

玄武岩/玻纤/丙纶复合材料的研制及其结构和性能

刘双双^a, 田伟^b, 祝成炎^a

(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,通过线形设计、预制件结构设计、直接热压成型工艺研制出一种玄武岩/玻纤/丙纶结构复合材料。观察并分析其结构可知:成型过程中,基体丙纶熔融后浸入组织内部包覆增强纤维,增强纤维则保证织物组织在复合材料中完整无缺,尤其纬纱满足复合材料在厚度上的要求。对制得的复合材料进行拉伸性能测试,结果显示:三维正交组织结构与三维角联锁组织结构复合材料相比,前者的弹性模量和抗拉强度均小于后者,拉伸应变大于后者。

关键词:玄武岩/丙纶;玻纤/丙纶;三维机织物;复合材料;结构;拉伸性能

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A

0 引言

随着科技的不断发展,纤维增强复合材料作为新型材料工业已呈现一种持续发展的趋势,特别是热塑性混纤复合材料、三维纺织结构复合材料等,成为树脂基复合材料研究的热点。三维复合材料中没有“层”的问题,可以克服普通复合材料受力后容易分层的缺点,不但能大幅度地提高复合材料的强度和刚度,而且具有良好的抗损坏性与抗冲击性^[1-2]。三维机织物增强是一种非常有效的增强形式^[3],其以轻质、抗分层、构件可设计性强、整体化结构好等特点得到了人们的青睐^[4-5]。

国内外学者一直致力于热塑性纤维增强复合材料、三维纺织结构复合材料的结构和性能研究,并取得了重大突破和进展^[6-8]。本文借鉴已有的研究成果,以玄武岩纤维、玻璃纤维为增强纤维,以聚丙烯纤维(简称丙纶)为基体纤维,采用包缠的方式将三种纤维结合,发挥三者协同效应,实现纤维之间优势互补,在普通织机上织造不同结构的三维机织物,采

用模压成型工艺研制热塑性纤维混杂三维增强复合材料,观察并分析复合材料的成型和结构,对制得的复合材料进行拉伸性能测试,分析复合材料的拉伸性能,为制备热塑性纤维混杂三维纺织结构复合材料提供一定参考。

1 原料选择

玄武岩纤维以天然玄武岩为原料,来源广泛、成本低,且在正常生产加工过程中几乎无污染^[9],其性能类似于碳纤维和玻璃纤维。玻璃纤维性能优良,价格低廉,不仅是纤维增强复合塑料(FRP)^[10]的主要增强材料,也是所有复合材料的最佳增强材料。丙纶纤维有熔点低,加工工艺简单,耐化学腐蚀,热变形温度高等特点,适宜作为热塑性复合材料的基体材料。本文为研制结构和性能较好的三维机织结构复合材料,选择玄武岩纤维、无碱玻璃纤维、聚丙烯纤维为原料,将三者相结合,以发挥协同效应,实现纤维之间的优势互补。其原料规格及性能如表1所示。

收稿日期: 2014-04-10

基金项目: 国家科技部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

表1 原料规格及性能

原料	线密度 /tex	密度 /(g·cm ⁻³)	熔点 /℃	断裂强度 /(cN· dtex ⁻¹)	断裂伸 长率/%
玄武岩纤维	600	3.00	1450	3.45	15.00
玻璃纤维	850	2.54	680	4.27	18.33
丙纶(绿)	100	0.91	166	2.24	46.11
丙纶(黑)	110	0.91	166	2.97	49.17

注:纤维由多股单丝并合而成。

2 玄武岩/丙纶、玻纤/丙纶复合线的制备

丙纶基三维机织结构复合材料的成型原理:丙纶长丝为热塑性高分子材料,熔点低,受热后熔化,熔融的丙纶利用其流变特性浸入织物组织的层间,将织物组织中的增强纤维包覆,温度降低后,熔融的丙纶又会凝固,最终形成复合材料板材。因此,为得到结构和性能较好的复合材料,增强纤维与基体纤维的线型设计要考虑以下几个因素:首先要保证织物组织中具有较高比例的基体纤维,热压过程中能够充分浸润增强纤维;其次要充分发挥增强纤维在结构中的增强作用,保证复合材料具有较好的力学性能;最后要保证所制复合线在织造和后续加工中的可织性,基体纤维能够有效地保护增强纤维。

增强用纤维与其他纤维混杂复合,可采用并合、加捻、包缠和网络等方法中的一种或者几种来完成,以达到不同纱线组合的要求。本文以玄武岩纤维、玻璃纤维为增强纤维,以丙纶为基体纤维,为满足上述因素的要求,采用并合和包缠的方法,利用HKV151B型花式捻线机进行复合线的组合加工。制成的复合线组合以及体积比如表2所示。

