

基于双线圈驱动的电脉冲除冰系统设计及多材料动力响应与除冰研究

牛一凡, 石朋琳, 姚佳伟, 魏久富, 魏鸿瑞
(中国民航大学中欧航空工程师学院, 天津 300300)

摘要: 由于电脉冲除冰技术具有效率高、能耗小、不会二次结冰等优点, 越来越受到研究人员重视。目前电脉冲除冰系统应用研究仅局限于导电金属材料, 其使用的单线圈驱动方式效率低, 耗能高。为此首先探索了双线圈驱动方式, 实现了低导电复合材料的电脉冲应用, 证明了双脉冲线圈大幅提高了线圈的脉冲效率, 除冰效果更佳; 其次, 探究了复合材料与多种金属材料的脉冲动力响应, 发现不同材料的峰值加速度和位移量均与电压呈二次曲线关系, 相比于弹性模量, 脉冲响应对于材料密度变化更为敏感; 最后, 对比了单/双线圈电脉冲除冰系统应用于金属材料与复合材料的除冰能耗, 发现双脉冲线圈除冰效果更佳, 同时由于受表面粗糙度影响, 复合材料除冰所需能耗更高, 证明了电脉冲除冰技术应用于复合材料的可行性。

关键词: 电脉冲; 脉冲响应; 双线圈; 复合材料; 除冰

Design of Electric Pulse Deicing System Based on Double Coil Drive and Study of Multi-material Dynamic Response and De-icing

NIU Yifan, SHI Penglin, YAO Jiawei, WEI Jiufu, WEI Hongrui

(Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Electric pulse deicing technology has the advantages of high efficiency, low energy consumption, no secondary icing, etc., many scholars have carried out research in this field. At present, the application research of electric pulse deicing system is limited to conductive metal materials, and the drive efficiency of single-coil is low and the energy consumption is high. In order to expand the application of low conductive materials, this paper explores the double-coil drive mode to realize the application of low conductive composite materials, which greatly improves the pulse efficiency. Secondly, the impulse dynamic response of composite materials and various metal materials is investigated, and it is found that the peak acceleration and displacement of the impulse response of materials are quadratic curves with the voltage. Compared with the elastic modulus, the impulse response is more sensitive to the change of density. Finally, the de-icing energy consumption of single/double-coil electric pulse deicing system applied to metal materials and composite materials is compared. It is found that the de-icing effect of double-pulse-coil is better, and the energy consumption of composite material de-icing is higher due to the influence of surface roughness, which proves the feasibility of electric pulse deicing technology applied to composite materials.

Key words: electro-impulse; impulse response; double-coil; composite materials; de-icing

0 引言

覆冰是冬季或初春常见的自然现象, 恶劣的气候条件均会形成覆冰, 严重影响人们的生活和工业安全。持续低温、雨雪天气导致输电线路覆冰、电网解列^[1-2]; 低温环境下船体表面甲板、驾驶室舷窗

等位置发生结冰现象, 严重时可引发船舶损毁甚至沉没等事故^[3]; 随着覆冰厚度的增加风力发电叶片振动幅度有所增大, 极易造成叶片断裂^[4]; 在冰冻雨雪天气下接触轨的覆冰可导致磁浮列车无法正常运行^[5]; 飞机机翼结冰影响飞机的气动性能, 甚至会引起飞机失速或坠毁^[5-6]。因此, 为了避免覆冰所带来的不利影响, 探索各工业领域适合的除冰技术一直是研究热点。

目前常用的除冰方法以热力除冰和机械除冰

基金资助项目: 中国民用航空局安全能力建设基金(ASSA2022/11); 中央高校基本科研业务费专项资金(3122020082)。

Project supported by Safety Capacity Building Fund of Civil Aviation Administration of China (AS-SA2022/11), Fundamental Research Funds for the Central Universities (3122020082).

为主, 相较于热力除冰, 机械除冰耗能小、不会引起二次结冰^[6-11]。电脉冲除冰技术是机械除冰的一种^[12], 是指电容器向线圈放电, 产生强磁场, 在金属材料上产生 1 个幅值高、时间短的机械力, 使得冰破碎脱离, 具有高效率、小能耗、对材料损伤小等特点, 越来越受到研究人员的重视^[13-16]。目前国内已初步应用在输电线路导线除冰、风力发电叶片除冰等领域, 俄罗斯、美国等国家已将该技术应用在航空领域, 俄罗斯已成功研发五代电脉冲除冰系统并将其应用到伊尔系列飞机上, 美国也已将该技术运用到某公务机、无人机上, 并已完成了电脉冲除冰技术在 Boeing 737、757、767 等机型中的除冰验证^[17-21]。

