复合材料静压痕与落锤冲击初始损伤对比试验

郭 渊 关志东 刘德博 孟庆春

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191) (北京航空航天大学 宇航学院，北京 100191)

摘 要：为了研究复合材料层合板的分层起始载荷，对不同材料体系和不同铺层数的复合材料层合板进行了准静态压痕试验和落锤冲击试验.得到了复合材料层板的分层起始载荷和冲击分层损伤能量门槛值，并对损伤情况进行了分析.结果表明，层合板的落锤冲击试验的分层起始载荷与冲击能级有关，并且分层起始载荷值随冲击能级提高而增加；准静态压痕试验的分层起始载荷值要低于低速冲击试验的分层起始载荷值；当冲击能量达到层板分层损伤能量门槛值时，层板发生大量分层损伤，层合板刚度出现急剧下降.

关 键 词：准静态压痕试验；落锤冲击试验；分层起始载荷

中图分类号：TB 33

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)08-1018-04

Comparison between quasi-static indentation testing and drop-weight impact testing on delamination onset damage

Guo Yuan Guan Zhidong Liu Debo

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Meng Qingchun

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To discuss the delamination onset load, quasi-static indentation tests and drop-weight impact tests were performed. The effects of the material and plying pattern on the delamination onset load were also studied. Moreover, the delamination threshold energy levels were found and the corresponding damage was analyzed. The results show that the delamination onset load increases along with the impact energy, and the delamination onset load in the quasi-static indentation is lower than in the low-velocity impact. Massive delamination happens in laminate panels when the energy reaches the delamination threshold energy, and the rigidity descends rapidly.

Key words: quasi-static indentation; low-velocity impact; delamination onset load

随着航空航天中对复合材料研究和应用的进一步深入，研究复合材料损伤对结构强度、刚度及疲劳寿命的影响愈来愈重要.目前普遍认为冲击损伤是复合材料在使用过程中产生的最严重的损伤[1].有研究表明，低速大质量冲击可以用准静态压痕试验来模拟[2].因此采集信息量大以及试验过程容易控制的准静态压痕试验得到广泛应用.

许多学者研究认为，复合材料落锤冲击试验和准静态压痕试验引起的损伤相似，但也存在一些不同[2-6].

目前，复合材料落锤冲击试验采用 ASTM D 7136—05 标准[7]，准静态压痕试验采用 ASTM D 6264—98 标准[8].本文在相同的层压板以及相同的试验条件下，依据上述试验标准对复合材料准静态压痕试验和落锤冲击试验的分层初始损伤进行研究，这对于研究表征复合材料层合板损伤阻抗具有积极意义.

收稿日期：2008-06-19

基金项目：国家自然科学基金资助项目(10477003)

作者简介：郭 渊(1982—)，男，山西河津人，博士生，guoyuan@ase.buaa.edu.cn.

1　试验标准及试验设备

两种试验标准对复合材料层压板的尺寸、支持方式及冲/压头等要求不一致,为了对比这两种试验,本文以落锤冲击试验标准作为基准,即层压板尺寸、支持方式及冲/压头等符合 ASTM D 7136—05 标准.

上述标准规定:层压板试件尺寸为 150 mm×100 mm;冲击支持夹具开口为 125 mm×75 mm;冲头直径 16 mm,质量 5.5 kg.

准静态压痕试验在 INSTRON 液压伺服静力/疲劳试验机上实施,加载速率为 0.5 mm/min.

冲击试验在自行设计的具备数据实时采集功能的落锤冲击试验机[9]上实施.此设备通过对射式激光传感器测定冲击初始速度,并由落锤上的压力传感器测定冲击接触力.

热揭层试验使用的造影液为氯化金乙醚溶液,并在天津中环的 SX2-12-10 马弗炉中加热去除基体.

本文图中的点 F_1 对应于分层起始载荷的位置.

2　试验及分析

2.1　准静态压痕试验

准静态压痕试验选用了 3 种材料体系,分别为 T700/5428A,T700/LT-03 和 T300/5405,其层合板冲击后压缩强度 CAI(Compression strength After Impact of laminate)分别为 200 MPa,180 MPa 和 170 MPa.

对于 T700/5428A 这种材料,选用了 3 种铺层数,分别为$[45/0/-45/90]_{3S}$,$[45/0/-45/90]_{4S}$和$[45/0/-45/90]_{6S}$.