表2 包缠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	600 tex 玄武岩+ 110 tex 丙纶	100 tex 丙纶	835	V(玄武岩): V(丙纶) =44:56
2	850 tex 玻纤+ 110 tex 丙纶	100 tex 丙纶	1095	V(玻纤): V(丙纶) =57:43

如图1所示,玻璃纤维、玄武岩纤维长丝束分别与丙纶长丝并合、包覆。其形成过程是:呈伸直状态的玻璃纤维、玄武岩纤维长丝束分别与绿色丙纶长丝并合,并由呈螺旋形分布的黑色丙纶长丝在其外部包覆形成稳定的纱线结构。这种纱线结构一方面

使基体丙纶能够充分地保护增强纤维,满足立体织物的制织要求,另一方面使所得织物中含有较高比例的丙纶,使所得织物可采用直接热压成型工艺制备丙纶基玻璃纤维/玄武岩纤维增强复合材料。

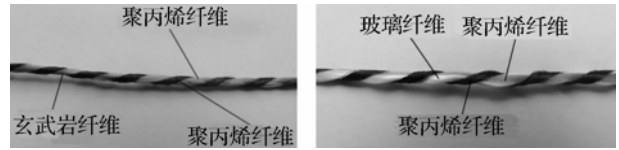


图1 包缠复合线成品试样

3 玄武岩/玻纤/丙纶三维机织物的设计和织造

三维机织物的结构形式主要有正交结构、角联锁结构、准正交结构等。三维正交结构最突出的特点是纱线弯曲少、多呈平直状态排列、纤维强力损伤小,并且不存在层间剥离问题,可用于生产各种形状性能优良的结构体;而三维角联锁结构织物由于纱线有屈曲,所以其预制件有较好的柔曲性能,变形能力较强,较适合用来加工柔性复合材料或用于形成具有复杂曲面形状的刚性复合材料等。因此,本文选用三维正交和三维角联锁两种基本结构。其经向结构示意图如图2和图3所示。

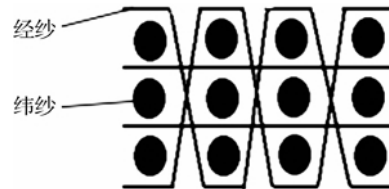


图2 三维正交组织结构示意

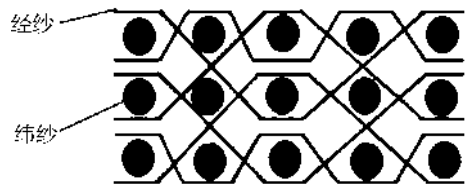


图3 三维角联锁组织结构示意

三维机织物的结构设计一般可以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的交织规律,绘出织物的结构示意图,并根据织物的结构示意图画出织物组织图,然后得到上机图。本文以所制玄武岩/丙纶包缠复合线为经纱,玻璃纤维/丙纶包缠复合线为纬纱,经纬纱层数选择3层,在ASL2000-20-E自动织样机上织造三维纺织预制件。根据经向结构图绘出组织图,得到上机图如图4、图5所示。

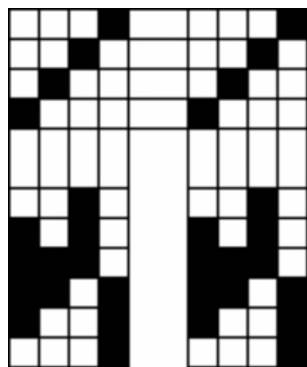


图 4 3D 正交 3 层组织上机图

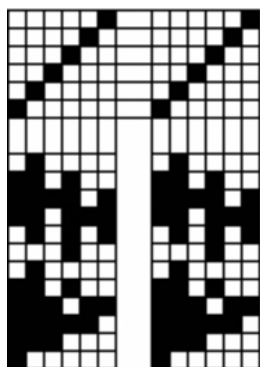


图 5 3D 角联锁 3 层组织上机图

4 丙纶基纤维混杂三维增强复合材料的成型

由于丙纶属于热熔性纤维,因此本文所得三维预制件只需热压处理即可成型。本文所用丙纶的熔点在 $165\sim 170^{\circ}\text{C}$,参考相关文献^[11]中复合材料模压成型工艺参数,确定多种实验方案,进行多次成型实验,对比复合材料的成型表面和截面结构,确定了模压参数:模压压力 5 MPa,模压时间 30 min,模压温度 180°C 。将每种预制件置于 XLB25-L 平板硫化

机的加工模具中,温度由室温升至 180°C (此温度大于丙纶熔点,保证丙纶熔融并浸入玻璃纤维和玄武岩纤维,同时保证熔融的丙纶无过量溢出,并且此工艺下的复合材料表面平整,成型良好),施加模压 5 MPa,经过 30 min 恒温热压,然后加循环水冷却到室温,即可制得所需复合材料。其工艺流程如图 6 所示。

