

船舶构件共线多裂纹应力强度因子研究

杨永祥, 王庆丰, 李树胜

(江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 船舶构件中除了单个形式存在的裂纹外, 还有多个裂纹同时存在的情况。多裂纹之间的相互干扰作用使得问题远比单裂纹复杂。本文采用比较简单直观的组合法对平板表面多裂纹的应力强度进行了求解并与 FRANC 3D 求解的结果比较, 两者结果较接近, 由此可见组合法可以适应工程要求。因此, 在平板表面多裂纹问题求解的基础上, 推出了 T 型构件焊趾处表面多裂纹应力强度因子求解的表达式, 从而使 T 型构件多裂纹复杂问题转化为较简单的平板多裂纹问题, 可以为工程计算方法提供参考。

关键词: 船舶; T 型构件; 共线表面多裂纹; 组合法; 应力强度因子

中图分类号: U661.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-4807(2008)01-0010-06

Study on Stress Intensity Factors of Ship Structure with Collinear Cracks

YANG Yongxiang, WANG Qingfeng, LI Shusheng

(School of Naval Architecture and Ocean Eng., Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China)

Abstract: Not only the single crack but also multiple cracks may exist in the ship structure. The problem of multiple cracks is more complex than that of single crack because of the interference of cracks. A simple combined approach is adopted to solve the stress intensity factor of multiple collinear surface cracks in plate. Results from comparison indicate that the combined approach can agree with the FRANC 3D, and meet the requirements in engineering. Based on the multiple cracks on the plate surface, a method for calculating the stress intensity factor of the T-butt joint with the collinear multiple surface crack is proposed. So the complex problem about the T-butt joint can be transformed into the simple problem of plate. This method can be the reference for the engineering calculation.

Key words: ship; T-butt joint; multiple collinear surface crack; combined approach; stress intensity factor

0 引 言

船舶和海洋结构物在建造时总是不可避免的存在一定的缺陷, 并且随着使用年限的增长, 构件出现裂纹的几率也增大。许多船舶与海洋结构物的事故^[1]就是由于构件出现裂纹并发生扩展最后导致断裂破坏的。以往对船舶构件裂纹的研究都是基于单裂纹的情况展开的, 而实际构件中不仅仅存在单一裂纹, 多裂纹的现象也很普遍, 如焊缝中出现的密集气孔、夹渣等类裂纹缺陷或老龄构件产生的疲劳多裂纹等。结构一旦出现多裂纹, 由于裂纹之间的相互影响作用, 会使裂纹尖端的应力强度因子发生改变, 如果仍按单裂纹问题进行求解, 可能会使结构偏于危险。所以对多裂纹问题不能再简单地采用单裂纹的方法进行求解, 应该分析具体情况再做适当的求解。要对含多裂纹的结构进行损伤容限评定, 首先要确定其应力强度因

收稿日期: 2007-07-09

基金项目: 院管基金项目(2005CH010J)

作者简介: 杨永祥(1952-), 男, 江苏兴化人, 副教授, 研究方向为船舶结构。

子。由于问题的复杂性,很难找到精确的解析解,主要是通过数值计算找到其近似解。目前对多裂纹的数值计算大多数学者采用有限元法^[2-3]、边界元法^[4-5]研究二维多裂纹的应力强度因子。文献[6]采用边界元法研究三维多裂纹问题。由于裂纹尖端的应力奇异性,这些方法存在着数据准备量大、计算时间长以及精度差等问题。还有许多学者针对某些特定分布的裂纹情况,采用各种半解析方法,研究多裂纹板的应力强度因子及其裂纹间的相互作用。国内对多裂纹的研究多集中在加筋板孔含双边裂纹问题上。文献[7]采用概率损伤容限分析的方法对飞机蒙皮加筋板孔边多裂纹结构进行了研究,提出了疲劳多裂纹扩展随机模型。文献[8]运用 Taylor 级数求解疲劳多裂纹扩展方程的非线性问题,取得了较高的精度。文献[9]采用线弹簧模型求解多个共面任意分布表面裂纹的应力强度因子。对于船舶构件多裂纹问题的研究还处于初级阶段,文献[10]采用 FRANC 3D 对平板中不同位置多裂纹之间的相互影响进行了研究。由于多裂纹问题远较单裂纹问题复杂,很难找到精确的解析解,一般主要通过数值计算找到其近似解。有限元是一个行之有效的适合复杂边界条件的数值计算方法,但此方法既费时又耗资较大。对于多部位损伤结构,若边界条件不复杂,可以采用交替迭代法,但作为工程计算采用组合法(Compounding Method)是适合的^[11]。

