计算了内壁具有轴向边裂纹的炮管自紧残余应力对应的应力强度因子,网格如图1所示。裂纹尖端用退化三角形四分之一中点奇异等参元,其余均为标准八节点等参元。载荷移置编程计算。按照断裂力学位移公式

$$K_I^* = \frac{\sqrt{2\pi}EV^*}{4(1-\nu^2)\sqrt{r}} \quad (3)$$

将有限元法计算的裂纹面垂直位移 V^* , 换算为应力强度因子 K_I^* , 外推得裂尖的 K_{IR} 。

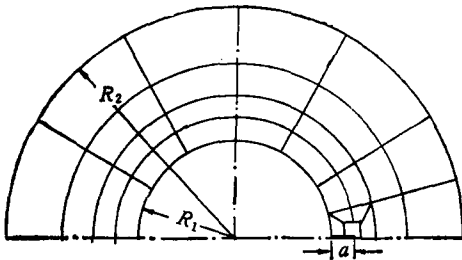


图 1

4. 内壁轴向边裂纹自紧炮管的疲劳寿命

疲劳裂纹扩展寿命 N_p , 根据炮管脉动循环载荷可用下式计算。

$$N_p = \int_{a_0}^{a_c} [c\Delta K]^n da \quad (4)$$

式中 a_0 为炮管初期发射龟裂的深度, a_c 是临界裂纹深度, ΔK 是应力强度因子变程, c, n 为材料常数。

本文所算炮管的 $R_1 = 60\text{mm}$, $R_2 = 125\text{mm}$, 材料为 40CrNi 3MoV 钢, 其性能 $\sigma_s = 1250\text{MPa}$, $\alpha_1 = 0.0246$, $\alpha_2 = 0.0384$, $\alpha_3 = 1.28$, $\beta = 0.631$, $E = 200\text{GPa}$, $\mu = 0.27$, $K_{IC} = 139.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $\frac{da}{dN} = 2.13 \times 10^{-10} \Delta K_1^{3.242} (\text{m}/\text{周})$, 自紧度为 50% 和 70%, 内压 $p = 540\text{MPa}$ 。

按本文有限元法方案, 计算得到各自紧度不同裂纹长度的残余应力对应的应力强度因子 K_{IR} , 内压 p 引起的应力强度因子 K_{IP} 可由手册 [6] 查得, 得自紧炮管总应力强度因子 K_I

$$K_I = K_{IP} - K_{IR} = y(a)\sqrt{\pi a} \quad (5)$$

70% 自紧度时,

$$y(a) = 29.12 - 0.33a + 0.023a^2 - 1.49 \times 10^{-4}a^3 \quad (6)$$

50% 自紧度时,

$$y(a) = 31.53 - 0.32a + 0.036a^2 - 1.49 \times 10^{-4}a^3 \quad (7)$$

未自紧时,

$$y(a) = 49.65 - 0.8a + 0.037a^2 - 1.49 \times 10^{-4}a^3 \quad (8)$$

取 $a_0 = 0.5\text{mm}$, 由 $K_I = K_{IC}$ 求得 a_c , 代入式 (4) 计算得疲劳裂纹扩展寿命 N_p , 列入表 1 中, 所得 $a-N$ 曲线见图 2 实线。

表 1 自紧炮管各参量的计算结果

自紧度	ρ (mm)	ρ^* (mm)	a_c (mm)		N_p (次)	
			穿透 裂纹	表面 裂纹	穿透 裂纹	表面 裂纹
70%	105.5	77.28	7.98	15.15	2820	9650
50%	92.5	72.9	6.48	12	2084	7146
0%	0	0	2.72	6	397	1561

5. 内壁有轴向表面裂纹自紧炮管的疲劳寿命

实际炮管中大多为表面裂纹, 如图 3。表面裂纹疲劳扩展规律比较复杂, 受载荷类型、 a/b 和 a/t 的影响, 为工程计算方便, 将表面裂纹转换为相当的穿透裂纹计算。炮管很长, 仅需考虑深度 a 的扩展。由文献 [7]、[8] 可见, 表面裂纹最深点 A 的应力强度因子 $K_{I,A}$ 与 a/b 有关, 对于每一一定 a/b 值的 $K_{I,A}$ 随 a/t 值增加而降低, 直至 $a/t \geq 0.5$ 以后才上升, 此与穿透裂纹 K_I 随 a/t 的变化规律类似, 例如, $a/b = 0.8$ 的表面裂纹, 不同 a/t 的 $K_{I,A}$ 值均不大于有相同 a/t 的穿透裂纹 K_I 的 0.7 倍, 因而可将前 K_I 式 (5) 中的 $y(a)$ 函数式 (6)、

