

文章编号: 1000-3851(2000)02-0114-05

复合材料夹芯板低速冲击后弯曲及横向静压特性

程小全, 寇长河*, 郇正能*

(北京航空材料研究院, 北京 100095) (*北京航空航天大学 飞行器设计及应用力学系, 北京 100083)

摘 要: 对低速冲击后的复合材料 Nomex 蜂窝夹芯板进行了纯弯曲和准静态横向压缩实验, 用 X 光技术、热层技术和外观检测等对板内的损伤进行测量, 分析了被冲击面在受压情况下蜂窝夹芯板的弯曲破坏特点, 对比了横向静压与低速冲击所造成的板内损伤, 讨论了不同横向压缩速度时接触力 P -压入位移 Δh 的变化规律和损伤情况。结果表明: 低速冲击可使蜂窝夹芯板的弯曲强度大幅度降低; Nomex 蜂窝夹芯板对低速冲击不敏感。

关键词: 蜂窝夹芯板; 低速冲击; 损伤; 弯曲; 准静态横向压缩

中图分类号: TB330.1; V258 **文献标识码:** A

BEHAVIOR OF BENDING AFTER LOW VELOCITY IMPACT
AND QUASI-STATIC TRANSVERSE INDENTATION OF
COMPOSITE HONEYCOMB CORE SANDWICH PANELS

CHENG Xiao-quan, KOU Chang-he*, LI Zheng-neng*

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

(*Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics, Beijing University
of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract: Pure bending tests after low velocity impact and quasi-static transverse indentation tests were carried out on composite Nomex honeycomb core sandwich panels. Methods of X ray, depley and visual inspection were used to measure the damage in specimens. Bending failure behavior was studied on the sandwich panels, in which the impacted face sheet was compressed and another face sheet tensioned. The damage caused by transverse indentation was compared with that by low velocity impact. The damage and rules of contact force P against indent displacement Δh were discussed at different transverse indent speeds. Results showed that the bending strength of honeycomb core sandwich panels was reduced extensively by low velocity impact and that the Nomex honeycomb core sandwich panels were not sensitive to transverse indent speed.

Key words: honeycomb core sandwich panels; low velocity impact; damage; bending; quasi-static transverse indentation

复合材料夹芯板是一种典型的复合材料结构,在某些方面它更能体现复合材料的优点和特色。但是,复合材料低速冲击性能差的缺陷夹芯板同样存在。不仅如此,夹芯板面板一般较薄,在较低的能量冲击下就会出现内部损伤,且很难从外表发现,因此研究复合材料夹芯板的冲击损伤和损伤容限具有非常重要的工程意义。另外,由于夹芯的存在,夹芯板的低速冲击损伤和继后的力学行为有许多易于层合板的特点^[1~4]。如果将夹芯看成两面板间的过渡层,

把夹芯板看成层合板的特例^[5],那么这些研究对复合材料结构和界面的发展有较大的指导意义,有可能帮助改善复合材料的抗冲击性能。

本文是在对复合材料夹芯板低速冲击损伤以及继后板的拉、压、疲劳等性能研究的基础上^[1~4],进一步对面板为典型铺层的 Nomex 蜂窝夹芯板低速冲击损伤后的弯曲进行实验研究,以期更全面了解蜂窝夹芯板低速冲击后的力学行为。本文还对夹芯板进行了不同速度下的准静态横向压缩实验,并将

收稿日期: 1998-10-30; 收修改稿日期: 1999-02-10

基金项目: 航空基础科学基金资助项目(9851017)

作者简介: 程小全(1967),男,博士,在站博士后,研究方向主要为复合材料力学、复合材料损伤力学、复合材料损伤容限设计等。



表 1 实验所用试件情况
Table 1 Specimens used in the test

实验状况	试 件	试件的铺层	尺寸(长×宽×厚)/mm ³	蜂窝厚度/mm
弯 曲	K/C 短试件	[(45/- 45) _K /45/- 45/0/90/Nom ex/90/0/- 45/45]	280×80×14	12.8
	K/C 长试件	[(45/- 45) _K /45/- 45/0/90/Nom ex/90/0/- 45/45]	500×80×14	12.8
	G/C 短试件	[(45/- 45) _{G2} /45/- 45/0/90/Nom ex/90/0/- 45/45]	280×80×14	12.8
	G/C 长试件	[(45/- 45) _{G2} /45/- 45/0/90/Nom ex/90/0/- 45/45]	500×80×14	12.8
横向静压	K/C	[(45/- 45) _K /45/- 45/0/90/Nom ex/90/0/- 45/45]	150×80×14	12.8
	G/C	[(45/- 45) _{G2} /45/- 45/0/90/Nom ex/90/0/- 45/45]	150×80×14	12.8
	G	[(45/- 45) _G /45/- 45/0/- 45/45/Nom ex/ 45/- 45/0/- 45/45/(45/- 45) _G]	150×80×9.5	8.3

