

文章编号:1006-2467(2020)12-1252-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.115

考虑雷电流参数概率分布的雷击金属损伤估算方法

厉天威¹, 刘磊¹, 陈坚²

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 直流输电技术国家重点实验室, 广州 510630;
2. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要:以常用金属材料铝 3003 合金为例, 基于实际雷电流的 4 种典型组成作用下的模拟雷电流金属损伤试验结果, 分析了铝 3003 合金的损伤面积和损伤深度等损伤表征参数与雷电流参数的关系. 以建筑物为算例, 依据落雷密度、雷电截收面积、雷电流幅值与转移电荷量的联合概率分布等参数分析, 计算了金属材料遭受雷电直击的年平均次数及其雷电流参数分布特征, 建立了以铝 3003 合金和建筑物载体为算例的金属材料遭受雷电直击时考虑雷电流参数概率分布的损伤估算方法. 结果表明:短时间首次回击电流分量和短持续时间后续回击电流分量作用下铝 3003 合金材料的损伤深度均小于 0.1 mm, 可忽略. 铝 3003 合金材料的损伤面积与所遭受的雷电流幅值成正比, 合金的损伤深度与雷电流的转移电荷量成正比.

关键词:金属材料; 直击雷; 年平均次数; 雷电流参数; 概率分布

中图分类号: TM 89 **文献标志码:** A

Estimation Method for Metal Damage Struck by Lightning Considering Probability Distribution of Lightning Current Parameters

LI Tianwei¹, LIU Lei¹, CHEN Jian²

(1. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510630, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Taking the commonly used metal material aluminum 3003 as an example, and based on the simulated lightning current metal damage test results in the four typical compositions of actual lightning current, the damage characterization parameters such as damage area and damage depth of aluminum 3003 alloy and lightning current parameters were analyzed. Taking the building as an example, and based on the parameter analysis of the combined probability distribution of lightning strike density, lightning interception area, lightning current amplitude and transferred charge amount, the annual average number of lightning strikes and the distribution characteristics of lightning current parameters of metal materials were calculated. A damage estimation method considering the probability distribution of lightning current parameters when a metal material with aluminum 3003 alloy and building carrier as an example was subjected to lightning strikes was established. The results show that the damage depth of the aluminum

收稿日期:2019-04-23
基金项目:特高压工程技术(昆明、广州)国家工程实验室(NEL201606)资助项目
作者简介:厉天威(1980-),男,湖北省孝感市人,工程师,主要从事雷电和高压输电线路等方面研究.
通信作者:陈坚,男,工程师,电话(Tel.):021-62932531;E-mail:Chen_jian@sjtu.edu.cn.

3003 alloy material under the action of short-term first return current component and short-duration subsequent return current component is less than 0.1 mm, which can be ignored. The damage area of the aluminum 3003 alloy material is proportional to the magnitude of the lightning current suffered, and the damage depth of the alloy is proportional to the amount of charge transferred by the lightning current.

Key words: metal material; direct lightning; average annual frequency; lightning current parameters; probability distribution

我国电网雷电监测网^[1](CGLDN)统计资料显示,自 2004 年起,许多区域的地闪密度明显增加,雷击损害已成为人民日常活动和工业生产等的重要问题^[2-4]. 现有防雷措施主要包括接闪、分流、屏蔽、均压、接地及布线优化等 6 个方面^[5],在易受雷击部位安装接闪器如避雷器和避雷带(网)等是防雷设计中的重要举措^[6-7]. 但由于实际存在的雷电绕击、维护不当等原因,雷电直击情况仍时有发生. 其中,金属材料是建筑物中截收雷电的主要结构材料,有必要开展金属材料遭受雷击时损伤深度和损伤面积的预估分析,为金属材料的尺寸选择提供基础.

