

C/ G层内混杂复合材料力学性能的实验研究

周光明¹ 梁中全² 赵 谦²

(1 南京航空航天大学航空宇航学院,南京 210016)

(2 南京玻璃纤维研究设计院,南京 210012)

文 摘 研究了 C/ G(碳/玻)层内混杂单向复合材料的力学性能,对其拉伸、弯曲、层间剪切、振动阻尼等性能进行了实验研究,并与同样铺层的纯 C、G 复合材料进行了对比分析。研究表明:C/ G 层内混杂复合材料可充分利用 C、G 纤维的各自优点,改善单一材料的模量、强度、断裂韧性、振动阻尼特性等力学性能,模量预测值与实验值较为接近,强度因影响因素较多,二者存在一定的差异,力学性能随 C、G 体积分数的变化符合混合律,说明了实验方法的合理性。通过 C、G 相对体积分数的合理设计可满足结构的实际要求。

关键词 层内混杂,复合材料,力学性能,实验

Experiment Research on Mechanical Properties of C/ G Interlaminar Hybrid Composite

Zhou Guangming¹ Liang Zhongquan² Zhao Qian²

(1 College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

(2 Nanjing Glass Fiber Research & Design Institute, Nanjing 210012)

Abstract The mechanical properties of carbon/ glass (C/ G) unidirectional interlaminar hybrid composite are studied. Experimental studies are performed on its tensile, flexural, interlaminar shear and vibration damping properties. Test data are compared with the properties of same unitary fiber (carbon and glass) reinforced composites. It is demonstrated that this kind of hybrid composite can fully utilize the advantages of both carbon and glass fibers, improve the property of unitary composite on the modulus, strength, fracture toughness and vibration damping; the predicted value of the modulus is close to experimental value; the difference of the strength values between them exists because of more affecting factors. The changes of the mechanical properties with C/ G volume fraction are coincident with hybrid fraction, which show a reasonable experimental method. The composite satisfies the practical requirements on the structure by suitable design.

Key words Interlaminar hybrid, Composite, Mechanical property, Experiment

1 前言

混杂复合材料由两种或两种以上复合材料构成,它通常用两种或两种以上纤维增强同一种基体而制成,可通过合理设计得到优异的综合性能。混杂复合材料是在 20 世纪 70 年代初研究与发展起来

的,一直受到人们的普遍重视,目前已被广泛应用于航空、航天、汽车和船舶等工业领域。各国学者也进行了大量的研究,但大都局限于层间混杂和夹层结构复合材料^[1~4],层内混杂复合材料的研究相对较少^[5],各种混杂后的力学性能研究尚显不足。相对

收稿日期:2004-05-14;修回日期:2004-07-28

周光明,1966 年出生,副教授,主要从事复合材料力学性能分析、结构设计、新材料研制等工作
宇航材料工艺 2004 年 第 5 期

层间混杂复合材料而言,层内混杂复合材料力学性能稳定,成型制作方便快捷,产品质量易于保证,因此具有非常广阔的应用前景。

本文着重研究单向 C/G 层内混杂复合材料的基本力学性能,用该种复合材料(两种组织结构)及具有相同铺层的单向碳纤维及玻璃纤维复合材料进行对比实验研究,并提出单向层内混杂材料纤维体积分数和拉伸性能的预测方法,以期层内混杂复合材料深入研究以及选材和设计应用提供参考依据。

2 实验

2.1 试验件制作

单向层内混杂布分别以 C/G 为 2:1 和 1:1 混杂两种组织结构,如图 1 所示。另两种用于对比的单向布分别为碳纤维单向布和玻璃纤维单向布,织物厚度均为 0.3 mm,所用纤维均分别为 T700、12K 碳纤维和无碱玻璃纤维。采用环氧 618 号树脂复合成型,各材料的性能见表 1。