表 2 冲击后蜂窝夹芯板的弯曲强度和破坏形式
Table 2 Bending strengths and failure styles of honeycomb core sandwich panels after low velocity impact

试 件	冲击能量 E/J	试样数	P_{max}/N	$M_{max}/N \times M$	r	破 坏 位 置 和 形 式
K/C 长试样	0	1	3547	268.05	1	试验段受压面板分层
	4	1	2186	163.95	0.61	受压面在冲击处分层扩展, 失稳
	6	1	2114	158.55	0.59	受压面在冲击处分层扩展, 失稳
G/C 长试样	0	1	4105	307.87	1	试验段蜂窝剪切破坏
	6	1	2805	210.37	0.68	受压面在冲击处分层扩展, 失稳
	8	1	2526	189.45	0.62	受压面在冲击处分层扩展, 失稳
K/C 短试样	0	1	5003	237.64	1	非试验段蜂窝剪切破坏
	3	1	4462	211.95	0.89	受压面在冲击处分层扩展, 失稳
	6	2	4144	196.84	0.83	受压面在冲击处分层扩展, 失稳
G/C 短试样	0	1	5006	237.79	1	非试验段蜂窝剪切破坏
	3	1	4117	195.56	0.82	受压面在冲击处分层扩展, 失稳
	8	2	4133	196.34	0.83	受压面在冲击处分层扩展, 失稳

冲击损伤与准静态压缩损伤进行比较, 旨在了解冲击与横向静压的关系, 以及损伤发展随冲头压入位移变化的大致规律。

1 实 验

1.1 试件

弯曲及准静态横向压缩所用试件的情况列于表 1。试件铺层中的 K、G 分别代表 Kevlar 和玻璃平纹布, Nom ex 蜂窝芯材为 NRH-2-80-(0.08), 其它铺层为 T300/双马树脂, 面板与夹芯之间有 SJ-2A 胶膜。准静态横向压缩时都是有表面布的面板受冲头压缩。

为了叙述方便, 本文定义受冲击或压缩的面板为前面板, 定义另一面板为后面板。

1.2 弯曲、准静态横向压缩实验与损伤测试

冲击实验与文献[1]相同。纯弯曲实验通过四点加载实现, 在 MTS880-50kN 实验机上进行。为了保

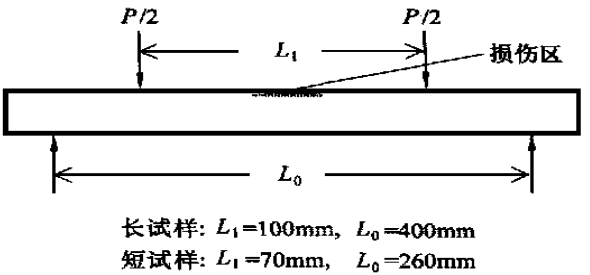


图 1 试件纯弯曲加载状态示意图
Fig 1 Pure bending loads of specimens

证加载点处试件不被压头压坏, 避免压头影响试件的弯曲变形, 根据 HB 5308-58 制作了专用的加载压头^[6]。图 1 是四点弯曲示意图, 其中给出了弯曲时四个加载点的位置。通过测量无损伤夹芯板二表面多点处的应变(4 个试样), 观察其破坏形式, 证明在实验段试样非常接近纯弯曲状态。
准静态横向压缩实验的压头和试件支持条件与低速冲击实验的情况完全相同, 实验也是在

M TS880-50kN 实验机上进行的。在横向静态压缩过程中,先固定冲头的压入位移量,然后通过调整加载时间来改变压缩速度,并利用实验机自带的载荷-位移($P-\Delta h$)记录仪记录压头的接触力随压入位移变化的全过程。

