

整体加筋壁板裂纹的应力强度因子研究

周游

(成都飞机设计研究所,成都 610091)

摘要:通过基于 ANSYS 的整体加筋壁板三维有限元模型,系统研究了筋板面积比 β (即筋条与壁板横截面积之比)以及筋条高宽比(h/b)对壁板内中心对称穿透直裂纹应力强度因子的影响。研究发现:在裂纹向两侧均匀扩展并不断靠近筋条的过程中,只有合理设计筋条尺寸,筋条才能对裂纹应力强度因子起到有效削弱作用,从而延长结构疲劳寿命。给定筋板面积比,若筋条宽或者筋条高不大于壁板厚度($h/t \leq 1$ 或 $b/t \leq 1$),应力强度因子随着筋条高宽比的增大而增大,筋条止裂作用减弱;而当筋条宽和筋条高均大于壁板厚度时($h/t > 1$ 且 $b/t > 1$),应力强度因子随着筋条高宽比的增大而减小,筋条止裂作用增强。基于大量有限元结果拟合的壁板裂纹应力强度因子经验公式可供工程人员进行快速估算。

关键词:应力强度因子;整体加筋壁板;筋板面积比;筋条高宽比;止裂作用

中图分类号:TB115

文献标志码:A

引言

飞机在执行任务过程中会承受各种复杂的载荷作用,机体壁板结构中薄弱部位很容易出现裂纹萌生,飞机的生命力面临着裂纹的极大威胁。设计合理的整体加筋壁板结构,使之充分发挥结构的抗疲劳性能来抑制裂纹扩展,具有实际工程意义^[1]。整体加筋壁板是无需采用铆接等技术而将壁板和筋条等加强部件由整块板坯通过机械加工制成的连续整体结构^[2],作为主要承力结构,被广泛用于飞机机身及翼面结构。相比传统铆接组合结构,整体加筋壁板具有减重效果明显、应力集中部位和潜在起裂源少、结构布局清晰、提高机体的密封可靠性等优点^[3-4]。

NASA 在 1996 年提出了“飞机整体结构化”(Integral airframe structure,简称 IAS)^[5],在节约成本的同时提升了结构疲劳可靠性。以色列学者 A. Brot^[6]通过实验和三维有限元法分析了整体加筋板的裂纹扩展,

得出整体加筋壁板普遍拥有较弱的损伤容限性能的结论。意大利学者 M. Fossati^[7]通过有限元模拟了三维裂纹在整体加筋壁板结构中扩展时前沿线的演变轨迹。国内学者黄其青^[8]等通过实验和理论计算研究了整体加筋板的裂纹扩展规律。李亚智^[9]、李旭东^[10]等利用有限元软件研究了飞机机身整体加筋壁板结构的破损安全性能,并与相同尺寸的铆接组合壁板结构进行了对比。

飞机设计工作中,设计人员需在强度与重量之间寻求最优化方案,在整体加筋壁板优化设计方面,国内学者开展了诸多研究。司晓磊^[11]等研究了整体加筋翼梁结构中不同筋条几何参数对裂端应力强度因子的影响,给出了该结构筋条宽厚比设计的优化值。李玉莲^[12]等采用有限元软件分析了筋条完全断裂情况下整体加筋壁板几何参数对结构损伤容限性能的影响,为整体加筋壁板结构优化设计提供参考。此外,彭春雷^[13]、蔡玲^[14]、肖群力^[15]等均在整体加筋壁板优化设计方面开

收稿日期:2016-04-06

作者简介:周游(1989-),男,四川广汉人,助理工程师,硕士,主要从事飞机结构疲劳强度方面的研究,(E-mail)i_zhouyou@163.com

展了相应研究。

现有理论研究鲜有从三维断裂的角度得出此类含裂结构定性或者定量的普遍结论,对工程应用的贡献不足,本文采用有限元分析方法,分析裂纹向筋条对称扩展过程中,筋板面积比及筋条高宽比对裂端应力强度因子的影响,基于有限元结果拟合的经验公式具有一定的工程参考意义。

