

高能电子碰撞电离对高空核爆炸辐射电离的影响

欧阳建明[†] 马燕云 邵福球 邹德滨

(国防科学技术大学理学院, 长沙 410073)

(2012年4月5日收到; 2012年5月17日收到修改稿)

利用数值模拟程序模拟了不同高度核爆炸下距离爆点不同位置处大气的 X 射线电离及演化过程, 分析了高能电子碰撞电离过程对高空核爆炸电离效应的影响. 结果表明: 高能电子碰撞电离过程对高空核爆炸的电离结果产生了重要影响, 在 80 km 爆高 1 kt 当量高空核爆炸条件下, 在距离爆点 1.5 km 处高能电子的碰撞电离效应使得电子的峰值数密度提高了约 2 个数量级; 随着时间的增加, 高能电子能谱逐渐向低能方向发展, 在 5 μ s 后高能电子数密度随电子能量近似呈负指数分布; 电子峰值时间与爆高有关, 随着爆高的增加而增大, 电离的影响区域也随着爆高的增加而增大. 在 80 km 爆高 1 kt 当量情况下电离效应对近百千米范围内的微波通信具有严重影响.

关键词: 高空核爆, 电子碰撞电离, 数值模拟

PACS: 28.70.+y, 52.20.Fs, 47.27.ek

1 引言

高空核爆炸是指爆点位于海拔 30 km 以上的核爆炸. 高空核爆炸主要以 X 射线、 γ 射线、 β 射线、中子流等形式向外辐射能量, 其中 X 射线辐射的能量占到释放总能量的 70%—85%^[1,2]. 由于高空空气稀薄, 核爆炸产生的辐射场能在很大的范围内电离大气, 电离效应分为瞬发电离和缓发电离. 瞬发电离源主要包括核爆炸产生的 X 射线、瞬发 γ 射线和中子流. 缓发电离源则主要包括缓发 γ 射线以及射线与空气中的原子或分子作用产生的高能电子等. 不同的电离源具有不同的电离效应, 其中 X 射线主要以光电效应为主, γ 射线主要是康普顿散射效应和电子对效应, 中子和高能电子主要是碰撞电离效应.

高空核爆炸的瞬发电离效应能产生大量的高能电子, 这些高能电子的能量大大超过了空气中的原子或分子中电子的束缚能. 在高速电子的作用下, 这些电子会被电离成自由电子. 这种高能电子的碰撞电离过程是高空核爆炸电离效应的主要过程之一, 能对高空核爆炸的电离结果产生重要影响.

大气被电离之后的成分及成分之间的演化过程十分复杂, 除了高能电子的碰撞电离之外, 低能电子会吸附于原子和分子之上形成负离子, 也会与正离子发生复合反应. 反应生成的很多成分存在的时间很短, 一般难以直接测量. 数值模拟是研究大气电离及电离后的演化过程的一种较好的方法. 本文以较为完善的大气等离子体物理化学过程模拟程序^[3]为基础, 结合 X 射线对大气的电离过程和高能电子的碰撞电离过程, 对程序进行了改进. 利用改进后的程序数值模拟了不同高度核爆炸下距离爆点不同位置大气的 X 射线电离及演化过程, 重点分析了高能电子碰撞电离过程对电离结果的影响. 研究结果对于高空核爆炸对通信系统和雷达系统的影响评估、高空核爆炸对空间装备的影响评估、核电磁脉冲的研究等方面都具有参考价值.

2 物理模型和数值模拟方法

模型中假设核爆炸发生后, 射线呈球对称分布向外发射. 射线在大气的传输过程中, 一方面, 由于球对称分布的影响, 光子数密度与传输距离的平方成反比; 另一方面, 射线在传输过程中会被大气成

[†] E-mail: oyjm@nudt.edu.cn

分吸收,随着传输距离的增加,光子数密度呈 e 指数衰减.在 X 射线波段,这种吸收主要通过光电效应产生高能电子.大气成分复杂,模型中考虑了 36 种组分^[4]及组分之间的 229 个反应式,以及光子与大气中的主要原子和分子的光电效应过程,例如



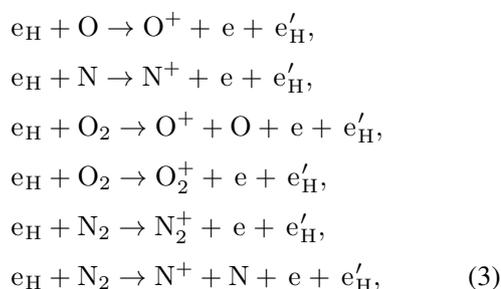
其中 e_{H} 表示电离过程中产生的高能电子.