1 平板多裂纹问题

1.1 平板多裂纹应力强度因子计算方法

对裂纹问题的研究早在二战时期就开始,其中《应力强度因子手册》^[12]给出了大量不同形式的裂纹问题的解,为结构与机械设计提供了依据。如何将复杂问题化简为《应力强度因子手册》中有已知解答或者其他资料有已知解答的问题,从而近似地(具有一定工程要求的精确度)求得复杂问题的应力强度因子成为许多学者关注的问题,而组合法实现了这一思想。

考虑如图1a)所示的弹性体,边界 S_0 作用外载荷 F_0 ,此弹性体有一条裂纹,它远离边界 S_0 ,在靠近裂纹处弹性体内还有一个内边界 S_1 , S_1 上没有外载荷作用。其应力强度因子用 K_1 表示(注意,两个裂纹尖端的 K_1 不相同)。可以采用叠加原理求图1a)的 K_1 ,因为图1a)的受力状态可分解为图1b)和c)两种受力状态,所以

$$K_1 = K_0 + K_1^* \quad (1)$$

图1c)中的 $-F_1$ 是按图1b)的受力求得相应 S_1 边界处的应力分布,等值反向地加在 S_1 上的外载荷。

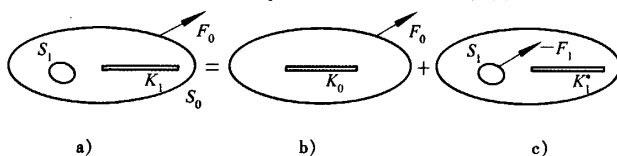


图1 裂纹靠近一个边界的弹性体

Fig. 1 Elastic body with crack close to one boundary

假若弹性体内没有内边界 S_1 ,而在别的靠近裂纹的地方有另一个内边界 S_2 ,同样作上述分解后有

$$K_2 = K_0 + K_2^* \quad (2)$$

若弹性体内同时存在两个内边界 S_1 和 S_2 ,如图2a)所示。由叠加原理知

$$K_{12} = K_0 + K_{12}^* \quad (3)$$

式中 K_{12}^* 为 S_0 上没有外力作用,而 S_1 、 S_2 上分别作用 $-F_1$ 和 $-F_2$ 时的应力强度因子。一般从已知解答中可能找不到图2c)所示的复杂情况的 K_{12}^* 。为了求 K_{12}^* ,将图2中c)分解成图3b)中两情况的组合(不是叠加),考虑到相互间影响作用 K_{12}^* 可表达为

$$K_{12}^* = K_1^* + K_2^* + \sum_{j=1}^m [(\Delta K_1)_j + (\Delta K_2)_j] \quad (4)$$

式中 m 是反复交替的次数; $(\Delta K_1)_j$ 为没有 S_2 边界时,在 S_1 边界上作用 $-(\Delta F_{12})_j$ 力系的应力强度因子;

