

# 铺设防雷金属网的 CFRP 板材雷击损伤研究

罗洋, 杜鸣心, 雷广州

(西安爱邦电磁技术有限责任公司, 西安 710077)

**摘要:** 雷电会对使用碳纤维增强复合材料 (CFRP) 的航空器安全飞行产生极大威胁, 目前广泛使用的雷击防护手段之一是在 CFRP 材料表面铺设金属网。在防雷设计中, 为了在加强防护效果与减轻部件质量之间取得平衡, 需要研究被防护部件铺设不同规格金属网时, 遭遇雷击后的电流和温度分布。本文对防雷金属网建立一体化的雷击热损伤等效模型, 推导各向异性等效参数, 并将等效模型计算结果与精细建模结果和试验结果进行对比。对比结果表明: 本文所用的等效仿真方法可以有效表示各规格金属网的烧蚀程度, 铺设金属网能提供有效的雷击直接效应防护, 仿真结果可为雷电防护方案设计提供指导。  
**关键词:** CFRP, 金属网, 雷击, 直接效应, 电热耦合

## 1 引言

雷电是一种包含巨大能量的大气放电现象, 会对使用碳纤维增强复合材料 (CFRP) 的飞行器产生极大安全威胁, 目前广泛使用的雷击防护手段之一是在 CFRP 材料表面铺设防雷金属网<sup>[1]</sup>。在防雷设计中, 为了在加强防护效果与减轻部件重量之间取得平衡, 需要研究被防护部件铺设不同规格金属网时, 遭遇雷击后的电流和温度分布。

CFRP 材料的雷击直接效应损伤以雷电流的焦耳热效应为主<sup>[2]</sup>, 属于电热耦合多物理场过程, 适合采用有限元法软件 COMSOL Mutilphysics 进行研究。但是, 由于防雷金属网的梗丝尺寸远小于被防护部件尺寸, 计算防雷金属网的精细模型时, 需要耗费大量计算资源, 这一点对分析复杂几何体铺设防雷金属网后的雷击损伤, 带来极大难度。

本文对防雷金属网建立一体化的雷击直接效应损伤等效模型, 通过各向异性等效参数表示等效模型中金属网沿长菱边和短菱边方向不同的材料特性, 并将等效模型计算结果与精细建模结果和试验结果进行对比。

## 2 电热耦合仿真模型

### 2.1 模型简化

本文按标准 SAE ARP 5412 中的雷电流 A 分量, 设定雷电流注入值  $I(t)$ 。

$$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

其中,  $I_0 = 218810\text{A}$ ,  $\beta = 11354\text{s}^{-1}$ ,  $\alpha = 647265\text{s}^{-1}$ 。

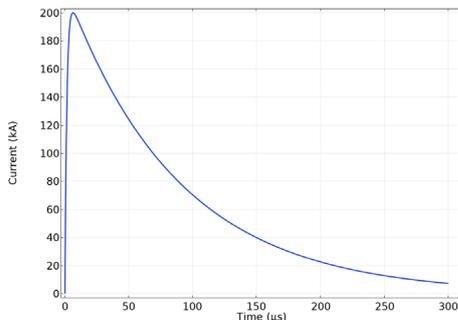


图1 雷电流波形 A 分类

金属导体内部的趋肤效应是瞬态电磁场计算中需要着重考察的因素。为考察防雷金属网单根梗丝内部的趋肤效应是否明显, 建立 1mm 长度的单根金属网梗丝模型, 从一侧边界注入雷电流 A 分量, 观察截面的电流密度分布。在

初始 1us 时刻内, 梗丝截面电流密度分布见图 2。可见在 0.4us 之后, 单根梗丝内部趋肤效应已不明显, 趋肤效应较明显的时段占总研究时间比例极小, 因此, 本文在对防雷金属网的等效过程中, 忽略防雷金属网内部趋肤效应, 将金属网模型简化为一体化模型, 认为一体化模型内部的电流密度均匀分布。

