

潜艇结构低周疲劳寿命工程评估方法

万正权 卞如刚

(第七〇二研究所 无锡 214082)

摘要: 本文基于断裂力学建立了潜艇结构低周疲劳寿命的工程估算方法,理论计算与模型试验结果比较表明:该方法是合理可靠的,可用于潜艇结构低周疲劳寿命评估。

关键词: 潜艇结构 低周疲劳寿命 近似评估方法

A Simplified Approach for the Low - Cycle Fatigue Life Prediction of Submarine Structures

Wan Zhengquan Professor, Bian Rugang Engineer

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi, 214082)

Abstract: In present paper, a simplified approach is developed based on fracture mechanics for the low - cycle fatigue life of submarine pressure hulls. The efficient and robustness of the present method are assessed by the comparative studies between theoretical analysis and model tests. It shows that the present method can be used for the low - cycle fatigue life prediction of submarine structure.

Key words: submarine structure, low - cycle fatigue life, simplified approach

1 引言

采用高强度钢设计、制造潜艇耐压船体结构最突出的问题是其疲劳强度相对下降,理论与试验研究结果表明:材料屈服点强度的增加必然导致材料塑性、韧性下降,使得结构变形剧烈局部化,在结构的拉应力部位,特别是在结构形式突变或不连续加强的局部应力集中区域及具有拉伸应力的部位(如潜艇不同形式壳体的结合部、不同厚度板的连接部、纵向和周向构件的交叉部、曲率半径剧烈腐化的部位,船体开孔部位及其它类似结构),产生塑性变形,在循环载荷作用下,出现以高应力应变、低循环寿命为特点的结构低周疲劳断裂。

20世纪60年代美国海军因高强度钢 HY - 80 最初用于核动力攻击型潜艇,开始研究潜艇结构设计中的疲劳问题,对潜艇结构材料的低周疲劳性能进行了大量的试验研究工作,考察循环次数与应变等关系,以及载荷波形、加载频率及介质等对疲劳寿命的影响。在90年代采用 HY - 100 高强度钢设计制造“海浪”级攻击型核潜艇时,由于制造过程中耐压船体结构出现严重的焊接裂纹,而投入大量的人力物力研究

解决高强度钢结构裂纹控制技术等工艺力学问题。80年代英国海军研究所发表的研究结果介绍了 T 型全焊透焊缝,特别是纵、环焊缝交叉的“十”字接头处的疲劳试验,以及根据计算疲劳裂纹扩展来估算模型疲劳寿命。俄罗斯对高强度钢潜艇结构低周疲劳问题进行了大量的理论和试验研究,专门制定了高强度钢潜艇结构工艺寿命和使用寿命评估方法。我国从70年代末开始注意潜艇结构疲劳问题,曾进行潜艇锥柱结合壳结构、肋骨与壳体焊缝结点的少量疲劳试验与分析,得到了一些有用的结果。

本文运用断裂力学方法研究结构表面裂纹的疲劳扩展问题,建立潜艇耐压船体结构低周疲劳寿命的工程估算方法,对锥柱结合壳结构疲劳裂纹扩展试验模型进行数值计算。结果表明:本文的方法是合理可靠的,可用于潜艇结构低周疲劳寿命分析评估。

2 耐压结构疲劳寿命评估

2.1 耐压壳表面裂纹应力强度因子

大量受拉伸或弯曲作用的有限厚板中的表面裂纹疲劳扩展实验表明,非规则形状的初始裂纹或缺陷

在交变载荷作用下,能够迅速变成近似的半椭圆形状,随后保持这一形状或近似地保持这一形状直到裂纹扩展到板的背面,成为穿透裂纹,基于这一试验现象,在工程实际中,一般假设表面裂纹为半椭圆形状。表面裂纹前缘区域的应力分布是三维弹塑性力学问题,到目前为止还没有精确的解析解,不得不采用一些近似估算方法。本文基于有限厚板在任意拉伸和弯曲组合载荷作用下,半椭圆表面裂纹前沿的应力强度因子近似公式^[1],并考虑圆柱壳曲率对轴向与环向表面裂纹应力强度因子的影响^[2],得到耐压圆柱壳表面裂纹应力强度因子工程估算公式:

$$K = GF(\sigma_t + H\sigma_b)\sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (1)$$

其中:G,H,Q为 Newman & Raju 根据三维有限元分析结果提出的修正系数,F为 Erdogan 提出的圆柱壳曲率修正系数。

2.2 表面裂纹扩展寿命的断裂力学方法

结构的疲劳破坏从本质上说是在交变载荷作用下结构中裂纹的生成、扩展,最终导致脆性断裂的过程,这一过程一般由三个阶段组成,即裂纹生成、裂纹扩展和断裂破坏阶段。在裂纹成核以后裂纹扩展阶段又可分成表面裂纹扩展和贯穿裂纹扩展两个阶段,对裂纹扩展影响最大的因素是裂纹尖端应力强度因子幅值、循环应力比、加载频率、结构尺度、工作环境等因素。Paris 根据试验结果,提出了疲劳裂纹扩展的数学模型:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^m \quad (2)$$

