

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.04.008

接结纱经向间距对 EP/CFSF 复合材料性能的影响

张鹏飞^{1,2}, 寇开昌¹

(1. 西北工业大学理学院, 西安 710129; 2. 陕西出入境检验检疫局, 西安 710068)

摘要: 基于不同接结纱经向间距的设计, 研究了不同接结纱经向间距对环氧树脂 (EP)/ 碳纤维间隔织物 (CFSF) 复合材料的力学性能、电学性能的影响规律, 结合扫描电子显微镜, 分析经向间距对复合材料性能的影响机制。结果表明, 随着接结纱经向间距的增加, EP/CFSF 复合材料的冲击强度和弯曲强度减小, 韧性减弱, 电阻率增大。当接结纱经向间距为 4 mm 时, 复合材料具有较佳的综合性能, 其冲击强度为 13.5 kJ/m², 弯曲强度为 121.30 MPa, 导电性能最好, 电阻率为 0.077 Ω·m。

关键词: 碳纤维; 环氧树脂; 接结纱经向间距; 力学性能; 电学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)04-0039-05

Influence of Binder Yarn Warp Direction Distance on Properties of EP/CFSF Composites

Zhang Pengfei^{1,2}, Kou Kaichang¹

(1. School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Shaanxi Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Xi'an 710068, China)

Abstract: Based on the design of different binder yarn warp direction distance, the mechanical properties, electrical properties and microstructure of epoxy resin/CFSF composites were studied by the means of changing the distance of warp direction. Meanwhile, combined with scanning electron microscope, the influence mechanism of the warp direction distance on the performance of the composite was analyzed. The results show that the impact strength and bending strength of epoxy resin/CFSF composites decrease with the increasing of warp direction distance, however, the resistivity increases. It is found that epoxy resin/CFSF composites have better physical performance at the warp direction distance about 4 mm. Herein, the impact strength and bending strength of are 13.5 kJ/m² and 121.30 MPa respectively, the resistivity is 0.077 Ω·m.

Key words: carbon fiber; epoxy resin; binder yarn warp direction distance; mechanical property; electrical property

碳纤维是一种具有超高强度、超高模量和优良耐腐蚀性的新型纤维材料。它的含碳量在 95% 以上, 是由片状的石墨微晶沿纤维轴向堆砌而成^[1-3]。碳纤维不仅具有碳材料固有的本征特性, 同时又具有一定的柔性, 可以作为纺织纤维进行加工。利用碳纤维的可纺织性能, 结合聚合物材料的成型性, 制备的复合材料可用于多种工业用途。以碳纤维作为增强材料的树脂基复合材料在航空、航天、体育器械、医疗器材等诸多领域已经得到广泛的应用^[4-12]。

环氧树脂 (EP) 具有优异的浸润性和粘接性, 其固化物具有较好的耐酸性、耐碱性和力学性能, 是热固性树脂基复合材料的重要基体材料之一^[13-16]。目前, 碳纤维增强树脂基复合材料在制备时常采用模压法将碳纤维以纤维状态分散在树脂基内, 此种方法增加了复合材料的成型时间, 且碳纤维在树脂基内不容易均匀分散。因而, 通过碳纤维间隔织物

(CFSF) 设计, 不仅可以解决碳纤维在树脂内不容易均匀分散, 还可以利用二者性能上的优势拓展两种材料的应用领域。笔者采用二维织机织造了具有三维立体结构的 CFSF, 并以 CFSF 为增强体, 通过浸渍 EP 制备 EP/CFSF 复合材料, 分别从力学性能、电学性能等角度, 分析 CFSF 的接结纱经向间距对 EP/CFSF 复合材料性能的影响规律, 并阐明经向间距对复合材料性能的影响机制, 为碳纤维增强树脂基复合材料的应用提供理论参考依据, 并为其性能提供评判标准。

1 实验部分

1.1 原材料

碳纤维: 6K, 东莞市碳索复合材料有限公司;