1 计算模型

1.1 模型示意图

本文计算的整体加筋壁板结构如图 1 所示, a 为裂纹半长度, W 为壁板半宽,材料为疲劳性能优良的 2024-T3 铝合金,材料参数见表 1,壁板左右对称布置筋条,裂纹为中心对称穿透 I 型直裂纹,壁板与筋条的尺寸参数见表 2。为了研究裂纹向两侧均匀扩展并不断靠近筋条的过程中应力强度因子的变化,本文计算了不同裂纹长度的模型;为了探究筋条不同尺寸参数对应力强度因子的影响,引入了无量纲的筋条宽与壁板厚度之比 b/t 以及筋条高与壁板厚度之比 h/t 两个参数;同时,在研究筋条不同高宽比 h/b 对止裂作用的影响时,引入了筋条与壁板面积比 β ($\beta = bh/tW$) 这个参数,即筋条横截面积 (bh) 与壁板横截面积 (tW) 之比。

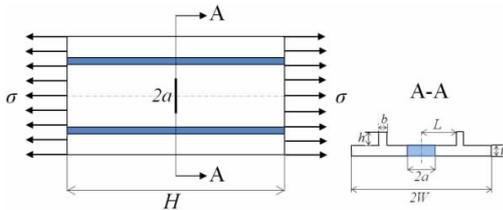


图 1 含裂纹整体加筋壁板结构示意图

表 1 材料属性

弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	屈服强度 σ_s/MPa	极限强度 σ_b/MPa
72	0.33	371	422

表 2 裂纹试样几何尺寸

参 数	尺寸/mm
壁板半宽 W	50
壁板长度 H	200
壁板厚度 t	2
筋条位置 L	25
初始裂纹半长 a_0	5

1.2 有限元模型及模型验证

模型的建立和求解是在 ANSYS 环境中完成。为了验证建模方式与应力强度因子求解方法的准确性,首先

对含中心对称穿透 I 型直裂纹的有限平板进行建模计算,将有限元计算得到的无量纲应力强度因子 F ($F = K/\sigma(\pi a)^{0.5}$) 与二维断裂理论 Feddersen 解^[16]计算得到的 F 以及文献[17]中 Kwon 等人提出的中心对称穿透直裂纹中面无量纲应力强度因子 F 计算式进行对比,如图 2 所示。可看出通过有限元计算得到的中面 F 大于二维理论计算值 8.5%,说明用传统二维理论进行结构的断裂评估将得到偏于危险的结果;与 Kwon 公式相比,最大误差在 2.5% 以内,说明通过本文的建模方式计算应力强度因子是可靠的。

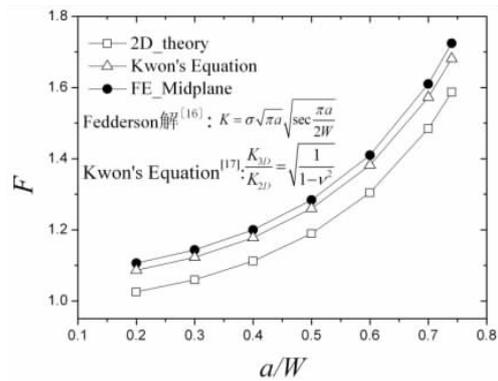


图 2 本文有限元结果与理论值对比

由于整体加筋壁板几何形状的对称性,本文选取模型的四分之一进行建模,在对称面上施加对称约束条件,采用 20 节点等参单元 SOLID95 模拟整体加筋板,在裂端采用奇异单元划分,利用节点位移法求解应力强度因子。由于表面层附近应力梯度较大,故在厚度方向上划分 20 层,单元厚度由中面至自由表面逐渐递减,如图 3 所示。裂纹前沿线上的应力强度因子在厚度方向上是变化的^[11],因此,为了更加准确客观且避免保守描述整体加筋板结构的三维断裂特性,本文采用裂纹前沿线上的最大无量纲应力强度因子来表征研究结果。

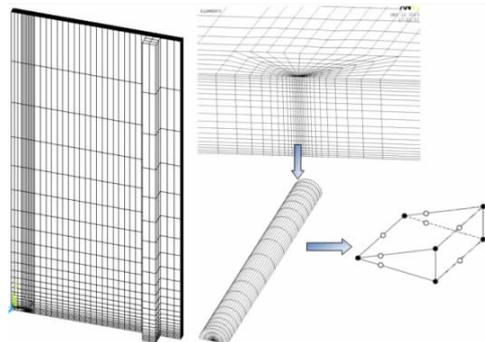


图 3 四分之一有限元模型及裂纹尖端的网格划分

2 计算与结果

2.1 筋板面积比对应力强度因子的影响

经计算发现,最大应力强度因子出现在壁板厚度方向不加筋一侧,对所得的应力强度因子最大值进行无量纲处理,得到无量纲应力强度因子 F 。图4和图5分别表示筋条位置固定,筋板面积比 β 变化对无量纲应力强度因子 F 的影响,并且与不加筋的情况 ($\beta = 0$) 进行对比。图中空心点线表示不加筋板的 F , 而实心点线表示加筋板的 F , 阴影部分区域是筋条所在区域。

