DOI：10.7652/xjtuxb201802013

光纤复合架空地线雷电直接效应的实验研究

孙晋茹，姚学玲，许雯珺，乐杨晶，陈景亮
（西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室，710049，西安）

摘要：基于对现行的光纤复合架空地线(OPGW)雷击测试标准及研究现状的分析，提出了 OPGW 连续时序雷电直接效应的实验方法，并建立了雷电流 B 分量与连续电流 C 分量组成的多重连续时序雷电直接效应的实验平台，评估雷电流 C 分量的幅值和作用间隙对 OPGW 雷击损伤的影响规律，探索雷电流对 OPGW 的作用机理及散流特性。研究发现：随着 C 分量转移电荷量的增加，OPGW 外层铝包钢股线熔断烧蚀程度不断加剧，雷击过后的温度不断升高。在转移电荷为 200 C 时，雷击后瞬间 OPGW 表面的温度超过 3 700 ℃，约 30％的股线发生严重损伤。随着雷击实验作用间隙由 5 cm 增加至 6 cm，OPGW 试品雷击后的温升减小 40％，损伤程度也有所减轻。研究内容能够为 OPGW 雷击实验方法的规范及防雷特性的评估提供基本实验支撑和理论依据。

关键词：光纤复合架空地线；雷电直接效应；转移电荷量；作用间隙；温度分布；雷击断股
中图分类号：TM863 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2018)02-0082-07

Lightning Direct Effect of Optical Fiber Overhead Ground Wires under Continuous Two Lightning Components

SUN Jinru, YAO Xueling, XU Wenjun, LE Yangjing, CHEN Jingliang
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: By analyzing the current standard of lightning testing and performance for the optical ground wire (OPGW), the lightning direct effect testing system with an adjustable discharge gap for the OPGW is constructed. The lightning strike characteristics and damage performance of OPGW under different experimental conditions of variable DC currents and discharge gaps are evaluated in the experiments. The mechanism of lightning direct effect and conducting performance of OPGW are explored preliminarily. It is found that as the Al-Steel outer layer of the OPGW, the erosion degree of the aluminum-clad steel wire increases with the increasing transfer charge of DC current C component. When the transfer charge gets about 200 C, the temperature of the OPGW surface after the lightning strikes is estimated for more than 3 700 ℃, and more than 30％ of the strands are damaged severely. Moreover, when the length of discharge gap increases from 5 cm to 6 cm, the temperature rise of OPGW due to the lightning strike decreases and the lightning damage degree is reduced over 40％.

Keywords: optical ground wire; lightning direct effect; transfer charge; discharge gap; temperature distribution; strand breakage

---

收稿日期：2017-05-09。 作者简介：孙晋茹(1991—)，女，博士生；姚学玲(通信作者)，女，教授，博士生导师。 基金项目：国家自然科学基金资助项目(51477132，51521065)；陕西省创新团队资助项目(2012KCT-07)；中央高校基本科研业务费资助项目(xkjc2014006)。
网络出版时间：2017-11-01 网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20171101.0922.002.html

光纤复合架空地线(OPGW)与输电导线同塔架设，处于架空线路的最顶部，作为输电线路的防雷线，对输电导线抗雷击放电提供屏蔽保护，同时通过复合在地线中的光纤，能够传送音频、视频、数据和各种光控制信号，组建多路宽带通信网。OPWG 以其结构简单可靠、不增加线路负荷、安全系数高、有较长的使用寿命和较高的运行可靠性等优势，在国内外的电力通信系统中得到越来越广泛的应用[1]。

由于电力线路走廊经过的地形地貌、气象条件比较复杂，加上杆塔有一定的高度，所以 OPGW 不可避免地会遭受雷击而发生断股[2]。若外层多股损坏后，内层钢管内的光纤也有可能受到损坏从而威胁到通信的中断或者直接导致整个 OPGW 损坏，造成严重的大面积停电事故。从 1994 年开始的 6 年间，加拿大安大略水电局对 90 000 km 线路统计的线路导地线损坏(主要雷击断股)有 574 次，得出每年每 100 km 线路损坏次数 M 为 0.1 次[3]。据日本经验，M 为 0.08 次[4]。OPGW 雷击损坏不仅影响输电线路的安全运行，而且威胁电力系统通信的可靠性。因此，探讨 OPGW 的雷电效应实验方法、雷电与 OPGW 相互作用机理，对提高 OPGW 的防雷性能，保证电力系统的安全运行具有重要的理论与应用价值。

