

3D 纤维增强复合材料的结构对力学性能的影响

雷忆三, 陈佳, 张瑞刚, 王富强, 闫丽丽

(中国电子科技集团公司第 33 研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 研究了树脂基镀镍碳纤维 3D 复合材料的不同结构, 包括三维五向、正交三向结构对 3D 复合材料拉伸性能和冲击性能的影响。进行了两种试件力学性能的测定, 结果表明, 三维五向 3D 复合材料和正交三向 3D 复合材料都能达到高的力学性能, 在纤维体积含量相近的情况下, 三维五向 3D 复合材料的拉伸强度和冲击强度较正交三向 3D 复合材料高, 拉伸强度可达 920 MPa、冲击强度达 150 KJ/m²。通过对编织结构的设计, 可以设计 3D 复合材料的性能。

关键词: 3D 复合材料; 三维五向; 正交三向; 力学性能

中图分类号: V 258 文献标识码: A

3D 复合材料是一种先进的结构复合材料。3D 复合材料是首先将增强纤维织造成三维整体织物, 再和基体(包括树脂、碳、碳化硅、金属等)复合, 从而制成复合材料制品, 所以在 3D 复合材料制品中没有“层”的问题, 可以克服以往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伤性与抗冲击性。利用高强度纤维(如碳纤维, 凯夫拉纤维等)制成的 3D 复合材料, 重量仅为钢材的 20%—30%, 而力学性能比钢更为优异, 该种材料是当前先进材料的前沿研究领域之一^[1-2]。

3D 织造技术在工艺上的突出特点是具有编织异形整体织物的能力, 即能够按照零件的形状和尺寸大小直接编织出复合材料零件的预制品。这是因为, 一方面 3D 织物在编织过程中其基本结构单元立方体能够随零件的形状和尺寸的变化而改变长、宽、高的比例^[3-4]; 另一方面织造工艺极为灵活可以任意变化以适应不同织物形状的要求, 实现直接整体编织。3D 编织工艺的这些特点对复合材料的设计、制造及产品质量都十分有利, 从而使 3D 复合材料具有优于其它复合材料的独特风格。

收稿日期: 2012-03-20

基金项目: 总装预研基金资助项目(9140A31030110JB3403)

作者简介: 雷忆三, 1965 年生, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电磁防护材料与技术的研究工作。

通讯联系人: 陈佳, 1984 年生, 女, 硕士, 助工, 主要从事电磁防护材料研究工作。E-mail: chenjia1154@163.com

本文研究了树脂基镀镍碳纤维 3D 复合材料的不同结构, 包括三维五向、正交三向结构对 3D 复合材料拉伸性能和冲击性能的影响, 通过对两种试件拉伸性能和冲击性能的测定, 得出在相近的纤维体积含量下, 三维五向 3D 复合材料和正交三向 3D 复合材料都能达到高的力学性能, 且三维五向 3D 复合材料的拉伸强度和冲击强度较正交三向 3D 复合材料的高。

1 材料制备

试件共分二类: 三维五向结构和正交三向结构镀镍碳纤维树脂基复合材料。两种 3D 复合材料制品所用的纤维均为 12 K 的 T300 碳纤维。图 1 为两种 3D 复合材料编织体纱线交织结构, 图 2 为两种 3D 复合材料编织体结构形态示意图。

复合材料试件制备流程见图 3。

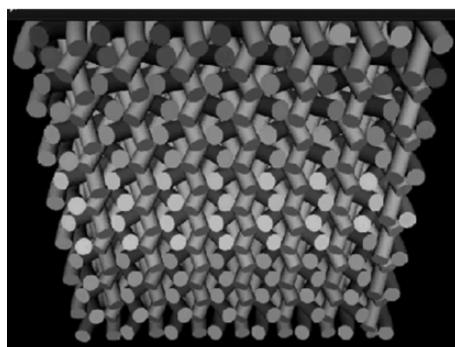
2 力学性能的测定

2.1 试片的形状与尺寸

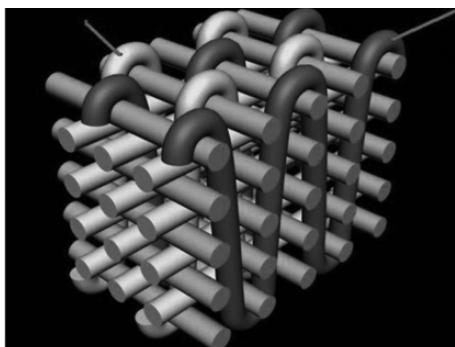
试样拉伸性能测定参考中国国家标准 GB/T 1447—2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方

