高空核爆炸能量在大气层中的沉积规律

彭国良[1)2)†] 张俊杰[2)] 王仲琦[1)] 任泽平[2)] 谢海燕[2)] 杜太焦[2)]

1) (北京理工大学机电学院, 北京 100081)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

(2022 年 6 月 3 日收到; 2022 年 8 月 29 日收到修改稿)

建立了高空核爆炸 X 射线辐射能和碎片动能在大气层中沉积的计算模型, 利用该模型模拟了美国和苏联的 4 次大威力高空核爆炸试验 (Checkmate, Starfish, K3, K4) 的能量沉积情况, 分析了碎片动能在海拔 100—200 km 的沉积规律. 计算结果表明, 与 X 射线沉积区相比, 碎片动能沉积区范围较小, 能量密度较大; 碎片动能沉积在较短时间内 (约 0.5 s) 完成, 在爆心附近和海拔 115 km 附近存在两个吸收峰; 动能沉积区在水平截面大体上为椭圆形, 爆炸纬度越高, 椭圆偏心率越小, 水平截面积随海拔高度的增加而增大, 随爆高的增大而减小; 距爆点较远、远离磁泡时, 动能沉积峰值点在穿过爆心的地磁场磁力线附近; 距爆点较近、磁泡内部的动能沉积峰值点在爆心投影点附近.

关键词: 高空核爆炸, X 射线能量沉积, 碎片动能沉积

PACS: 07.77.Ka, 28.70.+y, 52.40.–w **DOI:** 10.7498/aps.71.20221112

1 引 言

高空核爆炸的能量绝大部分 (95% 以上) 以 X 射线和碎片动能的形式释放[1]. 这些能量一部分沉积在 100—200 km 的高空大气中, 进而引起大范围的等离子体膨胀上升运动[2,3]. 运动的等离子体会扰动地磁场, 在地面产生晚期核电磁脉冲信号, 威胁电网安全[4]. 准确地计算核爆炸能量沉积是计算晚期核电磁脉冲的基础. 学者们对 X 射线的能量沉积计算做了大量研究, 欧阳建明等[5]、陶应龙等[6] 给出了详细的计算方法. 对碎片动能沉积问题, 杨斌等[7]、彭国良等[8,9] 研究了 Starfish 试验的早期碎片云运动规律, Winske[10]、Thomas 等[11]、Brecht 等[12]、Gladd 等[13] 研究了碎片云与大气等离子体的相互作用过程, 分析了碎片动能通过无碰撞激波传递给大气离子的机理, 计算了离子的速度谱分布. 综上, 前期的研究给出了早期碎片云运动的机理、计算方法及规律, 但碎片动能在大气层中的沉积规律尚未见报道. 本文研究高空核爆炸能量在大气层中的沉积规律, 重点研究碎片动能在 100—200 km 大气层的沉积规律, 分析碎片动能沉积的影响因素.

2 计算模型

2.1 核爆炸 X 射线能量沉积计算模型

核爆 X 射线以软 X 射线为主, 主要通过光电效应与大气分子相互作用, 可以用光传输的 Beer-lambert 定律计算其沉积[6]:

$$e_{\mathrm{X}} = \frac{E_{\mathrm{X}}}{4\pi r^2}\int_0^{\infty}\exp\left(-\int_0^r \rho_{\mathrm{air}}\mu(\nu)\mathrm{d}r\right)\rho_{\mathrm{air}}\mu(\nu)P(\nu)\mathrm{d}\nu, \tag{1}$$

式中, ν 为光子频率, $P(\nu)$ 为 X 射线能谱, $\mu(\nu)$ 为大气对 X 射线的谱吸收系数, 取值可参考文献 [14]; r 为距爆心的距离; ρ_{air} 为大气密度, 由美国标准大

† 通信作者. E-mail: pgl02@163.com

© 2022 中国物理学会 Chinese Physical Society

气模型[15]给出; E_X 为 X 射线总能量. 一般热核武器可由组合黑体谱给出[14]: 30% 能量份额为 0.8 keV 黑体谱, 67% 能量份额为 3 keV 黑体谱, 3% 能量份额为 12 keV 黑体谱.

