

型材筋条含裂纹的加筋结构 应力强度因子计算

严国林 黄维扬

(南京航空学院 104 教研室, 南京, 210016)

THE CALCULATION OF STRESS INTENSITY FACTOR FOR CRACKED SECTION IN A STIFFENED STRUCTURE

Yan Guo-lin, Huang Wei-yang

(Faculty 104 of Nanjing Aeronautical Institute, Nanjing, 210016)

摘要 本文根据型材结构的受力特性, 采用一种适合型材结构有限元分析的型材棱边位移协调单元模型, 计算了型材铆接加筋条含裂纹结构的 3 种 I 型开裂类型应力强度因子, 计算结果绘成曲线。

关键词 加筋结构, 协调单元, 应力强度因子

Abstract According to the analysis of the mechanical feature of the section structure, the author adopts a harmonious element model about the displacement in the bend line of section, which is applied to calculate the Stress Intensity Factor(SIF)of the section structure with the Finite Element Method. Compared with the analysis solution, the element model introduced in this paper is available. Then, in the case of the various rivet distance and rivet flexibility, the Stress Intensity Factor(SIF)for three cracked types about the structure rivet stiffened by cracked sections is calculated. The result of calculation is drawn in to a curve. Some conclusion are given from the result curve.

Key words stiffened struction, harmonious element, the stress intensity factor

0 引 言

加筋板是飞机等结构中的重要构件, 已经有许多文章对含裂纹的加筋板结构应力强度因子进行了计算^[1,2]。但关于型材筋条含裂纹的加筋结构应力强度因子计算极为少见, 本文将对这一情况进行一些探讨。

本文的研究对象是图 1 示的加筋结构。半无限大的底板“4”上, 均匀平行地铆接着有型材“1”、“3”等加筋条。整个结构中采用同一型号铆钉, 间距同为 P 。结构中的底

1991年7月4日收到, 1991年9月20日收到修改稿

板“4”和加筋条“1”、“3”等都受有集度相等的均匀拉伸载荷。

假定图1中型材加筋条“1”上分别出现了如图1示的中心裂纹和图1(b)、图1(c)示的边缘裂纹，用有限元方法计算这样复杂结构的应力强度因子。

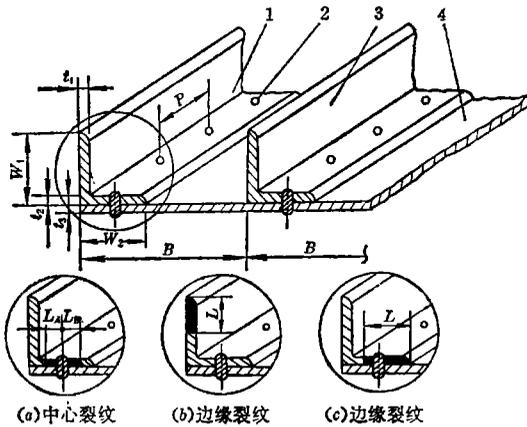


图 1
1—裂纹型材；2—铆钉；3—型材；4—底板

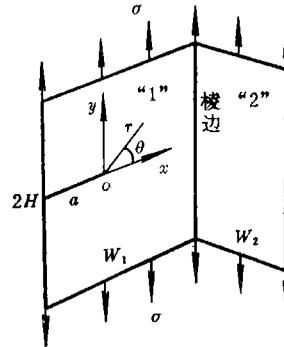


图 2

1 位移协调单元及计算方法介绍

对图1的应力强度因子的计算，关键是对含有裂纹的加筋条——型材的处理。图2为一含裂纹型材，分析它的受力特性，将图2中的角型材看成由板“1”和板“2”沿其棱边连接而成，板“1”和板“2”在图2示载荷作用下，只承受自身平面内的力。因为板“1”在棱边处的正应力对板“2”有垂直于该平面的分量，同理，板“2”在棱边处的正应力对板“1”也有垂直于该平面的分量，这些分量必须为零。因此，在棱边连接处，板“1”和板“2”相互之间只有剪应力的作用，并且各自平面内垂直于棱边的位移不受约束。

在正交角型材棱边处，对板“1”和板“2”的位移作如下的处理：板“1”和板“2”棱边处平行于棱边方向的位移是协调的。而垂直于棱边方向的位移是相互独立的，互不影响。因此，在棱边处，进行网格划分及前置处理时将多设置一些节点，这些节点只代表了一个方向即垂直于棱边方向的位移。具有这样节点的单元，称为型材棱边位移协调单元，简称为协调单元。当然，这种单元适用于所有相邻板条均正交的型材各棱边处。

在计算过程中，采用由两个互相垂直的杆单元组成的铆钉元来分析铆钉的内力和位移。其刚度矩阵为

$$[K]_{\text{铆}}^e = \frac{Et_2}{H_e} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 H_e ——铆钉无量纲柔度； E ——铆接板的弹性模量 (N/mm^2)； t_2 ——铆接结构中较厚板的厚度 (mm)。

