

复合材料与紧固件间接触电性能对装配结构雷击损伤特性的影响

姜臻辉 孙晋茹 郭永强 李树 姚学玲

Influence of contact electrical properties between composites and fasteners on lightning damage characteristics of assembled structure

JIANG Zhenhui, SUN Jinru, GUO Yongqiang, LI Shu, YAO Xueling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250108.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含紧固件碳纤维增强树脂复合材料在雷电流A分量下的损伤特性

Damage characteristics of carbon fiber reinforced polymer composites with fastener subjected to lightning A current

复合材料学报. 2020, 37(2): 356–365 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190515.001>

飞机复合材料壁板装配中临时紧固件数量与布局优化方法

Optimization method of the number and layout of temporary fasteners in composite panel assembly of aircraft

复合材料学报. 2022, 39(8): 4102–4116 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210913.003>

陶瓷基复合材料紧固件制造技术及其连接性能研究进展

Review of preparation processes and joining performance of ceramic matrix composite fasteners

复合材料学报. 2023, 40(6): 3075–3089 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230227.004>

SnO₂添加剂对AgCuOIn₂O₃复合材料电接触性能的影响

Effect of SnO₂ additive on the electrical contact properties of AgCuOIn₂O₃ composites

复合材料学报. 2022, 39(3): 1322–1331 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210415.001>

碳纤维增强银粉改性树脂复合材料的雷击损伤效应

Lightning damage effects of carbon fiber reinforced resin modified by silver powder

复合材料学报. 2020, 37(8): 1911–1920 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191118.002>

石墨烯/碳纳米管共改性碳纤维复合材料的结构、力学、导电和雷击性能

Structure, mechanical property, electrical conductivity and lightning strike damage behavior of graphene/carbon nanotube co-modified CFRPs

复合材料学报. 2022, 39(9): 4354–4365 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220803.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20250108.005

复合材料与紧固件间接接触电性能对装配结构雷击损伤特性的影响



分享本文

姜臻辉, 孙晋茹, 郭永强, 李树, 姚学玲*

(西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 雷击防护对于飞行安全至关重要, 机翼作为受到雷击频率较高的部位, 目前缺少雷电流在其内部传导过程中对材料损伤的相关研究。本文针对接触界面电性能对雷击损伤的影响这一关键问题, 通过实验及仿真方法研究了紧固件缠绕绝缘薄膜、缠绕导电薄膜及不作处理的 3 种带紧固件的碳纤维增强复合材料装配体在雷电流脉冲传导注入下的损伤特性。采用 Abaqus 有限元仿真软件建立了热-电耦合模型, 得到雷电流脉冲侧面注入条件下的温度、电场、电流分布。仿真与实验结果表明: 紧固件与孔壁间存在微小气隙, 在雷电流通过时容易击穿, 产生高温和火花, 对装配体造成损伤; 两种间隙处理方式均减小了雷电流传导过程中装配体的损伤, 但薄膜会出现不同程度的劣化; 若紧固件缠绕导电薄膜, 分层减小, 电流沿铺层方向流过紧固件, 在纤维与紧固件相交处集中形成高温区, 而缠绕绝缘薄膜加剧了分层, 电流绕过紧固件, 在纤维与其边缘相切处聚集, 形成高温区。该实验与仿真研究能够为带紧固件的复合材料雷击防护带来新的思路。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 紧固件; 雷击损伤; 有限元仿真; 接触电阻; 电性能; 电接触; 损伤特性

中图分类号: TB332; V258

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2025)11-6238-14

Influence of contact electrical properties between composites and fasteners on lightning damage characteristics of assembled structure

JIANG Zhenhui, SUN Jinru, GUO Yongqiang, LI Shu, YAO Xueling*

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Lightning strike protection is crucial for flight safety. Wings are more frequently struck by lightning, but there is a lack of research on the damage of materials during the conduction of lightning current inside. In this paper, the damage characteristics of three kinds of carbon fiber reinforced composite assemblies with fasteners wrapped with adiabatic film, conductive film and no treatment under lightning impulse conduction was investigated by experimental and simulation methods. The thermal-electrical coupling model was established by using Abaqus finite element simulation software, and the temperature, electric field and current distributions were obtained under the condition of lightning current lateral injection. Simulation and experimental results show that there is a small air gap between the fastener and the hole wall, which is easy to breakdown when the lightning current flows through, generating high temperatures and sparks, and causing damage to the assembly. Both gap treatments reduce the damage to the assembly during the lightning current conduction process, but the film will be degraded to varying degrees; if the fastener is wound with conductive film, the delamination decreases, the current flows through the fasteners in the direction of the layup, and the high temperature zone is formed at the intersection of the fibers and the fasteners. The delamination is exacerbated by the wrapping of the insulating film, where

收稿日期: 2024-09-30; 修回日期: 2024-12-10; 录用日期: 2024-12-22; 网络首发时间: 2025-01-09 13:46:35

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250108.005>

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (52007146); 浙江省自然科学基金 (LTGY23E070001)

Youth Program of the National Natural Science Foundation of China (52007146); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LTGY23E070001)

通信作者: 姚学玲, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料雷电效应和电磁防护技术 E-mail: xlyao@xjtu.edu.cn

引用格式: 姜臻辉, 孙晋茹, 郭永强, 等. 复合材料与紧固件间接接触电性能对装配结构雷击损伤特性的影响 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(11): 6238-6251.

JIANG Zhenhui, SUN Jinru, GUO Yongqiang, et al. Influence of contact electrical properties between composites and fasteners on lightning damage characteristics of assembled structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(11): 6238-6251(in Chinese).

the current bypasses the fastener and collects at the fiber tangent to its edge, creating a high-temperature zone. This experimental and simulation study can bring new ideas for lightning protection of composite materials with fasteners.

Keywords: carbon fiber reinforced composites; fasteners; lightning damage; finite element simulation; contact resistance; electrical properties; electrical contact; damage characteristics

从 1903 年莱特兄弟的“飞行者一号”首航开始，复合材料就在航空领域被广泛应用。其中碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)在 20 世纪 60 年代末开始在军用飞机领域开始应用并逐步推广到民航领域^[1]。由于其轻质、高强的特性，能够极大地提高燃油效率和飞行性能，在飞机许多部件上取代传统的金属材料^[2]。机翼是 CFRP 的重要应用部件^[3]，而民航客机的油箱大多位于机翼，是遭受雷击风险较高的区域。尽管 CFRP 本身导电性能较差，在加工、组装过程中不可避免需要用到金属铆钉、紧固件^[4]，两种材料导电性能差异很大，雷击损伤机制和纯 CFRP 区别较大。当机翼遭受雷击时，雷电流在传导至金属框架前会在复合材料内部传导，而金属紧固件的存在会对分流产生影响，以至在间隙处产生高温乃至火花，严重影响飞行安全，因此研究紧固件与复合材料接合处导电性能对雷电流传导过程中的损伤特性的影响具有很大意义。

当前针对无紧固件 CFRP 材料本身雷击损伤机制的研究较丰富^[5-7]，Dong^[8]在多物理耦合场中引入热解度进行电-热-热解关联分析，得到了更加准确的损伤模拟结果；防护手段也日趋成熟，主要有提高碳纤维基体导电性能^[9-10]和铺设导电防护层^[11-12]两种思路，而目前商业运行的民航飞机表面主要采取铺设铜网进行雷电防护：Guo^[13]发现铜箔和铝箔都能很好地抑制雷电损伤，具有各向异性导电率的膨胀箔如果能根据飞机雷电分区设计好铺设方向，就能大大提高防雷效果。针对带紧固件 CFRP 的雷击损伤机制和防护的研究较少。Paolo 等^[14]将 50 kA 的雷电流分别作用在含有 Hilok 紧固件的 CFRP 并进行剩余强度测试，发现紧固件的存在会使雷电流更易沿厚度方向扩散，从而影响剩余强度；尹俊杰等^[15]基于雷击过程中的能量平衡关系利用 Abaqus 软件建立了热-电耦合模型，对不同边界电势条件下的雷击烧蚀进行分析；田向瑜等^[16-17]的研究得出雷击在紧固件上使电流扩散到整个厚度，损伤面积和分层情况随电流增加而剧增，试样尺寸对雷击损伤影响较小的结论。紧固件的尺寸^[18]和排列分布^[19]对雷击损

伤也有很大影响。目前针对带紧固件的 CFRP 雷击防护基本都集中于雷击直接作用于紧固件情况下的损伤，对雷电流在材料内部传导过程中紧固件对分流及损伤的影响研究缺失，部分研究采用的波形比例不详且没有参考的标准，不够规范。

本文根据上述研究中存在的针对雷电流传导过程中紧固件对复合材料分流、损伤影响的研究缺失等问题，参考 SAE-ARP 5412A 标准^[20]采用不同幅值的 8/20 μ s 脉冲波形电流对含有不同导电性能材料薄膜包裹的紧固件的 CFRP 进行侧面雷电流注入，采用显微镜观察和红外、高速摄影对雷击的过程和最终损伤进行检查，并采用 Abaqus 有限元分析软件建立了含有带导电/绝缘层紧固件的 CFRP 雷电流侧面注入模型进行模拟和定性分析。实验结果与仿真模型在损伤规律上保持一致。