2.2 碎片动能沉积计算模型

高速运动的碎片离子主要受两种作用力, 即等离子体运动产生的电磁力和大气碰撞阻力. 其中, 将碎片动能转换为大气热能的主要是碰撞阻力. 高空核爆炸后的离子运动一般用混合粒子 (PIC) 模型[16–18]计算, 即用 PIC 粒子模型描述离子运动, 用无质量流体描述电子运动. 考虑粒子与大气的碰撞, 粒子的运动方程为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_p}{\mathrm{d}t}=\frac{q_p}{m_p}(\boldsymbol{E}+\boldsymbol{v}_p\times\boldsymbol{B})+\frac{\boldsymbol{F}_{\mathrm{air}}}{m_p},$$
$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}_p}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{v}_p, \tag{2}$$

式中, $\boldsymbol{v}$, q, m, $\boldsymbol{x}$ 分别为粒子的速度、电荷量、质量和位置坐标, 下标 p 代表第 p 个粒子, $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{B}$ 为粒子感受到的电场和磁场, $\boldsymbol{F}_{\mathrm{air}}$ 为大气碰撞阻力. 当粒子速度较大时 (本文取大于 10 km/s), 分别考虑粒子与自由电子、束缚电子及原子核的相互作用, 其计算公式为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{air}}=-n_{\mathrm{e}}S_{\mathrm{ef}}-n_{\mathrm{air}}(S_{\mathrm{eb}}+S_{\mathrm{n}}), \tag{3}$$

式中, S_{eb}, S_{n}, S_{ef} 分别表示束缚电子、原子核、自由电子的阻止本领. 阻止本领的计算公式可参考文献 [19]. 当粒子速度较小时 (本文取小于 10 km/s), 束缚电子的阻止作用可以忽略, 即

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{air}}=-n_{\mathrm{e}}S_{\mathrm{ef}}-n_{\mathrm{air}}S_{\mathrm{n}}, \tag{4}$$

得到大气碰撞阻力后, 离子在大气中的沉积能量 e_{D} 为阻力导致的动能损失, 计算公式为

$$\Delta\boldsymbol{v}=\frac{\boldsymbol{F}_{\mathrm{air}}}{m_p}\Delta t,\quad e_{\mathrm{D}}=\sum_p\frac{m_p\left[\boldsymbol{v}_p^2-(\boldsymbol{v}_p^2-\Delta\boldsymbol{v})^2\right]}{2}, \tag{5}$$

式中, Δt 为时间步长, $\Delta\boldsymbol{v}$ 为大气碰撞阻力导致的速度变化.

由无质量电子的运动方程可得到电场 E 的表达式:

$$\boldsymbol{E}=-\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}\times\boldsymbol{B}. \tag{6}$$

在准中性近似下, 电子速度 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}$ 可以由电流 J 的定义式给出:

$$\boldsymbol{J}=n_{\mathrm{i}}q(\boldsymbol{v}_{\mathrm{i}}-\boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}),\quad \boldsymbol{v}_{\mathrm{e}}=\boldsymbol{v}_{\mathrm{i}}-\boldsymbol{J}/n_{\mathrm{i}}, \tag{7}$$

式中, n_{i}, $\boldsymbol{v}_{\mathrm{i}}$ 分别为离子的数密度和平均速度, 可由 PIC 计算给出; q 为离子电荷量.