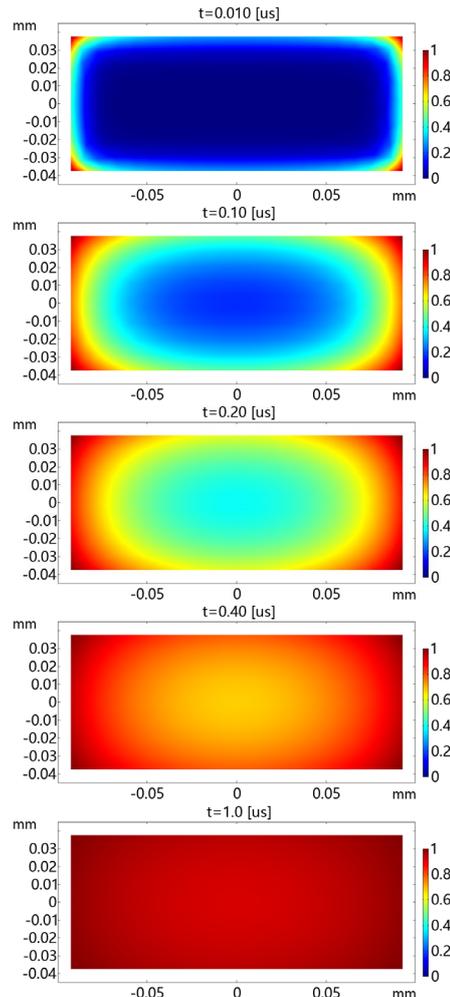


图2 注入雷电流 A 分量时, 梗丝截面电流密度归一化分布

### 2.2 控制方程

本文的仿真研究使用焦耳热模块。计算电流分布的控制方程为:

$$\nabla \cdot \vec{J} = Q_c \quad (2)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}_e \quad (3)$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (4)$$

电磁损耗  $Q_h$  作为外部热源输入到固体传热模块，以计算温度分布。电磁损耗  $Q_h$  计算式为：

$$Q_h = \vec{J} \cdot \vec{E} \quad (5)$$

计算温度分布的控制方程为：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = Q_T \quad (6)$$

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (7)$$

金属材料的电阻率受温度影响，关系如下：

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha (T - T_{ref})) \quad (8)$$

### 2.3 几何模型和材料参数

本文使用到的模型有防雷金属网精细模型、防雷金属网等效模型，CFRP 板材模型。

防雷金属网精细模型如下。图中黄色区域代表铜，灰色区域代表填充铜网间隙的环氧胶粘剂。LWD 表示金属网长菱边，SWD 表示短菱边。

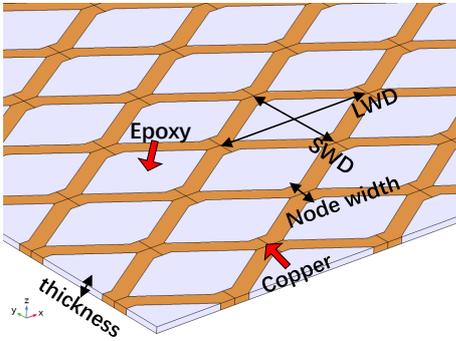


图3 防雷金属网精细模型

表1 防雷金属网精细模型的材料参数

Attributes	Copper	Epoxy
Conductivity (S/m)	$5.998 \times 10^7$	$1 \times 10^{-15}$
Thermal conductivity (W/(m*K))	400	0.25
Constant pressure heat capacity (J/(kg*K))	385	1000
Density (kg/m <sup>3</sup> )	8940	1200

防雷金属网等效模型与精细模型相比，总的长、宽、厚参数完全一致。等效模型使用各向异性材料参数来表示金属网沿长菱边、短菱边方向之间不同的材料特性。某型号防雷金属网所用各向异性电导率和导热系数的等效形式如下：

$$k_{eq} = \begin{bmatrix} k_{eq,x} & 0 & 0 \\ 0 & k_{eq,y} & 0 \\ 0 & 0 & k_{eq,z} \end{bmatrix} W/(m*K) \quad (9)$$

$$\sigma_{eq} = \begin{bmatrix} \sigma_{eq,x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{eq,y} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{eq,z} \end{bmatrix} S/m \quad (10)$$

CFRP 材料的铺层方式按  $[0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ]$ 。每层铺层内的 CFRP 材料作一体化建模，使用各向异性电导率和导热系数表征其沿纤维方向、垂直纤维方向之间不同的材料特性。