1 实验与仿真方法

1.1 原材料、设备与方法

1.1.1 实验设备

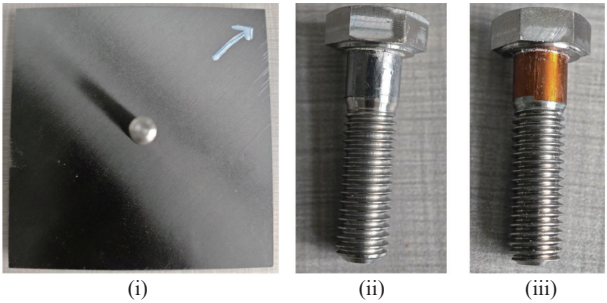
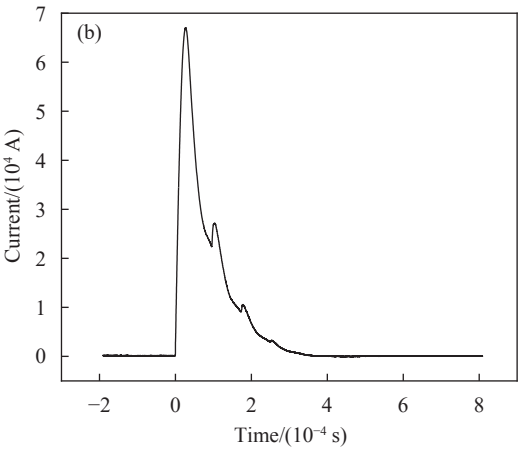
实验平台采用西安交通大学高电压大电流测试技术及装备工程试验室自主研发的雷电流组合波测试系统，实验设备和脉冲电流波形分别如图 1(a)、图 1(b)所示，雷击实验相关参数如表 1 所示。

1.1.2 试样准备与处理

CFRP 复合材料型号为 T700，生产厂家为上伟碳纤复合材料股份有限公司；树脂型号为 SWANCOR 2554，含量为 33%，与碳纤维具有极好的相容性，铺层结构采取 $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{3s}$ ，层数为 24 层，总厚度为 2.4 mm，采取热压罐成型工艺^[21]，试样平面尺寸为 100 mm×100 mm，在中心使用金刚石钻头钻取直径为 8.1 mm 的孔。紧固件采用中华人民共和国航天行业标准《航天型号用紧固件选用指南》(QJ 20054—2011^[22])推荐的 TC4 钛合金六角螺栓，规格选择 M8，其中与孔壁接触部分为光杆。分别采用厚度为 0.05 mm 的聚酰亚胺薄膜和 0.05 mm 的石墨片缠绕在紧固件的光杆部分并分别使用环氧树脂与导电银浆粘合、



(a) Experimental platform



(c) CFRP specimen and processed fasteners

CFRP—Carbon fiber reinforced polymer

图1 雷电流测试系统(a)、实验波形(b)与试样(c)

Fig. 1 Lighting test system (a), experimental waveform (b) and specimens (c)

表1 雷击实验参数(8/20 μs 波形)

Table 1 Experimental parameters of lightning impulse waveform (8/20 μs waveform)

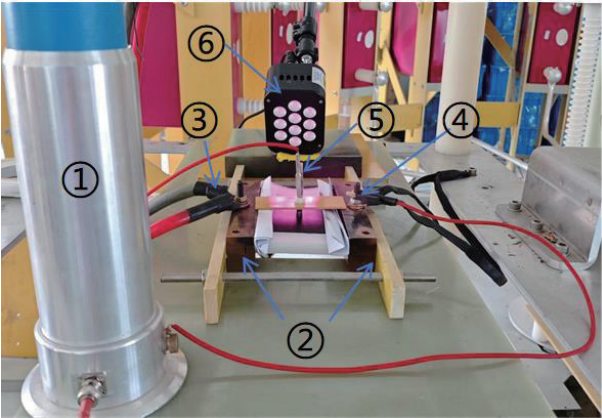
Specimen size/mm ³	Peak current/kA	Charge voltage/kV	Action integral/(A ² ·s)
100×100×2.4	16	5	10 882.93
100×100×2.4	27	8	30 388.22
100×100×2.4	40	12	71 863.58
100×100×2.4	50	15	114 302.78
100×100×2.4	67	20	204 565.96

固化,使处理后紧固件直径略大于8.1 mm,与碳纤维板中心圆孔形成较小的干涉配合^[23]以保证一定的连接强度.同时将孔直径为8.0 mm的CFRP

与无处理的紧固件配合作对照.

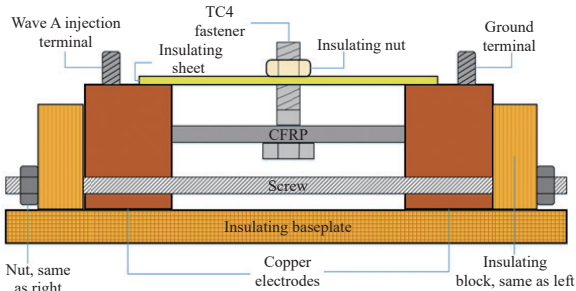
1.1.3 实验方法

根据SAE-ARP 5416A标准^[24]定制合适的夹具来夹持试样并注入电流,实际组装连线和夹具示意图如图2(a)、图2(b)所示.实验设定雷电流从试样左端注入,右端接地,CFRP左右侧面被铜电极夹紧,紧固件穿过树脂片后用绝缘螺母固定,在放电前开启红外光源,为高速摄影提供良好的照明,并在放电完成后立刻关闭避免对试样温度造成影响.在实验过程中将示波器的1通道连接电流输入端得到实验过程中流经试样的电流曲线,将连接分压器高压端的夹子夹在紧固件的螺杆尾端,低压端连接在接地端,得到二者间的电势差变化曲线,分析间隙导流情况.



①—Voltage divider; ②—Copper electrode; ③—Current injection terminal; ④—Ground terminal; ⑤—Voltage probe; ⑥—Infrared light source

(a) Schematic diagram of the actual assembly



(b) Schematic diagram of the fixture

TC4—90%Ti+6%Al+4%V

图2 夹具实际组装(a)与结构示意图(b)

Fig. 2 Schematic diagram of the actual assembly (a) and structure of the fixture (b)

1.2 有限元仿真模型建立方法

1.2.1 带有金属紧固件的CFRP电-热耦合模型

由于本文篇幅限制,仿真不考虑雷击过程中的力学与电磁效应,仿真结果仅作为电流与温度

分布的佐证。金属紧固件的存在会改变复合材料整体的导电性能，雷电流从侧面注入后通过电流通路上不同电导率的铺层进行传导，由于绝缘树脂基体的存在和碳纤维材料的各向异性导电性特征，不同铺层上分配的电流密度各异，产生的焦耳热也不同，面内与层间均会产生电势差。当温度或电势差达到一定数值，碳纤维之间的树脂会发生热降解或电击穿，造成分层或纤维断裂等损伤。Abaqus 软件的热-电模块基于此理论进行数值分析，其基本原理如下：

(1) 电场控制方程

雷电流从复合材料侧面注入试样时，CFRP 模型单元的电场分布服从 Maxwell 方程组：

$$\int_S Jn \, dS = \int_V r_c \, dV \tag{1}$$

式中： V 代表单元体积； J 代表单元电流密度； S 代表单元截面积； r_c 代表单元电荷体密度； n 代表 S 的外法向。

将欧姆定律代入上式得到电场有限元控制方程：

$$\int_V \frac{\partial \delta \varphi}{\partial x} \sigma^E \frac{\partial \varphi}{\partial x} \, dV = \int_S \delta \varphi \bar{J} \, dS + \int_V \delta \varphi r_c \, dV \tag{2}$$

其中： $\bar{J} = -Jn$ 为带有单元内电流密度方向的矢量； φ 代表电势能； x 为空间坐标轴方向； δ 用于描述场强微小变化； σ^E 代表电导率矩阵。

根据模型内电流密度分布情况对单元中阻性部分由电流产生的焦耳热进行计算，得到导体中电流焦耳热能量功率 P_{ec} 为

$$P_{ec} = J \cdot E = \frac{\partial \nabla \varphi}{\partial x} \cdot \sigma^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \tag{3}$$

其中： E 表示电场强度； $\nabla \varphi$ 表示电势的梯度。

电能并不完全转换成热能，最终电能转化为热能部分 Q_{ce} 的计算公式为

$$Q_{ce} = \eta P_{ec} \tag{4}$$

其中， η 为焦耳热份额百分系数。

(2) 热平衡方程

雷击过程中的温度场包括焦耳热的产生、传导和消散，其间的关系根据能量守恒定理可用下式表示：

$$\int_V \rho C_r \sigma^E \delta \theta \, dV + \int_V \frac{\partial \delta \theta}{\partial x} K \frac{\partial \theta}{\partial x} \, dV = \int_V \delta \theta r \, dV + \int_S \delta \theta q \, dS \tag{5}$$

式中： C_r 代表材料的比热； ρ 表示材料密度； δ

和 θ 分别代表电势和温度对时间变化的函数； K 为热导率； r 代表单位体积内产生的热量； q 为单位时间内物体传导的热量。

根据式 (3) 和式 (5)，雷电流注入复合材料的作用效果主要包括焦耳热引起的瞬态热分析和材料内部电流引起的稳态电场分析，温度的改变会引起电导率的变化，而电场强度达到阈值后发生的击穿也会反作用于焦耳热的产生，形成了复杂的热-电耦合机制。