在低频 Darwin 近似下, 电磁场方程为

$$\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}+\nabla\times\boldsymbol{E}=0, \tag{8}$$
$$\mu_0\boldsymbol{J}=\nabla\times\boldsymbol{B}. \tag{9}$$

3 高空核爆炸试验

本文计算的算例来源于美国和苏联在海拔 100 km 以上进行的 4 次大威力高空核试验, 分别是美国的 Checkmate[15] 和 Starfish[1], 苏联的 K3 和 K4[20]. 试验参数如表 1 所示. 表中部分参数为推测值. 文献 [1] 给出了 Starfish 试验碎片初始总质量约为 1500 kg, 初速度约为 1500 km/s, 核爆炸能量大约 70% 以 X 射线形式释放, 25% 以碎片动能形式释放. 本文假设碎片初始总质量正比于当量, 其他试验的碎片初速度和能量占比与 Starfish 相同. 初始的地磁场取偶极子近似, 主要与纬度相关.

表 1 高空核爆实验参数

Table 1. High-altitude nuclear tests parameters.

	爆高/km	当量/kt	维度/(°)	质量/kg
Checkmate	147	410	17	440
Starfish	400	1400	17	1500
K3	300	300	47	320
K4	150	300	47.6	320

4 结果与讨论

由于能量沉积与大气密度关系极大, 不同海拔下沉积能量相差若干数量级, 为了便于分析能量沉积规律, 本文中的沉积能量用当地大气内能进行归一化处理.

图 1 给出了大气压随海拔高度的变化, 数据来源于文献 [14]. 设大气为理想气体, 则大气内能可由大气压计算得到:

$$e_{\mathrm{air}}=p_{\mathrm{air}}/(\Gamma-1), \tag{10}$$

式中, e_{air} 为大气内能; Γ 为比热比, 对理想大气一般取 1.4; p_{air} 为大气压.

4.1 核爆炸 X 射线能量沉积

设大气为理想气体, X 射线沉积能量密度与当地大气内能之比为

$$\eta_{\mathrm{X}}=e_{\mathrm{X}}/e_{\mathrm{air}}, \tag{11}$$

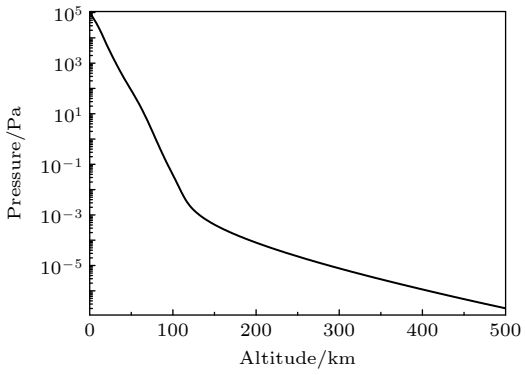

图 1 大气压随海拔高度的变化

Fig. 1. Atmosphere pressure *vs.* altitude.

其中, η_X 的大小能表征 X 射线能量对大气运动的影响程度, η_X 小于 0.1 时可忽略当地的大气运动受 X 射线能量的影响.

图 2 给出了 Checkmate, soviet-150 km, soviet-300 km, Starfish 等 4 次高空核爆炸的 X 射线沉积能量与大气内能之比的对数 ($\lg(\eta_X)$) 的等值线图. 图 2 中等值线 0 包围的区域代表 X 射线沉积能量与大气内能相当的区域; 等值线–1 代表 X 射线沉积能量比大气内能小 1 个量级, 其所包围的区域代表 X 射线沉积能量能影响大气的运动. 从图 2 可以看到, X 射线沉积能量密度与大气内能之比在爆心处最高, 往边缘逐步减少. 爆高和当量对 X 射线能量沉积影响较大, 爆高最高、当量最大的 Starfish 试验影响大气运动的区域半径超过 400 km, 其他 3 次试验都在 200 km 左右.

4.2 核爆炸碎片动能沉积

设置碎片宏粒子数为 500000, 每个网格上设置大气离子 8 个, 网格尺度为 10 km×10 km×10 km, 计算了 4 次试验的碎片动能沉积情况.

为比较碎片动能沉积与 X 射线能量沉积情况, 定义其比值为

$$\eta_{DX} = e_D/e_X. \tag{12}$$

η_{DX} 表征碎片动能沉积和 X 射线沉积的相对大小, η_{DX} 小于 0.1 时可忽略当地碎片动能的影响.