联系人: 张鹏飞, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为纤维增强复合材料制备及性能

收稿日期: 2017-01-17

EP: JD-919, 湖南嘉盛德材料科技有限公司;

甲基六氢邻苯二甲酸酐: 北京百灵威科技有限公司;

丙酮: 四川西陇化工有限公司。

1.2 仪器及设备

半自动小样织机: SGA598 型, 江阴市通源纺机有限公司;

摆锤冲击试验机: BC-50 型, 深圳市新三思材料检测有限公司;

微机控制电子万能试验机: CMT6303 型, 深圳市新三思计量技术有限公司;

动态热机械分析 (DMA) 仪: 242C 型, 德国 Netzsch 公司;

场发射扫描电子显微镜: Quanta-450-FEG 型, 美国 FEI 公司。

1.3 CFSF 的制备

(1) CFSF 的织造原理。

机织间隔织物生产中, 通过控制综框的运动来使一定数量的经纱在间隔织物的两个表面之间上下运动, 从而使间隔纱线连接两个表面层^[7]。图 1 所示为 CFSF 截面图, 在上下两层织物之间采用经纱连接, 连接经纱与上下层面之间采用“W”型固结。织造过程中, 开始接结纱 I、接结纱 II 分别与上、下层的经纱运动规律一致, 完成一个小循环后, 两根接结纱同时上下换层, 接结纱 I、接结纱 II 分别与下、上层的经纱运动规律一致。接结纱是在上下换层时产生, 当接结纱换层时, 用现有的 4 mm 模具来控制接结纱的送经量, 使得每次接结纱在上下两层织物间隔中高度相同。

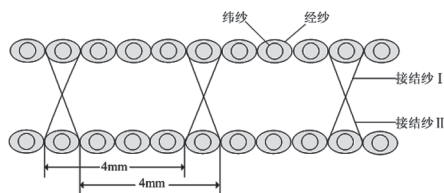


图 1 CFSF 截面图

(2) CFSF 的织造。

在织造 CFSF 之前, 首先对接结纱的经向间距进行不同的方案设计, 织造出五种 CFSF, 具体如表 1 所示。

在织造 CFSF 之前, 必须进行织造上机图的设计, 具体如图 2 所示。根据模具的规格尺寸, 织物幅宽采用 15 cm × 15 cm。织造采用地经与结接经比

表 1 CFSF 的织造方案设计

方案	接结纱经向间距 / mm	接结纱间纤维根数 / 根
a	4	2
b	8	4
c	12	6
d	16	8
e	20	10

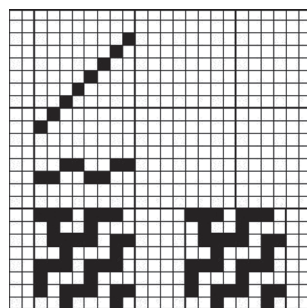


图 2 CFSF 上机图

值均为 6 : 2; 经过计算后, 取边纱 : 地经 : 接结经的值为 12 : 72 : 24; 穿综顺序为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 其中 1, 2 综穿接结经纱, 实验选择 15 号钢筘, 每箱 2 入进行织造。

1.4 EP/CFSF 复合材料的制备

首先, 将 EP 和固化剂甲基六氢邻苯二甲酸酐以 5 : 4 的质量比调制成胶液, 同时加入质量分数为 20% 的稀释剂丙酮, 搅拌均匀以备待用。然后将 CFSF 放入到自制的方形模具里, 将调好的胶液浇注进模具中。采用真空泵除去已浇注的模具空气, 并预先在常温固化 24 h。最后, 经 80℃ / 2 h + 100℃ / 4 h + 140℃ / 4 h 固化, 并在 160℃ 保温 4 h, 制得 EP/CFSF 复合材料。

1.5 性能测试

断面形貌采用场发射扫描电子显微镜进行分析;

冲击强度按 GB/T 1843-2008 测试;

弯曲强度按 GB/T 1449-2005 测试;

