

文章编号: 1673-3851 (2015) 02-0169-05

# 玄武岩、玻纤、丙纶机织复合材料的拉伸性能研究

刘双双<sup>a</sup>, 田伟<sup>b</sup>, 王洁瑜<sup>a</sup>, 胡丹峰<sup>a</sup>, 祝成炎<sup>a,b</sup>

(浙江理工大学, a. 现代纺织加工技术国家工程技术研究中心; b. 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 杭州 310018)

**摘要:**以玄武岩纤维、玻璃纤维为增强纤维,丙纶为基体纤维,采用包缠技术制备复合线,织造不同纤维混杂比例的平纹预制件及三维预制件,直接热压成型制备纤维增强复合材料,研究纤维混杂比例及预制件结构对复合材料拉伸性能的影响。结果表明:随着玻璃纤维体积分含量的增加,平纹组织复合材料的纬向抗拉强度先增大后减小,断裂伸长率逐渐减小,弹性模量逐渐增大,当玻纤含量在51%~59%之间时,复合材料力学性能相对最好;三维预制件复合材料中,4层角联锁结构的力学性能较4层准正交结构好,较4层正交结构差,多层预制件复合的复合材料,其力学性能好于相同层数的三维预制件复合材料。

**关键词:**玄武岩纤维; 玻璃纤维; 丙纶; 三维机织物; 复合材料; 拉伸性能

**中图分类号:** TB332      **文献标志码:** A

## 0 引言

热塑性纤维增强复合材料由于具有较好的机械性能,能满足各种实际应用对材料性能的要求,成为目前研究的热点<sup>[1]</sup>。对于实际应用的纤维增强复合材料,力学性能是评价其产品质量的重要指标,因此也成为国内外学者研究的主要方向。其中,对玻璃纤维增强复合材料的制备和性能研究较多,取得了较大地进展<sup>[2-4]</sup>,对玄武岩纤维及其复合材料的研究相对滞后,但仍有一定的研究成果<sup>[5-6]</sup>。随着三维织物织造技术的发展,三维机织复合材料也随之发展起来,而且以其优异的性能迅速成为人们关注的焦点,相关研究同样取得了重大进展<sup>[7-11]</sup>。本文在已有研究成果的基础上,选择玄武岩纤维和玻璃纤维

为增强纤维,以发挥两者的性能优势和协同作用;选择丙纶为基体纤维,采用包缠技术制备复合线,织造不同纤维混杂比例的平纹预制件;不同组织结构的三维预制件,直接热压成型制备纤维增强复合材料。研究纤维混杂比例及预制件结构对复合材料拉伸性能的影响,为拓宽玄武岩、玻纤、丙纶机织复合材料的应用奠定技术基础。

## 1 实验

### 1.1 实验原料与仪器

实验原料:玄武岩纤维(浙江石金玄武岩纤维有限公司提供);玻璃纤维(杭州泰克斯复合材料有限公司提供);丙纶(绍兴超特合纤有限公司提供),原料规格及性能如表1所示。

表1 实验原料规格及性能

原料	细度/tex	密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	熔点 / $^{\circ}\text{C}$	断裂强度 ( $\text{cN} \cdot \text{dtex}^{-1}$ )	断裂 伸长率/%	弹性模量 ( $\text{cN} \cdot \text{dtex}^{-1}$ )
玄武岩纤维	693	3.00	1450	3.23	13.33	229.50
玻璃纤维	490、640、 710、850	2.54	680	3.65、3.86、 3.94、4.27	15.00、18.33、 16.67、18.33	195.84、199.84、 223.38、225.42
丙纶	100	0.91	166	2.87	46.17	159.12

收稿日期: 2014-06-27

基金项目: 科技部国家国际科技合作专项项目(2011DFB51570); 浙江理工大学研究生科研创新项目(11110032661206); “纺织科学与工程”浙江省重中之重一级学科优秀研究生学位论文培育基金项目(11110031211202/005/093)

作者简介: 刘双双(1990-),女,吉林松原人,硕士研究生,主要从事纤维增强复合材料制备及力学性能方面的研究。

通信作者: 祝成炎, E-mail: cyzhu@zstu.edu.cn

实验仪器:HKV151B 型花式捻线机(浙江精工科技股份有限公司);ASL2000-20-E 自动织样机(天津市隆达机电科技发展有限公司);XLB25-D 型平板硫化机(浙江双力集团湖州星力橡胶机械制造有限公司);INSTRON 3367 电子万能材料测试仪(INSTRON)。

