

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.09.009

碳纤维中空织物增强树脂基复合材料导热性能与应用

周正亮,赵大娟,万佳,水锋

(中材科技股份有限公司,南京 210012)

摘要:采用真空引流成型工艺制备了树脂基碳纤维中空复合材料,主要研究了 15 mm 碳纤维中空织物复合材料和传统铝蜂窝导热复合材料的力学性能和导热性能,并从导热机理、导热材料结构角度进行分析。介绍了碳纤维中空复合材料在导热领域的应用情况。结果表明,碳纤维三维中空复合材料的综合力学性能明显优于传统铝蜂窝材料,导热性能基本与铝蜂窝复合材料相当,在航空航天技术领域更具应用优势,可成为替代传统蜂窝及泡沫夹层复合材料的理想结构材料。

关键词:碳纤维中空织物;复合材料;力学性能;导热

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)09-0046-04

Application of Thermal Conductivity of Carbon Fiber Hollow Fabric Reinforced Resin Matrix Composites

Zhou Zhengliang, Zhao Dajuan, Wan Jia, Shui Feng

(Sinoma Science & Technology Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract : Resin-based carbon fiber hollow composites were prepared by vacuum drainage molding process. The mechanical properties and thermal conductivity of 15 mm carbon fiber hollow fabric composites and traditional aluminum honeycomb thermal conductive composites were studied and analyzed from the point of view of heat conduction mechanism and structure of heat conduction materials. The application of carbon fiber hollow composites in the field of heat conduction was briefly introduced. The results show that the comprehensive mechanical properties of three-dimensional carbon fiber hollow composites are obviously superior to those of traditional aluminum honeycomb materials, the thermal conductivity of the material is almost the same as that of aluminum honeycomb composites, and have more advantages in the field of aerospace technology. It can be used as an ideal structural material to replace the traditional honeycomb and foam sandwich composites.

Keywords : carbon fiber hollow fabric ; composite ; mechanical property ; thermal conduction

随着现代电子信息技术及制造技术的快速发展,电子信息、航空航天等技术领域中电子元器件系统及设备向着高集成化、微型化、轻量化及高功率化等方向发展,而高度集成化和紧凑型封装技术减少了器件的散热空间,高功率密度使小空间范围内热量堆积,造成局部温度过高,热流分布不均匀,降低了电子元器件系统及设备性能、稳定性和使用寿命^[1-4]。相关统计数据表明,过热及热相关原因引起的电子元器件失效案例占比高达 55% 以上^[5-6]。为延长电子设备使用寿命、提高设备性能稳定性,许多功能性材料已经逐渐发展并用于提高电子设备及其元器件系统的散热效率^[7-11]。其中,聚合物基复合材

料等导热材料能将电子设备中的热量快速而有效地移除,成为电子信息、航空航天技术领域新材料的重要发展方向^[12]。

笔者主要对树脂基碳纤维中空复合材料的力学性能和导热性能进行研究,从导热机理与材料结构角度对传统铝蜂窝材料和碳纤维中空复合材料进行对比分析,为碳纤维中空复合材料在航空航天领域的开发利用提供数据支持和参考,并展望该材料在未来航空航天领域的发展方向。

1 实验方法

1.1 原材料

碳纤维中空织物: ZK15, 其中经纬纱均为 3K

通讯作者: 周正亮,高级工程师,主要从事复合材料相关研究工作 E-mail : zhouzhengliang@fiberglasschina.com

收稿日期: 2019-06-26

引用格式: 周正亮,赵大娟,万佳,等. 碳纤维中空织物增强树脂基复合材料导热性能与应用[J]. 工程塑料应用,2019,47(9): 46-49.

Zhou Zhengliang, Zhao Dajuan, Wan Jia, et al. Application of thermal conductivity of carbon fiber hollow fabric reinforced resin matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9): 46-49.

