复合材料的冲击吸能与动态黏弹特性

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)

摘 要: 考察了玻璃纤维、炭纤维、芳纶和 UHMWPE纤维复合材料 (分别称为 GFRP, CFRP, AFRP和 DFRP)层板的低速冲击吸能,并采用高载动态热机械分析仪 EPLEXOR500分析了其纤维复丝的动态黏弹性的载荷敏感性. 结果表明:冲击吸能明显受纤维性能及层板破坏模式的影响,呈韧性破坏的 AFRP和 DFRP的冲击吸能明显高于呈脆性破坏的 GFRP和 CFRP. 在动态热机械分析中,静载增大使得储能模量升高但损耗角正切减小,动载增大时正好相反,且在这些影响中有机纤维复丝动态黏弹性较无机纤维复丝表现出更显著的载荷敏感性和非线性. 4种层板的吸能大小与其纤维复丝储能模量载荷敏感性的强弱以及损耗角正切大小的顺序相同: DFRP > AFRP > GFRP > CFRP,反映出材料宏观冲击性能与表征其微观结构特征的黏弹性能的相关性.

关 键 词: 复合材料; 冲击; 吸能; 黏弹性

中图分类号: TB 332

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965 (2007) 07-0851-05

Impact energy absorption and dynamic viscoelasticity of composites

He Chenghong Zhang Zuoguang Li Yubin Sun Zhijie

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The energy absorptions of composite laminates reinforced respectively by glass fiber, carbon fiber, aramid fiber, and UHMWPE fiber (separately named as GFRP, CFRP, AFRP and DFRP), were investigated under the low velocity impact. The load sensibilities on dynamic viscoelasticity of composite fiber bundles of these four kinds of fibers were analyzed by using the EPLEXOR500 dynamic mechanical thermal analyzer under high loads. The impact tests show that the impact energy absorption is close related to the fiber properties and failure modes. The impact energy absorptions of AFRP and DFRP laminates through ductile failures are much higher than those of GFRP, and CFRP laminates through brittle failures. Dynamic mechanical thermal analysis of composite fiber bundles show the load effects as that storage modulus increase and loss tangents decrease with the increasing static load, while the case is just reverse with the increasing dynamic load. In these effects, the organic fibers exhibit more serious load sensibilities and non-linearity than the inorganic fibers. These four laminates show the same sequence DFRP > AFRP > GFRP > CFRP on energy absorption as the load sensibility of storage modulus or the value of loss tangent of composite fiber bundles. This reflectes the correlation of the macroscopic impact performance and viscoelasticity which is close associated with material microstructure.

Key words: composites; impact; energy absorption; viscoelasticity

纤维增强树脂基复合材料在航空航天、兵器工业、工程结构、机械设备、交通运输等领域的应用日益广泛,这些场合中普遍存在各种冲击载荷,因此,纤维复合材料的冲击损伤尤其是低速冲击损伤问题引起了高度的重视[1-4]. 复合材料层板在冲击载荷下存在基体压碎、开裂、分层、纤维断

收稿日期: 2006-06-20

作者简介: 贺成红 (1977 -),男,山西定襄人,博士生, chhhbj@163.com.

裂与拔出等多种损伤过程,其冲击损伤与增强纤维、基体以及界面性能有着非常大的关系,而且由于细观结构的影响,其损伤破坏机制和模式很复杂,给研究带来了很大的困难.

对于高分子复合材料,黏弹性是可以反映其微观结构最突出特征[5]的基本属性之一,本文即是基于材料宏观性能必然与其微观结构特征密切相关的考虑,试图探讨几种纤维复合材料的低速冲击损伤吸能与其动态黏弹性之间的关系. 材料微观结构运动单元的活动或构象的变化可直接反映在其动态黏弹性参数的变化上,冲击过程是快速作用的变载荷过程,因此研究复合材料在更接近实际的高动载下的黏弹特性对了解材料结构与性能之间的关系具有重要意义. 关于高分子材料动态黏弹性载荷敏感性的研究,主要集中于黏弹性较大的橡胶材料[6-9],且测试载荷都较小. 因抗冲击用高性能纤维的模量较高、强度较大,要研究其载荷敏感性,需施加较高载荷,故本文采用高载动态热机械分析仪 EXPLORER500 (可提供的最大总载荷高达 500N,远高于常规的动态力学热分析仪)在较宽的载荷范围内对几种纤维复合材料动态黏弹性的载荷影响做了考察,并从黏弹性角度对材料抗低速冲击机制进行了探讨.