1.2 实验方法

1.2.1 包缠复合线的制备

分别将玄武岩纤维、玻璃纤维与丙纶纤维无捻并

合,再用丙纶包覆形成具有混杂效果的包缠复合线,一方面使得复合线中具有较高比例的基体丙纶,保证热压过程中熔融的丙纶充分包覆增强纤维;另一方面克服单一纤维的缺陷,实现纤维之间的优势互补。包缠复合线的组合设计及体积比例如表 2 所示。

1.2.2 机织预制件的织造

1.2.2.1 平纹预制件的织造

在自动织样机上织造经密 100 根/10 cm、纬密 60 根/10 cm 的平纹组织预制件,经纬纱线组合如表 3 所示。

表 2 复合线纱线组合及体积比例

序号	芯纱组合	外包纱线	复合线线密度/tex	体积比例
1	693 tex 玄武岩+100 tex 丙纶	100 tex 丙纶	916	$V(\text{玄武岩}):V(\text{丙纶})=51:49$
2	490 tex 玻纤+100 tex 丙纶	100 tex 丙纶	700	$V(\text{玻纤}):V(\text{丙纶})=46:54$
3	640 tex 玻纤+100 tex 丙纶	100 tex 丙纶	860	$V(\text{玻纤}):V(\text{丙纶})=51:49$
4	710 tex 玻纤+100 tex 丙纶	100 tex 丙纶	920	$V(\text{玻纤}):V(\text{丙纶})=55:45$
5	850 tex 玻纤+100 tex 丙纶	100 tex 丙纶	1060	$V(\text{玻纤}):V(\text{丙纶})=59:41$

表 3 经纬纱线组合

序号	经纱	纬纱	织物组织
1	916 tex 玄武岩/丙纶包缠复合线	700 tex 玻纤/丙纶包缠复合线	平纹
2	916 tex 玄武岩/丙纶包缠复合线	860 tex 玻纤/丙纶包缠复合线	平纹
3	916 tex 玄武岩/丙纶包缠复合线	920 tex 玻纤/丙纶包缠复合线	平纹
4	916 tex 玄武岩/丙纶包缠复合线	1060 tex 玻纤/丙纶包缠复合线	平纹

1.2.2.2 三维机织预制件的织造

三维机织物的结构设计一般可根据织物的厚度要求预选经纬纱层数,然后确定各层经纬纱与垂纱的交织规律,画出织物的结构示意图,再根据结构示意图画出织物组织图,然后得到上机图,进行织造。本实验分别设计 2 层角连锁、4 层角连锁、4 层正交、4 层准正交等三维机织物,其经向结构示意图如图 1 所示。采用自动织样机,以 916 tex 玄武岩/丙纶包缠复合线为经纱,860 tex 玻璃纤维/丙纶包缠复合线为纬纱,织造经密 100 根/10 cm、纬密 200 根/10 cm 的三维机织预制件。

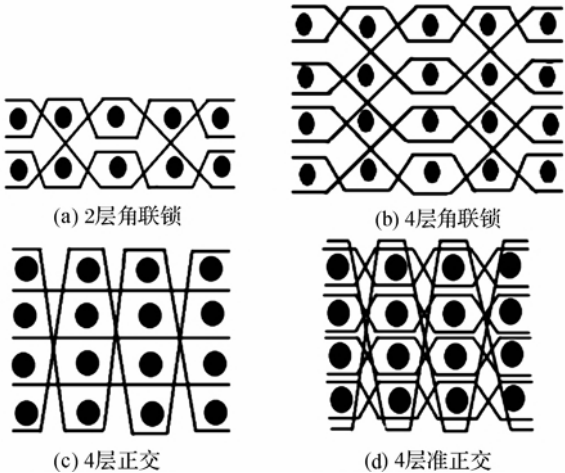


图 1 三维预制件的经向结构

1.2.3 复合材料的制备

参考相关文献资料<sup>[12]</sup>,确定模压参数,采用直接热压成型工艺制备复合材料。将预制件放入课题组自主设计的加工模具中,放入平板硫化机热压成型。温度由室温升至 220℃,同时加预压力 2 MPa,防止熔融丙纶皱缩引起织物变形,施加保压压力 5 MPa,经过 45 min 恒温保压,然后加循环水冷却至室温,制得所需复合材料。

1.2.4 复合材料拉伸性能测试

采用 INSTRON 3367 电子万能材料测试仪对复合材料进行拉伸性能测试,拉伸方法参照 GB/T 1446—2005《纤维增强塑料试验方法总则》和 GB/T 1447—2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》进行操作。拉伸试样如图 2 所示,试样尺寸如表 4 所示。测试条件:拉伸速度 50 mm/min,温度(20±2)℃,相对湿度(65±10)%。