$(\Delta K_2)_j$ 为没有 S_1 边界时,在 S_2 边界上作用 $-(\Delta F_{21})_j$ 力系的应力强度因子。

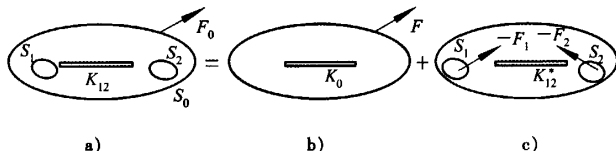


图2 裂纹靠近二个边界的弹性体

Fig.2 Elastic body with crack close to two boundaries

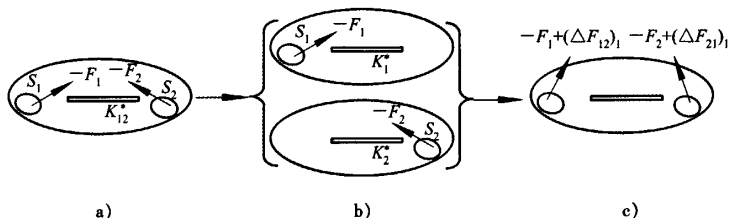


图3 组合法原理

Fig.3 Principle of combined approach

将式(1)和式(2)代入式(4),然后再把式(4)代入式(3),可得

$$K_{12} = K_1 + K_2 - K_0 + K_{12} \quad (5)$$

式中 $K_{12} = \sum_{j=1}^m [(\Delta K_1)_j + (\Delta K_2)_j]$ 为边界的相互影响项。

同理含 N 个边界的多裂纹问题应力强度因子表达式为

$$K = K_0 + \sum_{n=1}^N (K_n - K_0) + K_{iN} \quad (6)$$

式中 K_0 为只保留所研究的裂纹,其他边界(其他未研究的裂纹可以看出边界)不存在情况下的应力强度因子,称为基本情况的应力强度因子。 K_n 为仅在第 n 个边界存在下所研究裂纹的应力强度因子。当裂尖不太靠近边界时, K_{iN} 可以略去,则式(6)简化为

$$K = K_0 + \sum_{n=1}^N (K_n - K_0) \quad (7)$$

上式中圆括号中的项表示第 n 个边界对基本情况应力强度因子的影响,他们的影响是线性无关的。等式两边除以 K_0 ,得到正则化应力强度因子为

$$k = 1 + \sum_{n=1}^N (k_n - 1) \quad (8)$$

令 $\Delta k_n = k_n - 1$,则

$$k = 1 + \sum_{n=1}^N \Delta k_n \quad (9)$$

若 K_n 可以从应力强度因子手册或从其他资料的已知解答近似地求解,那么从组合法就可方便地找到所需的解答。

1.2 多裂纹应力强度因子计算方法比较

文献[10]在求解多表面裂纹应力强度因子时引入了干扰系数 λ 来描述应力强度因子表达式

$$K_I = K_{I0}(1 + \lambda) \quad (10)$$

式中 K_{I0} 为无其他裂纹时表面裂纹的应力强度因子; K_I 为加入干扰裂纹后表面裂纹的应力强度因子。然而干扰系数 λ 又受多种因素的影响。对于含有多表面裂纹的平板,干扰系数 λ 表示为

$$\lambda = \lambda(\varphi, \alpha, \beta, r, b, \frac{b_i}{d_i}) \quad (11)$$

其中 φ 为基础裂纹前沿确定位置的极角(弧度); α 为两裂纹中点连线与基础裂纹的夹角; β 为干扰裂纹与基础裂纹的夹角; r 为基础裂纹的中点到干扰裂纹中点的距离; b 为干扰裂纹的半长度; d 为干扰裂纹的深

度; i 为第 i 个干扰裂纹。

式(11) 中影响因素较多,且各影响因素的主次关系也未确定,需通过大量的有限元数值拟合计算或试验支持,采用多变量回归才能得到干扰系数 λ 的表达式,工作量太大,计算难度高。考虑到组合法利用应力强度因子手册或其他资料的已有结果,将多裂纹的问题简化为较简单的形式,适合工程问题求解的要求。本文将文献[10] 提出的干扰系数 λ 与组合法公式进行了比较,发现采用干扰项来描述裂纹之间的影响更有直观意义。

将文献[10] 两边同除以 K_0 ,得到正则化应力强度因子表达式

$$k_I = 1 + \lambda$$

(12)