X 射线的光电效应过程可以视为光子与空气组分的一种二体过程,某一能量的光子数密度 n 随时间 t 的变化率可表示为^[4]

$$\frac{dn}{dt} = -n_0 c \sum \sigma_i n_i, \quad (2)$$

其中 n_0 为入射光子的数密度, c 为光速, n_i 为组分 i 的数密度, σ_i 是此能量光子与组分 i 的光电离截面,截面与光子的能量有关,由数据库 EPDL97^[5]中查得.光子的能量范围从 10—10000 eV.由于光电效应中产生的电子能量由光子能量决定,因此由 (2) 式同时可以得到不同能量高能电子的产生速率.

X 射线电离大气中的原子或分子产生的高能电子还会与原子或分子产生碰撞电离,模型中考虑了高能电子与主要的大气原子和分子的碰撞电离过程



其中 e 为低能电子, e'_{H} 为碰撞电离后产生的高能电子.由于在电离过程中高能电子需要提供电离的能量,电离后的高能电子 e'_{H} 的能量较电离前的高能电子 e_{H} 的能量要低.

高能电子的碰撞电离过程也可以视为一种二体过程,某一能量的高能电子数密度 n_{H} 随时间 t 的关系可表示为

$$\frac{dn_{\text{H}}}{dt} = -n_{\text{H}} \sum \sigma_{i\text{H}} v_{\text{H}} n_i. \quad (4)$$

其中 v_{H} 为高能电子的速率, $\sigma_{i\text{H}}$ 为高能电子与组分 i 的电子碰撞电离截面.电子碰撞电离截面由 NIST (The National Institute of Standards and Technology) 提供的电子碰撞电离与激发截面数据库^[6]中查得.

3 模拟条件

数值模拟中假设高空核爆释放的总能量中 X 射线的能量占 85% 的份额. X 射线的能谱可以近似看成黑体辐射谱,黑体温度为 10^7 K ^[1],光子能谱采用普朗克分布,即

$$B(h\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/k_{\text{B}}T) - 1}. \quad (5)$$

光子的时间分布采用参考文献 [7] 中的时间分布函数

$$f = \frac{2\beta}{\pi} \frac{\exp[\beta(t - t_{\text{p}})]}{1 + \exp[2\beta(t - t_{\text{p}})]}, \quad (6)$$

其中归一化后 β 取 1.7×10^8 , 峰值时间 t_{p} 取 100 ns, 裸核区半径假设为 500 m ^[1].

各组分的初始数密度设为一般情况下高空大气的本底数密度,由参考资料查得^[7-9].初始时间步长 t_0 为 10^{-12} s ,程序采用可变步长方法,在计算过程中随着带电粒子数密度的减小,步长自动增大,但在 X 射线照射阶段 t_0 保持 10^{-12} s 不变,以保证精度.

4 结果分析

4.1 高能电子碰撞电离对 X 射线辐射电离效果的影响

图 1 给出了在 80 km 爆高 1 kt 当量情况下,距离爆点 1.5 km 处 (其中裸核区半径 0.5 km, 距离裸核区 1 km) 考虑高能电子碰撞电离和不考虑高能电子碰撞电离^[4]电子数密度 n 随时间 t 的演化过程.从图 1 中可以看出,高能电子碰撞电离过程对高空核爆炸 X 射线的电离结果产生了重要影响,高能电子的碰撞电离使得电子的峰值数密度提高了约 2 个数量级,电子的峰值数密度达到 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$.图 2 给出了低能电子、高能电子及主要负离子数密度 n 随时间 t 的演化关系.从图 2 中可以看出,高能电子数密度在约 0.1 μs 时刻达到峰值,此后直到 10 μs 高能电子数密度基本保持峰值不变,而后急剧衰减.虽然在 0.1 μs 到 10 μs 时间内高能电子的数密度基本不变,但由于高能电子的碰撞电离效应,能量不断衰减,高能电子的能谱随时间有所变化.图 3 给出了不同时刻高能电子的能谱,其中横坐标为高能电子的动能,纵坐标为高能电子的数密度.从图 3 可以看出,随着时间的增加,高能电子能

谱逐渐向低能方向发展. 图 3 中在 500 ns 和 1 μs 能谱图中存在两个峰值, 其中后一个峰值是由于模型中假设 X 射线能谱采用普朗克分布, 因此高能电子也会出现相应的峰值; 前一个峰值产生的原因是能量约 400—500 eV X 射线光子与空气中的氧原子和氮原子的电离截面存在峰值, 氧原子和氮原子的截面峰值对应的 X 射线光子的能量有所不同 [5]. 随着时间的增长, 能量较低的高能电子数密度逐渐增加, 峰值也不再明显, 在 5 μs 后高能电子数密度随电子能量近似呈负指数分布.