1.2.2 有限元模型建立与网格划分

为了模拟不同间隙处理方式对带有紧固件的 CFRP 在雷电流脉冲侧面注入下的损伤情况，利用 Abaqus 有限元仿真软件建立了热-电耦合模型 (图 3)，模型包含 3 个部件：带有中心孔的碳纤维板、省略了螺杆头部和螺纹部分的 TC4 圆柱 (模拟 CFRP 与螺杆接触的部分)、缠绕在紧固件外的薄膜。CFRP 利用壳单元生成实体层，层数为 24，每层厚 0.1 mm，边长为 100 mm，铺层方向为 $[45, 0, -45, 90]_{3s}$ ，左侧为电流注入端；右端为接地端，电势 $E=0$ ；紧固件和薄膜采用实体单元建模，紧固件简化为直径 8.0 mm、厚度为 2.4 mm 的金属圆杆，薄膜简化为内径 4.0 mm、厚度为 0.05 mm、高度为 2.4 mm 的圆环，三者相互通过绑定的方式关联。环境和模型整体初始温度为 $T=25^\circ\text{C}$ ，CFRP 的热辐射系数 $\varepsilon_1=0.85$ ，TC4 的热辐射系数 $\varepsilon_2=0.92$ ，波形取自示波器测得的真实 67 kA 的脉冲波形，分析步总时间设置为 200 μs 。

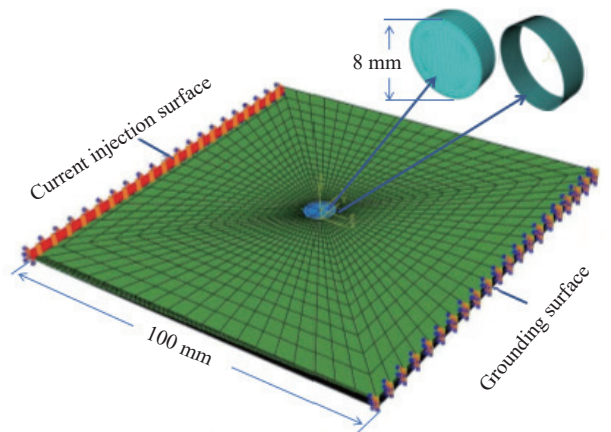


图 3 含紧固件与间隙薄膜的 CFRP 有限元模型
Fig. 3 Finite element modeling of CFRP with fasteners and gap film

1.2.3 材料属性的确定

碳纤维板和金属紧固件的相关材料参数参考文献^[25-28]，将实验组的薄膜属性分别设置为聚酰

亚胺与天然石墨的数值，对照组的薄膜设置成空气的属性，相关材料参数如表 2 和表 3 所示。表中的 v_{sd1} 是状态变量，表征石墨片在不同温度下的状态，其中 0 表示石墨片未损伤，1 表示石墨片受热氧化，2 表示其出现烧蚀损伤。当状态变量改变时，相应的电、热属性就会发生改变，并且当外界条件改变时，状态变量不会再改变。此功能由 usdfld 子程序现； k_x 、 k_y 、 k_z 分别表示石墨片垂直于面内和沿面 x 方向和 y 方向的热导率，其沿面热导率远优于厚度方向热导率。聚酰亚胺和空气层的热学参数设置为定值，如表 4 所示^[29]。

表 2 石墨片的热学参数^[25-26]

Table 2 Thermal parameters of graphite flakes^[25-26]

$T/^\circ\text{C}$	v_{sd1}	$k_x/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$k_y/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$k_z/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
25	0	40	500	500	710
200	0	35	450	450	650
200	1	35	450	450	650
400	1	10	200	200	550
400	2	10	200	200	550
600	2	5	100	100	500

Notes: T represents temperature; v_{sd1} represents solution-dependent variable; 0, 1 and 2 indicate that graphite sheet is intact, pyrolysis and ablation respectively; k_x , k_y and k_z indicate the thermal conductivity of the graphite sheet perpendicular to the surface and along the surface in the x -direction and y -direction, and its thermal conductivity along the surface is much better than that in the thickness direction, respectively; C_p represents specific heat.

表 3 石墨片的电学参数^[27-28]

Table 3 Electrical parameters of graphite sheet^[27-28]

$T/^\circ\text{C}$	v_{sd1}	$\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$
25	0	200
200	0	250
200	1	250
400	1	200
400	2	200
600	2	100

Note: σ represents electrical conductivity.

表 4 聚酰亚胺 (PI) 和空气的热学参数^[29]

Table 4 Thermal parameters of polyimide (PI) and air^[29]

Material	$k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
PI	0.35	109
Air	0.025 6	1 005

Note: k is thermal conductivity of polyimide.

为了简化模型，提高收敛性，将聚酰亚胺的击穿场强设置为仅与电场强度有关， v_{sd2} 代表一个标记击穿与否的状态变量，0 代表未击穿，1 代表击穿，击穿后的区域由绝缘变为导通，并在整

个放电过程中都不会恢复。文献^[30] 研究得出强电场对聚酰亚胺的导电性能有增强作用，击穿电压根据仿真复现实验中的现象，计算出击穿时刻前一分析步薄膜上最大场强的数值，相关参数如表 5 所示。

为了简化模型，假设气隙的击穿电压同正常状态下的空气击穿电压^[31]，而击穿后电弧的电导率约为 Ω/cm 的量级^[32]，考虑到该研究中间隙距离很短而接触面曲率较小，电场分布较均匀，因此实际短间隙的电导率会小很多，综合考量之下设定击穿后的气体间隙电导率为 10 S/m (表 6)。

表 5 聚酰亚胺的电学参数^[30]

Table 5 Electrical parameters of polyimide^[30]

$E/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	v_{sd2}	$\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$
1	0	1×10^{-15}
1 000 000	0	1×10^{-13}
18 000 000	1	100
1	1	100

Notes: E represents electric field strength; v_{sd2} is a state variable; 0 and 1 indicate that material is intact and breakdown respectively.

表 6 空气层的电学参数^[31-32]

Table 6 Electrical parameters of the air layer^[31-32]

$E/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	v_{sd3}	$\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$
1	0	1×10^{-14}
3 000 000	1	10
1	1	10

v_{sd3} 也是一个标记空气层是否击穿的标志，其原理同上。

2 结果与讨论

2.1 雷击后试样表观形态

图 4 展示了 3 组试样在遭受 67 kA 雷电流脉冲作用后的表观情况，图 4(a1)~图 4(c1) 为试样厚度方向的损伤情况，图 4(a2)~图 4(c2) 为试样表面的损伤情况，其中方框中表示分层，虚线圈出的为烧蚀痕迹。由图可知，对照组在厚度方向的边缘处出现轻微分层，在孔的周围也由于火花喷溅导致烧蚀；带有石墨片的组在层间和表面都没有明显的分层现象，侧面由于电流产生的焦耳热导致树脂部分热解，表面出现微小的孔洞，树脂变脆，孔壁上下两侧也出现了部分烧蚀痕迹；带有聚酰亚胺薄膜的组的分层损伤最为严重，在边缘处出现了较明显的纤维脱层与翘曲，主要是由于其导电路径相对最小，边缘处的场强最高，但是在孔

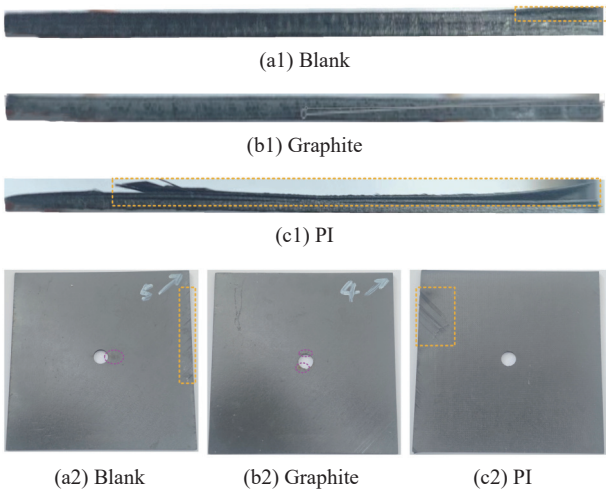


图4 雷击后 CFRP 表现状态

壁周围没有明显的烧蚀痕迹，说明该组试样产生的火花很少。

2.2 CFRP 与紧固件间接接触导电性能对试样温度分布的影响

图 5 展示了带石墨片、聚酰亚胺薄膜的试样和对照组在不同雷电流幅值作用下的红外摄影图，图 5(a1)~图 5(a3) 为缠绕石墨片组在不同幅值雷电流 A 波作用下的温升及其分布图。当间隙导电性能较高时，高温区分布从电流注入端到紧固件呈

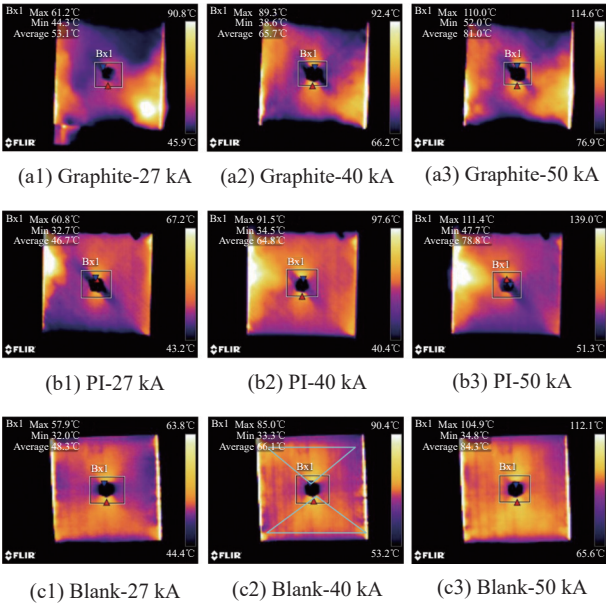


图 5 带有石墨片 ((a1)~(a3))、聚酰亚胺薄膜 ((b1)~(b3)) 和对照组试样 ((c1)~(c3)) 在不同幅值雷电流传导下的温度分布

Fig. 5 Temperature distributions of specimens with graphite sheets ((a1)-(a3)), polyimide films ((b1)-(b3)) and control specimens ((c1)-(c3)) under different amplitudes of lightning current conduction, respectively

