

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.04.013

## 含多部位损伤搭接结构应力强度因子三维有限元分析

邹君<sup>1,2</sup>, 张悦超<sup>1,2</sup>, 冯振宇<sup>1,2</sup>, 毛可毅<sup>1,2</sup>

(1. 中国民航大学适航学院, 天津, 300300; 2. 民航航空器适航审定技术重点实验室, 天津, 300300)

**摘要:** 应力强度因子 (Stress intensity factor, SIF) 分析是含多部位损伤 (Multiple site damage, MSD) 结构剩余强度和裂纹扩展寿命预测的基础和关键。考虑接触与摩擦, 建立了含 MSD 搭接结构的三维有限元模型, 研究了不同裂纹长度、铆钉类型以及损伤模式下裂纹尖端 SIF 分布情况和变化规律。结果表明, 搭接件孔边裂纹 I 型 SIF 起主导作用, II 型和 III 型 SIF 可忽略不计。由于次弯曲、铆钉变形和板厚度等因素, SIF 在外表面最小, 接触面一侧较大, 最大值多位于蒙皮内部。MSD 会使裂纹间的干涉作用增强, SIF 增大, 且裂纹间距离越近干涉作用越强。裂纹长度相同时, 埋头铆钉的孔边裂纹 SIF 积分均值大于平头铆钉, 且接触面的 SIF 埋头铆钉大于平头铆钉, 外表面则相反。

**关键词:** 多部位损伤; 搭接结构; 应力强度因子; 三维有限元分析

**中图分类号:** V215.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2020)04-0618-06

## Three-Dimensional Finite Element Analysis of Stress Intensity Factors of Lap Joints with Multiple Site Damage

ZOU Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuechao<sup>1,2</sup>, FENG Zhenyu<sup>1,2</sup>, MAO Keyi<sup>1,2</sup>

(1. College of Airworthiness, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China;

2. Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness Technology, Civil Aviation Administration of China, Tianjin, 300300, China)

**Abstract:** Stress intensity factor (SIF) is the foundation and key of predicting the residual strength and fatigue crack growth for structures with multiple site damage (MSD). Considering the contact and friction, three-dimensional finite element models of lap joints with MSD are established. The distribution and variation of SIFs at each crack tip with different crack lengths, rivet types and damage modes are investigated. Results show that  $K_I$  is dominant, while  $K_{II}$  and  $K_{III}$  are negligible. Due to the secondary bending, rivet deformation and plate thickness, the SIF reaches minimum at outside surface, and the faying surface side is larger, while the maximum is located in the plate for almost all crack length. The SIFs values increase substantially due to the interaction of MSD cracks. The shorter the distance between cracks, the stronger the interaction. When the crack length is the same, the integral average value of SIFs along the crack front for the countersunk rivet is larger than that of the flat head rivet. The SIF value at the faying surface of countersunk rivet is larger than that of the flat head rivet, while the trend of SIF at the outside surface is opposite.

**Key words:** multiple site damage (MSD); lap joints; stress intensity factor (SIF); 3D finite element analysis

对于老龄飞机金属结构, 在相似细节承受相同应力水平时, 容易导致多部位损伤 (Multiple site damage, MSD)<sup>[1]</sup>。MSD 的多条裂纹之间存在较强的相互作用, 从而使裂纹扩展速率增加, 剩余强

**基金项目:** 航空科学基金 (2017ZD67002) 资助项目。

**收稿日期:** 2019-12-18; **修订日期:** 2020-01-07

**通信作者:** 冯振宇, 男, 博士, 教授, E-mail: mhfy@163.com。

**引用格式:** 邹君, 张悦超, 冯振宇, 等. 含多部位损伤搭接结构应力强度因子三维有限元分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(4): 618-623. Zou Jun, Zhang Yuechao, Feng Zhenyu, et al. Three-dimensional finite element analysis of stress intensity factors of lap joints with multiple site damage[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(4): 618-623.