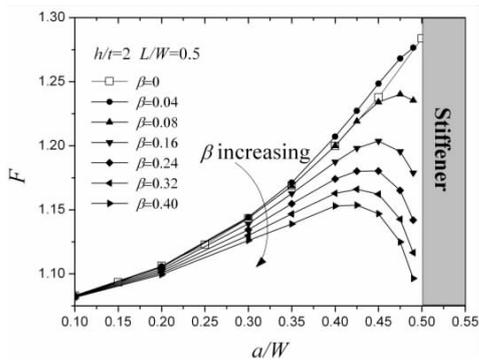


图4 $h/t = 2$ 时,筋板面积比 β 对 F 的影响

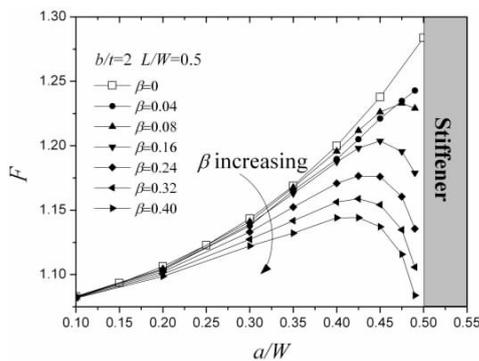


图5 $b/t = 2$ 时,筋板面积比 β 对 F 的影响

由图4和图5可见,在裂纹向筋条扩展的起始阶段,由于筋条与裂纹尖端相距较远,对裂纹的抑制作用不明显,加筋板的 F 与不加筋板的 F 基本相同,呈缓慢上升的趋势;随着裂纹长度逐渐增大,但尚未很靠近筋条时, F 随着裂纹增长逐渐增大,与不加筋板 F 的差值也逐渐增大,说明筋条的止裂作用在裂纹前沿逐渐靠近筋条时有所增强,筋板面积比 β 越大, F 增大的趋势越缓慢,这是因为筋条相对面积比越大,结构承载面积越大,更大的筋条横截面积分担了更多的载荷;当裂纹非常靠近筋条边缘时,筋条的存在对削弱 F 起到了

积极的作用,除 $\beta = 0.04$ 的情况外, F 均随着裂纹长度增大而下降,且筋板面积比越大, F 下降幅度越大,说明裂纹越接近筋条,筋条横截面积越大,止裂作用越明显。通过计算也发现,在筋板面积比相同的情况下,筋条不同高宽比 h/b 对裂纹扩展的抑制作用也有很大区别,对比图4和图5中的 $\beta = 0.04$ 曲线,在 $h/t = 2$ 、 $b/t = 0.05$ (见图4)情况时,加筋板 F 出现了大于不加筋板 F 的情况,筋条不仅未起到止裂作用,甚至还加速了裂纹的扩展,对结构产生不利的影响;而当 $h/t = 0.05$ 、 $b/t = 2$ (见图5)时, F 虽然在接近筋条的时候未出现显著下降的趋势,但是明显小于不加筋板 F , 筋条的存在起到了一定的止裂作用。在结构设计时,这一现象说明即使在壁板上加上同样横截面积的筋条,如果不充分考虑筋条的高宽比,可能会得出适得其反的效果。因此需进一步探究在筋板面积比 β 相同的情况下,选择不同筋条高宽比对裂纹无量纲应力强度因子 F 产生的影响。

2.2 筋板面积比相同时,筋条高宽比对应力强度因子的影响

为了探究筋板面积比相同时不同高宽比对 F 的影响,本文选取4个不同的筋板面积比 β , 每一个 β 对应一组不同的高宽比 h/b , 为方便表述,对模拟计算试件进行编号,具体几何参数参见表3,相同字母(如A、B、C、D)代表相同 β 的试件。计算结果如图6所示,筋板面积比 β 相同时,用相同形状的实心点线和空心点线区分不同高宽比对应的曲线。由图6可知:在筋板面积比相同的情况下,除筋条高与筋条宽均小于壁板厚度的情况不考虑外,当筋条高或者筋条宽小于或等于壁板厚度 ($h/t \leq 1$ 或 $b/t \leq 1$),如A_1、A_2、B_1、B_2试件,止裂作用随着筋条高宽比 h/b 的增大而减弱,表现为 F 随筋条高宽比 (h/b) 的增大而增大;而当筋条高且筋条宽均大于壁板厚度时 ($h/t > 1$ 且 $b/t > 1$),如C_1、C_2、D_1、D_2试件,止裂作用随着筋条高宽比 h/b 的增大而增大,表现为 F 随筋条高宽比 h/b 的增大而减小。

