

# 某航天硅基复合材料防静电性能测试研究

杜照恒, 魏明, 胡小锋, 王雷

(军械工程学院 静电与电磁防护研究所, 石家庄 050003)

**摘要:** 高速运动的航空器在其飞行过程中会经历复杂的空间环境, 使其静电安全性遭受严峻挑战; 针对某型航空隔热瓦硅基复合材料讨论分析了多种防静电性能的评估方法, 确定了静电衰减时间作为其防静电性能指标, 并采用充电法对静电衰减时间进行了测试研究, 获得了该材料在烧蚀前后的静电衰减特性, 为评价高速飞行器的静电安全性提供了重要依据; 研究结果表明, 烧蚀前的硅基复合材料静电衰减时间长, 残余电量较大; 烧蚀后的硅基复合材料静电衰减时间大大减小, 残余电量显著降低, 防静电性能远好于烧蚀前的硅基复合材料。

**关键词:** 静电衰减时间; 充电法; 硅基材料

## Study on Silicon-based Composite Electrostatic Resistant Property

Du Zhaoheng, Wei Ming, Hu Xiaofeng, Wang Lei

(Research Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Mechanical Engineering College, Shijizhuang 050003, China)

**Abstract:** The aircraft at high-speed movement in its flight process will undergo complex space environment, and suffered a serious challenge on electrostatic resistant property. Aiming at some silicon-based composites, we analyzed the assessment methods of electrostatic resistant property to determine static decay time as the key assessment parameter, and researched the static decay time of the silicon-based composites, obtained the fading characteristic before and after ablation, which will provides an important basis for the static security of high-speed aircraft. The results shows that: Silicon-based composites before ablation has a long static decay time and a large residual charge; the static decay time and the residual charge of silicon-based composites after ablation are significantly reduced, which greatly benefit the electrostatic resistant property.

**Key words:** electrostatic decay time; charging method; silicon-based composite material

## 0 引言

航空器在其任务过程中会经历对流层、平流层和热层的复杂气象环境<sup>[1]</sup>, 其表面材料会随航空器一起经历速度、高度和表面温度的大幅变化, 并在此过程中持续与大气中的灰尘、冰晶等微粒发生碰撞摩擦, 发生摩擦起电, 在航空器表面沉积大量的静电电荷<sup>[2-3]</sup>。尤其在航空器再入过程中, 表面材料会与空气及其微粒发生剧烈的摩擦, 产生高温的气体鞘层甚至形成“黑障”, 使摩擦起电情况更为复杂和严峻<sup>[4]</sup>。当机身电荷量持续增加以致航空器尖端或凸起位置处电场强度达到空气的击穿阈值时, 就会发生强烈的静电放电, 辐射很强的电磁波<sup>[5-7]</sup>, 干扰通信、导航系统和其它灵敏设备, 给飞行安全带来严重威胁。

因此如何有效减少静电电荷积累, 科学评估材料的防静电性能, 就成为亟待解决的课题。本文针对某航空硅基复合材料, 对其飞行任务前后不同烧蚀情况的防静电性能进行了研究, 为评价飞行器的静电安全性提供了重要依据。

## 1 防静电性能评估方法

传统上认为可以通过测量材料的体电阻率、表面电阻率等来评价材料的防静电性能<sup>[8]</sup>, 但是很多材料在静电高压的强电场作用下, 电阻特性随场强的变化而变化, 呈现非线性的特征, 因此在低压下测定的电阻率很难科学表征材料的真实防静电性能。此外, 本研究中的硅基复合材料由非均质多层网状材料编织构成, 试验样块的不同截取方式会对电阻测试结果产生影响。因此, 单纯靠测量材料的电阻率则难以全面评价其防静电性能<sup>[9]</sup>。

更适当的方法是以特定方式在被测材料表面上堆积静电电荷, 同时利用快速响应的非接触式静电场强计来直接测量材料表面电位变化的方法来评价材料的静电耗散能力, 即静电电荷衰减测试法<sup>[10]</sup>。根据被测试样带电方式的不同, 目前测试方法主要有电晕喷电法、摩擦法和充电法<sup>[11]</sup>。