某型号 CFRP 材料所用的各向异性电导率和导热系数的参数值如下<sup>[3]</sup>：

$$k_{eq} = \begin{bmatrix} 11.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 \end{bmatrix} W/(m*K) \quad (11)$$

$$\sigma_{eq} = \begin{bmatrix} 30000 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} S/m \quad (12)$$

### 2.4 边界条件与网格设计

模型中，对于电学边界，选择金属网上表面正中心作为电流注入点，选择金属网长菱边方向的侧面边沿作为接地，其余边界为电绝缘，对于热学边界，选择模型的上表面和侧面作为表面对环境辐射边界，表面辐射率设置为 0.5。边界条件和网格设计见图 4。

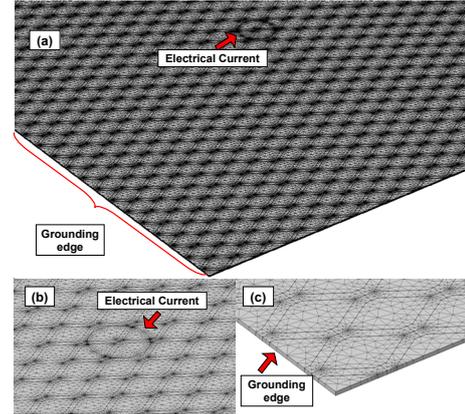


图4 防雷金属网精细模型网格设计

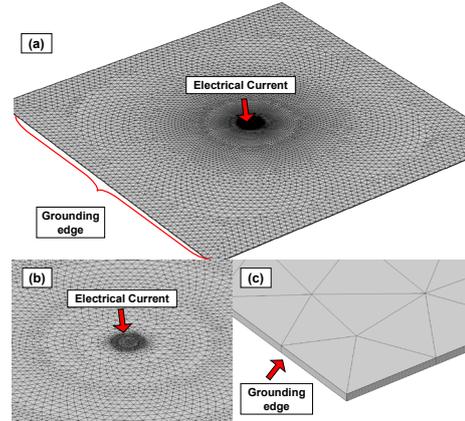


图5 防雷金属网等效模型网格设计

## 3 仿真结果

### 3.1 雷击损伤精细建模与等效建模仿真结果对比

对  $55\text{mm} \times 87\text{mm}$  铺设防雷金属网的样品仿真，注入峰值为  $43.8\text{kA}$  雷电流 A 分量，雷击损伤的精细建模与等效建模仿真结果如下。空白区域为温度高于铜汽化点的区域。可见等效模型模拟出的汽化区域的尺寸，在电流传导方向上与精细建模保持一致，在垂直电流传导方向上的汽化区域尺寸小于精细建模结果。

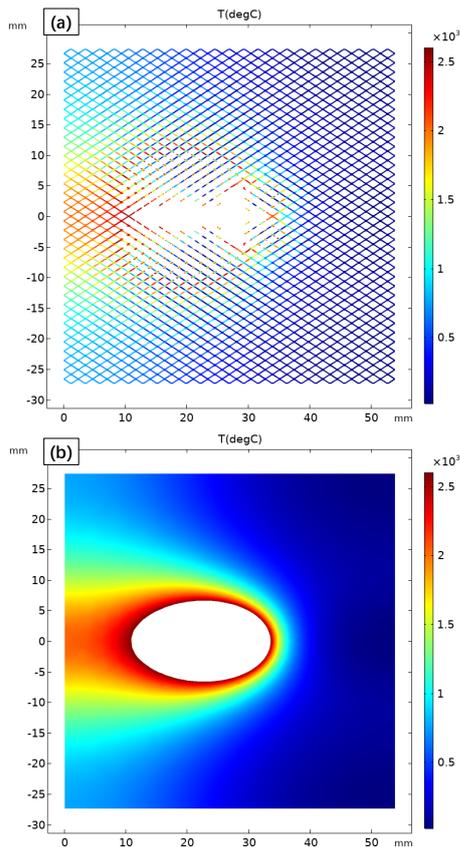


图6 某型防雷金属网精细模型与等效模型的雷击损伤结果对比

(a) 精细建模, (b) 等效建模

### 3.2 雷击损伤等效建模结果与试验结果对比

对500mm×500mm、表面铺设有两种不同型号金属网的CFRP板材进行雷击损伤仿真和试验。对样品注入峰值为200kA雷电流A分量,样品单边接地。仿真结果中,空白区域为温度高于铜汽化点的区域,深红色区域为温度高于铜熔点的区域。试验结果中,黑色区域为铜网烧蚀区域,用虚线框标注出。试验结果中铜网烧蚀区域的大小与仿真结果中温度高度铜熔点区域的大小一致性较高。

