第 52 卷 第 6 期：2920-2932 高电压技术 Vol.52, No.6: 2920-2932
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241595

雷击配电线路光纤复合架空地线烧蚀损伤特性仿真试验

安韵竹[1]，杨　健[1]，庞志程[1]，胡元潮[1]，廖民传[2]，屈　路[2]
（1. 山东理工大学电气与电子工程学院，淄博 255000；2. 南方电网科学研究院有限责任公司，广州 510005）

摘　要：光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire，OPGW)易遭受雷击而引起烧蚀损伤，烧蚀电弧涉及复杂非线性电磁热的等离子体放电过程。该文充分考虑雷电动态电弧发展过程中电磁热流体间的强弱耦合关系，建立了配网 OPGW 雷击过程的动态烧蚀模型，并开展配网 OPGW 雷击烧蚀损伤模拟试验，对比分析转移电荷量、OPGW 截面和雷电流幅值对 OPGW 雷击损伤的影响规律。开展 OPGW 雷击损伤模拟放电试验，分析转移电荷量对 3 种型号配电线路 OPGW 的烧蚀损伤过程。仿真与试验结果表明，转移电荷量由 50 C 增大到 150 C 时，仿真与试验的烧蚀深度分别增大了 5.34 倍和 4.38 倍，烧蚀面积分别增大了 11.5 倍和 4.71 倍，由于试验中电弧扫掠位置不固定，因此烧蚀面积增大程度并不明显；OPGW 单股截面小的受损伤影响较大，在具有拉力条件下的试验中单股截面小的更容易发生断股现象，但其整体性能受影响较小；雷电电弧高温持续烧蚀是 OPGW 雷击损伤的主要原因，当雷电流 C 分量的幅值从设定值的 97.5%减小至 90%时，烧蚀深度减小了 10.49%，烧蚀面积减小了 14.37%。因此，应根据当地雷电灾害情况与施工条件选择合适的 OPGW 型号。

关键词：光纤复合架空地线；雷击损伤；转移电荷量；雷电流分量；雷电电弧

Simulation and Experiment on Ablative Damage Characteristics of Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire for Lightning Strike Distribution Line

AN Yunzhu[1], YANG Jian[1], PANG Zhicheng[1], HU Yuanchao[1], LIAO Minchuan[2], QU Lu[2]
(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;
2. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510005, China)

Abstract: Optical fiber composite overhead ground wire(OPGW) is susceptible to lightning strikes which induce ablation damage. The ablation arc corresponds to a complex nonlinear electromagnetic-thermal plasma discharge process. In this study, the strong and weak coupling effects of electromagnetic, thermal and fluid fields during the evolution of dynamic lightning arcs are fully considered, and a dynamic ablation model for the lightning strike process of OPGW in distribution networks is established. Simulations are conducted to investigate lightning-induced ablation damages to distribution-network OPGW, and the influences of transferred charge quantity, OPGW cross-sectional structure, and lightning current amplitude on OPGW lightning damage are comparatively analyzed. Discharge simulation tests on lightning damage of OPGW were carried out to analyze the effect of transferred charge on the ablation damage process of three types of OPGW for distribution lines. Simulation and experimental results indicate that, when the transferred charge rises from 50 C to 150 C, the ablation depth increases by 5.34 times in simulation and 4.38 times in experiment, while the ablation area increases by 11.5 times and 4.71 times, respectively. Single strands with smaller cross-sections in OPGW are more vulnerable to lightning damage and prone to fracture under tensile load, whereas the overall structural performance of OPGW remains relatively stable. High-temperature continuous ablation caused by lightning arcs is the primary cause of OPGW lightning damage. When the amplitude of lightning current C-component drops from 97.5% to 90%, the ablation depth is reduced by 10.49% and the ablation area decreases by 14.37%. Consequently, optimal OPGW types should be selected according to local lightning property and actual engineering construction conditions.

Key words: optical fiber composite overhead ground wire; lightning striking damage; transferred charge quatity; lightning current component; lightning arc

---

基金资助项目：国家自然科学基金(52304068)；山东省自然科学基金(ZR2022QE070)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China(52304068), Shandong Provincial Natural Science Foundation(ZR2022QE070).

0　引言

配电线路是国民经济和社会发展的重要公共基础设施，其结构复杂、线路规模大、绝缘水平低、易受雷电影响。雷击是造成配网设备故障、缺陷最主要的原因之一。据统计，配网雷击故障约占所有故障的 20%，局部地区可达 30%。光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire，OPGW)是集光纤通信功能与电力线路避雷功能于一体的复合架空地线，架设在电力线路最顶端，既能起到配网防雷的作用，又能提高通信可靠性。70 年代以来，随着光纤复合架空地线在国内外的广泛应用，电力系统的供电可靠性大幅提高，但随之而来的是 OPGW 雷击损坏事故。1994~1999 年加拿大安大略水电局因雷击产生的断线次数达到 574 次，平均故障率约为 0.1 次/(100 km·年)[1]；2005~2013 年江苏省 220 kV 输电线路雷击跳闸 304 次，500 kV 跳闸 67 次，35~110 kV 间跳闸 408 次[2]；2010 年 6 月，500 kV 平来线架空地线遭受雷击断裂，架空地线 7 股全部断裂，其中外层 6 股有明显的烧融痕迹，内层 1 股在张力作用下拉伸断裂[3]。因此，根据当地实际运行环境与雷害情况决定 OPGW 选型尤为重要。

近年来，国内外学者通过雷击电弧烧蚀仿真模型及雷击断股试验对 OPGW 雷击损伤机理进行研究。Iwata 团队通过考虑电弧的传导热，计算了股线温度和熔化现象[4]。但是单一的热传导无法完全模拟出 OPGW 遭受雷击时的场景，模拟较为简单，Dmitriev 等人考虑磁饱和、趋肤效应来进行瞬态电磁场模拟，即考虑热传导原理和电流密度的计算，并通过热效应和电效应的耦合来提高结果的精确性[5]。模拟仿真计算精度得到提升后，学者们着眼于雷击过程中的 OPGW 损伤变化，静态的 OPGW 雷击损伤结果无法满足这一要求，Wang 等人提出一种适应雷电电弧通道中随时间和空间演变的热通量有限元算法，该算法通过模拟材料相变属性，可以去除由于烧蚀引起的材料相变，并将热通量重新作用于材料的其余部分，以动态形式展现了材料的热损伤[6]。动态损伤模拟拖慢了传统计算方法的仿真计算速度，使得计算时间延长，为了缩短在动态损伤模拟下的仿真计算速度，Abdelal 等人提出基于相似理论利用磁流体动力学模型模拟雷击，该方法利用有限元算法，能在较短的时间内计算出被击物体表面的电流密度、温度和速度等[7]。在 OPGW 雷击损伤过程中，OPGW 的热损失并不局限于热传导，为了使仿真更具真实性和精确性，需要全面考虑 OPGW 温度变化的原因，2019 年，Iwata 团队考虑电弧的传导热和对流传热，模拟了高能雷电直流电弧作用下的 OPGW 绞线熔化效果[8]。孙晋茹等人建立了基于相似理论的虚拟电弧磁流体动力学模型，将电弧模拟得到的时空变化的热电场应用于 OPGW，通过逐步分区加载的方法来实现电弧-热电耦合分析，包括传导热、焦耳热、对流热、辐射传递和金属相变，该模型的模拟结果与试验结果相似[9]。过往仿真大多研究环境对 OPGW 损伤的影响，但 OPGW 本身的参数不应被忽略，文献[10]利用有限元仿真软件，研究架空地线的结构对雷击断股特性的影响，结果表明，在一定范围内增大 OPGW 外股导线半径有助于降低雷击时的最高温度。