表3 模拟试件编号及几何参数

	A_1	A_2	B_1	B_2	C_1	C_2	D_1	D_2
β	0.04		0.08		0.24		0.40	
h/t	2	0.5	2	1	2	3	2	5
b/t	0.5	2	1	2	3	2	5	2
h/b	4	0.25(优)	2	0.5(优)	0.67	1.5(优)	0.4	2.5(优)

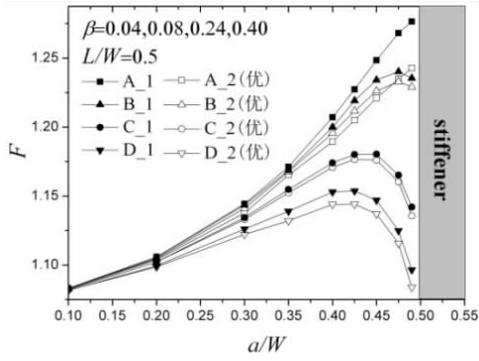


图 6 $\beta = 0.04, 0.08, 0.24, 0.40$ 时,筋条不同高宽比对 F 的影响

为了验证上述结论,本文以 $\beta = 0.08$ 和 $\beta = 0.24$ 两种情况为例,分别计算了筋条高宽比 h/b 变化时的 F 。当 $\beta = 0.08$ 时,计算了满足 $h/t \leq 1$ 或 $b/t \leq 1$ 条件的四种情况,而当 $\beta = 0.24$ 时,计算了满足 $h/t > 1$ 且 $b/t > 1$ 条件的四种情况,如图 7 和图 8 所示,均符合上述结论。

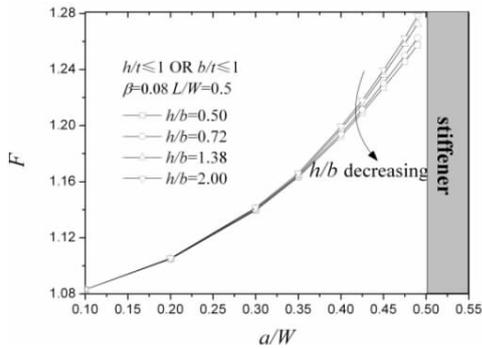


图 7 $\beta = 0.08, h/t \leq 1$ 或 $b/t \leq 1$ 时,筋条不同高宽比对 F 的影响

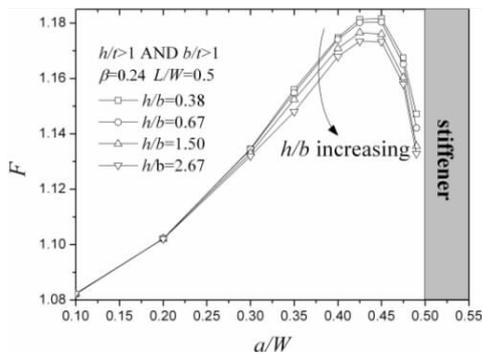


图 8 $\beta = 0.24, h/t > 1$ 且 $b/t > 1$ 时,筋条不同高宽比对 F 的影响

2.3 本模型应力强度因子经验公式的拟合

为避免筋条位置参数变化对公式拟合的影响,以筋条为参照物,选择筋条靠近裂端的侧面与壁板的交点为坐标参考系原点 O , 定义原点指向裂端的方向为 x 方向,以 x/L ($x/L = (L - a) / L$) 表示裂端与筋条的相对

