

## 边界条件对复合材料层合板准静态压痕损伤的影响\*

邢素丽,唐俊,肖加余

(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**在实际的服役过程中,飞机用复合材料层合板通过四边铆接的方式与飞机金属框架进行连接,其受力时的边界条件为四边固支。以实际应用背景为基础,分别从分层损伤扩展模式、接触力、凹坑深度、损伤宽度四个方面系统地比较了四边固支和四边简支两种边界条件下,复合材料层合板准静态压痕损伤的区别。结果表明以上四种变量在两种边界条件下均存在明显差异,可为基于实际应用的复合材料准静态压痕损伤研究提供实验依据。

**关键词:**复合材料层合板;准静态压痕;边界条件

**中图分类号:**TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)01-015-05

## Influence of boundary conditions on quasi-static indentation damage of composite laminates

XING Suli, TANG Jun, XIAO Jiayu

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Composite laminates are riveted to the metal frame when applied on aircrafts, hence the boundary condition of composite laminates is four-edge clamped. Based on the real application, the differences of quasi-static indentation damage of the composite laminates with the four edges clamped simply supported were systemically compared from four aspects: delamination propagation mode, contact force, dent depth and damage width. The experimental results show that all these four aspects are different when composite laminates are loaded under different boundary conditions. Also the results can provide experimental data for investigating the quasi-static indentation damage of composite laminates on the basis of real application.

**Key words:** composite laminates; quasi-static indentation; boundary condition

碳纤维/双马复合材料层合板具有良好的力学性能和耐高温性能,目前已被广泛应用于机翼蒙皮、机舱壁板等部位。随着碳纤维/双马复合材料层合板用量的增多,其损伤问题日益突出。由于层合板结构对冲击载荷十分敏感,十分容易产生层间分层、基体裂纹、纤维断裂等各种损伤,这些损伤的存在会导致层合板的承载能力大幅下降,给飞机的飞行安全造成严重的安全隐患。但是,由于冲击损伤是一个瞬时动态过程,其损伤过程难于监控,损伤评估工作所需实验消耗过大,因此,采用准静态压痕损伤来等效研究低速冲击损伤成了近些年来人们常用的研究方法。

Timoshenko等<sup>[1]</sup>首次提出:如果冲击过程持续的时间大于冲击谐波由冲击点传播到支撑点所需的时间,那么可以用准静态接触问题来等效地研究低速冲击问题。1998年美国颁布了ASTM

D6264-98(04)<sup>[2]</sup>《测量纤维增强聚合物基复合材料对集中准静态压痕力的损伤阻抗的标准方法》,该标准明确阐述了准静态压痕(Quasi-Static Indentation, QSI)实验可用于定量地测量纤维增强复合材料对集中准静态压痕力的损伤阻抗。而后,许多研究都证实了准静态压痕损伤与低速冲击损伤之间的等效性<sup>[3-9]</sup>。

在实际的服役过程中,飞机用复合材料结构件是通过四边铆接的方式与飞机金属框架进行连接的,其受力时的边界条件应为四边固支。然而,在目前针对准静态压痕损伤的研究中,大部分学者往往没有特别关注边界条件的影响,有的学者甚至认为边界条件对准静态压痕损伤的影响几乎可以忽略<sup>[10]</sup>。为了提供更加贴合实际应用背景的准静态压痕实验依据,分别从分层扩展模式、接触力、损伤宽度、凹坑深度四个方面讨论了四边简支和四边固

\* 收稿日期:2015-09-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51303208, 51403235)

作者简介:邢素丽(1976—),女,河南周口人,副教授,博士,硕士生导师, E-mail: xingsuli@nudt.edu.cn

支条件下复合材料层合板准静态压痕损伤的区别。

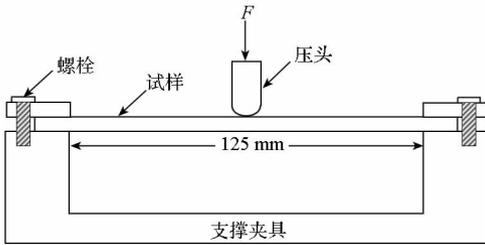
### 1 实验

通过热压罐工艺制备了碳纤维/双马复合材料层合板,铺层方式为 $[0/45/90/-45]_{5s}$ 。根据美标 ASTM D6264-98(04)<sup>[2]</sup>进行准静态压痕实验,加载速率为 1 mm/min,压头直径为 12.7 mm,试样悬空部分的尺寸为 125 mm × 75 mm。通过工装上九个螺钉来实现层合板试样的四边固支。需要指出的是,试样尺寸根据实验标准确定,尺寸效应对准静态压痕损伤的影响此处不作讨论,实验装置如图 1(a)和图 1(b)所示。在加载的过程中,每隔 1kN 停止加载,对试样进行超声波 C 扫描和凹坑深度测量,以监测层合板内部和表面损伤情况,而后,继续加载,直至试样破坏。



