不等径纤维混杂复合材料混杂原理[1)]

张佐光 仲伟虹 张大兴 史卫华
(北京航空航天大学 材料科学与工程系)

摘 要 对碳化硅-碳(SiCF-CF)/环氧和硼-碳(BF-CF)/环氧 2 种不等径纤维混杂复合材料的混杂模型和机理进行了初步研究. 建立了三角形和四边形阵列的混杂模型;分析了材料制备工艺对混杂阵列、纤维体积含量的影响.

关键词 纤维增强复合材料; 碳纤维; 碳化硅纤维; 硼纤维; 混杂纤维复合材料; 混杂模型; 混杂效应
分类号 TB 332

所谓不等径纤维复合材料是指较小直径(通常是几 μm 或十几 μm)纤维与较大直径(通常是几十 μm 或上百 μm)纤维进行混杂而构成的复合材料[1]. 这种新型的不等径纤维复合材料与一般的混杂纤维(纤维直径相差不大)复合材料相比,具有明显的特点[2]: ①纤维体积含量非常高,可达 70 %～80 %; ②突出的抗压、弯性能; ③优良的电磁波特性. 本文中所用增强纤维为:大直径纤维用 SiCF 和 BF,小直径纤维用 CF;基体采用 3 种环氧树脂体系. 首先建立了进行不等径纤维复合材料混杂模型,讨论了纤维的最大含量并通过制备试样用扫描电子显微镜观察不等径纤维分布和基体分布;同时探讨材料制备工艺对混杂阵列、纤维体积含量的影响规律.

1 实验与测试

1.1 原材料

本实验采用的几种纤维见表 1. 树脂基体为环氧树脂体系.

表 1 3 种纤维的基本性能及来源

性能或来源	纤维类型		
	碳纤维 (T300)	碳化硅纤维 (SiCF)	硼纤维 (BF)
直径/μm	7	109	102
密度/(10^3 kg·m^{-3})	1.7	3.4	2.57
拉伸强度/MPa	2950	3200	2812
拉伸模量/GPa	230		380
断裂伸长率/%	1.3	0.2	0.7
来源	日本东丽	石家庄	美国

1.2 试样制备

采用单向铺层热压工艺.

1.3 显微观察

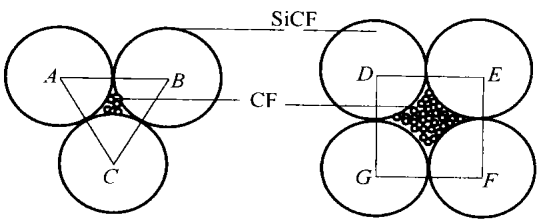
采用扫描电镜(JSM5800 和 580)观察材料中纤维和基体的分布及力学损伤的微观形貌.

2 结果与讨论

2.1 混杂模型的建立

2.1.1 理想混杂模型

理想状态的复合材料中纤维紧密而规整排列,大直径纤维两两相切,所夹区域(间隙)内混杂有一定数目的小直径纤维,构成正三角形或正四边形混杂阵列,如图 1 所示.



a 正三角形 b 正四边形

图 1 2 种理想混杂阵列模型示意图

在图 1a 所示的正三角形混杂阵列中, $\triangle ABC$ 的面积为 $\sqrt{3}R^2$, R 为大直径纤维的半径.

若单一小直径纤维增强复合材料中纤维体积含量是 V_f,则该区域内可混杂的小直径纤维数为

$$n_{f1} = \frac{(\sqrt{3} - \pi/2) \cdot R^2 \cdot V_f}{\pi r^2} \tag{1}$$

式中 r 为小直径纤维的半径.

在图 1 所示的正四边形混杂阵列中,同样可得到 $\square DEFG$ 区域内可以混杂的小直径纤维数为

$$n_{f2} = \frac{(4 - \pi) \cdot R^2 \cdot V_f}{\pi r^2} \tag{2}$$

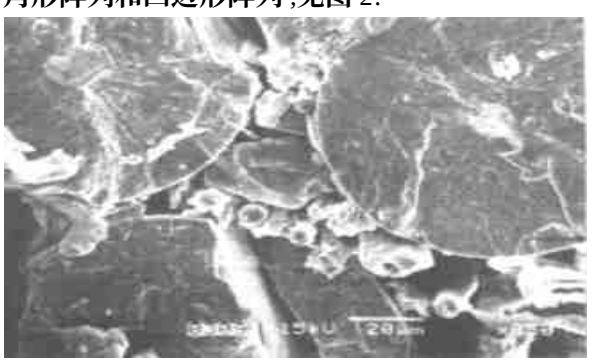
收稿日期: 1998-04-21 第一作者 男 47 岁 教授 100083 北京
1) 国家自然科学基金(59573007),航空科学基金(95G51011)资助项目

当直径为 7μm 的 CF 与直径 109μm 的 SiCF 混杂,且单一 CF 增强复合材料的纤维体积含量 V_f = 60 %时,按式(1)和式(2),则 $n_{f1} \approx 7$, $n_{f2} \approx 39$.

