

S-2/F46 复合材料低速冲击损伤及剩余弯曲性能

Damage and Residual Flexural Properties of S-2/F46 Composites Under Low Velocity Impact

贺成红, 张佐光, 李玉彬, 孙志杰

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

HE Cheng-hong, ZHANG Zu-guang, LI Yu-bin, SUN Zh-jie

(School of Materials Science and Engineering, Beijing

University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 考察了单向、正交和准各向同性 S-2/F46 复合材料低速冲击后的剩余弯曲强度和模量, 结合冲击损伤形貌比较了其冲击损伤模式及演化过程。单向复合材料的冲击损伤呈突变式发展, 而正交和准各向同性复合材料则呈多阶段渐进式发展, 弯曲性能衰减也呈现相应模式。只有当试样的结构完整性损失较大时弯曲性能才明显下降, 其衰减的临界冲击能以单向复合材料最大, 正交复合材料最小。此外, 角铺层复合材料弯曲模量比强度衰减更严重。

关键词: 复合材料; 铺层结构; 冲击; 损伤; 弯曲性能

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)06-0029-04

Abstract: The residual flexural strength and modulus of unidirectional, cross-ply and quasi-isotropy S-2/F46 composites were investigated after the low velocity impact with different energies. The differences in damage modes and evolutions were analyzed combined with the damage morphology. The unidirectional composites show a mutation mode for the damage evolution or the reduction in flexural properties, while the cross-ply or quasi-isotropy composites show a multistage progressive mode. The flexural properties clearly degrade only when the structural integrity of composites is considerably damaged. The critical impact energy to initiate reduction in flexural property of unidirectional composites is the largest and that of cross-ply composites is the smallest. In addition, for angle-laminated composites, the reduction in flexural modulus is more significant than that in flexural strength.

Key words: composite; laminate structure; impact; damage; flexural property

纤维增强树脂基复合材料因其突出的比强度、比刚度、抗疲劳性、耐腐蚀及高设计自由度等优点得到了广泛应用。但常用树脂尤其是环氧树脂基体性刚而脆, 在低速冲击下常会产生较严重的基体开裂、分层以及纤维断裂等损伤, 但在冲击表面却几乎无可视损伤, 因此非常危险, 引起了人们的高度关注。对于复合材料经低速冲击后的拉伸、压缩、弯曲以及剪切等剩余力学性能均有研究^[1-3], 但以剩余压缩性能的研究为最多^[4-6], 这是因为冲击作用常使层板产生分层, 在压缩作用下易于发生局部、整体或混合型的屈曲失稳, 导致压缩性能大幅下降。对于冲击后剩余弯曲性能的研究还较少^[7,8], 尤其是各种因素的影响规律及机理研究等。但在实际应用中复合材料承受面外弯曲载荷(如甲板、舱壁、机翼等)相当普遍, 其研究意义是显而易见的。为此本研究通过考察玻璃纤维增强酚醛环氧复合材料在不同冲击能量下的吸能及损伤状况, 分析其损

伤过程及特征, 探讨该复合材料在低速冲击下的损伤机理及其对剩余弯曲性能的影响。

1 实验

1.1 材料及制备

树脂基体采用酚醛环氧 F46 树脂(上海树脂厂), 固化剂为三氟化硼单乙胺(北京长阳振兴化工有限责任公司)。增强纤维采用 S-2 玻璃纤维(南京玻璃纤维研究设计院)。

复合材料试样采用单向 $[0]_{16}$, 正交 $[0/90]_{4S}$ 和准各向同性 $[0/45/90/-45]_{2S}$ 三种铺层, 由相同热压工艺制得。试样尺寸 $60\text{mm} \times 8\text{mm} \times 2\text{mm}$, 其长度方向均为最外层纤维方向。

1.2 低速冲击测试

试样的冲击损伤由 Charpy 型摆锤冲击试验机产

生(最大冲击能 3.92J),冲击头为直径 5mm 的线型冲击头。采用无缺口试样,跨距 40mm,沿厚度方向对试样中部正冲,通过调整摆锤冲击高度来产生不同程度的损伤。