在原有 IEC 60794-1999 标准中[5]借鉴了飞行器雷击实验航空标准[6]，规定雷电直接效应实验由 4 个雷击分量组成的多重时序雷电流来模拟，如表 1 所示。

表 1　雷击实验波形及参数

组成部分	参数	数值	容差
初冲击(A 部分)	峰值电流/kA	120	±10%
	累计作用量/(kA)^2·s	2	±10%
	脉冲宽度/μs	<500	
	上升时间/μs	<25	
中间电流(B 部分)	平均电流/kA	2	±10%
	脉冲宽度/ms	<5	
	转移电荷/C	10	
连续电流(C 部分)	峰值电流/A	*	
	持续时间/ms	*	
	转移电荷/C	*	
再冲击(D 部分)	峰值电流/kA	100	±10%
	累计作用量/(kA)^2·s	0.25	±10%
	脉冲宽度/μs	≤500	

注：* 表示需要由用户与制造商商定。

目前，国内外大多研究者仅采用连续电流 C 分量进行 OPGW 雷电损伤的研究，认为雷电损伤主要与雷电转移电荷量相关，即长时间连续电流形成的稳定电弧是引起 OPGW 熔化断股及损伤的主要原因[7-11]，单独雷电流 A、B 或 D 分量对光缆只造成轻微损坏。因此，在修订 IEC 60794-4-1：2003[12] 及 IEEE 1138：2009[13] 中仅保留了雷电流 C 分量，并给出了具体规定，如表 2 所示[12]。

表 2　连续电流参数

级别	电流/A	持续时间/ms	转移电荷/C
0	100	500	50
1	200	500	100
2	300	500	150
3	400	500	200

事实上，雷击是一种长间隙、多重雷电流连续放电的过程，是冲击力效应、热效应与电磁效应综合作用的结果。现有研究文献表明：在单一 100 kA 雷电流 A 分量作用下，OPGW 雷电附着点处的压力超过 5 MPa，瞬时温度达 3×10^4℃，雷电附着点附近的铝包钢股线可能会发生瞬间熔化变形[14-15]。此外，由于连续电流 C 分量的作用电压较低，无法对实验标准规定的带有作用间隙(50±10) mm 的 OPGW 进行实验，实际测试中常采用较粗的保险丝等捆绑在 OPGW 上进行实验，致使在捆绑点处出现严重的断股和烧蚀，而且测试结果分散性很大。因此，研究多重雷电流分量与 OPGW 的相互作用机制和实验方法，对准确表征 OPGW 的性能具有重要的理论意义和应用价值。

本文提出了雷电流 B 分量引发后续直流电流 C 分量的实验方法，对带有作用间隙的 OPGW 进行 B+C 连续作用雷击实验，通过分析不同 C 分量电流幅值，不同作用间隙下的雷击实验结果，获得雷电流分量与 OPGW 相互作用的和损伤的规律，研究雷电流在 OPGW 上的作用机理及散流特性，为规范 OPGW 的雷电效应实验方法及雷电损伤评估方法提供理论的基础。

1　实验方法和实验平台

1.1　OPGW 试样

本文采用不锈钢管层绞式结构的 OPGW 试样，光纤套入直径为 6.45 mm 的密封无缝钢管中，管内填充阻水化合物，在含有光纤的不锈钢管外绞合一层直径为 2.45 mm 的铝包钢线，其结构如图 1 所示。

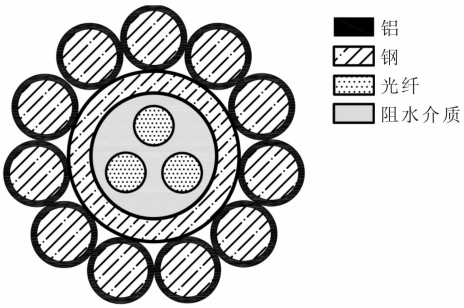
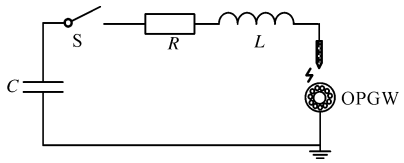