现明显的变窄并最终汇集于紧固件周围，从 CFRP 的中心区域再到电流接地端，高温区域宽度逐渐增大并最终延伸到整个接地端。值得注意的是，电流注入端的不同位置温度差异较大，高温区分布于靠近注入端下端，该区域与紧固件间的角度约为 -45° ，即 CFRP 背面表层纤维排布方向，由此推测电流更倾向于沿纤维方向通过紧固件向接地端传导。

图 5(b1)~图 5(b3) 为缠绕聚酰亚胺薄膜的实验组的红外截图。由于聚酰亚胺良好的绝缘和绝热性能，沿首层铺层方向的电流不能通过紧固件流经该区域，只能绕过紧固件从其两侧流过，紧固件周围沿 CFRP 对角线方向出现两个低温区，相应的在紧固件的上下两端出现两个相对对称的高温区，而温度最高点也相应出现在这两个高温区与紧固件的边界上。

与间隙处理过的试样不同，对照组 (图 5(c1)~图 5(c3)) 展示了正常情况下带紧固件的 CFRP 流过电流的生热情况。由于钻孔工艺的限制，8.0 mm 的钻头加工出的孔往往比标定尺寸大几丝，并且由于钻孔过程中左右夹持的关系，CFRP 板在水平方向受到挤压形成微小形变，而当结束加工，外在的压力撤去 CFRP 恢复形变，因此孔在水平方向的直径略大于垂直方向。在紧固件与 CFRP 之间存在很薄的空气间隙，当该处场强到达击穿电压时，气隙击穿，形成导电通路，同时该处温度也剧烈上升，整体温度分布呈现漏斗形。

2.3 雷击作用过程的电气响应分析

图 6 中实线表示流经整个试样电流，虚线描绘紧固件与接地端间的电势差。图 6(a) 为 67 kA 下带有石墨片组的电流-电压曲线，由于紧固件在整个放电过程中均导流，电势差与电流波形基本吻合，整体呈现阻性，由于 CFRP 板有感抗存在，因此电流与电压波形之间存在一些相位差；图 6(b) 为充电电压 15 kV 下的电流-电压波形，由于此时紧固件不导电，与接地端相当于断路，电压 U 波形表现为由脉冲电流 i 由时间 t 变化产生的感应电压，L 为电感：

$$U = L \frac{di}{dt} \tag{6}$$

图 6(c) 为充电电压为 20 kV 时带有缠绕聚酰亚胺 (PI) 薄膜紧固件试样的电压-电流波形曲线，PI 薄膜在此波形下单侧击穿，在极短的时间内电流涌入击穿点造成紧固件上的电势陡增并出现振

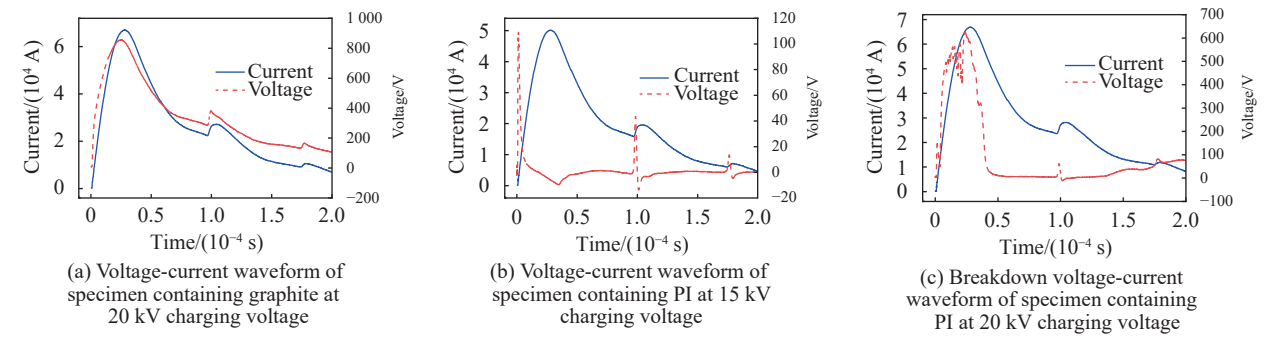


图6 实验中具有代表性的电流-电压波形图

Fig. 6 Representative current-voltage waveforms from the experiment

荡,但由于没有形成完整的电流通道,流入紧固件的电流迅速降低,紧固件上的电势很快跌落,与接地端的电势差迅速减小,波形形状很快变为感应电压波形。

2.4 不同处理的试样放电后试样损伤情况

图7展示了不同防护处理下试样的损伤情况。在67 kA的雷电流作用下,聚酰亚胺薄膜表面出现了较小的击穿点(图7(a)),其位于靠近左侧电流注入端的表面,击穿点形状近似椭圆,击穿点中心的TC4有轻微烧蚀痕迹。聚酰亚胺处理的试样的孔壁相对于无防护的组别,孔内壁明显光滑许多,仅在左侧与PI薄膜击穿位置对应处与其反对侧的孔壁出现了胶状残留物(图7(b)),根据击穿点的特征推测是聚酰亚胺融化残留的痕迹,孔壁处聚酰亚胺的击穿是热-电综合作用的结果:在雷电流脉冲的作用下孔壁达到了聚酰亚胺的热降解温度,材料绝缘性能退化或薄膜表层融化,绝

缘层的有效厚度变薄,导致其击穿场强比正常情况下低了1~2个数量级。

石墨片包裹的试样,其主要损伤是石墨层的烧蚀与氧化(图7(c)),同时由于石墨片较脆,当电流幅值较大时,石墨层会直接被电弧打碎,整体结构变得松散(图7(d)),碎片随着气流被冲出间隙,导电能力大幅下降并且薄膜缺失的部分被空气取代,在后续的雷击中更容易出现电弧、火花等危害安全现象,但其孔壁损伤最小,几乎与实验前无差别(图7(e))。对照组的CFRP与紧固件之间存在微小的气隙,需要击穿气隙形成电流通路,此过程产生的火花瞬时温度可高达上千度,远远高于TC4的熔点,在紧固件上留下烧蚀痕迹(图7(f))。烧蚀区域附近的金属由于高温导致TC4表面的镀层氧化发黄。纤维间的粘附力减弱,热解气体的冲击使孔周围出现了如图7(g)中纤维撕裂、翘曲等现象。接触点的高温导致孔壁树脂汽

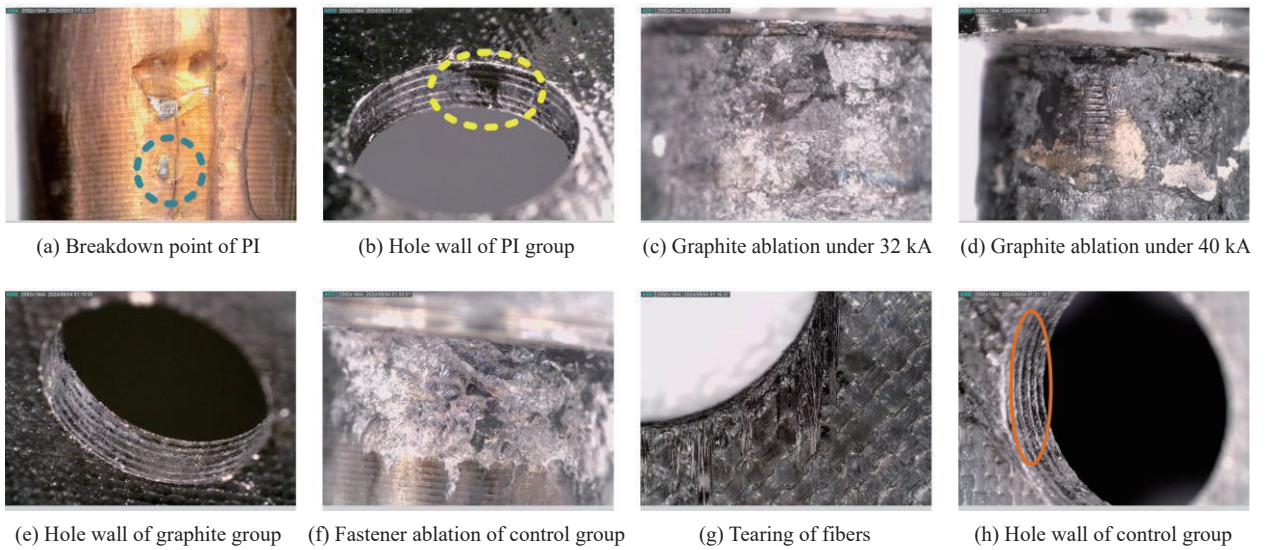


图7 CFRP 试样损伤形态显微拍摄

Fig. 7 Microscopic photos of CFRP specimens damage pattern

化而变得粗糙如图 7(h) 所示。

2.5 试样内部损伤的超声扫描结果

图 8 是不同间隙处理的 CFRP 板在经历 67 kA 雷电流脉冲作用后的超声扫描结果，中心孔部分用虚线圈出来表示。测试前的试样整体无明显损坏(图 8(a))，仅在部分孔壁处有细微的机械加工留下的损伤；无防护层的试样(图 8(b))在经历脉冲电流后在温度较高的孔壁上下两侧出现了较明显的损伤，通过观察试样内壁可以推断出损伤类型主要为树脂热解；石墨处理的试样(图 8(c))整体损伤很小，除了孔周围零星分布着一些损伤点外只有沿首层 45°铺层方向出现了一块三角形的损伤区域；聚酰亚胺处理的组(图 8(d))损伤面积明显大于之前的组，损伤分布与对照组类似。在雷电流流经 CFRP 的瞬间，材料内部尤其是紧固件周围瞬时温度高达上百度，远远超出了基体树脂的热解温度，瞬时产生大量热解气体，在紧密的碳纤维和紧固件的阻碍下不能迅速排出而在紧固件与 CFRP 的交界处产生了较高的内压，形成汽化反冲[33]。聚酰亚胺薄膜的形态在雷击过程中基本保持完好，没有大量的碎片或火花喷出，树脂热解产生的气体难以通过间隙迅速排出而在复合材料内部快速积聚，导致此种处理方式的复合材料较其他组分分层损伤更加严重。由超声扫描的结果可以得出，试样内部的损伤位置与电流和温度分布有关，而电流与温度分布则与间隙导电性能相关，因此对紧固件进行不同导电性能薄膜缠绕会对试样的分层损伤造成不同影响。

