

玄武岩纤维-碳纤维混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料的制备与力学性能

徐虹, 张可, 卢岩, 王祥辉, 刘栓, 窦艳丽*

(吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130025)

摘要: 对以平纹织物为增强体的混杂纤维复合材料(HFRP)的刚度和强度进行研究。设计热压工艺并制备 7 组具有不同混杂比的玄武岩纤维-碳纤维(玄-碳)混杂增强环氧树脂基复合材料试样进行拉伸试验。基于平纹织物的结构特征,对传统混合定律加以修正,提出以平纹织物为增强体的 HFRP 刚度估算模型。基于 HFRP 层合板的破坏机制,提出材料仅发生一次破坏的临界混杂比,并分成三个混杂比范围给出强度估算模型。最终以体现分散度的混杂效应系数对估算结果加以修正。结果表明:计算值与试验值近似,预估模型计算所得临界混杂比与试样拉伸试验时的应力-应变曲线分析结果相符,模型可为今后的实际应用提供理论依据。本文提出的预估方法可以反应混杂比和分散度对平纹织物为增强体的 HFRP 强度和刚度的影响,扩展了混合定律的应用范围。

关键词: 混杂纤维复合材料;碳纤维;玄武岩纤维;平纹织物;混杂比;力学性能

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)04-0767-07

Preparation and mechanical property of carbon-basalt hybrid fiber plain fabric reinforced epoxy resin matrix composites

XU Hong, ZHANG Ke, LU Yan, WANG Xianghui, LIU Shuan, DOU Yanli*

(School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The stiffness and strength of hybrid fiber reinforced polymer(HFRP) with plain fabric as reinforcement were studied. The hot-pressing process was designed and 7 groups of carbon-basalt hybrid fiber reinforced epoxy resin matrix composites specimens with different hybrid ratios were prepared for tensile test. Based on the structural characteristics of plain fabric, the traditional hybrid law was modified and a HFRP stiffness estimation model using plain fabric as reinforcement was proposed. According to the failure mechanism of HFRP laminates, the critical hybrid ratio of materials with only one failure was proposed and a strength estimation model with three ranges of hybrid ratios was also given. Finally, the estimation results were corrected by the coefficient of hybrid effect which reflects dispersion. The result shows that the calculated values and experimental values are similar and the critical hybrid ratio calculated fits the result of stress-strain curve analysis. The model can provide a theoretical basis for practical application in the future. The prediction method proposed in this paper can reflect the influence of hybrid ratio on the HFRP strength and stiffness of plain fabric, and expands the range of application of the mixture law.

Keywords: hybrid fiber composites; carbon fiber; basalt fiber; plain weave; hybrid ratio; mechanical property

混杂纤维复合材料(HFRP)可以综合多种纤维的优点,弥补单一纤维复合材料性能上的缺失,目前已被广泛研究应用于建筑、汽车、军事和航空航天等领域。碳纤维具有极高的强度与刚度,但断裂韧性不足,若混杂玄武岩纤维不仅可以对其加以改善,还可以降低碳纤维复合材料的生产成本^[1-11]。

近年来,很多国内外学者对 HFRP 的力学性能进行了研究。基于混合定律、断裂力学模型和微观力学模型等理论的强度、刚度与混杂效应计算方法也有很多。但研究对象多为以单轴布为增强体的单向或多向 HFRP,对于以平纹织物为增强体的 HFRP 研究较少^[12-18]。

但事实上以单轴布为增强体的 HFRP 在断裂时,易发生纤维间的劈裂,极大地影响力学性能,不适用于实际生产应用。相反,平纹织物复合材料具有优良的力学性能,已大量应用于高强度结构制品中^[19]。

本文设计热压工艺,以力学性能优良的碳纤维与玄武岩纤维平纹织物为增强体,制备 7 种具有不同混杂比的玄武岩纤维-碳纤维(玄-碳纤维)混杂增强环氧树脂基复合材料试样,试验测得材料强度和刚度。在参考传统混合定律的基础上,考虑混杂比、分散度及织物编制参数等影响因素,给出了以平纹织物为增强体的 HFRP 刚度与强度估算模型,扩大了混合定律的应用范围。该模型可为以后实际应用提供理论参考。

