

光谱法研究闪电回击放电通道的电阻及电流的热效应

王雪娟¹, 袁萍^{2*}, 张其林¹

1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044
2. 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃省原子分子物理与功能材料重点实验室, 甘肃 兰州 730070

摘要 闪电放电通道的电阻及电流产生的热效应对雷电灾害研究以及防护设计都具有重要意义, 放电通道的热力学特性与其等离子体辐射光谱密切相关。利用无狭缝摄谱仪获得的两次云对地多回击闪电放电的等离子体辐射光谱, 依据谱线波长、强度等信息, 结合同步地面电场变化资料, 应用空气等离子体传输理论, 计算了闪电回击放电通道的电导率、峰值电流、核心通道半径, 进而得到了闪电回击等离子体通道单位长度的电阻、峰值电流时的热功率及在回击初始前 $5 \mu\text{s}$ 内通道储存的热能。并与常规金属导体进行比较, 分析了闪电回击放电在峰值电流时等离子体通道的热功率与电阻、电流平方之间的相关性关系。结果表明: 利用光谱研究得到的闪电放电通道的电阻为 $0.04 \sim 8.41 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ 、峰值电流时的热功率为 $0.88 \times 10^8 \sim 2.20 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 、回击初始前 $5 \mu\text{s}$ 内通道储存的热能为 $1.47 \times 10^2 \sim 3.66 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$, 以上结果与文献报道的利用其他方法得到的结果相比, 在合理的范围内; 与常规金属导体相比, 闪电回击放电等离子体通道在峰值电流时的热功率与电阻成正比, 但与电流的平方呈指数减小的关系; 由于闪电等离子体通道的电阻与温度的 $3/2$ 次方成反比, 通常回击放电通道中峰值电流越大, 通道温度越高, 而电阻会迅速降低, 因此热功率也会急剧减小。此结论进一步验证了采用欧姆加热方法加热等离子体的致命缺点。

关键词 闪电回击通道, 电阻, 热功率, 热能

中图分类号: O536

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3718-06

引言

闪电回击放电产生的瞬时大峰值电流、高功率、以及强焦耳热等物理效应是许多雷击灾害的主要根源。在雷电物理研究和防护设计领域, 回击通道的峰值功率和储存的能量是其关注的两个重要参数。研究回击过程的峰值功率对探讨通道的能量传输和放电过程的物理机制, 优化防雷设备设计等具有重要意义, 目前只有少数研究者报道了闪电回击通道的峰值电功率^[1-2]、光功率和电磁辐射功率^[3], 但对热功率的报道非常少, 尤其是利用实验还没有对闪电放电通道热功率的报道。另外, 回击通道储存的能量在估算闪电所产生氮氧化物的数量和测试已提出的雷暴发生机制等方面具有重要作用。目前利用实验对闪电回击通道内储存热能的报道也非常少, 尽管有许多工作依据各种理论模型报道了闪电回击

过程中储存的总能量值, 但这些研究工作所估算的总能量值相差一到两个数量级^[2]。闪电通道内的电阻是表现闪电电学特性的一个重要参数, 现有的工作大多是根据电磁学模型得到的纯理论研究^[5], 依据实验研究此参数的工作也较少。闪电通道的热力学特性与其等离子体的辐射光谱密切相关, 迄今为止, 利用光谱研究闪电放电通道内电阻、热功率和热量的工作几乎没有。

利用两次多回击闪电光谱, 结合同步电场变化资料, 计算了两次闪电回击放电等离子体通道的电导率、峰值电流、核心通道半径, 且得到了通道单位长度的电阻、峰值电流时的热功率及在回击前 $5 \mu\text{s}$ 内通道储存的热能。并与常规金属导体比较, 分析了闪电放电等离子体通道在峰值电流时热功率与电阻、电流的关系。为雷电防护工作和微观物理过程的研究提供了一定理论依据和参考。