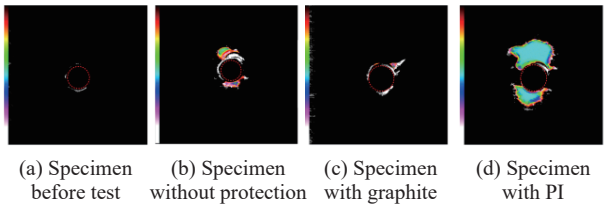


图 8 CFRP 试样超声扫描结果

Fig. 8 Ultrasonic scanning results of CFRP specimens

3 仿真结果与讨论

3.1 不同处理方式下 CFRP 板的电流分布

图 9 为 3 种不同处理方式的带紧固件的 CFRP 在峰值 67 kA 雷电流侧面注入下总体电流密度最高时刻的电流分布情况，其中图 9(a)代表带聚酰亚胺薄膜的试样，电流密度最高时刻约为 260 μs，图 9(b)代表带石墨片的试样，对应时间约为 280 μs，

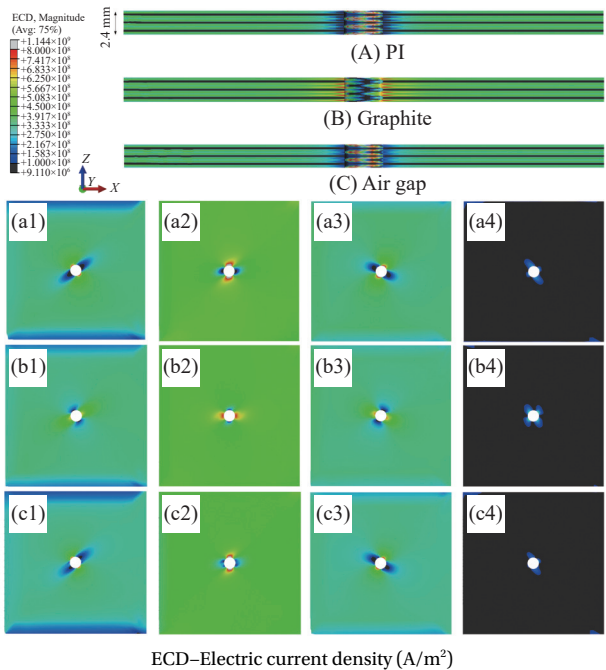


图 9 峰值 67 kA 的 A 波作用下 CFRP 电流分布仿真结果

Fig. 9 Simulation results of CFRP electric current distribution under the action of A-wave with peak 67 kA

图 9(c)代表带有空气间隙的试样，时间步约为 310 μs。不同组间由于导电性存在差异，因此电流最大值出现的时间不同，但都与脉冲电流峰值时间(300 μs)接近。数字 1、2、3、4 分别代表 45°、0°、-45°、90°方向的铺层，而图例旁三张细长的云图 A、B、C 则展示了 3 个模型沿 X 轴切开的层间电流分布

由于 CFRP 电导率和热导率的各向异性，因此不同模型不同铺层方向的各层电流分布均与纤维排列方向有关。紧固件位于试样的中心位置，金属的高导电性使紧固件导流与否对面内的电流分布具有重要影响。由于 CFRP 平行于纤维方向的电导率较高，因此电流优先沿着铺层方向向接地端传导。当电流流经紧固件周围时，若紧固件外缠绕绝缘材料，电流会绕过中心孔继续传导，在纤维方向平行线与孔壁相切处形成两个电流集中区；若紧固件外缠绕石墨等导电材料，电流则倾向于集中通过紧固件传导，在紧固件和经过孔中心的纤维方向平行线与孔壁相交处形成电流汇集区；若紧固件与 CFRP 间存在较大的间隙，在气隙厚度均匀的理想情况下，当孔壁左侧间隙的场强达到空气的击穿电压后就会形成电流通路，但由于气体通道的导电能力有限，因此对电流的吸引能力远没有导电固体层来得强，因此层内的

电流分布与PI组相差不大，但是相对更加均匀。对于纤维方向垂直于电流方向的90°铺层，由于其电阻率很高，相比于其他3个方向的铺层电流密度很低。

3.2 不同处理方式下CFRP板的温度分布

温度分布与电流分布有密不可分的关系。图10展示了3个模型在67 kA的雷电流A波侧面注入下的温度分布，其中温度高于400℃的部分用灰色标记，代表树脂热解较严重，而低于100℃的部分则标记为黑色，代表升温不明显。

从仿真结果中可以发现高温区域的分布与电流密度较高的区域基本重合，但又有所区别，主要体现在温度分布受相邻的上铺层的影响更大：例如对于0°铺层，其高温区域并不与高电流密度区域完全重合，而是向斜上方偏移，明显受到了首层45°铺层的传热影响，对于-45°和90°的铺层同理。聚酰亚胺组和空气间隙组的温度分布较接近，主要是由于二者的导电能力都比较差，电流分布差别不明显，但空气间隙组的温度分布明显比聚酰亚胺组更加均匀，是由于该组面内电流分布更均匀；空气间隙组在孔壁周围出现了一圈高温区，这是气隙大范围击穿产生的高温对CFRP孔壁产生了烧蚀，从前文的试样显微图片也能发

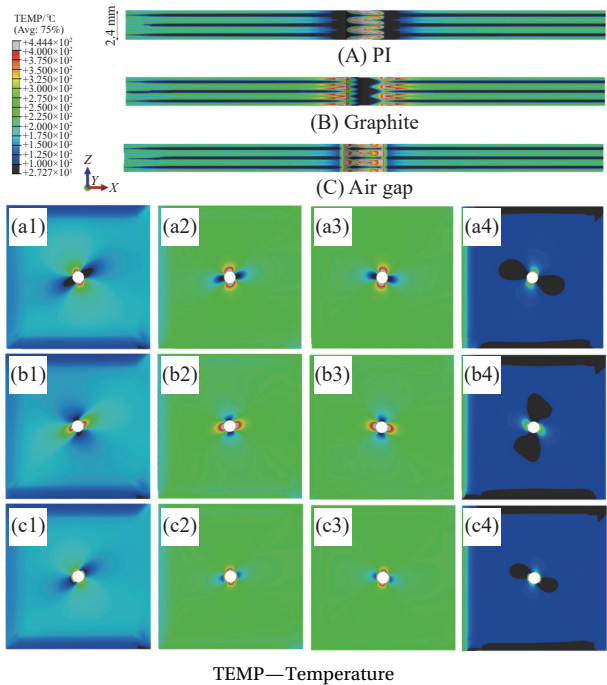


图10 峰值67 kA的A波作用下CFRP温度分布仿真结果

Fig. 10 Simulation results of CFRP temperature distribution under the action of A-wave with peak 67 kA

现，无防护的对照组孔壁烧蚀面积是最大的，这一点能从仿真里得到印证。

图11利用带聚酰亚胺薄膜试样的0°铺层，在软件中分别施加27 kA、40 kA、50 kA、67 kA的脉冲电流，将温度50℃以下用黑色标记，300℃以上用灰色标记，发现电流峰值与损伤分布无明显影响，当峰值在40 kA以下时未能达到树脂的热解温度，CFRP的热损伤不明显；当电流幅值达到40 kA及以上时开始出现热解并随着电流峰值升高，热解区域向上下两侧延伸，CFRP板整体温度上升。

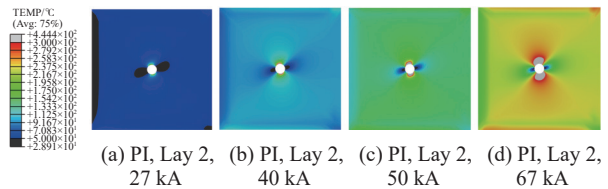


图11 带聚酰亚胺薄膜的CFRP试样在27 kA、40 kA、50 kA、67 kA峰值的脉冲电流作用下第二层的温升情况

Fig. 11 Temperature rise of the second layer of the CFRP specimen with polyimide film under pulsed currents of 27 kA, 40 kA, 50 kA and 67 kA peaks

3.3 导电、绝缘薄膜与空气间隙的损伤、击穿特性

3.3.1 渐进损伤过程

图12分别展示了石墨片烧蚀过程、聚酰亚胺薄膜击穿点及气隙中电流通道的形成过程，分别标注了各个变量的曲线采集的积分点。图12(a)选取的时间点分别为200 μs、350 μs、550 μs、2 000 μs，图12(b)对应分析步时间为170 μs，图12(c)选取的时间点分别为0.1 μs、30 μs、100 μs、1 000 μs，对于石墨片与气隙，选取的时间节点和下文这两组仿真结果的时间节点对应。