1 试验设计

1.1 原材料

碳纤维平纹织物,吉林丰帆特种纤维有限公司;玄武岩纤维平纹织物,浙江石金玄武岩纤维有限公司;凤凰牌环氧树脂 E51,南通星辰合成材料有限公司;2-乙基-4-甲基咪唑,天津市化学试剂厂。由厂家提供的碳纤维和玄武岩纤维的相关参数见表 1。测得固化后树脂的弹性模量为 1.8 GPa,抗拉强度为 48.8 MPa。

表 1 纤维纱线参数
Table 1 Paramater of fiber yarn

Yarn	Tensile modulus/GPa	Density/(g·cm ⁻³)	Tensile strength/MPa
Carbon yarn	214.45	1.780	2 600
Basalt yarn	96.00	2.763	2 200

1.2 基体与固化剂的选择

热固性树脂一直以来较热塑性树脂应用更广,本试验选择热固性树脂中力学性能优异的环氧树脂作为基体。在纤维生产过程中,为了让纤维更好的定形都会在纤维上涂抹上浆剂,其成分即为环氧树脂。因此,以环氧树脂作为基体还可以改善界面相容性。2-乙基-4-甲基咪唑为环氧树脂的中温型固化剂,其与树脂良好相溶、毒性低、经济性能佳、固

化后适用期长且整个加工工艺易于控制。

1.3 预浸料的制备与热压工艺

制备孔隙率较低的试件可以减少试验误差,使试验结论更加准确,这要求试件的制备工艺尽可能完善。

将 E51 环氧树脂与 2-乙基-4-甲基咪唑按质量比 100:7 混合。混合过程中恒处于 30℃ 条件下并不断搅拌,这样可以使环氧树脂与咪唑均匀混合且具有良好的流动性,便于施胶。纤维织物平铺于试验台上,倒出适量树脂,用刷板将其均匀涂抹于织物上,并撵出多余树脂。不可在预浸料中存留较多树脂,否则在热压时,黏稠的树脂流动起来会带动纱线,造成纱线弯曲,影响材料性能。继续覆盖纤维,重复操作直至完成。

将完成好的预浸料放在喷好脱模剂的聚四氟乙烯膜上,放入 XLB50X2 平板硫化机(郑州中阳生产),按图 1 所示时间温度进行热压。在固化反应之前必须将材料保温一段时间,这样可以提高树脂的流动性,使其更好的浸润纱线,同时给予时间排除气泡,减少缺陷。保温温度越高浸润效果越好,但过高温度会使树脂固化,因此设定 50℃ 保温 30 min。根据对环氧树脂与咪唑固化反应的差热分析报道,其差热谱图在 100℃ 存在放热峰,因此设定 100℃ 保温 3 h,并施加 2 MPa 完成固化反应。

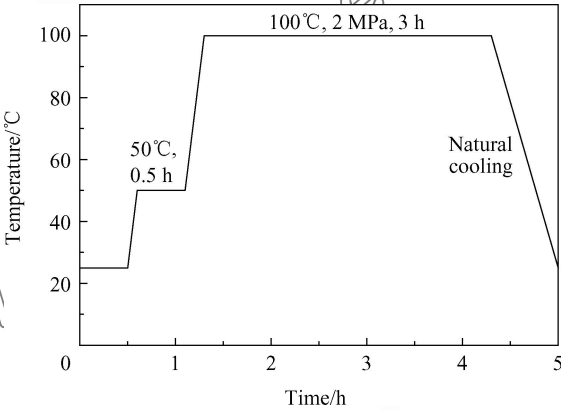


图 1 热压工艺曲线
Fig. 1 Curve of hot-pressing process

1.4 拉伸试验

按照标准 GB/T 3354—2014^[20]将热压好的层合板修剪为标准试件大小,试件样式见图 2。本试验共制备 7 组具有不同混杂比的玄-碳混杂增强环氧树脂基复合材料试样,每组 5 个试件,均采用对称嵌层式铺层结构,试件相关信息见表 2。用 WDW-200 电子万能拉伸机(长春科新仪器生产)进行拉伸试验。在