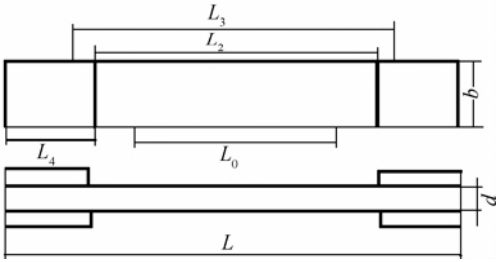


图 2 复合材料板材拉伸试样

表 4 试样尺寸

符号	名称	长度/mm
$L$	试样总长度	250
$L_0$	试样标距	$100\pm0.5$
$L_2$	端部加强片间距离	$150\pm5$
$L_3$	夹具间距离	$110\pm5$
$L_4$	端部加强片长度	50
$b$	试样宽度	$25\pm0.5$
$d$	试样厚度	1~5

注:复合材料拉伸试样由切割机切割可得,试样厚度  $d$  由厚度仪测试而得,每组试样的厚度值以 5 次实际测试值的平均值为准。

2 结果与讨论

2.1 纤维混杂比例对复合材料拉伸性能的影响

由于复合材料中经纱组分保持不变,只改变纬纱组分比例,因此,本实验测试了复合材料的纬向拉伸性能指标。图 3 所示为不同玻纤体积含量下复合材料纬向抗拉强度与断裂伸长率的关系图。

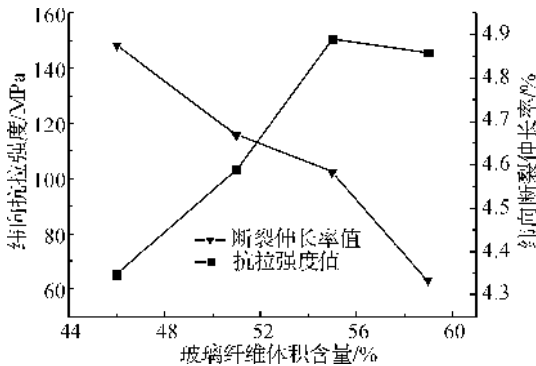


图 3 复合材料纬向拉伸性能与玻璃纤维体积分量的关系

从图 3 中可以看出,随着纬向玻璃纤维体积分量的增加,丙纶体积分量的减少,复合材料纬向抗拉强度呈现先增大后减小的趋势,当玻璃纤维体积分量达到约 55%左右时,纬向抗拉强度达到最大值。复合材料纬向断裂伸长率则随着玻纤体积分量的增加逐渐减小。分析其原因可知,当玻璃纤维体积分量小于 55%时,丙纶的体积分量相对较多,基体丙纶能较好浸润组织结构和充分包覆增强纤维,复合材料的成型质量相对较好,此时,复合材料的抗拉强度主要取决于增强纤维本身的力学性能,因此,随着玻璃纤维体积分量的提高,复合材料的抗拉强度随之增大,断裂伸长率逐渐减小,力学性能逐渐增强;而当玻璃纤维体积分量超过 55%时,丙纶的体积分量降低到一定程度,基体不能完整包覆和浸润增强纤维,导致部分增强纤维呈现游离状态,基体丙纶对增强体的包覆支撑作用减弱,增强纤维之间的抱合力相对较小,能承受的最大载荷变小,因此,当玻

