

电磁轨道发射装置内膛绝缘性能研究

赵伟康^{1,2,3}, 徐蓉^{1,3}, 袁伟群^{1,3}, 严萍^{1,3}

1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190
2. 中国科学院大学, 北京 100190
3. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 北京 100190

摘要 脉冲大电流放电过程中的高温烧蚀将降低绝缘支撑的绝缘性能, 影响系统的寿命和效率。为研究烧蚀对环氧树脂绝缘性能的破坏作用, 开展了模拟实验, 利用氩弧焊对环氧树脂样品进行高温烧蚀处理, 通过改变烧蚀电流、时间、距离和面积, 获得不同烧蚀情况的样品。从表面电阻率和沿面闪络电压两方面对样品的绝缘性能进行了评估。结果表明, 环氧树脂在高温烧蚀后绝缘性能大幅度降低。通过扫描电子显微镜和能谱分析, 样品表面粗糙度增大, 成分中氧化物的含量上升, 导致了绝缘性能降低。

关键词 环氧树脂; 高温烧蚀; 绝缘性能; 表面电阻率; 沿面闪络电压

大电流直线驱动装置能够将物体加速到 10 km/s, 常用于军事、航空航天和科学实验等领域。常用作支撑的环氧树脂硬度高、质量轻、柔韧性好, 具有良好的物理和化学特性, 是一种十分稳定的绝缘材料^[1]。然而, 大电流直线驱动装置常运行在较为恶劣的环境, 烧蚀、金属沉积、冲击力都会对装置内膛的环氧树脂产生严重的破坏, 造成绝缘支撑性能的下降。其中, 绝缘支撑闪络电压的大幅下降, 增加了装置击穿的概率, 威胁到整个实验装置的安全; 同时, 表面电阻的下降会使整个系统的效率降低。因此, 研究环氧树脂在大电流放电实验后的性能劣化情况, 尤其是绝缘性能劣化情况, 具有十分重要的意义。

前期开展了小口径下的重复发射实验, 实验充电电压 4.5 kV, 电流 170 kA, 电枢质量 1.94 g。对 30 发重复发射实验后的内膛绝缘部件进行测试分析发现, 影响绝缘支撑性能下

降的因素主要包括膛口烧蚀、金属沉积和冲击断裂, 如图 1 所示。在实际发射过程中, 受到电磁、力和热等诸多因素的影响, 难以衡量单一因素对内膛绝缘部件的影响程度和规律。本文主要研究了膛口区域高温烧蚀, 这种单一因素对于环氧树脂性能的影响, 为实际发射过程中绝缘性能破坏的机理研究提供参考。

目前, 国内外关于环氧树脂烧蚀问题的研究主要分为两种^[2]。一种是在相对较低的温度(200℃以下)、较长时间(1 h 以上)下环氧树脂的老化现象。李庆民等^[3]在 120℃下, 研究了高频正弦电压下环氧树脂的绝缘失效问题。另一种是在相对较高温(200℃以上)、较短时间(1 h 以下)下环氧树脂的损伤现象。陈博等^[4]研究了激光作用下环氧树脂复合材料的热损伤规律。大电流直线驱动装置上发生的烧蚀和第二种类型类似, 短时间内高能量的烧蚀, 但国内外此类研究主

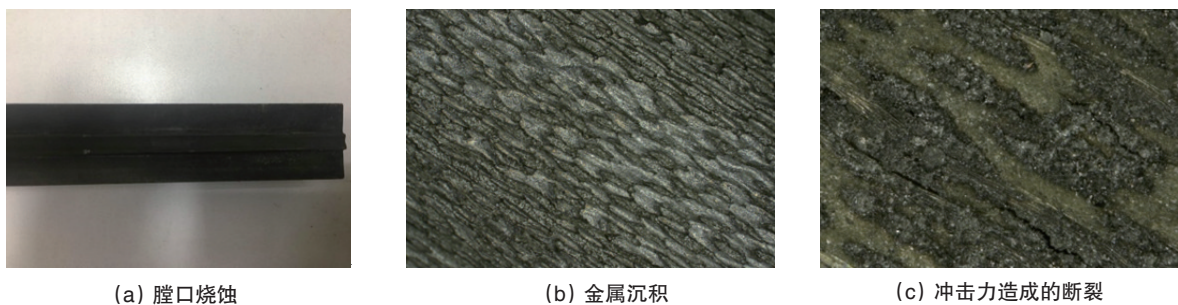


图 1 脉冲大电流过程中发生损伤的绝缘支撑

Fig. 1 Insulating support after pulsed high current erosion

收稿日期: 2017-02-28; 修回日期: 2017-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51237007, 51577178)