收稿日期: 2019-06-27, **修订日期:** 2019-10-08

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20180805), 南京信息工程大学人才启动基金项目(2017r065), 国家重点研发计划项目(2017YFC1501505), 国家自然科学基金项目(41675006)资助

作者简介: 王雪娟, 女, 1988年生, 南京信息工程大学大气物理学院讲师 e-mail: wxj@nuist.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: yuanp@nwnu.edu.cn

1 理论方法

1.1 闪电放电通道的电导率

电导率是描述等离子体输运特性的重要参数之一，在 LTE 条件下，闪电放电通道的电导率为

$$\sigma = 3n_e^2 e^2 \sqrt{\frac{\pi}{2m_e kT}} \left| \begin{matrix} q^{11} & q^{12} \\ q^{21} & q^{22} \end{matrix} \right| \left[\begin{matrix} q^{00} & q^{01} & q^{02} \\ q^{10} & q^{11} & q^{12} \\ q^{20} & q^{21} & q^{22} \end{matrix} \right]^{-1} \quad (1)$$

其中， n_e 为电子密度， e 为电子电量， m_e 为电子质量， k 为玻尔兹曼常数， T 为通道温度， q^{mp} 元由通道内的粒子数密度、电子密度以及碰撞积分决定。

1.2 核心通道半径和电阻

闪电放电通道由中间直径为厘米量级的核心通道和周围直径为 1~10 m 的电晕层通道两部分组成，通道的纵向电流主要承载在核心通道内^[6]。依据闪电电动力学模型，电流核心通道的半径为^[7]

$$r = \lambda_q \left[\frac{1}{2} + \lg \left(\frac{E_{\text{break}}}{E_{\text{cloud}}} \right) \right]^{1/2} (\pi n_{\text{atomic}})^{-1/2} \times \left[(1+f) \frac{3}{2} kT + \frac{1}{2} \tau_{\text{disso}} + f\tau_{\text{ioniz}} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

式中， λ_q 为线电荷密度，由半经验公式 $\lambda_q = (i/10.6)^{10/7} / L$ 计算得到， $E_{\text{break}} = 2.0 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 为空气击穿电场， $E_{\text{cloud}} = 5.0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 为雷暴云背景电场， n_{atomic} 为原子数密度， $f = 0.97$ 为通道电离度， $k = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg} \cdot \text{K}^{-1}$ 为玻尔兹曼常量， $\tau_{\text{disso}} = 1.57 \times 10^{-11} \text{ erg}$ 为 N_2 的分子离解能， $\tau_{\text{ioniz}} = 2.33 \times 10^{-11} \text{ erg}$ 为 N I 的第一电离能。

由电导率 σ 和核心通道半径可得到等离子体通道单位长度的电阻 R 为

$$R = \frac{1}{\sigma \pi r^2} \quad (3)$$

1.3 峰值电流

依据传输线模型，闪电核心通道的峰值电流与地面电场之间的关系为^[5]

$$i = \frac{2\pi\epsilon_0 c^2 D}{v} E \quad (4)$$

其中， ϵ_0 为真空介电常数， c 为光速， D 为水平观测距离， E 为初始峰值电场， v 为回击电流在地面附近沿通道传播的速度。

1.4 热功率

由单位长度的电阻 R 和电流 i 可以得到通道内的热功率 P 为

$$P = i^2 R \quad (5)$$

2 结果与讨论

图 1(a)和(b)给出了闪电 A 和 B 的原始光谱，R1 表示第一次回击，R2—R6 表示继后回击，光谱范围为 400~1 000 nm^[7]，分辨率约为 1.1 nm。由电场变化可知闪电 A 有 6 个回击，闪电 B 有 4 个回击。并由光声差得到这两次闪电的发生距离为 7.14 和 9.86 km。为了定量分析，取通道上光谱分辨率较好的位置，将其转化为用谱线相对强度和波长表示的谱线图，如图 2(a)和(b)所示，图中各回击按发生次序和时间间隔排列。