度降低,临界裂纹尺寸较短,结构难以满足损伤容限要求。

机身蒙皮纵向搭接连接区域由于采用大量铆钉连接,在增压疲劳载荷作用下容易产生 MSD,严重影响飞机结构的完整性,是主要的研究对象。含 MSD 结构的分析研究主要包括裂纹萌生、裂纹扩展和剩余强度 3 个方面<sup>[2]</sup>,其中 MSD 裂纹应力强度因子 (Stress intensity factor, SIF) 分析是含 MSD 结构剩余强度和裂纹扩展分析的前提。SIF 计算方法包含有限元法、边界元法、权函数法等<sup>[3]</sup>。由于 MSD 裂纹之间存在相互干涉以及搭接处钉载分布较复杂,主要采用有限元法进行分析。根据有限元计算得到的节点位移和载荷,可采用 1/4 节点法、位移外推法、虚拟裂纹闭合法和等效积分法等计算裂纹尖端 SIF<sup>[4]</sup>。

对于铆接搭接结构,对每个铆钉建立详细的有限元模型会大大增加计算需求,主要采用简化二维模型进行分析。Silva 等<sup>[5]</sup>基于 FRANC2D/L 软件,将铆钉简化为弹簧元,对含 MSD 搭接结构进行裂纹扩展分析。陈跃良等<sup>[6-7]</sup>提出了将铆钉简化为杆元和弹簧元的组合方式,研究了含 MSD 搭接结构不同损伤模式下的 SIF 随裂纹扩展变化情况。

二维有限元模型虽然在计算上较为简单,但忽略了铆钉的弯曲和翘起、铆钉预紧力、板之间摩擦力以及次弯曲等因素,难以反映搭接件复杂的三维应力应变特性。随着计算机和有限元软件的发展,三维有限元分析模型开始应用。陈跃良等<sup>[8]</sup>采用搭接结构三维模型与搭接部位二维模型相结合的方法,研究了不同直孔和沉孔孔边裂纹长度时 SIF 沿试件厚度的变化规律。王建立<sup>[9]</sup>基于 ABAQUS 建立了考虑接触的含裂纹铆接结构三维有限元模型,采用虚拟裂纹闭合法分析了裂纹尖端 SIF 随裂纹长度的变化规律。张腾等<sup>[10]</sup>建立了含 MSD 裂纹的无干涉铆接搭接结构三维有限元模型,研究了不同 MSD 损伤模式下裂纹前后表面的 SIF 随裂纹长度的变化规律。

本文基于 ABAQUS 有限元软件建立含 MSD 裂纹的铆接搭接结构三维有限元模型,考虑了板之间、铆钉与孔间的接触。分析不同孔边裂纹长度、不同铆钉类型和不同损伤模式下裂纹尖端的 SIF 分布情况与变化规律。

## 1 三维有限元分析模型与方法

### 1.1 结构模型

对 MSD 裂纹尖端应力强度因子研究采用铆

接搭接试验件,模拟某型飞机纵向蒙皮搭接处的实际结构特征。上下蒙皮通过 3 排 6 列铆钉紧固件进行连接,具体尺寸如图 1 所示。蒙皮材料为厚 1.6 mm 的 2024-T3 铝合金,铆钉直径为 5 mm,材料为 2117 铝合金,铆钉与孔间为无干涉配合。铆钉类型分为埋头铆钉与平头铆钉两种类型。材料属性如表 1 所示。下蒙皮及其夹持端右端固定,上蒙皮受远场循环载荷,大小为 100 MPa。

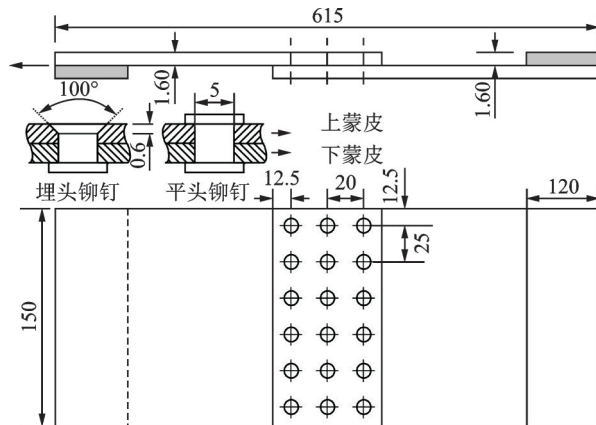


图 1 搭接试件几何尺寸

Fig.1 Geometry of lap joint specimen

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

材料	杨氏模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	断裂韧性 $K_{Ic}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
Al2024-T3	73 000	0.33	31.9
Al2117	71 700	0.33	