(a) 准静态压痕实验装置

(a) Experimental facility of quasi-static indentation



(b) 准静态压痕实验示意图

(b) Schematic of quasi-static indentation

图 1 准静态压痕实验

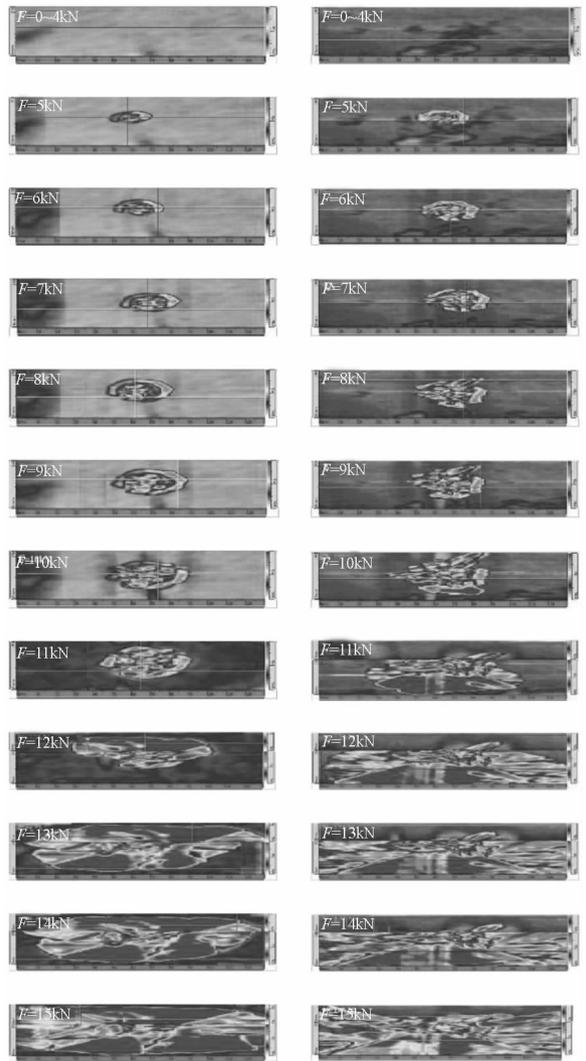
Fig. 1 Quasi-static indentation test

### 2 结果与讨论

#### 2.1 分层扩展模式的区别

图 2 所示分别为四边固支和四边简支条件下,每隔 1kN 卸载后所测得的超声波 C 扫描图,其反映的是复合材料层合板受特定准静态压痕力作用时内部的分层损伤扩展情况。对比发现,在分层损伤明显扩展之前,两种边界条件下的分层损伤扩展情况基本一致,即在一定静压痕力下,产

生的初始分层损伤基本一致。而后,随着静压痕力的增大,层合板内不断地产生新的分层损伤,且分层损伤在各自面内发生轻微的扩展。当分层损伤明显扩展之后,四边固支条件下,分层损伤在试样宽度方向上沿两侧同时扩展,直至扩展至试样边缘,而四边简支条件下,分层损伤首先沿宽度方向一侧进行扩展,扩展至试样边缘之后,再向另一侧扩展。造成这种差异的原因是:四边简支条件下,层合板四边处于自由状态,当分层损伤在一侧明显扩展后,造成了层合板两侧刚度的不对称,分层前缘为应力集中区,分层损伤会沿着应力集中



(a) 四边固支下复合材料层合板分层损伤扩展 (b) 四边简支下复合材料层合板分层损伤扩展

(a) Delamination damage propagation under four edges clamped (b) Delamination damage propagation under simply supported

图 2 不同边界条件下复合材料层合板分层损伤扩展情况

Fig. 2 Delamination damage propagation of composite laminates under different boundary conditions

的区域扩展,因此,分层损伤沿着分层损伤扩展的一侧继续扩展;而四边固支条件下,当分层损伤在一侧明显扩展后,继续加载,由于边缘的自由度为零,在变形协调的作用下,分层会沿另一侧扩展,从而使得层合板两侧的刚度对称。

对超声波 C 扫描所得的数据进行处理可以得到不同位置分层损伤的具体深度,为了消除试样厚度所带来的差异,均用损伤深度  $h$  除以层合板厚度  $T$ 。选择产生初始分层损伤、分层损伤明显扩展、分层损伤不再扩展三个不同的时刻,对两种边界条件下分层损伤深度进行了对比,如图 3 所示。