电晕喷电法是采用电晕放电的方法, 使试样表面上聚集电荷而成为带电体, 通过快速响应场强计来观察试样表面电荷自然消散情况, 它操作简单、重复性好, 可以对被测材料实现非破坏性测量, 测试电压和极性都可以控制, 测试结果在一定程度上反映了材料的静电衰减性能。但电晕放电时产生的激发态离子和光子, 可对材料产生 Cross-over 效应<sup>[7]</sup>, 对试验结果产生影响。

摩擦法是一种应用比较早的材料静电衰减测试方法, 英国标准 BS7506, 美国电子工业委员会标准 EIA-541, 我国标准 GB/T 12703-91 以及 JXUB 4-96 对摩擦法测量材料的静电电荷衰减时间都有规定, 军械工程学院静电与电磁防护研究所

收稿日期: 2014-03-16; 修回日期: 2014-04-21。

基金项目: 国家自然科学基金 (61172035)。

作者简介: 杜照恒 (1986-), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事静电防护理论与技术方向的研究。

魏明 (1968-), 男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 主要从事电磁脉冲效应与防护技术方向的研究。

亦在该领域进行了许多卓有成效的研究<sup>[11]</sup>。该方法主要用于测量织物和防静电工作服的静电带电能力, 织物经过摩擦后的带电电位越低, 其防静电性能越好, 比较接近材料的实际带电和消散过程, 能更加真实地反映出被测材料的静电电荷衰减特性。但本试验材料为固定尺寸的厚板状矩形, 与标准要求不符, 且试验方法与材料实际经历的静电过程相差较大, 试验重复性较差, 不适用与本材料防静电性能测试。

利用充电带电法测量材料的静电衰减时间是美联邦标准 FED-STD-101C 介绍的方法, 也是美军标 MIL-B-81705C 和国军标 GJB2605-96 推荐的评价防静电、防射频阻隔材料静电衰减性能的标准测试方法。它是将被测试样固定于两试样夹之间, 利用高压直流电源 (5 kV) 通过试样夹对试样充电, 当被测试样上的电位不再上升时, 将试样夹接地, 通过正对着试样中心的非接触式静电电位计测量试样表面电位的衰减情况, 计算静电衰减时间常数  $\tau$ 、半衰期  $t_{1/2}$  或  $V_1$  到  $V_2$  的衰减时间。较前两种测试方法, 充电法具有重复性好、对被测量影响小及试验简单方便等优点, 因此本文采用该方法对硅基复合材料开展防静电性能评估。

## 2 硅基复合材料充电法测试

物体的静电起电过程, 实际上是电荷产生和电荷消散的动态平衡过程。物体的电荷消散能力越强, 其带电能力越弱。静电衰减时间就是定量描述材料电荷消散能力的物理量, 静电衰减时间越长, 材料的绝缘程度越高, 带电能力越强。在实际工作中, 经常用到静电衰减时间常数  $\tau$ 、静电衰减半值时间 (亦称半衰期)  $t_{1/2}$ 、 $V_1$  到  $V_2$  的衰减时间这几个物理量<sup>[7]</sup>。

静电衰减时间常数  $\tau$ : 外界作用撤除后, 物体表面的电位值  $V$  (或所带电荷量  $Q$ ) 衰减到其初始值  $V_0$  (或  $Q_0$ ) 的  $e$  分之一时所需要的时间。即

$$t = \tau \text{ 时, } V = V_0 / e = 0.368V_0 \quad (1)$$

静电衰减半值时间 (亦称半衰期)  $t_{1/2}$ : 外界作用撤除后, 物体表面的电位值  $V$  (或所带电荷量) 衰减到其初始值  $V_0$  的一半时, 所需要的时间。在相同的测试条件下, 若材料的静电特性与测试电压关系不大时, 则有

$$t_{1/2} = \tau \ln 2 = 0.693\tau \quad (2)$$

$V_1$  到  $V_2$  的衰减时间: 外界作用撤除后, 物体表面的电位值由确定值  $V_1$  衰减到确定值  $V_2$  时所需要的时间。

利用充电法对硅基复合材料的静电衰减时间进行测量的装置的原理如图 1 所示, 它由两组试样夹、高压直流电源、高压开关、非接触式静电电位计和记录仪或数字存储示波器等组成。每组试样夹由一根方形铜杆和一根方形聚四氟乙烯杆组成, 两组试样夹用有机玻璃等绝缘材料平行固定于静电电位计的壳体上, 使电位计的探头对准被测试样的中央。两组试样夹的铜杆位于被测试样的同一侧, 都用高压线接到高压开关的中间触点, 以便对被测试样的某一面进行充电或放电, 测试该面的静电衰减时间。

