

T800/5228E 复合材料层合板动态冲击力学响应

刘立朋 张明 安学锋 唐邦铭 益小苏

(北京航空材料研究院, 先进复合材料国家重点实验室, 北京 100095)

文 摘 研究了宽冲击能量范围(12.8、25.5、34.2、42.3 与 51 J)内 T800/5228E 复合材料层合板动态冲击力学响应历程。结果表明,复合材料层合板损伤历程依次为裂纹引发→分层扩展→最大损伤→二次损伤等,冲击能量基本不会对其发展演化历程产生影响;力学损伤参数研究发现,赫兹失效载荷 F_h 与冲击能量成线性关系,而最大作用载荷 F_{max} 与冲击能量为特定指数函数关系。不可逆能量 L_w 与能量吸收率 η 研究表明,两者均与冲击能量保持单调递增关系,反映复合材料板的损伤程度在加重,但损伤面积基本趋于稳定,纤维断裂等二次损伤可能成为新型能量吸收方式。

关键词 复合材料层合板,低速冲击,动态冲击力学响应

Dynamic Impact Mechanical Response on T800/5228E Composite Laminate

Liu Lipeng Zhang Ming An Xuefeng Tang Bangming Yi Xiaosu

(National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Abstract Dynamic mechanical impact response of T800/5228E composite laminates was studied in a wide range of impacting energy. A whole scaling of crack initial—delamination—laminata failure—second damage was observed with 51 impacted energy, as just a part of this dynamic impact mechanical response curve in lower impacted energy without consideration of rebounding effect. F_h and f_{max} , are just line and natural exponential function of impacted energy respectively, and both of L_w and η exhibit monotonically increasing relation for impacted energy, showing the pre-penetration action happenness in selected energy of this article. Worth the whistle, ultrasonic C—scanning, a kind of non-destructive technique, probably can not evaluate the exact damage in projected composite laminates fairly in our work.

Key words Composite laminate, Low velocity impact, Dynamic impact mechanical response

0 引言

复合材料层合板冲击损伤历程错综复杂,是复合材料研究的热点^[1-3],涉及裂纹引发、分层扩展、纤维断裂、层板失效以及侵彻穿孔等众多损伤形式^[4-6],这些损伤的发生必然会引起冲头与复合材料板之间相互作用力以及复合材料板吸收能量的突变。动态冲击试验机能够捕捉冲击过程中瞬时力学/能量响应信息,是研究复合材料板动态冲击损伤的得力工具^[7-9]。

本文将借助 INSTRON 9250HV 动态冲击试验机,在宽冲击能量范围(12.8、25.5、34.2、42.3 与 51 J)内,对 T800/5228E 韧性复合材料层合板的动态冲击损伤历程、响应力学特征参数 F_h 与 F_{max} 、响应能量参数 L_w 与 η 等与冲击能量之间的关联展开试验研究。

1 实验

1.1 材料

T800/5228E 预浸料,面密度 133 g/m²,自制。

1.2 预浸料固化工艺与试样制备

复合材料试样铺层方式为 $[45/0/-45/90]_{5s}$,以热压罐固化成型,固化工艺 130℃/1 h+180℃/2 h,压力 0.6 MPa;将制备的层合板去除工艺边后线切割为尺寸 150 mm×100 mm 的矩形板试样待用。

1.3 试验设备与方法

动态冲击试验采用 INSTRON9250HV 型动态冲击试验机,含方孔的夹具夹持,四边固支,方孔尺寸为 125 mm×75 mm。采用 5.5 kg 半球形直径为 16 mm 的落锤冲击头,以不同的能量(以高度标定)冲击复合材料层板试验件几何中心位置,详见图 1。

收稿日期:2011-02-18;修回日期:2011-04-06

基金项目:国家 973 计划(2010CB631100)