碳纤维,地经密度 16 根/cm,绒经密度 8 根/cm,纬密 14 根/cm,织物高度 15 mm,芯层结构“8”字形,自制;

环氧树脂(EP):LT-5078A,惠柏新材料科技(上海)有限公司;

固化剂:LT-5078B,惠柏新材料科技(上海)有限公司。

1.2 仪器及设备

浮热沉固体材料低温热导率测定装置:自制;

万能材料试验机:HF-9005S 型,苏州力高检测设备有限公司。

1.3 试验方法

(1) 碳纤维三维中空复合材料制备。

碳纤维中空织物复合材料采用真空引流成型工艺制备。其中树脂与固化剂配比为 $m_{\text{(树脂)}}/m_{\text{(固化剂)}}=100:30$,压强为 $-0.095 \sim -0.085$ MPa,固化工工艺为 70°C ,4 h。

(2) 碳纤维三维中空复合材料性能测试。

根据压缩性能、拉伸性能、剪切性能、弯曲性能及剥离性能测试标准中规定的试样尺寸要求,对制备好的碳纤维复合板材进行切割,得到符合试验要求的试验件,每种试验件数量为 5 件。实验室温度: $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度: $(50 \pm 10)\%$ 。

中空复合材料平拉强度按照 GB/T 1452-2005 测试;

平压强度按照 ASTM 365-2005 测试;

四点弯曲强度按照 ASTM 393-2000 测试;双层剪切强度参照 ASTM 273-2000 测试;剥离强度按照 GB/T 1457-2005 测试;

热导率在室温下参照文献^[13]所述“浮热沉固体材料低温热导率测定法”进行测试,试件尺寸 $30\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,试件数量 5 件。

2 结果与讨论

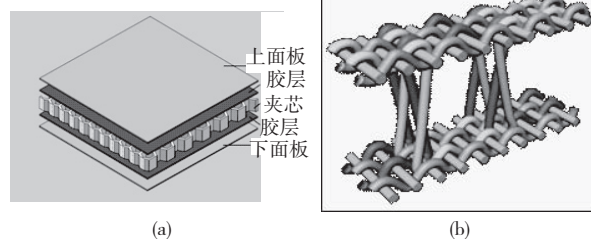
2.1 力学性能

将碳纤维中空复合材料的平拉强度、平压强度、四点弯曲强度、剪切强度以及剥离强度与铝蜂窝夹芯复合材料进行对比^[14],测试结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,与传统铝蜂窝夹芯材料相比,碳纤维中空复合材料的综合力学性能更加优异。传统铝蜂窝夹芯材料的平拉强度为 $1.6 \sim 2.8$ MPa,碳纤维中空复合材料平拉强度为 $6.7 \sim 9.5$ MPa,传统铝蜂窝夹芯材料的平压强度为 $1.0 \sim 2.8$ MPa,碳纤维中

空复合材料平压强度为 $1.2 \sim 14.3$ MPa,传统铝蜂窝夹芯材料的剥离强度为 $46 \sim 115$ (N·mm)/mm,碳纤维中空复合材料剥离强度为 184 (N·mm)/mm。从以上看出,碳纤维中空的平拉强度、平压强度和剥离强度远远高于铝蜂窝夹芯材料。这是由于铝蜂窝夹芯材料是由蒙皮与芯层二次复合得到(如图 1a 所示),材料内部存在开孔结构,当面板在载荷作用下受到破坏时,蜂窝孔格的粘接受到影响,牢度降低,从而降低了夹层结构整体的性能。当作导热用途时,铝蜂窝通常和碳纤维面板同时使用,其中碳纤维面板是作为蒙皮层。由于铝蜂窝和碳纤维复合材料均是刚度较高的结构材料,面板胶接时配合度较低,界面性能差,材料整体力学性能下降^[15]。而碳纤维中空织物为面芯一体成型(如图 1b 所示),复合材料层层之间连接牢固,得益于这种结构特性和高性能碳纤维的优良性能,中空复合材料中碳纤维分散性较好,纤维体积分含量高,中空复合材料整体力学性能大大提高。