地闪始于产生初始电离先导的区域^[8],其电场强度一般高于 500 kV/m,电流通道内峰值温度可达 30 000 °C,通道内压强是普通大气压的 10~15 倍^[9]. 直击雷是带电云层与被击物体间发生的强烈放电现象^[10-11],一次雷电活动的峰值放电功率达 10^{12} W,放电能量高达 10^{10} J^[12-13],由此产生雷击点的温度骤升、电磁力作用等过程会造成被击物或系统的严重损坏. 国内外的雷电观测数据表明,70%的地闪具有多重性的特点^[14-15]. 国际电工委员会(IEC)标准将典型的实际雷电流成分总结为短持续时间首次回击电流分量、回击间长持续时间雷电流分量、短持续时间后续回击电流分量和末次回击后的长持续时间雷电流分量 4 种典型分量^[14]. 结合实际雷电流的多组分特点,研究不同雷电流分量下金属材料的损伤特征,是有效评估金属材料雷击损伤深度和损伤面积的基础.

本研究以常用金属材料铝 3003 合金和建筑物载体为例,基于金属材料在 4 种典型模拟雷电流分量(短时间首次回击电流分量、回击间长持续时间雷电流分量、末次回击后长持续时间雷电流分量及短持续时间后续回击电流分量)作用下的损伤面积和损伤深度等试验数据,分析雷电流参数和金属损伤参数之间的关系. 依据落雷密度、雷电截收面积、雷电流幅值与转移电荷量的联合概率分布等分析,计算建筑物遭受雷电直击的年平均次数、所在区域雷电流的电流幅值和转移电荷量的联合分布,建立以

铝 3003 合金为例的金属材料遭受雷电直击时考虑雷电流参数概率分布的损伤参数估算方法.

1 雷电流金属损伤试验与分析

根据已有雷电流金属损伤试验方法及影响因素^[3],将铝 3003 合金加工为 150 mm×150 mm×5 mm 的长方体金属板,试验电极采用高温烧结钨骨架渗铜法制备、材料为钨 80 合金(W80/Cu20)的“直接型”半椭球棒电极,其头部设计为曲率半径 3 mm 的半椭球体,身部设计为直径 8 mm 的圆柱,以解决试验中存在的电极喷射和电弧能量受约束的问题. 设置试验电极距离试品为 5 mm,引燃铜丝直径为 0.2 mm,采用绝缘辅助固定装置固定试品,以减少因电动力产生的电极和试品移位对试验结果的影响. 铜带四端连接试品接地,保证放电时电磁场均匀分布,减小其对电弧附着点和附着形态的影响,设置试品竖直布置,降低熔化残留金属对试验结果的影响.

采用输出电流幅值可调的多分量实际雷电流模拟试验设备来产生模拟雷电流试验波形进行试验,用输出幅值可调(最高为 201.2 kA)的波形为 30/80 μ s 的冲击电流来模拟首次短时间回击电流分量. 用输出幅值可调(最高为 8.1 kA)的持续时间为 2 ms 的电流来模拟回击间长持续时间雷电流分量,用输出幅值可调(最高为 404 A)的持续时间为 520 ms 的电流来模拟末次回击后的长持续时间雷电流分量,用输出幅值可调(最高为 102 kA)的波形为 4/10 μ s 的冲击电流来模拟后续短持续时间回击电流分量. 试验得到了不同雷电流参数下铝 3003 材料的损伤面积 S 和损伤深度 d 等数据,对雷电流参数(幅值、转移电荷量)与材料损伤参数(损伤面积和损伤深度)进行了相关性分析和数据拟合.

对于首次短时间回击电流分量(FRSC),不同雷电流幅值作用下的铝 3003 材料的损伤深度均小于 0.1 mm^[3],可忽略不计,其 S 和电流幅值 I_p 的关系如图 1 和下式:

$$S = -1\,419.3 + 28.7I_p, \quad R = 0.91 \quad (1)$$

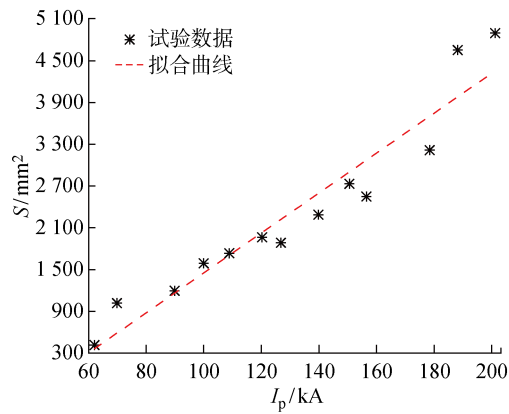


图 1 FRSC 作用下的电流幅值和损伤面积关系
Fig.1 Current amplitude versus damage area sub-
jected to FRSC