作者简介: 赵伟康, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术, 电子信箱: zhaoweikang@mail.iee.ac.cn; 徐蓉(通信作者), 副研究员, 研究方向为脉冲功率技术, 电子信箱: xr@mail.iee.ac.cn

引用格式: 赵伟康, 徐蓉, 袁伟群, 等. 电磁轨道发射装置内膛绝缘性能研究[J]. 科技导报, 2017, 35(15): 34-39; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.15.004

要集中于材料烧蚀后的表面损伤和力学性能,对绝缘性能的研究较少,因此研究了烧蚀后环氧树脂绝缘性能劣化情况。

1 实验研究

1.1 实验材料

实验采用目前大电流直线驱动装置中常用的绝缘材料玻璃纤维增强环氧树脂3240,尺寸为42 mm×30 mm×5mm,密度1.8 g/cm³,弯曲强度294 MPa,抗冲击强度150 kJ/cm²,表面电阻率>10⁷ MΩ,具有良好的力学和电学性能。

1.2 烧蚀实验

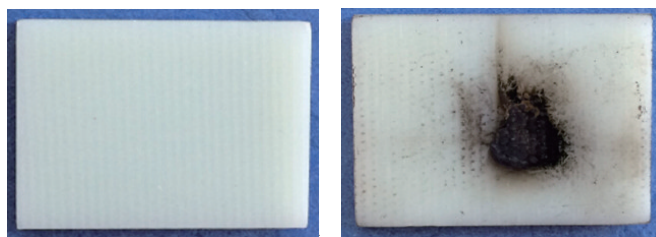
实际直线驱动装置中绝缘劣化过程十分复杂,很难直接进行测试和分析。为研究腔口区域的电弧烧蚀部件对绝缘性能的影响,设计了烧蚀模拟实验。实验中采用Sanarg 200P氩弧焊机作为高温烧蚀装置,焊机的输入电流为5~1000 A,能够产生温度6000~8000 K的电弧,电弧燃烧稳定,能量集中。实验中,随着烧蚀电流、烧蚀时间、烧蚀距离和烧蚀面积的变化,样品的破坏程度也不同。在避免环氧树脂燃烧的情况下,为获得不同烧蚀情况的环氧树脂样品,实验参数需要在一定范围内变化。实验中针对烧蚀的电流、时间、距离和面积4个变量设计了4组实验(表1)。

表1 环氧树脂烧蚀实验参数

Table 1 Experimental parameters of epoxy resin ablation

编号	输入电流/A	时间/s	距离/mm	烧蚀点数
1	20~40	5	10	1
2	30	2~15	10	1
3	30	5	5~15	1
4	30	5	10	1~4

图2为第1组实验电弧烧蚀作用前后(输入电流30 A,燃弧时间5 s)试样的宏观形貌。可以看到样品在电弧作用的区域明显发黑,复合材料表面发生破坏性变化,出现严重损伤。



(a) 未破坏

(b) 电弧作用后

图2 试样在电弧作用前后对比

Fig. 2 Diagram of samples before and after arc process

1.3 表面电阻率测量

电弧烧蚀作用后会造成长复合材料的绝缘性能下降,衡量材料绝缘性能的主要指标有3个^[6],表面电阻率、介质损耗及击穿电压。由于主要在磁场中应用,介质损耗的影响很小,

因此本研究主要从表面电阻率和击穿电压2个指标来衡量环氧树脂的绝缘性能。过低的电阻率和击穿电压会加大绝缘材料发生闪络的概率,引发意外事故。此外,过低的表面电阻会引起电流分流,降低系统效率。