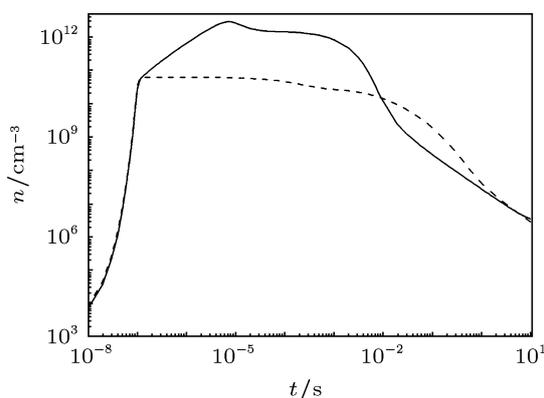


图 1 在 80 km 爆高 1 kt 当量核爆炸情况下, 距离爆点 1.5 km 处考虑高能电子碰撞电离 (实线) 和不考虑高能电子碰撞电离 (虚线) 电子数密度 n 随时间 t 的演化 ($L = 1.5$ km)

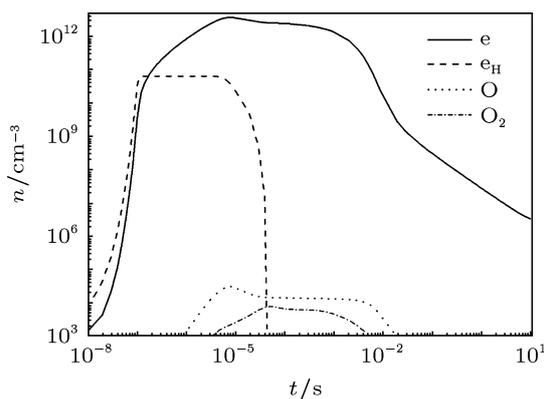


图 2 在 80 km 爆高 1 kt 当量核爆炸情况下, 距离爆点 1.5 km 处电子及主要负离子数密度 n 随时间 t 的演化 ($L = 1.5$ km)

图 4 给出了 80 km 爆高 1 kt 当量核爆情况下, 距离爆点 1.5 km 处主要正离子数密度 n 随时间 t 的演化图. 从图中可以看出, 电离过程产生的主要正离子包括 O^+ , O_2^+ , N^+ , N_2^+ 和 NO^+ 离子. 各阶段占主导的正离子依次为 N_2^+ , O^+ 和 NO^+ .

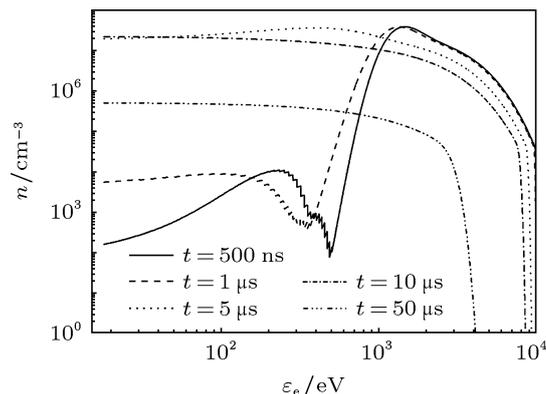


图 3 在 80 km 爆高 1 kt 当量核爆炸情况下, 距离爆点 1.5 km 处高能电子能谱 ($L = 1.5$ km; 横坐标为高能电子的动能, 纵坐标为高能电子的数密度)

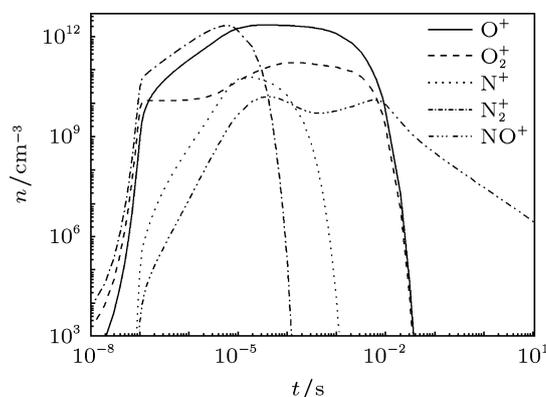


图 4 在 80 km 爆高 1 kt 当量核爆炸情况下, 距离爆点 1.5 km 处主要正离子数密度随时间的演化 ($L = 1.5$ km)