3.3.2 电流密度分布与变化

图13(a)~图13(c)分别展示了石墨片、PI薄膜与气隙的电流密度分布与变化情况，曲线图(图13(d)~图13(f))是各组相对应的电流密度变化曲线。图13(b)中PI薄膜的(b1)、(b2)、(b3)、(b4)分别对应的时间为0.1 μs(分析步刚开始)、17 μs(击穿前一步)、17.1 μs(击穿后第一个增量步)、200 μs(结束)，下文同。石墨片薄膜上的电流分布变化与CFRP的铺层角度相关性较大：电流密度较高区域与CFRP的0°与45°铺层所处的厚度方向相近，而水平上来看，则大致出现在沿水平方向25°左右的位置，即0°与45°夹角之间。在雷电流

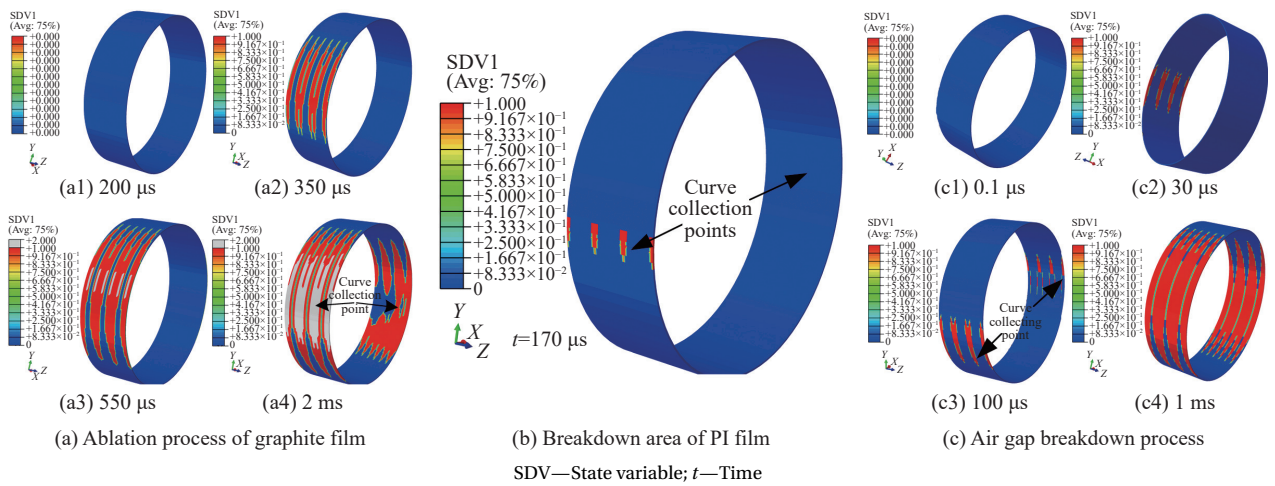


图 12 石墨片 (a)、聚酰亚胺薄膜 (b)、空气气隙 (c) 的烧蚀与击穿过程

Fig. 12 Ablation and breakdown process of graphite sheet (a), polyimide film (b) and air gap (c)

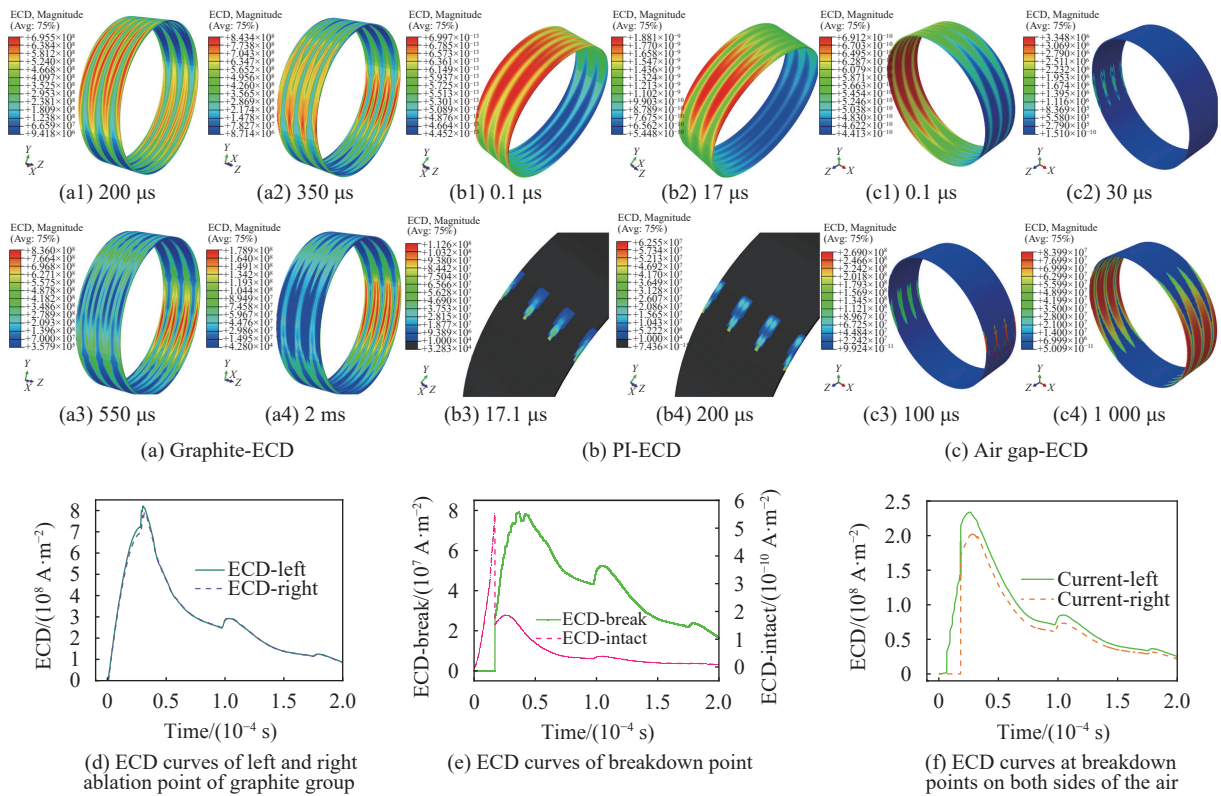


图 13 石墨片、聚酰亚胺薄膜、空气气隙的电流分布及变化 (ECD 的单位: A/m²)

Fig. 13 Current distribution and variation of graphite sheet, polyimide film and air gap (The unit of ECD is A/m²)

作用下石墨片温度逐渐升高,在一定温度范围内其电导率随温度上升而上升,因此通过烧蚀积分点的电流密度的上升速率较高,曲线较陡峭;当石墨片表面出现烧蚀,表面电流密度大幅降低,但贴近紧固件的一侧仍然保持较高的电流密度,由于烧蚀是由表及里的,贴近紧固件的石墨烧蚀程度较低,仍然具有较高的导电能力,且石墨片在水平方向的导电性远远优于厚度方向,电流在

石墨片内部进行了水平方向的再分配,但积分点整体的导电能力迅速降低,电流密度下降的速率也较快。当聚酰亚胺薄膜击穿前,电流微乎其微,其分布与电场分布高度类似,基本可以认为材料处于绝缘状态,当薄膜发生击穿时,击穿点的电流密度在很短的时间内上升至 $3 \times 10^7 \text{ A/m}^2$,对侧积分点的电流受到场强跌落的影响会有大幅跌落,二者后续走势与输入的脉冲波形类似。当空气气

隙场强小于击穿场强时，空气层绝缘，电流密度极小，当左侧场强较高处率先发生击穿，通过电流通道的电流迅速增大，但尚未形成完整电流通路，电流在间隙与紧固件内分布极不均匀，空气层中未击穿的部分电流密度依然很低；随着放电持续，左侧电流通路逐渐扩大，右侧击穿，左右击穿处的电流密度均出现阶跃，电流通路逐渐扩大，在后续时间的变化与电流波形相似。

3.3.3 场强分布及变化

石墨片、PI 薄膜与气隙的场强分布及变化如图 14 所示。对于石墨片，在其性能退化的过程中没有发生热电属性的突变，烧蚀点的场强变化规律基本与电流密度变化吻合：当薄片尚未烧蚀，承载较高电流密度区域的电场强度也相对较高；开始出现氧化时，由于性能退化不明显，烧蚀区域中间的电场强度依然高于两侧；当烧蚀程度严重，中心区域的热电性能大幅退化，电流从中心烧蚀区域向两侧分流，边缘处场强变高。PI 薄膜在没有击穿前整体场强随着电流的输入而持续升高，并且左右两侧存在较大的电势差；当薄膜左

侧发生击穿，击穿点的电压暴跌，其位于前分析步电场强度最高的位置，范围仅限于达到实验中击穿电压的若干单元，同时整个环上的整体场强也大幅跌落，右侧的 PI 在后续的放电过程中虽然场强有升高过程，但是始终无法达到击穿电压，没有形成完整的电流通路，带聚酰亚胺薄膜的试样在间隙处不会完全击穿，因此在击穿后右侧场强始终高于左侧。空气气隙的场强受到 CFRP 层间各向异性的影响，有明显厚度方向的差异，当气隙场强小于击穿场强时，空气层绝缘，气隙场强随时间逐渐升高并且左侧高于右侧；当左侧场强较高处率先发生击穿，该侧场强大幅跌落，右侧场强也会有较大降低，但尚未形成完整电流通路；随着放电持续进行，左侧击穿区域的面积不断扩大，场强依旧小于右侧，达到约 15 kV/cm，符合流注放电的特征 [34]；每当有新的电流通路产生时，未击穿区域的场强会有不同程度的跌落，因此右积分点的场强呈折线状上升并很快达到击穿电压，形成通过紧固件的完整电流通路，左右两侧击穿处均出现场强跌落；随着放电持续，左