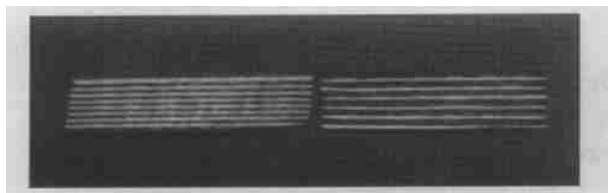


图 1 碳/玻混杂复合材料示意图

Fig. 1 C/G hybrid structure schematic

表 1 材料性能

Tab. 1 Properties of fiber and epoxy matrix

材料	线密度 /g·m ⁻¹	体密度 /g·cm ⁻³	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	断裂伸长率/%
T700	800	1.82	4 800	230	1.4
E 玻璃	1 200	2.54	2 760	79	3.3
环氧基体	-	1.12	103	3.5	3.0

试件采用模压成型方法,厚度由限位块控制,均为 2 mm,每种性能试验件为 5 件。各类复合材料试件均一次成型,然后分割成各个小样试验件。在铺设过程中须注意控制纤维束的平直,对混杂纤维要注意同类纤维在厚度方向上的一致性。

试验件的尺寸参照国家标准,但由于所用 T700 及 E 玻璃纱束较粗,直径较大,为了保证混杂试件内碳纤维和玻璃纤维的比例,混杂试验件的宽度根据纤维束的情况进行了适当的调整,具体尺寸见表 2。

表 2 各类性能试验件尺寸

Tab. 2 Size of samples mm

试件类别	平均长度	平均宽度
拉伸	220	30
弯曲	80	16
层间剪切	20	6
振动特性	200	16

2.2 实验件纤维体积分数及拉伸性能预测

2.2.1 纤维体积分数分析

混杂复合材料中两种纤维的混杂比为纱线根数之比,其纤维体积分数不仅与混杂比有关,而且还取决于单向布的密度,包括体密度 ρ_c 、线密度 ρ_L 和面密度 ρ_s 。因此,有必要对混杂后的纤维体积分数进行分析,以更好地分析其力学性能。

设碳/玻混杂比为 k ,则混杂后的单向布面密度为:

$$\rho_{SH} = \rho_{SC} \cdot \frac{k}{k+1} + \rho_{SG} \cdot \frac{1}{k+1}$$

碳纤维和玻璃纤维在单向混杂复合材料中的相对体积分数及质量分数分别为 V_C 、 V_G 、 m_C 、 m_G ,且 $V_C + V_G = 1$, $m_C + m_G = 1$,二者之比为 $m_C / m_G = k \cdot \rho_{LC} / \rho_{LG}$

$$V_C / V_G = \frac{k \cdot \rho_{LC}}{\rho_{LG}} \cdot \frac{\rho_{VG}}{\rho_{VC}}$$

单向混杂复合材料的体积分数 V_f 为:

$$V_f = \frac{\rho_{SH} \cdot N}{t(k \cdot \rho_{LC} + \rho_{LG})} \left(\frac{k \cdot \rho_{LC}}{\rho_{VC}} + \frac{\rho_{LG}}{\rho_{VG}} \right)$$

式中, t 为复合材料厚度, N 为铺层数。

2.2.2 拉伸性能分析

单向复合材料为层内混杂,纤维为平行排列,可用细观理论进行分析预测其拉伸性能。

(1) 纵向拉伸模量

利用混合律,其纵向弹性模量为:

$$E_H = V_f(E_C V_C + E_G V_G) + (1 - V_f) E_M$$

混杂后的弹性模量根据混杂比介于两种纤维模量之间。

(2) 纵向拉伸强度

由于碳纤维的断裂应变小于玻璃纤维的断裂应变,可见单向混杂复合材料的断裂应变由碳纤维控

制,复合材料被拉伸到 ϵ_c 时,碳纤维断裂。当碳纤维相对体积分数低于一临界值时,碳纤维所承受的载荷转给玻璃纤维继续承担,载荷可继续增加,出现二次破坏现象;当碳纤维相对体积分数超过某一临界值,玻璃纤维无法继续承载,表现为一次破坏。碳纤维体积分数相对临界值为:

$$V_{CR} = \frac{1}{1 + X_{fC} / (X_{fG} - KX_{fC})}$$

式中, $K = E_G / E_C$, X_{fG} , X_{fC} 分别为两种纤维的拉伸强度。

代入各项参数,得到碳纤维体积分数的相对临界值为 19%。本次研究的两种混杂复合材料的碳纤维相对分数均超过临界值,因此拉伸破坏表现为一次破坏,其强度预测公式为:

$$\sigma_t = V_f \cdot X_{fC} \left[V_C + \frac{E_G}{E_C} V_G \right]$$

各类材料纤维体积分数及拉伸预测值见表 3。从表 3 可见四种材料的纤维体积分数略有不同,但差别不大,成型后的试件经测量,纤维体积分数与预测值基本相同,误差不超过 1%。

