

温度和机械应力对 GF/EP 介电强度的影响

刘树美¹, 敖 明², 李忠华¹

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院 工程电介质及其应用技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 吉林省电力科学研究所, 吉林 长春 130021)

摘 要: 为了研究温度和机械应力对玻璃纤维/环氧树脂 (Glass Fiber/Epoxy, GF/EP) 复合材料介电强度的影响, 分别在不同温度、不同应力大小和不同应力作用形式下对 GF/EP 复合材料进行了工频击穿试验, 并依据电介质的击穿理论分析了温度和机械应力对其介电强度的影响规律。试验结果表明: 在环境温度一定的情况下, GF/EP 复合材料的击穿强度随拉应力的增大而减小; 在弯曲正应力增大的初始阶段击穿强度有所上升, 而后呈下降趋势; 在确定的机械应力下, GF/EP 复合材料低温和高温的介电强度都比室温下有所提高。研究结果为 GF/EP 复合材料在工程实际应用中提供了重要的实验基础。

关键词: GF/EP 复合材料; 温度; 机械应力; 介电强度

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.01.016

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2018)01-0087-06

Effects of Temperature and Mechanical Stresses on the Dielectric Breakdown Strength of GF/EP Composites

LIU Shu-mei¹, AO Ming², LI Zhong-hua¹

(1. Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application, School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Jilin Electric Power Research Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: To research the effects of temperature and mechanical stresses on the dielectric breakdown strength (DBS) of Glass Fiber/Epoxy (GF/EP) composites, the AC breakdown test has been carried out on the GF/EP composites under different temperatures, different stress magnitude and different style of the stresses, the effects of temperature and mechanical stresses on the dielectric strength have been analyzed according to the dielectric breakdown theory. The results show that: the dielectric strength of GF/EP composites decrease with increasing tensile stress under certain temperature; the dielectric strength increase at first with increasing bending stress, reach a maximum and indicate a decreasing tendency thereafter; compared to room temperature, the dielectric strength of GF/EP composites have been increased in different level under certain stress. The results provide important experimental basis for GF/EP composites in the practical application.

Keywords: Glass Fiber / Epoxy composites; temperature; mechanical stress; dielectric strength

收稿日期: 2016-05-23

基金项目: 国网吉林省电力有限公司 2014 年科学技术项目 (2014-33)。

作者简介: 刘树美 (1989—), 女, 硕士研究生。

通信作者: 李忠华 (1962—), 男, 教授, 博士研究生导师, E-mail: drzhhl@hrbust.edu.cn。

0 引言

玻璃纤维/环氧树脂(GF/EP)复合材料具有较高的机械和介电性能,而且耐疲劳、耐腐蚀,凭借其良好的绝缘性能和优异的力学性能,被广泛应用于电机、绕包绝缘干式变压器、户外干式空心电抗器等高压电力设备的绝缘结构中^[1-2]。

电力设备的运行状况直接关系到电网的安全与稳定,而电力设备的可靠性在很大程度上取决于绝缘的工作情况,电力设备中的绝缘一旦发生击穿,就会对整个系统造成难以估量的危害。可见,复合材料的击穿特性是评价设备复合绝缘程度好坏的重要指标之一^[3-5]。随着电力系统电压等级的提高,对系统供电可靠性的要求也越来越高,保证电力设备的绝缘在高场强下的正常工作非常重要^[6-8]。因此长期以来,电介质的击穿特性一直是高电压绝缘领域的研究热点。

在高压电气产品中绝缘不但受到振动、冲击等机械应力的作用,同时承受着电、热应力的作用^[9-12],因此研究 GF/EP 复合材料在机械应力和温度共同作用下的介电强度,对于提高材料的电气强度、完善产品结构具有重要意义。GF/EP 复合材料的结构由树脂基体、玻璃纤维和界面三部分组成,在工频电压下的击穿特性非常复杂^[13]。国内外学者针对这种材料也做了相关研究,日本学者 C. H. Park^[14-15]等测试了室温和液氮温度下,压应力和拉应力对 PET 和 FRP 介电强度的影响。实验结果表明:温度一定时,PET 和 FRP 的击穿强度随压应力的增大,呈先上升后下降的趋势;而在拉应力下击穿强度均随拉应力的增大而减小。Sauer^[16-18]也做了在液氮温度下 GF/EP 复合材料的耐压强度试验,研究表明电场与界面之间的夹角以及试样的厚度都会对击穿场强产生影响。王继辉^[1,19]等研究了玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料低温下的力学性能,发现复合材料的强度随温度的降低呈增加趋势。刘钧^[20]等人研究了室温下,拉应力对树脂基体和单向玻璃纤维增强聚合物基复合材料的介电强度,提出并证明了基体的介电强度与拉应力呈负指数关系,认为复合材料中纤维与基体的界面是影响材料介电强度的主要因素。但是,针对电力设备实际运行环境温度和弯曲应力下的介电强度问题,目前还没有相关的研究报告。我国东北地区年温差较大,干式空心电抗器在冬季异常低温条件下发生绝缘故障的现象较为频繁。因此,研究较宽温

