

闪电消散过程等离子体温度衰减规律的理论研究*

赵学燕 袁萍† 王杰 申晓志 郭逸潇 乔红贞

(西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

(2008 年 5 月 5 日收到, 2008 年 8 月 26 日收到修改稿)

利用流体运动方程、连续性方程和能量守恒方程, 对自然闪电回击后的消散过程建立数学模型, 计算了等离子体温度随时间和空间的变化规律. 结果分析表明: 在相同的通道半径处, 前期温度随时间衰减较快, 后期较慢, 并且, 初始温度越高, 衰减越快. 随着半径的增大, 温度的衰减幅度逐渐减小. 同一时刻, 半径小的位置温度梯度较小, 半径大的位置温度梯度较大. 由衰减到 NO 冻结温度的时间和位置, 初步推断氮氧化物 (NO_x) 生成主要在闪电冲击波之后 50 ms 内、半径 $R = 9$ mm 的等离子体通道内.

关键词: 闪电消散过程, 等离子体, 温度

PACC: 5000, 3120, 4710

1. 引言

闪电回击通道内电流高达几十千安甚至上百千安, 温度高达两万 K 以上, 并且高度电离, 是典型的等离子体通道^[1,2]. 温度是反映等离子体特性的基本参数. 闪电过程中伴随的各种化学反应、臭氧 (O_3) 和氮氧化物 (NO_x) 的产生数量及速度、放电过程的电流强度、磁场变化、发光效应、大气散射效应等都与等离子体温度密切相关^[3-6]. 氮氧化物 (NO_x) 对大气中痕量气体的分布具有重要作用, 它的浓度分布决定臭氧 (O_3) 和氢氧根 (OH^-) 的增减, 对大气环境和全球气候有直接的影响^[7]. 目前, 闪电产生氮氧化物 (LNO_x) 的机理仍不很清楚, 对其主要传输过程的认识也还存在很多争议. 闪电过程伴随的化学反应与等离子体温度密切相关, 氮氧化物的合成一般发生在闪电放电之后的消散阶段, 所以研究这一过程等离子体温度的衰减规律, 将为进一步研究闪电产生氮氧化物 (LNO_x) 的机理和有关理论计算奠定基础.

依据光谱信息是目前获取闪电回击通道等离子体温度的最有效途径之一, 早在 20 世纪 60 年代, Orville 等人^[8]以无狭缝光谱仪获得的闪电回击过程的光谱为依据, 得到通道等离子体的峰值温度一般在 28000—31000 K 之间, 在 J 过程之前的回击末期,

通道温度最低, 为 14000 K. Uman 等人^[9]研究了在通道电流中止后等离子体温度随时间的衰减情况. 早期的工作由于计算条件的限制, 没有进行数值求解. 闪电消散阶段通道已没有发光, 因此, 无法通过观测光谱信息得到温度. 迄今为止, 也没有其他的观测手段研究这一阶段等离子体温度的报道, 因此, 现有的资料远远不能满足这方面研究工作的需要.

本工作利用流体运动方程、连续性方程和能量守恒方程, 对闪电回击后的消散过程建立数学模型, 进行了数值求解, 从理论上研究了冲击波之后 50 ms 内, 闪电通道等离子体温度随时间和空间的变化规律. 讨论了不同位置处等离子体温度衰减到一氧化氮 (NO) 冻结温度所需要的时间, 为进一步研究闪电伴随的多种效应及闪电产生氮氧化物 (LNO_x) 的有关理论估算提供了参考数据.

2. 数学模型

2.1. 基本假设

闪电回击通道的等离子体温度可以通过光谱信息得到, 在回击过程的前 10 μs 内温度最高^[8], 一般可达到 30000 K 左右^[10,11], 回击通道内的峰值压强达到 30—50 atm ($1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)^[12]. 由于

* 国家自然科学基金(批准号: 40475007), 西北师范大学科技创新工程项目(批准号: NWNU-KJCXGC-03-21)资助的课题.