我国对于电脉冲除冰技术的研究, 特别是应用开发仍处于较为滞后的阶段。2007 年, 南京航空航天大学杜骞搭建了国内首个地面电脉冲除冰实验台, 初步证实了电脉冲除冰的可行性^[22]。2012 年, 南京航空航天大学李清英搭建并改进了电脉冲除冰系统的电路设计, 不仅扩大了脉冲电压的范围, 并针对电容量与线圈电感值对脉冲动力响应的影响展开了研究^[23]。2020 年, 重庆大学余倩豪探究了不同充电电压、电容、电感线圈、线圈间距对除冰效果影响^[24]。同年, 重庆大学王洋洋通过理论计算优化线圈内外径、层数并确定合适的电容值等参数, 实现材料共振以降低能耗的目的^[25]。

目前电脉冲除冰技术的应用研究多见于金属材料, 仅依靠单线圈通电带动金属材料实现电能与机械能的转换, 导致低电压驱动下振动效果并不理想, 高电压驱动下脉冲能量消耗严重, 效率低下。由于电脉冲技术是利用法拉第电磁感应定律产生脉

冲力进行除冰, 因此应用材料须为导电材料。随着材料科学的发展, 大量非金属材料逐渐应用在各工业领域中, 例如高性能工程塑料、高性能复合材料等, 以纤维增强树脂基复合材料为代表的高性能复合材料已在飞机机身、机翼等重要部分发挥着重要作用^[26], 其质量较轻、力学性能优异, 但导电性较差, 关于该类材料的电脉冲应用研究较少。

因此, 本文拟针对上述现存问题, 探索新型双脉冲线圈驱动方式, 搭建高效稳定的电脉冲除冰系统, 匹配多材料应用需求; 研究不同材料的脉冲响应, 并以碳纤维树脂基复合材料层合板为主要研究对象, 开展其在电脉冲除冰技术中的应用研究, 为电脉冲除冰技术在复合材料领域的应用提供基础。

1 系统设计及搭建

1.1 电脉冲除冰系统模块设计

为实现多材料电脉冲除冰, 本文设计的电脉冲除冰系统原理图如图 1 所示, 包含 4 个模块——充电模块、储能模块、控制模块与换能模块。充电模块用于调整电压, 为储能模块充电; 储能模块用于储存电能, 为换能模块释放脉冲信号提供能量; 控制模块用于将储能模块中的电能以脉冲的形式释放于换能模块; 换能模块用于将电能转换为机械能, 引起材料形变, 从而破坏冰层实现除冰。

1.1.1 充电模块

本文选择调压器、变压器与整流桥连接组成充电模块为电脉冲除冰系统提供能量。模块输入为 220 V 市电, 先经过降压变压器降至 0~250 V, 后经升压变压器将其调整到 0~1 000 V 范围, 再通过整流桥将其转换为 0~1 000 V 范围的直流变压。

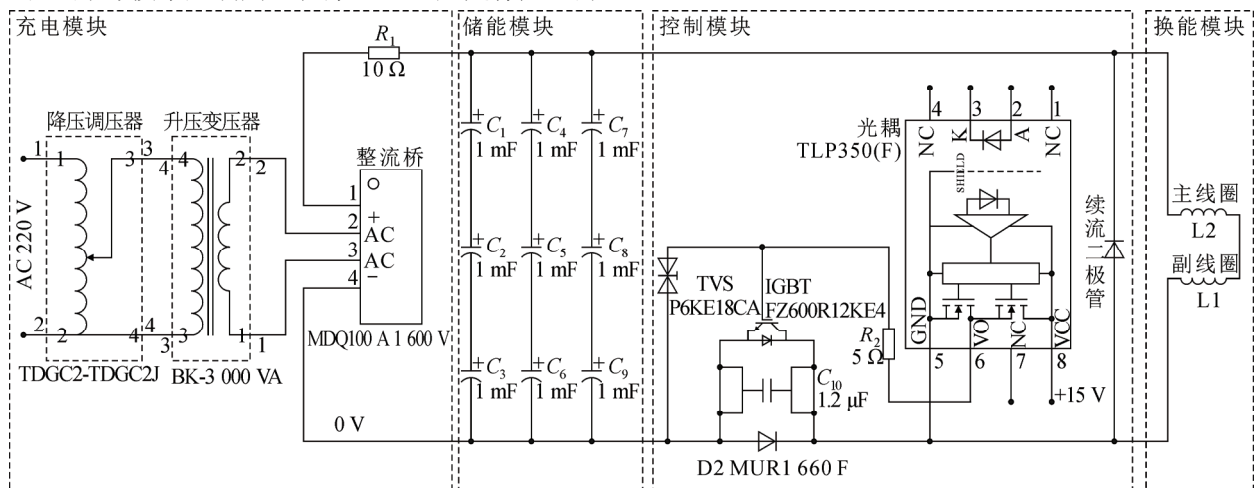


图 1 电脉冲除冰系统原理图

Fig.1 Electrical pulse deicing system schematic diagram

1.1.2 储能模块

储能模块是由电容器组组成, 目的是为换能模块供给电能。本文采用电容值为 1 000 μF 、耐压值为 400 V 的电容, 定义 3 个该参数的电容串联为 1 组, 储能模块为 3 组电容并联, 且在其两端连接阻值 330 k Ω 、功率 5 W 的色环电阻以释放残留电荷。