试验结果如图 1、图 2 所示.图 1 为铺层为$[45/0/-45/90]_{4S}$,材料为 T700/5428A,T300/5405 和 T700/LT-03 的准静态压痕试验.图 2 为上述 3 种铺层数,材料为 T700/5428A 的准静态压痕试验.

从图 1 可以看出,材料 T700/5428A 的分层起始载荷明显高于其余两种材料;材料 T700/LT-03 和 T300/5405 的分层起始载荷则相差不大,而 T300/5405 损伤后的刚度下降比较严重.

分层损伤和基体开裂主要取决于树脂基体性能.树脂的性能决定了复合材料冲击韧性,材料的 CAI 值则反应了这种特性.T700/5428A 的 CAI 值比另外两种材料高出 10%左右,所以它的分层起始载荷要高于另外两种材料;材料 T300/5405 的 CAI 值比 T700/LT-03 略低,即材料更脆,所以损伤后刚度下降比较明显.

准静态压痕试验虽与文献[10]在 1994 年测定分层临界载荷的试验模型有稍许差别,但经本文验证其临界分层载荷的公式仍然适用:

$$P_c^2 = k\frac{8\pi^2 Eh^3}{9(1-\upsilon^2)}G_{\mathrm{IIC}} \tag{1}$$

式中,E 和 υ 为层合板面内等效弹性模量和泊松比;h 为层合板的厚度;G_{IIC} 为Ⅱ型断裂损伤临界能量释放率.本文引入 k 值来协调两种模型差别.

式(1)表明,临界分层载荷 P_c 与层合板厚度 h 的$\frac{3}{2}$次方,即 $h^{3/2}$ 成正比.本文静压痕试验选用的 3 种铺层数层合板,其面内等效弹性模量、泊松比及Ⅱ型临界能量释放率都一致,差别仅在层板厚度.图 2 中分层初始载荷经验证符合上述比例关系.由此可解释图 2 中的试验现象:随着层合板厚度的增加,分层起始载荷也在不断提高.

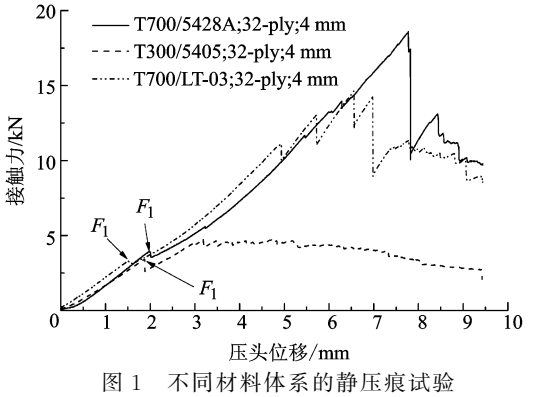


图 1　不同材料体系的静压痕试验

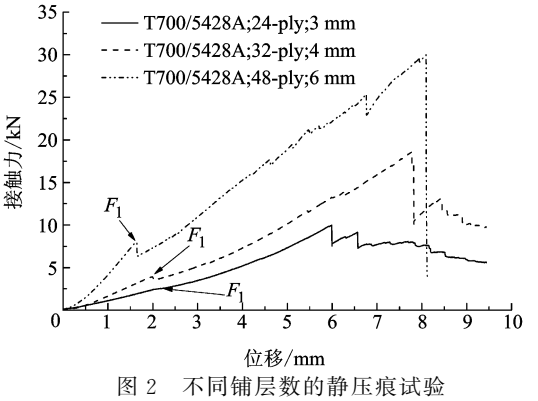


图 2　不同铺层数的静压痕试验

2.2　落锤冲击试验

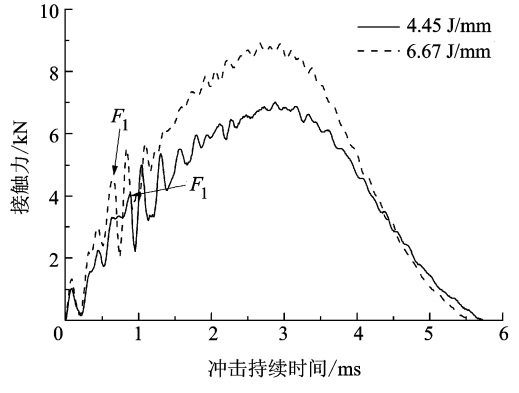
落锤冲击试验同样针对上述 3 种材料体系:T700/5428A,T700/LT-03 和 T300/5405.对于每一种材料,均使用$[45/0/-45/90]_{4S}$铺层.