图 3 给出了动能沉积与 X 射线沉积的量级比较. 从图 3 可以看到, 动能沉积区内 X 射线沉积能量远小于碎片动能沉积. 但结合图 2 可知, X 射线沉积范围远大于碎片动能. 因此计算核爆炸能量沉积时两种能量都需要考虑.

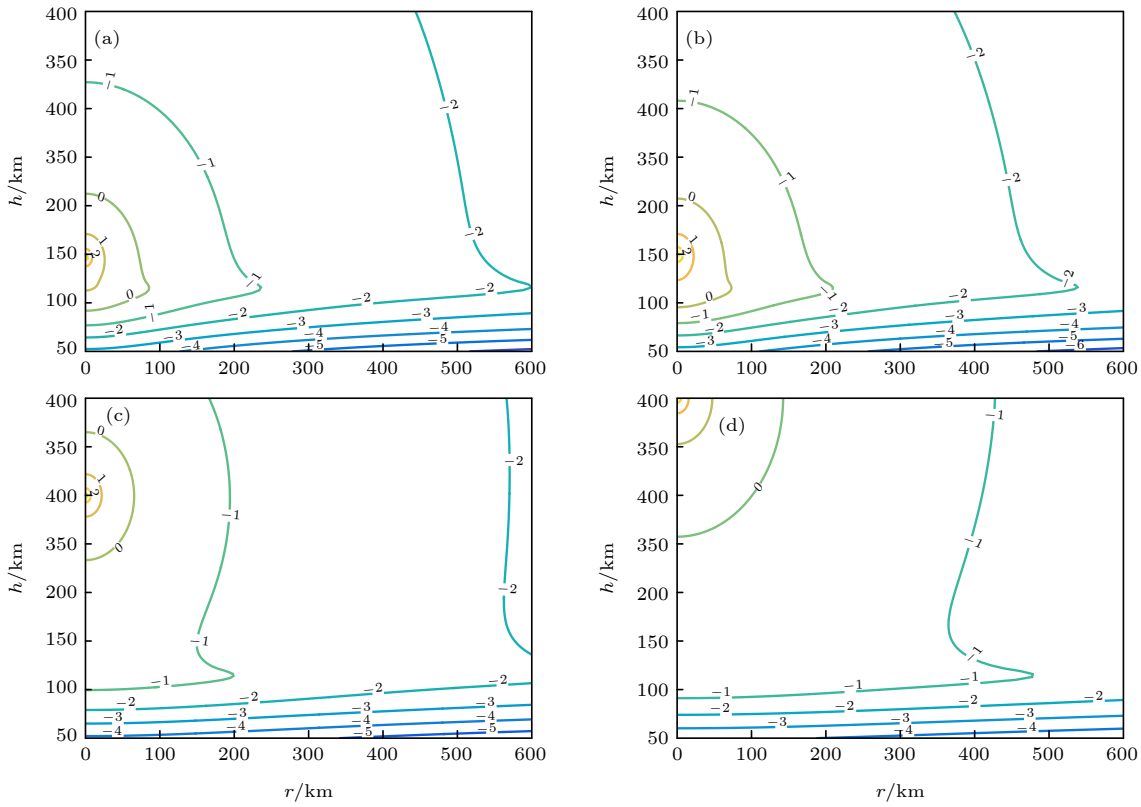

图 2 $\lg(\eta_X)$ 等值线图 (a) Checkmate; (b) K4; (c) K3; (d) Starfish

Fig. 2. Contour of $\lg(\eta_X)$: (a) Checkmate; (b) K4; (c) K3; (d) Starfish.