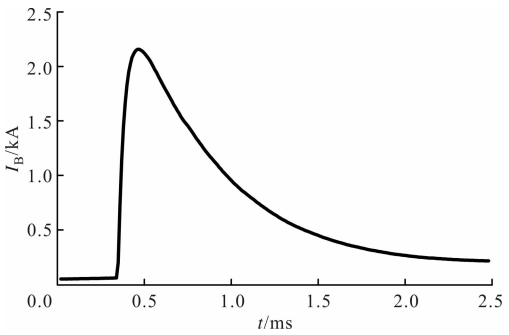
图 1 OPGW 试样结构图

1.2 OPGW 雷电实验的雷电流分量

1.2.1 引发雷电流 B 分量 本文使用的引发雷电流 B 分量由 *RLC* 发生回路产生，其电路原理及输出雷电流 B 分量波形如图 2 所示。图 2a 中 *C* 为储能电容，S 为放电开关，*R* 为调波电阻，*L* 为调波电感；图 2b 为 B 分量电流波形。



(a)B 分量发生回路原理



(b)B 分量电流波形

图 2 雷电流 B 分量发生回路和电流波形

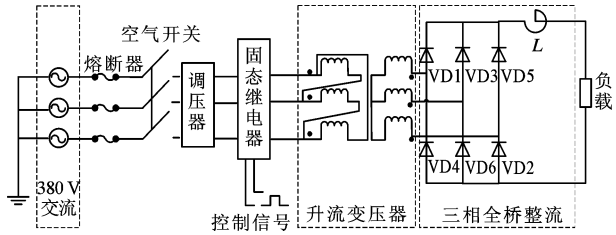
在放电电压 U_c 为 50 kV 的情况下，雷电流 B 分量的电流峰值 I_p 为 2 kA，波前和半峰值时间分别为 $T_f=62.5$ μs 和 $T_t=590$ μs。

1.2.2 连续雷电流 C 分量 采用三相可控整流电路产生连续电流 C 分量，发生器基本原理如图 3a 所示。实验中，通过固态继电器控制 C 分量加载时间，在负载为纯阻性的情况下，C 分量电流波形如图 3b 所示。

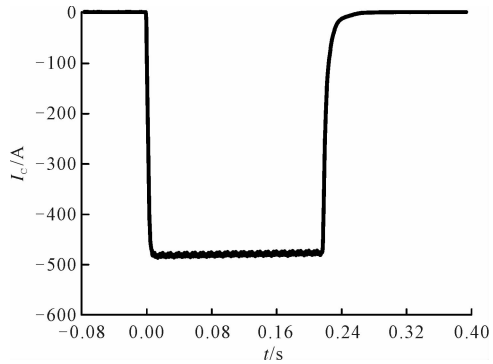
图 3 中，电流 C 分量的平均电流 I_{av} 为 479.5 A，电流持续时间 T_d 为 0.23 s，转移电荷量 Q_c 为 105.19 C。

1.3 OPGW 雷电效应的实验方法

采用 IEC 60794-4-1 中规定的实验方法，实验装置如图 4 所示。

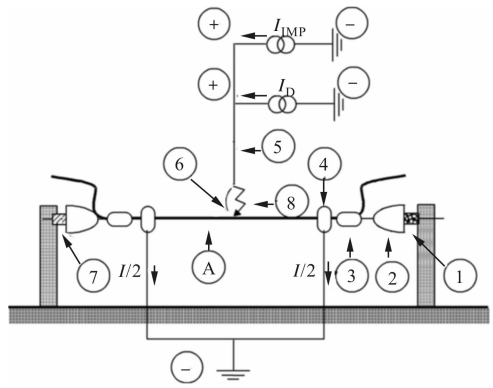


(a)雷电流 C 分量发生回路原理图



(b)电流 C 分量波形

图 3 雷电流 C 分量发生回路和电流波形



1：紧线螺丝；2：绝缘子；3：固定夹具；4：对称接地连接器；5：铜电极；6：引燃丝(0.2 mm 铜丝)；7：拉力计；8：电极与 OPGW 表面的作用间隙，一般为 5～6 cm；A：OPGW 试样