将式(8)、(9) 与式(12) 进行比较可以看出

$$\lambda = \sum_{n=1}^N (k_n - 1) = \sum_{n=1}^N \Delta k_n$$

为了区别文献[10] 中的 λ ,令

$$\lambda^* = \sum_{n=1}^N (k_n - 1) = \sum_{n=1}^N \Delta k_n$$

(13)

这样就将裂纹之间的干扰项分离出来,可以方便快捷地从应力强度因子手册^[12] 或其他资料的已知解答中近似的求出 K_n 。

1.3 算 例

以含三条等间距的共线等长半椭圆表面裂纹的无限大平板受单向均匀拉伸作用,欲求中心裂纹的应力强度因子,如图4 所示。对于共线多裂纹,一般关注裂纹扩展方向上的相互影响,因此本例以裂纹长度方向上 A 点的应力强度因子为分析对象,分别采用组合法和 FRANC 3D 法对不同中心间距情况下的应力强度因子进行了求解,计算结果见表1。通过分析比较,发现两种方法的误差在5% 之内。从表中可以看出在 $2a/d$ 很大的变化范围内,组合法的计算结果具有一定的精度,可以为工程所采用。

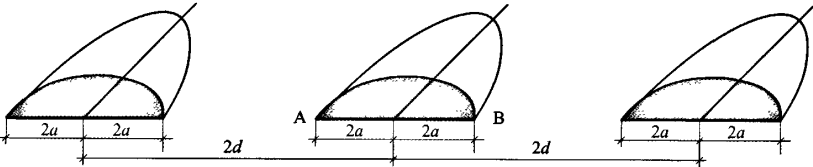


图4 共线半椭圆表面裂纹模型

Fig.4 Crack model of collinear semi-elliptic surface

表1 计算结果比较

Tab.1 Comparison of results from calculation

$2a/d$	K_0	K_A^L/K_0	K_B^L/K_0	K_A/K_0	
				组合法	FRANC3D
0	0.412 48	0.989 14	0.989 14	0.403 52	0.412 99
0.5	0.412 48	1.007 07	0.996 34	0.413 88	0.427 06
0.667	0.412 48	1.055 17	1.003 81	0.436 8	0.438 66
0.8	0.412 48	1.109 23	1.012 64	0.462 75	0.452 6
0.9	0.412 48	1.238 29	1.022 02	0.519 85	0.504 14

2 T 型构件表面多裂纹应力强度因子计算方法

2.1 T 型构件表面单裂纹应力强度因子计算方法

利用手册或已有的研究成果来解决平板多裂纹问题是一种行之有效的工程方法,然而对于较复杂的结构形式如 T 型构件就显得困难得多,因为关于 T 型构件手册或已有的研究成果不足以用来解决 T 型构件的多裂纹问题。然而,如果简化 T 型构件裂纹的应力强度因子的求解,利用理论较成熟的平板裂纹问题,建

立 T 型构件中裂纹与平板中裂纹应力强度因子之间的关系, 应力强度因子 K_T 可以表示成 $K_T = M_K K_p$, 式中 M_K 是应力强度因子修正系数, 表示焊趾处应力集中引起的应力强度因子的增加; K_p 为平板上表面裂纹应力强度因子。这样可以将 T 型构件裂纹问题转化为平板裂纹问题, 大大简化了问题的求解难度, 使得工程应用也就成为可能。

平板表面裂纹应力强度因子已有成熟的计算方法, 其中以文献[12] 提出的表面裂纹应力强度因子计算公式最具有代表性, T 型接头焊趾表面裂纹应力强度可表示为

$$K_T = (\sigma_t + H\sigma_b) \frac{\sqrt{\pi a}}{\Phi} F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{T}, \frac{2c}{w}, \varphi\right) \cdot M_K \quad (13)$$

式中 σ_t 为拉伸应力, σ_b 为弯曲应力, a/c 为裂纹形状比, a/T 为裂纹深度比, $2c$ 为裂纹长度, w 为板宽, φ 为参数角 (见图 5)。这样 T 型接头表面应力强度因子的计算就转化为计算 M_K 。