1.3 冲击后准静态弯曲性能的测试

在 SANS 万能试验机上进行,三点弯曲加载,跨距 40mm,加载方向与冲击方向相同,加载速率 1mm/min。

2 结果与讨论

2.1 复合材料低速冲击后剩余弯曲性能

图 1 为三种铺层方式复合材料的剩余弯曲强度和弯曲模量随冲击能的变化。可见,弯曲强度与模量的

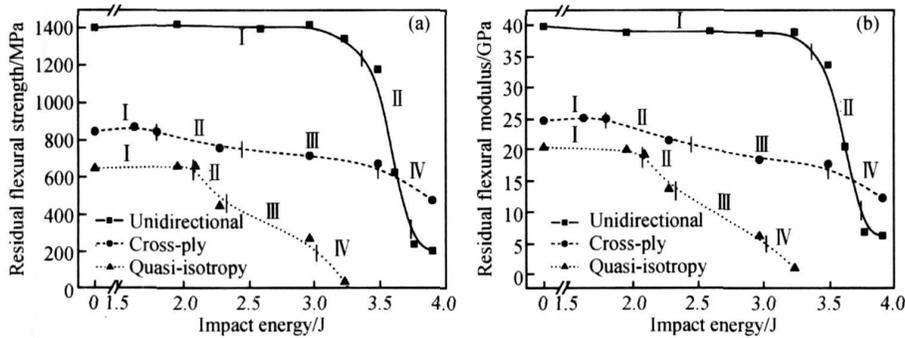


图 1 复合材料冲击后剩余弯曲性能

(a) 剩余弯曲强度; (b) 剩余弯曲模量

Fig 1 Residual flexural strength and modulus of composites after impact

(a) residual flexural strength; (b) residual flexural modulus

2.2 复合材料的低速冲击损伤特征

结合复合材料铺层结构差异对损伤形貌的演化进行分析,有助于理解损伤的产生和发展规律,分析弯曲性能的衰减过程。

2.2.1 单向复合材料低速冲击损伤特征

单向复合材料冲击损伤随冲击能的变化如图 2 所示,初始损伤主要是背面中部形成一条纵向裂纹,正面基本无可视损伤。随冲击能的增大,纵向裂纹逐渐扩展至冲击面,背部开始有少量纤维拉伸断裂。在第 II 阶段(突变损伤阶段)初期,冲击背面已有较多纤维拉断,断裂部位近似等间距地分布于整个宽度。继续提高冲击能,纵向裂纹迅速扩展至近于贯通整个长度并继续形成多条纵向裂纹而突变式整体失效,主要表现为正面的挤压断裂,并引发冲击线附近分层和背面纤维拉断。

损伤初期的纵向裂纹是因泊松效应所致,试样背部因冲拉作用而产生宽度方向的压缩应力,其中中部

衰减趋势基本相同。但单向试样的弯曲性能呈突变式衰减,可分为: I 低损伤阶段和 II 突变式衰减阶段。角铺层试样则为多阶段渐进式衰减,第 I 阶段衰减很少,对应于低损伤阶段,第 II、IV 阶段衰减加快,第 III 阶段衰减速度略低于第 II、IV 阶段。在冲击能较低时角铺层试样尤其是准各向同性试样的剩余弯曲性能远低于单向试样,这是因为角铺层试样中存在大量纤维与正应力不同向,而基体的承载能力和纤维的横向强度远低于纤维的纵向强度。但单向试样在突变损伤阶段弯曲性能衰减太快,以至于逐渐低于正交试样。三种试样在第 I 阶段中弯曲性能衰减均很小,因此将该阶段末的冲击能视为弯曲性能明显衰减的临界冲击能,对于单向复合材料约为 3.42J,正交复合材料约为 1.77J,准各向同性复合材料约为 2.06J。

