

船体结构疲劳强度的检验*

沈 华,汪秋良

(大连海事大学 航海学院,辽宁 大连 116026)

摘要:船体结构局部因磨损、腐蚀、脱焊、裂纹等缺陷,导致疲劳强度不足,引发重大事故.为此从保障航运生产安全的实际要求出发,对船体疲劳强度校核的意义、校核的部位及实用的校核方法给出了详细的说明,并结合计算软件的开发介绍了进行船体疲劳强度校核的计算流程.

关键词:船体结构;疲劳强度;检验方法

中图分类号:U661.43 **文献标识码:**A

1 疲劳破坏和疲劳强度

材料在交变载荷的作用下发生破坏断裂,称为材料的疲劳破坏.材料抵抗这种破坏的能力称为疲劳强度.试验表明,钢材在循环弯曲下的疲劳极限约为单调载荷极限的40%,这足以说明疲劳强度对处于不断循环弯曲和扭转中的船体结构的致关重要性.疲劳破坏是船舶结构的主要破坏形式之一,特别是对于大型船舶和使用高强度钢的船舶,问题尤为突出.

疲劳破坏具有局部特性和累积特性.因此,船体结构构件的形状、尺寸、连接形式、表面状态和环境条件都影响着结构疲劳强度;同时,疲劳破坏又是一个累积过程,一般要经历裂纹形成、裂纹扩展和裂纹到达临界尺寸时的快速断裂三个阶段.

船舶的疲劳强度应在船舶设计时得到保证,通过疲劳强度校核改进结构接点的设计,以保证船体结构中受交变动载荷的构件有足够的疲劳寿命.中国船级社制定的《船体结构疲劳强度指南》^[1](简称《指南》),已作为船舶技术指导性文件在我国普遍应用.

在海洋上航行的船舶长期处在较为严重的腐蚀环境中,腐蚀严重削弱了船体结构的疲劳强度.

日本船级社所做的调查指出,舷侧外板产生的裂纹,有一半以上是在严重腐蚀的舱内肋骨处发生的.加强对营运数年船舶的结构检测,并根据检测的数据进行疲劳强度检验和安全性评估,是当前各国非常重视和关注的问题.这项船舶安检工作首先应在一些重要的船舶上实施,如油船、散货船、集装箱船等.

2 疲劳强度检验部位的选择

船体疲劳强度检验部位的选择,应包括两个方面:第一是船体承受疲劳载荷比较大的部位,因而是疲劳损伤比较严重的地方;第二是腐蚀比较严重的部位,因而也是应力集中的地方,常出现裂纹源和开裂.

由于波浪弯矩和波浪扭矩的最大值通常发生在船中附近,船舶中部货舱区域是发生疲劳损伤最严重的地方之一,所以首先要求对船中货舱区域的结构进行疲劳强度检验.

对油船而言,在船体结构检测时,应注意选择甲板纵骨和船底纵骨与强横向框架和横舱壁的连接部位,以及在吃水线附近 $1.1d \sim 0.3d$ 范围内的纵骨.对散货船而言,应选择货舱内主肋骨与顶边舱和底边舱连接的两端肘板,以及甲板纵骨和

* 收稿日期:2002-01-14.

作者简介:沈 华(1948-),男,浙江吴兴人,教授,主要从事船舶稳性和强度的研究.

船底纵骨与横向强框架和横舱壁的连接部位. 对集装箱船,除了应选择甲板纵骨、舷侧纵骨和船底纵骨与强横向框架和横舱壁的连接部位,还应选择货舱大开口两端处的舱口角隅.

对于营运多年的船舶,应注意选择双层底及舷侧部位的压载水舱等腐蚀比较严重的构件,以及骨材、肘板等扶强材与内外舱壁板的连接处,进行船体检测.

在对船体结构进行疲劳检验中,应注意构件的表面状况,如有无磨损、腐蚀、碰撞损伤等;应运用仪器探明构件内部的状况,尽可能早地发现构件内部出现的裂纹源,并记录下裂纹源的尺寸和位置.