† E-mail: yuanyanp@nwnu.edu.cn

高温高压,使等离子体通道迅速膨胀,并伴有冲击波.随后,等离子体通道开始冷却.Uman 等人的研究结果表明,当温度降低到 14000 K 左右时,通道内的压强与周围的气体压强大致相等^[9]. Hill 等人^[12]模拟计算了等离子体通道扩展半径与温度的关系,分别考虑了辐射、冲击波和湍流等引起的能量损失.结果表明,冲击波引起的能量损失很小,通道等离温度的降低和能量向外传输主要依靠扩散和导热作用.随着能量的向外传递,等离子体温度降低,大量的离子复合,氮离子和氧离子经过化学反应合成氮氧化物(NO_x),并被带出通道.当温度降低到一定值时,化学反应达到动态平衡,各类生成物含量不变,称此温度为氮氧化物(NO_x)的“冻结温度”^[9].有关实验室电弧放电测量^[8]和有关理论计算得到一氧化氮(NO)的冻结温度为 2660 K^[13-16].

本文研究了冲击波之后 50 ms 内,闪电消散过程中等离子体温度的衰减规律.此时,通道的压强接近 1 atm.为了描述此过程中温度的衰减规律,建立以下基本假设:1)通道处于局部热力学平衡状态(LTE)^[17]. Griem 等人^[18]研究证实:闪电通道中电子和离子动能的平衡时间都在 0.01 μs 数量级,所以,相对于通道物理参量变化的时间而言,通道满足局部热力学平衡(LTE).2)在研究通道内部粒子的运动状态时,不必区别电子、离子和中性原子,而把它们当作一个整体进行处理^[19].

2.2. 理论方法

在闪电消散阶段,通道等离子体遵从以下方程^[9].
能量守恒方程:

$$-\nabla \cdot \kappa \nabla T + \rho c_p \frac{DT}{Dt} + \rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{v^2}{2} \right) - \frac{\partial P}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla P. \quad (2)$$

质量连续性方程:闪电通道内、外界面处介质的速度和通道界面的扩展速度三者相等,因此,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v = 0. \quad (3)$$

状态方程:采用理想气体模型^[19],同时考虑到闪电通道处于局部热力学平衡(LTE)状态,则有

$$P = P(\rho, T). \quad (4)$$

上述各式中, P 是气体压强, T 是绝对温度, ρ 是质量密度, v 是气体速率, c_p 是定压比热容, κ 是热传导率,算符 D/Dt 定义为

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + v \cdot \nabla. \quad (5)$$

则有,方程(1)左边的第三和第四项为零.为简化计算,将闪电通道看作是轴向均匀的圆柱体.当气流只沿径向传播时,联立方程(2),可以得到方程(1)左边的第三项正比于 ∇P .

因此,可将上述各方程整理为

$$-\nabla \cdot \kappa \nabla T + \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v = 0, \quad (7)$$

$$P = P(\rho, T) = \text{Constant}. \quad (8)$$

其中, ρ , v , T 是空间和时间的函数.由(6)–(8)式,可以得到等离子体温度随时间和空间的变化.

3. 计算结果与分析

依据上述理论,计算了冲击波之后通道等离子体温度随时间和径向的变化.以冲击波后通道内外压强近似相等为初始状态,Uman 等人的研究结果表明,此时通道温度为 14000 K 左右^[9].考虑到不同强度的闪电放电过程^[20],回击通道温度有一定差异,计算过程中取通道中心初始温度分别为 $T = 8000 \text{ K}$, $T = 9000 \text{ K}$, $T = 10000 \text{ K}$, $T = 12000 \text{ K}$, $T = 14000 \text{ K}$, $T = 15000 \text{ K}$ 的 6 种情况,时间从 0—50 ms,通道半径分别为 2 mm, 4 mm, 6 mm, 7.8 mm.计算结果在表 1 中列出.

图 1 反映了一定半径处温度随时间的变化规律.可以看出,在相同半径处,前期温度衰减较快,并且,初始温度越高,衰减越快;后期衰减较慢,不同初始温度下衰减幅度的差值也逐渐减小.随着半径的增大,温度的衰减幅度逐渐减小.以初始温度 $T = 8000 \text{ K}$ 和 $T = 15000 \text{ K}$ 两种情况为例:半径为 $R = 2 \text{ mm}$ 处,在前期(如 0—10 ms 内),二者分别衰减了 1573 K 和 4314 K;在中期(如 20—30 ms 内),二者分别衰减了 1185 K 和 2243 K;而在后期(如 40—50 ms 内)的衰减量分别为 605 K 和 1907 K. $T = 10000 \text{ K}$ 时,前 15 ms 内,温度随时间的变化曲线有点波动,可能是由于计算误差引起的.