无论是静电衰减常数  $\tau$ 、半衰期  $t_{1/2}$ , 还是测量  $V_1$  到  $V_2$  的衰减时间, 抑或是 GJB2605-96 里规定的衰减至初始电压 99% 所需的静电衰减时间, 其测试原理都一样, 均是测出从初始电压到终止电压经过的时间。因此, 为拓展仪器的适用范围, 设计了专用的测试软件, 使其可以灵活的测量初始电压衰减至自身的 1/e、1%、20%、30%、40%、50%、60%、

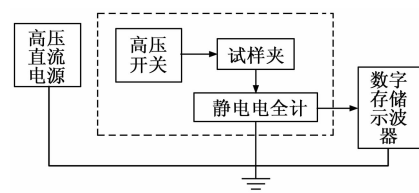


图 1 充电式测量装置结构示意图

70%、80%、99% 的静电衰减时间, 如图 2 所示。

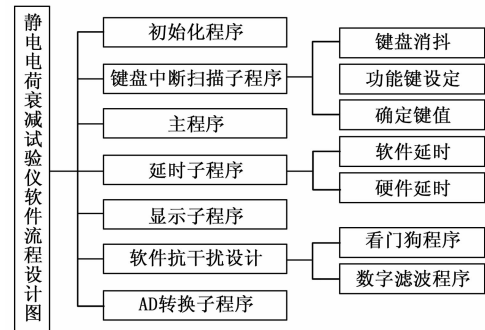


图 2 测试仪软件总体设计图

需要特别注意的是, 必须在实验前将待测材料放入密闭试验箱中, 在实验环境 ( $RT: 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH: 30\% \pm 5\%$ ) 同化不少于 48 h, 为避免影响实验结果, 样片应表面平整, 材料无缺陷。试验时, 正确连接高压直流电源、高压开关、非接触式静电电位计和记录仪或数字存储示波器等仪器设备, 检查确定无误后, 再通过密封管口的操作窗, 将试样固定于试样夹具上, 使需要测试的面对着传感器, 开始测试。如果需要检测波形, 则需要通过衰减器连接至示波器上, 同步记录整个衰减曲线。测试完毕后, 依次关闭高压开关、电源开关, 使仪器恢复测试前状态。

## 3 结果与讨论

作为测试结果参考比较的基准, 需首先测试良导体铝板分别加正负高压时的静电衰减曲线。多次重复测试, 获得典型试验数据如图 3 和图 4 所示。

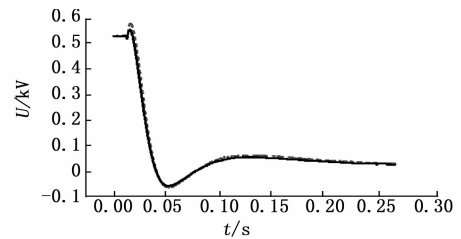


图 3 铝板充电法加正高压时的衰减曲线

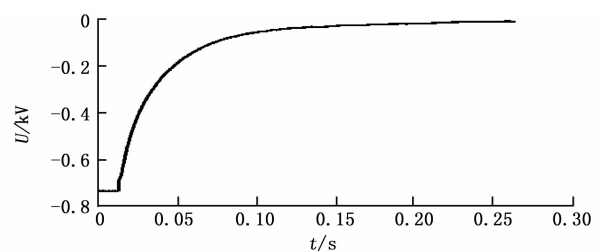


图 4 铝板充电法加负高压时的衰减曲线

由试验结果可知,在铝板加正高压情况下,将铝板通过高压开关迅速接地后,非接触式静电电位计测得电位值并非立刻下降。而是首先近似按正弦曲线上升一定幅值后再迅速下降,穿越零点后继续下降至负电位,达到最小值之后缓慢上升至零点附近,并最终趋于稳定在零电位。这一结果与实际情况下,铝板电位应单调下降的推论不完全吻合。分析认为,这是由于非接触式静电电位计的响应时间和通频带有限,而铝板电位的变化远远超过非接触式静电电位计的动态响应,因此产生上述现象。