图 4 OPGW 雷击实验装置示意图

采用直径为 10 mm 的铜制丝杆制成的圆锥状电极，圆锥高度约为 15 mm，电极与 OPGW 表面铝包钢线缆之间的作用间隙可调，并连接有直径为 0.2 mm 的铜丝作为引燃丝。实验中，OPGW 外层通过相距 2 m 的对称接地连接器接地，雷电注入点处于两个对称接地连接器中心位置。标准规定实验中电极与 OPGW 股线的间隙为 6 cm[12]，可使用长度为(5±1) cm 的引燃丝。

本文实验是在雷电流 B 分量一定的情况下，调整雷电流 C 分量幅值分别为 100、200 和 400 A，作

用时间均为 0.5 s，作用间隙分别为 5 cm 和 6 cm（对应的引燃丝长度分别为 5 cm，6 cm）。实验中，B 分量作为先导脉冲首先施加在被试 OPGW 上，C 分量电流在 B 分量开始作用的 1 ms 之内加载，利用 B 分量电弧未完全熄灭状态下的高温高导电等离子体通道，使电压较低的 C 分量电流能够通过 5～6 cm 的通道连续施加在被试 OPGW 上，雷电 B 分量和 C 分量的时序关系如图 5 所示。研究不同雷电流 C 分量幅值和不同作用间隙实验条件下 OPGW 的雷击损伤，进而研究雷电流在 OPGW 上的作用机理及散流特性。考虑到雷击损伤实验结果的分散性，在同一实验条件下选取不同位置实施模拟雷击 5 次。

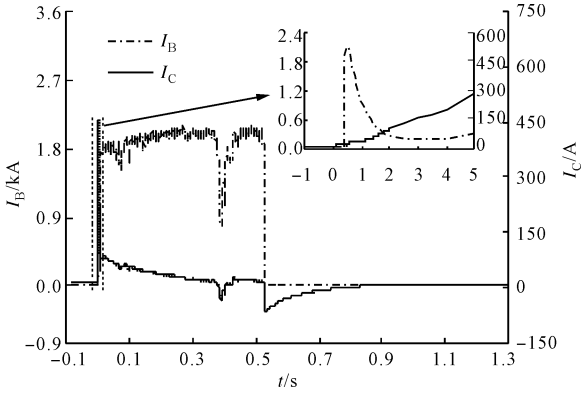


图 5　雷电流 B 分量与 C 分量时序关系波形图

2　OPGW 雷击损伤的实验与讨论

2.1　C 分量电荷量对 OPGW 雷击效应的影响

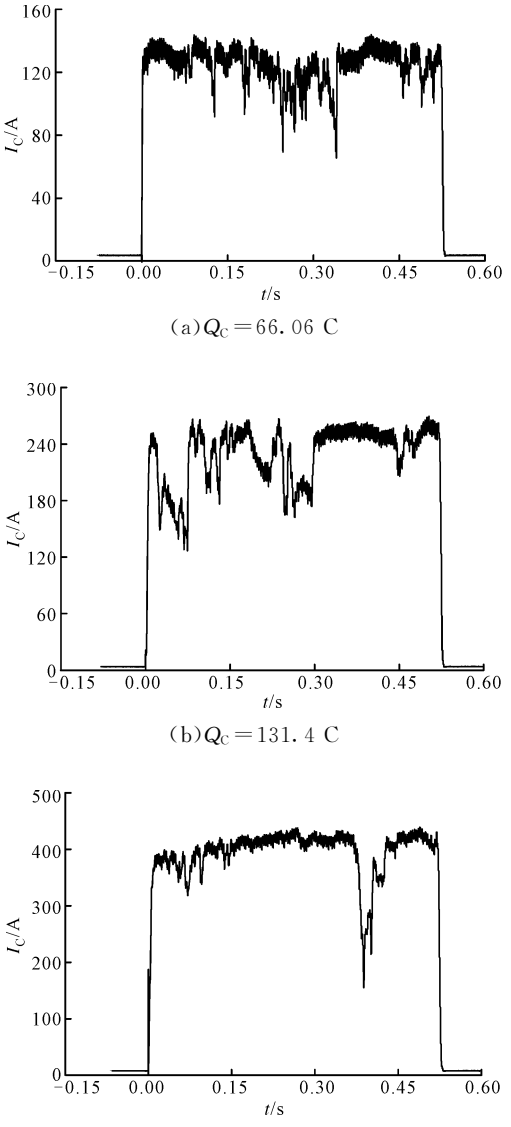
2.1.1　OPGW 的雷击损伤　在作用间隙 d 为 5 cm 的条件下，按照参考文献[5]中的 0、1、3 级实验，保持连续 C 分量平均电流分别约为 100、200 及 400 A，持续时间为 0.5 s，对相同规格的 OPGW 试样进行 B+C 分量连续作用实验，实验波形及参数如图 6 及表 3 所示。