动态力学性能采用 DMA 仪通过三点弯曲模式测试, 频率为 1 Hz, 升温速率为 5℃ / min, 比例因子为 1.3, 最大动态力为 2 N, 振幅为 30 m, 温度范围 30 ~ 300℃;

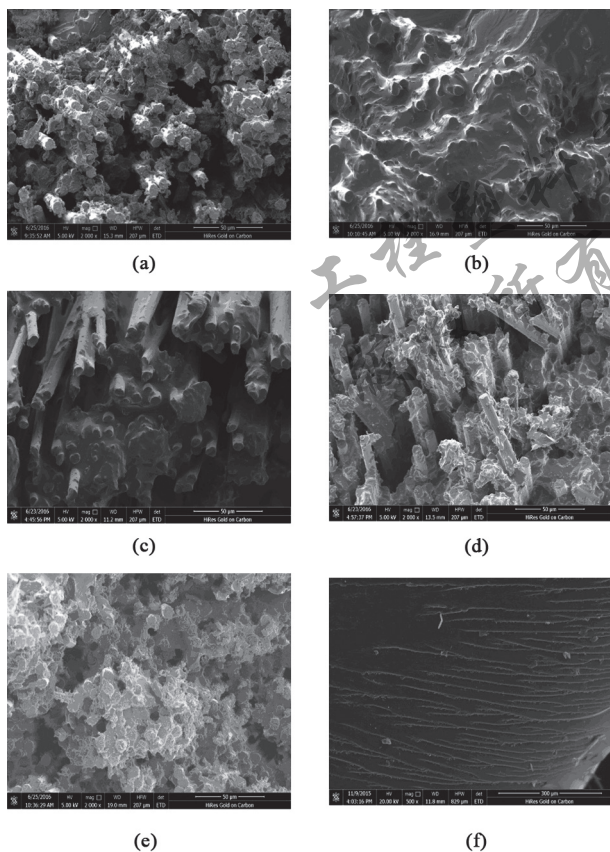
体积电阻率按 GB/T 15662-1995 测定。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的断面形貌

图 3 为纯 EP 剂不同接结纱径向间距条件下 EP/CFSF 复合材料冲击断面形貌。从图 3a 可以看出, 复合材料断面凸凹不平, 并有大量孔洞存在,

同时在断口处存在大量的 CFSF 经向纤维,且其均匀分布在 EP 中,可以认为该断裂机制为韧性断裂。因此,可以推测出经向纤维与树脂基体相容性较好,从而使复合材料具有较强的吸收冲击能的能力,具有较好的力学性能。从图 3b 可以发现,纤维已经完全浸入到树脂中,且断裂截面的表面较为光滑,同时表面孔洞减少。当接结纱经向间距为 12 mm 和 16 mm 时,在断裂截面处有纤维丝存在,同时有孔洞出现,如图 3c 和图 3d 所示。从图 3e 可以看出,当接结纱经向间距为 20 mm 时,难以发现径向纤维丝存在于断口截面处。图 3f 为纯 EP 的冲击断面形貌,可以看出断裂面均匀,且为河流状,表明其为脆性断裂。从图 3 可以看出, CFSF 经向纤维的引入可以显著改善 EP 的断裂机制,同时提高 EP 的力学性能,使得该复合材料力学性能增强。



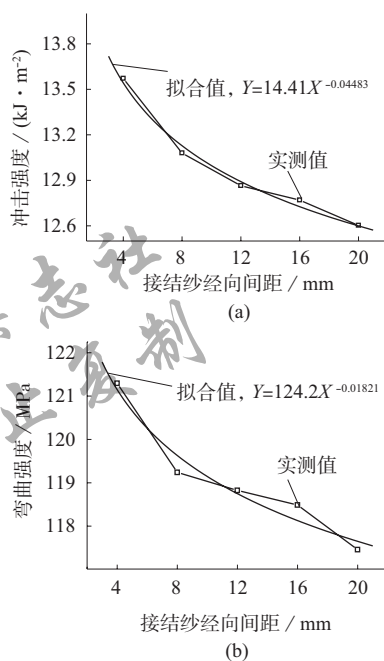
a~e—EP/CFSF 复合材料,经向间距分别为 4,8,12,16,20 mm;
f—纯 EP