在 OPGW 雷击仿真的精确度和真实性得到加强的同时，关于 OPGW 雷击试验的研究也得到了发展。Liuis-R Sales 将雷电流 4 个分量单独作用于 OPGW，试验得出不同分量对 OPGW 的损坏不同，其中，雷电流 A、B、D 分量只对外股造成轻微损伤，雷电流 C 分量破坏性最高[11]。除了外界环境因素对于 OPGW 的影响外，OPGW 自身性能的影响也同样重要，戚力彦等人采用长时间连续电流(即雷电流 C 分量)方案模拟雷击试验，发现镀锌钢线 OPGW 的耐雷击性能优于铝包钢，并指出耐雷击性能与施加的张力成反比，C 分量转移电荷量越大对 OPGW 的断股危害越大[12]。武汉大学通过模拟雷击试验，对 10 种 OPGW 的耐雷击能力进行了系统地宏观与微观分析，验证了转移电荷量和张力对 OPGW 雷击损伤程度成正比的规律，指出增大外层绞线的直径可以提高 OPGW 的耐雷能力；并通过使用扫描电镜观察 OPGW 的微观结构，发现随着转移电荷量的增加，OPGW 的氧元素比例增加，说明 OPGW 与空气中的氧气发生燃烧反应，在微观角度上验证了雷击引起的高温是 OPGW 断股的主要原因[13]。在雷击试验中，除了 OPGW 本身材料特性及雷电流的转移电荷量影响外，试验电极对雷击损伤也有影响。西安交通大学孙晋茹、姚学玲等人基于现行的 OPGW 雷击测试标准及研究现状分析，提出 OPGW 连续时序雷电直接效应的试验方法，通过对带有间隙的 OPGW 进行 B+C 连续作用雷击试验，得到雷电流分量与 OPGW 相互作用和损伤的规律，试验结果表明随着放电间隙的增大，OPGW 雷击后

的温升减小[14]。该团队于 2021 年通过雷电流 B 分量引发连续电流 C 分量对 OPGW 试样进行雷击损伤试验，探讨了电极材料、转移电荷量及负荷拉力对 OPGW 雷电损伤特性的影响规律[15]，结果表明钨铜电极造成的雷电损伤最严重，钢电极次之，铜电极下 OPGW 损伤程度最轻，且随着转移电荷量和负荷拉力的增加，OPGW 的断股数量增多。

在以往的研究中，多关注输电线路 OPGW 雷击损伤的相关研究，雷电流分量的持续时间与转移电荷量对雷电电弧特性的影响研究相对较少。文献[16]研究了雷击碳纤维增强聚合物分别注入雷电流 A 分量和 C 分量的电热耦合过程，雷电流 A 分量幅值大、作用时间短对碳纤维增强聚合物首层造成损伤严重，但 2 层及以下损伤较弱；C 分量电流幅值小、持续时间长，对碳纤维增强层合板造成严重损伤，进一步说明了雷击损伤的主要原因为 C 分量作用下的高温持续烧蚀。

为了研究配电线路 OPGW 的雷击损伤特性，不同于以往针对输电线路 OPGW 进行的较大转移电荷量的雷击仿真与试验，本文通过雷击烧蚀仿真与雷击试验研究了 3 种配电线路 OPGW 的雷击烧蚀特性，对较小转移电荷量的雷电流分量进行雷击损伤特性研究；建立了配网 OPGW 雷击烧蚀模型，结合磁流体动力学(magnetohydro dynamics，MHD)模型、三维瞬态传热模型和有限元计算方法，将电磁场、温度场和流场相互耦合[17-20]，具体原理见附录 A。研究雷电流的不同转移电荷量与持续时间对雷电电弧特性的影响，分析不同雷电流分量、不同转移电荷量和不同截面对配网 OPGW 雷击损伤的影响。

1 OPGW 雷击损伤数值模拟

为研究 OPGW 雷击损伤的影响因素，本文基于磁流体动力学理论建立配网 OPGW 雷击损伤过程三维瞬态多物理场耦合模型，采用有限元法对雷击烧蚀过程中的电磁场、温度场和流场耦合进行计算。

1.1 OPGW 雷击损伤模型计算原理

磁流体动力学(MHD)是研究等离子体和电磁场之间相互作用的物理学学科，该学科以纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程和麦克斯韦(Maxwell)方程组为基础，研究磁流体的运动性质。本文通过 MHD 模型，结合有限元仿真软件，将电磁场、温度场和流场相互耦合，具体原理[17-19]如下。

(1)电磁场

Maxwell 方程组可以描述电场、磁场与电荷密度、电流密度之间的关系，在本模型中用以耦合电场与磁场[20]，即：

$$\begin{cases}\nabla\times\boldsymbol{H}=\boldsymbol{J}+\dfrac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}\\ \nabla\times\boldsymbol{E}=-\dfrac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}\\ \nabla\cdot\boldsymbol{B}=0\\ \nabla\cdot\boldsymbol{D}=\rho_{\mathrm{e}}\end{cases}\tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{D}=\varepsilon\boldsymbol{E}$；$\boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H}$；$\boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E}$；$\nabla$ 为微分算子；$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度，A/m；$\boldsymbol{J}$ 为电流密度，A/m^2；$\boldsymbol{D}$ 为电位移，C/m^2；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度，C；$\boldsymbol{B}$ 为磁通密度，T；ρ_{e} 为自由电荷密度，C/m^3；ε 为介电常数，F/m；μ 为磁导率，H/m；σ 为电导率，S/m。

(2)温度场

采用能量守恒方程描述温度场，即：

$$\begin{cases}\rho c_p\left(\dfrac{\partial T}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla T\right)=\nabla\cdot\left(k\nabla T\right)+Q+Q_{\mathrm{p}}+Q_{\mathrm{vd}}\\ Q=\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{E}\\ Q_{\mathrm{p}}=\dfrac{T}{\rho}\left(\dfrac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p\left(\dfrac{\partial p}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla p\right)\\ Q_{\mathrm{vd}}=\tau:\nabla\boldsymbol{u}\end{cases}\tag{2}$$

式中：T、$\boldsymbol{u}$、c_p、k、p、ρ 和 τ 分别为温度(℃)、速度(m/s)、比热容(J/(g·℃))、空气导热系数(W/(m·K))、压力(Pa)、密度(g/m^3)和黏性应力张量(Pa·s)；Q、Q_{p}、Q_{vd} 分别为焦耳热、压力功、黏性功，W/m^3。由于电流密度 $\boldsymbol{J}$ 在电场和磁场中相等，故该能量守恒方程将电场、磁场与温度场耦合。

(3)流场

采用 Navier-Stokes 方程和连续性方程来描述导电流体的运动行为，其中连续性方程即为质量守恒方程，即：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\rho\boldsymbol{u}\right)=0\\ \dfrac{\rho\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\rho\left(\boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\boldsymbol{u}=-\nabla p+\nabla\cdot\tau+\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}\end{cases}\tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}$ 为电流和磁场相互作用产生的洛伦兹力，实现电场、磁场与流场的耦合。Navier-Stokes 方程中用到的密度 ρ 与黏度 τ 受到能量守恒方程的影响，实现温度场与磁场的耦合。

1.2 雷电流模型的建立

在三维模型中，将雷电流作为电流源注入电极，雷电流 i 的双指数表达式[21-22]为：

$$i=I_{\mathrm{m}}(\mathrm{e}^{-\alpha t}-\mathrm{e}^{-\beta t})\tag{4}$$

式中：I_m为雷电流峰值；t为时间；α为波前衰减系数；β为波尾衰减系数。根据美国汽车工程师学会和欧洲民用航空设备组织制定的飞机雷电环境和相关试验波形，规定雷电流 A 分量峰值电流为 200 kA(±10%)，作用积分为 2×10^6 $A^2\cdot s$(±20%)，持续时间≤500 μs；雷电流 B 分量最大转移电荷量为 10 C(±10%)，平均电流为 2 kA(±20%)，持续时间不超过 5 ms；雷电流 C 分量最大转移电荷量为 200 C (±20%)，持续时间为 0.25~1 s[23]。

IEC 组织制定的 IEC-62305 标准中I类雷电测试参数中的首次短时间雷击电流分量、后续短时间雷击电流分量和长时间雷击电流分量与 SAE 制定的标准中推荐使用的雷电流 A/B/C 分量参数规定基本一致，所以本文使用更容易描述的雷电流 A/B/C 分量代指。仿真中雷电流 A、B、C 分量波形表达式见式(5)，满足上述标准规定的参数情况。

$$\begin{cases} i_A = 215\,000\left(e^{-11\,000t} - e^{-700\,000t}\right) \\ i_B = 11\,900\left(e^{-500t} - e^{-1\,000t}\right) \\ i_C = 300 \end{cases} \tag{5}$$