表 3 混杂材料纤维体积分数及拉伸强度预测值

Tab.3 Prediction values of fiber volume fraction and tensile properties

材料类型	面密度 / $g \cdot m^{-2}$	纤维体积分数 / %	拉伸模量 / GPa	拉伸强度 / MPa
碳纤维	300	41.2	96.7	1 977
C/G=2:1	350	42.2	76.7	1 574
C/G=1:1	375	42.7	66.6	1 392
玻璃纤维	450	44.2	36.1	1 214

2.3 实验项目和实验方法

主要测试复合材料的拉伸性能(拉伸模量、拉伸强度、断裂伸长率)、弯曲性能(弯曲强度、弯曲模量)、层间剪切强度以及振动阻尼特性(振动阻尼、固有频率)。

2.3.1 拉伸、弯曲、层间剪切性能

采用 WDW-E2000 微机控制电子式万能试验机测试复合材料的静力性能,位移分辨率为 0.01 mm,应变通过 Y-33 数字应变仪采集。弯曲和层间剪切实验采用三点弯曲方法。

宇航材料工艺 2004 年 第 5 期

2.3.2 振动阻尼特性

试件用悬臂梁夹持,激励用锤击瞬间输入,力锤上的力传感器测出输入信号。在悬臂梁的自由端安置加速度传感器,测得响应信号。借助傅立叶变换分辨输入和响应信号的频率成分,将原始测量结果转换成频响函数,用适当的曲线拟合过程来分析这些测量数据,综合曲线拟合结果,建立模态特性,可给出自然频率、阻尼因子和振型,由 Agilent35670 动态信号分析仪完成。只需测出频率和基频阻尼因子,用单点激励、单点响应,试验框图如图 2 所示。

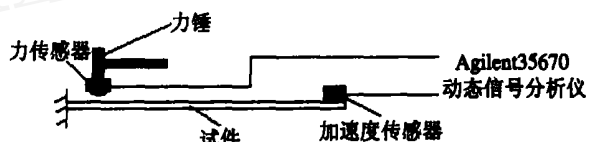


图 2 振动试验框图

Fig.2 Block diagram of vibration experiment

由振动频率 f 计算弹性模量 E 的计算方法如下:

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{M}}; T = \frac{3EI}{l^3}$$

式中, T 为等效弹簧刚度, M 为等效质量, l 为悬臂梁长度。

3 结果与分析

3.1 拉伸、弯曲、层间剪切性能

四种材料的拉伸载荷—位移曲线见图 3,表 4 为各类试件的性能试验结果。

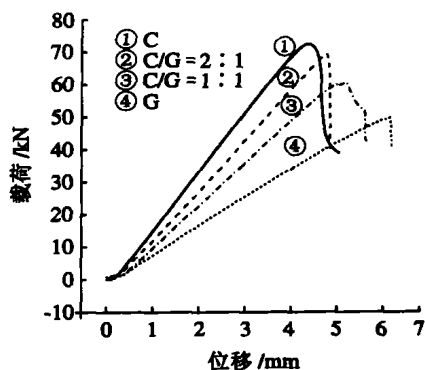


图 3 拉伸载荷—位移曲线

Fig.3 Tensile load-displacement curve

表 4 静力性能实验结果¹⁾

Tab. 4 Results of static test

类 型	拉 伸					弯 曲		剪切强度 / MPa
	模量/ GPa	误差/ %	强度/ MPa	误差/ %	断裂伸长率/ %	模量/ GPa	强度/ MPa	
碳纤维	97.75	1.1	1 468.2	25.7	1.5	72.19	624.2	42.67
C/ G=2 1	75.70	2.2	1 345.2	14.5	1.8	65.44	592.2	44.20
C/ G=1 1	67.33	1.0	1 123.6	19.3	2.2	56.24	588	46.74
玻璃纤维	35.20	2.6	905.3	25.4	2.8	30.75	591.7	48.16