法》,试片的形状为长方体,总长为 250 mm,厚度 4 mm,宽度 25 mm,夹具间距离 170 mm。所

测试试件实际外形尺寸为测量工作段内任意三处的宽度和厚度,取其算术平均值。

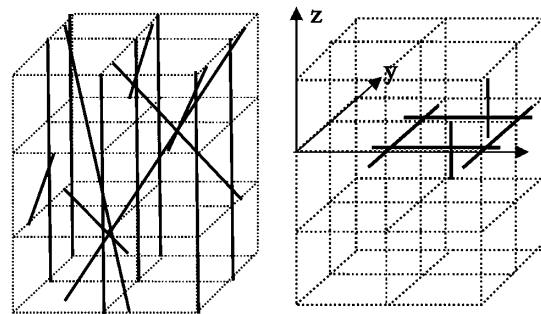


(a) 三维五向编织体内部纱线交织结构



(b) 正交三向编织体内部纱线交织结构

图 1 两种 3D 复合材料编织体纱线交织结构



(a) 三维五向织体结构示意图 (b) 正交三向织体结构示意图

图 2 两种 3D 复合材料编织体结构形态

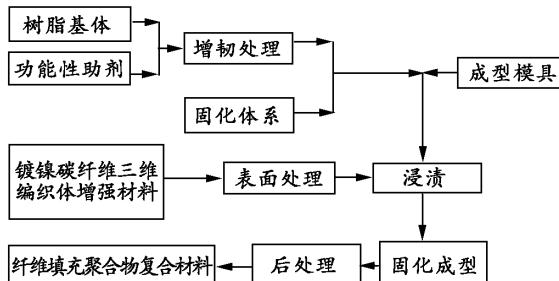


图 3 纤维填充聚合物复合材料制备工艺流程

试样冲击强度测定根据 GB/T1043.1—2008《塑料 简支梁冲击性能测定》,试片的形状为长方体,总长度为 80 mm,厚度为 4—5 mm,宽度为 10 mm,跨距 62 mm。

2.2 试验条件

为保证试件拉伸时钳口处不首先破坏,在试件的两端分别粘贴 2 mm 厚的加强片。拉伸试验在微机控制电子万能试验机 WDW-100 上进行,加载速度为 2 mm/min,环境温度为 18 °C,相对湿度为 18%。

冲击试验采用半自动冲击试验机 JB - 300B,环境温度为 18 °C,相对湿度为 18%。复合材料试件参数见表 1。

表 1 复合材料试件参数

试件种类	纤维含量 体积分数 /%	试样 个数	加载 方式
三维五向 3D 复合材料	53.6	10	纵向
正交三向 3D 复合材料	53.0	10	

3 结果与分析

3.1 两种试件的拉伸性能

表 2 给出了三维五向 3D 复合材料和正交三向 3D 复合材料两种试件拉伸性能的测试结果(平均值),图 4 为两种试件拉伸载荷一位移曲线。图 5 给出了两种试件拉伸破坏断口形貌。

表 2 各组试件拉伸性能数据(平均值)

试件种类	最大载荷	强度	断裂伸长率
	/kN	/MPa	/%
三维五向 3D 复合材料	92	920	5.65
正交三向 3D 复合材料	82	820	4.89

由表 2 可见在纤维体积含量基本相同的情况下,试件结构类别不同所对应的拉伸强度有所不同。三维五向织体结构和正交三向织体结构的复合材料都能达到较高的拉伸强度,且三维五向织体结构对应的拉伸强度稍高于正交三向织体结构复合材料,达到 920 MPa。通过纤维体结构的改变可使三维增强复合材料的力学性能发

生变化, 这充分体现了 3D 增强复合材料在力学性能方面的可设计性。

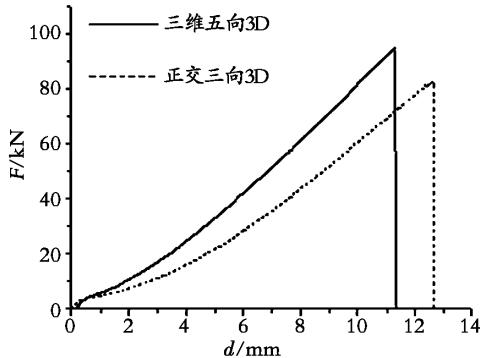
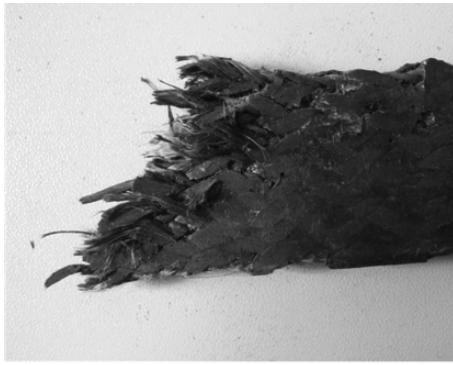
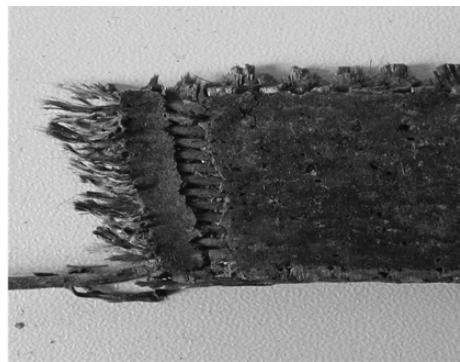