分别对烧蚀前的硅基材料加以正负高压,测试其在不同情况下的静电衰减曲线,典型试验结果如下:

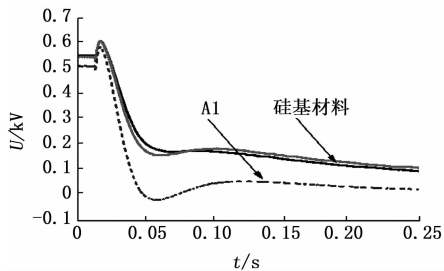


图 5 加正高压时未烧蚀硅基材料和铝板的衰减曲线

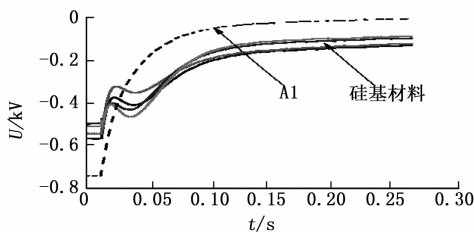


图 6 加负高压时未烧蚀硅基材料和铝板的衰减曲线

未烧蚀硅基材料在加正高压的情况下,当使其接地放电时,由于非接触式静电电位计的通频带限制,出现一短暂的电位上升,随后迅速下降。当电位下降至 3 kV 左右时,电位下降速率开始迅速减小直至 2 kV 左右时,电位下降速率基本保持恒定,并随时间开始缓慢下降,但最终电位仍然保持在 1 kV 以上。

未烧蚀硅基材料在加负高压的情况下,当使其接地放电时,其电位迅速上升,到达某一特定值时电位出现短暂的再度下降,并随后恢复上升趋势,电位上升速率缓慢下降,并最终在 -2 kV 左右时达到稳定,之后随时间开始缓慢上升。电位上升过程中出现短暂的电位下降,是因为负电荷同时分布在硅基材料的表面和材料内部,当材料突然接地时,材料表面的电荷的泄露电阻较小,迅速沿表面泄露通道泄放,使得电位计中电压迅速上升。当材料表面电荷泄露到一定程度时,材料中形成从材料表面指向材料内部的电场,在此电场力作用下,负电荷由材料内部迅速重新分布到材料的外表面,使得电位计中电压出现短暂的下降。

分别对烧蚀后的硅基材料加以正负高压,测试其在不同情况下的静电衰减曲线,典型试验结果如图 7 和图 8 所示。

烧蚀后的硅基材料在加正高压的情况下,当使其接地放电时,由于非接触式静电电位计的通频带限制,出现一短暂的电位上升,随后电位迅速下降。当电位下降至 2 kV 左右时,电位下降速率开始迅速减小直至穿越零电位,达到某一最小值