使用吉时利6517B型高阻表对表面电阻率进行测量,电极为环形电极,电极距离为2 mm。测试标准按照《GB 1410—2006 固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法》,采用三电极法测量,表面电阻率的计算公式为^[6]

$$\rho_s = R_s \frac{2\pi d}{d_2 - d_1} \quad (1)$$

式中, ρ_s 为表面电阻率, Ω ; R_s 为材料的表面电阻, Ω ; d_2 为测量电极的直径,mm; d_1 为环形电极的内径,mm。

1.4 闪络电压测试平台

闪络测试平台如图3所示,主要由3部分构成。1) 电源部分,提供闪络需要的微秒脉冲电压;2) 放电部分,由电极和实验腔体构成,是实验过程中发生沿面闪络的区域;3) 测量部分,通过高压探头和示波器对闪络电压进行测量。

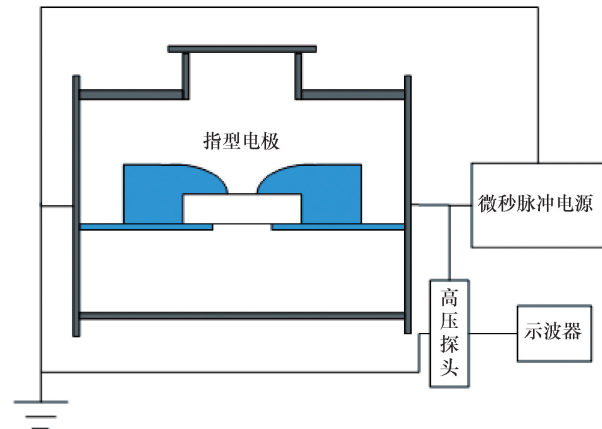


图3 闪络实验平台接线图

Fig. 3 Connection diagram of flashover platform

放电腔体实物如图4所示。实验腔体为不锈钢圆柱形结构,内径306 mm,高320 mm,腔体正前方设有观察窗,用于观测闪络现象,确定闪络发生。固定试样使用黄铜电极,前端曲率半径为1 cm,电极间距设为7 mm。



图4 放电腔体

Fig. 4 Discharge chamber

发射实验中膛口电压上升沿时间为微秒量级。因此,采用微秒脉冲电源作为实验电源,与实际发射过程中膛口区域

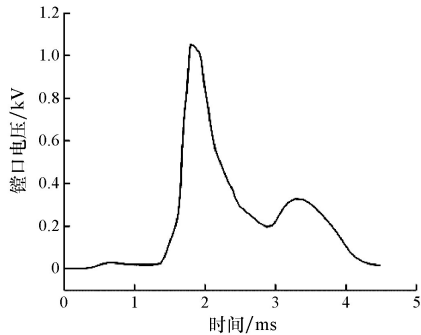


图5 发射实验中的膛口电压

Fig. 5 Muzzle voltage of emission experiment

的电弧类似。实验电源采用课题组自主研制的微秒脉冲电源 CMPC-40D,输出电压最高可达 40 kV,电压上升沿 0.5 μ s,脉宽 8 μ s(图5)。

电压测量采用的高压探头为美国 TekP6015A,测量范围为 0~40 kV,示波器型号为 TekDPO2024。在实验过程中,可以手动控制进行单次放电,放电间隔时间约为 30 s,每个电压等级进行 10 次脉冲闪络实验。脉冲峰值从 1 kV 开始调节并以一定的间隔升高电压,若有 5 次脉冲实验出现闪络,则定义该闪络电压为 50%闪络电压;若 10 次脉冲实验全部出现沿面闪络,则定义该闪络电压为连续闪络电压。微秒脉冲电源典型输出波形以及发生闪络时的击穿波形如图 6 所示。

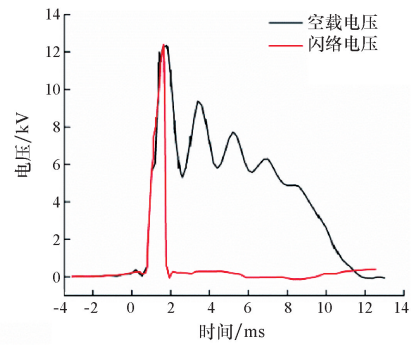


图6 微秒脉冲电源输出波形及闪络波形

Fig. 6 Waveforms of μ s-grade pulse power and flashover

2 结果与分析

2.1 表面电阻率

由图7表面电阻率的测量结果可以看出,经过烧蚀后,环氧树脂表面受损区域的电阻率发生明显下降,下降程度与烧蚀实验的参数有关,且表面电阻率接近半导体的状态,当表面电阻率继续下降时,会引起脉冲电流的分流,降低系统效率,影响发射性能。随着氩弧焊输入电流的增大,烧蚀温度越高,材料表面电阻率降低越剧烈;随着燃弧时间增长,积聚的电弧能量越高,材料表面电阻率越低;烧蚀的距离越近,烧蚀温度越高,表面电阻率越低;烧蚀的面积越大,损伤越为严重,表面电阻率越低。