注:1) 误差为试验值与预测值差值的百分比。

3.1.1 拉伸性能

(1) 纵向拉伸模量的实验值与估算值较接近,最大误差不超过 5%,弹性模量随碳纤维体积分数的增加而显著增大,变化趋势符合混合律。

(2) 拉伸强度随碳纤维体积分数的提高逐渐增大,断裂伸长率逐渐降低,C/G 为 2 1 和 1 1 的混杂材料较纯碳纤维复合材料断裂伸长率提高约 33% 和 47%,具有正的混杂效应。

(3) 拉伸破坏为一次破坏,破坏形式为纤维和基体沿纤维方向脱粘开裂后依次断裂破坏,如图 4 所示。

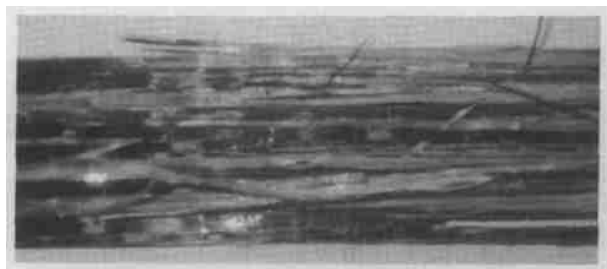


图 4 拉伸破坏模式

Fig. 4 Tensile rupture model

这种现象在某些试件中较为明显,强度实验值较预测值低很多,最低达 25% 左右,分析原因如下:

(1) 所用 T700 及 E 玻璃纤维纱束较粗,树脂不易浸透,纤维界面粘接性能差,导致界面处横向内应力超过界面强度,形成界面脱粘和开裂,从而降低了复合材料的强度;

(2) 原丝强度为平均强度,实际每根纤维强度不同,有时存在较大差异,因此根据纤维强度预测的复合材料强度值偏高。

3.1.2 弯曲性能

(1) 弯曲性能的变化趋势与拉伸基本符合,弯曲模量稍低于拉伸模量,随碳纤维体积分数的提高而增大。

(2) 由于复合材料的拉压性能不完全相同,玻璃纤维压缩性能较差,弯曲强度的研究也就更加复杂。从表 4 可见,混杂材料与纯玻纤复合材料的弯曲强度相差不大,低于碳纤维复合材料,且较拉伸强度低很多,弯曲破坏呈现压剪破坏特征。

3.1.3 层间剪切性能

(1) 玻璃纤维与环氧树脂的粘接能力稍高于碳纤维,随着复合材料中玻璃纤维体积分数的提高,层间剪切强度略有提高,各种混杂复合材料和单一纤维复合材料层间剪切强度相差不大,混杂后层间剪切强度基本不变。

(2) 由于纱束较粗,层间剪切强度较低,破坏形式为非分层破坏,而是纤维与基体剥离后断裂,由图 5 可见试验曲线呈现不规则阶梯型变化,呈现多次破坏现象,说明该种材料是纤维逐根失效破坏。

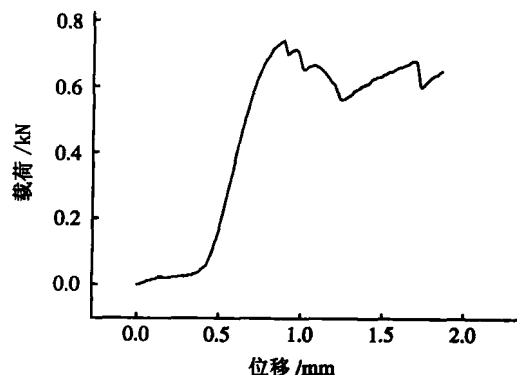


图 5 层间剪切载荷—位移曲线

Fig. 5 Load displacement curve of interlaminar shear

3.2 振动阻尼特性

试件频响函数趋势相同,图 6 给出了 C/G 为 2/1 的频响函数图,表 5 为振动性能测试结果。另外,为校核弹性模量的测量值,利用振动实验所测得的振动频率,计算了四种材料的弹性模量,并与拉伸实验结果进行了比较。