1.1.3 换能模块

换能模块主要由脉冲线圈组成, 负责将电容器组释放的瞬态电流通过磁场转化为材料的机械能。对于金属材料的除冰目标, 采用 1 个脉冲线圈即可获取足够的除冰能量。对于导电率低的非金属材料, 此种方式难以保证除冰效果。因此, 本文提出在除冰目标上增加与脉冲线圈绕向相反的副脉冲线圈, 组成如图 2 所示的双脉冲线圈换能模块。两线圈保持一定的间隙, 在通电瞬间两线圈之间激发出强大的相反方向磁场, 从而产生巨大的排斥力, 去除除冰目标覆冰。在实际搭建中, 主线圈绕制成型后使用环氧树脂封装在亚克力板特定凹槽内, 副线圈在成型后安装在除冰材料内侧。主副线圈间隔过小导致线圈振动时漆包铜线外侧包覆的绝缘材料破损, 出现短路的危险; 间隔过大导致磁场强度较小, 漏磁较多, 增加了除冰的困难^[8], 因此, 根据前人研究结果^[13], 通过在亚克力板与材料间加装垫圈保证主副线圈的间隔为 2 mm。

1.1.4 控制模块

控制电路不仅负责充放电的通断, 还具有调控脉冲信号参数的功能。当储能模块中的电容组充电完成后, 控制模块启动, 使储能模块与换能模块导通, 激发换能模块工作, 该过程要求电路反应迅速, 对控制模块中开关的灵敏度要求较高; 电容器放电瞬间产生高电压, 电流上升率激增, 电路放电结束时换能模块中的线圈与开关形成闭合回路, 此时的线圈残留较大的电压, 综合考虑以上 2 种情况系统控制模块中开关的耐流耐压能力要求较高。因此, 本文选择 FZ600R12KE4 型号绝缘栅双极型晶体管 (insulate-gate bipolar transistor, IGBT) 作为控制模块开关。在高频大功率的实验中常出现 IGBT 失效的问题, 经研究发现, 导致失效的原因为栅极电阻选择不当, 使得 IGBT 开关速度过慢, 瞬时功率激增, 超温失效, 另一方面由于开关瞬间发射极与集电极之间反向电压过大导致 IGBT 击穿, 因此选用 5 Ω 栅极电阻能够有效降低 IGBT 损耗, 降低结温。同时, 在集电极与发射极之间连接安规电容, 减少高

频谐振, 降低施加于 IGBT 的反向电压, 并在集电极与发射极之间连接超快恢复二极管, 可在 IGBT 关断瞬间有效限制 IGBT 集电极-发射极电压, 从而在连接感性负载时有效保护 IGBT^[27]。

控制电路模块的主要元器件除 IGBT 外还包含主控印制电路板 (printed circuit board, PCB), 主控 PCB 板上设有 ARDUINO_NANO ATmega328P 开发板, 可以按照既定程序控制系统模块。

1.2 结构设计

考虑到充电模块、储能模块中元件暴露在实验台, 存在电磁干扰以及漏电短路的风险, 以及控制模块中内部排线复杂且 PCB 上焊接的众多元器件易损坏, 设计了材料为聚氯乙烯的充电集成箱与控制盒。在充电集成箱左右两侧设置通风孔, 并在充电集成箱前后两侧安装风扇用于排风散热。

换能模块中除冰钢架的尺寸由后续结冰实验平台尺寸决定, 钢架与线圈接触平面尺寸设计为 15 cm \times 15 cm, 采用 304 不锈钢制作。电脉冲除冰系统整体示意图如图 3 所示。

2 电脉冲系统的多材料动力响应实验研究

受到冲击力的作用, 材料会产生形变和位移。峰值加速度和位移变化量是表征材料动力响应的重要参数。加速度与冲击力成正比, 因此峰值加速度可以表征材料受到的最大脉冲力的大小。位移可以表征材料在冲击过程中所发生的最大形变量, 即表征系统导致材料振动的剧烈程度。

将传感器探头固定到蒙皮材料试样中心处, 利用 LMS SCADAS 数据采集系统采集脉冲前后材料表面加速度变化, 利用基础数据二次积分获得位移数据, 重复 3 次取平均值。如图 4 所示。该系统测