作者简介:刘立朋,1979 年出生,博士研究生,主要从事树脂基复合材料的研究。E-mail:llpmail@sina.com

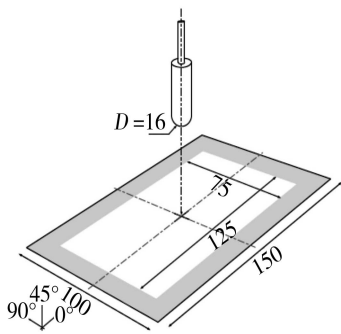
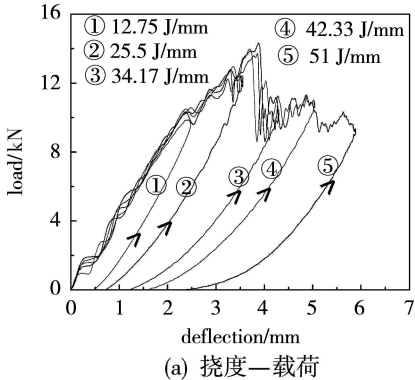
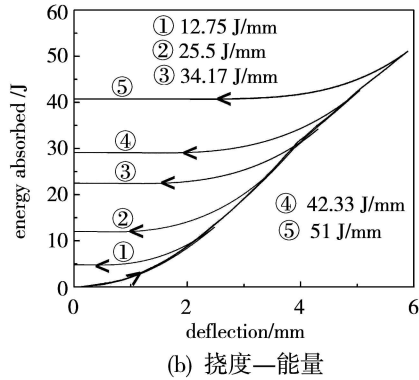


图1 复合材料层合板动态冲击试验方法

Fig. 1 Dynamic impact method for composite laminate



(a) 挠度—载荷



(b) 挠度—能量

图2 T800/5228E 复合材料板挠度—载荷线与挠度—能量曲线组图

Fig. 2 Deflection-loading and deflection-energy absorbed curves for T800/5228E composite laminates

结果显示,51 J 的冲击力学/能量曲线包含了其他四种冲击能量曲线,这表明对于 T800/5228E 复合材料板,冲击损伤演化历程是固定的,冲击能量只是决定损伤处于何种阶段。大量试验结果表明^[11-12],复合材料板的冲击损伤过程可以借助静压痕试验来研究,本文上述结论则从另一方面对此给予了证实。

2.2 复合材料层合板典型动态力学损伤历程分析

复合材料层合板的动态冲击力学/能量响应反映了其内部损伤的演化发展,高冲击能量的损伤历程可以覆盖低冲击能量的损伤阶段,因此理解了 T800/5228E 复合材料板在 51 J 冲击能量下的损伤过程演化即可掌握其他几种能量下的损伤演化。图 3(a)表明伴随着层合板挠度的增加,前期响应载荷在跨越涵盖几

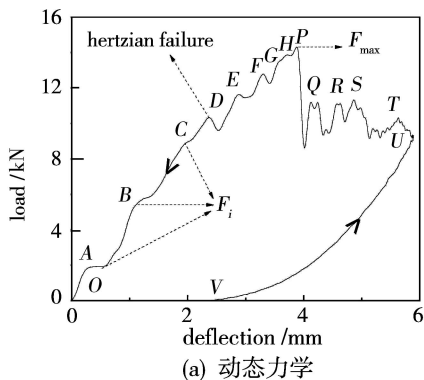
冲击试验标准执行美国材料与试验协会 ASTM D 7136。遭受冲击后的复合材料层合板内部损伤面积通过超声波 C 扫描获取。

2 结果与讨论

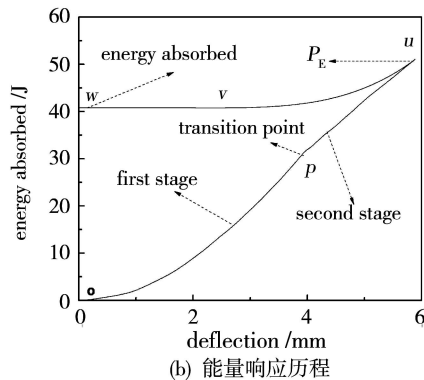
2.1 复合材料层合板动态冲击载荷/能量响应曲线

图 2 是 T800/5228E 复合材料板在五种冲击能量标准下挠度—载荷曲线与挠度—吸收能量曲线组图,各曲线组图显示,复合材料层合板在其挠度达到最大值后均可回归零点,这表明复合材料层合板未达到其完全饱和损伤值,处于侵彻发生之前阶段^[8]。