1 实验部分

1.1 原材料及试样

选用了 4种不同性能的常用纤维. 炭纤维: T300B (日本 Toray公司),玻璃纤维: S-2 (南京玻璃纤维研究设计院),芳纶: Twaron750 (荷兰 AKZO公司),UHMWPE纤维: SK66 (荷兰 DSM公司).

树脂基体:环氧 618 (无锡树脂厂);酚醛 缩丁醛体系 (酚醛: F01-36 (天津灯塔涂料股份有限公司),缩丁醛:聚乙烯醇缩丁醛 (北京兴津化工厂));低密度聚乙烯 (荷兰 DSM公司); 3234树脂体系 (北京航空材料研究院).

GFRP, CFRP, AFRP和 DFRP分别表示玻璃纤维、炭纤维、芳纶、UHMWPE纤维的复合材料层板. 所有层板均采用热压成型制备. 由于着重考察纤维性能对冲击吸能性能的影响,为避免纤维与基体界面结合性能相差太大,采用了不同的树脂基体, GFRP, CFRP采用 3234树脂体系, AFRP采用酚醛 缩丁醛体系, DFRP的基体为低密度聚乙烯.

纤维复丝的制备:采用浸胶、晾置、室温固化工艺制备,基体均为环氧 618树脂.

1.2 复合材料层板摆锤冲击实验

为实现对层板的冲击,采用了改造的 JC-SJ300-1型数字化多用途冲击试验机,试样采用两侧夹持、中点垂直冲击,冲击试验机的冲头为 7.62mm锥形冲头,冲击速度均为 2.80m/s

1.3 动态热机械分析 (DMTA)

DMTA测试采用拉伸加载下的静动载扫描模式,在试样上同时施加“静载”和“动载”(静载大于动载). “静载”是指恒定或变化较缓的单调载荷,“动载”为正弦交变载荷. 静动载扫描是指在一定的温度和加载频率下,考察当静载或动载幅值线性变化时,动态黏弹性参数的变化情况,相应地称为“静载扫描”或“动载扫描”. 所有实验中动载的加载频率均为 10Hz,测试温度均为 25℃.

2 实验结果与讨论

2.1 复合材料层板的冲击吸能

冲击过程中参与吸能的作用包括冲剪冲塞、挤压碎裂、弯曲形变、分层、界面脱粘、滑移摩擦、纤维拔出、拉伸断裂等. 复合材料薄板直接承受锥形冲头冲击时,最初为冲头剪断接触部位的部分纤维及基体;随后接触面增大,冲头将纤维向四周挤压、排开,同时纤维在巨大的排挤作用下向外卷曲、向四周隆起、并引起附近纤维的抽动和树脂基体的碎裂,冲头继续前进,速度下降,层板背部纤维弯曲拉伸形变、局部凸起直至纤维发生拉伸断裂,进一步吸收动能,其余纤维在排挤作用下向外、向四周弯卷,冲头穿出,随后克服摩擦作用而完全穿透层板.

图 1显示了 4种纤维复合材料层板的破坏形貌, GFRP和 CFRP的冲击形貌表现出明显的脆性破坏,冲入口周围出现较大面积的分层,出口处也有明显的分层、弯折,孔周围纤维毛刺较多. 而 DFRP和 AFRP则为明显的韧性破坏,冲击入口沿冲孔周围出现因冲头向四周挤压而形成的隆起以及因纤维的扯动而出现十字形损伤;穿透后冲孔收缩明显, DFRP层板因纤维变形性良好而在出射口处表现出较大的扯动现象,以至出现一个星形剥离创面;整个层板受冲击影响的范围也较大.

图 2为该 4种层板的冲击吸能, AFRP及 DFRP的冲击吸能较高,超过 GFRP和 CFRP的冲击吸能的 2倍. 纤维本身性能直接关系复合材料的冲击吸能能力,炭纤维和玻璃纤维刚度高,形变小,易于弯折,主要靠分层及纤维剪切断裂吸收能量,虽然其拉伸强度高,但由于横向剪切强度较低,在充分发挥拉伸性能之前,纤维已经弯折和剪