3 检验的计算方法和流程

3.1 计算方法

3.1.1 疲劳载荷的计算

疲劳载荷包括波浪弯矩和波浪扭矩、舷外海水对舷侧和船底的水动压力和舱内货物由船舶运动引起的对舷侧、舱壁和船底结构的动压力.

(1) 波浪弯矩按 1996 年《钢质海船入级与建造规范》^[2] 中的有关公式计算

$$(中拱)M_w(+) = 190MCL^2BC_b \times 10^{-3} \quad \text{kN} \cdot \text{m} \quad (1)$$

$$(中垂)M_w(-) = -110MCL^2B(C_b + 0.7) \times 10^{-3} \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (2)$$

$$(水平)M_H = 0.253ML^{2.25} \sqrt{Bd_1} C_b \quad \text{kN} \cdot \text{m} \quad (3)$$

波浪扭矩按《指南》中的规定公式计算

$$M_T(x) = 0.00123e^{-0.00295L}.$$

$$LB^3C_T[1 - \cos(2\pi x/L)] \pm 1.13L^{1.25} \sqrt{Bd_1^3} C_b(1 + 1.43\epsilon/d_1) \cdot \sin(2\pi x/L) \quad \text{kN} \cdot \text{m} \quad (4)$$

上式中的各系数计算,按《指南》的定义. 上述公式均对应于 10^{-8} 超越累积概率.

(2) 舷外海水动压力的计算

在 0.2 ~ 0.7 船长范围内,海水动压力计算公式为:

在舷侧水线处

$$p_{w1} = 2B^{0.66} + 3CC_b + 0.4d_1 \\ p_{w2} = 0.5p_{w1} + 5B\varphi_m \quad \text{kN/m}^2 \quad (5)$$

在艏部

$$p_{bs1} = p_{w1} - 1.2d_1 \quad \text{kN/m}^2$$

$$p_{bs2} = 0.5 p_{w1} - 0.6d_1 + 5B\varphi_m e^{-\pi d_1/L} \quad (6)$$

在船底中线处

$$p_{bc} = p_{w1} - 1.2d_1 \quad \text{kN/m}^2 \quad (7)$$

上式中有两个计算公式的计算结果取大值; φ_m 为最大横摇角(rad); C 为 IASC 定义的参数.

上述公式均对应于 10^{-4} 超越累积概率,乘以系数 $2^{1/\xi}$ 可得到 10^{-8} 超越累积概率的值. ξ 为 Weibull 分布的形状参数.

(3) 舱内货物压力

液货作用在舷侧、内底和舱壁上的压力取以下三式中计算的大值,

$$p_1 = \rho a_v z \quad \text{kN/m}^2 \\ p_2 = \rho a_t y \quad \text{kN/m}^2 \\ p_3 = \rho a_l x \quad \text{kN/m}^2 \quad (8)$$

式中, a_v, a_t, a_l 分别为纵向、横向和垂向合成加速度,按《指南》相关公式计算.

干货对舷侧和横舱壁的压力分别为

$$p = 0.7\rho a_t b, \quad p = 0.7\rho a_l l \quad (9)$$

式中, b, l 为计算点水平面舱内货物的宽度和长度. 舱内货物压力计算公式对应于 10^{-8} 超越累积概率.

3.1.2 疲劳应力范围的计算

船体梁垂向弯曲应力范围、水平弯曲应力范围和翘曲应力范围的计算式分别为

$$S_v = \Delta M_v / W_v \cdot 10^3 \quad \text{N/mm}^2 \\ S_H = \Delta M_H / W_H \cdot 10^3 \quad \text{N/mm}^2 \\ S_w = \Delta B_w / W_w \cdot 10^3 \quad \text{N/mm}^2 \quad (10)$$

式中,垂向波浪弯矩范围

$$\Delta M_H = M_w(+) - M_w(-)$$

水平波浪弯矩范围

$$\Delta M_H = 2M_H$$

翘曲应力范围

$$\Delta B_w = 2B_w$$

有关翘曲应力可根据薄壁梁扭转理论来计算.