从图 1 和图 2 看出，同一闪电的不同回击放电，辐射光谱轮廓和谱线成分基本一致，但谱线相对强度有明显不同，这反映了各回击放电强弱不同。不同闪电的回击，谱线轮廓稍有差异，在可见波长范围内(400~700 nm)，除了一条氢原子线外，光谱线都主要来自激发能较高的单电离的 N II 辐射，在近红外波长范围内(700~900 nm)，光谱线主要来自激发能较低的中性 N I 和 O I 辐射。依据谱线相对强度等信息，用多谱线法^[1, 8]计算得到回击通道温度，并利用 Saha 方程^[1]计算得到电子密度，进一步利用式(1)计算得到各回击通道的电导率。

图 3 是闪电 A 和 B 引起的地面快电场变化，可以看出在闪电 A 中，R1 和 R5 放电引起的地面电场变化幅度最大，相应的光谱总强度和离子线总强度也最强，如图 1(a)和图 2(a)所示。对于闪电 B，电场变化幅度较强的回击 R1 和 R3，

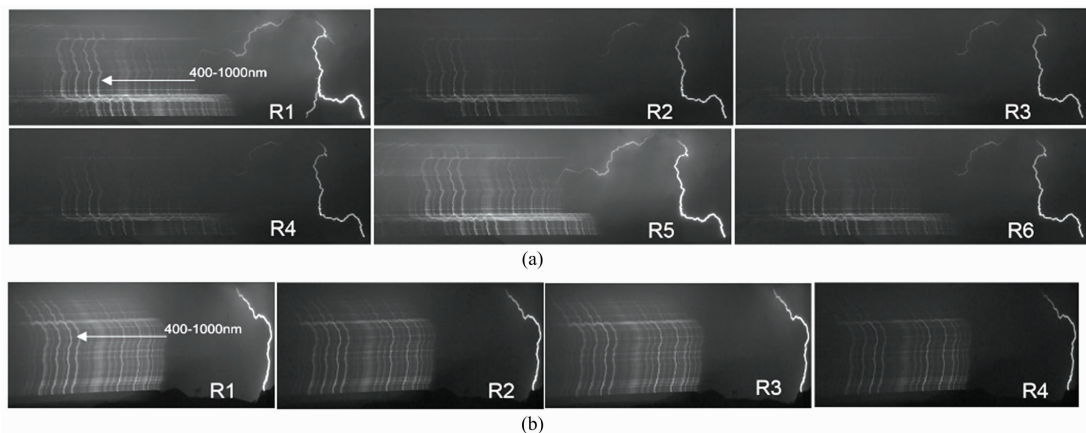


图 1 原始光谱

(a): 闪电 A 的 6 次回击; (b): 闪电 B 的 4 次回击

Fig. 1 The original spectra

(a): The six return strokes of lightning A; (b): The four return strokes of lightning B

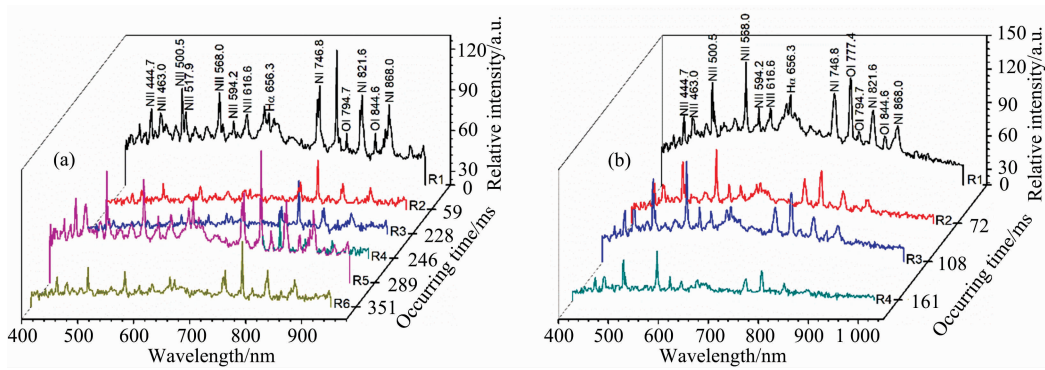


图 2 通道某一位置处的光谱图

(a): 闪电 A 的 6 次回击; (b): 闪电 B 的 4 次回击

Fig. 2 The spectra at a given height

(a): The six return strokes of lightning A; (b): The four return strokes of lightning B