研究对象为上蒙皮头排铆钉孔边穿透裂纹,如图 2 所示,损伤模式主要有以下 4 种情形:模式 1:仅在 3 号孔右侧存在裂纹。模式 2:在 3 号孔右侧与 4 号孔左侧存在等长裂纹。模式 3:在 3 号孔右侧与 5 号孔左侧存在等长裂纹。模式 4:在每个孔两侧都存在等长裂纹。

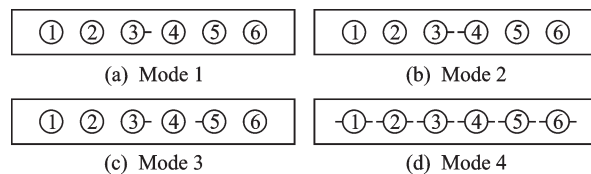


图 2 裂纹损伤模式

Fig.2 Damage modes with cracks

### 1.2 有限元模型与网格划分

基于 ABAQUS 有限元软件建立了含 MSD 裂纹的铆接搭接结构三维有限元模型,采用 Seam 功能在铆钉孔边分别预制不同损伤模式和不同长度的穿透裂纹。裂纹包含于圆柱形裂纹体中,裂尖区域采用退化的等参数奇异楔形单元 C3D15 进行网

格划分,裂尖附近单元中间节点移至1/4边长处;其他裂纹体区域采用二阶六面体单元C3D20进行网格划分。为降低计算需求,其他区域蒙皮和铆钉均采用一阶六面体非协调单元C3D8I进行网格划分。以含模式1裂纹的埋头铆钉搭接结构为例,其有限元模型以及蒙皮厚度方向、裂纹前缘的网格划分如图3所示。

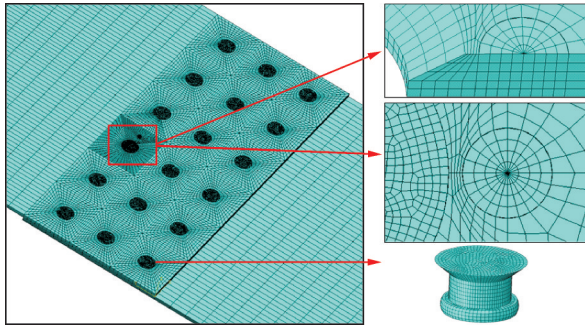


图3 含裂纹铆接搭接结构有限元模型

Fig.3 Finite element model of lap joint with cracks

### 1.3 接触描述

为防止上下蒙皮之间以及铆钉与蒙皮之间发生相互穿透,模型考虑了板之间、铆钉与孔间的接

触,在它们之间设置接触对。按接触对象可分为3种类型:(1)上蒙皮与铆钉的接触;(2)下蒙皮与铆钉接触;(3)上蒙皮与下蒙皮间的接触。每个铆钉都存在5个接触对,以埋头铆钉为例,主从面的设置如图4所示。各接触面的摩擦系数均设置为0.2<sup>[11]</sup>。

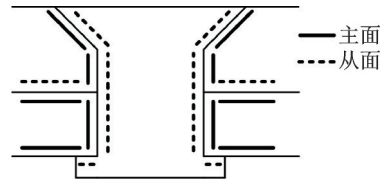


图4 各接触对主从面设置

Fig.4 Master and slave surfaces used to define contact pairs

### 1.4 边界条件

搭接结构有限元模型边界条件设置如图5所示,对上下蒙皮的两端夹持端Y向位移进行约束,载荷施加在夹持端左侧截面A上,右侧截面B的所有节点的3个自由度都进行约束。为了防止由于面外弯矩在搭接部位产生过大的翘曲,在搭接区域施加了垂直于表面方向的反翘曲位移约束。