表 1 等离子体温度随半径和时间的变化(单位:K)

时间/ms	初始 温度/K	通道半径/mm				初始 温度/K	通道半径/mm			
		2	4	6	7.8		2	4	6	7.8
0		7748.31461	6921.34831	5573.03371	3892.1348		8680.23582	7692.02695	6097.41718	4097.1910
1		7613.48135	6768.53933	5321.34831	2382.0225		8511.79113	7557.27120	3537.05783	2502.8090
10		6175.28090	5060.67416	3235.95506	1141.5731		6759.96631	5535.93487	2492.70073	1250.0562
20	8000	4629.21348	3721.34831	2328.08989	817.9775	9000	4940.76362	3986.24368	1987.36665	834.2697
30		3433.70787	2759.55056	1725.84270	602.2472		3593.20606	2908.19764	1818.92195	611.7978
40		2552.80899	2049.43820	1294.38202	431.4607		2582.53790	2099.66311	1313.58787	463.4831
50		1887.64045	1519.10112	970.78652	323.5955		1875.07019	1526.95115	943.00955	315.1685
0		10596.2942	9290.84784	7192.30769	4546.3223		11561.4823	10091.5216	7756.87816	4761.2360
1		10469.9670	9164.51432	7065.97417	3282.9871		9855.69905	7285.23302	2364.40202	2941.0112
10		9332.95901	7816.95677	5128.74902	1766.9848		8401.45985	4313.86861	1185.28916	1474.7191
20	10000	5542.95340	4490.17406	2812.74565	924.7613	12000	5807.41157	4667.60247	2946.09770	1019.6629
30		3858.50646	3100.50533	1970.52218	672.0943		4015.16007	3205.50253	2002.80741	716.2921
40		2679.39360	2174.05952	1338.85458	461.5385		2749.57889	2215.04177	1389.66873	463.4832
50		1921.39248	1500.28074	959.85402	335.2049		1900.61763	1507.58001	965.18810	311.7978
0		13427.8495	11729.9270	8828.18641	5241.5730		14348.6805	12525.54740	9423.35766	5429.2135
1		13086.4683	11307.69230	8244.24480	3219.1011		13985.9629	12115.10390	8736.10331	3325.8427
10		9537.90006	7607.25435	4866.36721	1651.6854		10034.2504	8134.75576	5128.01797	1707.8652
20	14000	6330.73080	5108.92757	3186.41213	1095.5056	15000	6626.61426	5338.01235	3352.61089	1114.6067
30		4237.50702	3411.00505	2135.31724	741.5730		4383.49242	3505.33408	2207.18697	737.0787
40		2800.11230	2261.08928	1416.61988	488.7641		3827.62493	2312.18417	1462.66143	521.3483
50		1847.83892	1506.45705	976.41774	337.0787		1920.83099	1529.47782	937.67546	305.6180

图 2 以初始温度 $T = 8000$ K 和 $T = 14000$ K 为例,给出了温度随时间和径向变化的立体图,反映了等离子体温度衰减的总体规律.从网格表面可以看出,在给定半径处,等离子体温度随时间的衰减是先快后慢;同一时刻,等离子体温度的空间分布规律是:半径小的位置温度梯度较小,半径大的位置温度梯度较大.即距离通道中心越近,温度变化越小,距离通道中心越远,变化越大;以 $T = 8000$ K 为例,当 $t = 20$ ms 时,在通道半径较小处(如 2—4 mm),温度的差值为 907 K;在通道半径较大处(如 6—7.8 mm),温度的差值为 1510 K. Uman 等人^[9]研究报告,初始温度为 $T = 14000$ K,在 50 ms 内衰减到

2000 K 左右,与本工作结果基本一致.

从计算结果也可以看出,通道外侧首先衰减到氮氧化物的冻结温度.以 $T = 14000$ K 为例,在 $R = 7.8$ mm 处,1 ms 衰减到一氧化氮(NO)的冻结温度附近; $R = 6$ mm 处,需要 28 ms; $R = 4$ mm 处,需要 42 ms; $R = 2$ mm 处,需要 48 ms. 50 ms 后,在 $R = 7.8$ mm 处,等离子体温度衰减到接近室温.通道中心等等离子体温度由 $T = 15000$ K 衰减到 NO 的冻结温度需要约 50 ms;半径为 8 mm 处,在 1 ms 时温度均衰减到 3000 K 左右.考虑到 1 ms 内的温度分布,由一氧化氮(NO)的冻结温度初步推断:氮氧化物(NO_x)生成主要在闪电回击后 50 ms 内、半径为 $R =$