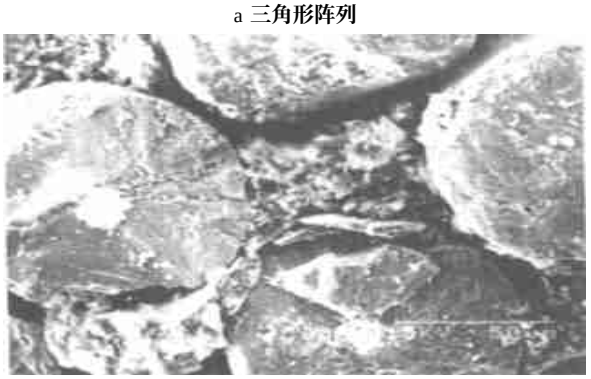
根据以上分析计算,可得到 2 种理想混杂阵列中 SiCF 与 CF 的混杂比(根数比):正三角形阵列为 1∶14,正四边形阵列为 1∶39. 同样,对于 BF-CF 混杂体系(BF 的直径是 102μm),可以得到 2 种理想混杂阵列中 BF 与 CF 的混杂比(根数比):正三角形阵列为 1∶12,正四边形阵列为 1∶34.

2.1.2 复合材料中的混杂模式

上面讨论了材料的理想混杂模式,但是实际制样过程中,压力大小、加压时机、树脂粘度等诸多因素将使得这 2 种混杂阵列在某种程度上发生一定的变形. 实验分别制备微型 SiCF-CF/环氧和 BF-CF/环氧混杂复合材料试样各 100 个,在每个试样上截取数个截面,打磨,镀膜(铜膜),置于扫描电子显微镜下观察,可以观察到纤维混杂的三角形阵列和四边形阵列,见图 2.



a 三角形阵列

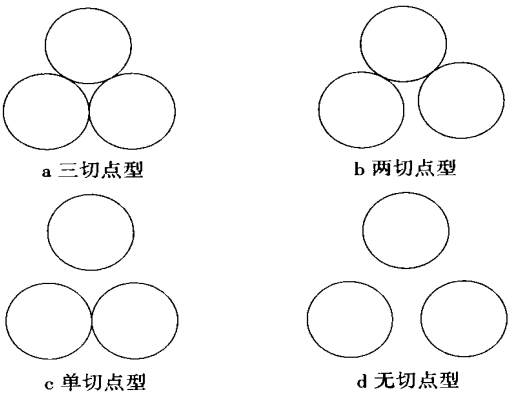


b 四边形阵列

图 2 三角形和四边形阵列的 SEM 照片
(制备压力为 0.32 MPa)

若将一个三角形阵列或四边形阵列作为混杂模式中的一个基元,则在每个混杂基元中,3 个或 4 个大直径 SiCF 或 BF 之间混有一定数目的小直径 CF. 对大量扫描电镜观察结果的分析表明,纤维的三角形阵列排布可以分为 4 种情况,见图 3.

2.2 纤维体积含量的统计值与分析



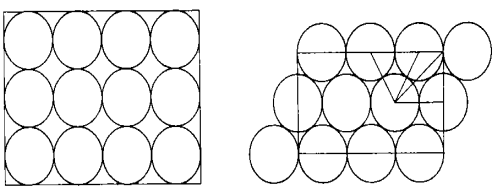
a 三切点型　b 两切点型　c 单切点型　d 无切点型

图 3 不等径纤维混杂复合材料的三角形阵列排布类型

2.2.1 不等径纤维混杂复合材料纤维体积含量的理论分析

首先考虑理想状态下,单一纤维增强复合材料的纤维体积含量. 如上所述,复合材料中纤维的理想排列有 2 种形式:正三角形和正四边形阵列,见图 4. 当纤维排列呈正三角形阵列时,其纤维体积含量为

$$V_{f1} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \times 100\ \% = 90.6\ \% \qquad (3)$$



a 正四边形阵列　b 正三角形阵列

图 4 复合材料中纤维的理想排布阵列

纤维排列呈正四边形时,其纤维体积含量为

$$V_{f2} = \frac{n^2(\pi R^2)}{(2nR)^2} \times 100\ \% = 78.5\ \% \qquad (4)$$

式中 R 为纤维的半径.