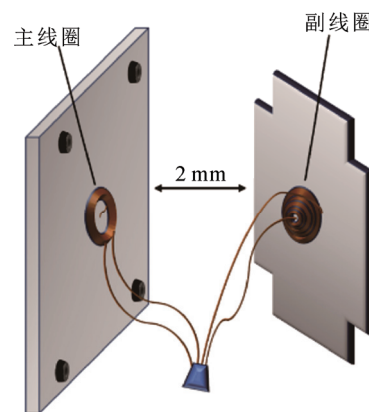


图 2 双线圈驱动示意图

Fig.2 Double-coil schematic diagram

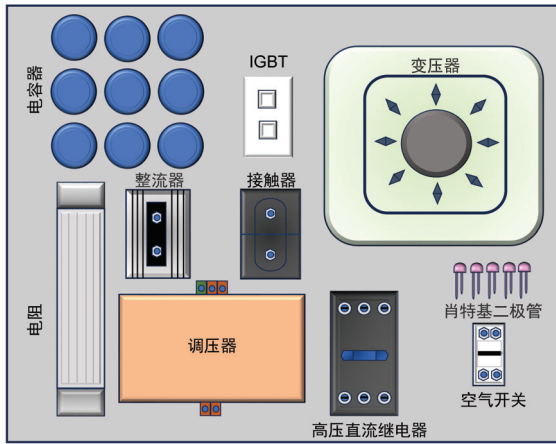


图3 电脉冲除冰系统示意图

Fig.3 Image of electro-impulse de-icing system

量加速度的量程为 $0\pm 100g$ (g 为重力加速度), 灵敏度为 100.9 mV/g , 采样带宽为 $2\ 560\text{ Hz}$ 。根据量程的大小, 激励材料振动电压范围为 $40\sim 120\text{ V}$ 。

为了探究电脉冲系统的多材料动力响应, 选取弹性模量在 $0\sim 200\text{ GPa}$ 的 6 组常见材料进行实验, 其材料参数如表 1 所示。

6 种材料尺寸均为 $15\text{ cm}\times 15\text{ cm}\times 0.2\text{ cm}$, 为保证测试试样厚度均为 2 mm , 碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fibres reinforced polymer, CFRP)层合板层数设置为 16 层, 均为 0° 单向铺层, 便于电脉冲响应分析。将材料与底座用螺丝进行连接并采用两垫片夹挤的方式固定材料。

2.1 驱动方式的影响——单/双脉冲线圈

为探究驱动方式(单/双脉冲线圈)对材料动力响应的的影响, 分别测量了各材料在 100 V 电压激励下单脉冲线圈驱动与双脉冲线圈驱动的加速度和位移量。实验结果按照组别排序, 如图 5 所示。

可以看到, 由于复合材料导电性能较差, 在单脉冲驱动方式下, 其加速度和位移量分别为 $1.91\times 10^{-9}\text{ m}$ 和 $9.1\times 10^{-3}\text{ g}$, 可认为无脉冲响应发生。在相同的脉冲电压激励下, 相比单脉冲驱动方式, 采用双脉冲驱动方式测得位移与峰值加速度大小均显著提升。复合材料的位移与加速度提升最为明显, 由无脉冲响应提升至位移 $3.25\times 10^{-5}\text{ m}$, 峰值加速度为 52.3 g , 可见电脉冲系统在复合材料除冰应用具有可行性。

同时, 在相同电压激励下, 各材料的位移和加速度响应在单双脉冲线圈驱动对比下的增幅并不相同, 例如: 由单线圈变为双线圈后, B30 白洋铜位

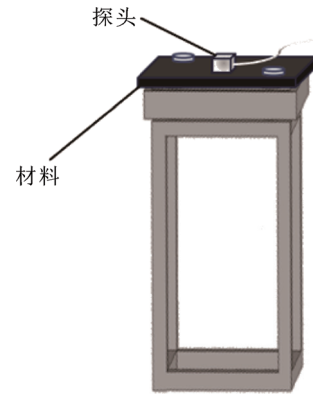


图4 动力响应测试示意图

Fig.4 Dynamic response test diagram

表 1 材料参数表

Table 1 Table of material parameters

| 材料名称 | 密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 弹性模量/GPa |
|-----------|--------------------------------------|----------|
| CFRP 层合板 | 1.65 | 9.0 |
| AZ31b 镁合金 | 1.75 | 45.0 |
| 铝 6061 | 2.70 | 68.7 |
| 黄铜 H62 | 8.50 | 100.3 |
| B30 白洋铜 | 8.90 | 150.0 |
| 304 不锈钢 | 7.90 | 193.0 |

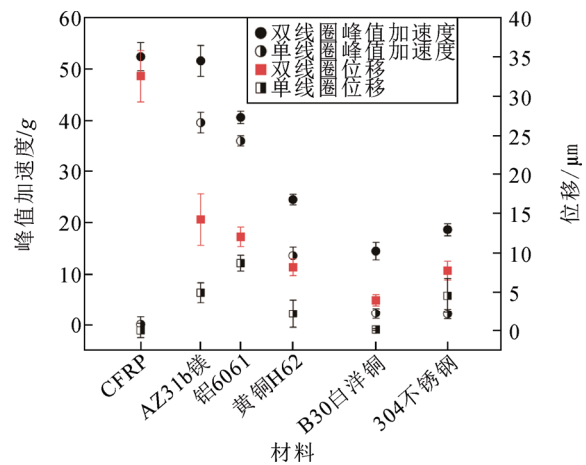


图5 多材料位移和峰值加速度的单/双线圈驱动方式对比

Fig.5 Comparison of single/double-coil driving modes for displacement and peak acceleration of materials