低速冲击和准静态横压所造成试样的内部损伤用X射线和热揭层测量,外部可见损伤用彩色照片记录,具体方法见文献[1,3]。

2 结果与分析

2.1 低速冲击后蜂窝夹芯板纯弯曲情况

实验所用的全部试样都是有表面布的表面受冲击,弯曲时大部分实验是有表面布的面板受压。弯曲破坏的结果见表2。表中的 P_{\max} 、 M_{\max} 分别是四点弯曲的最大压力和弯矩(见图1); $r = M_{\max, E} / M_{\max, 0}$, $M_{\max, 0}$ 是冲击能量 $E = 0J$ 时试样所能承受的最大弯矩, $M_{\max, E}$ 是冲击能量为 E 时试样所能承受的最大弯矩。因为试样数量有限,试件铺层不同,不好对复合材料蜂窝夹芯板冲击后的弯曲刚度、强度和破坏机理进行仔细的分析,但是从中仍然可以得到一些有价值的结果。

对比长试样与短试样的 P_{\max} 和 M_{\max} 值便能发现:对于未受冲击($E = 0J$)的情况,短试样的 P_{\max} 比长试样的大,这时短试样非试验段内的蜂窝便容易发生剪切破坏,而试验段仍保持完好,因此短试样的 M_{\max} 值偏小,不能反映蜂窝夹芯板纯弯曲破坏的真实情况,因此纯弯曲试件要有足够的长度,不宜太短;对于受到一定能量冲击后的情况,两类试样的弯曲破坏形式几乎相同, M_{\max} 值也相当,都能反映弯曲破坏的实际情况。由此可见,低速冲击损伤可使蜂窝夹芯板的弯曲强度降低40%左右;冲击损伤后蜂窝夹芯板纯弯曲实验可以适当缩短试件的长度,以节约材料。冲击后夹芯板的弯曲破坏过程是,前面板的最后界面(面板中与夹芯相邻的界面)分层扩展,之后出现子层局部屈曲,导致最后破坏。这与夹芯板在低速冲击后压缩破坏的过程相同^[2],由此可以进一步证明文献[7]所建立的压缩模型是合理的。

另外,从K/C和G/C中各取一个短试样(冲击能量 $E = 0J$)进行弯曲实验,这时没有表面布的面板受压,有表面布的面板受拉,结果发现二种试样的破坏情况相同,都是受压面板分层、断裂。但是,K/C试件所能承受的最大弯矩 $M_{\max} = 194.72N \cdot m$, G/C试件能够承受的 $M_{\max} = 201.64N \cdot m$,它们比表2

中相应试件(冲击能量 $E = 0J$)的最大弯矩小15%以上。因此改变不同面板所受的拉、压载荷状态,对夹芯板的弯曲强度会产生影响,可见表面布能够改善蜂窝夹芯板的弯曲性能。然而,试件在压缩破坏过程中,表面布对无损伤夹芯板的性能没有影响^[2]。

2.2 准静态横向压缩情况

为了了解冲击速度的影响,冲击与横向静压的关系,以及冲击和静压过程中冲头的压入位移与蜂窝夹芯板内损伤的关系,因此进行了准静态横向压缩研究。准静态横压时,K/C和G/C二种试件的实验条件和结果列于表3,G试件的实验条件与结果列于表4。

在准静态横向压缩实验之前,对Nomex蜂窝夹芯的力学行为和破坏状况先有所了解是有必要的。

表3 G/C、K/C二试件准静态压缩实验的条件与结果

Table 3 Quasi-static transverse indentation test conditions and results of specimen G/C & K/C

试 件	最大压入位移 /mm	横压速度 /mm · s ⁻¹	最大压缩载荷 P_{\max}/N
G/C	1.0	2.0	894
	2.0	0.4	1455
	2.0	4.0	1532
	2.0	40.0	1535
	3.0	6.0	1431
K/C	2.0	4.0	1623
	2.5	5.0	2055
	3.0	6.0	1726
	3.0	0.6	1948

表4 G试件准静态压缩实验的条件与结果

Table 4 Quasi-static transverse indentation test conditions and results of specimen G

最大压入位移 /mm	加载速度 /mm · s ⁻¹	试件数	a点位移	b点位移	P_{\max} /N
2.0	1.0	1	0.45	1.82	1250
	4.0	1	0.58	1.70	1450
2.5	5.0	1	0.45	1.84	1690
3.0	1.0	3	0.44	1.72	1428
	6.0	1	0.44	1.81	1620
3.5	1.0	1	0.45	1.85	1436
4.0	1.0	1	0.40	1.92	1450
4.5	1.0	2	0.37	1.82	1814
5.5	0.1	1	0.48	2.05	1520
	1.0	2	0.49	1.89	1265