图 3 纯 EP 及不同接结纱经向间距时复合材料的冲击断面形貌

2.2 复合材料的静态力学性能

静态力学性能研究主要考察接结纱经向间距对 EP/CFSF 复合材料冲击强度和弯曲强度的影响,具体测试结果见图 4。从图 4 可以看出,随着接结纱经向间距的增大,复合材料的冲击强度、弯曲强

度均呈递减趋势;经过曲线拟合,发现接结纱经向间距越小,EP/CFSF 复合材料的冲击强度和弯曲强度越大。当接结纱经向间距为 4 mm 时,复合材料的冲击强度达到最大值 13.5 kJ/m²,弯曲强度达到最大值 121.30 MPa。这是因为经向间距越小,接结纱密度越大,与间隔织物面板间形成的交织点也就越多,在复合材料受到应力作用时,间隔织物所能承担的应力也就越大,从而更好地保护树脂基体不被破坏。



a—冲击强度; b—弯曲强度

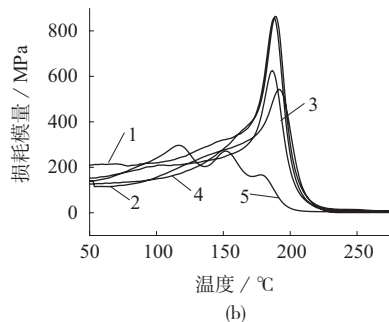
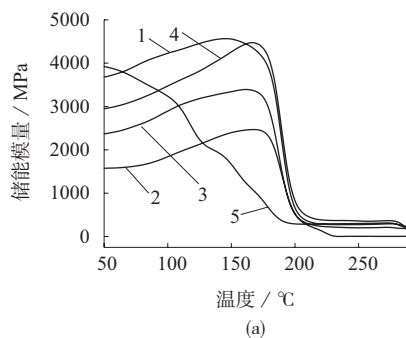
图 4 不同接结纱经向间距时复合材料的力学性能

2.3 复合材料的动态力学性能

图 5 为不同接结纱经向间距时 EP/CFSF 复合材料的动态力学性能。从图 5a 可以看出,50~150℃ 范围随温度的升高复合材料的储能模量呈现逐渐升高趋势;当接结纱经向间距为 4 mm 时,复合材料的储能模量最高,说明在接结纱经向间距为 4 mm 时整个体系的刚性占主导地位。从图 5b 可以看到,当接结纱经向间距为 4 mm 时,复合材料损耗模量最大值。由于损耗模量反映了材料的韧性,说明此时复合材料的韧性达到最大。结合图 5a 和图 5b,可以推测出当接结纱经向间距为 4 mm 时 EP/CFSF 复合材料的韧性以及强度更优,这与静态力学性能测试结果一致。

2.4 复合材料的电学性能

图 6 示出不同接结纱经向间距时 EP/CFSF 复合材料的体积电阻率。从图 6 可以看出,随着接结



接结纱经向间距: 1—4 mm; 2—8 mm; 3—12 mm;
4—16 mm; 5—20 mm
a—储能模量; b—损耗模量

图5 不同接结纱经向间距时复合材料的动态力学性能

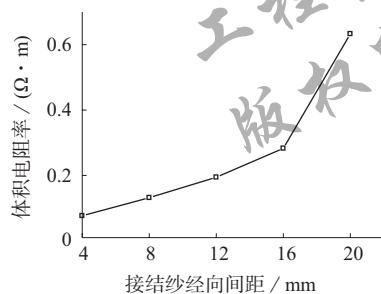


图6 不同接结纱经向间距时复合材料的体积电阻率

纱经向间距的增大,复合材料的电阻率增大,且递增速率急剧增加。这主要是因为加入 CFSF 后,碳纤维在树脂基体内部形成紧密的导电通路,而且接结纱经向间距越小,导电网络通路越密集,电流通过时所受的阻碍越小,电阻率越小。尤其当接结纱经向间距为 4 mm 时,EP/CFSF 复合材料的电阻率最小为 $0.077 \Omega \cdot m$,显著低于经向间距为 20 mm 的时的电阻率。

