

环境载荷对碳纤维电热复合材料电热性能的影响

谢明亮, 彭超义, 丁海滨

国防科技大学航天科学与工程学院, 长沙 410073

摘要 考查了碳纤维电热复合材料在通电加热和力学载荷下的电热性能。结果表明,碳纤维电热复合材料的电阻值随温度的升高成线性减小关系,但其变化范围较小;拉伸或弯曲载荷下的变形,碳纤维电热复合材料的电阻值均随着形变量的增加而增大,但环境载荷对2种载荷的影响有所区别。其中,电阻值随拉伸载荷的增大成线性增大关系,但在初始加载和即将拉断时电阻会有较大波动;对于弯曲载荷,初始加载时电阻值并没有发生明显变化,当加载达到某一临界值时,电阻值随弯曲载荷的增大成线性增大关系。

关键词 碳纤维;复合材料;电热性能

鉴于化石燃料消费对生态环境所造成的负面影响,近年来可再生能源备受关注,其中,技术最成熟的可再生能源——风能得到迅速发展。高原、寒冷地区,以及山脊、山顶的风能资源十分丰富,具有很大的开发价值,然而寒冷地区温度低、海拔高、湿度大,很容易造成叶片结冰、叶片结冰后载荷增大、叶片气动性能变差,这些对机组的安全以及功率都有很大影响,严重时可能会导致风机长时间停机或因叶片受损而减少使用寿命,因此发展抗冰冻叶片具有很重要的意义。风电叶片抗冰技术经历了机械除冰、电热除冰、超疏水涂层防冰的发展历程^[1-7]。随着复合材料的发展,碳纤维因具有高强、高模、高弹、耐高温、耐酸碱腐蚀、导电性能良好等优异特性在复合材料电热抗冰技术中有着良好的应用前景,有学者已经进行了相关研究。Kunmo等^[8]考查了碳纳米管复合材料的电热性能,对其接通12 V直流电压,发现该材料能在30 s内迅速从室温升至200℃,另外,在长期的加热试验中,还表现出良好的热稳定性和可重复性。杨威等^[9]对碳纤维片材(CFRP)在空气中的电热性能进行了试验研究,发现当CFRP的温度达到一定限度后,CFRP由于被空气所氧化而熔断,但当CFRP的温度低于该限制时,CFRP具有良好的导电性能,并且其电流-温度曲线具有良好的线性关系。孙建虎等^[10]考查了碳纤维-石墨复合水泥基材料导电性能,得到了环境温度、碳纤维长度及组合长度等因素对水泥基材料导电性能的影响结果。将碳纤维织物应用到叶片上加热除冰,需要掌握环境温度、拉伸和弯曲载荷等外界环境对其性能的影响,而目前关于环境载荷对碳纤维电热复合材料电热性能影响的

研究鲜有报道。

1 实验研究

1.1 实验材料与仪器

实验材料:导电银浆,OTS-5280型号;碳纤维为3 K的T300平纹布,面密度200 g/m²,厚度0.25 mm,经纬丝数比为1:1;树脂体系为陶氏公司生产的风电叶片专用树脂体系760E/766H。

实验仪器:电子万能试验机、微欧计、数字万用表、红外测温枪、超声波探伤仪、调压器、冷冻柜、烘箱等。

1.2 试样制备

将不同层数的碳纤维布与玻璃纤维布分别制备成纯碳电热复合材料、碳纤维/玻璃纤维层间混杂复合材料;非纯碳电热复合材料铺层方式为碳纤维布与玻璃纤维布依次交互铺层;然后将碳纤维布两端各0.05 m处用导电银浆封端,粘上铜箔电极,最后放入烘箱中按120℃/5 min+130℃/60 min进行烘干固化^[11];各种所需试样采用真空灌注模塑成型工艺(VIMP)注入树脂,按照70℃/6 h^[12]固化后制成试样。

1.3 实验表征

使用红外测温枪对试样表面直接进行温度测试;使用万用数字表(欧姆挡)进行电阻测试,导电银浆与铜箔电极的接触电阻很小,可忽略不计;使用超声波探伤仪对试样内部结构进行探伤测试;所有测试在同一环境下进行,室温相同^[13];每次测量均进行3次,求算数平均值。

收稿日期:2015-11-30;修回日期:2015-12-30

基金项目:国家高技术研究计划(863计划)项目(2012AA03A205);湖南省科技重大专项(2011FJ1001)

作者简介:谢明亮,硕士研究生,研究方向为高分子复合材料,电子信箱:253682844@qq.com;彭超义(通信作者),副教授,研究方向为复合材料、多功能结构和风电叶片,电子信箱:pengchaoyi@nudt.edu.cn

引用格式:谢明亮,彭超义,丁海滨.环境载荷对碳纤维电热复合材料电热性能的影响[J].科技导报,2016,34(8):67-70;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.08.011