文献[13] 对 a/c 、 a/T 、 φ 等参数进行了研究, 给出了 M_K 表达式, 参数见图 6。Fu 和 Hasswell 通过三维有限元分析, 提出了 T 型接头焊趾表面裂纹 M_K 的经验表达式。Bowness 和 Lee(2000) 又进行了更为广泛地研究, 考虑 T 型接头几何参数、裂纹形状等各种因素的 M_K 的影响, 得到大量计算数据, 给出了考虑因素更为全面的 M_K 计算公式。虽然这些公式和有限元计算点的拟合程度很高, 但 M_K 表达式形式过于繁琐, 系数过多, 各种因素之间的影响主次关系不明确, 不利于工程的应用。

文献[14] 对计算 M_K 的公式进行了分析比较, 发现 a/T 、 a/c 以及 L/T 是影响 M_K 的主要因素, θ 角度的影响可以忽略。针对公式中的不足, 文献[14] 保留 Bowness 和 Lee 公式的第一项 f_1 , 并作了适当修改, 使其不仅在走向上而且在数值上与 M_K 一致; 修改了第二项, 作为辅助项, 起到修正作用。其 T 型接头焊趾表面裂纹应力强度因子的简化计算方法为:

- 1) 拉伸载荷作用下表面裂纹最深点处的 M_K 表达式的简化

$$M_K = f_1\left(\frac{a}{T}, \frac{a}{c}\right) - f_2\left(\frac{a}{T}, \frac{L}{T}, \frac{a}{c}\right) \quad 0.005 \leq a/T \leq 0.9$$

- 2) 弯曲载荷下表面裂纹最深点处的 M_K 的简化

$$M_K = f_1\left(\frac{a}{T}, \frac{a}{c}\right) - f_2\left(\frac{a}{T}, \frac{L}{T}\right) \quad 0.005 \leq a/T \leq 0.5$$

$$M_K = 1.0 \quad 0.5 < a/T \leq 0.9$$

- 3) 表面裂纹末端 M_K 的简化

$$M_K = f_1\left(\frac{a}{T}, \frac{a}{c}, \frac{L}{T}\right) + f_{2(b)}\left(\frac{a}{T}, \frac{L}{T}, \frac{c}{a}\right) \quad a/c \leq 0.25; 0.005 \leq a/T \leq 0.9$$

$$M_K = f_1\left(\frac{a}{T}, \frac{a}{c}, \frac{L}{T}\right) + f_{2(b)}\left(\frac{a}{T}, \frac{L}{T}, \frac{c}{a}\right) \quad a/c > 0.25; 0.005 \leq a/T \leq 0.9$$

式中相关参数见参考文献[14]。

这样, 要 M_K 确定, T 型接头焊趾表面裂纹应力强度因子就可依托平板表面裂纹应力强度因子来计算, 使问题求解容易得多。

2.2 T 型构件表面多裂纹应力强度因子的计算

以上讨论了 T 型接头焊趾表面单裂纹应力强度因子的求解问题, 求解公式以 3.1 简化公式较为方便。

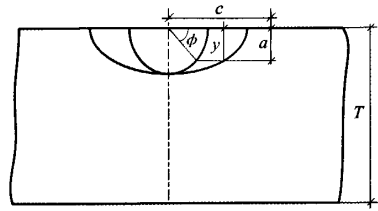


图 5 表面裂纹示意图

Fig.5 Sketch map of surface crack

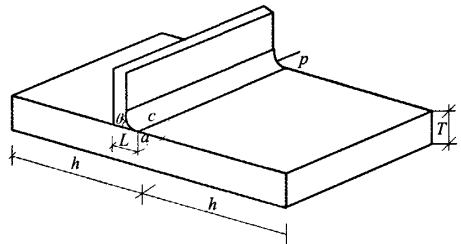


图 6 T 型接头模型

Fig.6 Model of T-butt joint

既然 T 型接头焊趾表面裂纹应力强度因子就可转化为平板表面裂纹应力强度因子来计算,而平板多裂纹应力强度因子又可采用组合法通过查相关手册求得,则 T 型接头焊趾表面多裂纹应力强度因子求解公式可表达为

$$K_T = M_K K_p, \quad K_p = K_0 + \sum_{n=1}^N (K_n - K_0)$$

式中 K_0 为基本情况的应力强度因子; K_n 为仅在第 n 个边界存在下所研究裂纹的应力强度因子。

$$\text{正则化后应力强度因子表达式} \quad K_T = M_K \cdot K = M_K \left(1 + \sum_{n=1}^N \Delta K_n \right)。$$