移量提升 $3\ 276.07\%$, 峰值加速度提升 550.45% ; 而铝 6061 位移量仅提升 38.09% , 峰值加速度仅提升 12.70% 。这是由于单脉冲线圈驱动下, 斥力在线圈与金属材料之间产生, B30 白洋铜与铝 6061 导电率相近, 但密度与弹性模量差距较大, B30 白洋铜密度是铝 6061 的 3.24 倍, 弹性模量是铝 6061 的 2.18 倍, 因此单脉冲线圈驱动时 B30 白洋铜位移变化量

与峰值加速度较小,采用双脉冲线圈驱动斥力由线圈与线圈产生,斥力大小显著提升,因此对于弹性模量较大、密度较大的金属,增幅效果更加显著。

2.2 电压对材料脉冲响应的影响

本文搭建的电脉冲除冰系统以电压作为输出变量,将激励电压设置在 40~120 V 区间内,每隔 20 V 测量不同材料的位移量与峰值加速度大小,测试结果如图 6 所示。

可以看到,对于同一材料,随着电压的增大,峰值加速度呈现上升趋势。根据电磁力计算式(式(1))可知,电磁力 F 与电压 U^2 成正比,即加速度与电压呈二次曲线关系,由加速度二次积分计算所得的位移量同样与电压呈二次曲线关系^[23],与图 6 所示测试结果相符。

$$F = \left| \frac{U^2}{8\pi f^2 N^2 \left(\frac{\mu_0 A}{\delta} + A_g \right)^2} \mu_0 \frac{A}{\delta^2} \right| \quad (1)$$

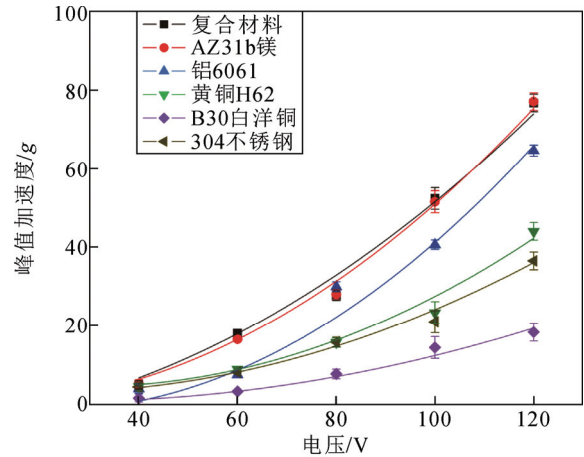
式中: A 为电磁势矢量; μ_0 为真空磁导率; f 为频率; N 为线圈匝数; A_g 为气隙磁导; δ 为气隙长度。

双线圈驱动方式下,主副线圈之间的斥力远大于主线圈与材料涡流之间的斥力,因此可认为脉冲斥力主要在线圈和副线圈之间产生,与材料自身电导率无关,作用在相同电压下的不同材料所受到的脉冲斥力近似相同。相同脉冲斥力下,材料的自身性质不同导致了输出的脉冲响应(峰值加速度和位移量)不同,因此须研究材料属性对脉冲响应的影响。

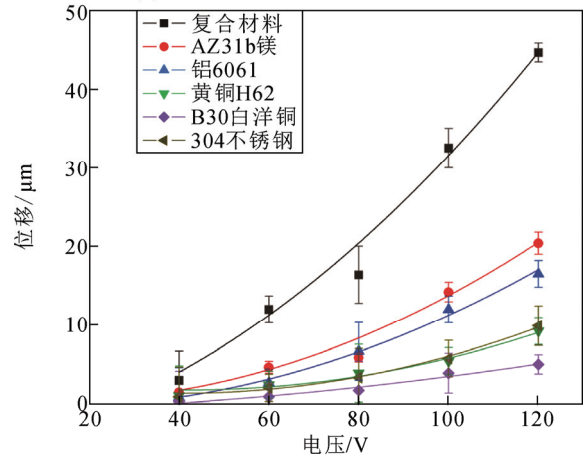
2.3 材料属性对脉冲响应的影响

忽略材料电导率,影响脉冲响应的材料因素包括材料弹性模量与密度。图 7 为弹性模量与位移关系图。

根据实验数据可得,复合材料与 AZ31b 镁合金密度相当,由于 AZ31b 镁合金的弹性模量较大,相同脉冲斥力作用下,形变量较小,即脉冲响应较小,与前人研究结果符合^[25]。黄铜 H62(8.50 g/cm³)、B30 白洋铜(8.90 g/cm³)、304 不锈钢(7.90 g/cm³)的密度较为接近,而 B30 白洋铜的密度略大于黄铜 H62 的密度,但由于弹性模量提高了约 50%,脉冲响应相应较小,而 304 不锈钢与 B30 白洋铜相比,密度减小了 11%,弹性模量提高了 29%,此时 304 不锈钢的脉冲响应相较于 B30 白洋铜增大。可见,密度的减小不仅弥补了弹性模量提高导致的脉冲响应减小,并且进一步提高了脉冲响应。因此,电脉冲响应对于材料密度变化更为敏感。