图2 玄-碳纤维混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料
标准拉伸试件

Fig.2 Standard tensile specimens of carbon-basalt hybrid
plain fabric reinforced epoxy resin matrix composites

表2 玄-碳纤维混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料
试件信息

Table 2 Information of carbon-basalt hybrid plain fabric
reinforced epoxy resin matrix composites specimen

Ply label	Spread sequence	Spread quantity	Resin content/%	Hybrid ratio/%
P01	B	8	44.40	0.00
P02	B/C/B/C/B	2/1/1/1/2	46.80	16.43
P03	B/C/B/C/B	1/1/2/1/1	46.67	19.73
P04	B/C/B/C/B	1/2/2/2/1	47.62	32.96
P05	C/B/C/B/C	1/1/2/1/1	45.14	49.57
P06	C/B/C/B/C	2/1/2/1/2	42.63	59.59
P07	C	8	47.79	100.00

试件居中位置安装 50 mm 标距引伸计, 试验加载速率控制为 3 mm/min, 直至试件断裂。

2 以平纹织物为增强体的 HFRP 刚度预估

2.1 特征体积单元 (RVE) 结构模型

在平纹织物中纱线弯曲且相互交织, 形成了不同于单向纤维的编织结构。本文使用 RVE 模型描述平纹织物复合材料的细观结构。并且假设纱线轴线为正弦曲线, 截面为凸透镜型的双凸模型。图 3 为平纹织物的截面轮廓。其中 a 为最小单元的长度, b 为纤维的厚度。

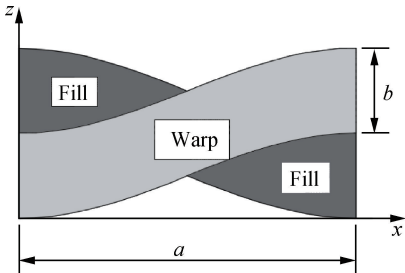


图3 纤维界面轮廓
Fig.3 Section contour of fiber

大部分平纹织物复合材料中, 长度要比厚度大 30~50 倍, 因此可以将模型简化为分别由经纱和

纬纱组成的层结构。

2.2 预估模型

以玄-碳混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料为例, 传统混合定律为

$$E_h = v_f(E_c v_c + E_b v_b) + (1 - v_f)E_m \tag{1}$$

式中: v_f 为纤维体积含量; E_h 、 E_c 、 E_b 和 E_m 分别为 HFRP、碳纤维、玄武岩纤维和环氧树脂的抗拉弹性模量。此式主要适用于单向 HFRP。对于平纹织物来说, 在拉伸方向上, 经向纱线轴向受拉, 纬向纱线径向受拉, 纱线的轴向弹性模量与径向弹性模量完全不同, 因此对 HFRP 刚度的计算不能将所有纤维纱线统一处理, 为适用于平纹织物为增强体的 HFRP 刚度计算, 对式(1)修正如下:

$$E_h = v_l(v_c(E_{cl} v_{cl} + E_{ct} v_{ct}) + v_b(E_{bl} v_{bl} + E_{bt} v_{bt})) + (1 - v_f)E_m \tag{2}$$

式中: L 代表纱线轴向方向; T 代表纱线径向方向。普遍认为, 纤维径向弹性模量比轴向弹性模量小两个数量级, v_{cl} 、 v_{ct} 、 v_{bl} 和 v_{bt} 为纤维的织物编织参数, 见表 3。由式(2)得到的理论值与实验值的误差见表 4, 其中最大误差达到 19.53%, 不能很好地预估 HFRP 的刚度。

关于 HFRP 力学性能的大量研究结果表明, 两种纤维混杂时存在混杂效应, 正的混杂效应可以提高 HFRP 性能。混杂界面数越多, 纤维分散度越好, 材料性能越好。因此引入分散度的概念来计算混杂系数可以更加准确地计算材料刚度。