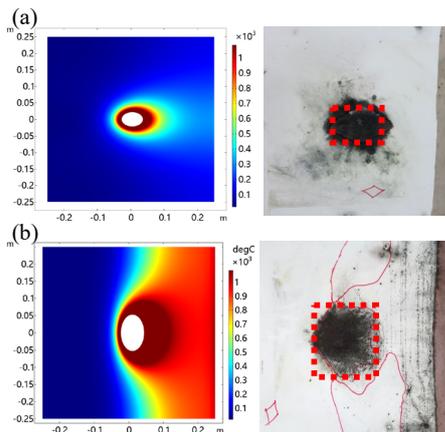


图7 两种不同规格金属网,铺设在500mm×500mm上CFRP材料上,雷击损伤的仿真结果和试验结果对比

### 3.3 铺设金属网的CFRP板材与无防护CFRP板材的雷击损伤仿真对比

图8和图9为铺设防雷金属网前后的CFRP板材遭受雷击时的损伤仿真结果。图8中的每个切面图的纵坐标位于CFRP材料每个铺层的厚度方向中心点。图9中最上方切面图为防雷金属网的切面,下方为CFRP材料每个铺层厚度方

向中心点的切面。由仿真结果可见,未采用防护措施时,CFRP板材容易发生多个铺层的贯穿性烧蚀。铺设防雷金属网之后,CFRP板材得到有效防护。

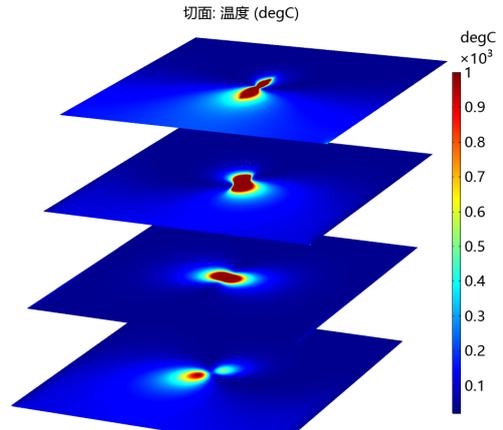


图8 无防护CFRP板材注入200kA雷电流后的各铺层雷击损伤

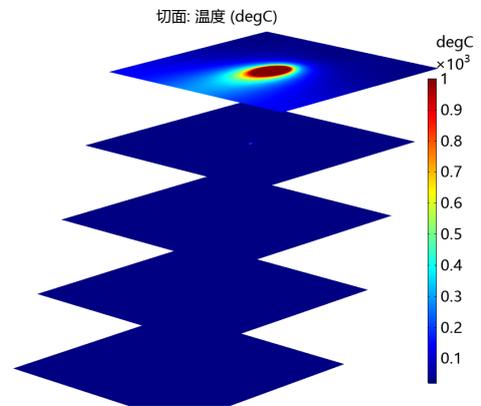


图9 铺设防雷金属网后的CFRP板材注入200kA雷电流后的各铺层雷击损伤(最上层为防雷金属网)

## 4 结论

- 1) 防雷金属网等效模型可以有效表示金属网沿长菱边和短菱边方向不同的烧蚀趋势。
- 2) 防雷金属网等效模型与试验结果一致性良好。
- 3) 铺设防雷金属网可以对CFRP材料有效防护雷击直接效应损伤。

## 5 参考文献

- [1] 朱健健, 李梦. 航空复合材料结构雷击损伤与雷击防护的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(17): 37-42.
- [2] 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.
- [3] Ogasawara T, Hirano Y, Yoshimura A. 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.