式中：i_A、i_B、i_C分别为雷电流的 A、B、C 分量，A；t为时间，s。雷电流分量关系图如图 1 所示。

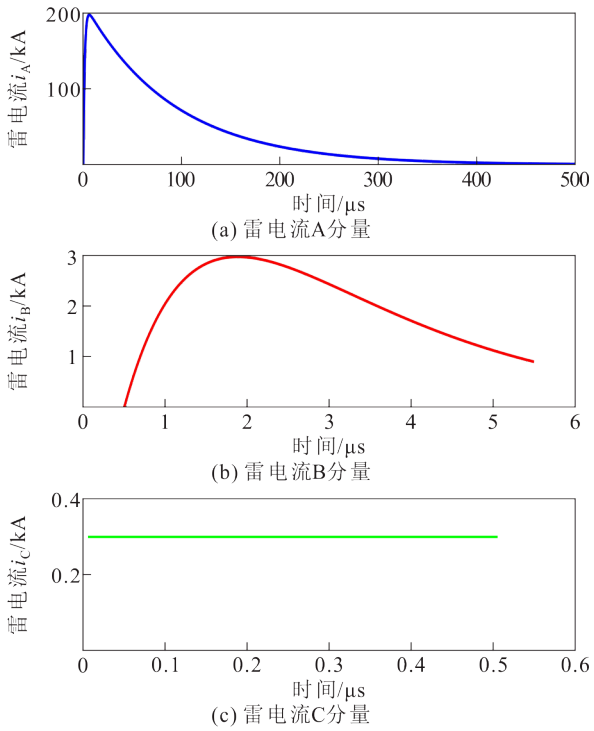


图 1　雷电流 A、B、C 分量

Fig.1　A, B and C components of lightning current

电流场中电流守恒和电绝缘，初始电势为 0 V，光纤复合架空地线两端接地，在电极上端作为电流源注入点；磁场中初始磁矢势为 0 Wb/m；固体域中传热初始温度为 293.15 K，空气域中设置流入与流出边界条件，流入边界初始温度为 293.15 K，将空气域设置为层流场，参考压力水平为 101.325 kPa，对应固体传热接口的流入与流出，层流物理场的入口与出口边界作为空气的流动方向。

在计算中依次对雷电流 A、B、C 分量进行求解，并在求解器中选用继承解的形式模拟雷电流分量的连续作用，雷电流 A 分量的求解时间为 500 μs，时间步长为 1 μs；雷电流 B 分量的求解时间为 5 ms，时间步长为 0.1 ms；雷电流 C 分量幅值较小且波形没有变化，求解时间为 0.5 s，时间步长为 50 ms。

1.3　OPGW 模型建立

文献[12]中提到，镀锌钢的耐雷性能比铝包钢更好，但铝包钢具有较好的导电性和耐腐蚀性，在搭设过程中质量更轻，更易操作。镀锌钢虽具有较好的耐雷性能，但其耐腐蚀性能较弱，需要定期维护。在架设过程中重量大，操作难度大。架空地线作为常年暴露在外的设备，对耐腐蚀性能要求较高，否则需要频繁更换，不经济。所以本文 OPGW 的构成材料均为铝包钢，建立 3 种规格的 OPGW 雷击烧蚀有限元模型。

根据国家标准与南方电网标准，部分配电线路常用 OPGW 型号见附录 B 表 B1。本文依照标准规定，选取 OPGW-50、OPGW-70 和 OPGW-90 3 种型号。OPGW-50 和 OPGW-70 为中心不锈钢管式结构，该结构包含 6 根铝包钢管和 1 根空心不锈钢管，其中 OPGW-50 铝包钢和不锈钢管直径均为 3.3 mm，OPGW-70 铝包钢和不锈钢管直径均为 3.8 mm；OPGW-90 为层绞不锈钢管式结构，该结构分为 3 层：中心层为 1 根直径 2.6 mm 的铝包钢；第 2 层为 4 根铝包钢和 2 根不锈钢管，直径均为 2.5 mm；最外层为 11 根直径为 2.8 mm 的铝包钢，具体结构如附录 C 图 C1 所示。由于雷击损伤只发生在较小的范围内，因此为了减少仿真计算时间，缩短 OPGW 模型长度至 2 m。

1.4　雷电电弧模型的验证

为研究雷电电弧的放电特性，利用本文第 1.1 节所建立的雷电流模型对不同转移电荷量和不同雷电流持续时间下的雷电电弧变化进行仿真计算。

为了对比印证本文模型有效性，采用与文献[18]一致的雷电流波形和结构模拟雷电放电电弧，

雷电流幅值为 30 kA，持续时间为 20 μs，放电间距为 200 mm。t=14 μs 时本文模型与文献[18]所建电弧模型计算结果对比如表 1 所示。2 个模型计算得到的雷电电弧的最大温度相差 9.4%、最大电流密度相差 9.16%。造成差别的主要原因与网格剖分和空气参数差别有关，各项最大相差不超过 10%，进一步证明了本文电弧模型的有效性。为加速收敛，在后续模型中加入电离通道，设置电离通道初始温度为 1×10^4 ℃，使得空气完全电离[24]。

表 1 本文与文献[18]电弧参数对比

Table 1 Comparison of arc parameters between the present study and reference [18]

对比模型	最大温度/℃	最大电流密度/(A·m^{-2})
文献[18]模型	1.17×10^4	1.20×10^8
本文模型	1.28×10^4	1.31×10^8

1.5 转移电荷量对雷电电弧的影响

为研究雷电电弧不同转移电荷量的雷电参数变化，保持 B 分量不变，选择 C 分量转移电荷量为 50、100、150、200 C，持续时间均为 0.5 s，电弧参数如表 2 所示。

表 2 不同转移电荷量的雷电电弧参数

Table 2 Lightning arc parameters of different transferred charge quantities

转移电荷量/C	最大温度/℃	最大电流密度/(A·m^{-2})
50	1.54×10^4	4.42×10^7
100	3.86×10^4	7.99×10^7
150	4.21×10^4	1.32×10^8
200	6.99×10^4	2.01×10^8

由表 2 可知，随着转移电荷量的增大，电弧的温度和电流密度均增大。转移电荷量由 50 C 增大到 200 C，最高温度提高了 3.54 倍，最大电流密度提高了 3.55 倍。

1.6 雷电流分量对雷电电弧的影响

为研究雷电流分量对雷电电弧参数的影响，分别使用多重雷电流 A+B+C 分量、连续雷电流 A+C 分量和连续雷电流 B+C 分量进行仿真计算，取 500 ms 时的结果如表 3 所示。

由表 3 可知，在相同的转移电荷量下，随着雷电流分量的变化，雷电电弧参数均发生变化。当雷电流由多重雷电流 A+B+C 分量变为 A+C 分量时，雷电电弧参数的电流密度由 1.41×10^8 A/m^2 减小为 1.329×10^8 A/m^2，减小了 6.09%，这说明雷电流分量的变化对雷电电弧的电流密度有直接影响，雷电电弧参数温度由 4.17×10^4 ℃减小至 3.87×10^4 ℃，减小了 7.75%。分析产生此现象的原因在于：先导雷电电弧持续时间越长，在先导结束后残留的载流子越多，更有利于后续 C 分量续弧，这一点在对比连续雷电 A+C 分量和 B+C 分量时较为明显，雷电流 A 分量的幅值较大但持续时间短，雷电流 B 分量的幅值小但持续时间较长，导致连续雷电流 B+C 分量的雷电电弧参数更大。

表 3 不同雷电流分量的雷电电弧参数

Table 3 Lightning arc parameters of different lightning current components

雷电流组成	电流密度/(A·m^{-2})	温度/℃
多重雷电流 A+B+C 分量	1.410×10^8	4.17×10^4
连续雷电流 A+C 分量	1.329×10^8	3.87×10^4
连续雷电流 B+C 分量	1.338×10^8	3.95×10^4

1.7 转移电荷量对 OPGW 雷击损伤的影响

为研究转移电荷量和 OPGW 横截面积对 OPGW 雷击损伤的影响，利用建立的多物理场耦合模型进行有限元仿真。

选择 OPGW-50 进行转移电荷量分别为 50、100、150 C 的雷击损伤仿真，具体结果见附录 C 图 C2。由图 C2 可知，随着转移电荷量的增加，OPGW 烧蚀情况愈发严重。由于试验时电弧烧蚀扫掠位置不固定，仿真时烧蚀位置集中，所以试验烧蚀面积大于仿真烧蚀面积。

转移电荷量 50 C 时仿真烧蚀深度为 0.27 mm，烧蚀面积为 2.67 mm^2；转移电荷量 100 C 时仿真烧蚀深度为 0.74 mm，烧蚀面积为 8.54 mm^2；转移电荷量 150 C 时仿真烧蚀深度为 1.713 mm，烧蚀面积为 33.4 mm^2。仿真结果表明，转移电荷量由 50 C 增大至 150 C，烧蚀深度增大了 5.34 倍，烧蚀面积增大了 11.5 倍。