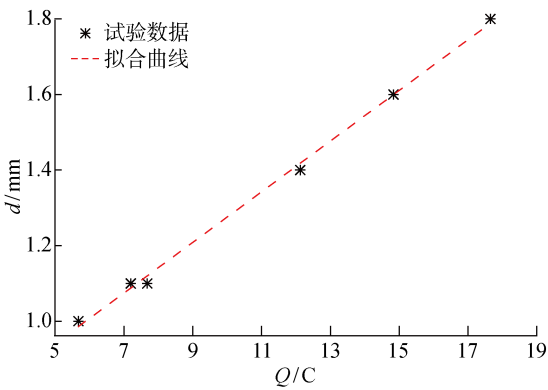


图 3 ICC 作用下的转移电荷量和损伤深度关系
Fig.3 Charge transfer versus damage depth sub-
jected to ICC

式中: R 为相关系数。
对于回击间长持续时间雷电流分量 (ICC), 铝 3003 合金材料的 S 、 d 与 I_p 、转移电荷量 Q 的关系如图 2、3 及下式:

$$S = -2.51 + 2.70I_p, \quad R = 0.99 \quad (2)$$

$$d = 0.60 + 0.067Q, \quad R = 0.99 \quad (3)$$

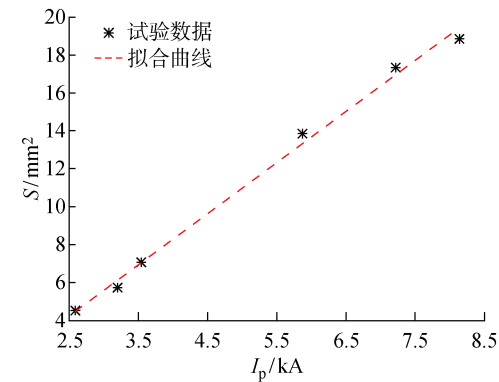


图 2 ICC 作用下的电流幅值和损伤面积关系
Fig.2 Current amplitude versus damage area
subjected to ICC

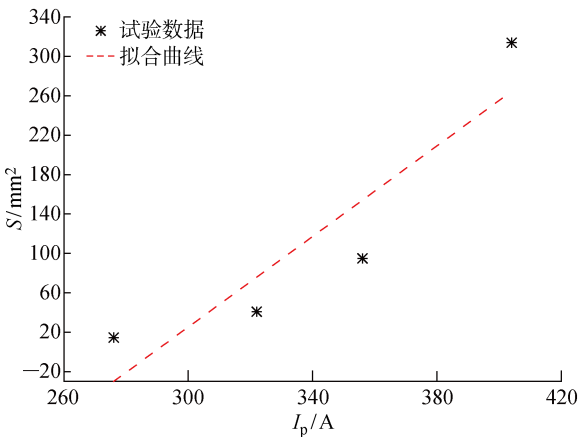


图 4 LCC 作用下的电流幅值和损伤面积的关系
Fig.4 Current amplitude versus damage area sub-
jected to LCC

对于末次回击后的长持续时间雷电流分量 (LCC), 铝 3003 合金材料的 S 、 d 和 I_p 、 Q 的关系如图 4、5 及下式:

$$S = -665.31 + 2.3I_p, \quad R = 0.75 \quad (4)$$

$$d = -2.53 + 0.028Q, \quad R = 0.97 \quad (5)$$

对于后续短持续时间回击电流分量 (SSCC), 不同电流幅值作用下铝 3003 合金材料的损伤深度均小于 $0.1 \text{ mm}^{[3]}$, 可忽略不计, 铝 3003 材料的 S 和 I_p 的关系如图 6 和下式:

$$S = 105.5 + 2.1I_p, \quad R = 0.99 \quad (6)$$

由此可知, 铝 3003 合金的损伤面积和电流幅值

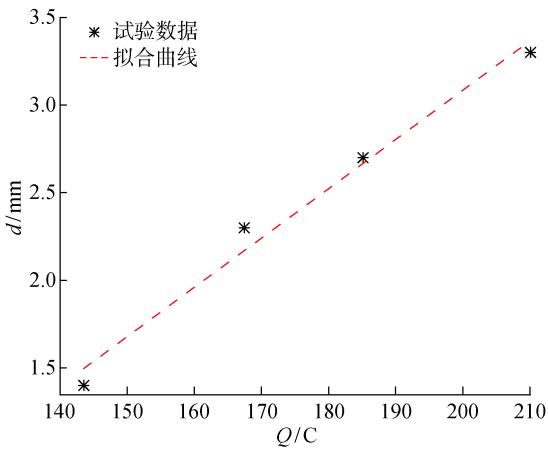


图 5 LCC 作用下的转移电荷量和损伤深度的关系
Fig.5 Charge transfer versus damage depth sub-
jected to LCC

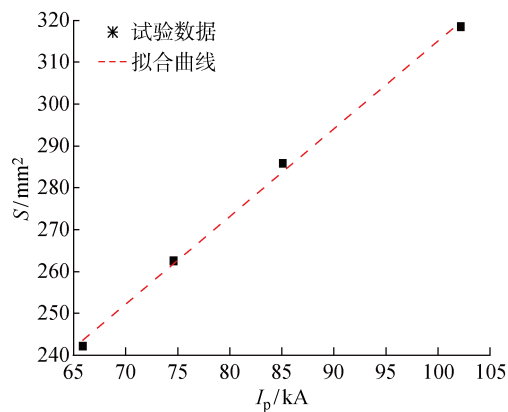


图 6 SSCC 作用下的电流幅值和损伤面积关系
Fig. 6 Current amplitude versus damage area sub-
jected to SSCC

参数拟合相关度较高,损伤深度与转移电荷量参数的拟合相关度较高.采用最小二乘拟合方法对铝 3003 材料的损伤面积、损伤深度与电流幅值和持续时间
的关系进行参数拟合,拟合参数见表 1 所示,拟合结果为

$$y = b + kI_p^{a_1}t^{a_2} \tag{7}$$

式中: y 为损伤深度或损伤面积; t 为时间; b 、 k 、 a_1 及 a_2 为拟合系数.

表 1 雷电流参数与损伤面积及损伤深度的拟合参数
Tab.1 Fitting parameters between current parameters, dam-
age area, and damage depth

参数	拟合系数			
	b	k	a_1	a_2
S/mm^2	-167.8	20.0	1	0
d/mm	0.26	0.012	1	1

2 金属遭受雷击的概率分析

以建筑物载体为算例,安装在建筑物系统等的金属材料遭受雷击的概率由建筑物自身的接闪概率决定,建筑物遭受雷电直击的年平均次数 N_D 主要取决于其所在区域的雷暴活动特征和建筑物系统的接闪特征,如地闪密度 N_G 、几何特征等.首先计算地闪密度、建筑物系统的截收面积 A_D 等数据,地闪密度由多年积累的基于地闪定位系统测量的地面落雷情况的统计分析可得,若此统计数据缺失,可依据下式进行计算:

$$N_G = 0.1T_d \tag{8}$$

式中: T_d 为年平均雷暴日.

关于截收面积的计算,对于处于平地上且附近无其它建筑物或树木,建筑物之间的截收面积没有

重叠的孤立建筑物或系统,截收面积是与建筑物上沿接触的斜率为 1/3 的直线沿建筑旋转一周在地面上投影出的面积.对于形状复杂的建筑物或系统,通常采用作图法计算 A_D .作图法中首先将复杂物体分解为如矩形等简单形状,然后计算分解后不同简单形状的截收面积,取合成后最大的截收面积作为建筑物整体的截收面积.依据建筑物的特征分析,在实例计算中可采用平行边长度方法修正建筑物的截收面积^[4],采用三维立体角度分析体积比例法来细化重叠比例^[16],以提高建筑物截收面积的计算精度.对于建筑物相对位置、建筑物围绕及暴露场所等因素的影响,可采用位置因子 C_D 来分析,不同建筑物的相对位置对应的位置因子如表 2 所示.