图 4 两种结构试件拉伸载荷—位移曲线

由图 4 可以看出两种试件的拉伸载荷—位移曲线均呈双折线形, 曲线上有一个不太明显的拐点, 拐点之前为初始模量区。在初始阶段, 纤维与树脂之间的界面结合得很好, 树脂起到了很好的传递力的作用, 多根轴向纱共同承受拉伸力的作用, 表现为较高的初始模量。随着材料的伸长, 树脂与纤维间的部分界面开始发生破坏, 整体性受到影响, 表现为略低的二次模量, 随着界面破坏的加剧, 其增强作用的纤维难以共同发挥作用, 不能承受已经达到了很高的拉伸力, 产生突然的断裂, 即脆断, 两种试件的端口基本上均为平断口, 如图 5 所示。



(a) 三维五向3D复合材料拉伸破坏断口形貌



(b) 正交三向3D复合材料拉伸破坏断口形貌

图 5 两种结构试件拉伸破坏断口形貌

三维五向增强复合材料和正交三向增强复合材料都能达到高的拉伸强度。在 3D 复合材料与传统织物复合材料的最大区别是它除了 X、Y 两个方向纱线外, 在 X、Y 两个方向纱线的平面法线方向还有 Z 向纱线, 是三维立体结构。纤维不但在平面内相互交织、交叉在一起, 而且通过厚度方向, 在三维空间中也相互交织、交叉在一起, 形成了一个不分层的整体结构, 根本不存在“层”的问题, 克服了传统复合材料“分层”的缺点, 从而大大提高了复合材料的材料的强度和刚度, 使材料具有优良的力学性能。采用三维编织工艺制作的增强预制体层间连接强度远远优于其它层合材料, 纤维的方向、分布和含量均可设计和控制, 可满足多功能复合材料对不同力学性能的使用要求。

三维五向和正交三向编织预制件纤维的方向、分布和含量均可设计和控制, 可满足多功能复合材料的使用要求。由于三维五向编织结构

的整体成型性特点, 该工艺可织造截锥形、哑铃形、带筋圆筒等特殊形状实用预制体, 目前该工艺已成功应用于导弹前体防热套、舱段、方向舵、喷管、喉衬、尾翼以及卫星结构件等产品的制造。采用正交三向工艺可织造板状、圆筒状、锥筒状立体编织物, 目前该工艺已成功应用于导弹端头帽、天线窗、飞机刹车盘等产品的制造。

经测试, 三维五向 3D 复合材料的拉伸强度较正交三向 3D 复合材料的高, 分析其原因为正交三向 3D 复合材料的一个特征是在较低的拉伸应力下就开始出现永久变形或称“软化”, 软化使不同种类复合材料刚度下降 20%—50%。试验中正交三向 3D 复合材料中的经纱束可能会因 Z 向纱线存在而严重偏移, 这种严重扭曲的纤维束在拉伸应变达到一个临界值时开始塑性伸长, 这时纤维束中的树脂开始出现永久性的剪切变形。应力超过起始塑性伸长临界应力后, 正交三向 3D 复合材料中开始出现基体断裂(拉伸断裂和

分层断裂) Z 向纱线脱黏,某些材料中还有纤维束断裂,纤维束拔出。拉伸破坏一般发生在经纱断裂时,断裂的经纱可能在机织工艺过程中就已经出现损伤,性能已经显著下降。而三维五向编制结构中编织纱线与编织成型方向有一个夹角,共有四种空间倾斜方向,有效地提高了复合材料的性能,同时试件在织物编织成型方向(纵向),即 0° 方向加入了加强纱线,试件内部沿 0° 方向的纱线比例增大,纵向纱线几乎处于伸直状态,试件在此方向的承载能力增强,大幅度提高了材料在该方向的强度和模量,出现如试验所得