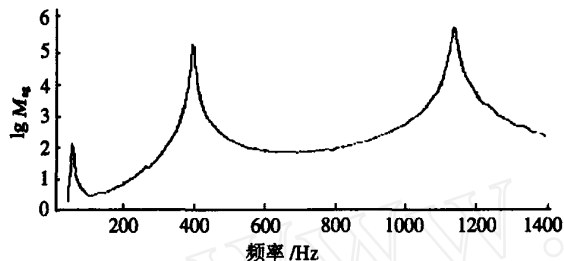


图 6 C/G 为 2/1 试件频响函数图

Fig. 6 Frequency-response function of C/G=2/1 sample

表 5 振动性能测试结果

Tab. 5 Results of vibration test

类型	第一阶		第二阶		E(动) / GPa	E(动) / E(静)
	频率 / Hz	阻尼比 / %	频率 / Hz	阻尼比 / %		
碳纤维	52.3	4.95	420	0.96	96.6	0.99
C/G=2/1	55.4	5.21	424	0.98	72.3	0.96
C/G=1/1	52.0	5.56	392	1.02	64.4	0.95
玻璃纤维	43.5	6.24	318	1.06	34.1	0.97

由表 5 可得如下结果。

(1) 利用振动理论得到的弹性模量与拉伸试验得到的模量基本一致,也说明了本次振动试验的可靠性。

(2) 固有频率受试件尺寸、质量影响较大,因此不便比较,也不是考察的重点,但各类材料(除碳纤维外)固有频率差别不大。

(3) C/G 为 2/1 和 1/1 混杂后的材料阻尼比纯碳纤维复合材料分别提高 5% 和 12%, 振动衰减性

能随玻璃纤维体积分数的增加逐渐提高。

(4) 由于试件尺寸较小,质量较轻,试验结果存在一定的分散性。

4 结论

(1) C/G 为 2/1 和 1/1 混杂复合材料拉伸模量和弯曲模量符合混合律,增加碳纤维体积分数可改善单一玻璃纤维增强复合材料的模量。断裂伸长率和振动阻尼特性均较纯碳纤维复合材料有明显改善,提高了其冲击韧性和振动衰减性。

(2) 三种性能的破坏模式均为一次破坏,由于纱束较粗及纤维缺陷的存在,强度值有所下降,呈界面脱粘和开裂后纤维逐根断裂现象,这种现象在层间剪切时尤为明显。在碳纤维复合材料中混入玻璃纤维可略为提高其层间剪切强度,混杂不影响层间特性,性能优于层间混杂复合材料。

(3) 设计混杂复合材料构件时,应选择适当的 C/G 混杂比,这样才能充分考虑构件对各种性能的要求,可将单向混杂布作为原材料用于多向复合材料的制作,满足构件的实际使用要求。

(4) 由于纱束较粗,树脂不易浸透,破坏模式呈剥离后断裂特征,强度较预测值低,实际工程应用中应充分注意其成型工艺。

参考文献

- 余顺海,唐羽章. 混杂纤维复合材料. 长沙:国防科技大学出版社,1987:1~6
- 张大兴,张佐光. CFGF 多向混杂纤维复合材料拉伸特性研究. 新型炭材料,1997;12(2):29~35
- Jung Ju Lee. Evaluation and analysis of interlaminar fracture toughness of bead filled matrix hybrid composite materials using orthotropic fracture mechanics. Composite Structures, 1995;32:477~489
- Hwang S F, Shen B C. Opening-mode interlaminar fracture toughness of interply hybrid composite materials. Composites Science and Technology, 1999;59:1861~1869
- 曾庆敦,黄小清,林雪慧. 层内混杂复合材料应力集中问题的研究. 应用数学和力学,2001;22(2):135~139

(编辑 李洪泉)