表 3　雷电流 B 分量及 C 分量实验波形参数

试样	B 分量			C 分量		
	I_p/kA	T_f/μs	T_t/μs	I_{av}/A	T_d/s	Q_t/C
A1	2.179	75.0	670	126.1	0.528 3	66.1
A2	2.160	75.0	590	230.7	0.524 5	120.3
A3	2.157	62.5	590	397.8	0.525 6	206.7

雷电流 B、C 分量连续作用雷击实验后，OPGW 损伤情况如图 7 所示（作用间隙 d=5 cm）。

从图 7 看出，随着 C 分量转移电荷量的增加，注入 OPGW 的能量增大，外层铝包钢股线熔断烧蚀程度不断加剧。当注入电荷量约 60 C 时，OPGW



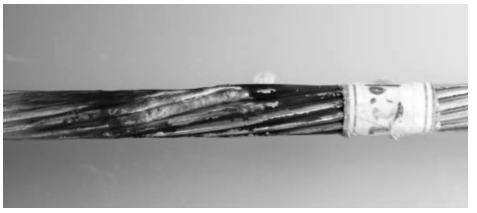
(a)Q_C=66.06 C

(b)Q_C=131.4 C

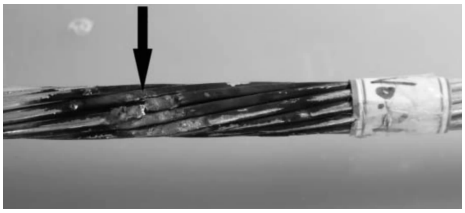
(c)Q_C=219.6 C

图 6　雷电流 C 分量实验波形图

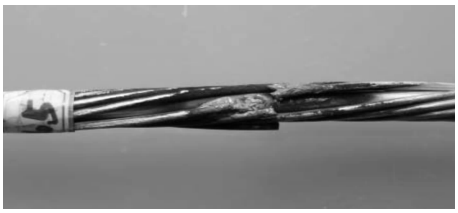
(a)转移电荷量 66.06 C(试样 A1)



(b)转移电荷量 120.3 C(试样 A2-1)



(c)C 分量转移电荷量 123.0 C(试样 A2-2)



(d)转移电荷量 206.7 C(试样 A3)

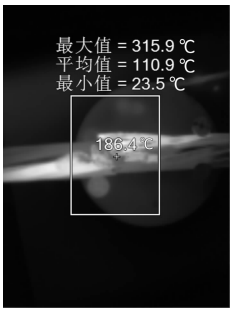
图 7 OPGW 试品的雷电损伤情况(d=5 cm)

发生轻微的雷击损伤,外层仅出现轻微的片状烧蚀痕迹,没有发生金属股线的熔化现象(见图 7a);当注入电荷量增加到 120 C 时,OPGW 的外层金属股线出现熔化变形现象。由于 OPGW 雷击损伤实验的分散性,5 次实验中,4 个 OPGW 试品上观察有外层金属股线熔化扭曲,但未发生股线熔断现象(见图 7b),一个 OPGW 试品出现 1 根雷击铝包钢股线断裂,如图 7c 所示。当注入电荷量增加到 200 C 时,OPGW 外层股线熔化变形明显,出现多股线烧熔粘结在一起的现象,股线熔断根数明显增加,完全变形损伤的金属股数量均在 3 根以上,OPGW 的力学特性将遭受严重影响(见图 7d)。