引入混杂系数的刚度计算如下:

$$E' = \left[1 + \frac{v_f^2}{4} + \frac{K}{2}(v_c^2 - v_c) \right] E_h \tag{3}$$

表3 碳纤维及玄武岩纤维编织参数

Table 3 Weaving parameters of carbon fiber and basalt fiber

Fiber	v_L / %	v_T / %
Carbon fiber	48.69	51.31
Basalt fiber	41.14	58.86

Notes: v_T —Radial yarn volume; v_L —Axial yarn volume.

表4 式(2)得到的 HFRP 刚度的理论值误差

Table 4 Error rate of stiffness theoretical value calculated from formula (2)

Ply label	Experimental/GPa	Calculated/GPa	Error/%
P01	24.07	23.45	-2.57
P02	26.64	29.16	9.46
P03	27.00	30.38	12.52
P04	30.20	35.48	17.48
P05	36.82	44.01	19.53
P06	41.49	47.38	14.20
P07	60.80	55.98	-7.93

其中: φ 为分散度; v_c 为混杂比; K 为与铺层形式有关的参数, 本试验采用对称式铺层, K 取 2。分散度的计算公式如下:

$$\varphi = 1 - (H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 + \dots) / H_h^2 \quad (4)$$

式中: H_1 、 H_2 、 H_3 ……为同种连续纤维的厚度; H_h 为 HFRP 试件厚度。

2.3 刚度预估结果

以混杂比为横坐标, 绘制试验所测刚度与本模型预估刚度对比曲线如图 4 所示。可见, 试验值与预测值基本一致, 相应误差见表 5, 最大误差率降低到 12.96%。这证明了试验的准确性及预测模型的正确性。试验值较预测值偏小, 是试件孔隙所致, 同时偏差较小证明试件孔隙率极低, 制备工艺是合理的。

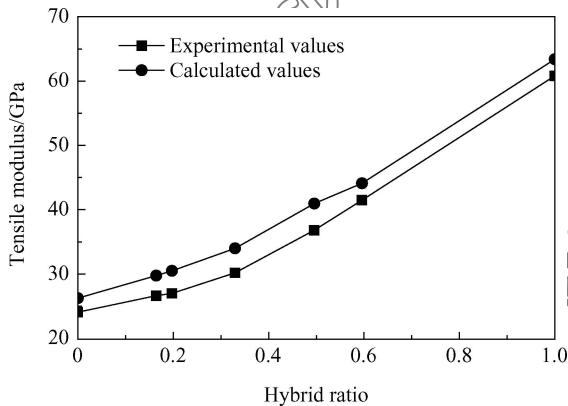


图 4 玄-碳纤维混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料拉伸模量试验值与计算值对比

Fig. 4 Comparison of experimental values and calculated values of tensile modulus for carbon-basalt hybrid fiber plain fabric reinforced epoxy resin matrix composites

3 以平纹织物为增强体的 HFRP 强度预估

3.1 预估模型

在玄-碳混杂纤维复合材料层合板中, 碳纤维的断裂应变较低, 在拉伸过程中, 其会先承受主要载荷并断裂。此时若玄武岩纤维的含量较低, 将会与碳纤维一同断裂, 材料为一次破坏; 若玄武岩纤维含量较高, 则碳纤维断裂后, 其还具备承载能力, 载荷可继续增加直至 HFRP 彻底失效, 材料为多次破坏。材料一次破坏与多次破坏之间存在临界混杂比。

将研究对象考虑为经向横截面积为单位 1 的 HFRP 层合板。碳纤维、玄武岩纤维和环氧树脂的体积含量分别为 λ_c 、 λ_b 和 λ_m ; 经向碳纤维与全部碳