图8为第1组实验样品表面电荷的消散速率,消散速率与表面电阻率的趋势一致。良好的环氧树脂消散速率为每

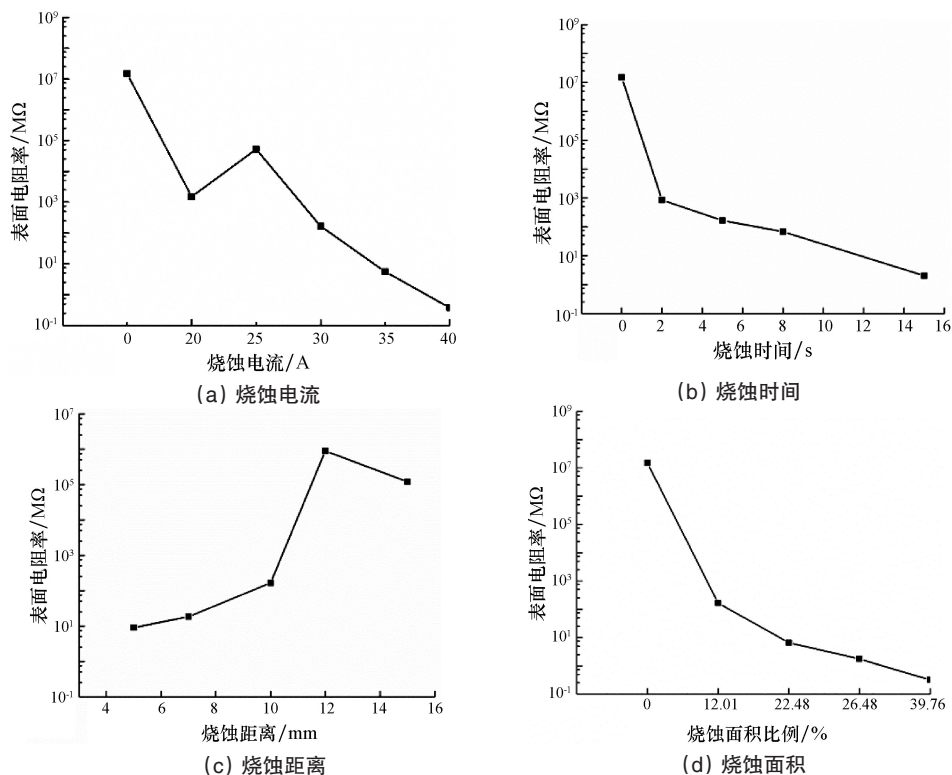


图7 烧蚀后环氧树脂的表面电阻率变化曲线

Fig. 7 Surface resistivity curves of epoxy resin after ablation

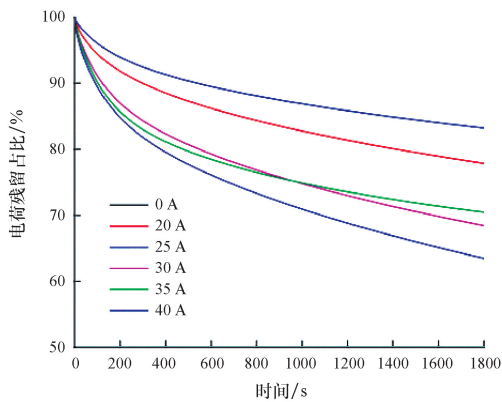


图8 不同样品的表面电荷消散示意

Fig. 8 Potential dissipation curves of different samples

小时1%,而烧蚀后样品的消散速率远大于此数值。过快的消散速率表明绝缘材料的性质更接近半导体,不利于闪络性能的改善。

2.2 沿面闪络电压

对不同烧蚀条件下绝缘样品的闪络电压进行了测量,结果如图9所示。与未被烧蚀作用的样品相比,经过电弧烧蚀后的样品,沿面闪络电压大幅下降,说明绝缘材料表面经过

高温烧蚀后,耐受电压会降低。50%闪络电压和连续闪络电压两者变化趋势相似,均可以反映材料的绝缘性能。

随着电弧输入电流的增加,烧蚀温度升高,试样的连续闪络电压总体呈下降趋势,下降到最低点(输入电流30 A)后会有稍许升高。此外,在实验中发现,对于未被烧蚀处理过的样品,50%闪络电压与连续闪络电压均为15 kV,变异系数较小。而对于烧蚀处理过的样品,其沿面闪络电压数值较分散,随机性较高,变异系数较大。