表 2 建筑物的位置因子
Tab.2 Location factor for the building

参数	非孤立对象		孤立对象	
	被更高对象包围	被相同高度或更矮对象包围	位于平原	位于小山顶或山丘
C_D	0.25	0.5	1	2

综上, N_D 可由下式计算:

$$N_D = N_G A_D C_D \times 10^{-6} \tag{9}$$

3 雷电流幅值和转移电荷量的分布分析

已有研究表明,金属材料遭受雷击的损伤面积主要取决于雷电流幅值,损伤深度主要取决于转移电荷量^[17].基于对雷电流参数长期的观测和数据积累,分析雷电流的幅值和转移电荷量分布.雷电流参数的概率分布服从高斯分布 (Gaussian Distribution),其概率密度函数 $P(x)$ 与随机变量 x 的关系式为^[8]

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}x\sigma_{\ln x}} \exp\left[-0.5\left(\frac{\ln x - \ln x_m}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right] \tag{10}$$

式中: $\sigma_{\ln x}$ 是 $\ln x$ 的标准偏差; x_m 为正态分布的中值.对式(10)进行积分运算,得其累积概率 $P_c(x)$:

$$P_c(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{u_0}^{\infty} e^{-u^2} du = 0.5 \operatorname{erfc} u_0 \tag{11}$$

令 $u = (\ln x - \ln x_m)/(\sqrt{2}\sigma_{\ln x})$, erfc 为互补误差函数, erf 是自变量为 x 的误差函数:

$$\operatorname{erfc} x = 1 - \operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{u_0}^{\infty} e^{-\eta^2} d\eta \tag{12}$$

根据文献[18]统计得到的雷电流参数如表 3、4 所示.其中: t_f 为电流上升时间, t_h 为电流半峰值时

间, S_m 为电流变化陡度. 由表 3 可知, 雷电流首次回击分量的电流幅值的中值为 31.1 kA, 标准差 $\sigma = 0.48$.

表 3 首次负极性回击电流的参数统计表

Tab. 3 Current parameter statistics of first negative return stroke

雷电流参数	样本数量	中值	标准差
I_p/kA	80	31.1	0.48
$t_f/\mu\text{s}$	80	3.83	0.55
$t_h/\mu\text{s}$	90	77.5	0.58
$S_m/(\text{kA} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	75	24.3	0.60

表 4 正极性雷电流参数的统计结果

Tab. 4 Current parameter statistics for positive return stroke

雷电流参数	样本数量	中值	标准差
I_p/kA	26	35	1.21
$t_f/\mu\text{s}$	19	22	1.23
$t_h/\mu\text{s}$	16	230	1.33
$S_m/(\text{kA} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	21	2.4	1.54

进一步分析两个雷电流参数 x 和 y 的联合概率分布, 其联合概率密度函数 $P(x, y)$ 为

$$P(x, y) = \frac{\exp\left[\frac{-0.5}{1-\rho_c^2}(f_1 - f_2 + f_3)\right]}{2\pi xy \sigma_{\ln x} \sigma_{\ln y} \sqrt{1-\rho_c^2}} \quad (13)$$

式中: ρ_c 为相关系数; y_m 为正态分布的中值.

$$f_1 = \left(\frac{\ln x - \ln x_m}{\sigma_{\ln x}}\right)^2$$
$$f_2 = 2\rho_c \left(\frac{\ln x - \ln x_m}{\sigma_{\ln x}}\right) \left(\frac{\ln y - \ln y_m}{\sigma_{\ln y}}\right)$$
$$f_3 = \left(\frac{\ln y - \ln y_m}{\sigma_{\ln y}}\right)^2$$

如果 (x, y) 是相对独立分布的, 即 $\rho_c = 0$, 则 $P(x, y) = P(x)P(y)$, 对于 $x \geq x_0$ 和 $y \geq y_0$ (x_0, y_0 为某一固定值) 的累计发生概率为

$$P_c(x \geq x_0, y \geq y_0) = 0.5\text{erfc } u_{x_0} \text{erfc } u_{y_0} \quad (14)$$

式中: $u_{x_0} = \frac{\ln x_0 - \ln x_m}{\sqrt{2}\sigma_{\ln x}}; u_{y_0} = \frac{\ln y_0 - \ln y_m}{\sqrt{2}\sigma_{\ln y}}$.