3 结论

(1) 随着接结纱经向间距的增大,复合材料的冲击强度、弯曲强度均呈递减趋势。当接结纱经向间距为 4 mm 时,复合材料的冲击强度和弯曲强度达到最大。

(2) 随着温度的升高,不同经向间距接结纱的复合材料储能模量也发生变化,当接结纱经向间距为 4 mm 时,复合材料橡胶态区域的储能模量最高。

(3) 复合材料的体积电阻率随着接结纱经向间距的增大而增大,这是由于当加入的 CFSF 的接结纱密度越小,导电网络通路越稀疏,电阻率增加速率越来越快。

参考文献

- [1] 李雅静. 碳纤维生产技术标准特点分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2016, 36(6): 33-35.
Li Yajing. Analysis on standard characteristics of carbon fabric production technology[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2016, 36(6): 33-35.
- [2] 佚名. 碳纤维在航空航天领域应用进展分析[EB/OL]. [2014-02-11]. 中国商务部官网.
Anon. Analysis on application progress of carbon fiber in aerospace[EB/OL]. [2014-02-11]. <http://ccn.mofcom.gov.cn/spbg/show.php?id=10773>.
- [3] 贺福. 碳纤维及其应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
He Fu. Carbon fiber and its application technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [4] Arjmand M, Apperley T, Okoniewski M, et al. Comparative study of electromagnetic interference shielding properties of injection molded versus compression molded multi-walled carbon nanotube/polystyrene composites[J]. Carbon, 2012, 50(14): 5126-5134.
- [5] Awad W H, Beyer G, Benderly D, et al. Material properties of nanoclay PVC composites[J]. Polymer, 2009, 50(8): 1857-1867.
- [6] Caamano C, Grady B, Resasco D E. Influence of nanotube characteristics on electrical and thermal properties of MWCNT/polyamide 6,6 composites prepared by melt mixing[J]. Carbon, 2012, 50(10): 3694-3707.
- [7] Wang J W, Wu M, Li Y H, et al. Preparation of expanded graphite/poly(phenylene sulfide) composites with high thermal and electrical conductivity by rotating solid-state premixing and melt processing[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(5): 1932-1939.
- [8] Besco S, Modesti M, Lorenzetti A, et al. Effect of modified clay on the morphology and electric properties of PC/ABS-MWCNT composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 124(5): 3617-3625.
- [9] Yoo T H, Kim M, Park O O, et al. Effect of gamma-ray MWCNTs on electrical conductivity of a PET/graphite composite[J]. Materials Letters, 2012, 67(1): 219-221.
- [10] Hong M S, Choi W K, An K H, et al. Electro-magnetic interference shielding behaviors of carbon fibers-reinforced polypropylene matrix composites: II. Effects of filler length

- control[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(5):3 901-3 904.
- [11] Nascimento J F, Ezquerro T A, Seferis J C. Anisotropy of electrical conductivity and structure in polymer-carbon fiber composite materials[J]. Polymer Composites, 1995, 16(2):109-113.
- [12] Linares S A, Ibarra R L. Influence of the nature and the content of carbon fiber on properties of thermoplastic polyurethane-carbon fiber composite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 90(10):2 676-2 683.
- [13] 陈平. 环氧树脂及其应用 [M]. 大连: 化学工业出版社, 2002.
Chen Ping. Epoxy resin and its applications[M]. Dalian: Chemical Industry Press, 2002.
- [14] 陈平, 刘胜平. 环氧树脂 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1999:215-244.
Chen Ping, Liu Shengping. Epoxy resins[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1999:215-244.
- [15] 益小苏. 复合导电高分子材料的功能原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004:17-37.
Yi Xiaosu. Functional principle of composite conductive polymer materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004:17-37.
- [16] 张富衫, 张威. 环氧树脂的应用与发展 [J]. 辽宁化工, 1993(3):13-17.
Zhang Fushan, Zhang Wei. Application and development of epoxy resins[J]. Liaoning Chemical Industry, 1993(3):13-17.
- [17] 孙云娟, 贾立霞, 李瑞洲, 等. 间隔织物面层组织对其增强板材性能的影响 [J]. 产业用纺织品, 2012, 12(19):24-26.
Sun Yunjuan, Jia Lixia, Li Ruizhou, et al. Effects of spacer fabric's panel weaves on the properties of spacer fabric composites[J]. Technical Textiles, 2012, 12(19):24-26.