随着燃弧时间的增长,烧蚀能量增大,样品的闪络电压变化规律并不明显,闪络电压总体上在8 kV左右波动,明显低于未被烧蚀处理的样品15 kV。烧蚀面积的影响与烧蚀时间类似,闪络电压下降明显,但面积增大到一定程度后,闪络电压趋于稳定。

随着烧蚀距离的增大,闪络电压的增加呈现先平稳,然后迅速上升,最后再次出现平稳的趋势。在距离较近的情况下,烧蚀已经十分严重,电压下降不明显;在距离较远的情况下,烧蚀均较轻,因此与未被烧蚀的样品相比差距不大。

烧蚀处理后样品的连续闪络电压最低下降到4 kV左右,距离和面积对闪络电压的影响明显,在与实际发射实验后表面电阻率数据接近的情况下,沿面闪络电压的降低仍在膛口区域的安全电压范围之内。

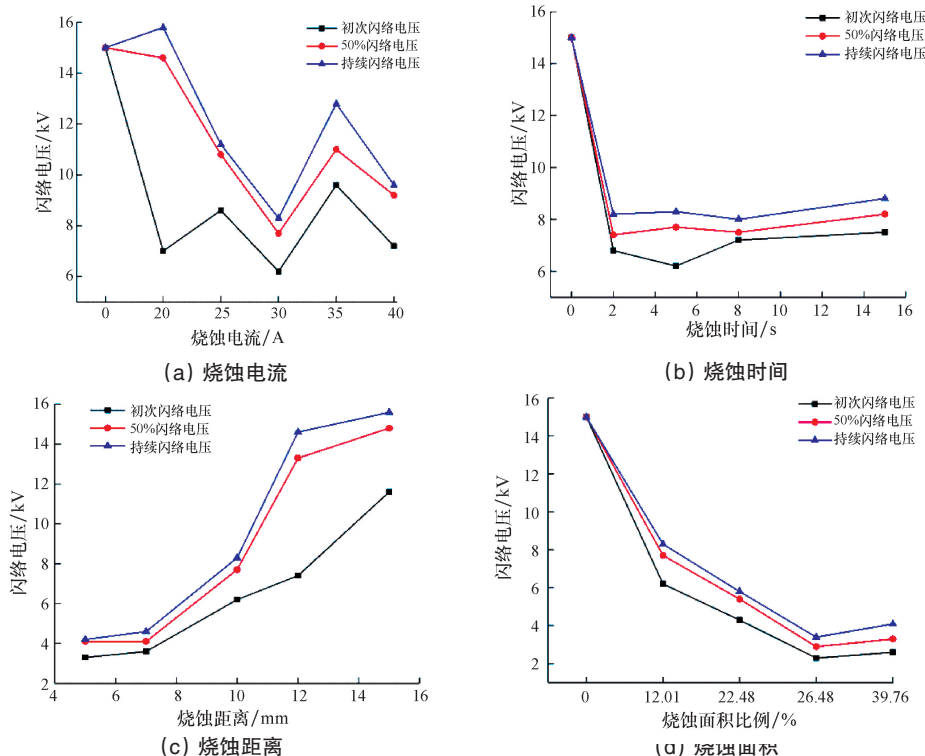


图9 烧蚀前后环氧树脂的沿面闪络电压变化曲线

Fig. 9 Surface resistivity curves of epoxy resin after ablation

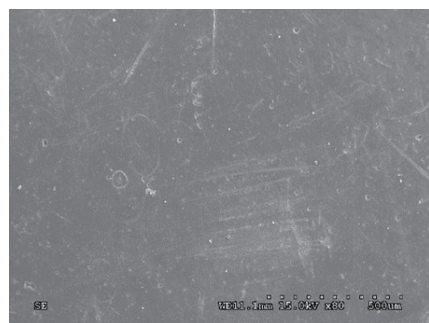
3.3 表面形貌和表面成分分析

为分析绝缘劣化的原因,使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和能谱仪(energy dispersive spectroscopy, EDS)对环氧树脂样品进行观察和测量。使用场发