其中:C,m均为材料常数,可由标准的试样疲劳试验获得。

Paris 定律实际上是一个以线弹性断裂力学为基础的公式, $\frac{da}{dN}$ 和 ΔK_{eff} 的经验关系虽然没有涉及疲劳裂纹的扩展机理,但已被大量试验结果所证实,同时被广泛用来预测裂纹疲劳寿命,特别是疲劳扩展寿命,产生了巨大的经济效益。

对于潜艇耐压船体结构,由于焊接残余应力及焊接结构内原先存在着微小缺陷和微小表面裂纹,在高应力、应变低循环载荷作用下,这些微小裂纹迅速汇合,形成类似半椭圆形的初始表面裂纹,裂纹形成所消耗的循环寿命与裂纹扩展至临界状态所消耗的循环寿命相比是很小的,一般仅占总寿命的 10%,甚至更少。因此基于断裂力学方法预测结构表面裂纹扩展寿命,评估潜艇结构低周疲劳寿命是合理可行的。

2.3 初始裂纹与临界裂纹尺寸

初始裂纹尺寸是指开始计算疲劳寿命时的最大原始裂纹尺寸。研究表明,由于材料和工艺因素,焊接结构不可避免地存在各种缺陷和微裂纹,可以用无损探伤方法进行检测,在进行疲劳扩展寿命计算时,应重点分析最大应力区域的缺陷和微裂纹,并对它们进行当量化处理,将其转化为规则化裂纹。然而,焊接结构中缺陷和微裂纹的检测结果不仅与无损检测方法、探伤仪器精度及探伤工作人员的经验有关,而且受材料特性、裂纹形状和位置、构件形状和表面粗糙度及工作环境等多种因素影响,根据裂纹检测仪器初始裂纹测试结果的概率统计,耐压壳结构初始裂纹尺寸取为, $a_0 \geq 0.05 \sim 0.5\text{mm}$, $b_0 \geq 2 \sim 5\text{mm}$ 。

临界裂纹尺寸是指在给定的工作载荷下,结构不发生脆断,局部区域内的裂纹不影响结构强度和稳定性,所容许的最大裂纹尺寸。根据断裂力学基本理论,可以采用应力强度因子临界值来判定裂纹扩展的临界值,局部区域内的微小裂纹并不影响结构强度和稳定性,但当裂纹扩展到一定程度将会降低结构强度和稳定性。因此,裂纹扩展的临界状态(临界裂纹尺寸)判据推荐为: $\Delta K_{max} = 0.7K_{IC}$ 和 $a_{max} = 0.25t$ 。

3 数值算例

为了验证本文的潜艇结构低周疲劳寿命工程估算方法的合理可靠性,我们以锥柱结合壳裂纹扩展试验模型作为考题,进行数值计算。

3.1 锥柱结合壳模型疲劳扩展寿命计算

耐压锥柱结合壳模型^[9]凸锥处 $R = 1367\text{mm}$, $t = 9\text{mm}$, $\gamma = 20^\circ$ 。试验前在模型凸角处预制初始表面裂纹 $a_0 = 1.0 \sim 1.5\text{mm}$, $b_0 = 10.0 \sim 15.0\text{mm}$ 。将模型放置深海模拟压力筒中,进行 $p = 0 \sim 3\text{MPa}$ 外压循环加、卸载试验。当循环次数为 5048 次时,锥柱结合壳凸角处表面裂纹长度达 50mm,对结构模型稍作修补后,继续进行试验,当累计循环 9302 次,该处表面裂纹长度达 100mm。

在模型凸角处结构应力状态为拉弯组合,将应力分析结果代入公式(1)得到裂纹尖端应力强度因子,取裂纹扩展速率参数^[5], $C = 1.31 \times 10^{-11}$, $m = 2.44$,积分公式(2)得到表面裂纹扩展寿命,数值计算结果与试验检测结果比较吻合(参见表 1),图 1 给出了耐压壳表面裂纹扩展过程。

3.2 耐压船体结构低周疲劳寿命评估

潜艇结构模型低周疲劳试验结果表明^[3],耐压艇

表1 锥柱结合壳模型结构疲劳寿命计算结果

循环次数	数值计算结果(a,b)		试验结果(a,b)
0	(1.0,10.0)	(1.5,15.0)	(1.0~1.5,10.0~15.0)
1000	(3.78,12.06)	(4.52,17.76)	
3000	(5.74,24.88)	(6.16,32.58)	
5000	(6.64,43.44)	(6.97,54.09)	
5048	(6.66,43.88)	(6.99,54.62)	(a,50.0)
6000	(7.01,55.47)	(7.37,69.28)	
7500	(7.62,81.53)	(8.1,108.62)	
8200	(7.99,101.72)		
9302			(a,100.0)