度范围内 GF/EP 复合材料的介电强度具有重要意义。

本文研究了温度、应力大小和应力作用形式对 GF/EP 复合材料介电强度的影响。

1 试验系统与方法

1.1 高低温环境的实现

本次试验中环境温度设置在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$ 范围内进行。采用高电压高低温试验箱来实现环境温度的模拟,该冰箱可以提供连续的 $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 的稳定运行环境。试验中将整个测试系统浸入到盛有变压器油的玻璃缸内,防止进行击穿试验时表面电弧放电的影响。试验装置如图 1 所示。试验仓和温度控制系统采用分体设计,中间由绝缘通风管道连接。空气由送风机驱动,流经制冷换热器、加热器、送风管道、试验仓和回风管道形成循环,使主体试验仓基本稳定在试验设置的温度条件下实现环境温度的模拟。

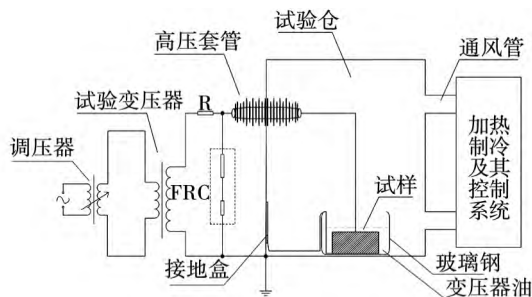


图1 试验装置图

1.2 拉应力及电极系统的实现方法

在研究 GF/EP 复合材料的介电强度随拉应力的变化规律时,采用球—板电极系统,将棒状的高压极端部设计成直径为 10 mm 的半球形,地电极为经过倒角处理的直径为 50 mm 的圆柱电极。为了使高压极与地电极中心处相互垂直以保证测得数据的准确性,并且便于在实验过程中转移位置,将上下电极固定在绝缘支架上,如图 2 所示。

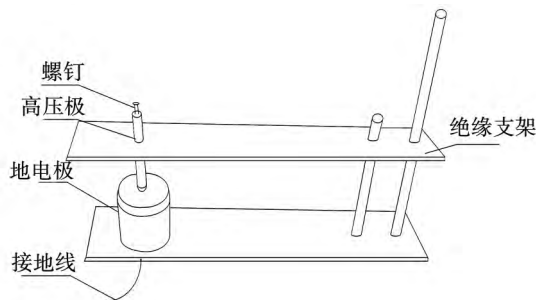


图2 拉伸试样的电极系统

测试所用试样为 3240 环氧酚醛层压玻璃布板, 拉伸试样的厚度为 0.2 mm, 尺寸设计为 300 × 240 mm, 其中有效长度为 200 mm。为了保证试样在拉伸过程中只受到均匀分布的拉应力作用, 将试样两端用多个螺钉对称固定在拉伸模具上。考虑到试样开孔处拉力与剪切力同时存在, 并且在孔边缘产生应力集中, 为了防止试样在开孔处发生破坏, 将试样两端用 PQ 胶粘贴在表面粗糙、厚为 5 mm 的绝缘板上。试验装置如图 3 所示。

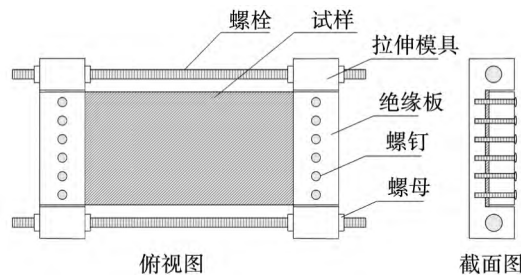


图 3 试验装置图

假设试样原长为 L , 纵向拉伸变化 ΔL , 在不超过材料的拉伸强度极限时, 应力与应变服从胡克定律, 则有:

$$\sigma = E \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

表 1 试样测试点处的拉应力值

应变 / %	0	0.146	0.292	0.438	0.583	0.729	0.875	1.02
拉应力 / MPa	0	37.92	75.83	113.75	151.67	189.58	227.50	265.42