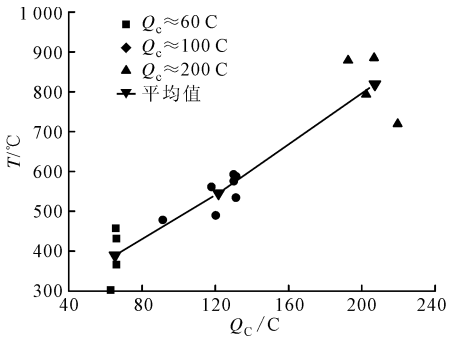
实验中所用的 B 分量能量较小,幅值约为 2 kA,作用积分约为 2.2×10^3 A^2·s,对 OPGW 的作用效果不明显。本文只作为先导脉冲引发 C 分量的持续加载,高强度雷电流与 OPGW 作用过程中的冲击力和电磁效应没有得到充分体现。未来我们将进一步改变先导脉冲雷电流分量的参数,进行 OPGW 雷击效应作用机理的深入研究。

2.1.2 *OPGW 雷击实验温度特性* 雷电流 C 分量的注入致使 OPGW 雷电附着点的温度迅速升高,当局域温度大于外层金属股线的熔点时,就会发生 OPGW 外层股线的熔化变形及断裂。雷击实验后试品红外温度分布如图 8 所示。

从图 8a 得知,OPGW 被雷击后 t=10 s 时,线缆上最高温度为 315.9 ℃,且高温区集中在雷电附着点附近,呈纺锤状分布。图 8b 所示的雷击后 t=5 s 线缆表面温度特性表明:随着 C 分量转移电荷量的增加,雷击后电缆表面的温度升高,直接影响



(a)t=10 s 时的红外温度谱图



(b)t=5 s 时的温度分布规律

图 8 雷击后试品的红外温度分布(试样 A3)

OPGW 外层铝包钢股线熔断烧蚀程度。雷击后,随着与外界热量的交换,OPGW 表面温度迅速下降,其变化规律如图 9 所示。

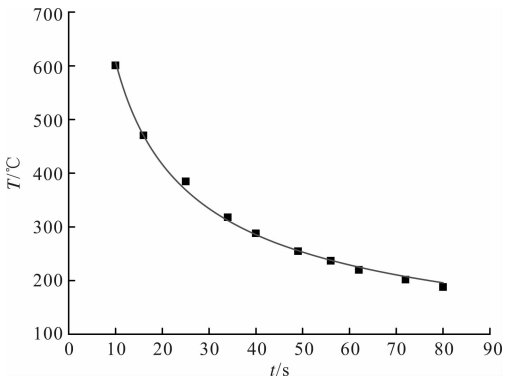


图 9 雷击后试品温度的变化规律(试样 A3)

根据雷击实验测到的温度数据,通过曲线拟合,得到温度随时间变化的关系为 $T=1\,047t^{-0.538\,4}$,由此计算得到雷击后 0.1 s 时 OPGW 表面的温度约为 3 713 ℃。

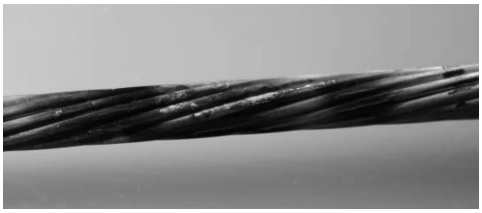
2.2 作用间隙对 OPGW 雷击损伤的影响

作用间隙 d 增加至 6 cm,其余实验条件不变,对相同规格 OPGW 进行 B+C 分量连续雷击实验,实验参数如表 4 所示,试品雷击损伤情况如图 10 所示。

从图 10 中雷击损伤结果看出,随着 C 分量转移电荷量的增加,OPGW 外层铝包钢股线熔断烧蚀

表 4　雷电流 B 分量及 C 分量实验波形参数

试样	B 分量			C 分量		
	I_p/kA	T_f/μs	T_t/μs	I_{av}/A	T_d/s	Q_t/C
B1	2.190	75	670	117.7	0.524 9	61.32
B2	2.191	75	690	188.8	0.525 1	98.39
B3	2.159	75	600	414.9	0.527 1	212.8