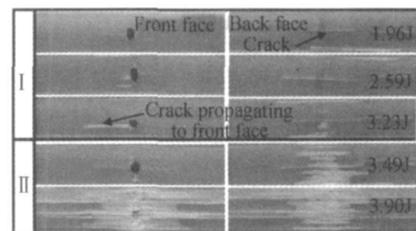


图 2 不同冲击能下单向复合材料的损伤形貌

Fig. 2 Damage of unidirectional composites under impacts with different energies

应力集中而形成压缩裂纹。

2.2.2 正交复合材料低速冲击损伤特征

正交复合材料的冲击损伤演化如图 3 所示,同样是首先在背面形成沿纤维方向的裂纹(见图 3 第 I 阶段及其局部放大图 4a),但由于存在 0° 和 90° 两种纤维取向,相应铺层中的裂纹也分别呈 0° 和 90° 方向。在第 II 阶段,试样正面开始出现分层、折断。第 II 阶段中

正面分层已较大,背部已有少量纤维拉伸断裂。第IV阶段中背部纤维拉断增多,直至整个宽度的纤维均被拉断、拔出而呈毛刷状。

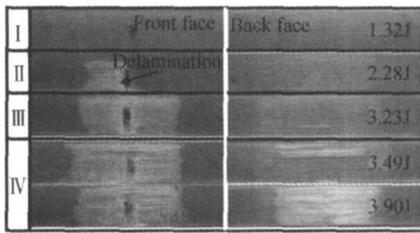


图3 不同冲击能下正交复合材料的损伤形貌

Fig. 3 Damage of cross-ply composites under impacts with different energies

冲击背面 0° 方向裂纹同样源于泊松效应,但因横向应力被相邻 90° 纤维约束和分散,宽度中心的应力集中不再非常突出,因此产生了较多较细且均匀的纵向裂纹。 90° 方向裂纹则直接源于拉应力的作用,数量更多且更为细密(见图4)。

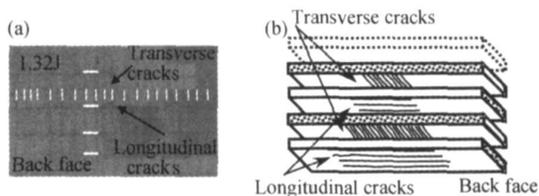


图4 正交复合材料背面各层中的裂纹扩展

(a) 实际试样背面的裂纹; (b) 裂纹扩展示意图

Fig. 4 Expansion of cracks in the layers near to backside of cross-ply composites

(a) actual cracks on backside; (b) sketch expansion of cracks

2.2.3 准各向同性复合材料低速冲击损伤特征

如图5所示,准各向同性复合材料在冲击损伤扩展第I阶段同样主要表现为背面各向微裂纹的形成与扩展,由于纤维的取向更复杂而很难清晰分辨裂纹沿纤维传播的脉络,但可看出沿纤维倾斜走向的雾状微裂纹分布。在第II阶段,正面出现挤压分层,且背面已经有大量纤维拉伸断裂。在第III阶段中正面分层进一步扩展。第IV阶段中纤维拉断及正面的分层、以及内部微裂纹造成的分层已很严重,损伤急速扩展。

2.3 复合材料损伤模式、机理及其对冲击后弯曲性能的影响

三种复合材料铺层方式的不同导致了其冲击损伤模式不同。单向试样呈突变损伤的原因:(1)试样中所有纤维均沿正应力方向排列,冲击能较低时不易断裂,且因形变方向一致,也不易产生分层;(2)基体性脆,易形成裂纹,且存在顺畅的裂纹扩展通道,逐渐使整个试

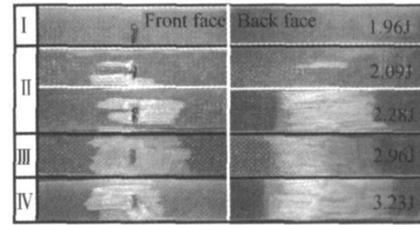


图5 不同冲击能下准各向同性复合材料的损伤形貌

Fig. 5 Damage of quasi-isotropy laminated beam under impacts with different energies