为此, 按文献[8]中的标准, 用 G 试件制作了二个试样, 然后对其进行垂直面板的平面压缩实验(如图 2 所示), 测量 G 试件所用蜂窝的压缩破坏特性。图 3 是 Nomex 蜂窝的压缩载荷 F -位移 Δh 曲线。压缩过程中, 蜂窝保持很好的弹性变形, 直至破坏。夹芯的破坏形式为蜂窝壁突然失稳皱屈, 此时的压缩载荷 F 骤然下降。与蜂窝失稳载荷 F_b 对应的蜂窝芯子压缩量约为 0.7 mm。

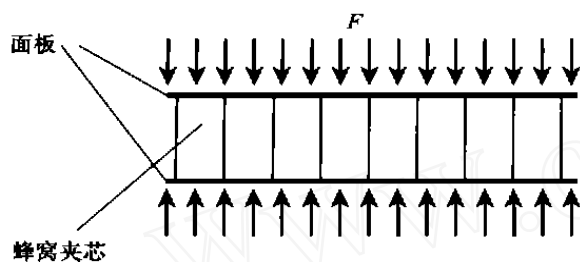


图 2 蜂窝夹芯板平面压缩示意图

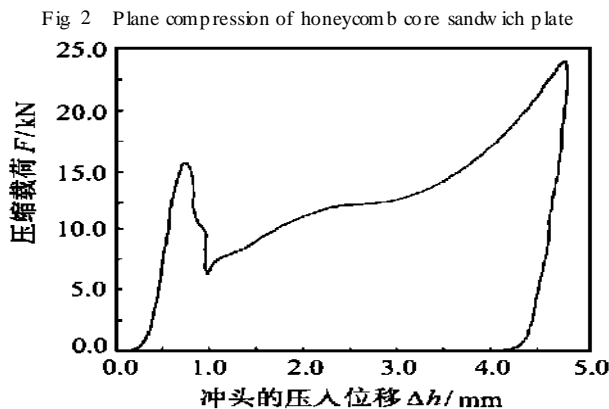


图 3 Nomex 蜂窝的压缩载荷-位移曲线

Fig 3 Compressive load-displacement curve of Nomex honeycomb

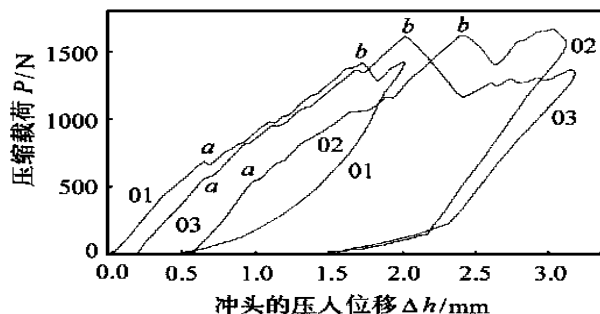


图 4 G 试件不同压入深度时的 P - Δh 曲线

Fig 4 P - Δh curves of specimen G at different indentation depths

对比 X 射线和热揭层所测的损伤结果发现, 蜂窝夹芯板的准静态横向压缩损伤与冲击损伤^[1]相似, 即夹芯的损伤面积大于面板的损伤面积; 前面板内各界面的分层损伤为“哑铃”形, 并且是越靠近夹

芯的界面分层面积越大; 面板损伤的投影近似为圆形; 压缩点附近的蜂窝壁皱曲、塌陷, 在厚度方向上损伤的位置靠近前面板; 后面板无损伤。可见在分析 Nomex 蜂窝夹芯板的损伤时, 可以用准静态压缩来等效低速冲击, 但是静压载荷与冲击能量的关系不容易很好地建立。

图 4 是 G 试件的一组压头接触力 P -压入位移 Δh 曲线, 它们是复合材料 Nomex 蜂窝夹芯板典型的准静态横压 P - Δh 曲线。图中每条曲线上的 a 、 b 两点分别是曲线的第一拐点和最大压缩载荷 P_{\max} 点。G 试件的 a 点对应的压头位移大约在 0.37~0.60 mm 之间, b 点对应的压入位移约在 1.7~2.0 mm 之间; G/C 试件 b 点对应的位移约为 1.9 mm。当冲头的最大压入位移仅有 1.0 mm 时, 其 P_{\max} 值没有达到夹芯板所能承受的最大静压载荷, 所以表 3 中第一个 G/C 试样的 P_{\max} 值比别的试件要小。

对所有的试件, 不同的静压加载速度(从 0.4 m/s 至 40 m/s)对 a 、 b 两点的位移和 P_{\max} 值没有明显影响, 而且它们的 P - Δh 曲线形状相似, 板内的损伤也相同, 说明 Nomex 蜂窝夹芯板对外物的冲击速度不敏感。值得一提的是, 这里的静压速度是一个平均值, 最大压缩速度实际较此偏大。而 $E = 3J$ 时, 冲击的最大速度也只有 160 mm/s (冲击物质量为 2.35 kg^[1]), 可见二者的差别并不很大。