对于每一种情况,首先采用了 4.45 J/mm 和

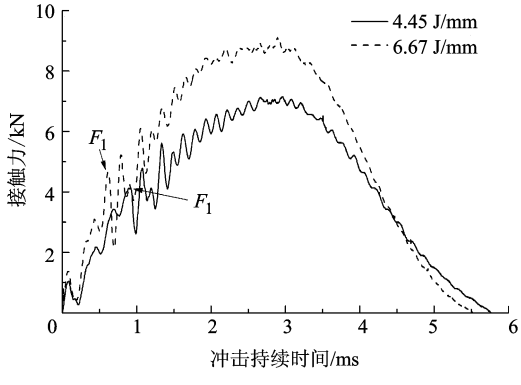
6.67 J/mm 这两个常用冲击能级.试验结果如图3所示.

从图3中可以看出,对于这3种材料的落锤冲击试验,随着冲击能级的提高,层板发生分层起始损伤的时间提前,并且分层起始载荷也在增加.

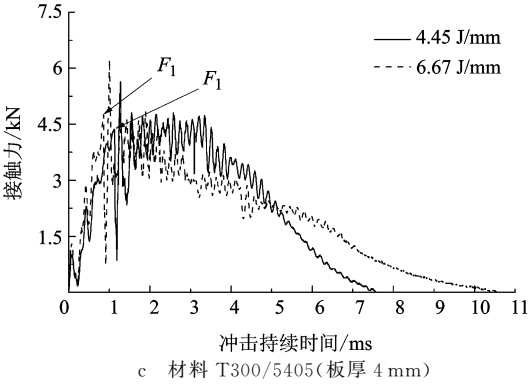
本文认为冲击能级越大,意味着冲头速度的提高,使层板产生损伤的时间缩短,从而层板损伤没有充分的时间进行扩展,因此分层起始载荷也相应提高.



a 材料 T700/5428A(板厚4 mm)



b 材料 T700/LT-03(板厚4 mm)

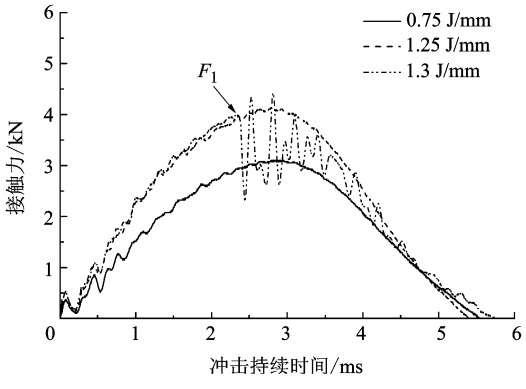


c 材料 T300/5405(板厚4 mm)

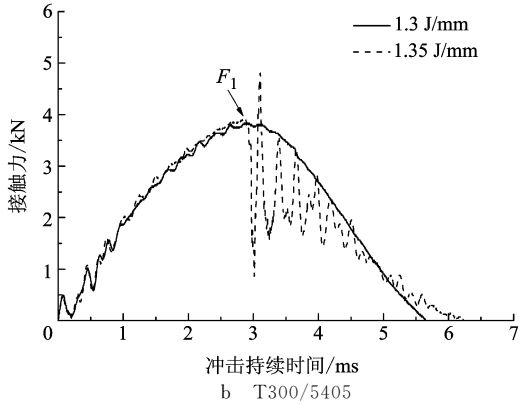
图3 T700/5428A、T700/LT-03和T300/5405落锤冲击试验

为了与静压入分层起始载荷具有可比性,本文对T700/5428A和T300/5405这两种材料,铺层方式为$[45/0/-45/90]_{4S}$的层合板,找出了冲击分层损伤门槛值,如图4所示,并与准静态压痕试验做了比较,见表1、表2.

从表1和表2中可以看出,准静态压痕的分层起始载荷低于冲击分层起始载荷.而随着冲击能级的提高,冲击引起的分层起始载荷有增加的趋势.



a T700/5428A



b T300/5405

图4 两种材料冲击分层损伤门槛值

表1 T700/5428A分层起始载荷

类 型	分层起始载荷/kN
准静态压痕	3.923
1.3 J/mm	4.004
4.45 J/mm	4.126
6.67 J/mm	4.590

表2 T300/5405分层起始载荷

类 型	分层起始载荷/kN
准静态压痕	3.388
1.35 J/mm	3.906
4.45 J/mm	4.370
6.67 J/mm	4.760

2.3 热揭层试验

本文对T700/5428A,$[45/0/-45/90]_{4S}$的层合板在冲击能级为1.3 J/mm、4.45 J/mm和6.67 J/mm下分别进行了热揭层试验,以详细了解各层的损伤情况,如图5所示.