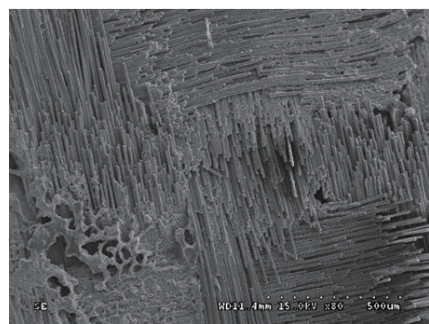
射型扫描电子显微镜S-4300对烧蚀作用前后的环氧树脂3240复合材料进行微观形貌观察,首先放大80倍对损伤区域的总体形貌进行观察,再选取局部细节放大500倍进行观察并进行EDS分析。

由图 10 可以看出,烧蚀作用前的材料表面较为光滑,而经过电弧高温烧蚀后,复合材料表层的环氧树脂已经发生高温分解而脱落,暴露出交错层叠排列的根状玻璃纤维,其中部分玻璃纤维已经发生断裂。环氧树脂的汽化温度为 510℃,远低于玻璃纤维的汽化温度^[7]。在氩弧焊的作用下,树脂会首先发生热解过程,向外释放气体,带走大量热量,这对熔点较高的玻璃纤维有一定保护作用^[8]。但玻璃纤维具有较高的各向异性热膨胀系数,烧蚀给材料性能带来无法忽略的各向异性效应,每个方向膨胀度的差异产生热应力,进而发生分层。玻璃纤维本身的导电性高于环氧树脂,随着烧蚀程度的加深,玻璃纤维增强型复合材料表面环氧树脂含量降低,玻璃纤维相对含量上升,材料表面电阻率会降低^[9]。

选取电弧未处理样品和电弧电流为 25 A 的样品进行局



(a) 未破坏



(b) 电弧输入电流 25 A

图 10 烧蚀前后样品表面形貌

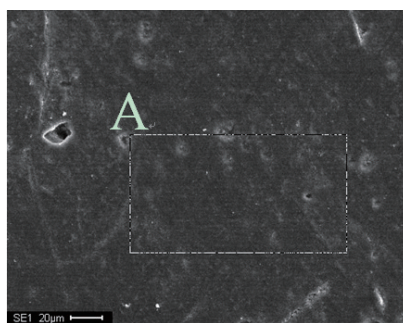
Fig. 10 Surface topographies of sample before and after ablation

通过 SEM 可以看到,烧蚀后的环氧树脂表面凹凸不平,表面粗糙度有所增加,甚至有些区域出现了明显的断裂。这种表面状况,尤其是断裂部分会造成表面电场的畸变,使局部区域电场较强。这部分局部电场较强的区域在相对较低的外加电场下就会产生初始电子,根据二次电子崩理论,初始电子不断撞击材料表面进而产生电子崩,使得闪络形成^[11]。因而,烧蚀以后的绝缘材料闪络电压较低。

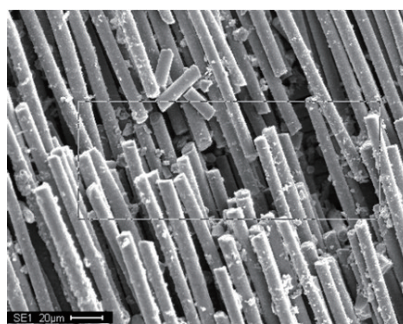
EDS 结果如图 12 所示。可以看出,烧蚀后样品表面碳元素含量明显下降,而氧、硅、钙元素含量有所上升。结合 SEM 图像可以看出表面并没有发现明显碳化的痕迹,说明环氧树脂表面并没有发生碳化。这是由于过高的温度使得表面碳化物质难以存在,仅存在一些钙和硅的氧化物。这些氧化物