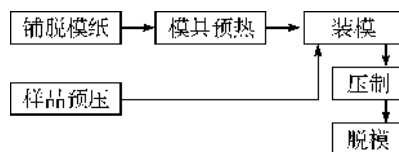


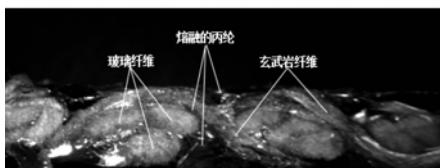
图 6 复合材料模压成型工艺流程

5 复合材料结构观察与分析

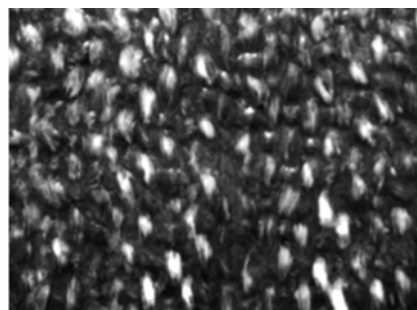
图 7(a)、(c)为三层正交组织复合材料表面形貌及横截面结构,图 7(b)、(d)为三层角联锁组织复合材料表面形貌及横截面结构。图 7 可以看出,温度 180°C ,压力 5 MPa 的条件下,熔融的基体丙纶能够浸润到织物的层间结构,包覆增强纤维,冷却凝固后形成复合材料板材,而增强纤维未发生变化,作为经纬纱线,使织物组织在复合材料中结构完整,因此成型的复合材料板中,织物组织仍清晰可见,与织物组织经向结构示意图保持一致,但由于模压压力的作用,纤维之间距离变小,形成挤压,纤维束变扁。经纱玄武岩纤维在织物组织中屈曲,纬纱玻璃纤维在织物组织中起到增加织物厚度的作用,两者结合共同控制复合材料板材的厚度。三层角联锁组织复合材料的厚度较三层正交组织复合材料大,且熔融的丙纶在角联锁组织内部的浸渍相对完全,空隙少,因此复合材料板材的成型效果好。



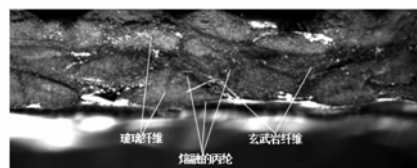
(a) 正交组织表面形貌



(c) 正交组织横截面



(b) 角联锁组织表面形貌

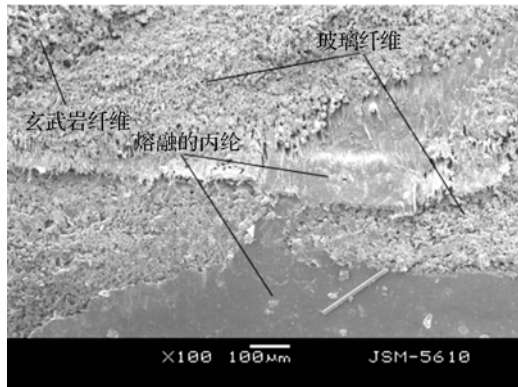


(d) 角联锁组织横截面

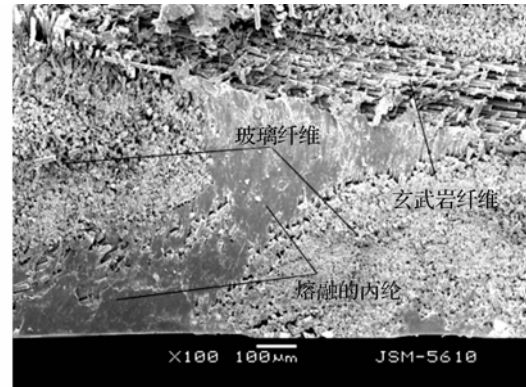
图 7 复合材料的表面和截面

图8(a)、(b)分别为三层正交组织和三层角联锁组织结构中丙纶的浸润和包覆情况。图8可以看出,在此工艺条件下,熔融的丙纶在压力作用下流动,逐渐浸润到织物的层间,填充纤维束之间的空间,对增强纤维形成紧密的包覆,已经浸润的纤维束形成连续相。纤维束也在压力

作用下发生变形,形成挤压,有利于纤维束内部的气体排出,减少孔隙,在一定程度上改善了复合材料的成型和结构。因此,熔融丙纶的浸润质量和包覆增强纤维的紧密程度决定了复合材料最终的结构和性能,这也是优化复合材料成型工艺的参考指标。



(a) 正交组织



(b) 角联锁组织

图8 复合材料内部熔融丙纶的浸润情况

6 复合材料的拉伸性能

采用 INSTRON 3367 电子万能材料测试仪对所制复合材料进行拉伸测试,以获得复合材料的拉伸性能指标,判断所制复合材料性能的优劣。复合材料的拉伸方法参照 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。测试条件为:拉伸速度 10 mm/min,温度 20℃,相对湿度 65%。测试结果如表3所示。