(a) 不同材料峰值加速度随电压变化曲线



(b) 不同材料位移随电压变化曲线

图 6 电压对材料脉冲响应的变化曲线

Fig.6 Curves of impulse responses with voltages of different materials

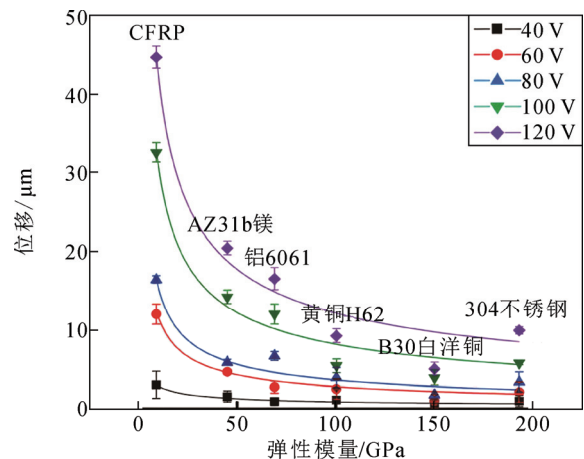


图 7 不同脉冲电压下各材料的位移随弹性模量变化曲线

Fig.7 Curves of the different materials' displacement changes with elastic modulus under different impulse voltages

3 除冰实验

3.1 单/双线圈驱动除冰效果对比

为了进一步探究单/双线圈对电脉冲系统能耗

的影响, 分别针对单双脉冲线圈进行了除冰实验。首先, 利用实验室自制大气模拟结冰实验平台进行结冰实验, 参照美国联邦航空条例 FAR 25《运输类飞机适航标准》规定, 结冰条件设置为: 温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、平均水滴直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、液态水体积质量为 1 g/m^3 , 结合实验平台调节范围风速设置为 20 m/s , 由于铝 6061 动力响应表现良好且常用于制作飞机蒙皮、机身框架、大梁等, 因此金属材料中选择铝 6061 进行结冰实验; 其次, 分别利用单双脉冲线圈对结冰的铝 6061 金属板进行除冰实验, 除冰电压设置为 450 V 。除冰结果分别见表 2 和表 3。

通过观察, 单线圈驱动方式下, 第 1 次冲击后, 冰层表面出现裂纹; 第 4 次冲击时出现部分冰层脱落, 脱落首先发生于边界处, 且后续冲击冰层脱落效果较差, 逐渐拓展至主副线圈附近; 第 8 次冲击后除冰面积不再增长; 10 次除冰结束并未完全去除材料表面冰层。在相同覆冰工况和除冰电压下, 双脉冲线圈除冰效果显著优于单脉冲线圈除冰效果。仅冲击 2 次即可实现完全脱冰。

综上, 双脉冲驱动方式的脉冲响应要明显优于单脉冲驱动方式, 加装双线圈不仅能够将更多的电能转化为机械能, 提高激励大小, 并且能够有效地提高材料的形变量, 减少系统能量消耗。因此, 后续实验均采用双线圈驱动的方式。

3.2 金属材料与复合材料除冰效果对比

选用上述复合材料层合板和铝 6061 金属板进行结冰除冰实验, 结冰条件同上文, 利用本文搭建的电脉冲除冰系统进行除冰, 采用双脉冲线圈的驱动方式, 电压设置为 450 V 。图 8 为首次冲击后复合材料层合板(左)和铝 6061 金属板(右)脱冰情况, 冰层均破碎呈蜘蛛网形状由中心向四周延伸。铝合金表面冰层破碎面积较大, 裂纹数目少并且右侧一部分冰已经脱离材料表面; 复合材料表面冰层裂纹数目较多, 冰层整体与复合材料黏结紧密, 第 1 次冲击没有出现掉冰现象。铝合金表面冰层在连续执行 2 次脉冲冲击后冰层完全从材料表面脱落, 而复合材料在经历连续 4 次冲击后实现完全脱冰。电脉冲系统除冰能耗计算如式(2)所示。

$$E = \frac{U_i^2 - U_f^2}{R_{\text{tot}}} \cdot n \quad (2)$$

式中: E 为能量; U_i 为所输入的电压值, U_f 为单次脉冲冲击后剩余电压值; R_{tot} 为电路总电阻; n 为冲击次数。根据式(2)计算, 上述铝合金除冰能耗为 180 J , 复合材料除冰能耗为 404 J , 是铝合金材料的 2.25 倍。