由于裂纹结构中裂纹尖端应力场具有 $\gamma^{-1/2}$ 奇异性，为此，常用裂纹尖端 8 节点 1/4 中点等参奇异元（图 3 中(a)）处理，由此单元压缩成的三角形结点 1/4 中点等参单元。（图 3 (b)）。

根据线弹性力学方法，在 I 型裂纹尖端的位移场的解为^[3]

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{E} (1 + \mu) \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{Bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \left(k - 1 + 2\sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ \sin \frac{\theta}{2} \left(k + 1 - 2\cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中 E 、 μ ——材料弹性模量及泊松比，

$$k = \begin{cases} \frac{3 - \mu}{1 + \mu} & \text{平面应力} \\ \frac{3 - 4\mu}{3 - 4\mu} & \text{平面应变} \end{cases}$$

(r, θ) ——坐标原点位于裂纹尖端的极坐标值。

由上式可见，利用有限元方法求出裂纹尖端位移解后，即可由（2）式求出结构的应力强度因子。本文用 $\theta = \pi$ 的垂直裂纹表面位移 $v(r, \pi)$ 值求 K_I 。在裂纹面选择 N 个不同的节点，将其位移代入式（2），求出每个点的 K_I ，作出相应的 K_I-r 曲线，利用最小二乘法和外推法，将其延伸，曲线与纵轴交点即为所求的结构应力强度因子 K_I 。

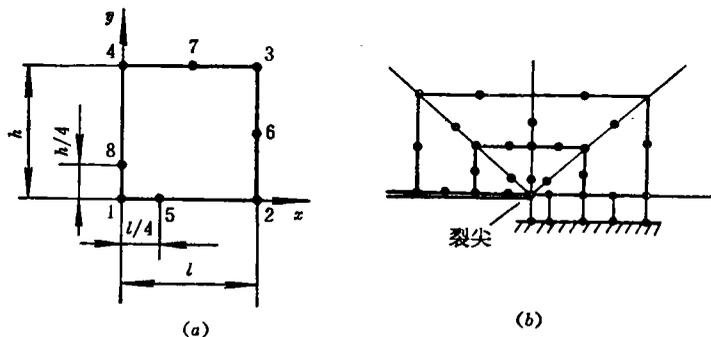


图 3

2 计算结果和结论

采用本文介绍的协调单元，我们首先计算了图 2 结构的应力强度因子 K_I 。选择的结构参数为： $H/W_1 = 1.0$ ， $\mu = 0.3$ 。

当 $a = 0.5 W_1$ 时，计算结果为： $K_I / \sigma \sqrt{\pi a} = 2.4503$ ；

文献[2]计算结果为： $K_I / \sigma \sqrt{\pi a} = 2.4931$ ；相对误差为 1.71%。

其它 a/W 值的应力强度因子值见图 4。从计算结果与文献[2]的比较来看，说明本文采用的位移协调单元模型计算图 1 示结构应力强度因子可行。

在对图 1 所示结构计算应力强度因子时，假定结构中所有材料具有相同的材料特性常

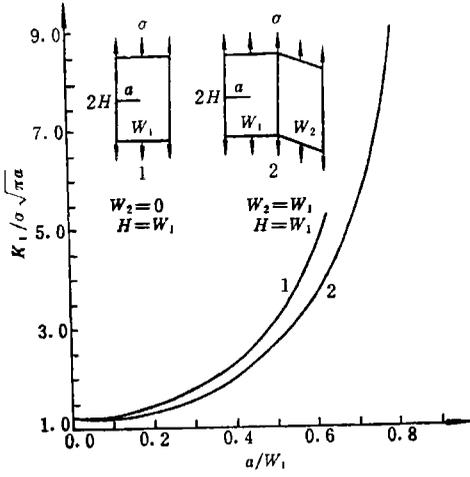


图 4

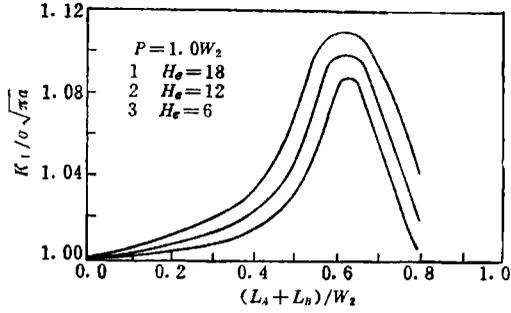
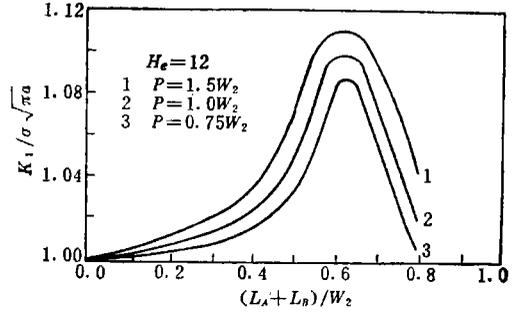