表3 复合材料的拉伸测试指标比较

织物结构	弹性模量/GPa	最大抗拉强度/MPa	拉伸应变/%
3D 正交 3 层	0.34	48.57	17.67
3D 角联锁 3 层	1.66	52.63	8.00

从表3中可以看出,在经纬纱线相同的情况下,三维正交组织结构与三维角联锁组织结构复合材料相比,前者的弹性模量和最大抗拉强度均小于后者,拉伸应变大于后者。分析其原因:三维正交结构最突出的特点是纱线弯曲少、纤维强力损伤小,不存在层间剥离问题。由于三维正交结构的整体性较好,纱线屈曲相对较少,熔融的丙纶不易渗入内部层间结构,导致复合材料浸润性能相对较差,因此不利于发挥三维正交结构复合材料的拉伸性能;而三维角联锁结构,由于纱线屈曲相对较多,其预制件有较好的柔曲性能,变形能力较强,熔融丙纶易于渗透到结构内部,对层间结构形成

包覆固结,使得复合材料成型过程中浸润性能相对较好,因此可以显著改善复合材料的拉伸性能。

7 结 语

以玄武岩纤维、玻璃纤维为增强纤维,以丙纶为基体纤维,采用包缠的方式预制玄武岩/丙纶复合线,玻璃纤维/丙纶复合线,既可以克服单一纤维的缺点,发挥协同效应,又可以保护增强纤维,避免织造和后续加工过程中的纤维损失,提高纱线可织性。以前者为经纱,后者为纬纱,设计正交、角联锁等三维机织组织,以满足复合材料在厚度上的要求。利用基体丙纶熔点低的特性,采用直接热压成型工艺,复合材料成型过程中,基体丙纶熔融浸入组织层间结构,而增强纤维则保证织物组织在复合材料中结构完整,清晰可见,尤其是纬纱,保证了复合材料在厚度上的要求。熔融丙纶的浸润质量和包覆增强纤维的紧密程度决定了复合材料最终的结构和性能,因此对复合材料成型工艺的优化时加以参考。对比两种组织的复合材料,发现三维角联锁组织复合材料比三维正交的厚度大,且其丙纶的浸润效果更好,同时具有相对较好的拉伸性能,充分发挥了增强纤维与基体纤维的抗拉性能。

综上所述,本文所研制的玄武岩/玻纤/丙纶复合材料,成型结构良好、力学性能优越、工艺过程简单且成本较低,在新型绿色产业用复合材料领域具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 任淮辉, 李旭东, 刘德学, 等. 三维复合材料微结构的力学响应分析[J]. 兰州理工大学学报, 2008(2): 1-5.
- [2] 杨 英. 飞机用三维复合材料结构的研究[J]. 飞航导弹, 2007(2): 59-64.
- [3] 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): 13-15.
- [4] 唐鑫余. 三维机织结构在织造过程中的理论与实践[J]. 玻璃纤维, 2004(1): 20-23.
- [5] 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(1): 179-183.
- [6] 吕丽华, 魏春艳, 赵 欣, 等. 智能三维机织玄武岩纤维复合材料的制备[J]. 棉纺织技术, 2011, 39(9): 552-554.
- [7] 张明星, 胡 红. 三维多重结构增强玄武岩复合材料的力学性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(1): 77-81.
- [8] 马雷雷, 田 伟, 冯兆行, 等. 三维纺织复合材料准静态拉伸实验的有限元模拟[J]. 浙江理工大学学报, 2010, 27(3): 383-386.
- [9] 刘 馨. 玄武岩纤维: 高性能纤维后起之秀[J]. 新材料产业, 2012(3): 67-70.
- [10] 危良才. 玻璃纤维是复合材料的最佳增强材料[J]. 纤维复合材料, 2009, 53(8): 53-56.
- [11] 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.

Manufacture of BF/GF/PP Composites and the Structure and Performance

LIU Shuang-shuang^a, TIAN Wei^b, ZHU Cheng-yan^a

(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: This paper develops a fiber hybrid reinforced composite with basalt fiber and glass fiber as reinforced fiber and polypropylene as base fiber. The process includes design of yarn form, prefabricated member structure and molding process, etc. Basing on the observation and analysis of composite's structure, it can be obtained that the melt polypropylene immerses in the fabric and the reinforced fibers ensure the fabric structure in the composite intact. Especially the weft yarn meets the thickness requirement of composites. This paper also tests the tensile properties of the 3D angle interlock and orthogonal composites. Results show that the former has better modulus of elasticity and tensile strength, and the latter has better tensile strain.

Key words: BF/PP; GF/PP; 3D woven fabrics; composites; structure; tensile properties

(责任编辑: 张祖尧)