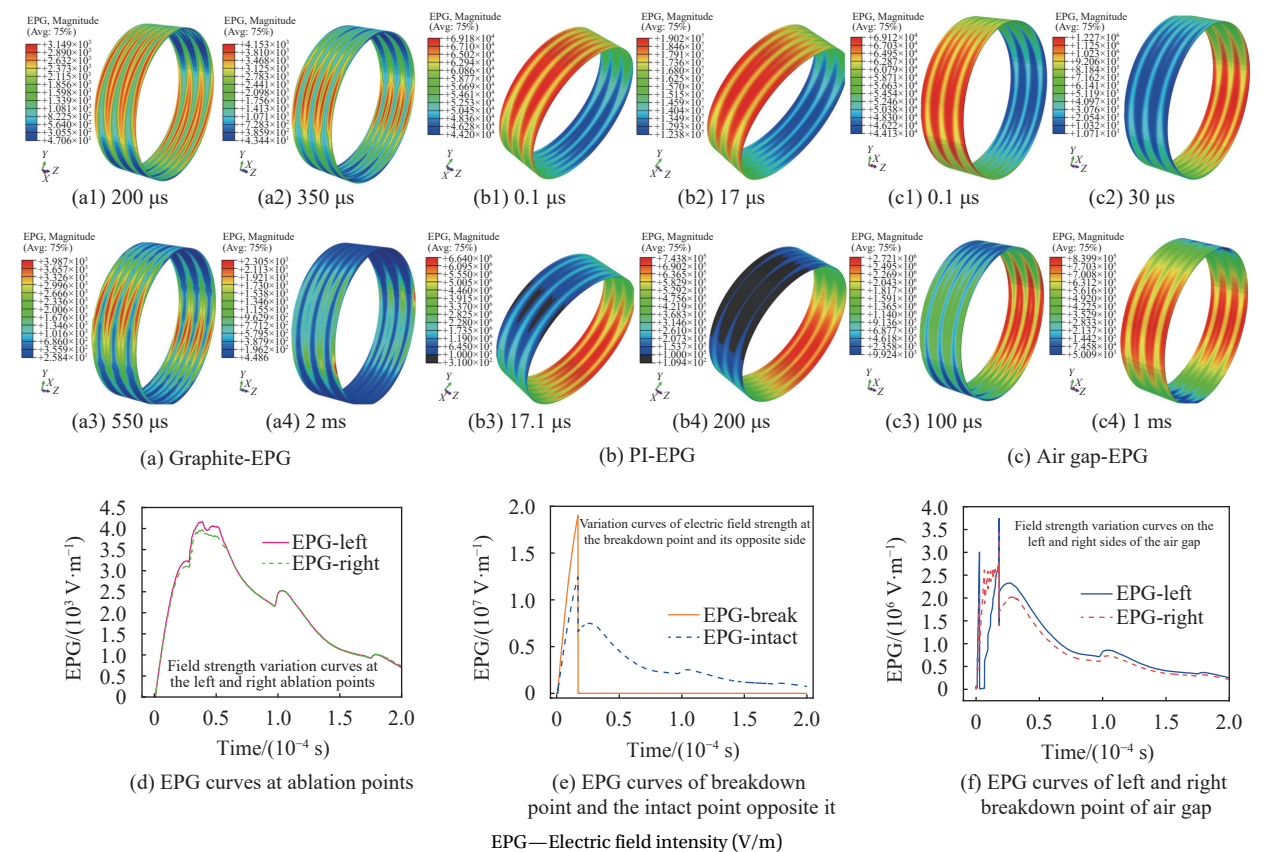


图 14 石墨片、聚酰亚胺薄膜、空气气隙的场强分布及变化
Fig. 14 Field strength distribution and variation of graphite sheet, polyimide film, and air gap

右两侧场强趋于一致且远高于未击穿区域，在后续的放电过程中维持 10 kV/cm 的数量级，与前人^[35]所做的棒-板间隙(碳纤维单丝视作棒，钉子由于曲率半径远大于碳纤维单丝因此可以视作板)流注放电电场强数量级一致，数值接近。

3.3.4 温度分布及变化

图 15 展示了石墨片、PI 薄膜及气隙的温度分布及变化过程。当电流较小，石墨温升不明显，随着温度进一步升高，其左右侧表面达到氧化温度，被氧化区域面积向周围尤其是水平方向扩展并出现烧蚀并逐渐深入内层；左右侧烧蚀点的温度变化差别不大，达到特定温度后石墨的热电属性大幅退化，温升变慢。击穿前 PI 薄膜圆环上下两端的温度最高可达 146℃，但此时薄膜中几乎无电流，自身不生热，为 CFRP 传热导致其上下两侧升温；PI 薄膜击穿瞬间温度可达到 1 600℃ 以上，大量电流通过细小的电流通路流入紧固件导致局部温度迅速升高，在之后的分析步进行降温过程，而 PI 圆环上下两侧则持续受到 CFRP 的

传热作用，在分析步结束后其外表面平均温度也可达到 360℃ 以上。空气层未被击穿时，气隙温升不明显；当左侧气隙被击穿，击穿点附近温度开始快速上升，而当右侧也达到击穿电压，形成通过紧固件的完整电流通道时，其温度也开始骤升，气体放电通道及贴近击穿处的紧固件温度持续上升并达到约 2 000℃ 以上，高温区域沿击穿通道延展，造成 TC4 表面烧蚀；气隙左侧率先击穿，大幅升温与开始降温的时间都更早，温升幅度远大于右侧。

4 结论

(1) 在本文实验条件下，含紧固件的碳纤维增强树脂复合材料在雷电流脉冲电流从侧面注入的情况下，间隙会出现不同程度的损伤：当间隙不做任何处理时分层损伤较明显，孔壁损伤与紧固件烧蚀最为严重；当采用导电石墨包裹紧固件时分层损伤最小，薄膜出现不同程度的烧蚀与碎裂，但相比于不做处理，孔壁与紧固件损伤都减弱了；采用高绝缘强度的聚酰亚胺包裹紧固件时，碳纤

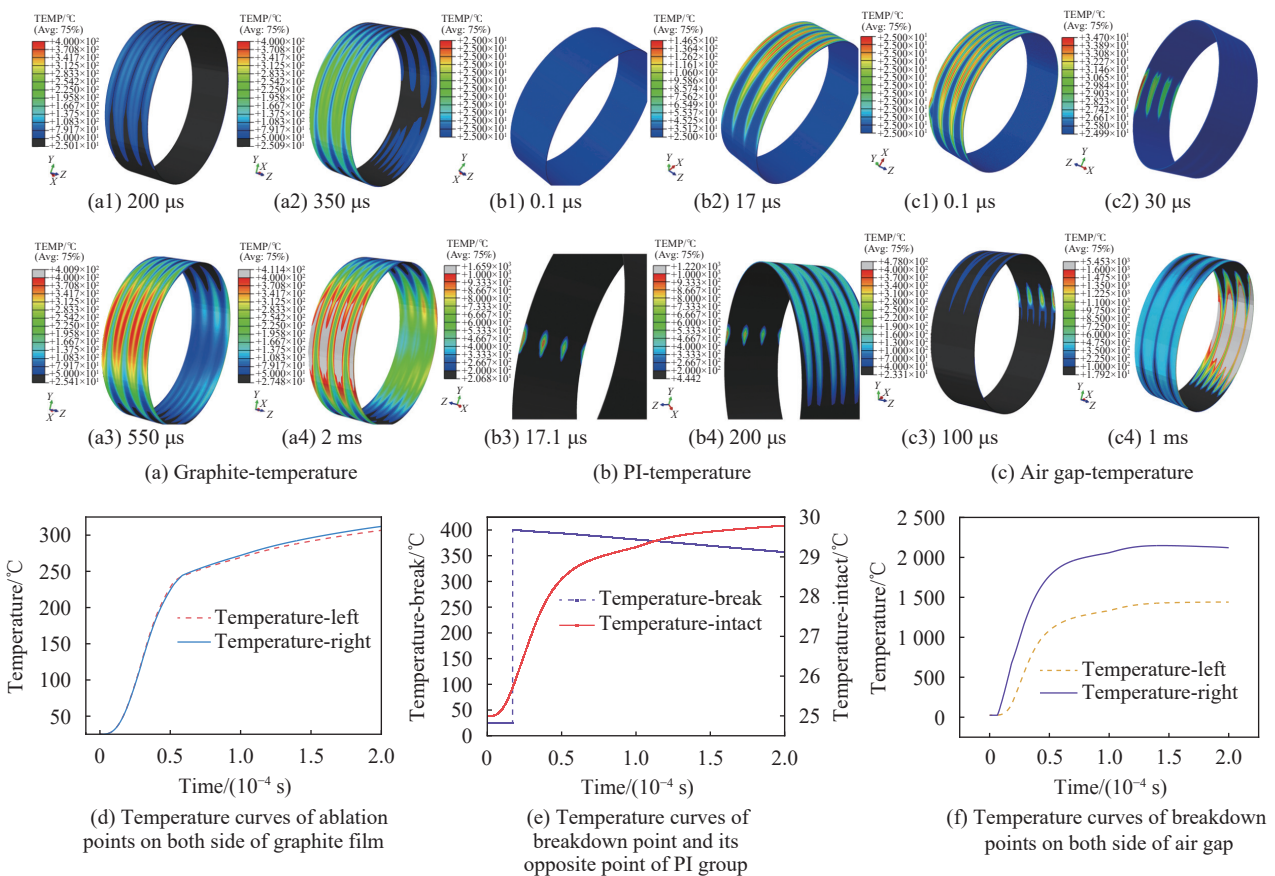


图 15 石墨片、聚酰亚胺薄膜、空气气隙的温度分布及变化

Fig. 15 Temperature distribution and variation of graphite sheet, polyimide film and air gap