纤维体积比为 α_{ci} 、经向玄武岩纤维与全部玄武岩纤维体积比为 α_{bi} ; 板条沿经向受单向拉力为 F , 则

$$F = \lambda_c \alpha_{ci} \sigma_c + \lambda_b \alpha_{bi} \sigma_b + \lambda_m \sigma_m \quad (5)$$

$$\lambda_c + \lambda_b + \lambda_m = 1 \quad (6)$$

式中, σ_c 、 σ_b 和 σ_m 分别代表碳纤维纱线、玄武岩纱线和环氧树脂基体的抗拉强度。由于在拉伸过程中, 三个部分等位移变形, 有以下关系:

$$\sigma_c = E_c \epsilon, \sigma_b = E_b \epsilon, \sigma_m = E_m \epsilon \quad (7)$$

当拉伸载荷增加到碳纤维受力极限时, 即 $F = F_f$; $\sigma_c = \sigma_{cf}$; $\epsilon = \epsilon_{cf}$, 由式(5)和式(7)得:

$$\lambda_c \alpha_{ci} E_c + \lambda_b \alpha_{bi} E_b + \lambda_m E_m = \frac{E_c}{\sigma_{cf}} F_f \quad (8)$$

碳纤维断裂后, 玄武岩纤维和基体继续承载, 载荷达到玄武岩纤维极限时, 即 $F = F_f$, $\sigma_b = \sigma_{bf}$, $\epsilon = \epsilon_{bf}$, 则

$$\lambda_b \alpha_{bi} E_b + \lambda_m E_m = \frac{E_b}{\sigma_{bf}} F_f \quad (9)$$

由式(6)、式(8)和式(9)可以得到 HFRP 的临界混杂比(碳纤维含量)如下:

$$\begin{aligned} v_c^* &= \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \lambda_b} \\ &= \frac{(E_m \lambda_m - E_b \alpha_{bi} \lambda_m + E_b \alpha_{bi})(E_c \alpha_{cf} - E_b \sigma_{cf})}{E_b (1 - \lambda_m)(E_c \alpha_{ci} \sigma_{cf} - E_b \alpha_{bi} \sigma_{cf}) + E_c \sigma_{bf} \alpha_{bi}} \end{aligned} \quad (10)$$

当材料发生多次破坏时 ($v_c < v_c^*$), HFRP 抗拉强度(σ_H)为式(11); 当 $v_c = v_c^*$ 时, σ_H 为式(12)所示; 当材料发生一次破坏时 ($v_c > v_c^*$), σ_H 为式(13)所示。

$$\begin{aligned} \sigma_H &= \lambda_b \alpha_{bi} \sigma_{bf} + \lambda_m \sigma_{bf} \frac{E_m}{E_b} \\ &= \left[(1 - v_c)(\lambda_b + \lambda_c) \alpha_{bi} + \lambda_m \frac{E_m}{E_b} \right] \sigma_{bf} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sigma_H &= F_f = \frac{\lambda_c \alpha_{ci} E_c}{\sigma_{cf}} - \frac{E_b}{\sigma_{bf}} \\ &= \frac{v_c^* (\lambda_b + \lambda_c) \alpha_{ci} \sigma_{cf} E_c}{E_c \sigma_{bf} - E_b \sigma_{cf}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sigma_H &= \lambda_c \alpha_{ci} \sigma_{cf} + \lambda_b \alpha_{bi} \sigma_{cf} \frac{E_b}{E_c} + \lambda_m \sigma_{cf} \frac{E_m}{E_c} \\ &= \left[V_c (\lambda_c + \lambda_b) \alpha_{ci} + (1 - v_c) (\lambda_c + \lambda_b) \alpha_{bi} \frac{E_b}{E_c} + \lambda_m \frac{E_m}{E_c} \right] \sigma_{cf} \end{aligned} \quad (13)$$

该强度模型建立在以下假设之上: (1) 试样中

各部分在受拉过程中一直处于等应变的受力状态;
(2) 树脂对纤维浸润性良好, 界面完好; (3) 发生破坏前, 纤维和环氧树脂基体的应力与应变关系为线性。

3.2 强度预估结果

以混杂比为横坐标, 绘制试验所测强度与本模型预估强度对比曲线如图 5 所示。可见, 两种数据基本一致, 相应误差见表 5。抗拉强度曲线在临界混杂比处出现最小值, 是 HFRP 的破坏机制所决定的。