对于 $x < x_0$ 和 $y \geq y_0$ 的累积发生概率为 $P_c(x < x_0, y \geq y_0) = (1 - 0.5\text{erfc } u_{x_0}) \times (0.5\text{erfc } u_{y_0})$ (15)

对于给定 $x = x_0$ 的 y 的概率分布函数为

$$P(y | x = x_0) = \frac{P(x, y)}{P(x)} = \frac{\exp\left[-\frac{(\ln y - b')^2}{2\sigma^2}\right]}{y\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (16)$$

$$\text{式中: } b' = \ln y_m = \ln y_m + \rho_c \frac{\sigma_{\ln y}}{\sigma_{\ln x}} (\ln x_0 - \ln x_m) = (\ln y_m - \rho_c \frac{\sigma_{\ln y}}{\sigma_{\ln x}} \ln x_m) + \rho_c \frac{\sigma_{\ln y}}{\sigma_{\ln x}} \ln x_0 = \ln a + d' \ln x_0 = \ln ax_0^d; \sigma = \sigma_{\ln y} \sqrt{1-\rho_c^2}; \ln a = \left(\ln y_m - \rho_c \frac{\sigma_{\ln y}}{\sigma_{\ln x}} \times \ln x_m\right); d' = \rho_c \frac{\sigma_{\ln y}}{\sigma_{\ln x}}.$$

式(16)为 1 个新的正态分布, 中值为 y_m , 标准偏差为 $\sigma = \sigma_{\ln y} \sqrt{1-\rho_c^2}$.

对于雷电流参数, 其中值 y_m 关系统计如表 5 所示. 其中, Q_{flash} 为雷闪放电活动的总转移电荷量, Q_{imp} 为雷电回击电流放电过程中的转移电荷量, Q_{stroke} 为雷闪中一次放电过程的转移电荷量.

表 5 条件中位数的相关系数和参数 $y_m | x = ax^{d'}$

Tab. 5 Parameters of correlation coefficients $y_m | x = ax^{d'}$

条件	条件中位数	ρ_c	a	d	$\sigma_{\ln(y x)}$
首次负极性回击电流分量	$t_f I_p/\mu\text{s}$	0.47	0.61	0.54	0.49
	$I_p t_f/\text{kA}$	0.47	17.86	0.41	0.43
	$S_m I_p/(\text{kA} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	0.38	4.81	0.47	0.56
	$I_p S_m/\text{kA}$	0.38	11.71	0.31	0.45
	$Q_{\text{flash}} I_p/\text{C}$	0.54	0.15	1.14	0.86
	$I_p Q_{\text{flash}}/\text{kA}$	0.54	18.57	0.26	0.41
	$Q_{\text{imp}} I_p/\text{C}$	0.77	3.20	1.48	0.59
	$I_p Q_{\text{imp}}/\text{kA}$	0.77	16.07	0.40	0.31
	$S_m I_p/(\text{kA} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	0.11	25.62	0.18	0.84
	$I_p S_m/\text{kA}$	0.11	9.55	0.069	0.53
后续负极性回击电流分量	$Q_{\text{stroke}} I_p/\text{C}$	0.43	0.11	1.01	1.13
	$I_p Q_{\text{stroke}}/\text{kA}$	0.43	11.57	0.18	0.48
	$t_f I_p/\mu\text{s}$	0.07	17.08	0.071	1.23
	$I_p t_f/\text{kA}$	0.07	28.29	0.069	1.21
	$S_m I_p/(\text{kA} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	0.49	0.26	0.62	1.34
	$I_p S_m/\text{kA}$	0.49	24.99	0.39	1.05
	$Q_{\text{flash}} I_p/\text{C}$	0.62	15.53	0.46	0.71
正极性雷击	$I_p Q_{\text{flash}}/\text{kA}$	0.62	0.91	0.83	0.95