表 1 碳纤维中空复合材料与铝蜂窝夹芯复合材料力学性能比较

项目	材料种类	
	铝蜂窝夹芯复合材料	碳纤维中空复合材料
平拉强度 / MPa	1.6 ~ 2.8	6.7 ~ 9.5
平压强度 / MPa	1.0 ~ 6.8	1.2 ~ 14.3
四点弯曲强度 / MPa	60 ~ 165	46 ~ 163
双层剪切强度 / MPa	0.4 ~ 2.8	0.7 ~ 5.1
剥离强度 / [(N·mm)·mm ⁻¹]	46 ~ 115	184



a—铝蜂窝夹芯结构;b—三维中空复合材料夹层结构

图 1 两种复合材料结构示意图

在航空航天领域,导热材料不仅要求具备高导热性能,还要在保证结构性能的同时承受更大的载荷、具有更轻的质量,满足严苛环境下电子元器件系统的特殊需求。为满足质轻的要求,铝蜂窝夹芯材料在一定的质量下,厚度需要做得很薄。在恶劣环境中工作时,这种薄壁易导致铝蜂窝表面(尤其是蜂窝孔隙较大的位置)发生局部失稳,且无法承受较大的剪切载荷,易开裂分层从而失效,为元器件系统带来极大的安全隐患。而碳纤维中空织物采用高性能碳纤维一体编织成型,与传统编织方法不同,中

空织物上下层面由Z向绒经交织连接,保证了预制体整体的层间性能,较传统夹层结构连接强度更高,抗分层能力更强;经与树脂复合后,绒经在一定程度上起到加强筋的作用,其点阵均布的特征能够保证复合材料产品承受一定载荷,中空结构特征能够保证在同载荷作用下实现最轻量化,材料整体结构具备抗分层、良好的结构刚强度和导热性能。因此,碳纤维中空复合材料在航空航天技术领域更具有应用优势,可成为替代传统的蜂窝及泡沫夹层复合材料的理想结构材料。

2.2 导热性能

在常温下对碳纤维中空复合材料和导热碳纤维面板铝蜂窝夹层板的导热性能进行测试,测量精度为 $\pm 3\%$,碳纤维中空复合材料与铝蜂窝夹芯复合材料导热性能见表2。由表2可见,碳纤维中空复合材料的导热性能基本与铝蜂窝夹芯复合材料相当,可以满足一定环境下的导热需求。

表2 碳纤维中空复合材料与铝蜂窝夹芯复合材料导热性能

项目	材料种类	
	铝蜂窝夹芯复合材料	碳纤维中空复合材料
面内热导率/ [W·(m·K) ⁻¹]	3.428	3.265

从其导热机理研究,碳纤维中空复合材料主要通过固相导热和气相传热两种途径进行热传导^[16]。其中固相导热过程中主要由材料中的碳纤维和EP基体产生热传导,而碳的热导率高于树脂(100~400 K温区内),因此碳纤维在复合材料中所占体积比对材料整体的热传导起着重要的作用。导热碳纤维面板铝蜂窝夹层板中碳纤维仅作为蒙皮层,而碳纤维中空复合材料中碳纤维贯穿于上下面板及绒经层,体积所占比例大,热传导效果较好;与铝蜂窝夹层结构复合材料相比,中空夹层的结构使材料实现减轻质量的同时导热性能略微降低。

表3列举了几种常见聚合物材料的导热性能^[13]。由表3可以看出,聚合物材料本身的热导率很低[一般在0.10~0.50 W/(m·K)之间],其中EP的热导率低于0.2 W/(m·K),PE-HD的热导率最高,也仅达到0.44 W/(m·K)。这是由于对于大多数聚合物来说,声子传输平均自由程很小,热导率相对较低^[14]。聚合物材料本身的热导率难以满足高集成度、高功率密度电子器件系统的应用要求。因此,树脂基碳纤维导热复合材料的导热性能主要取决于材料中导热碳纤维的应用和复合材料预制件编织方式,其中预制件的编织方式可以改变碳纤维的分布

状态,使材料导热性能立体化,从而进一步实现复合材料功能在更多维度的可设计性。后续研究可以考虑从导热碳纤维的制备、树脂基体的选择、复合材料成型工艺、材料应用背景等方面综合考虑,实现树脂基碳纤维中空复合材料的结构功能一体化。