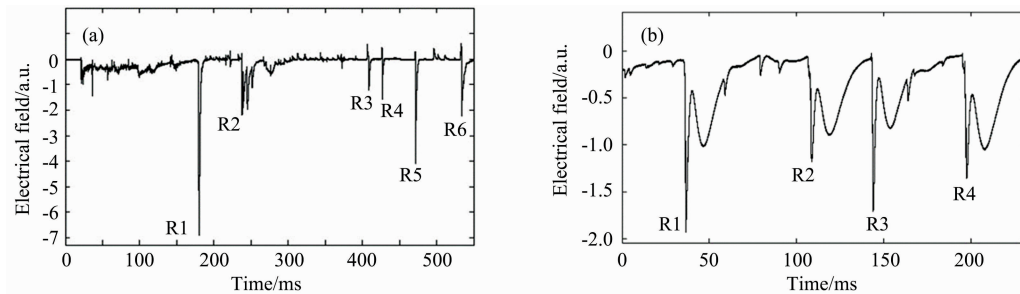


图 3 闪电 A(a), B(b)引起的地面快电场变化波形

Fig. 3 The waveforms of electric field change recorded by fast antenna for lightning A (a) and B (b)

其相应的离子线总强度和光谱总强度也较强,如图 3(b),图 1(b)和图 2(b)所示。

利用电场变化的初始峰值,取回击速度 $v=c/2^{[8]}$,由式(4)得到放电通道的峰值电流。由峰值电流和通道长度,依据式(2)得到电流核心通道的半径。其中,闪电 A 和 B 回击通道长度约为 1.91 和 2.01 km。由电导率和核心通道半径,

依据式(3)可得到通道单位长度的电阻。由电阻和峰值电流,利用式(5)得到热功率。表 1 列出了这两次闪电各回击放电通道的物理特性参数,其中, σ 为电导率, E 为归一化到 100 km 处的初始峰值电场, i 为峰值电流, r 为核心通道半径, R 为通道单位长度的电阻, P 为峰值电流时通道单位长度的热功率。

表 1 闪电 A 和 B 各回击通道的物理特性参数

Table 1 The calculated parameters of each return stroke for lightning A and B

闪电	回击	$\sigma/$ ($10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$)	$E/$ ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)	$i/$ kA	$r/$ cm	$R/$ ($\Omega \cdot \text{m}^{-1}$)	$P/$ ($10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$)	$W/$ ($10^2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$)
A	R1	2.12	4.74	15.81	0.65	0.36	0.89	1.49
	R2	2.09	2.77	9.22	0.30	1.69	1.44	2.40
	R3	2.24	1.53	5.11	0.13	8.41	2.20	3.66
	R4	2.17	2.00	6.66	0.19	4.07	1.80	3.01
	R5	1.96	5.18	17.29	0.74	0.30	0.88	1.48
	R6	2.01	2.95	9.84	0.33	1.45	1.40	2.35
B	R1	2.37	13.78	45.9	1.79	0.04	0.88	1.47
	R2	2.20	9.96	33.2	1.13	0.11	1.25	2.08
	R3	2.28	10.94	36.47	1.29	0.08	1.12	1.86
	R4	2.19	8.82	29.4	0.95	0.16	1.39	2.32

表 1 中两次闪电各回击放电通道的电导率在 $1.96 \times 10^4 \sim 2.37 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 之间,归一化到 100 km 的初始峰值电

场在 $1.53 \sim 13.78 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 之间,峰值电流在 $5.11 \sim 45.9 \text{ kA}$ 之间,这些结果均在文献报道的范围内^[4, 6-8]。且这两次闪电