4.2 不同高度高空核爆炸的 X 射线电离及电子碰撞电离结果

图 5—7 给出了不同爆高情况下 (80, 120 和 160 km), 与爆点不同距离 (1, 5, 10, 15, 20, 50, 100 km) 处电子数密度 n 随时间 t 的演化. 从图 5—图 7 中可以看出, 电子的峰值数密度随着到爆点的距离的增加而减小. 在 80 km 爆高情况下, 电子寿命随着到爆点距离的增加而有所增加, 但在 120 km 爆高和 160 km 爆高情况下, 电子寿命在不同距离处基本保持不变. 电子峰值时间与爆高有关, 随着爆高的增加而增大, 在 80 km 爆高情况下电子峰值时间约为 10 μs, 在 80 km 爆高情况下电子峰值时间则达到 20 ms. 由于大气密度随着高度的增加而减少, 高空核爆炸的能量沉积范围随着爆炸高度的增加而增大, 电离的影响区域也随着爆炸高度的增加而

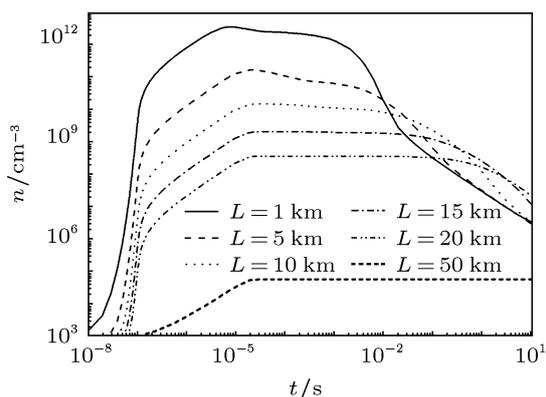


图5 在 80 km 爆高 1 kt 当量核爆情况下, 距离爆点不同位置处电子数密度随时间的演化

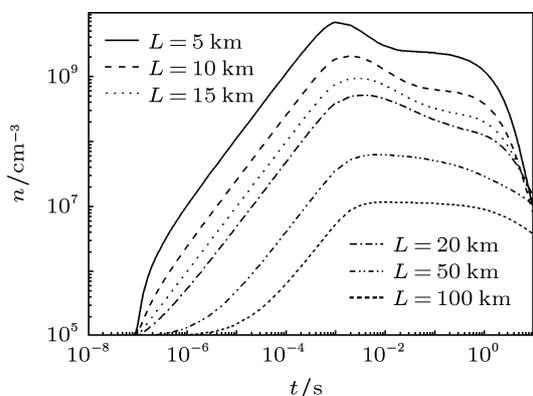


图6 在 120 km 爆高 1 kt 当量核爆情况下, 距离爆点不同位置处电子数密度随时间的演化

加大, 从图 5 中可以看出, 在 80 km 爆高情况下, 电离影响的主要区域在数十千米范围内, 在距离爆点 50 km 处, 电离产生的电子峰值数密度只有电子的本底数密度的约 100 倍. 距离爆点越近, 电离的影响越大, 在距离爆点 5 km 左右, 电子的峰值数密度达到 10^{11} cm^{-3} 量级, 与之相对应的电磁波截止频率^[10] 在微波的 C 波段 (4—8 GHz), 低于该截止频率的 C 波段、S 波段 (2—4 GHz)、L 波段 (1—2 GHz) 及高频无线电波段电磁波将不能穿越该区域, 与截止频率相近的 X 波段、Ku 波段将严重衰减. 在距离 10 km 处, 电子的峰值数密度达到 10^{10} cm^{-3} 量级, 与之相对应的电磁波截止频

率^[10] 在微波的 L 波段. 在 120 km 和 160 km 爆高情况下, 高空核爆炸影响的频段主要在 L 波段及高频无线电波段.