这样只要可以从相关手册查得相应平板多裂纹问题的已知解,就可以通过上式求得 T 型接头焊趾表面裂纹应力强度因子。

3 结 论

通过以上计算和分析比较可以得到以下结论:

1) 通过对平板共线表面多裂纹应力强度因子的计算表明,组合法和 FRANC 3D 法计算结果的误差在 5% 之内。在 $2a/d$ 很大的变化范围内,组合法的计算结果具有一定的精度,可以为工程所采用。

2) 修正了文献[10]中多裂纹问题的干扰系数 λ ,给出了物理意义更为直观的干扰项 λ^* ,这样就可以通过应力强度因子手册或其他资料的已知解答查得相应的结果,大大简化了工作量。

3) 通过对平板表面多裂纹应力强度因子的求解进而推导出 T 型构件焊趾处表面多裂纹应力强度因子的求解,从而将复杂的 T 型构件焊趾处表面多裂纹问题转化为简单的平板表面多裂纹问题,符合工程计算的思想,可为工程计算提供参考。

参考文献:

- [1] 崔维成,蔡新刚,冷建兴. 船舶结构疲劳强度校核研究现状及我国的进展[J]. 船舶力学,1998,2(4):63-81.
- [2] CHEN W H, CHANG C S. Analysis of two dimensional fracture problems with multiple cracks under mixed boundary conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics,1989,34(4):921-934.
- [3] LIU D S, CHIOU D Y. A coupled IEM/FEM approach for solving elastic problems with multiple cracks[J]. Int J Solids & Structures,2003,40:1973-1993.
- [4] RAJIYAH H, ATLURI S N. Evaluation of K-factors and weight functions for 2-D mixed-mode multiple cracks by the boundary element alternating method[J]. Eng Fract Mech,1989,32:911-922.
- [5] CHEN W H, CHEN T C. An efficient dual boundary element technique for two-dimensional fracture problem with multiple cracks[J]. Int J for Numerical Methods in Engineering,1995,38:1739-1756.
- [6] WESSEL C A, CISILINO O, SANTI J, et al. Numerical and experimental determination of three-dimensional multiple crack growth in fatigue[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2001,35:47-58.
- [7] 张建宇,费斌军,赵丽滨. 疲劳多裂纹扩展随机模型[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(4):396-399.
- [8] 赵丽滨,张建宇,费斌军,等. 疲劳多裂纹问题的 Taylor 级数解法[J]. 机械强度,2001,23(2):168-170.
- [9] 袁杰红,周建平,唐国金,等. 多个共面任意分布表面裂纹的应力强度因子[J]. 力学季刊,2000,21(1):72-79.
- [10] 王庆丰,黄小平,崔维成. 不同位置的裂纹间的互相作用及其影响规律的有限元分析[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版,2006,20(1):16-19.
- [11] 刘文斑,郑晏仲,费斌军. 概率断裂力学与概率损伤容限/耐久性[M]. 北京航空航天大学出版社,1999.
- [12] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M](增订版). 北京:科学出版社,1994.
- [13] DIJKSTRA O D, SNIJDER H H, VAN STRAALLEN I J. Fatigue crack growth calculations using stress intensity factors for weld toe geometries[C]//Proc Eighth Int Conf Offshore Mech Arctic Engng, The Hague,1989,137-143.
- [14] 韩芸,黄小平,崔维成,等. T 型接头焊趾表面裂纹应力强度因子的简化计算方法[J]. 中国造船,2006,47(1):1-11.

(责任编辑:李玲)