各回击电流核心通道半径在 0.13~1.79 cm 之间。Jayakumar 等^[2]计算了人工触发闪电回击在峰值功率时,通道的电流核心通道半径为 0.10~0.69 cm。Rakov^[9]利用有损耗传输线方法估算的回击峰值前后电流通道半径分别为 0.3 和 3 cm。

Jayakumar 等^[2]报道的人工触发闪电在峰值功率时,通道单位长度的电阻为 0.67~31 Ω·m⁻¹。Rakov^[9]估算的回击峰值前后通道单位长度的电阻分别为 3.5 和 0.035 Ω·m⁻¹。表 1 中利用光谱得到的这两次闪电各回击放电通道单位长度的电阻在 0.04~8.41 Ω·m⁻¹ 之间,结果在合理的范围内。

表 1 中给出的各回击放电通道在峰值电流时通道单位长度的热功率为 0.88×10⁸~2.20×10⁸ W·m⁻¹。Paras 和 Rai^[10]假设闪电通道中回击峰值电流为 20 kA 时,理论估算的峰值热功率在 10¹⁰ W 数量级。实验方面目前没有关于闪电回击通道热功率的研究报道。Kridler 等^[1]估算了一次自然闪电首次回击的峰值电功率为 7.8×10⁸ W·m⁻¹。Jayakumar 等^[2]得到的人工触发闪电过程峰值电功率为 2.2×10⁸~25.1×10⁸ W·m⁻¹。Jayakumar 等^[2]报道了一次人工触发闪电回击初始前 1.4 μs 内通道电流和电功率的变化波形,发现回击通道内电功率从零上升到峰值的时间小于相应电流从零上升到峰值的时间。也就是说,通道电流在峰值时刻对应的电功率要小于电功率的峰值。由于在闪电过程中电功率和热功率一样,都可以看作是回击过程中通道的输入功率^[2]。因此,表 1 中峰值电流时的热功率略微小于文献报道的峰值电功率是合理的。

依据闪电气体动力学模型,闪电回击电流在最初前 5 μs 内由零线性增加到峰值,之后在几十微秒内指数衰减^[4]。因此,假设闪电 A 和 B 各回击通道的电流在回击前 5 μs 内是由零线性变化到峰值,进而在 5 μs 内对热功率进行积分,便可得到各回击在前 5 μs 内通道单位长度储存的热能 W,计算结果在表 1 中给出。表 1 中闪电 A 和 B 各回击放电在前 5 μs 内储存的单位长度的热能在 1.47×10²~3.66×10² J·m⁻¹ 之间。Paras 和 Rai^[10]估算了在回击峰值电流为 20 kA 时,通道储存的总热能数量级为 10⁶ J。利用气体动力学模型^[11],回击通道单位长度的总能量数量级为 10³ J·m⁻¹。依据电学模型^[7],回击通道单位长度储存的总能量为 2×10²~1×10⁴ J·m⁻¹。Jayakumar 等^[2]估算的人工触发闪电回击过程在前 50 μs 左右输入的平均能量在 10³~1×10⁴ J·m⁻¹ 之间。Kridler 等^[1]报道的一次单回击自然闪电的通道平均输入能量为 2.3×10⁵ J·m⁻¹。Uman^[12]得到的闪电通道能量范围为 10⁵~10⁶ J·m⁻¹。由以上可以看出,Kridler 等^[1]和 Uman^[12]报道的结果明显大于其他研究报道的结果,这是因为他们报道的能量值可能包括梯级先导和回击两个过程的能量,所以不能将他们的结果直接与单独回击过程的能量值进行比较^[4]。

图 4 给出了这两次闪电各回击放电在峰值电流时通道的热功率与电阻随回击发生时间的变化关系。可以看出:在峰值电流时同一闪电的不同回击放电通道内的热功率与电阻正相关。这说明闪电等离子体通道的热功率随电阻的变化特性与通常金属导体的变化规律一致。