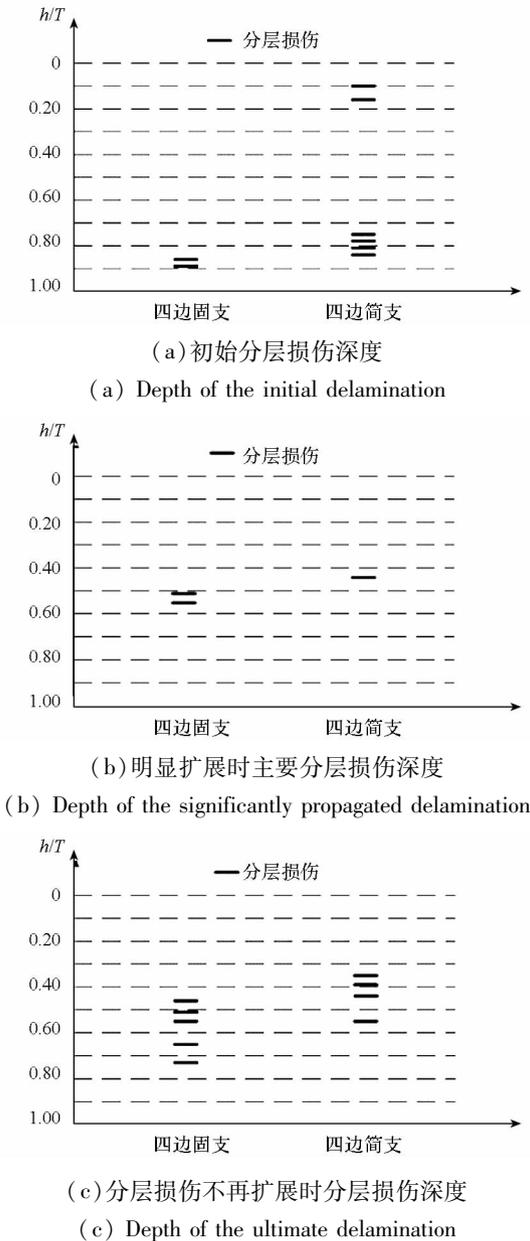


图 3 不同边界条件下不同时刻分层损伤深度  
Fig. 3 Delamination damage depth of samples under different periods and boundary conditions

对比发现:当复合材料层合板在静压痕力作用下产生初始分层损伤时,四边简支条件下层合

板内部产生了更多的分层损伤,且既产生了浅层初始分层损伤又产生了深层初始分层损伤,而四边固支条件下只产生了深层的初始分层损伤;在分层损伤明显扩展时,四边固支条件下发生明显扩展的损伤深度为 0.51 和 0.55,而四边简支条件下发生明显扩展的分层损伤深度为 0.44,两者有所不同;当层合板发生最终失效时,四边固支条件下,分层损伤深度为 0.51,而四边简支条件下则为 0.39。总体而言,四边简支条件下分层损伤的深度要浅于四边固支条件下分层损伤的深度。

### 2.2 凹坑深度的区别

在准静态压痕实验过程中,每隔 1kN 停止加载后,立即对凹坑深度进行测量,四边固支和四边简支条件下层合板试样的凹坑深度 - 静压痕力曲线如图 4 所示。

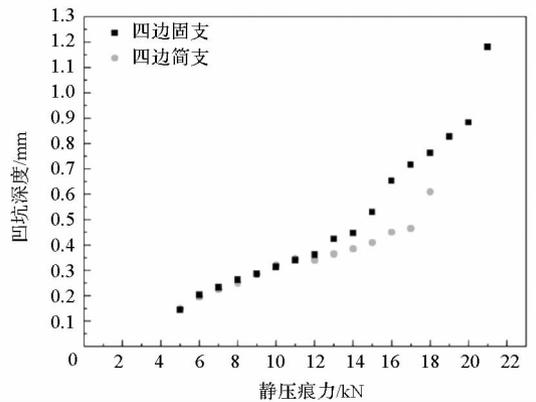


图 4 不同边界条件下复合材料层合板凹坑深度 - 静压痕力曲线  
Fig. 4 Dent depth of samples under different boundary conditions