(a)C 分量电荷量 61.32 C(试样 B1)

(b)C 分量电荷量 98.39 C(试样 B2)

(c)C 分量电荷量 212.8 C(试样 B3)

图 10　OPGW 的雷击损伤情况(d=6 cm)

程度加剧。当转移电荷量较小时，雷击仅在 OPGW 股线表面造成轻微的磨损，未出现股线熔化变形现象。当电荷量达 200 C 时，外层线股表面上产生深浅不一的黑斑点或称为熔蚀斑，在断股周边线股上粘附有一些微小金属瘤状物，甚至出现两股线烧熔粘结在一起的现象。

与作用间隙 d=5 cm 时的损伤(图 7)相比，相同 C 分量转移电荷量作用时，随着作用间隙 d 的增加，雷击对 OPGW 的损伤程度减弱。当 C 分量注入电荷量为 200 C、d=5 cm 的条件下，OPGW 外层股线发生较严重的熔化及断裂，而当 d=6 cm 时，OPGW 外层金属在雷电流冲击下发生熔化变形，但损伤的深度和范围均比较小。

不同作用间隙下，雷击放电后 t=5 s 时的 OPGW 试品温度特性对比如图 11 所示。

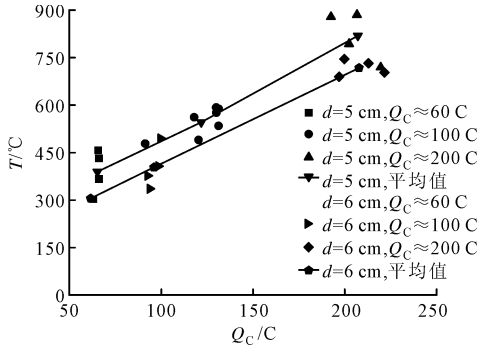


图 11　t=5 s 时的雷击后 OPGW 温度特性

从图 11 可以看出：随着 C 分量电荷量的增加，雷击后电缆表面的温度升高，但 OPGW 试品在 d=6 cm 时雷击后温度小于其在 d=5 cm 条件下的温度。当 C 分量注入电荷量为 200 C、放电间隙 d=5 cm的条件下，OPGW 试样在雷击后约 0.1 s 时表面温度约为 3 700 ℃(试样 A3)，其外层股线发生较严重的熔化及断裂。当 d=6 cm 时，OPGW 试样 t=0.1 s 时温度约为 2 200 ℃(试样 B3)，温度下降约 40%，其外层铝包钢股线在雷电流冲击下发生熔化变形，但损伤的深度和程度均较小。即随着雷击实验作用间隙的增加，雷击对 OPGW 的损伤程度减弱，雷击后线缆表面温度降低，仅有 2 根股线出现明显熔化变形，损伤根数相应减少。

在雷电流分量 B+C 向 OPGW 注入过程中，由于高温等离子体通道周围空气的受热膨胀及流动，加上电弧自生及外加电磁场作用，电弧柱体会出现扭转及局域扩张现象[16]，当扭曲的弧柱 OPGW 表面的电场强度达到临界场强 E_C 时，电弧接触点就会发生跳跃。作用间隙越长，电弧越容易发生扭曲变形，电弧运动范围加宽。因此，随着作用间隙 d 的减小，雷电流与 OPGW 的作用面积减小，雷电能量注入更加集中，导致 OPGW 外层股线的雷击附着点的熔蚀损伤越严重。

3　结　论

本文针对目前单一连续电流 C 分量单独作用无法模拟真实状态下的雷击过程的研究现状，提出采用多重雷电流 B 分量与 C 分量连续作用于 OPGW 的雷击实验方法。对雷电流 B+C 分量连续作用后 OPGW 的损伤效应与温度特性进行了研究，得到以下结论。

(1)随着雷电流 C 分量转移电荷量的从 60 C 增加至 200 C，雷击后极短时间 OPGW 表面温度从 1 000 ℃升至 3 700 ℃以上，OPGW 外层铝包钢股线