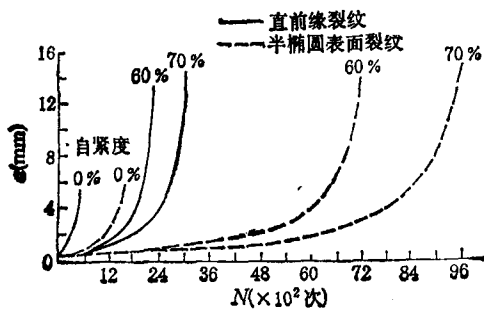


图 2

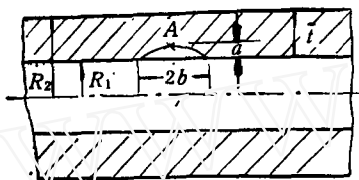


图 3

(7)和(8)中各项均乘以 0.7 系数,以作为计算该表面裂 K_{IA} 的公式,由材料试验知表面裂纹 $\frac{da}{dN}$ 均不大于穿透裂纹的 $\frac{da}{dN}$ 值,从偏于安全角度,可采用穿透裂纹的 $\frac{da}{dN}$ 结果,用式(4)计算,对于 $a/b = 0.8$ 时的表面裂纹的 a_c, N_p 也列入表 1 中, $a-N$ 曲线见图 2 中虚线. 对于其它 a/b 的表面裂纹,均可用类似方法计算.

6. 讨论

5.1 由本文可见自紧度和裂纹构形对疲劳裂纹扩展寿命影响大,设计时应考虑其影响. 本文采用了自紧残余应力的精确解析式,提高了计算疲劳寿命的精度.

5.2 初始裂纹尺寸对疲劳寿命影响很大,而临界裂纹尺寸的影响较小.

5.3 本文仅计算交变内压对应的疲劳寿命 N_p , 将其乘以 0.85 系数,即 $0.85N_p$, 为同等内压条件下火炮发射的打炮的疲劳寿命数^[4], 此关系还需进一步研究.

张忠志、冯梅仪和曹秀红同志参加了本文的疲劳实验工作,在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 美国陆军试验与鉴定司令部试验操作规程选编第三卷(2)“炮管寿命”兵器工业部科技局(1984).
- [2] Underwood, J. H., Throop, J. F., AD A087154 (1979).
- [3] Parker, P., AD A109081 (1981).
- [4] Underwood, J. H., Kendall, D. P., AD A116286 (1982).
- [5] 朱务学、查子初,《力学学报》增刊, (1987) 245~254.
- [6] 中国航空研究院主编《应力强度因子》手册,科学出版社(1981).
- [7] Tan, C. L., Feather, R. T., *International Journal of Fracture* 16. 3 (1980).
- [8] 王志群,用边界元计算半椭圆表面裂纹的应力强度因子,《第二届工程中边界元法会议论文集》,1(1988), 280~287.

(本文于 1988 年 10 月 27 日收到)

船舶横向重力下水过程动力学分析

叶志明

(上海工业大学土木系)

冯燕伟 俞焕然

(兰州大学力学系)

提要 本文对现代船舶制造中的新工艺——船舶横向重力下水的动力学过程,作了详尽的理论分析与计算. 编制了计算机软件,可供实际应用.

关键词 船舶制造工艺,横向重力下水,动力学

1. 引言

船舶在船台上建造到一定阶段后即可下

水. 常用的方法是重力下水,即船舶在自身重力作用下沿船台倾斜滑道滑入水中. 重力下水的方式有纵向与横向两种. 纵向下水时船体的中纵剖面平行于滑道运动,实践证明,应用静力学的观点来处理纵向下水问题,其结果与实际情况很相近,计算也简单,此方法已相当成熟,已为国内外各船厂普遍采用的下水方式^[1].