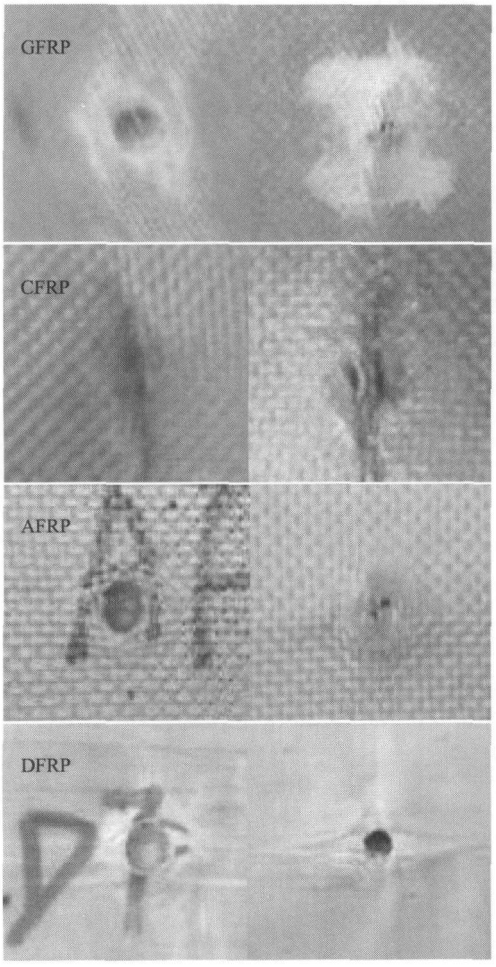


图 1　4种纤维复合材料层板冲击破坏形貌
(左为冲入口,右为冲出口)

断,因而吸能较低,特别是当板材厚度较薄时. Twaron750以及 UHMW PE纤维则由于柔性好,易于产生大的形变,使层板的受力状况转化为主要承受拉伸应力,有利于实现通过纤维拉伸形变及断裂而吸收大量能量.

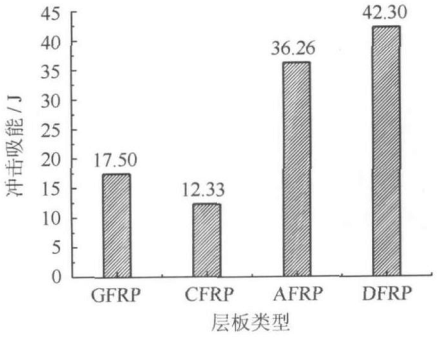


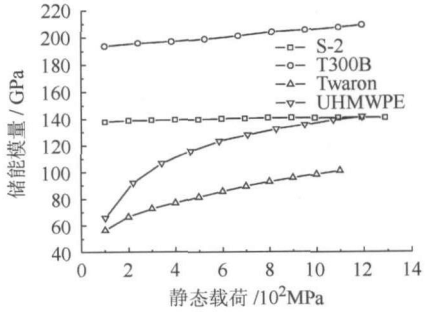
图 2　4种纤维复合材料的冲击吸能

2.2　载荷对纤维复丝动态储能模量的影响

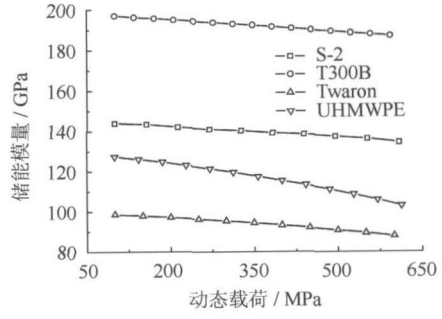
考察了载荷对 4种纤维复丝动态黏弹性参数的影响. 图 3a和图 3b分别为静载扫描和动态扫描中 4种纤维复丝动态储能模量的变化. 储能模量均随静载的增大而提高,随动载的增大而降低. 无机纤维复丝的储能模量高于有机纤维复丝. 但有机纤维复丝储能模量随载荷而变化的幅度很大,如图 3a和图 4a静载扫描中,有机纤维复丝储能模量均升高达 1倍左右,尤其是 UHMW PE复丝升幅最大,在所研究载荷范围内升高超过 70 GPa,以至于在静载较高时逐渐超过 S-2玻璃纤维复丝. 与静载使得储能模量升高相比,动载增大则使储能模量降低, S-2玻璃纤维复丝和碳纤维复丝的储能模量降低的幅度仍较小,有机纤维复丝储能模量降低的幅度也明显减小,但变化幅度仍以 UHMW PE纤维复丝为最大.

另外,有机纤维复丝储能模量的变化均表现出明显的非线性,尤其在静载扫描中. UHMW PE纤维复丝的非线性最为明显,而无机纤维复丝储能模量变化的非线性较小,特别是对于碳纤维复丝.