维增强复合材料(CFRP)内部分层损伤较严重,但薄膜被击穿后也仅在紧固件表面留下微小的烧蚀凹坑,对紧固件与孔壁的损伤最小,整体表现最佳。

(2)碳纤维增强复合材料与紧固件间的间隙导电能力会对材料的电流、温度分布造成影响:当二者间导电性能较好时,电流倾向于沿纤维铺层方向通过紧固件向接地端传导,高温区域一般与电流集中区域部分重合,但是受到相邻铺层的影响较大,往往轻微偏离铺层;当二者间绝缘时,电流倾向于绕过紧固件传导,从而在铺层方向的直线与紧固件相切的两侧汇聚,温度分布规律同上;当二者间的导电能力不佳时,需要一定电流强度的波形才能使间隙导通,因此电流与温度分布与幅值有关。在相同实验条件下,电流与温度分布在相同方向的铺层间差别不大,基本呈现以厚度方向中心对称的规律。

(3)本文的仿真条件下的结果基本模拟了实验过程中碳纤维、间隙夹层与紧固件上的各个分量的变化趋势与状态变化:温度与电流分布规律基本与实验结果一致,间隙失效的位置与分布情况也基本与实验结果吻合,对于间隙的损伤也进行了较准确的模拟,可以用来定性模拟侧面注入A波情况下碳纤维增强复合材料的损伤。

参考文献:

- [1] SOUTIS C. Fibre reinforced composites in aircraft construction[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, 41(2): 143-151.
- [2] VLASOVA V. Use of composite materials in aircraft[C]//AIP Conference Proceedings. Melville, New York: American Institute of Physics, 2019, 2171: 030020.
- [3] ZHANG J, LIN G, UDAY V, et al. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 250: 110463.
- [4] 李林. 大型民机复合材料整体油箱雷电、静电防护设计[J]. *民用飞机设计与研究*, 2019(1): 29-33.
LI Lin. Protection design of lightning and static of composite integral fuel tank for large civil plane[J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2019(1): 29-33(in Chinese).
- [5] FUJISAWA Y, SATO T, HIRANO Y, et al. Nonlinear electrical conductivity characteristics under high impulse current and applications to lightning strike damage simulation for CFRP laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 183: 108230.
- [6] TOSHIO O, YOSHIYASU H, AKINORI Y. Coupled thermal-electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(8): 973-981.
- [7] 姚学玲, 郭灿阳, 孙晋茹, 等. 碳纤维复合材料在雷电流作用下的损伤仿真与试验[J]. *高电压技术*, 2017, 43(5): 1400-1408.
YAO Xueling, GUO Canyang, SUN Jinru, et al. Damage simulation and experiment of carbon fiber composites subjected to lightning current[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(5): 1400-1408(in Chinese).
- [8] DONG Q. Coupled electrical-thermal-pyrolytic analysis of carbon fiber/epoxy composites subjected to lightning strike[J]. *Polymer*, 2015, 56: 385-394.
- [9] KATARZYNA K, ANDRZEJ K. The effect of reaction medium on the conductivity and morphology of polyaniline doped with camphorsulfonic acid[J]. *Synthetic Metals*, 2016, 214: 45-49.
- [10] VIPIN K, LIN W H, WANG Y Q, et al. Enhanced through-thickness electrical conductivity and lightning strike damage response of interleaved vertically aligned short-carbon fiber composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 253: 110535.
- [11] EMMANUEL I A, SAMUEL A, NDUBUISI I M, et al. Simulating lightning effects on carbon fiber composite shielded with carbon nanotube sheets using numerical methods[J]. *Heliyon*, 2024, 10(8): e29762.
- [12] ZHU H X, FU K K, HUANG T L, et al. Highly conductive CFRP composite with Ag-coated T-ZnO interlayers for excellent lightning strike protection, EMI shielding and interlayer toughness[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 279: 111448.
- [13] GUO Y L. Enhanced lightning strike protection of carbon fiber composites using expanded foils with anisotropic electrical conductivity[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 117: 211-218.
- [14] PAOLO F, MARK M. Damage resistance and tolerance of carbon/epoxy composite coupon subjected to simulated lightning strike[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40(6/7): 954-967.
- [15] 尹俊杰, 李曙林, 姚学玲, 等. 含紧固件复合材料层压板结构雷击烧蚀损伤特征分析[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(1): 104-111.
YIN Junjie, LI Shulin, YAO Xueling, et al. Ablation damage characteristic analysis of composite laminate with fasteners subjected to lightning strike[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(1): 104-111(in Chinese).
- [16] TIAN X Y, YAO X L, FENG R X, et al. Damage mechanism analysis for carbon fiber reinforced polymer composites with a fastener under lightning strike[J]. *Composite Struc-*

- tures, 2022, 289: 115465.
- [17] 田向渝, 姚学玲, 孙晋茹, 等. 含紧固件碳纤维增强树脂复合材料在雷电流 A 分量下的损伤特性 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 356-365.
- TIAN Xiangyu, YAO Xueling, SUN Jinru, et al. Damage characteristics of carbon fiber reinforced polymer composites with fastener subjected to lightning A current[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(2): 356-365(in Chinese).
- [18] 单泽众, 罗名俊, 卢翔, 等. 含紧固件层合板雷击烧蚀损伤分析 [J]. 航空材料学报, 2021, 41(1): 83-90.
- SHAN Zezhong, LUO Mingjun, LU Xiang, et al. Analysis of lightning ablation damage of fastener-containing laminates under different factors[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(1): 83-90(in Chinese).
- [19] KUANG C Z, ZHOU Y C, ZHU H X, et al. Thermal and mechanical damage to carbon fibre reinforced composites with metallic fasteners under lightning strike[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 193: 111280.
- [20] SAE. Aircraft lightning environment and related test waveforms: SAE-ARP5412A[S]. London: SAE International, 2005.
- [21] LI Y F, SUN J R, LI S, et al. Experimental study of the damage behaviour of laminated CFRP composites subjected to impulse lightning current[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 239: 109949.
- [22] 国家国防科技工业局. 航天型号用紧固件选用指南: QJ 20054—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence, PRC. Guide for selection and application of fasteners for space project: QJ 20054—2011[S]. Beijing: Standard Press of China, 2011(in Chinese).
- [23] 高彬. 干涉配合紧固件的应力波安装方法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- GAO Bin. A study of stress wave installation methods for interference fit fasteners[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004(in Chinese).
- [24] SAE. Aircraft lightning test methods: SAE-ARP5416A[S]. London: SAE International, 2005.
- [25] MACHIDA Y, MATSUMOTO N, ISONO T, et al. Phonon hydrodynamics and ultrahigh-room-temperature thermal conductivity in thin graphite[J]. Science, 2020, 367: 309-312.
- [26] TOULOUKIAN Y S, POWELL R W, HO C Y, et al. Thermal conductivity: Metallic elements and alloys[M]//Thermophysical properties of matter—The TPRC data series. New York: IFI/Plenum, 1970: 1595.
- [27] RATTANAWEERANON S, LIMSUWAN P, THONGPOOL V, et al. Influence of bulk graphite density on electrical conductivity[J]. Procedia Engineering, 2012, 32: 1100-1106.
- [28] 邹艳红, 刘洪波, 傅玲, 等. 热解温度对氧化石墨的结构与导电性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2006(3): 318-323.
- ZOU Yanhong, LIU Hongbo, FU Ling, et al. Influence of pyrolytic temperature on structures and properties of graphite oxide[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006(3): 318-323(in Chinese).
- [29] 查俊伟, 王帆. 高导热聚酰亚胺电介质薄膜研究进展 [J]. 物理学报, 2022, 71(23): 190-207.
- ZHA Junwei, WANG Fan. Research progress of high thermal conductivity polyimide dielectric films[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(23): 190-207(in Chinese).
- [30] 王松, 武占成, 唐小金, 等. 聚酰亚胺电导率随温度和电场强度的变化规律 [J]. 物理学报, 2016, 65(2): 252-258.
- WANG Song, WU Zhancheng, TANG Xiaojin, et al. Study on temperature and electric field dependence of conductivity in polyimide[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 252-258(in Chinese).
- [31] 顾乐观, 张建辉, 孙才新. 染污光滑圆柱绝缘子沿面电场分布对闪络过程的影响 [J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(s1): 70-76.
- GU Leguan, ZHANG Jianhui, SUN Caixin. Influence of surface electric field distribution along polluted cylindrical insulator on flashover process[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(s1): 70-76(in Chinese).
- [32] 刘晓鹏, 赵贤根, 马御棠, 等. 空气间隙击穿后电弧通道的特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5302-5311.
- LIU Xiaopeng, ZHAO Xianguan, MA Yutang, et al. Characteristics of the arc channel during the post-discharge stage in air gap[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 5302-5311(in Chinese).
- [33] LIU Z Q. Combining analysis of coupled electrical-thermal and blow-off impulse effects on composite laminate induced by lightning strike[J]. Applied Composite Materials, 2015, 22(2): 189-207.
- [34] 梁曦东, 陈昌渔, 周远翔. 高电压工程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 19-22.
- LIANG Xidong, CHEN Changyu, ZHOU Yuanxiang. High voltage engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 19-22(in Chinese).
- [35] 张贇, 曾嵘, 黎小林, 等. 大气中短空气间隙流注放电过程数值仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2008(28): 6-12.
- ZHANG Yun, ZENG Rong, LI Xiaolin, et al. Numerical simulation on streamer discharge of short air gap of atmospheric air[J]. Proceedings of the CSEE, 2008(28): 6-12(in Chinese).