1.3 弯曲应力及电极系统的实现方法

为了研究 GF/EP 复合材料的介电强度随弯曲正应力的变化规律, 本文采用一种特殊的电极形式, 其中高压极为直径 5 mm、长 200 mm 的实心圆柱电极, 地电极采用长 500 mm、外径各不相同的空心金属铝管。测试试样的厚度为 0.3 mm, 长度设计为 450 mm, 宽度根据地电极的不同外径分别取值。将试样用绝缘带固定在地电极上, 并将电极固定在绝缘支架上, 为了提高试验效率, 1 个地电极可以对应 5 个高压极, 试验装置如图 5 所示。

假设试样是纯弯曲的, 横截面上没有剪力只有弯矩, 则试样弯曲时的局部放大图如图 6 所示。PQ 为中性层上的纵向纤维, 试样变形后中性层的曲率半径为 ρ , PQ 对应夹角为 $d\theta$, 任一纵向纤维到中性层的距离为 y , 则该纤维在弯曲变形后的长度为 $(\rho + y) d\theta$, 其原长应与长度不变的中性层纤维相等,

式中: E 为材料的弹性模量, 所用试样的纵向拉伸强度为 314 MPa, 而 GF/EP 复合材料达到其拉伸强度极限时的应变约为 1.2% [2], 可求得 $E = 26\,167$ MPa, 为了方便计算取 $E = 26\,000$ MPa。拉应力下试样局部单元的受力分析如下图所示。

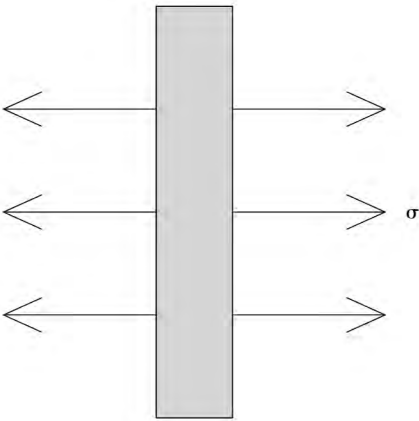
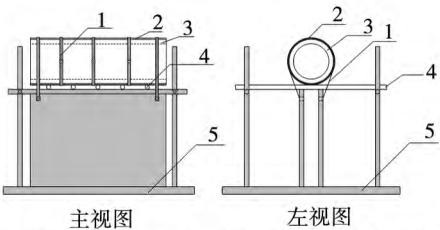


图 4 拉应力下试样局部单元的受力分析图

试验所用拉伸模具中螺栓的螺距为 1.75 mm, 从试样的原长开始, 通过改变模具两端六角螺母的角度, 按照 0.292 mm 每次的方式对试样梯度拉伸, 由式(1)可得到试样测试点处所受拉应力大小如表 1 所示。



1-绝缘带 2-试样 3-地电极 4-高压电极 5-绝缘支架

图 5 弯曲试样及电极系统

即 $\rho d\theta$, 故该纵向纤维的线应变为:

$$\varepsilon = \frac{(\rho + y) d\theta - \rho d\theta}{\rho d\theta} = \frac{y}{\rho} \quad (2)$$

纵向纤维轴向拉伸或压缩, 应力不超过材料的比例极限时, 其应力与应变服从胡克定律。若试样厚度为 d , 地电极铝管的外径为 D , 因 $D \gg d$, 则有:

$$\sigma = E \frac{d}{D} \quad (3)$$

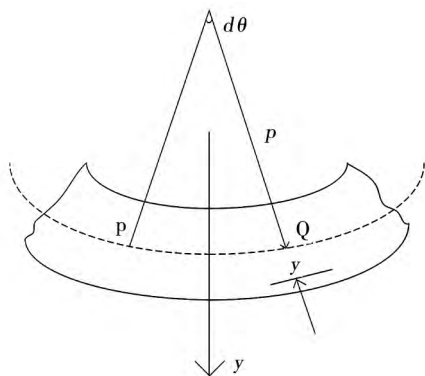


图6 弯曲试样的局部放大图

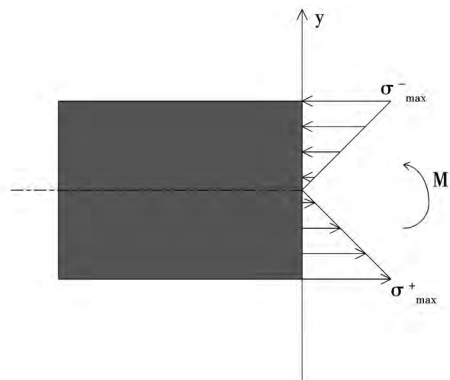


图7 弯曲试样的正应力分布图

式中: E 为材料的弯曲弹性模量, 工程规定 $E \geq 24\,900\text{ MPa}$, 为了方便计算取 $E = 25\,000\text{ MPa}$ 。试样弯曲时的受力分析如下图所示。

试验所用铝管电极的外径分别为 88 mm、60 mm、46 mm、42 mm、31 mm 和 25 mm。由式(3) 得到试样测试点处所受弯曲正应力大小如表 2 所示。

表2 试样测试点处的弯曲正应力值

直径/mm	∞	88	60	46	42	31	25
弯曲正应力/MPa	0	85.23	125.00	163.04	178.57	241.94	300.00

1.4 试验数据的处理方法

进行试验之前, 将击穿试样用酒精擦拭干净, 充分干燥后连同电极系统浸入变压器油中。设定好试验所需的温度, 待达到所需实验温度并稳定 60 min 以后进行击穿测试。每种条件下至少测 10 个数据点, 若试样击穿之后表面碳化痕迹明显或击穿点明显偏离接触点, 则认为该数据不合格, 应该舍弃。Weibull 分布作为对失效数据进行统计分析的模型, 在对绝缘材料击穿数据的处理中得到广泛应用。图 8 给出了机械应力对 GF/EP 复合材料击穿强度影响的 Weibull 分布图, 从图中可得出给定条件下击穿数据的特征值, 并用此特征值进行数据的后续处理与分析。

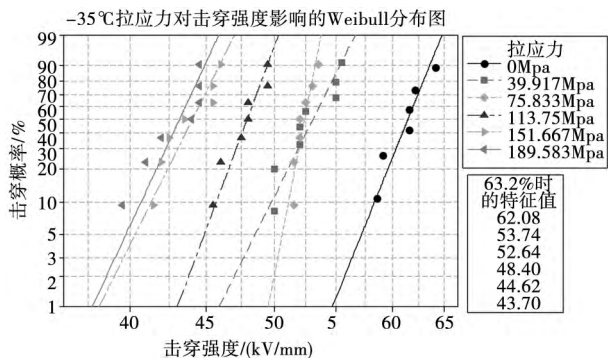


图8 机械应力对击穿强度影响的 Weibull 分布图

2 试验结果及分析

2.1 拉应力对介电强度的影响

GF/EP 复合材料的介电强度随拉应力的变化规律如图 9 所示。从图中可以看出: 在环境温度一定的情况下, 击穿强度随所受拉应力的增大而减小, 而且拉应力越大, 击穿强度的下降速率越快。

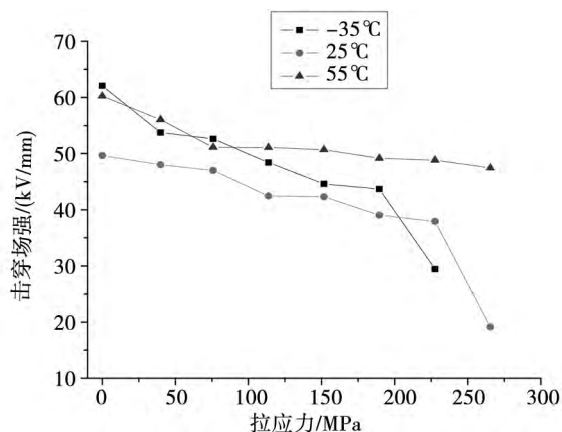


图9 不同温度下击穿强度随拉应力的变化规律

分析以上结果认为: GF/EP 复合材料的界面之间存在许多缺陷, 在静电力和拉应力共同作用下分子链内化学键变弱, 界面结构遭到破坏, 绝缘性能下降, 导致击穿强度降低。随着拉应力增大, 弱界面破

坏加剧,致使复合材料的击穿强度下降速率增大。

拉应力作用下 GF/EP 复合材料的介电强度随温度的变化规律如图 10 所示。从图中可以看出: 试样承受拉应力一定的情况下,击穿强度随着温度的升高呈现先降低后增大的趋势。