纤维含量超过 55%时,复合材料的力学性能有所下降。

弹性模量主要反映复合材料抵抗弹性变形的能力,是体现复合材料力学性能的另一重要指标。图 4 所示为不同玻纤体积分量下复合材料弹性模量的变化趋势。

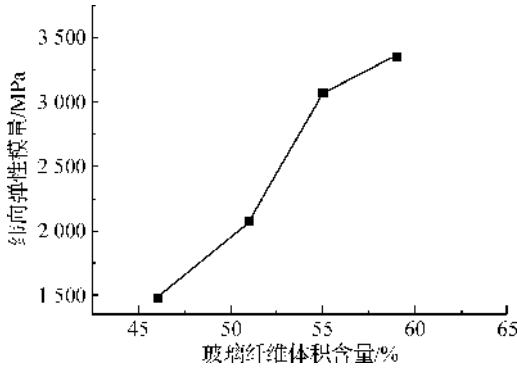


图 4 复合材料纬向弹性模量与玻璃纤维体积分量的关系

从图 4 中可以看出,随着玻璃纤维体积分量的增加,复合材料的纬向弹性模量呈现逐渐上升的趋势,并且在玻璃纤维体积分量超过 50%时上升较快,超过 55%之后上升较为缓慢。说明增强纤维的力学性能对复合材料弹性模量的影响起主要作用,随着玻璃纤维体积分量的增加,丙纶含量也不至于过少,复合材料成型良好,质地较硬,抗弹性变形能力增强,因而弹性模量逐渐增大。根据回归方程和拟合曲线可以得到曲线的顶点,即弹性模量达到最大值的点。分析得出,在玻璃纤维体积分量约为 80%时,复合材料纬向弹性模量达到最大,此时,如果再增加玻璃纤维的含量,复合材料的纬向弹性模量反而会下降。这是由于随着玻璃纤维含量的持续增加,丙纶含量相对过少,玻璃纤维呈现游离状态,不能被丙纶充分包覆和浸润,因此复合材料成型效果会比较差,质地相对较软,容易变形,弹性模量就会随之下降。

2.2 预制件结构对复合材料拉伸性能的影响

表 5 和表 6 所示为相同经纬纱组分,不同预制件结构所制复合材料的拉伸性能测试结果。

表 5 不同预制件结构复合材料纬向拉伸结果

预制件结构	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/MPa
平纹(4 层复合)	99.94	4.69	2 519.00
4 层正交	81.35	5.87	2 164.00
4 层准正交	73.35	15.10	1 027.00
4 层角联锁	77.34	8.23	1 483.00
2 层角联锁(2 层复合)	105.94	7.50	1 844.00

从表5中可以看出,4层三维预制件复合材料中,4层正交结构的纬向抗拉强度和弹性模量较大,断裂伸长率较小,力学性能相对最好,4层角联锁次之,4层准正交结构相对较差。分析其原因可知,4层正交结构的特点是纱线弯曲少,多呈平直状态排列,不存在层间剥离问题,其结构的整体性较好,预制件也相对较薄,基体丙纶熔融后容易浸润织物内部层间结构,包覆增强纤维,有利于增强三维正交结构复合材料的力学性能。而角联锁结构织物的纱线有相对较多的屈曲,其预制件相对比较厚,而柔曲性能相对较好,丙纶熔融后在短时间内不容易完全渗透到组织结构内部,对纤维包覆性相对较差,因此,角联锁结构的复合材料的力学性能稍差。4层准正交结构的特点是纱线部分呈平直状态排列,部分呈弯曲状态,整体性较正交结构差,制品厚度又小于角联锁结构,结构内部丙纶浸润和包覆效果相对较差,因此力学性能较差。此外,多层预制件复合制得的复合材料,其力学性能均优于单层三维织物制成的复合材料,且多层三维织物复合所得复合材料的力学性能要优于多层平纹组织复合材料。

表6 不同预制件结构复合材料经向拉伸结果

预制件结构	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/MPa
平纹(4层复合)	96.30	10.13	1368.00
4层正交	54.68	18.64	705.00
4层准正交	62.34	5.38	1398.00
4层角联锁	45.15	10.05	1051.00
2层角联锁(2层复合)	77.68	9.46	970.00

对比表5和表6可知,不同预制件结构复合材料经向拉伸力学性能指标的变化趋势与纬向基本相似,尤其是复合材料的抗拉强度值。但是,相同预制件结构的复合材料,其纬向的力学性能均优于经向的力学性能。这是因为对于所有预制件,特别是三维预制件,其经线排列并未有太大改变,只是由于不同的织物结构,经纱的屈曲程度和状态不同,对复合材料的力学性能的影响较纬纱方向相对较小;而纬纱方向,由于不同的织物结构,尤其是三维立体织物,大大提高了织物厚度方向上的纬纱密度,其玻璃纤维含量和丙纶含量都大幅度增加,因此纤维束的增加和更多丙纶的包覆明显提高了复合材料纬向的力学性能。

### 3 结 论

本文以玄武岩纤维、玻璃纤维为增强纤维,丙纶

为基体纤维,采用包缠技术制备包缠复合线,以相同线密度的玄武岩/丙纶包缠复合线为经纱,不同纤维混杂比例的玻璃纤维/丙纶包缠复合线为纬纱,制织平纹组织预制件,再以相同线密度的两种包缠复合线分别为经纬纱,织造三维机织预制件,采用统一的模压参数直接热压成型制备丙纶基纤维增强复合材料,对所得复合材料进行拉伸性能测试,研究纤维混杂比例及预制件结构对复合材料拉伸性能的影响。研究结果如下:

a) 保持经纱组分不变,改变平纹预制件的纬纱组分比例,随着复合材料中玻璃纤维体积分含量的增加,复合材料的纬向抗拉强度呈现先增大后减小的趋势,当玻璃纤维体积分含量约为55%左右时,纬向抗拉强度达到最大值。复合材料的纬向断裂伸长率随着玻纤量的增加则逐渐减小,纬向弹性模量逐渐增大,但不会随着玻纤含量的持续增加而持续增大。

b) 当玻璃纤维体积分含量在51%~59%之间时,复合材料的纬向抗拉强度和弹性模量均较大,此时复合材料的力学性能相对最好。

c) 保持经纬纱组分不变,三维预制件复合材料中,4层角联锁结构的纬向抗拉强度略小于4层正交结构,但略大于4层准正交结构。多层预制件复合制得的复合材料,其纬向力学性能均优于相同层数的三维织物制成的复合材料。

d) 不同预制件结构复合材料的经向拉伸性能其变化趋势与纬向基本相似,但经向的力学性能均较纬向的力学性能差。

### 参考文献:

- [1] 章亚东,段跃新,左璐,等. 经编织物法制备连续增强热塑性复合材料的微观形貌和浸润过程分析[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 63-69.
- [2] 叶飞,田伟,冯兆行,等. 玻璃纤维/涤纶混杂热塑性机织复合材料的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2011, 32(11): 28-32.
- [3] 刘晓烨,戴干策. 麻纤维/玻璃纤维混杂增强聚丙烯复合材料的性能研究[J]. 塑料工业, 2007, 35(6): 35-38.
- [4] 张荫楠,王春红,马崇启. 苧麻纤维/玻璃纤维混杂增强聚丙烯树脂基复合材料的制备与力学性能分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(S1): 63-67.
- [5] 胡显奇,罗益锋,申屠年. 玄武岩连续纤维及其复合材料[J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27(2): 1-5.
- [6] 邱菊生,钟智丽,石磊,等. 纤维组分比例对玄武岩/聚丙烯复合材料的力学性能影响研究[J]. 天津工业大学学报, 2010, 29(1): 23-26.

- [7] 黄学峰, 张立泉, 朱梦蝶, 等. 三维机织复合材料力学性能分析与研究[J]. 玻璃纤维, 2011(3): 13-17.
- [8] 祝成炎, 高祯云, 朱俊萍. 组合式 3D 机织物复合材料的拉伸性能[J]. 纺织学报, 2005, 26(5): 14-19.
- [9] 田 伟, 祝成炎. 玻璃纤维/丙纶混杂 3D 机织物及其复合材料的研制[J]. 产业用纺织品, 2003, 21(12): 6-9.
- [10] 王 静, 祝成炎. 玻/涤混杂 3D 机织复合材料拉伸性能的研究[J]. 材料工程, 2007(S1): 179-183.
- [11] 雷忆三, 陈 佳, 张瑞刚, 等. 3D 纤维增强复合材料的结构对力学性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2010, 27(5): 37-41.
- [12] 刘双双, 田 伟, 胡丹峰, 等. 丙纶基纤维增强复合材料的成型工艺探讨[J]. 浙江理工大学学报, 2014, 31(6): 631-635.

## Study on Tensile Properties of BF/GF/PP Woven Composites

LIU Shuang-shuang<sup>a</sup>, TIAN Wei<sup>b</sup>, WANG Jie-yu<sup>a</sup>, HU Dan-feng<sup>a</sup>, ZHU Cheng-yan<sup>a,b</sup>

(a. Modern Textile Processing Technology National Engineering Research Center;

b. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** By using basalt fiber and glass fiber as the reinforced fibers, and polypropylene fiber as the matrix fiber, wrapping technology was adopted to prepare composite yarns to make tabby preformed unit and 3D preformed unit with different proportions of fibers. Fiber reinforced composites were prepared directly through hot press molding. Effects of different fiber components and structure of preformed units on tensile properties of composites were studied. Results show that the zonal tensile strength of the plain composites increases first then decreases with the rise in volume content of glass fiber; elongation at break declines gradually; elasticity modulus increases gradually. When the volume content of glass fiber is between 51% and 59%, mechanical properties of composites reaches the best. Among 3D composites, the tensile property of 4-layer angle interlock structure is better than that of 4-layer quasi-orthogonal structure and worse than that of 4-layer orthogonal structure. The multilayered composites have much better tensile properties than 3D woven composites with the same layers.

**Key words:** basalt fiber; glass fiber; polypropylene; 3D woven fabrics; composites; tensile properties

(责任编辑: 张祖尧)