距离,如图 9 所示。拟合数据采用式(1)表示的幂指数多项式的形式。

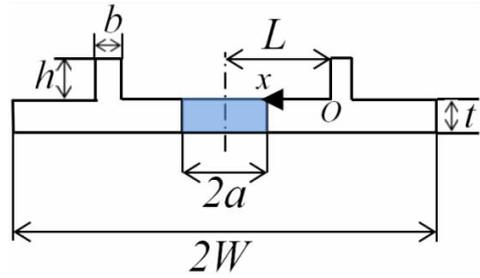


图 9 拟合公式所用模型示意图

$$F = F_1 F_2 / F_3 \tag{1}$$

式中, $F_1 = N_1 B N_3, F_2 = N_2 H N_3, F_3 = N_4 B N_3, N_1 = [1 u u^2 u^3 u^4], N_2 = [1 v v^2 v^3 v^4], N_3 = [1 w w^2 w^3 w^4]^T, N_4 = [1 u_0 u_0^2 u_0^3 u_0^4]$, 其中, $u = b/t, v = h/t, w = x/L, u_0$ 为基准,在本文计算中,是以 $b/t = 2$ 为基准,故取 $u_0 = 2$ 。 B 和 H 为多项式系数矩阵,分别代表筋条宽度和高度对 F 的修正,具体可见式(2)和式(3)。

$$B =$$

$$\begin{bmatrix} 1.34503 & -1.91889 & 6.87152 & -13.48623 & 10.57707 \\ -0.13527 & 2.98472 & -21.78497 & 63.29687 & -63.58718 \\ 0.03208 & -1.06174 & 8.87482 & -27.44346 & 28.55408 \\ -0.00423 & 0.18837 & -1.70563 & 5.47235 & -5.8166 \\ 0.00025 & -0.01295 & 0.12356 & -0.40558 & 0.43668 \end{bmatrix}$$

$$\tag{2}$$

$$H =$$

$$\begin{bmatrix} 1.25073 & -1.27876 & 6.51391 & -19.13026 & 20.54416 \\ 0.01888 & 1.59881 & -17.77607 & 61.04703 & -67.24816 \\ -0.05217 & -0.17771 & 5.45314 & -22.2103 & 26.2462 \\ 0.01414 & -0.0254 & -0.76914 & 3.75119 & -4.72202 \\ -0.00118 & 0.00456 & 0.04165 & -0.24336 & 0.32252 \end{bmatrix}$$

$$\tag{3}$$

如图 10 和图 11 所示,将式(1)计算得到的 F 与有限元计算值进行对比,吻合度较高,最大误差不超过 3%。

3 结论

本文通过有限元平台 ANSYS 建立含裂纹整体加筋壁板模型,分析裂纹向筋条扩展的过程中,筋板面积比 β 以及筋条不同高宽比 h/b 对裂端无量纲应力强度因子 F 的影响,得到以下结论:

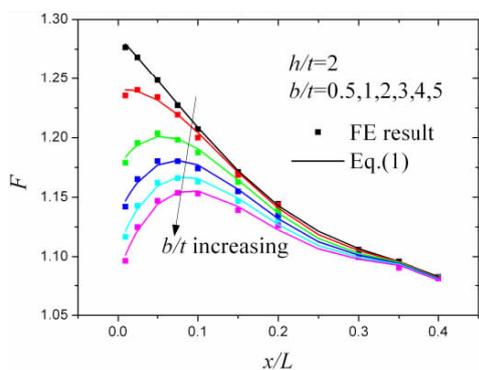


图10 $h/t = 2$, b/t 改变时,经验公式与有限元计算结果对比

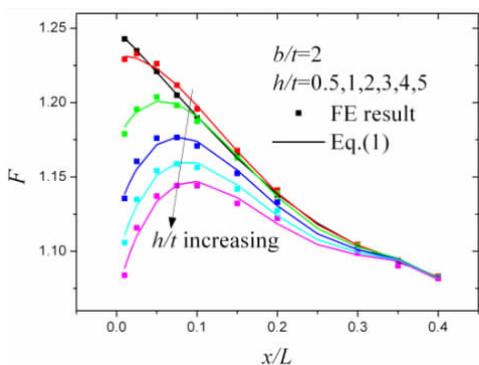


图11 $b/t = 2$, h/t 改变时,经验公式与有限元计算结果对比

(1) 在裂纹不断靠近筋条的扩展过程中,合理设计筋条尺寸,筋条对裂纹应力强度因子有明显的削弱作用,从而延长结构的疲劳寿命;给定筋板面积比,若不充分考虑筋条高宽比,可能使得应力强度因子增大,加速结构的失效破坏。

(2) 给定筋板面积比,当筋条宽或者筋条高不大于壁板厚度时 ($h/t \leq 1$ 或 $b/t \leq 1$),止裂作用随着筋条高宽比 h/b 的增大而减弱,表现为 F 随筋条高宽比 h/b 的增大而增大;在筋板面积比相同的情况下,当筋条宽和筋条高均大于壁板厚度时 ($h/t > 1$ 且 $b/t > 1$),止裂作用随着筋条高宽比 h/b 的增大而增大,表现为 F 随筋条高宽比 h/b 的增大而减小。

(3) 对有限元结果进行拟合,得出壁板裂纹应力强度因子经验公式。

上述结论和公式为此类含裂结构在工程中的损伤容限评定和结构优化设计提供了一定的参考指导作用。

参考文献:

[1] 张涛,刘土光,熊有伦,等.加筋板结构止裂数值计算

与实验研究[J].舰船科学技术,2005,27(5):19-24.