2 结果分析与讨论

分别测试了纯碳纤维复合材料、碳纤维/玻璃纤维层间混杂复合材料在通电情况下的电阻与温度、电阻与拉伸和弯曲载荷的关系。

2.1 温度对碳纤维电热复合材料电阻的影响

实验选取-15~70℃温度变化范围,试样尺寸 500 mm×

200 mm,对于低于室温的温度,将复合材料放置于卧式冷藏/冷冻柜中,调至不同的温度,保持 10 min 后进行电阻测量;对于高于室温的温度,将复合材料放入烘箱中,调至不同温度,保持 10 min 后进行电阻测量。表 1 是 4 种碳纤维电热复合材料试样在不同温度 T 下的电阻值 R 。图 1 为根据表 1 测试数值绘出的电阻值随温度变化曲线。

表 1 不同温度下的电阻值

Table 1 Resistance of specimens at different temperatures

试样编号	铺层方式	$T/^\circ\text{C}$	R/Ω	试样编号	铺层方式	$T/^\circ\text{C}$	R/Ω
1	C	-13.0	1.658	3	G/C/G	-9.8	1.619
		-6.0	1.633			-5.1	1.607
		0.5	1.619			0.5	1.591
		20.3	1.515			19.8	1.398
		30.5	1.480			31.0	1.317
		49.8	1.401			49.9	1.239
		69.1	1.319			68.9	1.207
2	C/C	-11.0	0.821	4	G/C/G/C/G	-11.8	0.810
		-5.6	0.806			-5.5	0.800
		-1.3	0.797			0.7	0.789
		20.6	0.748			19.9	0.734
		31.2	0.731			31.3	0.725
		50.2	0.714			50.9	0.708
70.3	0.662	69.9	0.644				

注: C 为碳纤维; G 为玻璃纤维; T 为温度; R 为电阻。

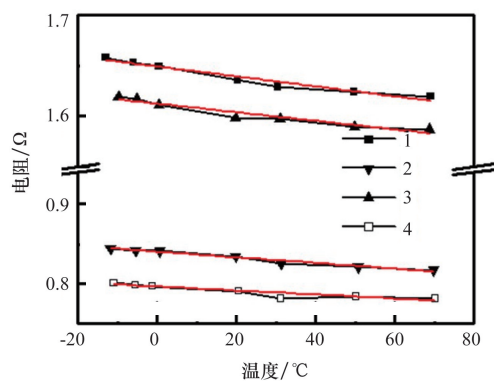


图 1 电阻随温度变化曲线

Fig.1 Resistance varies with temperature

由图 1 可知,纯碳纤维复合材料和碳纤维/玻璃纤维层间混杂复合材料,其电阻值均随温度的升高而减小,但其变化的范围很小,对电阻没有太大影响,基本上呈线性减小关系,原因可能是:对碳纤维的类石墨结构来说,石墨片层结构外的一个孤立电子,在外电场作用下,石墨的导带向价带倾斜,而其费米能级要保持水平,则在导带具有较低势能面上电子

出现的概率大,使其导电性增强,电阻减小。

由图 1 还可以看出,对于尺寸相同且含有相同碳纤维布的复合材料中,纯碳纤维复合材料的电阻值大于碳纤维/玻璃纤维层间混杂复合材料的电阻值,如图中的试样 1 的电阻大于试样 3 的电阻,试样 2 的电阻大于试样 4 的电阻,这是因为:就碳纤维平纹布结构来说,其为纵横向相互正交在一起的碳纤维,彼此之间相互接触,则存在一定的接触电阻,接触压力是影响接触电阻的最大因素,在碳纤维和玻璃纤维混杂的复合材料结构中,玻璃纤维的存在增大了碳纤维之间的接触压力,使碳纤维布的接触电阻减小,从而使碳纤维/玻璃纤维混杂复合材料的电阻小于纯碳纤维复合材料的电阻,导致碳纤维/玻璃纤维层间混杂复合材料在相同的电压下具有比纯碳纤维复合材料更高的发热功率。

2.2 形变对碳纤维电热复合材料电阻的影响

2.2.1 碳纤维电热复合材料在拉伸载荷下的电阻测试

将试样按照如图 2 所示方式安装在万能力学试验机上,试样是由 3 层碳纤维布铺设而成的纯碳纤维电热复合材料,尺寸为 250 mm×25 mm,试验取 3 个试样;试样两端用玻璃纤维绝缘夹头包裹,中间夹持有引伸计,标距为 50 mm,铜板连接到微欧计;试验机的加载速度为 2 mm/min。