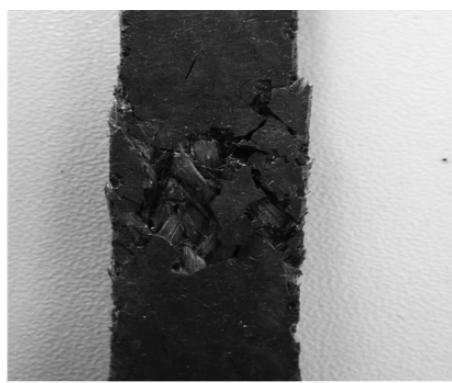
的一致结果。

3.2 两种试件的冲击强度

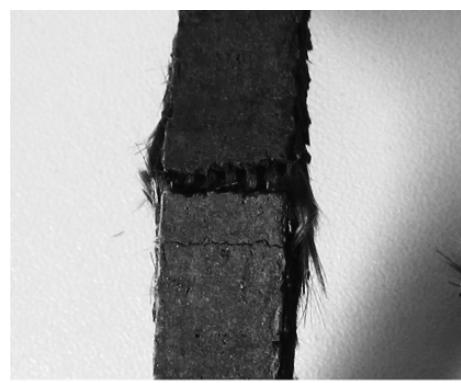
表 3 给出了三维五向 3D 复合材料和正交三向 3D 复合材料冲击强度的测试结果(平均值)。图 6 为两种结构试件的冲击破坏断口形貌。

表 3 各组试件冲击强度数据(平均值)

试件种类	试样破坏时 吸收能量 /kJ	冲击强度 /(kJ · m ⁻²)
三维五向 3D 复合材料	6	150
正交三向 3D 复合材料	5	125



(a) 三维五向 3D 复合材料冲击破坏断口形貌



(b) 正交三向 3D 复合材料冲击破坏断口形貌

图 6 两种结构试件冲击破坏断口形貌

由表 3 可见,在纤维体积含量基本相同的情况下,试件类别不同所对应的冲击强度也有所不同。三维五向 3D 复合材料和正交三向 3D 复合材料的冲击性能都能达到较高的强度,且三维五向的编织结构对应的冲击强度稍高于正交三向机织增强复合材料,达到 150 kJ/m²。由于两种试件的 3D 结构,使得两种试件都能达到较高的冲击强度,同时因为三维五向编织层的起伏,尤其是编织结构 0° 方向的加强纱线,使得冲击损伤在复合材料中很难传播。从而三维五向编织复合材料较正交三向编织的复合材料显示出更强的冲击损伤抑制能力,有效提高了材料的性能。

4 结论

(1) 3D 复合材料的力学性能具有可设计性,实际应用中可根据具体要求,通过对织物结构

进行设计,以满足多功能复合材料对力学性能的要求。

(2) 在相近的纤维体积含量下,三维五向 3D 复合材料和正交三向 3D 复合材料都具有较高的力学性能,且三维五向 3D 复合材料的拉伸、冲击强度均高于正交三向 3D 复合材料。

参考文献:

- [1] Brookste Ind. Braiding of a three-dimensional article through select fiber placement [P]. UA Patent: 5123458, 1994-10-23.
- [2] 李嘉禄,肖丽华. 立体多向编织结构对复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 1996 (3): 71-75.
- [3] Wu D L. Three-cell mode land 5D brided structural composites [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56: 225-233.
- [4] 韩其睿,李嘉禄,李学明. 复合材料三位维编织结构的单元体模型[J]. 复合材料学报, 1996, 13 (3): 76-79.

Influence of Structures of Fiber 3D Composites on Their Mechanical Properties

LEI Yi-san , CHEN Jia , ZHANG Rui-gang , WANG Fu-qiang , YAN Li-li

(33th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation , Taiyuan 030006 ,China)

Abstract: In this paper ,the mechanical properties of resin based nicked plated carbon fiber 3D composite materials with different structures are investigated , including the effects of 3D five-direction and 3D three orthogonal braiding composites on tensile strength and impact strength of the composite. Mechanical properties test results indicate that two kinds of specimens , both five-direction braiding composites and three orthogonal braiding composites achieve high mechanical properties , and the tensile strength and impact strength of 3D five-direction braiding composites are higher than that of 3D three orthogonal braiding composites , and the tensile strength of 3D five-direction composite reaches to 920MPa ,the impact strength reaches to 150 kJ/m². The mechanical properties of 3D braiding composites are determined by their designed braiding structure .

Keywords: 3D composite; 3D five-direction; 3D three orthogonal; Mechanical property

(编辑: 段玉琴)

加入“中国学术期刊(光盘版)电子杂志社”的声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我社上述声明。凡有不同意者,请在来稿时特别声明,我刊将另作处理。

本刊编辑部