由图 8 推断由于复合材料表面存在沟壑, 粗糙度较大, 冰层与表面黏结紧密, 受到冲击冰层内部首先出现裂纹, 消耗大量能量, 在后续的冲击中,

表 2 单脉冲线圈除冰效果表

Table 2 Table of single pulse coil deicing effect

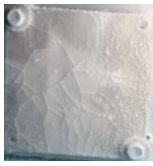
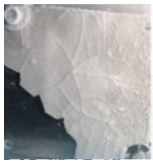




| 除冰次数 | 第 1 次 | 第 4 次 | 第 5 次 | 第 6 次 | 第 7 次 | 第 8 次 |
|-------|---|---|---|--|---|---|
| 除冰效果 |  |  |  |  |  |  |
| 除冰率/% | 0 | 14.79 | 40.24 | 49.70 | 65.68 | 66.15 |

表 3 双脉冲线圈除冰效果表

Table 3 Table of double pulse coil deicing effect


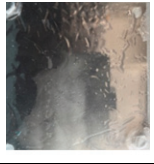
| 除冰次数 | 第 1 次 | 第 2 次 |
|-------|---|---|
| 除冰效果 |  |  |
| 除冰率/% | 72.58 | 100.00 |



图 8 复合材料(左)和铝 6061(右)除冰效果对比

Fig.8 Comparison of deicing effect of composite material (left) and aluminum 6061 (right)

冰层逐渐与材料表面脱离, 因此与铝合金相比, 复合材料能量消耗更多。

4 结论

1) 本文提出的双脉冲线圈驱动装置能够成功应用于碳纤维树脂基复合材料等非金属材料, 且与目前常见的单脉冲线圈驱动装置相比, 能够显著提高材料在电脉冲系统中的振动效果。

2) 脉冲响应峰值加速度和位移量均与电压呈二次曲线关系; 材料的弹性模量与密度均会影响脉冲响应, 弹性模量越大、密度越大, 脉冲响应越小; 相比于弹性模量, 脉冲响应对于材料密度变化更为敏感。

3) 通过进行相同覆冰工况下铝 6061 合金与复合材料层合板的除冰实验, 验证了本文搭建电脉冲除冰系统的有效性, 复合材料与冰层黏附更加紧密导致除冰能量消耗更多。

本文基于双线圈驱动的电脉冲除冰设计实现了低导电、不导电材料的应用, 后续可进一步进行轻量化设计以面向未来全复合材料飞机以及复合材料风力发电叶片的除冰应用。

参考文献 References

- [1] 杨国林, 蒋兴良, 王茂政, 等. 输电线路单导线覆冰形状对直流大电流融冰时间的影响[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2916-2924. YANG Guolin, JIANG Xingliang, WANG Maozheng, et al. The influence of ice shape on DC high current melt-icing time of transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2916-2924.
- [2] 王运达, 张 钢, 邱瑞昌, 等. 城市轨道交通接触网在线融冰方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1970-1978. WANG Yunda, ZHANG Gang, QIU Ruichang, et al. Online ice melting method for catenary of urban rail transit[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1970-1978.
- [3] 熊广友, 张少君, 王明雨, 等. 船舶甲板超疏冰涂层的制备及其性能[J]. 山东交通学院学报, 2022, 30(2): 118-126. XIONG Guangyou, ZHANG Shaojun, WANG Mingyu, et al. Preparation and properties of super ice-phobic coating on ship decks[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(2): 118-126.
- [4] 莫秋云, 王国强, 郭荣滨, 等. 风力发电机叶片覆冰状况及防冰除冰措施[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9017-9024. MO Qiuyun, WANG Guoqiang, GUO Rongbin. Wind turbine blade icing condition and anti-ice deicing measures[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21): 9017-9024.
- [5] 欧阳虹, 蒋兴良, 涂振华, 等. 磁浮接触轨电脉冲除冰的试验研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1553-1560. OUYANG Hong, JIANG Xingliang, TU Zhenhua, et al. Experimental study on electro-impulse de-icing of maglev contact rail[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1553-1560.
- [6] WEI Y, XU H J, XUE Y, et al. Quantitative assessment and visualization of flight risk induced by coupled multi-factor under icing conditions[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(8): 2146-2161.
- [7] 崔 哲. 脉冲参数对机翼电脉冲除冰效果影响的仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020: 1-13. CUI Zhe. Simulation study on the influence of pulse parameters on the wing electrical pulse de-icing effect[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science & Technology, 2020: 1-13.
- [8] 刘小暄, 朱春玲, 朱程香, 等. 电加热防/除冰过程中溢流水再冻结数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(2): 281-290. LIU Xiaoxuan, ZHU Chunling, ZHU Chengxiang, et al. Simulation of electrothermal anti-icing/deicing process including runback water ice accretion[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(2): 281-290.
- [9] LI L K, LIU Y, ZHANG Z C, et al. Effects of thermal conductivity of airframe substrate on the dynamic ice accretion process pertinent to UAS inflight icing phenomena[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 131: 1184-1195.
- [10] 唐 超, 谢文俊, 袁培毓, 等. 翼面前缘共形电热除冰功能结构开发与验证[J]. 航空学报, 2023, 44(12): 427872. TANG Chao, XIE Wenjun, YUAN Peiyu, et al. Development and verification of a conformal electrothermal deicing functional structure for leading edge of airfoil[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(12): 427872.
- [11] 王晟伍, 李 黎, 陈劲宇, 等. 超疏水和超双疏涂层表面覆冰剪切强度及剥离强度对比[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4809-4816. WANG Shengwu, LI Li, CHEN Jinyu, et al. Comparison of icing shear strength and peel strength between superhydrophobic and superamphiphobic coatings[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4809-4816.
- [12] ZHAO Z H, CHEN H W, LIU X L, et al. The development of electric heating coating with temperature controlling capability for anti-icing/de-icing[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 184: 103234.
- [13] 李清英, 朱春玲, 白 天. 电脉冲除冰系统除冰激励的简化与影响因素[J]. 航空学报, 2012, 33(8): 1384-1393. LI Qingying, ZHU Chunling, BAI Tian. Simplification of de-icing excitation and influential factors of the electro-impulse de-icing system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(8): 1384-1393.
- [14] 周煜杰. 飞机防除冰方法的总结与探究[J]. 现代贸易工业, 2019(1): 195-196. ZHOU Yujie. Summary and exploration of aircraft anti-icing and de-icing methods[J]. Modern Trade Industry, 2019(1): 195-196.
- [15] LI Q Y, ZHU C L, BAI T, et al. Numerical simulation and experimental verification of the electro-impulse de-icing system[C] // Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. Honolulu, Hawaii, USA: AIAA, 2012: 9846-9854.
- [16] ZUMWALT G, FRIEDBERG R. Designing an electro-impulse de-icing system[C] // Proceedings of the 24th Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA: AIAA, 1986: 545.
- [17] 姜 涛. 架空地线电脉冲除冰器设计及除冰试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022: 47-63. JIANG Tao. Design of electric pulse deicing device for overhead ground wire and experimental study on deicing[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2022: 47-63.
- [18] 何舟东, 朱永峰, 周景峰. 飞机电脉冲除冰技术探讨[J]. 实验流体力学, 2016, 30(2): 38-45.