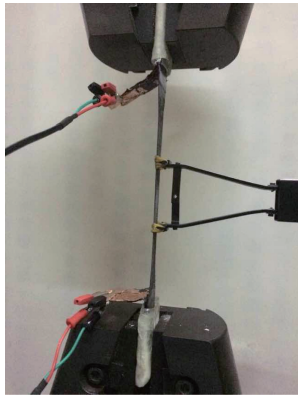


图2 拉伸试样安装示意

Fig. 2 Installation sketch of tensile sample

图3是根据形变-时间和电阻-时间的关系换算出的电阻与形变量之间的关系。由图3可知,电阻值会随着形变的增大而变大,呈上升趋势,近似为线性关系,在初始加载时和即将拉断时电阻会有较大波动,在拉伸过程中,电阻变形关系保持平稳。电阻值在1.30 Ω附近出现波动,这主要是因为,随着形变量的增加,碳纤维逐渐被拉长时横截面减小,部分碳纤维发生断裂,电阻逐渐变大;当未断裂的碳纤维和基体不足以承受拉伸载荷时,试样发生整体断裂,电阻突然变大。

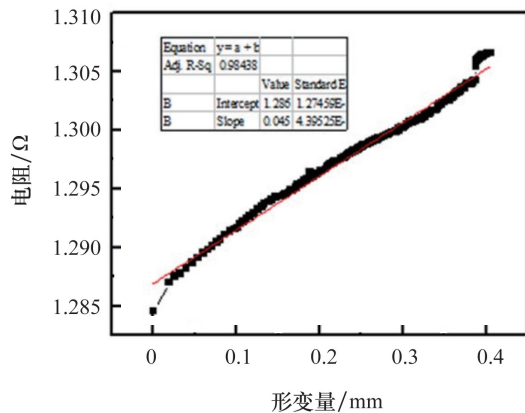


图3 拉伸载荷时电阻-形变关系

Fig. 3 Relationship between resistance and deformation of tension loading

2.2.2 碳纤维/玻璃纤维层间混杂复合材料在弯曲载荷下的电阻测试

将试样按照如图4所示方式安装在材料试验机上,试样是由3层碳纤维布与4层玻璃纤维布相间铺设而成的层间混杂复合材料,试样尺寸为250 mm×25 mm,试验取3个试样;铜极连接到微欧计;试验机的加载速度为2 mm/min。

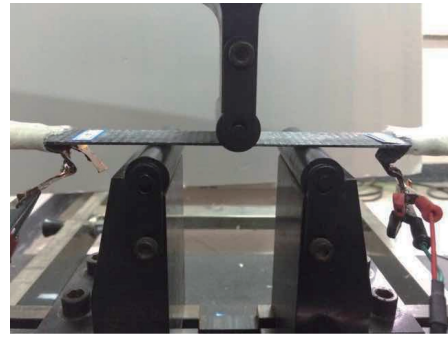


图4 弯曲试样安装示意

Fig. 4 Installation sketch of bend sample

图5是根据形变-时间和电阻-时间的关系换算出的电阻与形变量之间的关系。由图5可知,在形变量小于10 mm时,电阻的变化不明显,刚开始时电阻会有所下降,然后迅速保持稳定,随着形变的增大,电阻值并没有发生明显的变化,只是在平衡值附近波动,原因是在形变较小时,复合材料内部还未发生任何变化,其电阻并不会受此弯曲加载过程的影响;当形变达到10 mm后,电阻值开始随着形变的增大而增大,增加的过程是较缓慢且稳定,近似为线性关系,原因是复合材料在受到弯曲载荷时,其下表面受拉应力,上表面受压应力,压力使纤维之间贴合的更紧密,使复合材料的横截面变小,电阻值变大。此外,在形变增大的过程中,电阻波动上升,虽然从电阻的绝对值来看,其变化并不是很明显,但对较大尺寸的碳纤维电热复合材料,形变对电阻的影响不能简单的忽略。

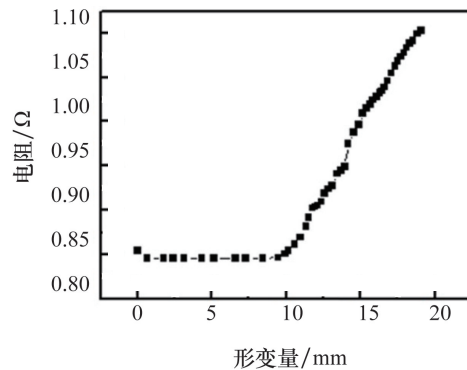


图5 弯曲载荷时电阻-形变关系

Fig. 5 Relationship between resistance and deformation of bending loading

3 结论

1) 无论何种增强形式的碳纤维电热复合材料,其电阻值均会随本身温度的升高而减小,但变化范围较小。

2) 在碳纤维布层数相同、试样尺寸相同的情况下,有玻璃纤维布相间混杂的复合材料的电阻值会稍小于纯碳纤维复合材料的电阻值,玻璃纤维的存在增大了碳纤维间的接触压力,从而减小接触电阻。