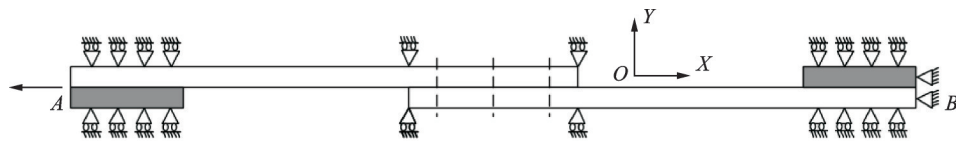


图5 模型边界条件

Fig.5 Boundary conditions of model

## 2 计算结果与分析

对无裂纹的铆接搭接三维有限元模型的应力分析结果表明,上中下3排铆钉所受的钉载比为7.18:5.75:7.12,与文献[12]试验测量的钉载比7:6:7十分吻合,验证了三维有限元模型的合理性。采用ABAQUS中的交互积分方法计算SIF。交互积分法由Stern等<sup>[13]</sup>首先提出,从能量角度计算二维复合型SIF,Gosz等<sup>[14]</sup>进一步推广到三维裂纹情况,其计算结果精度较高。为了研究含MSD裂纹铆接搭接结构的SIF特性,分析了不同孔边裂纹长度、不同铆钉类型和不同损伤模式情况下裂纹尖端SIF在厚度方向的分布情况和变化规律。

### 2.1 孔边裂纹类型

由于采用三维有限元模型,所有裂纹尖端的SIF均包含 $K_I$ 、 $K_{II}$ 和 $K_{III}$ 3个结果。根据文献[15],采用有效应力强度因子 $K_{eff}$ 表征复合型裂纹的SIF,则

$$K_{eff} = \left( K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{K_{III}^2}{1-\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

为了分析铆接搭接结构孔边裂纹类型,图6和7分别给出了铆钉为埋头铆钉和平头铆钉时模式1孔边单裂纹情形下裂尖接触面处的 $K_I$ 、 $K_{II}$ 、 $K_{III}$ 和 $K_{eff}$ 随裂纹长度的变化曲线。

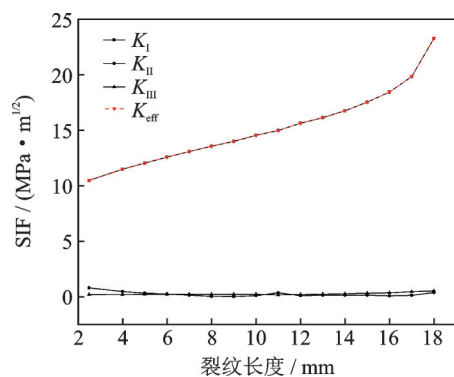


图6 模式1埋头铆钉搭接结构SIF随裂纹长度的变化  
Fig.6 SIF of countersunk rivet lap joints with Mode 1 crack under different crack lengths

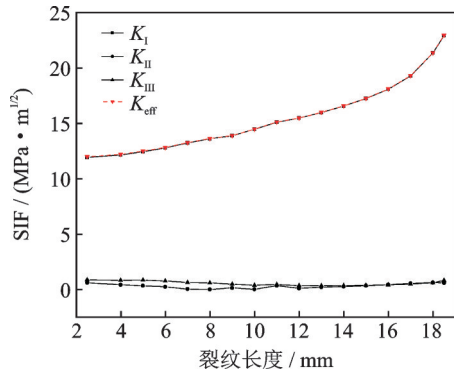


图 7 模式 1 平头铆钉搭接结构 SIF 随裂纹长度的变化  
Fig.7 SIF of flat head rivet lap joints with Mode 1 crack under different crack lengths

可以看出,无论是采用埋头铆钉还是平头铆钉,  $K_{II}$  和  $K_{III}$  值始终接近于 0,  $K_I$  值远大于  $K_{II}$  和  $K_{III}$ 。随着裂纹长度增加,  $K_I$  增加的速度不断加快。此外,  $K_I$  与  $K_{eff}$  在不同裂纹长度下都几乎重合。因此,认为铆接搭接结构的孔边裂纹类型为 I 型裂纹,在后续研究中主要基于  $K_I$  分析结果进行研究。