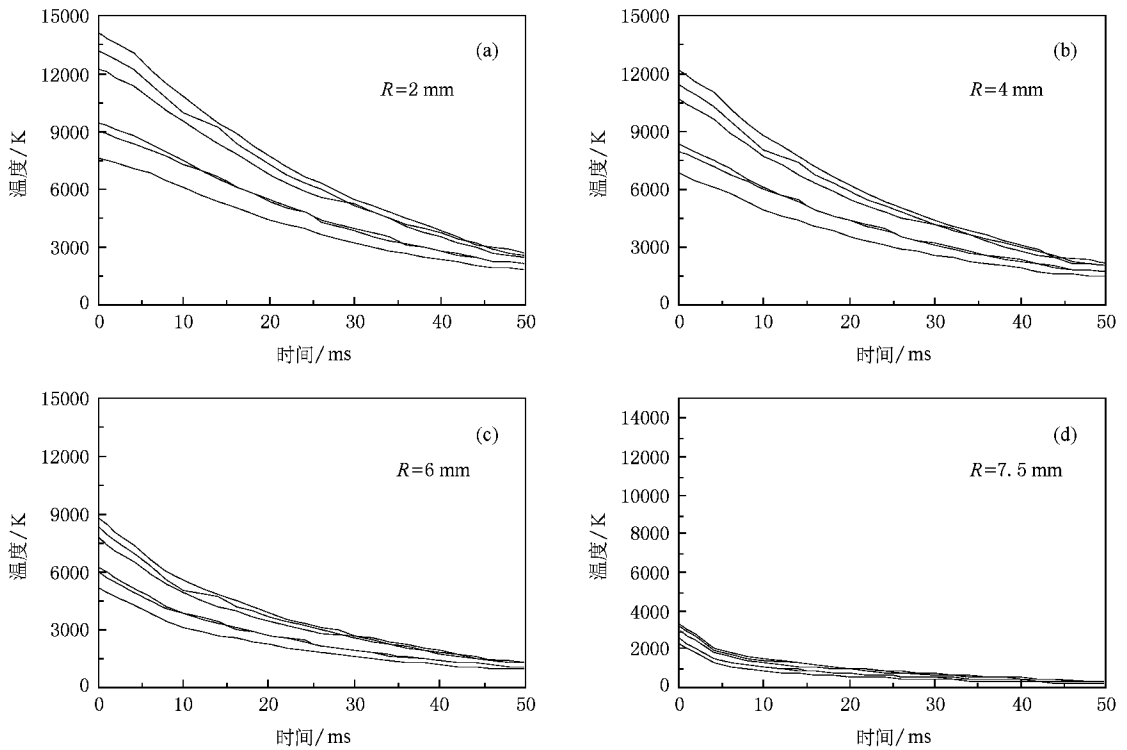


图 1 在给定半径处等离子体温度随时间的衰减曲线

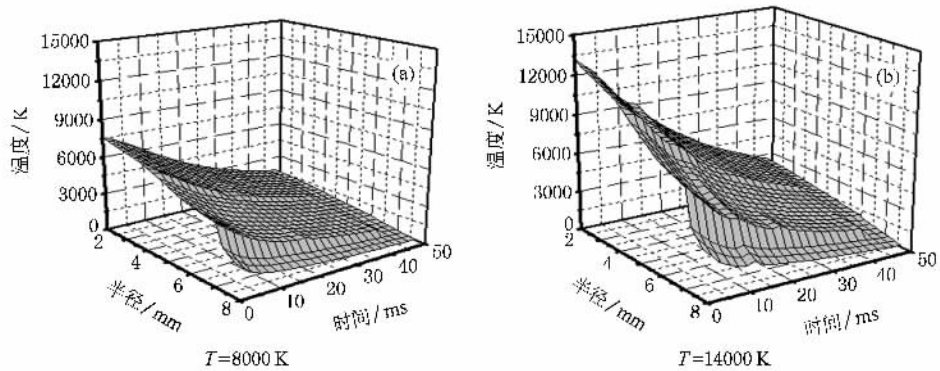


图 2 等离子体温度、时间、半径的三维图

9 mm 的通道内.

4. 结 论

对自然闪电回击后的消散过程建立数学模型, 计算了等离子体温度随时间和空间的变化规律. 结果分析表明 相同通道半径处, 在前期, 温度随时间

衰减较快, 后期较慢, 初始温度越高, 衰减越快. 随着半径的增大, 温度随时间的衰减逐渐变慢; 同一时刻, 半径小的位置温度梯度较小, 半径大的位置温度梯度较大. 同时, 由等离子体温度衰减到 NO 冻结温度的时间和位置初步推断: 氮氧化物(NO_x)生成主要在闪电回击后 50 ms 内、半径为 R = 9 mm 的通道内.