在 G 试件准静态压缩过程中, P - Δh 曲线不断出现抖动, 斜度越来越小。曲线的抖动, 对应的是板内损伤的起始或扩展, 其中 a 点是第一个抖动点。图 4 中 a 点对应压头的位移虽然小于蜂窝平面压缩破坏时的压缩量, 但并不表明此时夹芯不破坏, 因为压头通过面板对蜂窝同时会产生压缩和剪切两种作用, 必然会使夹芯提前破坏。 a 点之后, 面板损伤和蜂窝损伤交织在一起, 使板的横向抗压刚度不断减小, 直至 b 点, 蜂窝被严重压塌。而这时面板却不一定被穿透。

图 4 中, 01 曲线的压入深度是 2.0 mm, 02 曲线的是 2.5 mm, 03 曲线的是 3.0 mm。卸载时, 01、02、03 三种情况的残留凹陷深度分别是 0.3 mm、0.6 mm、0.9 mm, 但是蜂窝很快继续反弹, 表面几乎不留下凹陷。

准静态横压损伤与低速冲击的相似性, 以及对压入速度的不敏感性, 证明可以用准静态横向压缩模拟低速冲击来研究蜂窝夹芯板的冲击损伤。冲击过程中, 面板损伤和夹芯损伤混杂在一起同时发生。

但是,即使是蜂窝严重压塌,卸载后的夹芯板表面仍然完好,无纤维断裂等损伤。

3 结 论

低速冲击可使复合材料蜂窝夹芯板的弯曲强度大幅度降低;冲击后复合材料夹芯板的弯曲破坏过程是,前面板的最后界面分层扩展,接着发生子层局部屈曲,而导致最终破坏。Nomex 蜂窝夹芯板对横向静压的速度变化不敏感,因此在研究低速冲击损伤时,可以用准静态横向压缩来模拟低速冲击。冲击或准静态横向压缩过程中,面板损伤和夹芯损伤交杂在一起同时发生。低速冲击后夹芯板的表面几乎没有损伤特征。

参 考 文 献

- [1] 程小全,寇长河,酆正能 复合材料蜂窝夹芯板低速冲击损伤研究[J]. 复合材料学报, 1998, 15(3): 124~ 128
- [2] 程小全,寇长河,酆正能 复合材料蜂窝夹芯板低速冲击后的压缩[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(5): 551~ 554
- [3] 寇长河,程小全,酆正能 低速冲击后复合材料蜂窝夹芯板的拉伸特性[J]. 复合材料学报, 1998, 15(4): 69~ 73
- [4] 程小全,寇长河,酆正能 低速冲击后复合材料蜂窝夹芯板的疲劳特性[J]. 航空学报, 1998, 19(6): 740~ 743
- [5] Lu W H, Liao F S, Su A C, Kao P W, Hsu T J. Effect of interleaving on the impact response of a unidirectional carbon/epoxy composite[J]. *Composites*, 1995, 26(3): 215~ 222
- [6] 程小全 复合材料层合板与蜂窝夹芯板低速冲击后压缩性能研究 [博士学位论文][D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998
- [7] 寇长河,程小全,酆正能 复合材料蜂窝夹芯板低速冲击后的压缩强度估算[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(5): 555 ~ 558
- [8] 中华人民共和国航空工业部标准 HB 5307-85, 胶接铝蜂窝夹层结构和芯子平面压缩性能试验方法[S].

(上接第 101 页)

(S09) Processing (Processing)

(processing techniques and processing modeling)

(S10) Interphases & Interfaces

(S11) Joining & Repairing

(S12) Machining and Tooling

(S13) Matrices

(S14) Mechanical & Physical Properties (Mech. /Physic)

(fatigue, fracture, damage, numerical methods, creep & viscoelastic behavior, delamination, buckling & failure in compression, homogeneization)

(S15) Metal Matrix Composites (MMC)

(S16) NDE & Reliability (NDE)

(health monitoring, non-destructive evaluation, reliability)

(S17) Reinforcements (Reinf.)

(S18) Smart Materials & Structures (Smart Mater. & Struct.)

(S19) Structures (Struct.)

(design, analysis, testing)

(S20) Testing (Testing)

(experimental characterization, mechanical properties)

(S21) Textiles

(preforming methods, process simulation, characterization)

(S22) Normalization

(S23) Others

(完)