熔断烧蚀程度加剧。当注入电荷量增加到 120 C 时，OPGW 试品发生外层金属股线熔化扭曲，当注入电荷量增加到 200 C 时，OPGW 外层股线发生显著的变形及烧熔粘结现象，约 30% 的股线熔断，OPGW 整体力学特性受到严重影响。

(2)当雷击实验作用间隙 d 增加至 6 cm 时，相同实验条件下，OPGW 试品雷击后的温升减小，股线损伤根数及损伤程度均有所下降，相比于 $d=5$ cm的情况，雷击后股线温度下降约 40%，这与电弧动态特性及电流在 OPGW 上的散流特性有关。

关于高强度雷电流与 OPGW 作用过程中的冲击力和电磁效应，以及 OPGW 雷电直接效应多场耦合物理模型的建立，需要在未来进行深入研究。

参考文献：

[1] 梁芝贤，穆国强. OPGW 的应用 [J]. 光通信技术，2007，31(1)：62-64.
LIANG Zhixian，MU Guoqiang. The using of OPGW [J]. Optical Communication Technology，2007，31(1)：62-64.

[2] 徐拥军，周建华，赵厚鹏，等. 特高强度光纤复合架空地线的研制与应用 [J]. 电力信息与通信技术，2016(11)：62-67.
XU Yongjun，ZHOU Jianhua，ZHAO Houpeng，et al. Development and application of ultra-high strength optical fiber composite overhead ground wire (OPGW) [J]. Electric Power Information and Communication Technology，2016(11)：62-67.

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

[4] YOKOYA M，KATSURAGI Y，GODA Y，et al. Development of lightning-resistant overhead ground wire [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，1994，9(3)：1517-1523.

[5] IEC. Optical fiber cable part 4-1：aerial optical cable for high-voltage power line：IEC 60794-4-1-1999 [S]. Geneva，Switzerland：IEC，1999.

[6] SAE. Aircraft lightning environment and related test waveforms：ARP 5412A [S]. Warrendale，PA，USA：SAE，2005.

[7] 刘亚坤，戴明秋，肖瑶，等. 雷电流作用下金属损伤试验的影响因素 [J]. 高电压技术，2017，43(5)：1445-1452.
LIU Yakun，DAI Mingqiu，XIAO Yao，et al. Influence factors of metal materials struck by simulated lightning currents [J]. High Voltage Engineering，2017，43(5)：1445-1452.

[8] LU L，LIANG Y，LI B，et al. Experimental study on location of lightning stroke on OPGW by means of a distributed optical fiber temperature sensor [J]. Optics & Laser Technology，2015，65(9)：79-82.

[9] IWATA M，OHTAKA T，KUZUMA Y，et al. Development of a method of calculating the melting characteristics of OPGW strands due to DC arc simulating lightning strike [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2013，28(3)：1314-1321.

[10] IWATA M，OHTAKA T，GODA Y. Melting and breaking of 80 mm^2 OPGWs by DC arc discharge simulating lightning strike [C]// International Conference on Lightning Protection. Piscataway，NJ，USA：IEEE，2016：1-4.

[11] DUBITSKY S D，KOROVKIN N V，HAYAKAWA M，et al. Thermal resistance of optical ground wire to direct lightning strike [C]// URSI International Symposium on Electromagnetic Theory. Piscataway，NJ，USA：IEEE，2013：108-111.

[12] IEC. Optical fiber cable part 4-1：sectional specification：aerial optical cable along electrical power line：IEC 60794-4-2003 [S]. Geneva，Switzerland：IEC，2003.

[13] IEEE. IEEE standard for testing and performance for optical ground wire (OPGW) for use on electrical utility power lines：IEEE STD 1138-2009 [S]. Piscataway，NJ，USA：IEEE，2009.

[14] CHEMARTIN L，LALANDE P，PEYROU B，et al. Direct effects of lightning on aircraft structure：analysis of the thermal，electrical and mechanical constraints [J]. Aerospace Lab，2012，AL-09(5)：1-15.

[15] 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 & Manufacturing，2010，57(8)：973-981.

[16] HE J，GU S，ZENG R，et al. Propagation models for motion processes of long ac arcs on overhead lines [J]. Electric Power Systems Research，2011，81(12)：2066-2073.

(编辑 杜秀杰)