从图5中可以看出,分层损伤面积随着冲击能级的提高而增大.当冲击能量达到冲击分层损伤能量门槛值(1.3 J/mm)时,层板中不同铺层角之间普遍发生较均匀的分层损伤;当冲击能量达

到 4.45 J/mm 时,分层损伤面积增大并呈现锥形分布;当冲击能量进一步增大到 6.67 J/mm 时,分层损伤进一步扩展,分层损伤面积无明显规律.

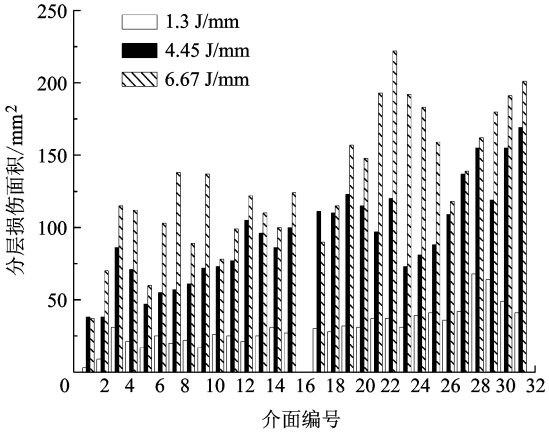


图 5　T700/5428A 分层损伤情况

3　结　论

1) 同一层合板的落锤冲击试验,随着冲击速度的提高,试件分层起始载荷也会增加;并且由于冲头惯性的影响,发生首次分层的时间提前.

2) 同一层合板的准静态压痕试验的分层起始载荷低于低速冲击试验的分层起始载荷.

3) 考虑到落锤冲击试验涉及试件中波的传播与振动以及与时间有关的材料特性等因素,本文认为准静态压痕试验相对于落锤冲击试验有更充裕的时间产生损伤,由此可以解释结论 1)和结论 2)的试验现象.

4) 当冲击能量达到冲击分层损伤能量门槛值时,层板中不同铺层角之间普遍发生较均匀的分层损伤,层板刚度急剧下降.

5) 分层损伤和基体开裂主要取决于树脂基体性能.树脂的性能决定了复合材料冲击韧性,材料的 CAI 值则反应了这种特性.准静态压痕试验的分层起始载荷与材料的 CAI 值密切相关.

参考文献(References)

[1] 杨乃宾,张怡宁.复合材料结构设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003:321－330
Yang Naibin, Zhang Yining. Composite structure design [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003:321－330(in Chinese)

[2] Nettles A T, Douglas M J. A comparison of quasi-static indentation to low-velocity impact [R]. NASA/TP-2000-2210481, 2000

[3] Swanson S R. Limits of quasi-static solutions in impact of composite structures[J]. Composites Engineering, 1992, 2(4):261－267

[4] Kwon Y S, Sankar B V. Indentation-flexure and low-velocity impact damage in graphite epoxy laminates[J]. Journal of Composites Technology and Research, 1993, 15(2):101－111

[5] Kaczmarek H, Maison S. Comparative ultrasonic analysis of damage in CFRP under static indentation and low-velocity impact[J]. Composites Science and Technology, 1994, 51(1):11－26

[6] Lee S M, Zahuta E. Instrumented impact and static indentation of composites [J]. Journal of Composite Materials, 1991, 25(2):204－222

[7] ASTM D 7136—05, Test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer-matrix composite to a drop-weight impact event[S]

[8] ASTM D 6264—98(04), Test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer-matrix composite to a concentrated quasi-static indentation force[S]

[9] 关志东,赵伟. FC 落锤式冲击试验机的研制及 T300/QY8911 层合板低速冲击损伤的试验研究[J].复合材料学报,2005,22(增刊):27－31
Guan Zhidong, Zhao Wei. FC impact testing machine and the research of low velocity impact damage of T300/QY8911 composite plates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(Supplement):27－31(in Chinese)

[10] Davies G A O, Zhang X, Zhou G, et al. Numerical modeling of impact damage[J]. Composites, 1994, 25(5):342－350

(责任编辑:李　晶)