1.8 横截面积对 OPGW 雷击损伤的影响

选择 OPGW-50、OPGW-70 和 OPGW-90 3 种型号的光纤复合架空地线进行转移电荷量为 150 C 的雷击损伤仿真，具体结果见附录 C 图 C3。由图 C3 可知，OPGW-50 和 OPGW-70 在转移电荷量为 150 C 时并未出现断股现象，在仿真时的烧蚀深度分别为 1.713 mm 和 1.71 mm，与试验时烧蚀深度分别相差 7.14%和 7.04%。仿真与试验结果相差较小，验证了仿真的合理性。

仿真结果表明，OPGW-50、OPGW-70 和

OPGW-90 的烧蚀深度分别为 1.713、1.71、2.8 mm，烧蚀面积分别为 33.4、33.35、36.3 mm^2。相比于 OPGW-50，OPGW-90 的烧蚀深度增大 63.45%，烧蚀面积增大 8.68%，且 OPGW-90 接近断股，靠近电弧中心区域的股线烧蚀最为严重，最外层铝包钢烧蚀大半，裸露出第 2 层股线。

在型号为 OPGW-90 的雷击损伤仿真结果中，并未出现断股现象，但最外层股线电弧中心点烧蚀深度已达到 2.8 mm，裸露出第 2 层部分股线。根据试验后 OPGW-90 断股面电镜扫描分析可知，其断裂面并不平滑。可见断股原因为在经过高温烧蚀后，单股线中剩余截面积无法承受拉力导致断裂。在有限元仿真中并未模拟拉力的作用，所以无法呈现由拉力导致的断股现象。

1.9　雷电流幅值对 OPGW 雷击损伤的影响

为研究雷电流对光纤复合架空地线雷击损伤的影响，使用 OPGW-50 型号的光纤复合架空地线，选择连续雷电流 B+C 分量，分别改变雷电流 B 分量和 C 分量的幅值大小，在本文第 1.2 节建立的雷电流分量中分别减少 2.5%、5%、7.5%和 10%，在不同雷电流幅值作用下的光纤复合架空地线烧蚀仿真结果如附录 C 图 C4 所示。从图 C4 中不同雷电流 B 分量幅值下的 OPGW 雷击损伤仿真计算结果可知：随着雷电流 B 分量幅值的减小，雷电损伤参数的烧蚀深度和烧蚀面积均发生变化，并整体呈现减小的变化趋势。此外，当雷电流 B 分量的幅值从 97.5%减小至 90%时，烧蚀深度由 1.704 mm 减小至 1.673 mm，减小了 1.82%；烧蚀面积由 31.48 mm^2 减小至 30.36 mm^2，减小了 3.55%。由此可知，雷电流 B 分量幅值的变化对雷击损伤参数的烧蚀深度和烧蚀面积有直接影响，二者基本呈现出正相关的变化规律。

从附录 C 图 C5 中不同雷电流 C 分量幅值下的 OPGW 雷击损伤的仿真计算结果可知：随着雷电流 C 分量幅值的减小，雷电损伤参数的烧蚀深度和烧蚀面积均发生变化，并整体呈现减小的变化趋势。此外，当雷电流 C 分量的幅值从 97.5%减小至 90%时，烧蚀深度由 1.64 mm 减小至 1.468 mm，减小了 10.49%；烧蚀面积由 29.3 mm^2 减小至 25.09 mm^2，减小了 14.37%。由此可知，雷电流 C 分量幅值的变化对雷击损伤参数的烧蚀深度和烧蚀面积有直接影响，二者基本呈现出正相关的变化规律。

由上述数据分析及图 2 中不同幅值下连续雷电流 B+C 分量对光纤复合架空地线的雷击损伤参数的仿真计算结果可知：雷电流 C 分量对光纤复合架空地线雷击损伤参数的影响大于雷电流 B 分量的影响，证明了光纤复合架空地线雷击损伤的主要原因为雷电流 C 分量的持续烧蚀作用，雷电流 B 分量主要起到击穿空气间隙、为后续雷电流 C 分量续弧提供条件的作用。

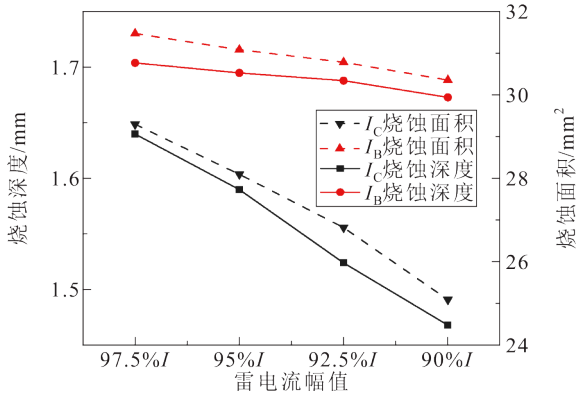


图 2　不同幅值下连续雷电流 B+C 分量对光纤复合架空地线的雷击损伤参数

Fig.2　Lightning damage parameters of B+C component of continuous lightning current on fiber composite overhead ground wire under different amplitudes

2　OPGW 雷击损伤试验

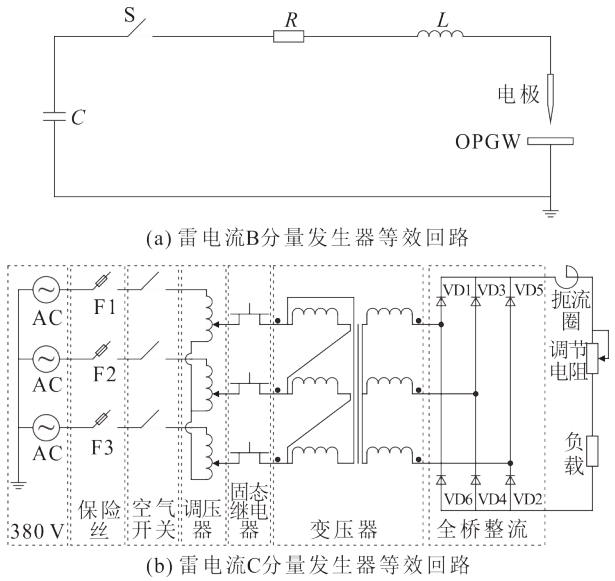
本文 OPGW 雷击损伤试验依托于西安交通大学陕西省高电压大电流测试技术及装备工程实验室的多重连续雷电直接效应测试系统，该系统可用于航天飞行器等一系列闪电电流冲击试验。

2.1　试验方法

为了开展 OPGW 雷击损坏试验，搭建了如附录 C 图 C6 所示的模拟雷击试验平台。通过示波器观察雷电流波形，使用延时继电器控制雷电流施加时间，放电间隙为 4 cm，为保证雷电流成功续弧，在钢电极与试样之间接入引弧丝。

试验中雷电流 B 分量脉冲电流发生器的原理如图 3(a)所示。脉冲电流由 RLC 电路产生，由储能电容 C、开关 S、调波电阻 R、调波电感 L、电极、光纤复合架空地线样品和接地装置组成。开关与 PLC 和专用控制电路相连，从而实现对开关的延时控制。

雷电流 C 分量电流发生器示意图如图 3(b)所示。雷电流 C 分量以直流形式输出，通过调压器、变压器、三相全桥整流和调整电阻得到所需的雷电流 C 分量电流值。雷电流 C 分量的作用时间由固态继电器控制，扼流圈防止脉冲冲击破坏电路。



(a) 雷电流B分量发生器等效回路

(b) 雷电流C分量发生器等效回路

图 3 雷电流电源等效回路

Fig.3 Equivalent circuit of lightning current power supply

针对同一 OPGW 型号，改变转移电荷量分别为 50、100、150 C，在相同 OPGW 型号下，对同一个转移电荷量进行 5 次雷击试验。为检验试样经受雷击后是否仍然具有合格的工作能力，对 OPGW 试样施加 15%~20%额定拉断力(rated tensile strength，RTS)的稳定压力，并通过冷接技术将 OPGW 内部光纤与光源和光功率计相连，试验结束后检验其抗拉力和光衰减，并观察外表是否有明显断股[25-26]。