3.1.3 应力范围的合成

将垂向和水平弯曲应力范围及翘曲应力范围合成为总体应力范围;将海水动压力和货物压力引起的应力范围合成为局部应力范围;再将这两应力范围合成为检验应力范围.

对于甲板有大开口的船舶,总体应力范围合成时需考虑到斜浪情况,合成公式为

$$S_g = 0.6S_v + S_H + S_w \quad (11)$$

对于其他船舶可不考虑船体的扭转,总体应力范

围按下式计算

$$S_g = \sqrt{S_v^2 + S_H^2 + 0.2S_v S_H} \quad (12)$$

局部应力范围合成按下式为

$$S_i = \sqrt{S_e^2 + S_i^2 + 2\rho_p S_e S_i} \quad (13)$$

式中, S_e , S_i 分别为海水动压力和舱内液货动压力; ρ_p 为两种应力范围间的平均相关系数。

3.1.4 疲劳累积损伤计算

采用基于 S-N 曲线和 Miner 的线性累积损伤理论. S-N 曲线是应力范围与以循环次数计算的

使用寿命曲线, 在实际工程计算中采用英国能源部经修正的 8 根曲线, 可根据结构接点的形式、受力方向和建造工艺选取其中之一. 曲线的基本形式为

$$\lg N = \lg K - m \lg S \quad (14)$$

式中, 当 $N \leq 10^7$ 时, $m = 3$; 当 $N > 10^7$ 时, $m = 5$.

8 根曲线的 K 值与 $N = 10^7$ 对应的应力范围见表 1.

表 1 S-N 曲线的参数

曲线	B	C	D	E	F	F2	G	W
$K \times 10^{10}$	580.0	346.4	152.0	102.6	63.19	43.30	24.81	9.279
S	83.40	70.23	53.27	46.81	39.83	35.12	29.17	21.01

疲劳累积损伤按船的满载和压载两种情况分别计算, 在线性累积损伤理论的假设下, 累积损伤度的计算式为

$$D = N_T \int_0^\infty \frac{f(S)}{N(S)} dS = \frac{0.6\alpha\mu K_1}{18.42^{3/\epsilon}} \cdot \frac{S_L^3}{f_1 K} \cdot 10^8 \quad (15)$$

船舶设计寿命为 20 年, 期间应力循环的总次数 $N_T = 0.6 \times 10^8$. $N(S)$ 为结构在恒幅值应力范围 S 作用下疲劳失效时的循环次数, 由 S-N 曲线得到. 按满载和压载两种情况, 分别计算得到的累积损伤度用 D_f 、 D_b 表示, 在结构的设计寿命期内应满足

$$D_f + D_b \leq 1 \quad (16)$$

3.1.5 腐蚀对疲劳强度和结构使用寿命的影响估算

首先, 考虑腐蚀造成的结构剖面尺寸的损失对总纵应力的影响. ABS 的做法是采用实测的方法, 将设计尺寸减去腐蚀量, 这样计算出来的应力偏大, 需用 0.95 系数进行修正.

其次, 考虑应力腐蚀疲劳对使用寿命的影响. 实际的结构件都在不同程度上存在裂纹和类似裂纹的缺陷, 采用预制裂纹试样的应力腐蚀试验可得到与实际情况相符合的结果. 采用船用钢中心裂纹试样在海水环境中的应力腐蚀疲劳试验, 可得到裂纹的扩展速率 da/dN 符合帕里斯指数规律^[3,4], 即

$$da/dN = (13 \times 10^{-11} - 4.3 \times 10^{-11} \lg f) \Delta K^{3.5} \quad (16)$$

上式的单位是 mm/c(毫米/周次); f 为载荷频率; ΔK 为应力腐蚀疲劳强度因子范围. 在求得 da/dN 后估算出腐蚀疲劳构件的安全性和使用寿命, 具体的做法是将上式从裂纹的初始尺寸到临界尺寸进行积分. ΔK 是与载荷频率和试样的裂纹尺寸有关的变量, 可用理论方法计算得到.