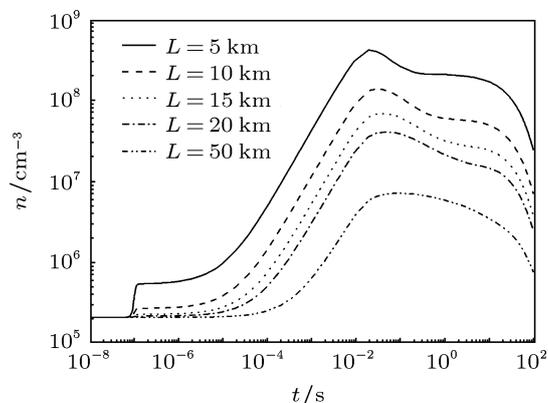


图7 在 160 km 爆高 1 kt 当量核爆情况下, 距离爆点不同位置处电子数密度随时间的演化

5 结论

本文以较为完善的大气等离子体物理化学过程数值模拟程序为基础, 结合 X 射线对大气的电离过程及高能电子的碰撞电离过程, 对程序进行了改进. 利用改进程序数值模拟了不同高度核爆炸下, 距离爆点不同位置处大气的 X 射线电离及演化过程, 分析了高能电子碰撞电离过程对电离结果的影响. 结果表明: 高能电子碰撞电离过程对高空核爆炸 X 射线的电离结果产生了重要影响, 在 80 km 爆高 1 kt 当量高空核爆炸情况下, 在距离爆点 1.5 km 位置处高能电子的碰撞电离使得电子的峰值数密度提高了约 2 个数量级; 随着时间的增加, 高能电子能谱逐渐向低能方向发展, 在 5 μs 后高能电子数密度随电子能量近似呈负指数分布; 电子峰值时间与爆高有关, 随着爆高的增加而增大, 电离的影响区域也随着爆炸高度的增加而增大; 在 80 km 爆高 1 kt 当量高空核爆炸情况下电离效应在近百千米范围内对微波通讯具有严重影响, 而在 120 km 爆高和 160 km 爆高情况下影响的频段主要在高频无线电波段.

[1] Wang J G, Niu S L, Zhang D H, Qiao D J 2010 *The Parameter Manual Book of High-Altitude Nuclear Explosion Effects* (Beijing: Atomic Energy Press) p31 (in Chinese) [王建国, 牛胜利, 张殿辉,

乔登江 2010 高空核爆炸效应参数手册 (北京: 原子能出版社) 第 31 页]

[2] Tao Y L, Wang J G, Niu S L, Zhu J H, Fan R Y 2010 *Acta Phys.*

- Sin.* **59** 5915 (in Chinese) [陶应龙, 王建国, 牛胜利, 朱金辉, 范如玉 2010 物理学报 **59** 5915]
- [3] Ouyang J M, Guo W, Wang L, Shao F Q 2004 *Chin. Phys.* **13** 2174
- [4] Ouyang J M, Ma Y Y, Shao F Q, Zou D B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 083201 (in Chinese) [欧阳建明, 马燕云, 邵福球, 邹德滨 2012 物理学报 **61** 083201]
- [5] Cullen D E, Hubbell J H, Kissel L 1997 *The Evaluated Photon Data Library* (Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory) UCRL-50400
- [6] Kim Y K, Irikura K K, Rudd M E, Stone P M 1997 *Electron-Impact Cross Sections for Ionization and Excitation* (Gaithersburg: The National Institute of Standards and Technology) <http://www.nist.gov/pml/data/ionization/index.cfm>
- [7] Hesstvedt E, Hov O, Isaken 1978 *Int. J. Chem. Kinet* **10** 971
- [8] Brasseur G, Solomon S 1984 *Aeronomy of the Middle Atmosphere* (Boston: D. Reidel Publishing Company) p213
- [9] Heicklen J 1976 *Atmospheric Chemistry* (New York: Academic Press) p7
- [10] Chen F F 1974 *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion* (New York: Springer Science Business Media) p85

The effect of energetic electron impact ionization on radiation ionization process of high-altitude nuclear explosion

Ouyang Jian-Ming[†] Ma Yan-Yun Shao Fu-Qiu Zou De-Bin

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073 China)

(Received 5 April 2012; revised manuscript received 17 May 2012)

Abstract

The X-ray ionizations and atmospheric temporal evolutions of different altitude nuclear explosions at different distances are numerically simulated. The effects of energetic electron impact ionization on radiation ionization process are analyzed in this paper. It is concluded that the energetic electron impact ionization process is important for radiation ionization, and in the case of 1 kt equivalent explosion at 80 km, the electron density at 1.5 km distance from explosion center increases two orders because of the energetic electron impact ionization. In 5 μ s the spectral energy distribution of energetic electrons varies with time, and the number density of energetic electrons decaying with electron energy will present an approximately negative exponential distribution. The peak time of electron density and the influence area of ionization increase with explosion altitude increasing. The ionization effect for 1 kt equivalent explosion at 80 km has an important influence on micro-wave communication in a 100 km range.

Keywords: high-altitude nuclear explosions, electron impact ionization, numerical simulation

PACS: 28.70.+y, 52.20.Fs, 47.27.ek

[†] E-mail: oyjm@nudt.edu.cn