图 5

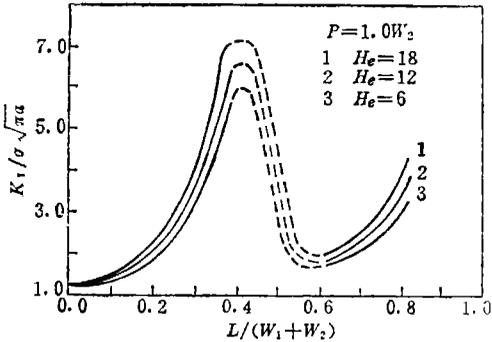
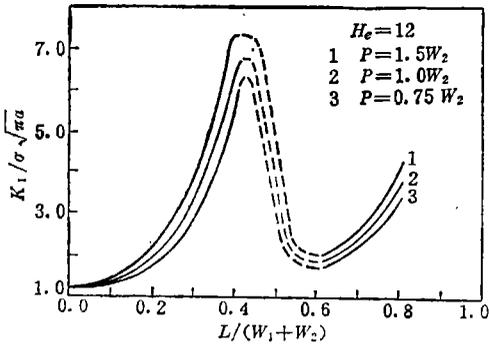


图 6

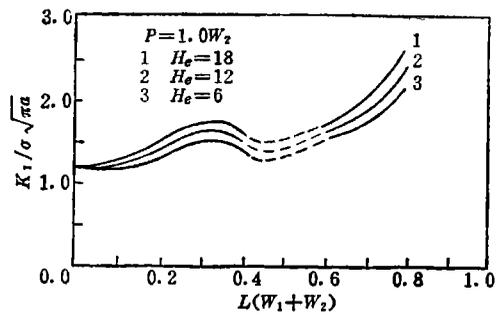
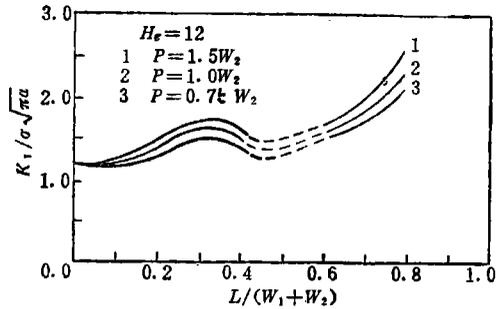


图 7

数。结构参数选择: $W_1/W_2=1.0, B/W_2=6.0, t_1/W_1=t_2/W_2=0.15, t_3/W_2=0.1$ 。分别计算了各开裂类型在不同的铆钉柔度 H_e 和间距 P 情况下的应力强度因子 $K_2/\sigma\sqrt{\pi a}$ 。计算结果见图 5、图 6、图 7。(注: 当裂纹扩展至型材棱边附近时, 由于单元划分较困难, 故图中虚线是根据曲线变化趋势而连接的。)

根据以上计算, 得出结论:

(1) 图 2 结构的计算结果与文献[2]比较, 可以说明本文介绍的协调单元模型可以适用于型材结构有限元分析;

(2) 图 1 中第二种开裂情况的应力强度因子比其它情况大, 这在工程中必须加以注意;

(3) 图 5~图 7 的曲线表明, 当铆钉间距 P 和柔度 H_e 增大时, 应力强度因子 $K_2/\sigma\sqrt{\pi a}$ 就随之增大, 反之则下降。

参 考 文 献

- 1 Shkarayev S V, Mayer Jr E T. Edge Cracks in Stiffened plates. Eng Fract Mech, 1987; 27: (2)127~314
- 2 黄维杨. 型材中应力强度因子的计算方法. 工程力学, 1986; 3: (3)1~11
- 3 高永寿, 黄维杨, 断裂力学教程. 航空专业教材编审组出版, 1983; 20

上接 A176 页

续表

序号	项目名称	时间	人数	地点	筹办单位及联系人	备注
12	信息处理及计算机应用	待定	50~80人	待定	北京航空航天大学 范仁周(100083)	
13	通讯与导航专业学术交流	5月	80~100人	四川绵阳	航空航天部607所(四川内江641003)季菲	
14	自控专业委员会第五届学术年会	三季度	180人	待定	北京航空航天大学 (100083)三系唐仁林 冯亚昌	
15	惯性-天文导航系统学术会议	4月20日至26日	60人	北京	清华大学精仪系顾启泰 北京航空航天大学五研 常庆之	
16	液压气动专业学术讨论会	三季度	待定	贵阳	501厂 王兆新	
17	第七届全国复合材料学术会议	6月10日至15日	200人	大连	大连理工大学陈浩然	中国航空学会复合材料专业会和中国力学学会、中国宇航学会及复合材料学会联合召开, 中国力学学会主持。
18	第四届人体工程、航医救生专业委员会年会	三季度	~120人	待定	北京航空航天大学505教研室袁修干、李敏(100083)	
19	发动机可靠性、维修性及维修技术研讨会	三季度	70~80人	待定	沈阳黎明发动机制造公司 吴久诚 北京航空航天大学四系 杨帆(100083) 空一所周肇基(100076)	

下转 A192页