[2] 赵长喜,李继霞.航天器整体壁板结构制造技术[J].航天制造技术,2006(4):44-48.

[3] 马野,许希武,宁晋建.整体加筋壁板裂纹扩展轨迹模拟及控制分析[J].固体力学学报,2009,30(3):251-258.

[4] 闫晓中,王生楠,苏毅.整体壁板三维裂纹应力强度因子计算与分析[J].航空工程进展,2011,2(2):205-209.

[5] MUNROE J,WILKINS K,GRUBER M.Integral airframe structures(IAS):validated feasibility study of integrally stiffened metallic fuselage panels for reducing manufacturing costs,NASA/CR-2000-209337[R].NASA Langley Technical Report Server,2000.

[6] BROT A,PELEG-WOLFIN Y,KRESSEL I,et al.The damage-tolerance behaviour of integrally stiffened metallic structures[J].Wolfen,2008,12(3):556-562.

[7] FOSSATI M,COLOMBO D,MANES A,et al.Numerical modelling of crack growth profiles in integral skin-stringer panels[J].Engineering Fracture Mechanics,2011,78(7):1341-1352.

[8] 黄其青,李亚智,蒋峰,等.整体加肋板裂纹扩展特性分析[J].机械科学与技术,1999,18(6):983-984.

[9] 李亚智,张向.整体加筋壁板的破损安全特性与断裂控制分析[J].航空学报,2006,27(5):842-846.

[10] 李旭东,关志东.整体壁板损伤容限特性与修理技术研究[J].中国民航大学学报,2008,26(5):36-38.

[11] 司晓磊,张博平,史仁义,等.整体加筋翼梁结构止裂性能研究[J].科学技术与工程,2012,12(11):2626-2630.

[12] 李玉莲,尚晓冬,刘娜.基于损伤容限设计思想的中央翼整体加筋壁板设计研究[C]/2013年首届中国航空科学技术大会论文集,2013:1-5.

[13] 彭春雷,吴雪飞.典型加筋整体壁板的优化设计[J].机械研究与应用,2007,20(2):92-93.

[14] 蔡玲,黄其青,殷之平,等.基于损伤容限设计思想的飞机整体翼梁优化设计[J].机械强度,2009,31(4):620-624.

[15] 肖群力,黄其青,殷之平.典型机翼整体壁板止裂特性分析及优化设计[J].机械强度,2012,34(1):92-96.

- [16] 布洛克.工程断裂力学基础[M].北京:科学出版社, 1980.
- [17] MOREIRA P M G P, PASTRAMA S D, CASTRO P

M S T D. Three-dimensional stress intensity factor calibration for a stiffened cracked plate[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(14): 2298-2308.

Analysis of the Stress Intensity Factors for Integrally Stiffened Cracked Panel

ZHOU You

(AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China)

Abstract: Based on the three-dimensional cracked finite element models, the influences of the stiffener to plate area ratio and the stiffener height to width ratio on the stress intensity factors of centrally through-the-thickness crack within the integrally stiffened panel are systematically investigated. The numerical results show that rational stiffener size can effectively weaken the stress intensity factors at crack tip, thus prolonging the fatigue life of the structure. When the stiffener to plate area ratio is constant, the stress intensity factors will increase with the increasing of the height to width ratio when either the stiffener height or width is less than or equal to the plate thickness; furthermore, the stress intensity factors will decrease with the increasing of the height to width ratio when both the stiffener height and width are larger than the plate thickness. The conclusions can provide reference for the damage tolerance design and assessment of the integrally stiffened cracked structures. Based on large numbers of finite element systematic calculation results, an empirical formula calculating SIFs at the crack tip within the plate is obtained for engineering application.

Key words: stress intensity factor; integrally stiffened panel; stiffener to plate area ratio; stiffener height to width ratio; crack-arrest property