2.2 试验材料

为了研究连续雷电流 B+C 分量对配网 OPGW 的损伤效果，使用截面为 50、70、90 mm^2 的 OPGW 作为试验样品，使用钢电极并采用铜丝引弧。试验样品具体参数及照片如附录 C 图 C7 所示，由上至下依次为 OPGW-50、OPGW-70、OPGW-90。OPGW-50 外层由 6 股半径为 1.65 mm 的铝包钢组成，最内层为一股半径为 1.65 mm 的空心不锈钢管，其内包裹着 36 芯光纤；OPGW-70 外层由 6 股半径为 1.9 mm 的铝包钢组成，最内层为一股半径为 1.9 mm 的空心不锈钢管，其内包裹着 48 芯光纤；OPGW-90 则分为 3 层，最外层由 11 股半径为 1.4 mm 的铝包钢组成，第 2 层由 2 股空心不锈钢管和 4 股铝包钢组成，半径均为 1.25 mm，其中每股不锈钢管中均包裹 24 芯光纤，最内层为 1 股半径为 1.3 mm 的铝包钢。

2.3 转移电荷量对 OPGW 雷击损伤的影响

选取规格为 OPGW-50 的试样，进行转移电荷量分别为 50、100、150 C 的雷击损伤试验。试验后样品如附录 C 图 C8 所示。不同转移电荷量下的试验波形如附录 C 图 C9 所示。

由附录 C 图 C8 可知，当转移电荷量为 50 C 和 100 C 时，仅出现了轻微烧蚀现象；当转移电荷量为 150 C 时，烧蚀现象较为严重，最上方距离电弧更近的铝包钢线已出现缺口。但在 3 种转移电荷量下均未出现明显断股损伤，随着转移电荷量的增大，OPGW 受烧蚀面积明显增大，且烧蚀深度显著增加，平均烧蚀面积与烧蚀深度如图 4 所示。

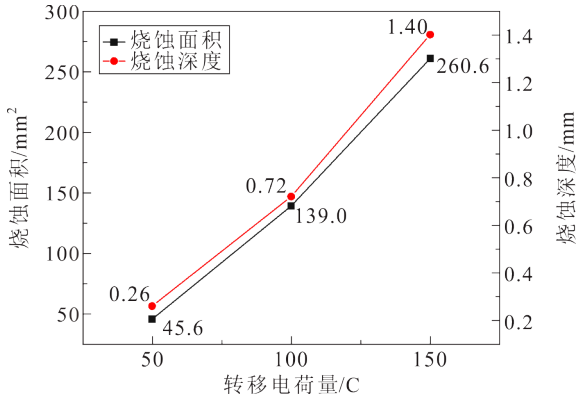


图 4 不同转移电荷量下的雷击损伤参数

Fig.4 Lightning damage parameters under different amounts of transferred charge

在 4.65 kN 拉力下，OPGW-50 并未发生断股现象，经光功率计测量，并未检测到光衰减量变化，证明该规格的 OPGW 在承受转移电荷量为 150 C 及以下的雷电流时仍然可以正常工作。

2.4 横截面积对 OPGW 雷击损伤的影响

为了研究 OPGW 横截面积对其受雷击损伤的影响，本文选用转移电荷量为 150 C 的雷电流对 3 种型号的 OPGW 进行模拟雷击试验。试验后部分样品如附录 C 图 C10 所示。

在转移电荷量为 150 C 的雷击下，OPGW-50 和 OPGW-70 2 种型号的 OPGW 均未出现明显断股现象，OPGW-90 在 5 次雷击试验中，4 次出现了断股现象，其中 1 次断 2 股，3 次断 1 股，且断股有几率经过高温重新熔融。OPGW-50 和 OPGW-70 经过 5 次雷击试验的平均烧蚀面积和烧蚀深度分别为 260.6 mm^2、1.4 mm 和 249.6 mm^2、1.42 mm。

在前 2 种规格的 OPGW 中，随着截面的增大，OPGW 上的烧蚀损伤现象减小，但 OPGW-90 外层烧蚀断股现象较为严重，这主要是由于 OPGW-50 和 OPGW-70 结构为中心不锈钢管式，而 OPGW-90 为层绞不锈钢管式结构，如附录 C 图 C11 所示，该

结构单层铝包钢的截面较小，导致单股线经高温烧蚀后，难以承受额定拉断力导致断裂，但其可用更多铝包钢线绞合，增加机械强度与耐张性能，且具有较高的冗余性，即使某层发生断裂，其他层仍可以继续提供保护[25-26]。

经光功率计测量，3 种型号的 OPGW 均并未检测到光衰减量变化，并且剩余拉断力仍然在规定的额定拉断力范围内，证明 3 种型号的 OPGW 在转移电荷量 150 C 的雷电流下仍可以正常工作。

3　结论

本文对配电线路光纤复合架空地线雷击损伤的影响因素进行了试验与仿真计算，分析不同转移电荷量、OPGW 截面面积和雷电流分量对光纤复合架空地线的雷击损伤差异，主要结论有：

1）随着转移电荷量的增加，雷电电弧参数与 OPGW 的烧蚀深度均增加。转移电荷量由 50 C 增大到 200 C，雷电电弧参数的最大温度提高了 3.54 倍，最大电流密度提高了 3.55 倍。在 OPGW-50 型号下，转移电荷量不超过 150 C 时不会造成断股现象；转移电荷量从 50 C 增大至 150 C 时，试验时的烧蚀面积增加了 4.72 倍，试验与仿真的烧蚀深度分别增加了 4.38 倍和 5.34 倍，由于仿真基于理想情况下进行烧蚀，所以烧蚀深度较大。

2）当雷电流由多重雷电流 A+B+C 分量变为 A+C 分量时，雷电电弧参数的电流密度减小了 6.09%，雷电电弧的温度减小了 7.75%，这说明雷电流分量的变化对雷电电弧参数有直接影响。

3）OPGW-50 和 OPGW-70 的烧蚀深度的仿真和试验结果分别相差 7.14%和 7.04%，OPGW-90 在仿真中烧蚀最为严重，但未出现断股现象，而在试验中出现了较为严重的断股损伤。该现象表明，随着 OPGW 单股线截面面积的减小，发生断股现象的几率提升。因单股线截面面积小，烧蚀过后剩余面积较小，其能承受的拉力较小，最终导致拉断。但若单股线截面面积越小、而总体截面面积大，则意味着该型号的 OPGW 由更多股铝包钢线组成，在面对雷击时有更高的冗余性。

4）在不同幅值雷电流的作用下，烧蚀损伤的影响程度与雷电流幅值成正比，且雷电流 C 分流对雷击烧蚀的影响大于雷电流 B 分量的影响，证明了光纤复合架空地线雷击损伤的主要原因为雷电流 C 分量的持续烧蚀作用，雷电流 B 分量主要起到击穿空气间隙、为后续雷电流 C 分量续弧提供条件的作用。

5）配电线路 OPGW 与输电线路 OPGW 的雷击损伤影响因素有相似特性，但配电线路 OPGW 的截面较小，层绞不锈钢管式结构单股线截面面积小，易出现断股现象。应根据当地雷电灾害情况与施工条件选择合适的配电线路 OPGW 型号。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] CHISHOLM W A, LEVINE J P, CHOWDHURI P. Lightning arc damage to optical fiber ground wires (OPGW): parameters and test methods[C]//2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings. Vancouver, Canada: IEEE, 2001: 88-93.

[2] 许东容. 500 kV 惠汕乙线光纤复合架空地线雷击断股分析[J]. 广东电力，2004，17(5)：67-70.
XU Dongrong. Analysis of lightning-caused OPGW strand breakage on 500 kV HuiShan transmission line[J]. Guangdong Electric Power, 2004, 17(5): 67-70.

[3] 吴正树. 500 kV 平来线架空地线雷击断股分析[J]. 广西电力，2010，33(5)：60-61.
WU Zhengshu. Analysis of strands breaking of 500 kV Pinglai overhead ground line[J]. Guangxi Electric Power, 2010, 33(5): 60-61.

[4] IWATA M, OHTAKA T, KUZUMA Y, et al. Analytical investigation on OPGW strands melting due to DC arc discharge simulating lightning strike[C]//2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Vienna, Austria: IEEE, 2012: 1-5.

[5] DMITRIEV V, GONZALEZ L. Modified OPGW cable-electrical and thermal analysis by coupled equations[C]//2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC). Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2013: 1-5.