3.2 计算流程

根据上述计算公式, 船体结构疲劳强度检验的计算流程可参见图 1.

4 结束语

船体结构抗疲劳设计方法已经在现代船舶设计中采用. 显然, 对营运多年的船舶而言, 船体结构局部磨损、腐蚀、脱焊、裂纹等状况是各不相同的, 疲劳强度问题不可能在船舶设计中完全解决. 保证船舶具有足够的疲劳强度, 还需要船舶使用和管理部门加强对船体结构的定期检测和疲劳强度检验. 随着船舶大型化及高强度钢在船体结构中的应用, 这个问题将变得越来越突出.

船用钢中心裂纹试样试验和数据的采集, 是对具有腐蚀疲劳裂纹构件的安全性和寿命估算的基础. 采用腐蚀疲劳裂纹规律进行的构件剩余疲劳强度估算, 是当前十分有应用前景的方法.

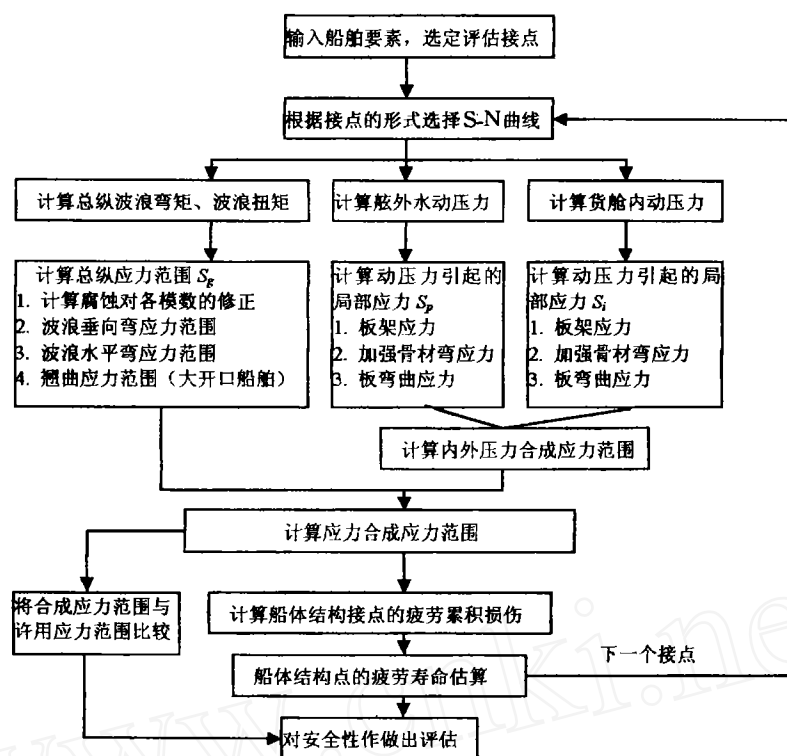


图 1 计算流程图

参 考 文 献:

- [1] 中国船级社. 船体结构疲劳强度指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. 4-34.
- [2] 中国船舶检验局. 钢质海船入级与建造规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996. 35-80.
- [3] 郑学祥. 船舶及海洋工程结构的断裂与疲劳分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1988. 101-189.
- [4] 胡毓仁, 陈伯真. 船舶及海洋工程结构疲劳可靠性分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996. 126-178.

Fatigue strength checking method for hull structure

SHEN Hua, WANG Qiu-liang

(Navigation College, Dalian Maritime Univ., Dalian 116026, China)

Abstract: It is the abrasion, corrosion, unsolder and crack of the components of hull structure that make the hull fatigue strength being in insufficiency and arouse the serious accidents of ships. From the practical safe demands of navigation, where and which the structure components should be checked and what the checking method will be used are explained in this paper. The computing flow is given to show more detailed process of the checking method.

Key words: hull structure; fatigue strength; checking method