### 2.2 厚度方向 SIF 分布情况

为了研究裂纹尖端 SIF 在厚度方向上的分布规律,图 8 给出了采用埋头铆钉与平头铆钉时各损伤模式下裂纹长度为 4 mm 时的  $K_I$  分布情况。图 8 中厚度 0 mm 位置对应于上蒙皮外表面,厚度 1.6 mm 位置为上蒙皮内表面,即接触面位置。  $K_I$  值取各条裂纹中的最大值。

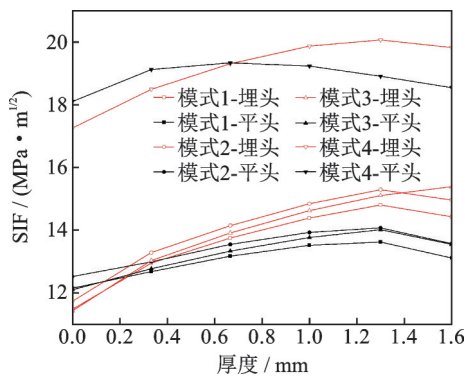


图 8 裂纹长度为 4 mm 的搭接结构  $K_I$  沿试件厚度方向变化

Fig.8  $K_I$  along the thickness direction of lap joints with 4 mm crack length

从图 8 可以看出无论是采用埋头铆钉与平头铆钉, SIF 值在外表面均为最小,靠近接触面一侧 SIF 值较大,最大值多数出现在蒙皮内部靠近接触面处。这主要是因为搭接口在远端载荷下由于偏心载荷会产生次弯曲,尽管施加了反翘曲约束,上蒙皮接触面仍会存在拉应力,而外表面形成压应

力。此外由于铆钉的弯曲和剪切变形,铆钉对上蒙皮的钉载主要作用在接触面一侧,这也导致接触面一侧 SIF 值较大。对于有限厚板,文献[16]采用三维有限元仿真分析也表明含中心穿透裂纹板的 SIF 最大值位于板厚度中心位置附近,与厚度有关。本文的有限元分析结果表明,蒙皮内部靠近接触面一侧的裂纹扩展速度最快,裂纹扩展轨迹为波浪形,这与文献[17]的试验结果是一致的。可见,搭接结构的疲劳裂纹具有隐蔽性,采用常规目视检查容易低估裂纹长度,从而对飞机造成潜在威胁。

为便于后文研究,提出采用定积分得到的平均值  $K_{Iavg}$  表征不同裂纹长度下裂纹尖端的  $K_I$  大小,为

$$K_{Iavg} = \frac{1}{T} \int_0^T K_I(t) dt \quad (2)$$

式中:  $K_{Iavg}$  为某一裂纹长度下的裂纹尖端  $K_I$  沿厚度方向的积分均值,  $K_I(t)$  为厚度方向上的  $K_I$  分布函数,  $T$  为蒙皮厚度。由于有限元网格是离散的,假设  $K_I$  在各层单元中沿厚度方向线性变化,可用分段积分计算得到  $K_{Iavg}$ 。

### 2.3 MSD 裂纹对 SIF 的影响

为了研究 MSD 对 SIF 的影响,图 9 给出了采用埋头铆钉和平头铆钉时裂纹尖端  $K_{Iavg}$  随裂纹长度的变化曲线。可以发现,相同裂纹长度下,2 种铆钉情况下各损伤模式的 SIF 均有如下关系:模式 4 > 模式 2 > 模式 3 > 模式 1,且随着裂纹扩展 SIF 值差异逐渐增大。模式 4 的 MSD 裂纹明显大于模式 1 单裂纹下的 SIF,且其随裂纹扩展增加十分迅速,这表明 MSD 裂纹不同孔之间的干涉非常显著。在同样双裂纹模式下,模式 2 的 SIF 大于模式 3,这是由于模式 2 的两裂纹间距离更短,干涉作用更强,随着裂纹扩展干涉更加显著。