[6] WANG Y, ZHUPANSKA O I. Lightning strike thermal damage model for glass fiber reinforced polymer matrix composites and its application to wind turbine blades[J]. Composite Structures, 2015, 132: 1182-1191.

[7] ABDELAL G F, MURPHY A. A multiphysics simulation approach for efficient modeling of lightning strike tests on aircraft structures[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(4): 725-735.

[8] IWATA M, NAKANO T, KOTARI M, et al. Calculation of OPGW strands melting due to DC arc discharge simulating high-energy lightning strike[J]. Plasma Physics and Technology, 2019, 6(2): 188-192.

[9] SUN J R, LI S, QING Q, et al. Damage characteristics of OPGWs under consecutive lightning strikes based on a coupled arc-thermal-electric simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(3): 1927-1937.

[10] 王书范，王诚，谢蓉，等. 基于 COMSOL Multiphysics 的 OPGW 耐雷性能分析与仿真[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版)，2023，41(2)：240-245.
WANG Shufan, WANG Cheng, XIE Rong, et al. Analysis and simulation of OPGW lightning protection based on COMSOL Multiphysics[J]. Journal of Hubei Minzu University (Natural Science Edition), 2023, 41(2): 240-245.

[11] SALES L R，MARTIN J，GINOCCHIO A. 光纤复合架空地线(OPGW)雷击试验及分析[J]. 电力系统通信，2004(5)：1-5.
SALES L R, MARTIN J, GINOCCHIO A. Lightning test and analysis

for optical ground wire (OPGW)[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2004(5): 1-5.

[12] 戚力彦，赵大平，刘汉新，等. OPGW 耐雷击性能的综合试验研究[J]. 电力系统通信，2009，30(3)：63-67.
QI Liyan, ZHAO Daping, LIU Hanxin, et al. Study on OPGW with-stand-lightning performance[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(3): 63-67.

[13] CAI L, HAN T X, WANG J G, et al. Experimental analysis of the strands breaking characteristics of optical fibre composite overhead ground wire due to simulating lightning strike[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(15): 2922-2929.

[14] 孙晋茹，姚学玲，许雯珺，等. 光纤复合架空地线雷电直接效应的实验研究[J]. 西安交通大学学报，2018，52(2)：82-88.
SUN Jinru, YAO Xueling, XU Wenjun, et al. Lightning direct effect of optical fiber overhead ground wires under continuous two lightning components[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(2): 82-88.

[15] 孙晋茹，焦梓家，朱鑫，等. 光纤复合架空地线雷电损伤模式及影响因素的实验及仿真研究[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1872-1880.
SUN Jinru, JIAO Zijia, ZHU Xin, et al. Experimental and simulation study of damage mode and influencing factors of lightning damage to optical fiber ground wires under lightning impulse and continuous current[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1872-1880.

[16] 周蜜，苏小玮，高俊福，等. 雷电流 A 分量与 C 分量对碳纤维复合材料损伤特性差异[J]. 电工技术学报，2022，37(增刊 1)：297-306.
ZHOU Mi, SU Xiaowei, GAO Junfu, et al. Differences in damage characteristics of lightning current components A and C to carbon fiber reinforced polymer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(Supplement1): 297-306.

[17] 王润东，黎静华，韦善阳. 基于多物理场耦合模型的碱性水电解槽工作特性[J]. 高电压技术，2024，50(7)：3209-3220.
WANG Rundong, LI Jinghua, WEI Shanyang. Operating characteristics of alkaline water electrolyzer based on multi-physical field coupled modeling[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3209-3220.

[18] 徐翀，王鹏博，杨帆，等. 三芯电缆中间接头压接缺陷多物理场及温度梯度场分析[J]. 高电压技术，2024，50(4)：1769-1780.
XU Chong, WANG Pengbo, YANG Fan, et al. Analysis of multi-physics field and temperature gradient field of crimping defects on intermediate joints on the three-core cable[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1769-1780.

[19] 袁发庭，杨文韬，韩毅凛，等. 基于电磁-流热双向耦合的变压器绕组温升计算及结构参数优化[J]. 高电压技术，2024，50(3)：952-961.
YUAN Fating, YANG Wentao, HAN Yilin, et al. Temperature rise calculation and structure optimization research of transformer winding based on electromagnetic-fluid-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 952-961.

[20] 刘刚，靳立鹏，胡万君，等. 基于混合有限元法的油浸式变压器稳态流-热耦合场并行计算方法[J]. 高电压技术，2024，50(5)：2259-2269.
LIU Gang, JIN Lipeng, HU Wanjun, et al. Parallel calculation method for steady-state fluid-thermal coupling field of oil-immersed transformer based on hybrid finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2259-2269.

[21] CAI L, HU Q, WANG J G, et al. Differences between triggered lightning striking to ground and distribution line inferred from measured currents and electromagnetic fields[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 705-717.

[22] Society of Automotive Engineers International. Aircraft lightning environment and related test waveforms: SAE Standard ARP5412C[S], 2024.

[23] 杨帆，郝翰学，王鹏博，等. 电力装备多物理场数值计算发展现状[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2348-2364.
YANG Fan, HAO Hanxue, WANG Pengbo, et al. State of the art of multiphysics simulation technology for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2348-2364.

[24] 史惠萍. 光纤复合架空地线的结构比较[J]. 光通信研究，2002(1)：45-48.
SHI Huiping. Structure compare of optical fiber overhead grounding wire[J]. Study on Optical Communications, 2002(1): 45-48.

[25] 刘云. 光纤复合架空地线(OPGW)雷击及其试验的研究[D]. 北京：中国电力科学研究院，2003.
LIU Yun. Research on lightning strike and its test of optical fiber composite overhead ground wire (OPGW)[D]. Beijing, China: China Electric Power Research Institute, 2003.

[26] 谢书鸿. 光纤复合架空地线(OPGW)的结构剖析[J]. 电线电缆，1998(3)：13-16.
XIE Shuhong. Structure analysis of optical fiber composite overhead ground wire (OPGW)[J]. Wire & Cable, 1998(3): 13-16.



安韵竹(通信作者)
1988—，女，博士，副教授，博导
主要从事雷电放电与防护、气体介质放电和电磁兼容方面的研究工作
E-mail: anyunzhu2006@163.com

AN Yunzhu
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2025-09-30 修回日期 2025-12-12 编辑 程子丰

附录 A

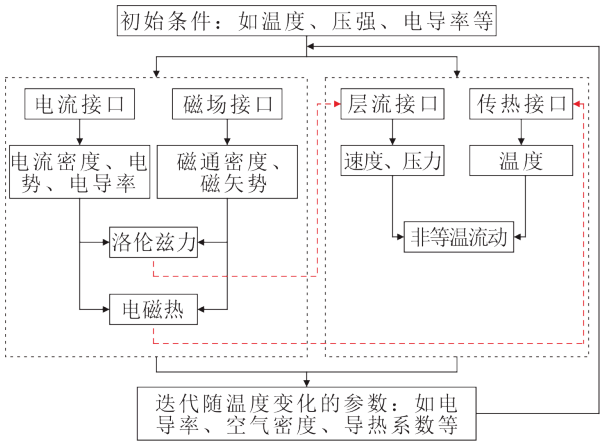


图 A1　配网光纤复合架空地线雷击损伤影响计算流程图

Fig.A1　Calculation flowchart of lightning strike damage effect of optical fiber composite overhead ground wire in distribution network

附录 B

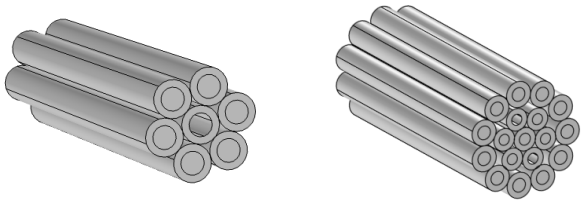
表 B1　部分配电线路 OPGW 规格型号

Table B1　Part of the distribution line OPGW specification model

规格型号	光缆结构
OPGW-50	6/3.3/40AS，SUS1/3.3
OPGW-70	6/3.8/40AS，SUS1/3.8
OPGW-90	1/2.6/20AS+4/2.5/20AS+11/2.8/20AS，SUS2/2.5