样分割为若干窄条,整体性突然降低而失效。此外,最终损伤形貌显示正面挤压断裂很严重,而背部纤维拉伸断裂不很充分,这是由于S-2/F46拉伸强度比压缩强度高很多,说明其冲击弯曲强度是由压缩性能控制的。对于角铺层试样, 90° 和 $\pm 45^\circ$ 纤维增强了横向强度,分散了横向应力,因而不会形成贯通裂纹进而出现突变损伤。但由于角度铺层间变形协调能力很差,易于层间开裂,而且因基体碎裂严重,纤维应力集中程度高而易于拉断,这点对于准各向同性试样更为明显,因为其弱承载层(90° 和 $\pm 45^\circ$ 铺层承受试样长度方向应力的能力较弱)更多,背部纤维的应力集中更突出,因而在冲击能很低时就有纤维拉伸断裂。对应于这些不同形式损伤的出现,角铺层试样呈现出多阶段发展的损伤特点。

不同的损伤模式导致不同的损伤状况,由此带来弯曲性能衰减规律表现出很大的不同。

单向试样冲击中纵向裂纹一旦形成,应力即得以缓解,在一定冲击能范围内不再产生其它部位的裂纹,因而弯曲性能衰减很慢。而在损伤突变式增长初期,试样背部开始有少量纤维拉断,因此弯曲性能衰减稍微加快。当纵向裂纹扩展至贯通整个长度后,在极短时间内,剩余窄条中再次沿中部或近中部产生纵向裂纹,试样模量及强度急剧下降而整体失效。

正交试样冲击的背部裂纹对剩余弯曲性能的直接影响也不大。由于 $0^\circ/90^\circ$ 界面变形协调能力很差,试样正面在第II阶段中形成了较大面积的分层,弯曲性能衰减较快。第II阶段中,分层的扩展因其前沿距离冲击线越来越远而减慢,弯曲性能的衰减减速。第IV阶段中,纵横交错的裂纹扩展形成了较大程度的基体碎裂,传递载荷的能力下降,背部纤维的应力集中加剧,拉伸断裂增多,试样有效承载截面较快地减小,弯曲性能快速降低。

准各向同性试样弯曲性能的衰减与正交试样类似,但衰减更快,尤其在第II阶段试样背面已有大量纤维拉断,弯曲性能衰减迅速。

图 1 显示三种复合材料弯曲性能衰减的临界冲击能高低顺序为: 单向 GFRP > 准各向同性 GFRP > 正交 GFRP。这可基于损伤模式进行分析。冲击初始损伤为基体开裂, 之后扩展为分层, 由于单向试样很少发生分层, 故其临界冲击能很高。对于角铺层试样, 铺层夹角越接近 90° , 相邻层变形越不匹配, 层间应力越大, 因而正交试样中基体裂纹很快即引发分层, 临界冲击能最低, 准各向同性试样次之。但由于准各向同性试样强度低而很快即有大量纤维拉伸断裂, 衰减率迅速增大而超过正交试样。

三种复合材料临界冲击能对应的损伤为纤维拉断或分层, 这表明只有当试样的结构完整性损失较大时弯曲性能才会受到影响, 而初期损伤即基体开裂对结构完整性的影响较小, 故弯曲性能未明显降低。图 6 为三种复合材料弯曲强度与弯曲模量的衰减率随冲击能而变化的曲线。对于单向试样, 二者的变化几乎重合, 但对于角铺层试样, 弯曲模量的衰减率明显高于弯曲强度, 尤其是在第 II 阶段, 其中又以正交试样最为显著。从前面的冲击形貌可知, 在第 II 阶段, 角铺层试样都产生了较大的分层, 整体性降低, 而模量比强度对分层更敏感, 其衰减率明显大于弯曲强度, 尤以正交试样为甚。而强度对纤维的断裂更为敏感, 由于准各向同性试样在第 II 阶段已有大量的纤维拉断, 刚度降低, 分层发展不如正交试样充分, 所以其模量与强度的衰减差距较正交试样小。单向试样由于直至断裂也很少发生分层, 因此其强度的衰减接近甚至略高于模量的衰减。