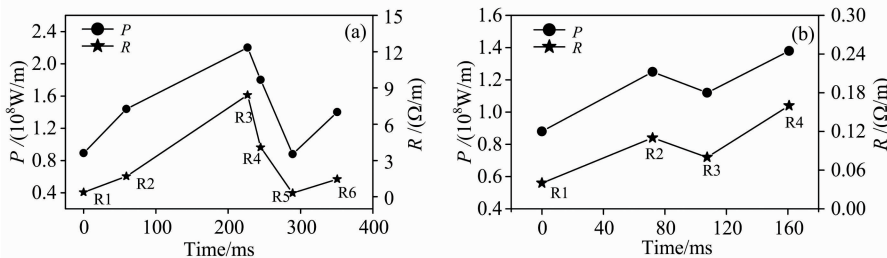


图 4 闪电 A 和 B 各回击通道在峰值电流时热功率与电阻随回击发生时间的变化
Fig. 4 Relationship between the thermal power per unit length at the time of peak current and resistance per unit length for lightning A and B

图 5 给出了这两次闪电各回击放电通道在峰值电流时热功率与电流平方的变化关系,可以看出:同一闪电其回击放电通道内峰值电流越大,相应热功率越小,且热功率随电流的平方指数减小。这与常规金属导体的性质不同。Jayakumar 等^[2]观测到人工触发闪电峰值电功率也随峰值电流的增大而减小。

结合式(1)~式(3)可知,闪电等离子体通道的电阻与温度的 3/2 次方成反比^[13]。随着等离子体温度的增加,电离度增大,通道电阻将迅速降低。于是对于高温、高电离或完全电离的等离子体,等离子体几乎就是“理想导体”,其电阻可以忽略不计^[13]。通常回击通道中峰值电流越大,通道温度就会越高。如闪电 A 中回击 R1 和 R5 峰值电流最大,它们通道

的温度也最高,所以通道电阻最小,只有 0.36 和 0.30 Ω·m⁻¹,闪电 B 中回击 R1 和 R3 同理。回击通道的电阻随温度的升高而降低,此结论进一步验证了采用欧姆加热方法加热等离子体的致命缺点。欧姆加热时电流通过等离子体,由于欧姆耗散将能量传递给等离子体,它的加热效率为 I²R。当等离子体温度较高时,电阻将趋于零,这时欧姆加热方法失效^[13],所以回击放电峰值电流时的热功率随峰值电流的增大而急剧减小。

3 结 论

依据闪电等离子体光谱信息和同步地面电场变化资料计

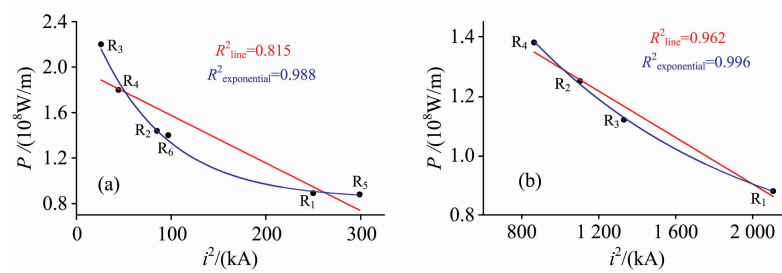


图 5 闪电 A 和 B 各回击通道在峰值电流时热功率与峰值电流平方的变化关系

R_{line}^2 和 $R_{\text{exponential}}^2$ 分别表示线性拟合与指数拟合的相关性系数

Fig. 5 Relationship between the thermal power per unit length and the peak current for lightning A and B

R_{line}^2 and $R_{\text{exponential}}^2$ are R-square values for linear and exponential fits