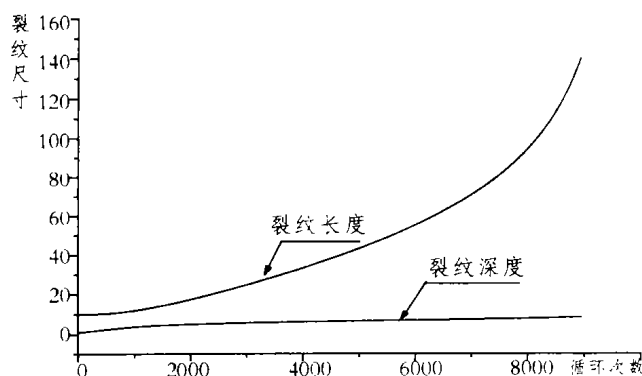


图1 耐压壳表面裂纹扩展

体的局部区域,如锥柱结合部焊趾根部,在薄膜应力、局部弯曲应力和焊接残余应力循环作用下,往往产生低周疲劳破坏,因此锥柱结合区域是潜艇耐压船体结构低周疲劳寿命评估的典型部位。

某艇锥柱结合壳部位,按照50%的裂纹检测概率,设定初始表面裂纹尺寸 $a_0 = 0.3\text{mm}$, $b_0 = 3.0\text{mm}$,取表面裂纹扩展速率参数^[5], $C = 1.31 \times 10^{-11}$, $m = 2.44$,计算结果参见图2。

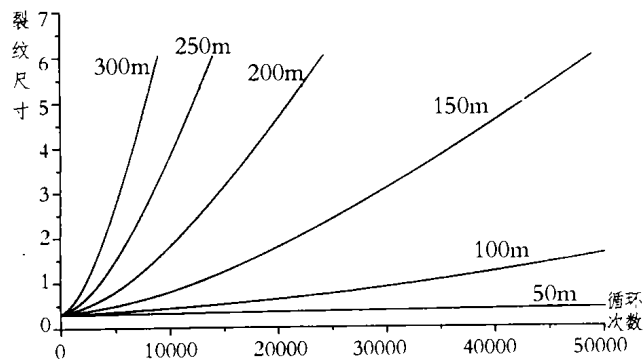


图2 给定下潜深度的潜浮次数与表面裂纹深度的关系

根据计算结果,该艇满足《潜艇结构设计计算方法》的规定,在服役期间300m潜深的潜航次数大于500的要求。如果能建立该艇在服役期间各下潜深

度的潜航次数,根据图2的计算结果进行疲劳损伤累积,可以估算出该艇的剩余疲劳寿命。

4 结 语

基于断裂力学方法建立了耐压结构表面裂纹疲劳扩展寿命估算方法,并对耐压锥柱结合壳结构低周疲劳试验模型进行数值计算,计算结果与试验结果比较吻合。可用于评估潜艇耐压船体结构低周疲劳寿命。

参 考 文 献

- 1 Murakami, Y., Stress Intensity Factors Handbook, Pergamon Press, 1987.
- 2 Tada, H., Paris, P. C. & Irwin, G. R., The Stress Analysis of Cracks Handbook, Second Edition, Paris Productions Incorporated, Saint Louis, MO, 1985.
- 3 Dunham, F. W., Fatigue Testing of Large-scale Models of Submarine Structural.
- 4 陈孝渝.《潜艇和潜水器结构的低周疲劳》.国防工业出版社,1990.
- 5 赵少汴.《抗疲劳设计》.机械工业出版社,1994.
- 6 崔振源.《表面裂纹理论及其应用》.西北工业大学出版社,1987.
- 7 张祖枢.“潜艇耐压壳疲劳寿命的断裂力学估算方法”.《华中理工大学学报》,Vol. 19, No. 6, 1991.
- 8 张祖枢、晏思聪.“921A钢焊接接头在腐蚀疲劳下表面裂纹扩展规律”.《华中理工大学学报》,Vol. 20, No. 6, 1992.
- 9 侯维廉.《潜艇结构疲劳模型疲劳试验系列报告》.CSSRC, 1996.

作者简介：万正权,男,1962年10月生,1984年毕业于北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系,1993年中国舰船研究院毕业并获工学博士学位。主要从事船舶与海洋工程结构力学理论与试验研究。卞如刚,男,1970年10月生,1993年毕业于兰州大学数学力学系。自参加工作以来,一直从事舰船结构力学理论与试验研究。