- HE Zhoudong, ZHU Yongfeng, ZHOU Jingfeng. Study on electro-impulse de-icing technology[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(2): 38-45.
- [19] LEVIN I A. Electric-impulse de-icing system (Aviation)[R]. Vista, USA: PWT Brochure, 1997.
- [20] ZUMWALT G W, SCHRAG R L, BERNHART W D et al. Analyses and tests for design of an electro-impulse de-icing system[R]. Washington, D. C., USA: NASA, 1985.
- [21] SCHRAG R L, ZUNWAL G W. Electro-impulse de-icing: concept and electrodynamic studies[C]//Proceedings of the 22nd Aerospace Sciences Meeting. Reno, USA: AIAA, 1984.
- [22] 杜 筹. 电脉冲除冰系统设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009: 13-79.
DU Qian. Design and research on electro-impulse de-icing system[D]. Nanjing, China: Nanjing University, 2009: 13-79.
- [23] 李清英. 电脉冲除冰系统的实验、理论与设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 11-51.
LI Qingying. Research on the experiments, theories, and design of the electro-impulse de-icing system[D]. Nanjing, China: Nanjing University, 2012: 11-51.
- [24] 余倩豪. 飞机机翼的电脉冲除冰装置设计及试验[D]. 重庆: 重庆大学, 2020: 1-61.
SHE Qianhao. Design and test of the electro-impulse de-icing device for aircraft wing[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2020: 1-61.
- [25] 王洋洋. 微功耗飞机电脉冲除冰系统理论与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020: 1-171.
WANG Yangyang. Theoretical and experimental research of the electro-impulse de-icing system for aircraft[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2020: 1-171.
- [26] 李璇蕊, 郑 婷, 王晓东, 等. 热塑性树脂增韧环氧树脂复合材料研究进展[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报, 2024: 1-10[2024-05-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240207.1447.006.html>.
- LI Xuanrui, ZHENG Ting, WANG Xiaodong, et al. Research progress of epoxy resin composites toughened by thermoplastic resin[J/OL]. Journal of Harbin Engineering University, 2024: 1-10[2024-05-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240207.1447.006.html>.
- [27] 焦梓家, 孙晋茹, 乐杨晶, 等. 通信电源系统智能浪涌保护模块的设计与防护特性[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 885-893.
JIAO Zijia, SUN Jinru, LE Yangjing, et al. Design and protection characteristics of intelligent surge protection module for communication power supply system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 885-893.



牛一凡(通信作者)

1979—, 女, 博士, 教授, 硕导

主要从事航空复合材料结构安全性评估及防除冰技术

E-mail: yifan.niu@foxmail.com

NIU Yifan

Ph.D., Professor

Corresponding author

收稿日期 2024-02-18 修回日期 2024-05-13 编辑 曾文君