部高倍放大并对选中的区域进行 EDS 分析,其结果如图 10 所示,A 区域和 B 区域分别是烧蚀前后进行 EDS 分析的区域(图 11)。在电弧烧蚀之后,环氧树脂发生热解,使得暴露出的玻璃纤维断裂十分严重。经能谱检测分析,铝、硅、钙元素主要来自电弧烧蚀后暴露出的玻璃纤维束,硅、钙元素含量在电弧作用后都有显著升高,另外碳元素含量随着烧蚀严重程度增加而降低,而氧元素含量则随着烧蚀程度增加而升高。

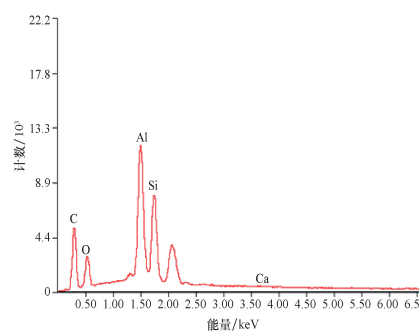
在电弧高温作用下,复合材料表面环氧树脂发生高温分解,分子链出现裂解,大量分解产物以气体形式排出,主要为二氧化碳^[10],降低了碳元素的含量,同时树脂基体的脱落进一步加重玻璃纤维束的断裂,使复合材料表面受到严重的破坏。氧元素含量明显上升则说明在烧蚀过程中氧化物的含量上升,这部分氧化物主要是玻璃纤维中高熔点的氧化钙和氧化硅。



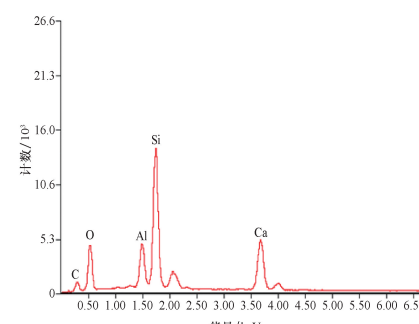
(a) 未破坏



(c) 电弧输入电流 35 A



(b) A 区域 EDS 能谱分析



(d) B 区域 EDS 能谱分析

图 11 烧蚀前后样品局部形貌及相应 EDS 能谱分析

Fig. 11 Local appearances of sample before and after ablation and corresponding EDS spectrum analysis

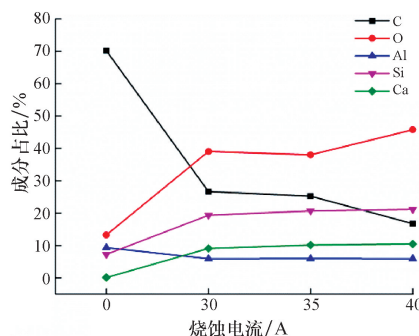


图 12 烧蚀前后样品元素占比

Fig. 12 Percentages of sample atoms before and after ablation

的存在会大大改变材料的表面态。表面态的存在会促进电子活动,影响材料表面带电特性,导致表面载流子浓度增加^[12]。对于环氧树脂这种载流子浓度较低的材料,表面电阻率会有明显下降。

4 结论

通过设计模拟实验,研究了高温烧蚀对于环氧树脂绝缘性能的影响,得到以下5点结论。

1) 烧蚀作用后环氧树脂复合材料表面会发生严重损伤,表面电阻率与未经烧蚀作用的样品相比大幅降低,最大可达7个数量级。绝缘支撑的表面电阻过低会降低直线驱动装置的能量转换效率。

2) 通过搭建的沿面闪络实验平台,针对4种实验变量进行了沿面闪络实验,结果表明电弧高温烧蚀会在一定程度降低绝缘材料的耐受电压。

3) 通过微观形貌的观察和烧蚀前后表面成分的分析,可以看出经电弧高温烧蚀后复合材料表面环氧树脂脱落,裸露出玻璃纤维,使表面态发生改变,电导率提高。同时,粗糙度的增加促进了初始电子的产生,使得闪络电压下降。

4) 烧蚀损伤会造成绝缘支撑表面电阻和耐受电压的下降。对于实际的大电流驱动装置,烧蚀后的闪络电压依然在可接受的范围内,但表面电阻率降低以及效率的下降是将来仍需解决的问题。