对比两种边界条件下凹坑深度的变化规律并结合前文的超声波 C 扫描结果可以看出,在分层损伤明显扩展之前 ( $F < 12\text{kN}$ ),两种边界条件下所测的凹坑深度变化规律几乎一致;当分层损伤明显扩展后,两种边界条件下所得的凹坑深度变化曲线出现明显的分岔现象,四边固支条件下的凹坑深度明显大于四边简支条件下的凹坑深度,其原因在于:四边简支条件下,静压痕力较大时,层合板边缘向上翘起,增大了层合板的整体变形,从而通过整体的变形降低了凹坑深度的增长。

### 2.3 损伤宽度的区别

对超声波 C 扫描的结果进行进一步处理,定义沿试样长度方向的分层损伤的最大宽度为试样的损伤宽度,如图 5 所示。四边固支和四边简支条件下,损伤宽度 - 静压痕力曲线如图 6 所示。

对损伤宽度进行分阶段的线性拟合,如图 6

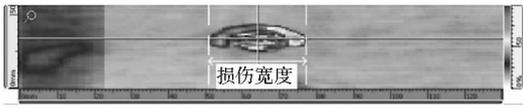


图 5 完好试样损伤宽度的定义  
Fig. 5 Definition of the damage width

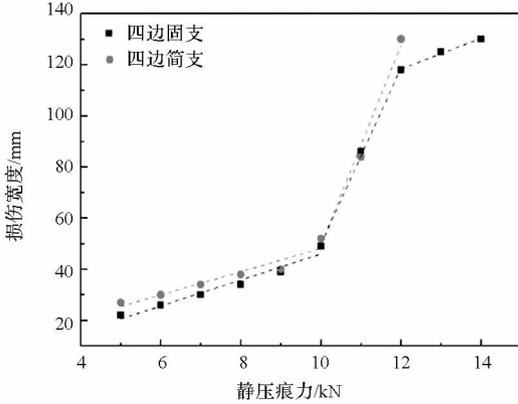


图 6 不同边界条件下复合材料层合板损伤宽度 - 静压痕力曲线

Fig. 6 Damage width of samples under different boundary conditions

所示。结合前文特定静压痕力下的超声波 C 扫描结果可知,四边固支条件下,分层损伤宽度的增加可分为三个阶段,第一个阶段是从产生初始分层损伤到分层损伤明显扩展之前,损伤宽度的增加较为缓慢;第二阶段从分层损伤明显扩展到分层损伤扩展至试样边缘之前,损伤宽度迅速增加;第三阶段从分层损伤扩展至试样边缘之前到分层损伤扩展至试样边缘,损伤宽度的增加再次变缓。而在四边简支条件下,分层损伤宽度的增加只呈现出两个阶段,并没有出现四边固支条件下分层损伤宽度增长速率再次减缓的第三阶段。对比两种边界条件下分层损伤宽度的增加情况发现,两种边界条件下损伤宽度的扩展速率基本一致,但是,在四边固支条件下,当分层损伤扩展至试样边缘时,由于夹具对试样的挤压,对分层损伤的进一步扩展起到了阻碍的作用,造成损伤宽度增加速率的降低,而在四边简支条件下,四边处于自由状态,因此,分层损伤直接扩展至试样边缘,损伤宽度增加速率不会减缓。

### 2.4 接触力的区别

为了研究静压痕力与层合板损伤之间的关系,对试样进行单次加载实验,即直接加载至试样破坏,所得的静压痕力 - 位移曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,层合板受静压痕力作用直至破坏的整个过程中,可以得到特征静压痕力  $F_1, F_2$

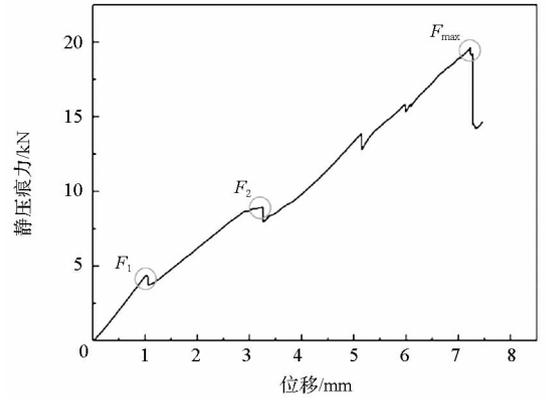


图 7 静压痕力 - 位移曲线

Fig. 7 Force-displacement curve

和  $F_{max}$ , 对应超声波 C 扫描的结果发现,特征静压痕力对应着特征损伤的产生,  $F_1$  对应着在静压痕力作用下层合板内部初始分层损伤的产生;  $F_2$  对应着在静压痕力作用下层合板内部分层损伤的明显扩展;  $F_{max}$  则对应层合板的最终破坏。因此,特征静压痕力可以用来表征复合材料层合板在各个阶段的损伤阻抗情况。四边固支和四边简支条件下得到的特征静压痕力值见表 1。