因此, y 从 y_0 到 ∞ 的累计概率分布为 $P_c(x = x_0 | y \geq y_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{u_0}^{\infty} e^{-u^2} du = 0.5\text{erfc } u_0$ (17)

式中: $u = \sqrt{2}\sigma(\ln y - b'); u_0 = \sqrt{2}\sigma(\ln y_0 - b')$.

对于 $x_1 < x < x_2$ 且 $y \geq y_0$ 的概率分布为 $P_c(x_1 < x < x_2 | y \geq y_0) = \frac{\int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_0}^{\infty} P(x, y) dy}{\int_{x_1}^{x_2} P(x) dx} =$

$$\frac{\sum_{x_1}^{x_2} \Delta x \sum_{y_0}^{\infty} P(x, y) \Delta y}{0.5(\operatorname{erf} u_{x_2} - \operatorname{erf} u_{x_1})} \quad (18)$$

式中: Δx 、 Δy 为离散计算步长.

$$u_{x_1} = (\ln x_1 - \ln x_m) / (\sqrt{2} \sigma_{\ln x})$$

$$u_{x_2} = (\ln x_2 - \ln x_m) / (\sqrt{2} \sigma_{\ln x})$$

因此,金属材料年平均遭受雷电流幅值为 I_p 的雷击次数 N_{DI} ,遭受转移电荷量为 Q_p 的雷击次数 N_{DQ} ,遭受雷电流幅值为 I_p 且转移电荷量为 Q_p 的雷击次数 $N_c(I > I_p, Q > Q_p)$ 的计算式为

$$N_{DI} = N_D P_I \quad (19)$$

$$N_{DQ} = N_D P_Q \quad (20)$$

$$N_c(I > I_p, Q > Q_p) =$$

$$N_D \frac{\exp\left[\frac{-0.5}{1-\rho_c^2}(f_1 - f_2 + f_3)\right]}{2\pi x y \sigma_{\ln I} \sigma_{\ln Q} \sqrt{1-\rho_c^2}} \quad (21)$$

式中:

$$f_1 = \left(\frac{\ln I - \ln I_p}{\sigma_{\ln I}}\right)^2$$

$$f_2 = 2\rho_c \left(\frac{\ln I - \ln I_p}{\sigma_{\ln I}}\right) \left(\frac{\ln Q - \ln Q_p}{\sigma_{\ln Q}}\right)$$

$$f_3 = \left(\frac{\ln Q - \ln Q_p}{\sigma_{\ln Q}}\right)^2$$

综上,得到金属材料年平均遭受雷电流幅值为 I_p ($I > I_p$) 造成的 S 和 d 可用 yN_{DI} 计算;年平均遭受转移电荷量为 Q_p ($Q > Q_p$) 造成的 S 和 d 可用 yN_{DQ} 计算;年平均遭受雷电流幅值为 I_p 且转移电荷量为 Q_p ($I > I_p, Q > Q_p$) 造成的 S 和 d 可用 yN_c 计算.

4 结论

以常用金属材料铝 3003 合金为例,分析了雷电流参数和金属损伤特征的相关关系,依据落雷密度、雷电截收面积等数据分析,计算了以建筑物为算例的遭雷电直击年平均次数,得到如下结论:

(1) 短时间首次回击电流分量和短持续时间后续回击电流分量作用下铝 3003 合金材料的损伤深度均小于 0.1 mm,可忽略不计.

(2) 铝 3003 合金材料的损伤面积与所遭受的雷电流幅值成正比,合金的损伤深度与雷电流的转移电荷量成正比.

(3) 以建筑物为算例,建立了考虑雷电流幅值和转移电荷量的联合概率分布下金属材料遭受雷击时损伤参数的估算方法,为金属材料的雷击损伤特性评估和尺寸选择提供参考.