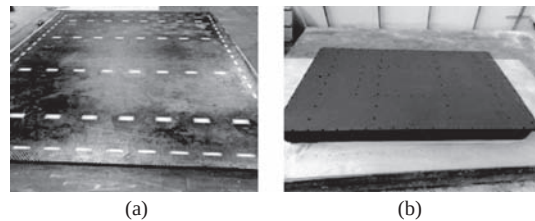
表3 常见聚合物材料的热导率(室温)

聚合物材料	热导率/[W·(m·K) ⁻¹]
聚氯乙烯(PVC)	0.12~0.19
高密度聚乙烯(PE-HD)	0.44~0.53
聚四氟乙烯(PTFE)	0.25~0.27
聚苯硫醚(PPS)	0.30
聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)	0.16~0.25
聚苯乙烯(PS)	0.10~0.15
硅橡胶	0.17~0.21
低密度聚乙烯(PE-LD)	0.29~0.34
聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)	0.15
聚丙烯(PP)	0.11~0.14
聚酰亚胺(PI)	0.11
乙烯-乙酸乙烯共聚物(E/VAC)	0.33~0.35
EP	0.17~0.19

3 应用情况

在航天器的热设计中,安装板是电子元器件的主要散热渠道,为仪器或电子元件提供适宜的温度环境,以保证其正常工作^[17]。同时,由于航天器处于太空环境中,对有源安装板等结构件的质量、结构、性能要求比较严苛。因此,安装板与仪器或电子元器件的传热效果、安装板本身的结构刚、强度及质量属性至关重要^[18]。

碳纤维中空复合材料因具有良好的刚、强度特性、质轻并兼具导热功能,综合性能满足航天器应用要求,能为航天器内部电子元器件系统提供良好的温度环境,与常用的导热板材料相比,该材料在满足功能性和尺寸精度的同时,减重效果明显(较客户技术指标要求减轻质量10%~15%),且在不破坏中空织物整体空间特征的前提下,可实现大尺寸化连续成型,产品平面度达到0.05 mm。目前已成功应用于导热安装板领域,图2为碳纤维中空复合材料应用在导热安装板的示意图。



(a) 近距离; (b) 远距离

图2 碳纤维中空复合材料应用在导热安装板

4 结论

未来航空航天用导热材料不仅要求具备高导

热性能,还要满足在更高温度、更加恶劣的环境中工作,能够承受更大的载荷、具有更轻的质量并保证其结构性能满足电子元器件系统的需求。碳纤维中空织物增强树脂基复合材料具有高的比强度,密度小、质轻,导热性能良好,能够减少电子元器件质量的同时又确保高导热和足够的结构强度,在航空航天导热领域拥有极大的应用潜能。但限制其深度推广应用的瓶颈仍然存在,如成型工艺的单一性、高导热碳纤维的研发应用等,在一定程度上制约了生产效率,增加了生产成本。如何以材料热传导机理为基础,实现材料结构功能一体化、提高其生产效率对其在飞速发展的航空航天技术领域中的大批量应用起着至关重要的作用。