投稿须知

1 稿件内容

稿件应注重科学性、实用性及时效性,要求技术新颖,论点明确,论据可靠,数据准确,文字通顺、简练。稿件内容必须真实,避免抄袭,请作者文责自负。引用他人成果时,请按《著作权法》有关规定说明出处。内容应未曾发表过或被其他出版物刊载过,且无一稿多投。

2 稿件要求

凡属于重大科技获奖的论文和重点项目资助的论文,请在来稿第一页注明名称及批准号,本刊将优先刊登。

(1) 题目、作者署名及单位。题目力求简明、醒目,反映出文章的主题,一般不超过 20 个汉字。作者姓名在题目下按序排列,不同工作单位的作者,应在姓名右上角加注阿拉伯数字序号。作者单位须写全称并注明省份、城市和邮政编码。联系人信息(包括姓名,学历或职称,主要研究方向)注在第一页下方。

(2) 摘要及关键词。论文需要同时提供中文和英文摘要,摘要以提供论文的内容梗概为目的,不加评论和补充解释,应简明、确切地论述研究目的、原理和结论,具有相对独立性。中文和英文摘要均要求采用报道性摘要类型。具体要求:中英文摘要均为一段式,内容比较具体,一般需要列举关键数据。中英文摘要内容基本一致,中文摘要以 200~300 字为宜,英文摘要可略详。关键词要求 3~8 个。

(3) 正文。正文各部分都应简洁明了。层次标题一律用阿拉伯数字连续编号,尽量减少层次;不同层次的数字之间用小圆点相隔,末位数字不加标点符号。如“1”,“1.1”等。文中量、单位及符号的使用应符合国际标准和国家标准。

(4) 图表。图表要设计合理,简单自明。每一幅图都应有图序和简短确切的图名,横纵坐标均要注明物理量及其单位,线条图要用矢量格式的图,或将 *.opg, *.dwg, *.eps 等格式的图打包压缩随投稿一起上传。表格请使用三线表,每一表格都应有表序和简短确切的表题。图表标题一律用中文表达。

(5) 参考文献。以作者亲自阅读过的主要原始文献为限,不可引用非公开出版或发表的文献,不能引用其他文章中引用的但未经核对原文的文献,要注意引用最新的文献。参考文献要有一定的数量,研究性论文至少 16 篇。参考文献的著录按文章中引用的顺序依次排列,中文参考文献要有对照英文部分(英文部分不编号)。无论中外文的作者,一律采用姓前名后的形式著录;作者不超过 3 人时可全部著录,超过 3 人时,只著录前 3 位,其后加“等”或“et al”。综述类论文的参考文献著录项目适当简化,可参见本刊相关栏目文章样式。作者对所引文献的准确性和完整性负责。

3 投稿方式

请作者登陆“工程塑料网”(http://www.epa1973.com),进入杂志社之页,点击“网上投稿”后投稿。来稿请注明详细地址、电话、邮箱等信息,便于通知联系。一般一个月左右可以查询稿件审理意见,超过 3 个月未收到修改意见或回复的可自行处理。

4 注意事项

为适应我国信息化建设需要,扩大学术交流渠道,本刊已编入国内外著名数据库。稿件一经录用,将同时被数据库收录,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意收录,请在投稿时声明,否则将视为同意。