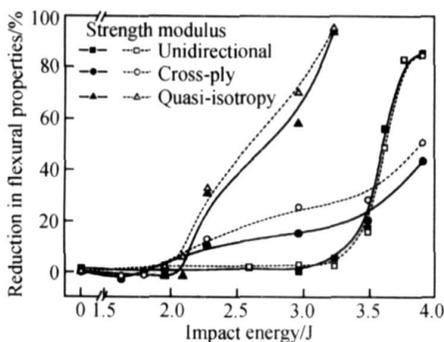


图 6 冲击后复合材料弯曲强度与模量衰减的比较
Fig 6 Comparison of reduction in flexural strength and modulus of composites after impact

3 结论

(1) 相同能量冲击后三种铺层结构复合材料弯曲性能的衰减幅度依次为: 准各向同性 GFRP > 正交

GFRP > 单向 GFRP, 但单向复合材料进入突变损伤阶段后弯曲性能迅速衰减, 其剩余弯曲性能逐渐低于正交复合材料。

(2) 铺层方式的不同导致复合材料冲击损伤模式的不同。单向复合材料呈现突变式损伤模式, 突变点对应于因泊松效应而形成的纵向裂纹扩展至贯通整个长度; 而正交和准各向同性复合材料则呈现多阶段的损伤扩展模式, 各阶段分别对应于分层、纤维断裂等损伤形式的出现。

(3) 三种复合材料在低损伤阶段都出现了基体开裂, 但弯曲性能未明显降低。弯曲性能衰减的临界冲击能大小顺序为: 单向 GFRP > 准各向同性 GFRP > 正交 GFRP。

(4) 当复合材料结构完整性损失较大时弯曲性能才明显下降, 其中弯曲强度对纤维断裂更敏感, 而弯曲模量对分层更敏感。冲击中角铺层复合材料形成了大面积分层, 其弯曲模量较强度衰减更严重。

参考文献

- [1] RICHARDSON M O W, WISHEART M J. Review of low-velocity impact properties of composite materials[J]. Composites: Part A, 1996, (27A): 1123-1131.
- [2] SERGE A. Impact on laminate composite materials [J]. Applied Mechanics Reviews, 1991, 44(4): 155-190.
- [3] 郭亚军. 低速冲击下复合材料层板的动态响应历程与应力分析[J]. 材料工程, 1992, (2): 37-40.
- [4] CARTIÉ D D R, IRVING P E. Effect of resin and fiber properties on impact and compression after impact performance of CFRP[J]. Composites: Part A, 2002, 33(4): 483-493.
- [5] SANCHEZ-SAEZ S, BARBERO E, ZAERA R, et al. Compression after impact of thin composite laminates [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(13): 1911-1919.
- [6] NAIK N K, JOGLEKAR M N, ARYA H, et al. Impact and compression after impact characteristics of plain weave fabric composites: Effect of plate thickness[J]. Advanced Composite Materials, 2004, 12(4): 261-280.
- [7] MOURITZ A P, GALLAGHER J, GOODWIN A A. Flexural strength and interlaminar shear strength of stitched GRP laminates following repeated impacts [J]. Composites Science and Technology, 1997, 57(5): 509-522.
- [8] 程小全, 寇长河, 郗正能. 复合材料夹芯板低速冲击后弯曲及横向静压特性[J]. 复合材料学报, 2000, 17(2): 114-118.

收稿日期: 2007-03-30; 修订日期: 2007-12-06

作者简介: 贺成红 (1977—), 男, 博士生, 主要从事树脂基复合材料设计与性能的研究, 联系地址: 北京航空航天大学材料学院 104 教研室 (100083)。E-mail: chhhbj@163.com