表 1 不同边界条件下复合材料层合板的特征静压痕力值

Tab. 1 Eigen force of samples under different boundary conditions kN

边界条件	特征静压痕力		
	$F_1$	$F_2$	$F_{max}$
四边固支	4.51	10.18	21.53
四边简支	4.51	10.52	18.55

由于制备工艺的限制,经观察发现试样的厚度并不均一,为了消除厚度对层合板整体性能的影响,定义接触力  $F' = F/T$  ( $T$  为试样厚度),故得到特征接触力  $F'_1, F'_2$  和  $F'_{max}$ ,具体数值如图 8 所示。

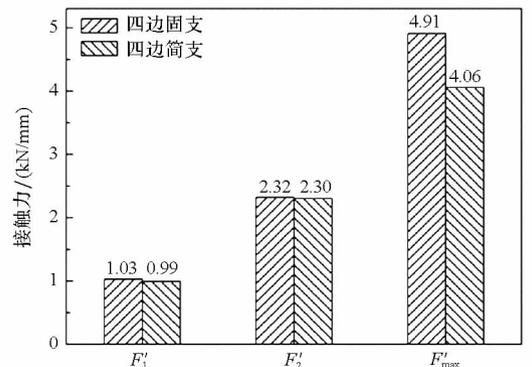


图 8 不同边界条件下复合材料层合板特征接触力

Fig. 8 Eigen contact force of samples under different boundary conditions

由图8可知,四边固支和四边简支条件下所得到的特征接触力值  $F'_1, F'_2$  基本一致,但是  $F'_{\max}$  相差较大,四边固支条件下所得到的  $F'_{\max}$  明显大于四边简支条件下所得到的  $F'_{\max}$ 。这表明在四边固支条件下,复合材料层合板能够承受更大的准静态压痕力,其损伤阻抗要高于四边简支条件下层合板的损伤阻抗。

### 3 结论

从实际应用的背景出发,系统地比较了四边简支和四边固支两种边界条件下复合材料层合板准静态压痕损伤的区别,结果表明,无论是分层扩展模式、凹坑深度、损伤宽度,还是特征接触力,两种边界条件下都存在明显的差异。因此,在以飞机用复合材料层合板为研究对象的准静态压痕损伤研究中,不能通过四边简支条件下的准静态压痕损伤来等效研究四边固支条件下的准静态压痕损伤。

### 参考文献 (References)

- [1] Timoshenko S, Goodier J N. Theory of elasticity [M]. 2nd ed. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 1951.
- [2] ASTM D6264-98(04). Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced quasi-static indentation force[S]. ASTM International, 1998.
- [3] Poe C C. Mechanics methodology for textile preform composite materials [C]//Proceedings of the 28th International Technical Conference, SAMPE, 1996: 324-338.
- [4] Lee S M, Zahuta P. Instrumented impact and static indentation of composites [J]. Journal of Composite Materials, 1991, 25(2): 204-222.
- [5] 黄光启, 杨胜春, 鲍盘盘. 复合材料低速冲击与准静态压痕等效方法研究[C]. 第17届全国复合材料学术会议论文, 2012.  
HUANG Guangqi, YANG Shengchun, BAO Panpan. Equivalent method of composite materials subjected to low speed impact and quasi-static indentation force[C]. The 17th National Conference on Composite Materials, 2012. (in Chinese)
- [6] 闫丽, 安学锋, 蔡建丽, 等. 复合材料层压板低速冲击和准静态压痕损伤等效性的研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(3): 70-77.  
YAN Li, AN Xuefeng, CAI Jianli, et al. Study on damage equivalence of composite laminates subjected to low-velocity impact and quasi-static indentation [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(3): 70-77. (in Chinese)
- [7] Nettles A T, Douglasm M J. A comparison of quasi-static indentation to low-velocity impact; NASA/TP 2000-2210481 [R]. Alabama: Marshall Space Flight Center, 2000.
- [8] Swanson S R. Limits of quasi-static solutions in impact of composite structures [J]. Composites Engineering, 1992, 2(4): 261-267.
- [9] Kaczmarek H, Maison S. Comparative ultrasonic analysis of damage in CFRP under static indentation and low-velocity impact [J]. Composite Science and Technology, 1994, 51(1): 11-26.
- [10] 熊俊杰. 复合材料层压板对集中准静态压痕力的损伤阻抗分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.  
XIONG Junjie. Analysis of damage resistance of composite laminates subjected to quasi-static indentation force [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)