在本试验中, 试样 2 ($v_c = 16.43\%$)、试样 3 ($v_c = 19.73\%$) 拉伸试验的应力-应变曲线显示, 应力第一次急剧下降后, 有再次持续增加的现象, 这是材料发生多次破坏的表征, 断口破坏形貌见图 6。

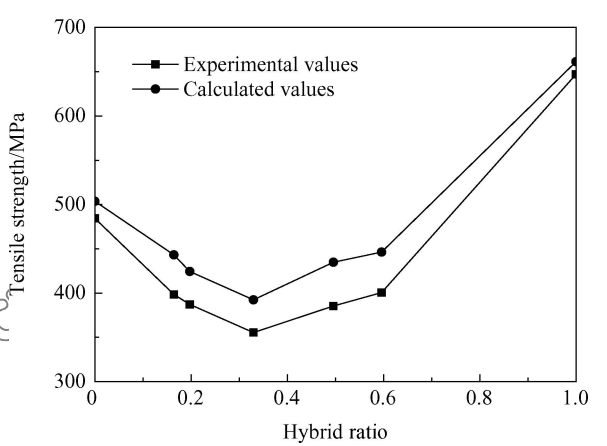


图 5 玄-碳纤维混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料抗拉强度试验值与计算值对比
Fig. 5 Comparison of experimental values and calculated values of tensile strength for carbon-basalt hybrid fiber plain fabric reinforced epoxy resin matrix composites

表 5 玄-碳纤维混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料弹性模量及抗拉强度计算误差
Table 5 Error rate of tensile modulus and tensile strength of carbon-basalt hybrid plain fabric fiber reinforced epoxy resin matrix composites specimens

Ply label	Tensile modulus/GPa			Tensile strength/MPa		
	Experimental	Calculated	Error/%	Experimental	Calculated	Error/%
P01	24.07	26.25	9.06	484.34	503.69	4.00
P02	26.64	29.76	11.71	398.46	443.09	11.20
P03	27.00	30.50	12.96	387.19	424.39	9.61
P04	30.20	34.00	12.58	355.35	392.40	10.43
P05	36.82	40.95	11.22	385.42	434.79	12.81
P06	41.49	44.12	6.34	400.61	446.31	11.41
P07	60.80	63.38	4.24	647.12	661.83	2.20

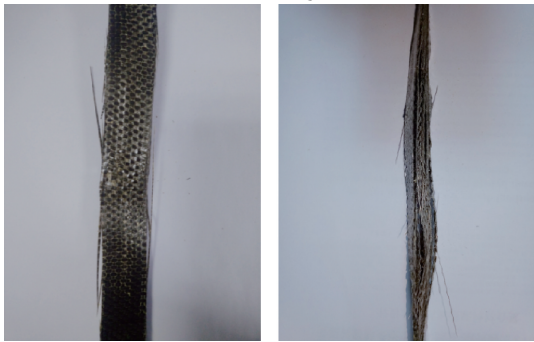


图 6 玄-碳纤维混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料试样在拉伸过程中多次破坏时宏观端口形貌
Fig. 6 Macroscopic appearance of fracture when carbon-basalt hybrid fiber plain fabric reinforced epoxy resin matrix composites specimens at multiple failure state

试样 4 ($v_c = 32.95\%$)、试样 5 ($v_c = 49.57\%$) 和试样 6 ($v_c = 59.59\%$) 的拉伸试验应力-应变曲线显示应力值仅发生一次急剧下降, 试验即结束。这是

材料仅发生一次破坏的表征, 断口破坏形貌见图 7。
平均树脂含量 $\lambda_m = 45.86\%$ 时, 按上述计算方法得到临界混杂 $v_c = 26.167\%$ 。显然, 这与试验结果相符。几种试样应力-应变曲线见图 8。