光缆结构表示光缆的具体绞合结构，如 1/2.6/20 AS+4/2.5/20 AS+11/2.8/20 AS，SUS2/2.5 表示层绞不锈钢管结构，1/2.6/20 AS 表示最内层为 1 根直径 2.6 mm 导电率为 20%的铝包钢单丝，4/2.5/20 AS 表示第二层为 4 根直径 2.5 mm 导电率为 20%的铝包钢单丝，11/2.8/20 AS 表示第三层为 11 根直径 2.8 mm 导电率为 20%的铝包钢单丝，SUS2/2.5 表示第二层含 2 根直径 2.5 mm 的不锈钢管光单元。

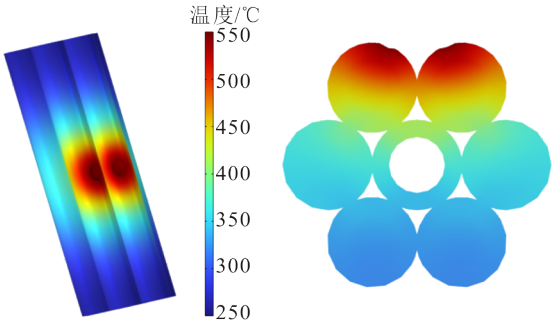
附录 C



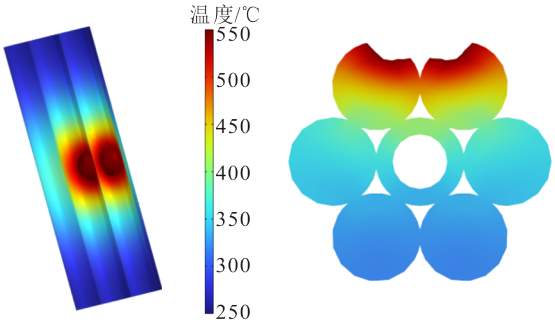
(a) 中心不锈钢管式　　(b) 层绞不锈钢管式

图 C1　OPGW 模型

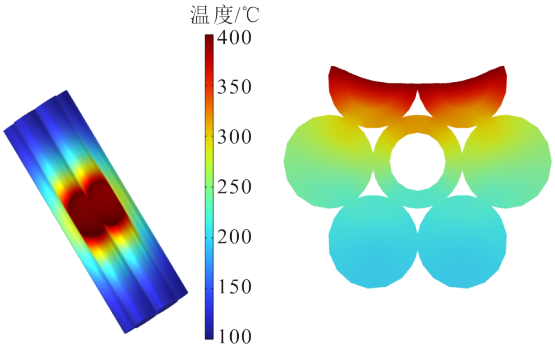
Fig.C1　OPGW model



(a) 转移电荷量50 C



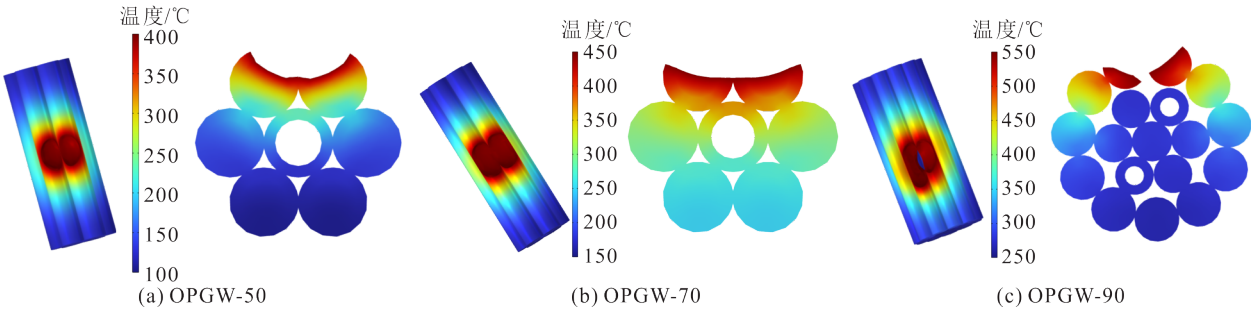
(b) 转移电荷量100 C



(c) 转移电荷量150 C

图 C2　不同转移电荷量的 OPGW 烧蚀情况

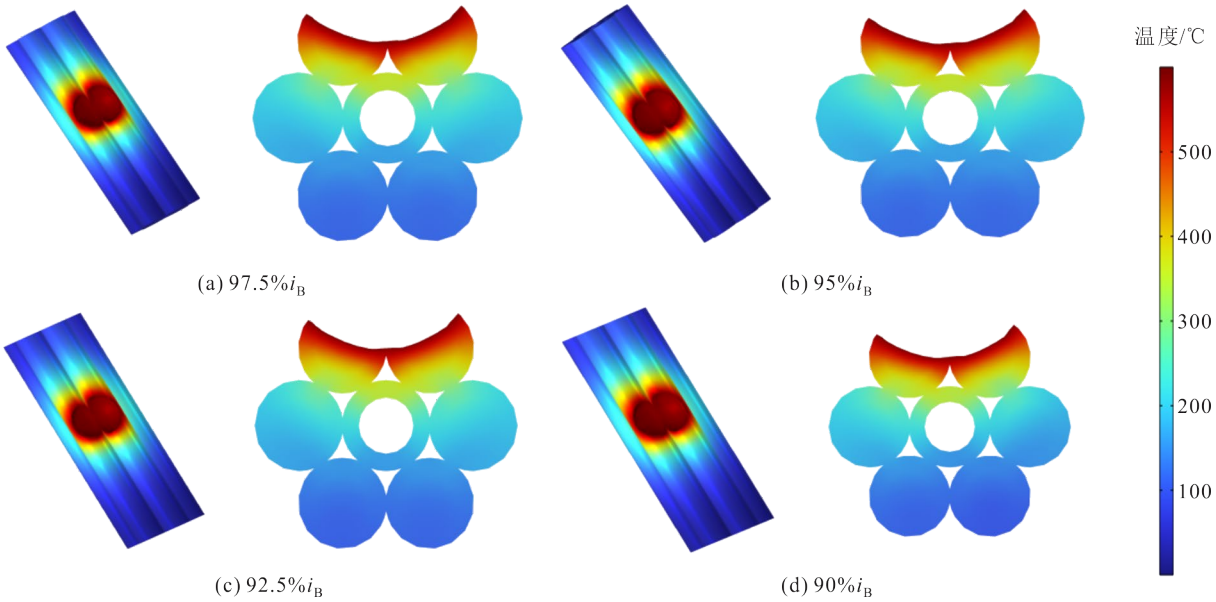
Fig.C2　The ablation of OPGW with different transferred charges



(a) OPGW-50　(b) OPGW-70　(c) OPGW-90

图 C3　不同截面面积下的 OPGW 烧蚀情况

Fig.C3　Ablation of OPGW under different cross-sectional areas

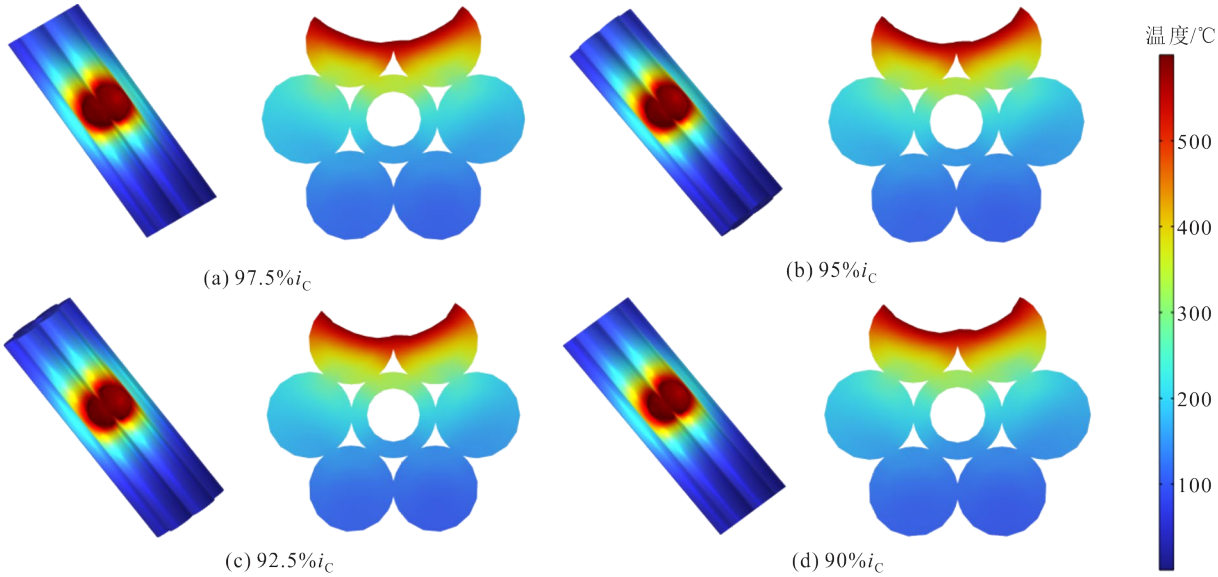


(a) 97.5%i_B　(b) 95%i_B

(c) 92.5%i_B　(d) 90%i_B

图 C4　不同雷电流 B 分量幅值下的 OPGW 雷击损伤

Fig.C4　OPGW lightning damage under different amplitude of B component of lightning current