[1] Prucitt M L 1963 *J. Geophys. Res.* **68** 803

[2] Uman M A 1964 *J. Atmos. Terr. Phys.* **26** 123

- [3] Marshall T C ,Rust W D 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 297
- [4] Moore C B 1960 *J. Geophys. Res.* **65** 1907
- [5] Salanave L E 1961 *J. Sci.* **134** 1395
- [6] Uman M A 1969 *Lightning* (New York : Cambridge University Press) p264
- [7] Zhou Y ,Qie X S 2002 *J. Plateau. Meteorology.* **21** 501 (in Chinese)[周 筠、郗秀书 2002 高原气象 **21** 501]
- [8] Orville R E 1968 *J. Atmos. Sci.* **25** 839
- [9] Martin A ,Uman ,Voshall Roy E 1968 *J. Geophys. Res.* **72** 497
- [10] Wang D H ,Qie X S ,Guo C M 2000 *Lightning and Artificially Triggered Lightning* (Shang Hai : Shanghai Jiaotong University Press) p81 (in Chinese)[汪道洪、郗秀书、郭昌明 2000 雷电与人工引雷(上海 :上海交通大学出版社)第 81 页]
- [11] Uman M A ,Orville R E 1964 *J. Atmos. Sci.* **21** 306
- [12] Hill R D 1971 *J. Geophys. Res.* **76** 637
- [13] Borucki W J ,W L Chameiaes 1984 *Res. Geophys. Space. Phys.* **22** 363
- [14] Zhang Z ,Lu X ,Hao Z Q ,Zhang S C ,Zhang D D ,Wang Z H ,Ma Y Y ,Yan P ,Zhang J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5293 (in Chinese) [张 、鲁 欣、郝作强、张适昌、张东东、王兆华、马媛媛、严 萍、张 杰 2007 物理学报 **56** 5293]
- [15] Hill R D ,Rinker R G ,Wilson H D 1980 *J. Atmos. Sci.* **37** 179
- [16] Dawson G A 1979 *J. Atmos. Sci.* **36** 174
- [17] Jin Y M ,Fan Y S 1983 *Physical properties of low-temperature plasma* (Beijing : Tsinghua university press) p48 (in Chinese)[金佑民、樊友三 1983 低温等离子体物理基础(北京 :清华大学出版社)第 48 页]
- [18] Griem H R 1964 *Plasma. Spectroscopy* (New York : McGraw Hill) p580
- [19] Sun J Q 1979 *J. Atmos. Sci.* **3** 69 (in Chinese)[孙景群 1979 大气科学 **3** 69]
- [20] Yuan P ,Liu X S ,Zhang Y J ,Xie L Y ,Dong C Z 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2495 (in Chinese)[袁 萍、刘欣生、张义军、颜录有、董晨钟 2002 物理学报 **51** 2495]

Theoretical study on the rule of plasma temperature decay in the process of lightning dissipation *

Zhao Xue-Yan Yuan Ping[†] Wang Jie Shen Xiao-Zhi Guo Yi-Xiao Qiao Hong-Zhen

(College of Physics and Electronic Engineering ,Northwest Normal University ,Lanzhou 730070 ,China)

(Received 5 May 2008 ; revised manuscript received 26 August 2008)

Abstract

The temporal and spatial distributions of the plasma temperature during the dissipation process of lightning are calculated theoretically by applying the equation of motion ,the equation of continuity and the equation of energy conservation of hydrostatics. The result shows that the temperature decay at a given radius is quicker in the earlier stage and slower in the later stage ; Furthermore ,the higher the original temperature ,the quicker the decay. The temperature decays slower when the radius becomes larger. At the same time ,the larger the radius of lightning channel ,the greater the temperature gradient , and vice versa. According to the time and position of freezing temperature of NO ,we can conclude primarily that NO_x are produced in the channel of less than 9 mm radius in the time within 50 ms after the lightning return stroke.

Keywords : period of dissipation in the lightning-discharge channel , plasma , temperature

PACC : 5000 , 3120 , 4710

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40475007) and the Foundation of Northwest Normal University (Grant No. NWNNU-KJCXGC-03-21).

[†] E-mail : yuanp@nwnu.edu.cn