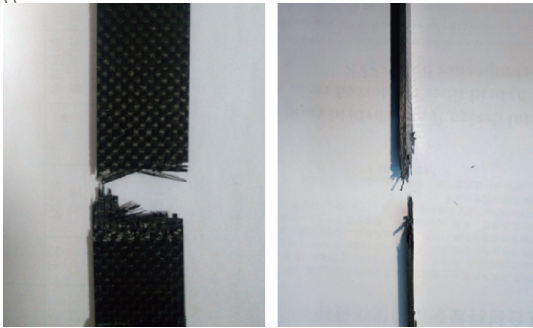


图 7 玄-碳混杂平纹织物增强树脂基复合材料试样在拉伸过程中一次破坏时宏观端口形貌
Fig. 7 Macroscopic appearance of fracture when carbon-basalt hybrid fiber plain fabric reinforced epoxy resin matrix composites specimens at single failure state

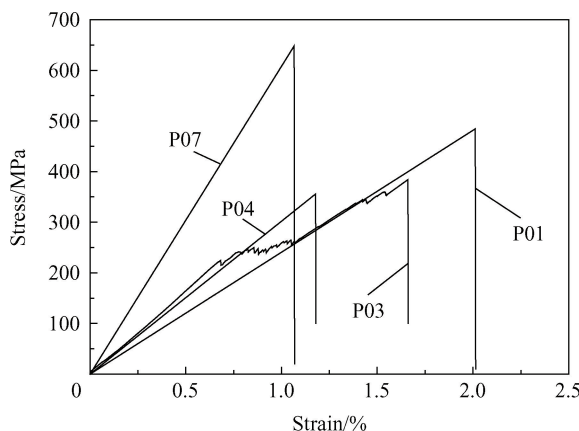


图8 玄武碳纤维混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料试样
拉伸试验应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of carbon-basalt hybrid fiber plain fabric
reinforced epoxy resin matrix composites specimens

4 结 论

(1) 本文所给出的以平纹织物为增强体的混杂纤维复合材料(HFRP)的刚度与强度预测模型可以准确预报材料性能, 计算值与试验值极为相符。碳纤维-玄武岩纤维(玄武碳纤维)混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料的刚度随着混杂比的增加会持续增加; 强度值则因破坏机制的改变而在临界混杂此处存在最小值。

(2) 根据本文提出的模型, 计算在树脂含量为45.86%时, HFRP不发生多次破坏的临界混杂比为26.167%。这与试验中试样的应力-应变曲线所显示的结果相符。

参考文献:

[1] 罗益峰, 罗晰旻. 世界高性能纤维及复合材料的最新发展与创新[J]. 纺织学报, 2015(5): 22-32.
LUO Yifeng, LUO Ximin. The latest development of high-performance fibers and composites in the world[J]. China Textile Leader, 2015(5): 22-32 (in Chinese).
[2] ZHANG Y, LI Y, MA H, et al. Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites[J]. Composites Science and Technology, 2013, 88(14): 172-177.
[3] KOTHA S P, CUZELSU N. Tensile behavior of cortical bone: Dependence of organic matrix material properties on bone mineral content[J]. Journal of Biomechanics, 2007, 40(1): 35-45.
[4] 李卫东, 曹海琳, 魏斌, 等. BF/CF层间混杂结构对复合材料性能影响[J]. 热固性树脂, 2009, 24(5): 39-43.