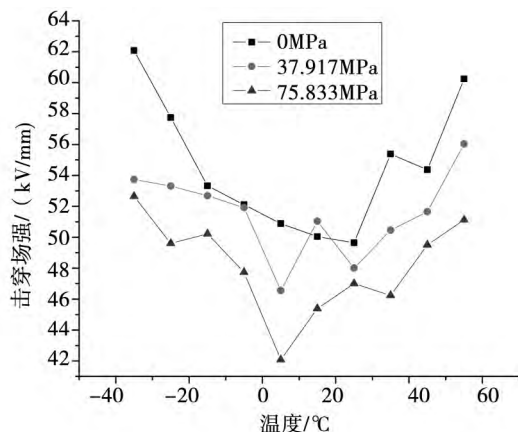


图 10 不同拉应力下击穿强度随温度的变化规律

固体电介质在电场作用下介质内部的损耗将引起发热,由于环境温度升高,散热条件不利,导致介质内部温度升高,击穿强度降低。数据处理过程中,假设试样的弹性模量为一常量,得出击穿强度随温度的升高呈先下降后增大的趋势。而实际情况下,当环境温度大于 0°C 时,GF/EP 复合材料的弹性模量随温度的上升而下降,即相同伸长量下,试样受到的拉应力随温度的升高而降低。因而,曲线的上升阶段符合前述的击穿强度随拉应力增大而减小的规律。

2.2 弯曲正应力对介电强度的影响

在研究弯曲正应力对 GF/EP 复合材料介电强度的影响中,环境温度从 -15°C 开始,每隔 10°C 梯度升温至 55°C 。分别在不同温度和不同弯曲正应力作用下以 500 V/s 的速度对试样加压,直至试样发生击穿。

GF/EP 复合材料的介电强度随弯曲正应力的变化规律如图 11 所示。从图中可以看出,在环境温度一定的情况下,GF/EP 复合材料的介电强度在弯曲正应力增大的初始阶段有所上升,当弯曲正应力增大到 85.23 MPa 后呈现下降的趋势,且弯曲正应力越大,介电强度下降速率越快。

分析以上结果认为: 在弯曲正应力增大的初始阶段,试样内部分子排列致密,致使在温度和应力的共同作用下的击穿强度有所上升,而后随着应力增大界面结构遭到破坏,绝缘性能下降,导致击穿强度

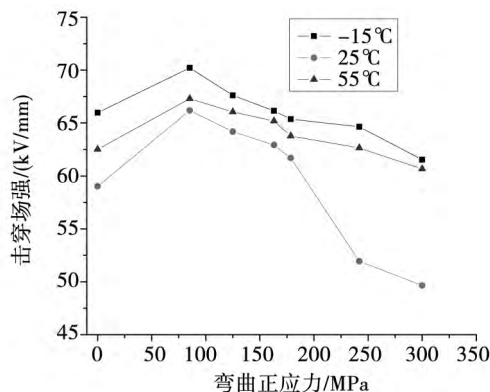


图 11 不同温度下击穿强度随弯曲正应力的变化规律

降低。

弯曲正应力作用下 GF/EP 复合材料的介电强度随温度的变化规律如图 12 所示。从图中可以看出,击穿强度随着温度的升高呈现先降低后增大的趋势。

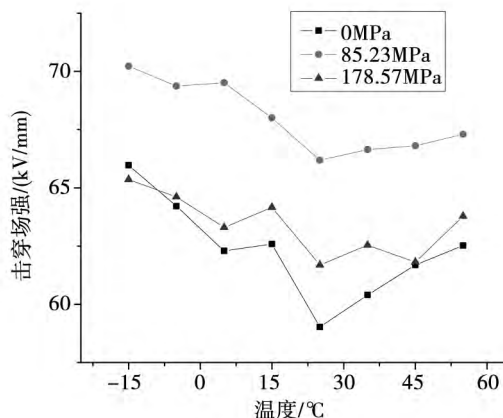


图 12 不同弯曲正应力下击穿强度随温度的变化规律

击穿强度随温度的变化规律与拉应力下击穿强度的变化规律相同,但是变化幅度减小,这与 C. H. Park^[5] 的研究结果相同,即相同应力作用下,试样的厚度会影响击穿强度的变化程度。GF/EP 复合材料的结构随温度变化比较复杂,由于复合材料中树脂基体和玻璃纤维的热胀冷缩能力不同,在不同温度、不同应力作用下,树脂基体和玻璃纤维的粘附力增强,界面处的微孔减少,使试样的击穿强度在低温和高温下有所提高。