黏弹性是树脂基复合材料微观结构运动单元在对外载做出响应时所表现出的特性,反映了其运动单元的多重性和对外载响应的迟滞性. 微观运动单元在外载下的响应过程与外载的大小有关,在同时施加一个静载和一个动载时,静载相当于给运动单元预先施加了一个张紧力,因此对动载的响应会有一定程度的减弱,显然静载越大,减弱越明显,表现即是动态应变减小,储能模量升高(如图 3a).



a　静载的影响



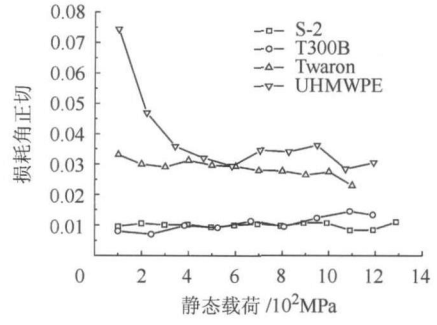
b　动载的影响

图 3　静载及动载对纤维复丝动态储能模量的影响

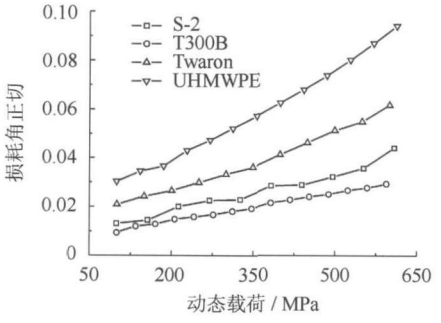
玻璃纤维和炭纤维的分子结构刚性较大,因而表现出较大的储能模量,但其构象发生改变的幅度较小,因此随载荷而改变的幅度不大. UHMWPE纤维复丝的动态储能模量表现出很大的载荷敏感性且非线性很强,其损耗角正切也很大,这与其特殊的物理结构相符:UHMWPE纤维分子结构没有侧基(更无极性侧基),易于发生分子内旋转,柔性好,因此在载荷下很容易发生形变,在高载荷下可充分伸直,因此模量随载荷而变化的幅度很大.

2.3 载荷对纤维复丝损耗角正切的影响

损耗角正切的变化情况(如图 4),随静载的增大,有机纤维复丝的损耗角正切先迅速下降,至静载较大时趋于平缓,但无机纤维复丝的损耗角正切则变化不大. 随动载的增大,4种纤维复丝的损耗角正切均增大,且升高的速度较均匀. 按照前面静载对动载抑制作用的分析,静载增大时,动态应变减小,因此运动单元之间的内摩擦减小,损耗角正切减小. 反之,动载增大则会引起损耗角正切增大.



a 静载的影响



b 动载的影响

图 4 静载及动载对纤维复丝损耗角正切的影响

图 4还显示无论是在静载扫描还是在动载扫描中,有机纤维损耗角正切均明显大于无机纤维复丝,且都以 UHMWPE纤维复丝的损耗角正切为最大,其随载荷而变化的幅度也最大. 这是由于其形变量大,分子构象的变化幅度大,过程中需克服较大的分子内摩擦,因此损耗角正切及其变化幅度都较大.

2.4 冲击吸能与动态黏弹性载荷敏感性的关系

所研究的几种复合材料层板的冲击吸能大小顺序为:DFRP > AFRP > GFRP > CFRP,这是由纤维性能及层板的破坏吸能形式决定的. 本质上,任何宏观的力学性能都是材料微观结构对外界作用响应的体现. 随载荷的变化,柔性纤维分子构象易于变化,易于使材料承受的应力状况得到重新分配,转化为更有利于大量吸收能量的拉伸状态,表现出大的拉伸形变以及拉伸断裂. 而刚性纤维的分子构象则变化幅度较小,对于横向冲击力的作用,不能有效改善应力状况,因而主要呈现分层和剪切冲断的形貌,吸能较小. 动态黏弹性是普遍采用的反映材料微观结构动态响应能力的指标. 而且,黏弹性行为的本质即是能量耗散[10]. 因此,冲击吸能与动态黏弹性对于材料的微观结构特征的反映是统一的,4种纤维储能模量载荷敏感性及其非线性以及损耗角正切大小均显示出了与前述的层板吸能大小相同的顺序:DF > AF > GF > CF(如图 3、图 4). 这正是材料微观结构与宏观性能之间固有相关性的反映.

3 结 论

1) 呈韧性破坏的 AFRP和 DFRP的冲击吸能明显高于呈脆性破坏的 CFRP和 GFRP.

2) 载荷对所研究的 4种纤维复丝的动态黏弹性的影响中,有机纤维复丝与无机纤维复丝有两点明显不同:一是载荷敏感性,有机纤维复丝的储能模量随静载的增大而大幅度提高,随动载的增大则明显降低,无机纤维复丝虽也有相同变化趋势,但变化幅度小得多,且 2种有机纤维复丝的损耗角正切及其变化幅度均比无机纤维复丝的大;二是有机纤维复丝储能模量变化的非线性非常明显,而无机纤维复丝尤其是炭纤维复丝则几乎是线性变化.