LI Weidong, CAO Hailin, WEI Bin, et al. Effect of CF/BF interlaminated hybrid structure on composite properties[J]. Thermosetting Resin, 2009, 24(5): 39-43 (in Chinese).
[5] 杨斌, 章继峰, 周利民. 玻璃纤维-碳纤维混杂增强PCBT复合材料层合板的制备及低速冲击性能[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 435-443.
YANG Bin, ZHANG Jifeng, ZHOU Limin. Preparation and low-velocity impact properties of glass fiber-carbon fiber hybrid reinforced PCBT composite laminate[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 435-443 (in Chinese).
[6] QU P, GUAN X J, JIA Y X, et al. Effective elastic properties and stress distribution of 2D biaxial nonorthogonally braided composite[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(8): 997-1008.
[7] VALENZA A, FIORE V, DI BELLA G. Effect of UD carbon on the specific mechanical properties of glass mat composites for marine applications[J]. Journal of Composite Materials, 2010, 44(11): 1350-1364.
[8] PEDRO J P, JOAQUIM A O, JOSE M, et al. Development of a pedestrian bridge with GFRP profiles and fiber reinforced self-compacting concrete deck [J]. Composite Structures, 2011, 93: 2969-2982.
[9] SORINA T G, SAFONOV A A, KHAIRETDINOY A K H. Peculiarities of using carbon glass-reinforced plastic in pultrusion composite profiles for bridge engineering[J]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2010, 39(1): 47-51.
[10] GURURAJA M N, HARI N. A review on recent applications and future prospects of hybrid composites[J]. International Journal of Soft Computing and Engineering, 2012, 1(6): 352-355.
[11] SUN X S, CHEN Y, TAN V B C, et al. Homogenization and stress analysis of multilayered composite offshore production risers[J]. Journal of Applied Mechanics, 2014, 81(3): 1-11.
[12] 徐欢欢, 古兴瑾, 李晨. 混杂纤维复合材料的拉伸刚度[J]. 复合材料学报, 2016, 33(2): 394-398.
XU Huanhuan, GU Xingjin, LI Chen. Tensile stiffness of hybrid fiber composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2016, 33(2): 394-398 (in Chinese).
[13] SWOLFS Y, GORBATIKH L, VERPOEST I. Fiber hybridisation in polymer composites: A review[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 67(12): 181-200.
[14] 张普, 朱虹, 孟少平, 等. CFRP/BFRP混杂效应试验研究和理论分析[J]. 工业建筑, 2011, 41(3): 103-107.
ZHANG Pu, ZHU Hong, MENG Shaoping, et al. Theoretical analysis and test research on hybrid effect of CFRP/BFRP

- hybrid fiber[J]. Industrial Construction, 2011, 41(3): 103-107 (in Chinese).
- [15] 田跃飞,蔡江勇,王淑琴. 混杂 FRP 复合材料混杂效应的计算[J/OL]. 中国科技论文在线(2009-04-22)[2015-03-06]. <http://www.paper.edu.cn>.
TIAN Yuefei, CAI Jiangyong, WANG Shuqin. Calculation of hybrid effect of hybrid FRP composite materials[J/OL]. China Science-Paper Online (2009-04-22) [2015-03-06]. <http://www.paper.edu.cn> (in Chinese).
- [16] 陈汝训. 混杂纤维复合材料受拉构件的最优混杂比研究[J]. 固体火箭技术, 2005, 28(3): 219-221.
CHEN Ruxun. Study on optimal hybrid ratio of hybrid fiber composite tension member[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2005, 28(3): 219-221 (in Chinese).
- [17] 张小东,王耀杰,邓宗才. 混杂纤维片材拉伸性能研究[J]. 国防交通工程与技术, 2010, 8(1): 21-25.
ZHANG Xiaodong, WANG Yaolie, DENG Zongcai. An experimental study of the tensile properties of IHFRP[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2010, 8(1): 21-25 (in Chinese).
- [18] 范赋群,曾庆敦,黄小清. 复合材料的统计断裂理论[J]. 力学与实践, 2000, 22(2): 1-5.
FAN Fuqun, ZENG Qingdun, HUANG Xiaoqing. Probabilistic fracture theories for composites[J]. Mechanics in Engineering, 2000, 22(2): 1-5 (in Chinese).
- [19] 魏广恒. 基于变分原理的机织复合材料细观力学模型[D]. 天津工业大学, 2006.
WEI Guangheng. The micro-mechanics model of the woven fabric composite based on variational principle[D]. Tianjin Ploytechnic University, 2006 (in Chinese).
- [20] 中华人民共和国国家标准化管理委员会. 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法: GB/T 3354—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for tensile properties of orientation fiber reinforced polymer matrix composite materials: GB/T 3354—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015 (in Chinese).