参考文献:

- [1] 陈家宏,冯万兴,王海涛,等. 雷电参数统计方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 6-10.
CHEN Jiahong, FENG Wanxing, WANG Haitao, *et al.* Statistical method of lightning parameters[J]. **High Voltage Engineering**, 2007, 33(10): 6-10.
- [2] LIU Y, DAI M, GUHA A, *et al.* Damage characteristics and microstructure response of steel alloy Q235B subjected to simulated lightning currents[J]. **IEEE Access**, 2019, 8(7): 9258-9264.
- [3] 刘亚坤,夏海亮,何雨微,等. 雷击时金属油罐的损伤与温升特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1578-1585.
LIU Yakun, XIA Hailiang, HE Yuwei, *et al.* Ablation damage and temperature rise of metal oil tanks struck by direct lightning[J]. **High Voltage Engineering**, 2016, 42(5): 1578-1585.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑物防雷设计规范:GB 50057-2010[S]. 北京:中国计划出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for protection of structures against lightning: GB 50057-2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [5] 夏海亮,刘亚坤,刘全桢,等. 长持续时间雷电流分量作用下电极形状对金属烧蚀特性的影响[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(8): 903-908.
XIA Hailiang, LIU Yakun, LIU Quanzhen, *et al.* Metal ablation affected by electrode shapes under long continuing lightning current[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2017, 51(8): 903-908.
- [6] 李瑞芳,吴广宁,曹晓斌,等. 雷电流幅值概率计算公式[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 161-167.
LI Ruifang, WU Guangning, CAO Xiaobin, *et al.* Formula for probability of lightning current amplitude[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2011, 26(4): 161-167.
- [7] 黄晓虹,周歧斌,杜亚平. 分析带金属板结构的建筑物内部雷电磁脉冲磁场分布的等效电路法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(7): 1112-1116.
HUANG Xiaohong, ZHOU Qibin, DU Yaping. An equivalent circuit method for computing lightning-induced magnetic fields in structures with metallic plates[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2012, 46(7): 1112-1116.
- [8] RAKOV V A, UMAN M A. Lightning physics and effects [M]. New York: Cambridge University Press, 2003.

- [9] COORAY V. The lightning flash[M]. IET Digital Library, 2013.
- [10] LIU Y K, FU Z C, GAO X, *et al.* Damage characteristics and response of Al alloy 3003 to different components of simulated lightning currents[J]. **IEEE Access**, 2018, 6: 1277-1283.
- [11] HE J L, RAKOV V, WANG D H, *et al.* Lightning physics and effects[J]. **Atmospheric Research**, 2013, 129: 33-34.
- [12] LIU Y K, FU Z C, LIU Q Z, *et al.* Numerical inversion analysis on front-face temperature rise of Al alloy suffered from long continuing current in lightning[J]. **IET Science Measurement & Technology**, 2018, 12(4): 467-471.
- [13] CLIFFORD D W, CROUCH K E, SCHULTE E H. Lightning simulation and testing[J]. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 1982, 24(2): 209-224.
- [14] International Electrotechnical Commission. Protection against lightning Part 3: Physical damage to structures and life hazard[S]. Geneva: IEC, Geneva, 2010.
- [15] SUN J R, YAO X L, XU W J, *et al.* Lightning test method for optical-fiber overhead ground wires[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2018, 33(5): 2412-2419.
- [16] 高磊, 凌晨. 关于建筑物等效截收面积计算的若干问题探讨[J]. **气象科技**, 2014, 42(6): 1126-1130.
GAO Lei, LING Chen. Problems encountered in calculating equivalent collection areas of structures[J]. **Meteorological Science and Technology**, 2014, 42(6): 1126-1130.
- [17] LIU Y K, FU Z C, LIU Q Z, *et al.* Experimental and analytical investigation on metal damage suffered from simulated lightning currents[J]. **Plasma Science & Technology**, 2017, 19(12): 125301-125310.
- [18] RAKOV V A, BORGHETTI A, BOUQUEGNEAU C, *et al.* CIGRE technical brochure on lightning parameters for engineering applications[C] // **2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)**. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 373-377.

(本文编辑:陈晓燕)