3) 不论何种增强形式的碳纤维电热复合材料,在受到拉伸或者弯曲载荷发生形变时,其电阻值都会随着形变量的增加而增大;拉伸形变时,电阻为近似线性增大,整体变化范围不大;弯曲载荷时,刚开始形变阶段,电阻几乎不发生变化,在平衡值附近呈上下波动状态,而当形变达到一定量时,电阻会迅速增大,和形变量近似成线性关系,直至试样断裂。

参考文献(References)

- [1] 王义进. 风机叶片防覆冰技术研究[J]. 机电信息, 2011, 291(9): 91, 127.
Wang Yijin. Study on anti-icing technology of fan blade[J]. Mechanical and Electrical Information, 2011, 291(9): 91, 127.
- [2] 杨常卫, 张功虎, 孙涛. 黑鹰直升机旋翼桨叶防/除冰系统研究[J]. 直升机技术, 2011, 166(1): 37-44.
Yang Changwei, Zhang Gonghu, Sun Tao. Development of black hawk helicopter rotor anti-/de-icing system[J]. Helicopter Technique, 2011, 166(1): 37-44.
- [3] 许斌, 于静梅. 基于电加热法的自控型防冰除冰叶片结构研究[J]. 应用能源技术, 2012, 180(12): 44-46.
Xu Bin, Yu Jingmei. Research of the auto control anti-icing and de-icing wind turbine blade base on electro thermal technique[J]. Applied Energy Technology, 2012, 180(12): 44-46.
- [4] Lowell J. Adams, Norbert A. Weisend, Jr. Thomas E. Wohlwender. Attachable electro-impulse de-icer: US, 5129598[P], [2015-11-30].
- [5] Cao L L, Jones A K, Sikka V K, et al. Anti-icing superhydrophobic Coatings[J]. Langmuir, 2009, 25(21): 12444-12448.
- [6] Peng C Y, Xing S L, Yuan Z Q, et al. Preparation and anti-icing of superhydrophobic PVDF coating on a wind turbine blade[J]. Applied Surface Science, 2012, 259(2012): 764-768.
- [7] Dalili N, Edrisy A, Carriveau R. A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(2): 428-438.
- [8] Kunmo C, Dongouk K, Yoonchul S, et al. Electrical and thermal properties of carbon-nanotube composite for flexible electric heating-until application[J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(5): 668-680.
- [9] 杨威, 程华. 碳纤维布电热性质的试验探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(3): 110-111.
Yang Wei, Cheng Hua. The experimental exploration of CFRP's electric and thermal quality[J]. Building Science Research of Sichuan. 2003, 29(3): 110-111.
- [10] 孙建虎, 石少卿, 刘颖芳, 等. 碳纤维-石墨复合水泥基材料导电性能的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012, 7: 45-48.
Sun Jianhu, Shi Shaoqing, Liu Yingfang et al. Experimental study on properties of carbon fiber-graphite composite cement-based conductive material[J]. China Concrete and Cement Products, 2012, 7: 45-48.
- [11] Li C L, Cui X, Wu Z H, et al. A method of eliminating ice on wind turbine blade by using carbon fiber composites[J]. Advanced Materials Research, 2013, 774-776(7): 1322-1325.
- [12] 卢敏. MW 风电叶片用环氧树脂基复合材料耐候性研究[D]. 长沙: 湖南工业大学, 2012.
Lu Min. Study on weather resistance properties of epoxy resin matrix composite for MW wind turbine blade[D]. Changsha: Hunan University of Technology, 2012.
- [13] 廖波, 周国庆, 刘卓典. 硅橡胶导电复合材料电性能的 DC/AC 测试[J]. 江苏大学学报, 2012, 33(1): 88-91.
Liao Bo, Zhou Guoqing, Liu Zhuodian. DC/AC test of electric property for silicon rubber matrix conductive composites[J]. Journal of Jiangsu University, 2012, 33(1): 88-91.

Effect of environment loading on the electric properties of carbon fabric

XIE Mingliang, PENG Chaoyi, DING Haibin

College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract This paper investigates the properties of carbon fabric in ohmic heating and mechanical loads. The results show that the resistance of carbon fabric decreases basically linearly with the increase of temperature; but the variation range is small. For deformations caused by either tensile load or compressive load, the resistance of carbon fabric will increase with the increase of deformation, but the effects of these two loads are different. That is, the resistance increases linearly with the increase of tensile load, but there is great volatility in the initial loading and before tensile failure. For the bending load, the resistance has no significant change in the initial loading; but when the load reaches a critical value, the resistance increases linearly with the increase of the bending load.

Keywords carbon fabric; composites; electric properties

(编辑 傅雪)