个小平台区的 A—B—C 阶段后,迅速达到 D 点,紧接着是较大范围内的载荷波动区 E—F—G—H—P,但载荷总体仍处于上升阶段,最高峰 P 点(F_{max})之后响应载荷骤降,进入了二次载荷波动 Q—R—S—T—U 区域,与第一个载荷波动区 E—F—G—H—P 相比,这个区域表现为一近平台区,响应载荷只是在某一载荷附近大幅度震荡,U 点之后,挠度在经过 V 点(载荷已为零)之后回归初始 O 点。而图 3(b)中与此相对应的挠度—能量吸收曲线则较为简单,过渡点 u 对应于载荷最大处的 P 点,并将上升的耗能阶段一分为二,最大耗能点 u 对应着最大挠度处 U,之后是能量最小值始点 v,对应于挠度载荷曲线上 V 点,最后能量维持至 W 处,亦即初始 O 点。



(a) 动态力学



(b) 能量响应历程

图3 T800/5228E 复合材料板在 51 J 冲击能量下动态力学/能量响应历程

Fig3 Deflection-load curves for T800/5228E composite laminate in 51 J impacted energy

A-B-C 区域各小的响应载荷平台发生之后, 复合材料板刚度均略有降低, 预示了此时 T800/5228E 复合材料板内部微裂纹的出现。D-E-F-G-H-P 阶段载荷大范围波动, 这是前期形成的微裂纹在逐步扩展吸收能量。其中 D 点作为微裂纹扩展的起点, 习惯上称为赫兹失效, 其与 II 型断裂韧性 (G_{IIc}) 密切相关^[12]。P 点为此阶段的终点, 亦是整个响应历程的最大力学载荷 F_{max} , 其载荷骤降, 通常被归结为冲击过程中最主要损伤造成的^[5]。挠度—载荷曲线上的两个吸能阶段 Stage1 和 Stage2 的分界点 u 对应于 F_{max} , 反映了此后新型损伤方式出现。Stage2 阶段能量吸收速率 (E_a/d) 略有缓和, 对应的 Q-R-S-T-U 区域响应载荷再次大幅度波动, 预示着大范围损伤扩展再次发生, 基体裂纹与分层程度进一步加剧, 复合材料板正/反面纤维断裂严重^[5]。越过最大挠度点 $U(u)$ 之后, 复合材料板挠度开始回落, 冲击头在复合材料板弹性作用下逆向运动, 并在 $V(v)$ 点与复合材料板相脱离, 能量维持恒定至初始位置 $O(w)$ 。

2.2.3 冲击能量对复合材料板主要损伤参数的影响

F_h 与 F_{max} 是复合材料层合板最主要力学响应参数。赫兹失效表征了复合材料材料初始分层损伤扩展, 对应于层合板位移—载荷曲线上较大范围内载荷波动的起点。最大作用力载荷 F_{max} 的出现则是复合材料层合板整体失效的反映。

虽然冲击能量基本不会改变冲击损伤的演化进程, 但对各冲击能量下的 F_h 与 F_{max} 研究时(图 4)发现, 两者赫兹失效发生基本与冲击能量无关, 只是 12.8 J 冲击能量下并无赫兹失效发生, 这是由于赫兹失效发生需要一定冲击能量门槛值, 与高于 12.8 J 冲击能量有关, 而赫兹失效载荷与冲击能量无关的结论与 G. Belingardi 等^[8]人在研究玻璃纤维复合材料板时得到的结论是一致的; F_{max} 在前期表现为随冲击能量增加而逐步升高, F_{max} 几乎以线性方式增长, 而当冲击能量达到一定水平(34.2 J)之后, F_{max} 则稳定于 14.47 kN 载荷处, 不再随冲击能量而改变, Dahsin