3 结 论

通过对 GF/EP 复合材料的试样在不同温度、不同应力大小和不同应力作用形式下的击穿测试,可以得出以下结论:

1) 拉应力使 GF/EP 复合材料的界面结构遭到破坏,引起复合材料击穿强度降低,并且拉应力越大击穿强度下降速率越快。

2) 复合材料试样发生弯曲时,受到剪切力和拉应力的共同作用,导致材料的击穿强度在受力初始阶段有所上升,而后随着应力增大击穿强度逐渐降低。

3) 温度对 GF/EP 复合材料的击穿强度有显著影响,与室温下相比,高温和低温均能使试样的击穿强度得到提高。

参 考 文 献:

- [1] 翁春晓. 超低温用环氧树脂及其碳纤维织物增强复合材料的研究 [J]. 武汉: 武汉理工大学, 2012, 7-10.
- [2] 洪旭辉, 华幼卿. 玻璃纤维增强树脂基复合材料的介电特性 [J]. 化工新型材料, 2005, 33(4): 16-19.
- [3] 赵冲, 李忠华, 郑欢. 低温环境下变压器油纸复合绝缘材料受潮击穿特性研究 [J]. 变压器, 2013, 50(9): 58-61.
- [4] 张秋也, 陈庆国, 魏新芳, 等. 温度对油、纸介电参数及复合电场分布的影响 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(6): 59-64.
- [5] 申巍, 曹雯, 吴锴. 环氧/纸复合材料击穿特性及空间电荷的研究 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 1-6+35.
- [6] 张良, 吕家圣, 王永红, 等. 35kV 干式空心电抗器匝间绝缘现场试验 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(6): 66-71.
- [7] 骆晓龙, 张良, 王永红, 等. 干式空心电抗器匝间绝缘试验方法有效性分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(1): 74-78.
- [8] 王龙江. 空心电抗器绝缘电热联合老化试验方法研究 [J]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014: 2-6.
- [9] 敖明, 崔明, 李中华等. 高压固体复合绝缘材料电击穿试验研究 [J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 21-22+25.
- [10] 敖明. 户外干式空心电抗器表面树枝状放电试验研究 [J]. 中国电力, 2000, 33(3): 39-41.
- [11] XIUKE Y, ZHONGBIN D, YANIL Z. Fluid-thermal Field Coupled Analysis of Air Core Power Reactor [C] // Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF), 2012 Sixth International Conference on. IEEE, 2012: 1-4.
- [12] IBUCHI T, FUNAKI T. A Study on Copper Loss Minimization of Air-Core Reactor for High Frequency Switching Power Converter [C] 2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). 2013: 1-5.
- [13] 屠德民. 从工程电介质进展看前沿课题 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 8-15.
- [14] PARK C. H., KANEKO T., HARA M. Effects of Mechanical on The Dielectric Breakdown Strengths of PET and FRT [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1982, E1-17(6): 234-240.
- [15] PARK C. H., HARA M., AKAZAKI M. Effects of Temperature and Voltage on Dielectric Breakdown Strengths of PET and FRP under Mechanical Stresses [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1982, 17(6): 546-553.
- [16] SAUERS I., JAMES D. R., ELLIS A. R. Surface Flashover of Fiberglass Reinforced Plastic in Vacuum at Cryogenic Temperature [J]. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002.
- [17] JAMES D. R., SAUERS I., ELLIS A. R. Breakdown and Partial Discharge Measurements of Some Commonly Used Dielectric Materials in Liquid Nitrogen for HTS Applications [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(3): 1513-1516.
- [18] TUNCER E., SAUERS I., JAMES D. R. Electrical Insulation Characteristics of Glass Fiber Reinforced Resins [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 2359-2362.
- [19] 曾庆敦, 邹波. 单向复合材料在低温下的应力集中及强度 [J]. 航空材料学报, 2005, 25(1): 58-62.
- [20] 于涛, 刘钧, 肖加余. 拉应力对玻璃纤维增强聚合物基复合材料介电强度的影响 [J]. 复合材料学报, 2012, 29(6): 73-77.
- [21] 王振发. 工程力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 157-181.

(编辑: 王 萍)