(a) 97.5%i_C　(b) 95%i_C

(c) 92.5%i_C　(d) 90%i_C

图 C5　不同雷电流 C 分量幅值下的 OPGW 雷击损伤

Fig.C5　OPGW lightning damage under different amplitude of C component of lightning current

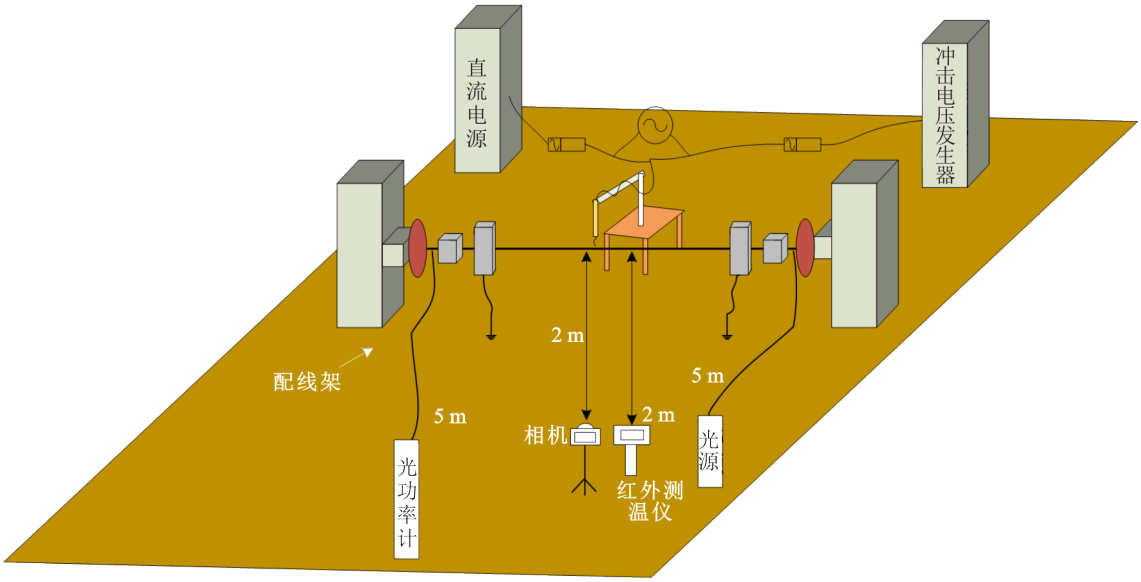


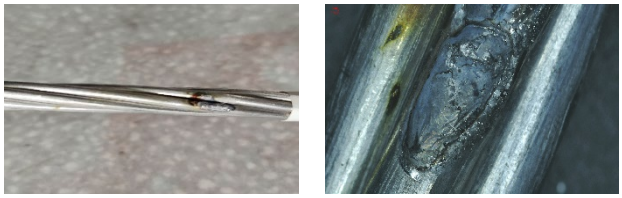
图 C6　模拟雷击试验平台示意图

Fig.C6　Schematic diagram of simulated lightning strike test platform

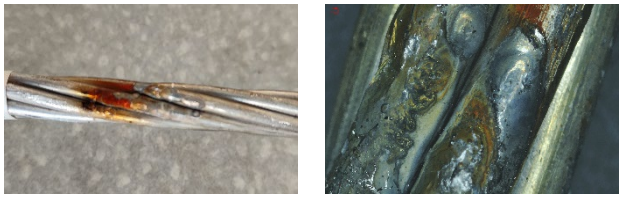


图 C7　OPGW 试验样品

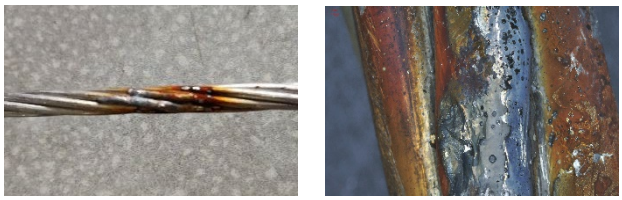
Fig.C7　OPGW test sample



(a) 转移电荷量 50 C



(b) 转移电荷量 100 C

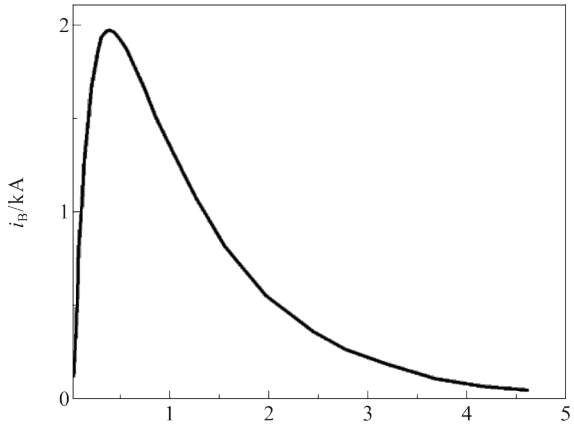


(c) 转移电荷量 150 C

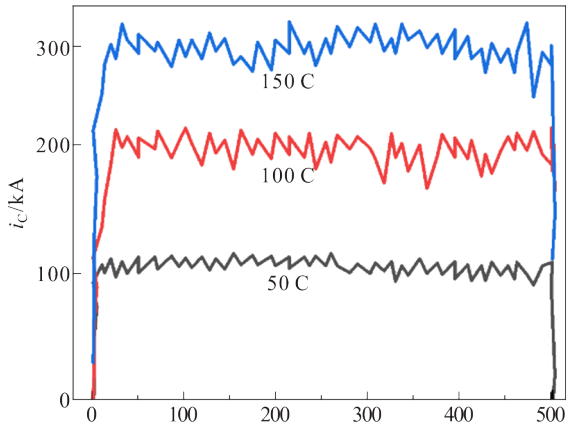
注：左图为 OPGW 整体烧蚀情况，右图为电镜扫描下的 OPGW 烧蚀情况。

图 C8　不同转移电荷量下的 OPGW-50 损伤

Fig.C8　Damage of OPGW-50 under different charge transfer amouts



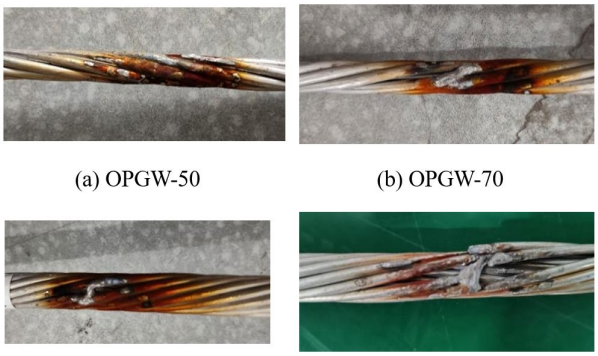
(a) 雷电流B分量i_B波形图



(b) 雷电流C分量i_C波形图

图 C9　不同转移电荷量下的电流波形

Fig.C9　Current waveforms under different transferred charge quantities

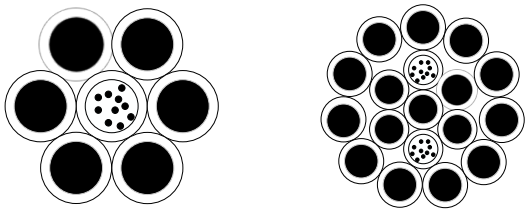


(a) OPGW-50　(b) OPGW-70

(c) OPGW-90　(d) 断 2 股后熔融

图 C10　不同截面下的 OPGW 损伤

Fig.C10　OPGW damage under different cross-sections



(a) 中心不锈钢管式　(b) 层绞不锈钢管式

图 C11　OPGW 的两种结构

Fig.C11　Two structures of OPGW