现在讨论纤维混杂构成理想混杂阵列后,混杂体系的纤维体积含量. 取含一定数目(n_F)大直径纤维的区域,则该区域内大直径纤维所占面积为

$$S_F = n_F \cdot (\pi R^2) \qquad (5)$$

小直径纤维所占面积为

$$S_f = (S_F / V_F - S_F) \cdot V_f = n_F \cdot (\pi R^2) \cdot (1/V_F - 1) \cdot V_f \qquad (6)$$

式中 V_F 为大直径纤维增强复合材料的理想纤维体积含量;V_f 为小直径纤维增强复合材料的理想纤维体积含量.

则理想状态下不等径纤维混杂体系的纤维体

积含量为

$$V_f^* = V_F + (1 - V_F) V_f \quad (7)$$

根据以上单一纤维增强复合材料的 2 个理想纤维含量值 V_{f1} 和 V_{f2},可以估算混杂体系的理想纤维体积含量: ①正三角形混杂阵列: $V_{f1}^* = 99.1\%$; ②正四边形混杂阵列: $V_{f2}^* = 95.4\%$.

2.2.2　混杂复合材料的纤维体积含量统计

实验得到 CFRP 的树脂基体含量为 47 %,那么其纤维体积含量为 53 %. 采用 SEM 测量 BFRP 和 SiCFRP 的纤维体积含量. 在试样截面上取多个视野进行观察. 每个视野至少包括 10 根以上纤维. 那么每个视野内纤维体积含量为

$$V_{fi} = \frac{S_F}{S} = \frac{n_F \cdot (\pi R^2)}{S} \quad (8)$$

式中　n_F 为视野内的纤维数目; S 为视野面积.

对这些视野下的纤维体积含量取平均值,就得到该截面的纤维体积含量. 再另取几个截面进行观察,同样得到不同截面下的纤维体积含量. 取这些截面下纤维体积含量的统计平均值,即为试样的纤维体积含量. SiCFRP 和 BFRP 的纤维体积含量统计值列于表 2.

表 2　复合材料纤维体积含量的测试数据

试样类型	CFRP	BFRP	BF-CFRP	SiCFRP	SiCF-CFRP
纤维体积含量/%	53	50	76.5 (CF:40.5)	51	77.0 (CF:40.8)

2.3　工艺参数对纤维与其含量的影响分析

根据一般复合材料的制备压力,由实验确定出 2 个极限压力值(0.2～0.45 MPa). 当制备压力低于下限值时,混杂试样中形成明显的分层结构. 实验讨论 3 个压力点(0.22 MPa、0.32 MPa 和 0.42 MPa)下,混杂模式分布及纤维体积含量的变化趋势. 实验表明,在制备压力范围内,随压力值的增大,纤维排列趋于有序和紧密,三角形阵列和四边形阵列的数量增大;但是四边形阵列较三角形阵列的上升速度缓慢;当达到某一压力值时,四边形阵列的数量分布略有下降. 当压力值增至某一临界点时,材料结构中纤维排列均呈三角形和四边形阵列,松散区域所占面积几乎减少为零. 压力值超过该临界点后,四边形阵列向更为紧密且稳定的三角形阵列转化.

3　结　论

1) 不等径纤维混杂复合材料的混杂模式一般有 2 种:三角形阵列和四边形阵列.

2) 不等径纤维混杂复合材料的纤维体积含量可达 76 %以上,而单一纤维增强和一般混杂纤维增强复合材料的纤维体积含量多为 60 %左右,难以高于 70 %.

3) 纤维的排列模式受固化压力的影响很大,随压力增加三角形阵列和四边形阵列数量均增加,而三角形阵列增加快于四边形阵列,纤维排列更为紧密.

参　考　文　献

1　Boron graphite join forces in one composite material. Advanced Composites, 1993, 8(4): 45～47

2　史卫华. 不等径纤维混杂复合材料的基础研究:[学位论文]. 北京:北京航空航天大学材料科学与工程系,1997

Analysis on Arrangement of Hybrid Composites Reinforced with Different Diameter Fibers

Zhang Zuoguang　Zhong Weihong　Zhang Daxing　Shi Weihua

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Materials Science and Engineering)

Abstract　It mainly explored the hybrid model and mechanism of two kinds of hybrid composite materials reinforced with different diameter fibers which were composed of small-diameter fibers nested between large-diameter fibers in a matrix. T300 carbon fiber(CF), SiC fiber and boron fiber(BF) were used. Three types of single fiber composites and hybrid composites with carbon fibers as small-diameter fibers, SiC and boron fibers as large-diameter fibers in epoxy resin matrix were constructed. Triangle and quadrilateral formations were proposed as the hybrid models. The effects of processing on hybrid arrangement and fiber volume fraction were analyzed.

Key words　fiber reinforced composites; carbon fibers; silicon carbide fiber; boron fibers; hybrid composite; hybrid model; hybrid effect