3) 复合材料的冲击吸能与动态黏弹性都是材料微观结构对外载的响应特性,4种层板的冲击吸能大小依次为:DFRP > AFRP > GFRP > CFRP,这与反映材料微观结构特征的动态黏弹性参数载荷敏感性及其非线性的大小一致.

参考文献 (References)

[1] 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

[2] Christoforou A P. Impact dynamics and damage in composite

structures[J]. Composite Structures, 2001, 52(2): 181 - 188

[3] Richardson M O W, Wisheart M J. Review of low-velocity impact properties of composite materials[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1996, 27(12): 1123 - 1131

[4] 关志东,郦正能,寇长河,等. 复合材料层板低速冲击损伤有限元模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(1): 37 - 40
Guan Zhidong, Li Zhengneng, Kou Changhe, et al. Dynamic simulation for composite laminates damage process due to low velocity impact [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(1): 37 - 40 (in Chinese)

[5] 刘安华,龚克成. 高分子材料黏弹过程的混沌运动[J]. 高分子材料科学与工程, 2001, 17(1): 11 - 15
Liu Anhua, Gong Kecheng. Chaotic movement of viscoelastic process in macromolecular materials[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2001, 17(1): 11 - 15 (in Chinese)

[6] Lazan B J. Behavior of plastics under vibrations[J]. Modern Plastics, 1942(20): 83 - 88, 136 - 138

[7] Payne A R. The dynamic properties of carbon black-loaded natural rubber vulcanizates[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1962, 19(6): 57 - 63

[8] Lee T H, Freddy Y C Boey, Loh N L. Characterization of a fiber-reinforced PPS composite by dynamic mechanical analysis: effect of aspect ratio and static stress[J]. Composites Science and Technology, 1993, 49(3): 217 - 223

[9] Alvarez V A, Valdez M E, Vazquez A. Dynamic mechanical properties and interphase fiber/matrix evaluation of unidirectional glass fiber/epoxy composites[J]. Polymer Testing, 2003, 22(6): 611 - 615

[10] 张义同. 热黏弹性理论[M]. 天津:天津大学出版社, 2002
Zhang Yitong. Theory of thermo-viscoelasticity [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002 (in Chinese)

(责任编辑:娄　嘉)

八方(OW2)开源软件国际联盟

八方(OW2)开源软件国际联盟(OW2 Consortium,简称 OW2联盟)是由中国"四方国件 联盟(Orientware)与法国国际性中间件开源软件联盟(Objectweb)于 2007年 1月共同发起成立的,旨在推进国际中间件技术的共享和应用。OW2联盟总部设在比利时的布鲁塞尔。

"四方国件 联盟是在国家"十五 "863计划的支持下,由北京大学、北京航空航天大学、国防科学技术大学和中国科学院软件研究所等大学与科研机构,以及中创软件股份有限公司等中间件公司共同发起,于 2005年初成立的中间件开放技术联盟,旨在集成和推广"十五 "863中间件优秀技术和成果。联盟于 2005年底发布了中间件集成套件"四方国件 "(Orientware),该套件集成了北京大学的构件化应用服务器 PKUAS,北京航空航天大学的 XLinker等 Web Service运行环境,国防科技大学的 StarAppserver构件化应用服务器以及中科院软件所的 Once系列中间件等。

ObjectWeb是由法国布尔公司(BULL SAS),法国电信(France Telecom)和法国国家计算机与自动化科学院(French National Institute for Research in Computer Science and Control,简称 INRIA)于 2002年共同创建的国际性中间件开源软件联盟,是世界上很有影响的中间件开放技术联盟,旨在促进新一代开源中间件在工业领域的开发和推广。

2005年 11月,在科技部的主持下,"四方国件 "与 Objectweb在上海签订合作备忘录。为了在国际范围促进中间件技术共享和广泛应用,"四方国件 "与 Objectweb于 2006年 10月同意合并,创建 OW2联盟。2007年 5月 3日,OW2联盟在布鲁塞尔完成组建并召开了首届理事会。新创建的 OW2联盟由 12个战略会员组成,包括中国的发起会员:北京大学、北京航空航天大学、国防科学技术大学和中国科学院软件研究所及中创软件股份有限公司,其他发起会员有法国的 BULL公司, INRIA,法国泰雷斯集团(Thales Group),另外红帽子公司(Red Hat)也是联盟的战略会员之一。

5月 28日,八方(OW2)开源软件国际联盟成立发布会在我校新主楼会议中心召开。

摘自北航新闻网