算的两次闪电各回击放电通道单位长度的电导率为 $1.96 \times 10^4 \sim 2.37 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, 峰值电流为 $5.11 \sim 45.9 \text{ kA}$, 电流核心通道半径为 $0.13 \sim 1.79 \text{ cm}$, 电阻为 $0.04 \sim 8.41 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$, 峰值电流时的热功率为 $0.88 \times 10^8 \sim 2.20 \times 10^8 \text{ W} \cdot$

m^{-1} , 回击初始前 $5 \mu\text{s}$ 内通道单位长度储存的热能为 $1.47 \times 10^2 \sim 3.66 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$ 。并且与常规金属导体相比, 闪电放电通道内峰值电流时的热功率与电阻呈正比, 而与电流的平方呈指数减小的关系。

References

- [1] Krider E P, Dawson G A, Uman M A. J. Geophys. Res., 1968, 73: 3335.
- [2] Jayakumar V, Rakov V A, Miki M, et al. Geophys. Res. Lett., 2006, 33: L05702.
- [3] Quick M G, Krider E P, J. Geophys. Res., 2013, 118: 1868.
- [4] Rokov V A, Uman M A. Lightning: Physics and Effects. New York: Cambridge Univ Press, 2003.
- [5] Pavlovic D, Cvetic J, Herdler F, et al. Electr. Pow. Syst. Res., 2014, 113: 30.
- [6] QIE Xiu-shu, ZHANG Qi-lin, YUAN Tie, et al(鄒秀书, 张其林, 袁铁, 等). Thunder Physics (雷电物理学). Beijing: Science Press (北京: 科学出版社), 2013. 75.
- [7] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, et al. Phys. Plasmas, 2014, 21: 033503.
- [8] Mallick S, Rakov V A, Tsalikis D, et al. Atmos. Res., 2014, 135-136: 306.
- [9] Rakov V A. J. Geophys. Res., 1998, 103: 1879.
- [10] Paras M K, Rai J, Res. J. Recent Sci., 2012, 1(9): 36.
- [11] Dubovoy E I, Mihailov M S, Ogonkov A L, et al. J. Geophys. Res., 1995, 100(D1): 1497.
- [12] Uman M A. The Lightning Discharge. New York: Elsevier, 1987. 377.
- [13] LI Ding, CHEN Yin-hua, MA Jin-xiu, et al(李定, 陈银华, 马锦秀, 等). Physics of Plasma(等离子体物理学). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2006. 150.

Study on the Resistance and Thermal Effects of Current in Lightning Return Stroke Channel by Spectroscopy

WANG Xue-juan¹, YUAN Ping^{2*}, ZHANG Qi-lin¹

1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
2. Key Laboratory of Atomic and Molecular Physics & Functional Materials of Gansu Province, College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract The resistance and the thermal effects of current in lightning discharge channel are important to the lightning disaster research and prevention design, and the thermal characteristics of lightning channel are closely related to the spectra of the plasma. In this work, using the spectra of two cloud-to-ground lightning with multiple return strokes obtained by a slit-less spectrograph, and combining with the synchronous electrical information, the electrical conductivity, the peak values of current, the arc channel radius has been calculated, then the resistance per unit length, the thermal power per unit length at the instant of peak current, and the heat energy per unit length during the first 5 μs in the channel are firstly obtained. Meanwhile, compared to the common metal conductors, the relationships between the thermal power and the resistance and the square of the peak current in lightning plasma channel are analyzed. The results shown that the resistances per unit length are estimated by spectra to be $0.04 \sim 8.41 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$. The thermal peak powers per unit length are in the range of $0.88 \times 10^8 \sim 2.20 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ and the heat energies over the initial 5 μs are in the range of $1.47 \times 10^2 \sim 3.66 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$. The values of these parameters are consistent with the values reported in other works; The thermal power at time of peak current increases linearly with the resistance but reduces exponentially with the square of the peak current; Because the resistance in lightning channel is inverse ratio to $2/3$ power of the temperature, the stronger peak currents are generally corresponding to the higher temperatures, but the resistance and the thermal power will decrease rapidly with the temperature, which further proves why the plasma cannot be heated by the ohmic heating method.

Keywords Channel of lightning return stroke; Resistance; Thermal power; Heat energy

(Received Jun. 27, 2019; accepted Oct. 8, 2019)

* Corresponding author