参考文献

- [1] Zeng Xiaoliang, Sun Jiajia, Yao Yimin, et al. A combination of boron nitride nanotubes and cellulose nanofibers for the preparation of a nanocomposite with high thermal conductivity[J]. ACS Nano, 2017, 11(5):5 167–5 178.
- [2] 耿庆申, 卢玉, 樊海荣, 等. 特高压和超高压交流输电系统运行损耗比较分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16):72–77.
Geng Qingshen, Lu Yu, Fan Hairong, et al. Comparative analysis of operation losses of UHV AC and EHV AC transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16):72–77.
- [3] Li Qi, Chen Lei, Gadinski M R, et al. Flexible high-temperature dielectric materials from polymer nanocomposites[J]. Nature, 2015, 523(7 562):576–579.
- [4] 雷智博, 曹建光, 董丽宁, 等. 航天器热管理高导热材料应用研究 [J]. 中国材料进展, 2018, 37(12):103–111.
Lei Zhibo, Cao Jianguang, Dong Lining, et al. Study on application of high thermal conductivity materials in aerospace thermal management[J]. Materials China, 2018, 37(12):103–111.
- [5] 郭磊. 电子器件散热及冷却的发展现状研究 [J]. 低温与超导, 2014, 42(2):62–66.
Guo Lei. Development of heat dissipation in electronics components [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2014, 42(2):62–66.
- [6] Belhardj S, Mimouni S, Saidane A, et al. Using microchannels to cool microprocessors:a transmission-line-matrix study[J]. Microelectronics Journal, 2003, 34(4):247–253.
- [7] 孙贤贤. 三维石墨烯基纳米复合材料的制备及导热性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Sun Xianxian. Study of preparation and thermal property of three demensional graphene based nanocomposites[D]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2017.
- [8] 石倩, 雷华, 陈泉, 等. 氮化硼 / 聚合物导热复合材料的进展 [J]. 塑料, 2018, 47(3):110–112, 117.
Shi Qian, Lei Hua, Chen Xiao, et al. Progress on boron nitride / polymer thermally conductive composite[J]. Plastics, 2018, 47(3):110–112, 117.
- [9] 贺新福, 张小琴, 王迪, 等. 碳纳米管 / 聚合物基导热复合材料研究进展 [J]. 化工进展, 2018, 323(8):170–176.
He Xinfu, Zhang Xiaoqin, Wang Di, et al. Research progress in heat conductive CNTs / polymer composites[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 323(8):170–176.
- [10] 吴宇明, 虞锦洪, 曹勇, 等. 高导热低填充量聚合物基复合材料研究进展 [J]. 复合材料学报, 2018, 35(4):760–766.
Wu Yuming, Yu Jinhong, Cao Yong, et al. Review of polymer-based composites with high thermal conductivity and low filler loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4):760–766.
- [11] Xiao Meng, Du Boxue. Review of high thermal conductivity polymer dielectrics for electrical insulation[J]. High Voltage, 2016, 1(1):34–42.
- [12] 李寒梅, 陈蓼璞, 朱维维, 等. 高导热聚合物复合材料结构与性能研究进展 [J]. 化学研究, 2018(4):429–440.
Li Hanmei, Chen Liaopu, Zhu Weiwei, et al. Recent progress of structure and properties of high thermal conductive polymer composites[J]. Chemical Research, 2018(4):429–440.
- [13] 张建可, 冀勇夫. 碳纤维面板铝蜂窝夹层结构低温导热率测试研究 [J]. 真空与低温, 2003, 9(1):37–40.
Zhang Jianke, Ji Yongfu. The thermal conductivity of honeycomb sandwich panels with carbon fibre plates at low temperature[J]. Vacuum & Cryogenics, 2003, 9(1):37–40.
- [14] 张艳红, 耿杰, 匡宁, 等. 三维中空复合材料在天线罩上的应用研究 [J]. 玻璃纤维, 2015(3):20–23.
Zhang Yanhong, Geng Jie, Kuang Ning, et al. Application of 3D hollow sandwich composite in radome[J]. Fiber Glass, 2015(3):20–23.
- [15] 陈龙辉, 付杰斌, 王强, 等. 复合材料夹层结构在航空领域的应用 [J]. 教练机, 2014(2):44–48.
Chen Longhui, Fu Jiebin, Wang Qiang, et al. Application of composite sandwich structure on aviation[J]. Trainer, 2014(2):44–48.
- [16] 张建可. 树脂基碳纤维复合材料的热物理性能之一——导热系数 [J]. 中国空间科学技术, 1987(3):59–60.
Zhang Jianke. The one of thermal physical properties of carbon fiber / epoxy resin composites-thermal conductivity[J]. Chinese Space Science and Technology, 1987(3):59–60.
- [17] 杜伯学, 孔晓晓, 肖萌, 等. 高导热聚合物基复合材料研究进展 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(14):3 149–3 159.
Du Boxue, Kong Xiaoxiao, Xiao Meng, et al. Advances in thermal performance of polymer-based composites[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14):3 149–3 159.
- [18] 周佐新, 李劲东. 具有多个热源的仪器安装板的导热分析 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22(S1):85–88.
Zhou Zuoxin, Li Jindong. The heat transfer analysis of mounted plate with many heat source[J]. Journal of Engineering Thermo Physics, 2001, 22(S1):85–88.