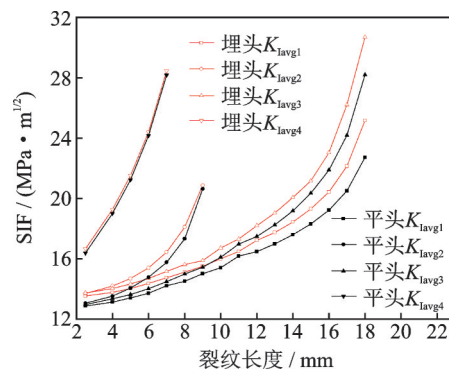


图 9 不同模式下的搭接结构 SIF 随裂纹长度的变化曲线  
Fig.9 SIF of lap joints with different crack lengths of different crack modes

## 2.4 铆钉类型对SIF的影响

为研究铆钉类型对厚度方向上SIF分布的影响,对图8进行分析可以发现,在埋头铆钉与平头铆钉情况下厚度方向上 $K_I$ 总体变化趋势相似。但在相同损伤模式与裂纹长度下,采用埋头铆钉结构的孔边裂纹SIF在接触面大于平头铆钉,在外表面则相反。这表明铆钉形状对SIF在厚度方向上的分布影响较大,采用埋头铆钉时裂纹前缘更具有隐蔽性。

为研究铆钉形状对裂纹前缘SIF值大小的影响,对图9进行分析可以发现,SIF曲线总体变化趋势埋头铆钉与平头铆钉相同。各损伤模式下相同裂纹长度时,采用埋头铆钉结构的孔边裂纹SIF均大于平头铆钉,可见与埋头铆钉相比采用平头铆钉连接的疲劳性能更好。随着裂纹长度增加,模式2与模式4铆钉类型下的孔边裂纹SIF逐渐趋于一致,原因是随着裂纹扩展裂纹间干涉是影响SIF的主要因素。由于模式1为单裂纹,模式3裂纹间干涉作用很小,埋头铆钉铆窝导致蒙皮承载面积减小,孔边裂纹SIF值差异随裂纹扩展逐渐增加。

## 3 结 论

本文基于ABAQUS建立了含MSD搭接结构三维有限元模型,研究了不同裂纹长度、铆钉类型以及损伤模式下裂纹尖端SIF分布情况和变化规律。经分析得出以下结论:

(1) 搭接件孔边裂纹I型SIF起主导作用,II型和III型SIF可忽略不计。

(2) 由于次弯曲、铆钉变形和板厚度等因素影响,SIF在外表面最小,接触面一侧较大,最大值大多位于蒙皮内部。搭接结构的疲劳裂纹具有隐蔽性,目视检查容易低估裂纹长度。

(3) 相同裂纹长度下,各损伤模式下的SIF均有如下关系:模式4>模式2>模式3>模式1。MSD裂纹之间存在较强的干涉作用,使SIF增大,且裂纹间距离越短,干涉作用越强。

(4) 裂纹长度相同时,埋头铆钉的孔边裂纹SIF积分均值大于平头铆钉,且接触面的SIF埋头铆钉大于平头铆钉,外表面则相反。随着裂纹长度增加,铆钉类型对含MSD裂纹的孔边裂纹SIF影响逐渐减小。与平头铆钉相比,采用埋头铆钉连接损伤容限性能更差,且裂纹更具有隐蔽性。

### 参考文献:

[1] 王生楠,郑晓玲. 运输类飞机防止广布疲劳损伤的新

规章解读[J]. 航空学报,2010,31(9): 1758-1768.

WANG Shengnan, ZHENG Xiaoling. Study on proposed rules to preclude widespread fatigue damage for transport category aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2010,31(9): 1758-1768.

[2] 冯振宇,杜洪增,田秀云. 老龄飞机结构广布疲劳损伤研究的关键问题[J]. 中国民航学院学报,2004(S1): 89-92.

FENG Zhenyu, DU Hongzeng, TIAN Xiuyun. Key issues in the study of widespread fatigue damage in ageing aircraft structures [J]. Journal of Civil Aviation University of China,2004(S1): 89-92.

[3] 酆正能. 应用断裂力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012: 65-73.