5) 未来可考虑从两个方面提高复合材料的抗烧蚀能力。一是改变复合材料的成分,例如增加高熔点玻璃纤维含量来增强复合材料的性能;二是尝试表面喷涂耐热陶瓷材料改善环氧树脂表面性能。

参考文献 (References)

- [1] Kitamura Y, Hirabayashi S. Partial discharge deterioration of epoxy resin for electronic parts[C]//Proceedings of the Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena. Millbrae: IEEE, 1985: 485-490.
- [2] 李波. 湿热老化对环氧树脂复合材料电学性能影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- Li Bo. Study on the effect of hydrothermal on electrical properties of epoxy

- resin composites[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [3] 李庆民, 刘伟杰, 韩帅, 等. 环氧树脂绝缘高频电热联合老化中局部放电特性分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 389-395.
- Li Qingmin, Liu Weijie, Han Shuai, et al. Analysis on partial discharge characteristics of epoxy resin insulation during high-frequency electrical-thermal aging[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 389-395.
- [4] 陈博, 万红, 穆景阳, 等. 重频激光作用下碳纤维/环氧树脂复合材料热损伤规律[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(4): 547-552.
- Chen Bo, Wan Hong, Mu Jingyang, et al. Ablative mechanism of carbon-fiber/epoxy composite irradiated by repetition frequency laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(4): 547-552.
- [5] 邹平. 植物绝缘油的油纸浸渍与水解动力学特性及纳米改性方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- Zou Ping. Research on oil-paper impregnation and hydrolysis kinetic characteristics and nano-modification approaches of vegetable insulating Oils[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [6] 杨丽君, 徐积全, 胡恩德, 等. 变压器油中腐蚀性硫浓度对绕组绝缘电气性能的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 42-48.
- Yang Lijun, Xu Jiquan, Hu Ende, et al. The influence of corrosive sulfur contentation in transformer oil to the electrical properties of insulated windings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 42-48.
- [7] Feraboli P, Kawakami H. Damage of carbon/epoxy composite plates subjected to mechanical impact and simulated lightning[J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(3): 999-1012.
- [8] Dong Q, Guo Y, Sun X, et al. Coupled electrical-thermal-pyrolytic analysis of carbon fiber/epoxy composites subjected to lightning strike [J]. Polymer, 2015, 56: 385-394.
- [9] Kawakami H, Feraboli P. Lightning strike damage resistance and tolerance of scarf-repaired mesh-protected carbon fiber composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(9): 1247-1262.
- [10] 湛志华. 废弃电路板环氧树脂真空热裂解实验及机理研究[D]. 武汉: 中南大学, 2012.
- Zhan Zhihua. Vacuum pyrolysis and the mechanism research on waste epoxy printed circuit boards[D]. Wuhan: Central South University, 2012.
- [11] Sweeney M A, Brandenburg J E, Gerber R A, et al. Analysis of mechanisms for anode plasma formation in ion diodes[C]//Proceedings of the 1983 5th International Conference on High-Power Particle Beams. San Francisco: IEEE, 1983: 203-207.
- [12] 赵文彬. 冲击电压下半导体材料表面闪络现象与机理的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2007.
- Zhao Wenbin. Phenomena and mechanism of surface flashover across semiconducting materials under pulsed voltage[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2007.

Investigation on insulation support performance in electromagnetic launcher

ZHAO Weikang^{1,2,3}, XU Rong^{1,3}, YUAN Weiqun^{1,3}, YAN Ping^{1,3}

1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China

3. Key Laboratory of Power Electronics and Power Drives, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The high temperature ablation in the process of pulsed high current discharge would reduce the insulation performance of the insulation support and affect the life and efficiency of the system. To investigate the destructive effect of ablation on epoxy resin insulation, we use argon arc welding to modify the surface epoxy resin with different values of ablation current, time, distance and area so as to obtain samples with different ablation situations. The surface resistivity and surface flashover voltage of the samples are then measured. The results show that the insulation property of the epoxy resin after high temperature ablation degrades greatly. Scanning electron microscopy and energy spectrum analysis indicate that the increasing surface roughness and oxide would reduce the insulation property of epoxy resin.

Keywords epoxy resin; high temperature ablation; dielectric property; surface resistivity; surface flashover voltage

(责任编辑 傅雪)