Liu 等^[13]人的 F_{max} 研究结果则与本文保持了一致, 沈真等人认为可以将此最大载荷作为复合材料体系损伤阻抗的表征参数。

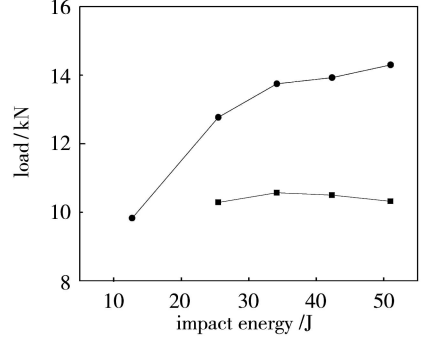


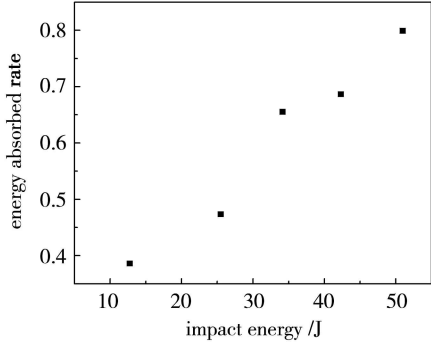
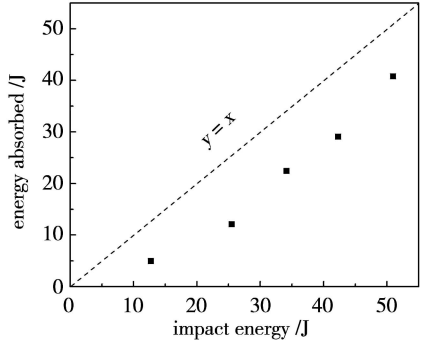
图 4 T800/5228E 赫兹失效载荷、最大载荷与冲击能量之间的关联

Fig. 4 Research on Impact energy- F_h and Impact energy- F_{max} curves for T800/5228E composite laminates

2.4 不可逆能量 L_w 与能量吸收率 $\eta(L_w/E_0)$

L_w 是指在整个动态冲击过程中冲击头始末能量差, 主要包括两部分: (1) 复合材料板在震荡过程所消耗的能量; (2) 复合材料板损伤所吸收的能量。与后者相比, 前者微乎其微, 甚至可以忽略不计。由图 5 可知, 当冲击能量增加时, 复合材料层合板吸收能量 L_w 稳步上升, 但均小于初始冲击能量, 这表明复合材料板侵彻尚未发生^[8], 这一点在 T800/5228E 复合材料板的能量吸收率 (η), 冲击能量曲线上也得到了证实。 η 是复合材料板吸收冲击动能能力的反映, 当侵彻发生时其值达到 1^[8], 即冲击动能完全为复合材料板所吸收。在图 5 中, η 值虽然表现为冲击能量的单调递增函数, 但均小于 1, 其中 51 J 冲击能量时, η 为 0.8, 已接近了侵彻能量门槛值。

值得注意的是, 当冲击能量达到一定水平后, 内部损伤的超声波 C 扫描结果显示损伤面积基本不再改变[图 6 中的(d) 与(e)对比]。在对冲击复合材料板表面观察后发现, 高冲击能量下复合材料板表面纤维断裂更加严重, 这在一定程度上促进了能量消耗。