LI Zhengneng. Applied fracture mechanics [M]. Beijing: Beihang University Press,2010: 65-73.

[4] 刘明尧,柯孟龙,周祖德,等. 裂纹尖端应力强度因子的有限元计算方法分析[J]. 武汉理工大学学报,2011,33(6): 116-121.

LIU Mingyao, KE Menglong, ZHOU Zude, et al. Analysis of finite element calculation methods for crack-tip stress intensity factor [J]. Journal of Wuhan University of Technology,2011,33(6): 116-121.

[5] SILVA L F M, GONCALVES J P M. Multiple-site damage in riveted lap-joints: Experimental simulation and finite element prediction [J]. International Journal of Fatigue,2000,22(4): 319-338.

[6] 陈跃良,郁大照,杨茂胜,等. 含多处损伤搭接结构应力强度因子有限元分析[J]. 航空学报,2007,28(3): 615-619.

CHEN Yueliang, YU Dazhao, YANG Maosheng, et al. Finite element analysis of stress intensity factors of lap joint with multiple site damage [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2007,28(3): 615-619.

[7] 郁大照,陈跃良,王允良. 含多处损伤宽板螺接搭接件疲劳寿命研究 [J]. 工程力学,2017,34(6): 217-225.

YU Dazhao, CHEN Yueliang, WANG Yunliang. Study on fatigue life of wide bolted lap joint with multiple site damage [J]. Engineering Mechanics,2017,34(6): 217-225.

[8] 陈跃良,杨茂胜,张勇. 考虑微动影响的搭接结构应力强度因子有限元分析[J]. 失效分析与预防,2011,6(4): 199-203,223.

CHEN Yueliang, YANG Maosheng, ZHANG Yong. Finite element analysis of intensity factors of single lap joint under inching [J]. Failure Analysis and Prevention,2011,6(4): 199-203,223.

[9] 王建立. 含裂纹铆接结构应力强度因子分析[D]. 大

- 连:大连海事大学,2010.
- WANG Jianli. Stress intensity factor of the riveted joint structure with crack[D]. Dalian:Dalian Maritime University,2010.
- [10] 张腾,何宇廷,伍黎明,等.无干涉铆接搭接结构的多裂纹扩展预测方法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2016,17(1):8-12.
- ZHANG Teng, HE Yuting, WU Liming, et al. A prediction method of multiple crack growth on the fitted rivet lap-joint[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2016, 17(1): 8-12.
- [11] SZOLWINSKI M P, FARRIS T N. Linking riveting process parameters to the fatigue performance of riveted aircraft structures[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(1): 130-137.
- [12] COPE D A, WEST D, LUZAR J, et al. Corrosion damage assessment framework: corrosion/fatigue effects on structural integrity: D500-13008-1 [R]. [S. l.]: The Boeing Defense and Space Group, 1988.
- [13] STERN M, BECKER E B, DUNHAM R S. A contour integral computation of mixed-mode stress intensity factors[J]. International Journal of Fracture, 1976, 12(3): 359-368.
- [14] GOSZ M, DOLBOW J, MORAN B. Domain integral formulation for stress intensity factor computation along curved three dimensional interface cracks[J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(15): 1763-1783.
- [15] 郁大照,陈跃良.含裂纹螺接件应力强度因子三维有限元分析[J].机械工程学报,2011,47(20):121-126.
- YU Dazhao, CHEN Yueliang. Stress intensity factor of cracks in bolted based on three-dimensional finite element analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(20): 121-126.
- [16] 杨政,霍春勇,郭万林,等.有限厚度板穿透裂纹前缘附近三维弹性应力场分析[J].应用力学学报,2003,20(3):74-78,161.
- YANG Zheng, HUO Chunyong, GUO Wanlin, et al. Three-dimensional elastic stress fields near crack front in finite thickness plates [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2003, 20(3): 74-78, 161.
- [17] HARRIS C E, PIASCIAK R S, NEWMAN J C. A practical engineering approach to predicting fatigue crack growth in riveted lap joints: NASA/TM-2000-210106[R]. Hampton, Virginia: NASA, 2000.

(编辑:陈珺)