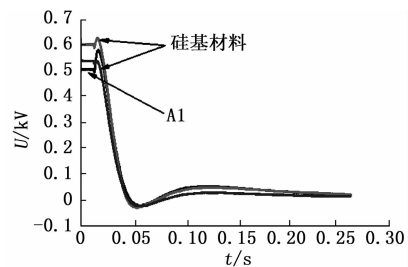


图 7 加正高压时烧蚀后硅基材料和铝板的衰减曲线

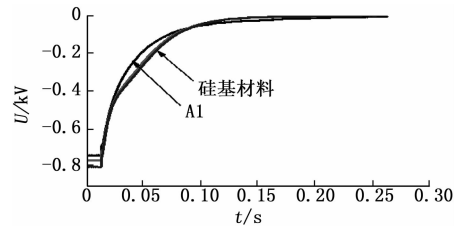


图 8 加负高压时烧蚀后硅基材料和铝板的衰减曲线

后,又缓慢上升至零电位。与烧蚀前相比,材料的静电电荷残余量大大降低,泄露时间也有大幅度减小,这说明在烧蚀过程中材料的电阻率发生了显著变化,静电泄露能力大大加强。

烧蚀后的硅基材料在加负高压的情况下,当使其接地放电时,其电位迅速上升,上升速率随时间缓慢降低,直至零电位。与烧蚀前相比,材料的静电电荷残余量大大降低,泄露时间也有大幅度减小,并且不存在电位的反常下降。这说明在烧蚀过程中材料的体电阻率和面电阻率发生了显著变化,整体的静电泄露能力已趋于一致。

#### 4 结论

本文在分析对比材料防静电性能多项指标的基础上确定了静电衰减时间作为硅基材料防静电性能评价指标,综合对比多种静电衰减时间测试方案的特点,确定了充电法的试验方案,并对烧蚀前后的硅基材料进行了静电衰减时间测试研究,得到如下结论:

- (1) 硅基材料在加正负高压的情况下,静电泄露性能略有不同;
- (2) 未烧蚀硅基材料在加正高压的情况下,静电泄露事件较长,且最终电位基本保持在 1 kV 以上。
- (3) 未烧蚀硅基材料在加负高压的情况下,材料电位存在反常上升的现象,且最终电位保持在 -1 kV 以下。
- (4) 烧蚀后的硅基材料在加正高压和负高压的情况下,电位反常上升现象消失,静电电荷残余量大大减少,静电衰减时间都大幅减小,静电泄露性能大大加强。

#### 参考文献:

[1] 郭鹏飞,于加其,赵良玉. 临近空间高超声速飞行器发展现状与关键技术 [J]. 飞航导弹, 2012, 32 (11): 17-21.  
 [2] 景晓龙,张建伟,黄树彩,等. 临近空间发展现状与关键技术研究 [J]. 航天制造技术, 2011, 29 (2): 17-21.  
 [3] 雷 尤. 临近空间飞行器简析 [J]. 黑龙江科技信息, 2012, 16 (11): 90-91.  
 [4] 孙可平,宋广成. 工业静电 [M]. 北京:中国石化出版社,1994.  
 [5] 武占成,张希军,胡有志. 气体放电 [M]. 北京:国防工业出版社,2009.

像素点的判别: 若  $R(a_1 | \mathbf{x}) < R(a_2 | \mathbf{x})$ , 则选择决策为  $a_1$ , 即该像素点属于  $\theta_1$  类 (斑点像素); 否则, 属于  $\theta_2$  类 (背景像素)。

### 4 实验结果与分析

本实验中所采用的图像为烟标图像 (芙蓉王牌), 将 300 幅人工检测后所得到的正品与次品图像作为总的训练集, 其中有 8 幅图像为具有斑点缺陷的图像, 其余为无斑点缺陷的正品图像。

利用上节中的式 (9) 可求得先验概率密度分别为:

$$P(\theta_1) = 8/300 \approx 0.027,$$

$$P(\theta_2) = (300 - 8)/300 = 292/300 \approx 0.973 \quad (11)$$

再根据式 (7) 与式 (8) 求两类的类条件概率密度函数的均值与方差, 由式 (2)、式 (3) 可得到两类的类条件概率密度  $P(\mathbf{x} | \theta_1)$ 、 $p(\mathbf{x} | \theta_2)$ , 其中  $p(\mathbf{x} | \theta_2)$  是在每个像素点处都具有不同的函数形式。再根据式 (4) 与式 (5) 求在待测图像中每一点处的两类后验概率  $P(\theta_1 | \mathbf{x})$  和  $P(\theta_2 | \mathbf{x})$ 。此时, 我们就可以根据式 (10) 所确定的损失函数, 结合式 (6) 分别求出了在待测图像中某一点处取两种不同决策的条件风险, 根据这两种风险可以做出下列决策: 若  $R(a_1 | \mathbf{x}) < R(a_2 | \mathbf{x})$ , 则选择决策为  $a_1$ , 即该像素点属于  $\theta_1$  类 (斑点像素), 同时将该点像素灰度值赋 255 (表现在图像上为成白色); 否则, 属于  $\theta_2$  类 (背景像素), 同时将该点像素灰度值赋 0 (表现在图像上为呈现黑色)。此时, 我们就能将待检测图像进行二值化, 并且同时将斑点区域从复杂的背景区域中分割出来了, 这样以便于我们的检测。图 1 是具有斑点的烟标图像, 图 2 为利用本文方法检测出来的分割后的烟标图像。