(a) 不可逆能量 (b) 能量吸收率

图 5 复合材料板动态冲击过程中的不可逆能量与能量吸收率

Fig. 5 Research on L_w and η of composite laminates for T800/5228E impact energy

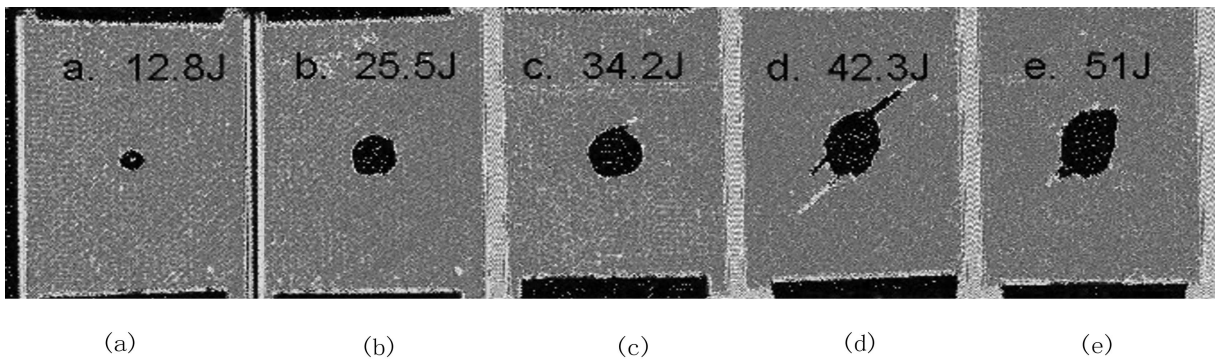


图6 T800/5228E复合材料板相应冲击能量下内部损伤超声波C扫描结果

Fig. 6 Ultrasonic-C results of damaged T800/5228E composite laminates on impacting

3 结论

(1)动态冲击挠度—载荷与挠度—能量曲线组图显示,T800/5228E复合材料板侵彻能大于51J,五种冲击能量下复合材料板动态冲击力学/能量响应曲线在复合材料板回弹之前具有高度的一致性,这说明冲击能量只会影响T800/5228E复合材料板损伤的发展程度,而不会影响复合材料板损伤发展历程。

(2)遭受51J冲击能量时,T800/5228E复合材料板动态力学/能量响应曲线显示冲击损伤经历了裂纹扩展→分层→最大损伤→二次损伤等几个主要阶段。

(3)T800/5228E复合材料板 F_h 与冲出能量无关, F_{max} 先随冲击能量升高而增长,之后也趋于稳定。

(4) L_w 与 η 随冲击能量增长而增长,当冲击能量为51J时,其值为0.8,已接近了侵彻门槛值能量。同时,T800/5228E复合材料板的超声波C扫描结果并未与其所吸收能量保持一致,表面纤维断裂严重化可能是造成这种状况的主要原因。

参考文献

[1] Chambers A R, Mowlem M C, Dokos L. Evaluating impact damage in CFRP using fibre optic sensors[J]. Composites Science and Technology,2007,67: 1235-1242

[2] Sandrine Petit, Christophe Bouvet, Alain Bergerot. Impact and compression after impact experimental study of a composite laminate with a cork thermal shield[J]. Composites Science and Technology,2007:3286-3299

[3] Ibekwe S I, Mensah P F, Li Guoqiang. Impact and post impact response of laminated beams at low temperatures [J]. Composite Structures,2007,79:12-17

[4] Sala G. Impact behaviour of heat-resistant toughened composites[J]. Composites:Part B,2000,31:161-173

[5] Shyr Tienwei, Pan Yuhao. Impact resistance and damage characteristics of composite laminates[J]. Composite Structures,2003,62:193-203

[6] Naik N K, Ramasimha R, Arya H. Impact response and damage tolerance characterization of glass-carbon/epoxy hybrid composite laminate[J]. Composites: Part B, 2001,31: 565-574

[7] Zuleyha Aslan, Karakuzu Ramazan, Okutan Buket. The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading[J]. Composite Structures,2003,59:119-127

[8] Giovanni Belingardi, Roberto Vadori. Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates[J]. International Journal of Impact Engineering,2002,27:213-229

[9] Liu Dahsin, Raju B B, Dang Xinglai. Impact perforation resistance of laminated and assembled composite plates [J]. International Journal of Impact Engineering,2000,24:733-746

[10] 郑晓霞,郑锡涛,沈真,等. 低速冲击与准静态压痕力下复合材料层合板的损伤等效性[J]. 航空学报,2010,31(5):928-932

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

[12] Gao Davies, Zhang X. Impact damage prediction in carbon composite structures[J]. Int. J Impact. Eng. ,1994, 16(1):149-170

[13] Liu Dahsin, Raju B B, Dang Xinglai. Impact perforation resistance of laminated and assembled composite plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24: 733-746

(编辑 李洪泉)