图 1 具有斑点的烟标图像



图 2 分割后的烟标二值化图像

从上述两图中可以看出, 本文的方法能有效地检测出烟标中的黑色斑点, 从分割后的二值化图像中可以看出, 分割出来

的斑点图像基本上保持了原有的形状, 而且在其他无斑点的区域也没有发生明显的误检。

### 5 总结以及进一步的工作

本文在统计决策论与贝叶斯分析的理论基础上, 提出了一种基于最小风险的贝叶斯决策的印刷品斑点检测方法, 并在理论和实验中证明了方法的有效性和准确性。

进一步的工作:

(1) 考虑到印刷品的实时性要求很高, 因此, 要考虑进一步提高算法的速度, 可以考虑不必求每一点处的类条件概率密度, 而是考虑能否将具有相同灰度值的像素点赋予相同的类条件概率密度。

(2) 由于印刷品中的斑点有时候可能不只是黑色的, 因此, 我们还必须考虑到能否求更为一般性的斑点区域的类条件概率密度。

(3) 在确定先验概率时, 由于样本数量有限, 能否考虑采用更为合适的先验概率确定方法。

### 参考文献

[1] Tanimizu K, Meguro S, Ishii. A high-speed detection method for color printed matter [A]. Industrial Electronics Society, 1990. IECON 90., 16th Annual Conference of IEEE [C]. 1990, 1 (27-30): 653-658.

[2] 陈 斌. 基于机器视觉技术的印刷品质量在线检测关键技术研究 [D]. 成都: 中国科学院成都计算机应用研究所, 2005.

[3] 杨 杰. 票据纸面及其特征标记的在线检测研究 [D]. 成都: 中国科学院成都计算机应用研究所, 2005.

[4] Gordon W Braudaway. Detection and Location of very Small Print Defect in Real Time for High-speed Digital Printing [J]. SPIE, 2006, 6076: 110-112.

[5] Berger J O. 统计决策论及贝叶斯分析 [M]. 贾乃光, 译. 北京: 中国统计出版社, 1998.

[6] 裴志松, 冯 雪. 基于贝叶斯网络的健壮社团检测 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (11): 1025-1029.

[7] 李定主, 王 飞. 模式识别中贝叶斯决策理论的研究 [J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17 (7): 165-166.

[8] 陈超银, 杨 伟. 基于贝叶斯决策的电传飞控系统状态监测与健康 管理 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (6): 1449-1451.

[9] 文春勇, 朱信忠, 徐慧英, 等. 基于最小风险的贝叶斯决策理论相关反馈方法 [J]. 计算机应用研究, 2009, 26 (3): 1171-1173.

[10] 谢振平, 王 涛, 刘 渊. 一种集成贝叶斯决策的视频烟雾检测新方法 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 20 (6): 1255-1258.

~~~~~

(上接第 1710 页)

[6] 雷晓勇, 刘尚合, 胡小峰, 等. 尖端导体电晕放电试验研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (9): 2197-2199.

[7] 陈 翔, 魏 明, 王向东, 等. 基于 RBF 神经网络的静电电位动态测试仪波形重建 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (5): 1202-1205.

[8] 菅义夫 (日). 静电手册 [M]. 科学出版社, 1981.

[9] Chubb J. Comments on method for charge decay measurement [J]. Journal of Electrostatics, 2004, 62 (9): 73-80.

[10] 肖志伟, 魏光辉. 基于单片机和 LabVIEW 的静电电荷衰减测试系统 [J]. 电子测量技术, 2009, 32 (11): 109-111.

[11] 肖志伟, 魏光辉, 陈 星, 等. 静电电荷衰减测试研究现状及对策 [J]. 仪表技术, 2009, 38 (10): 40-42.