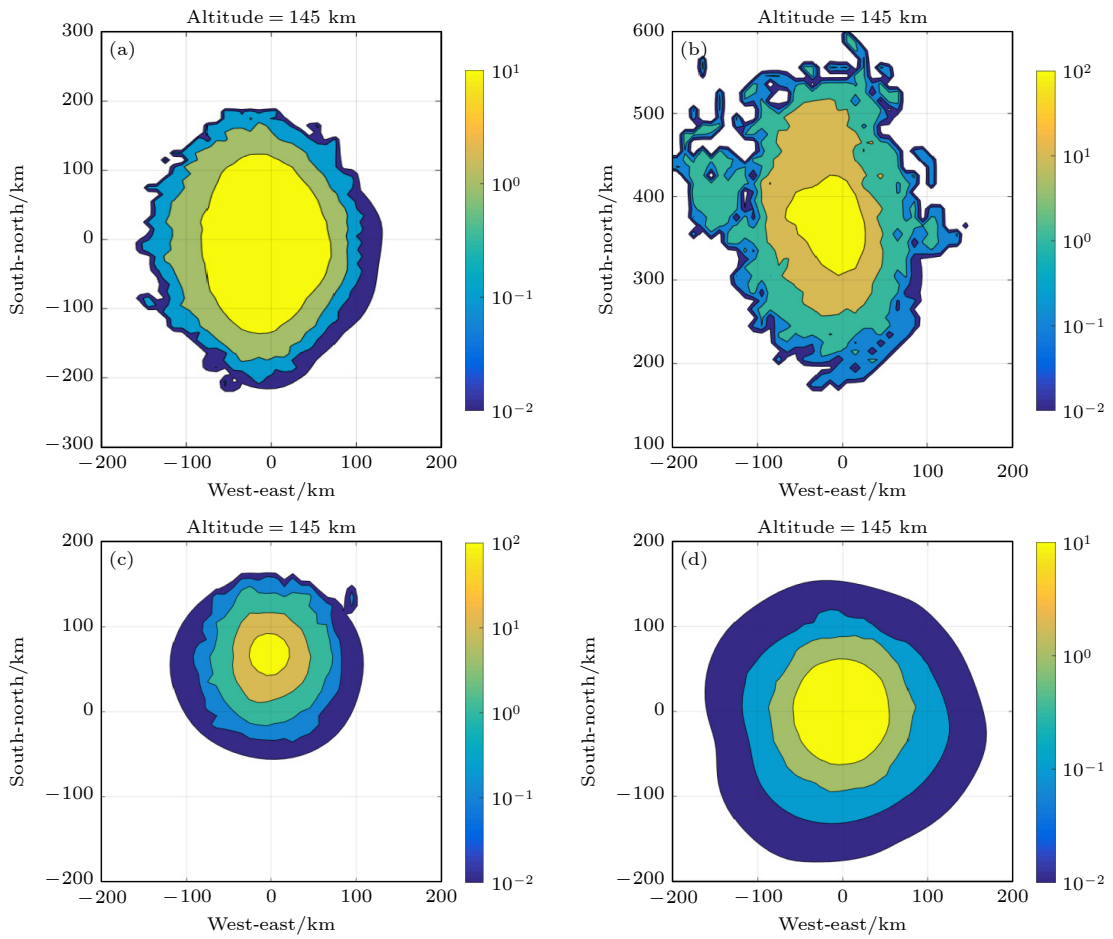

图 3 碎片动能沉积与 X 射线能量沉积的比值 η_{DX} 等值线云图 (a) Checkmate; (b) K4; (c) K3; (d) Starfish

Fig. 3. Contour of energy ratio η_{DX} of the debris and X-ray: (a) Checkmate; (b) K4; (c) K3; (d) Starfish.

为描述碎片动能沉积随高度 h_0 的变化, 定义归一化碎片动能沉积线密度 δ_{D} 为单位高度碎片动能沉积与总碎片动能 E_{D} 之比, 即

$$\delta_{\mathrm{D}}(h_0)=\frac{1}{E_{\mathrm{D}}}\iint_{S(h=h_0)} e_{\mathrm{D}}\mathrm{d}s, \tag{13}$$

式中, δ_{D} 的单位为 km^{-1} , 表征单位高度的大气对碎片动能的吸收能力.

4 次高空核爆炸试验中海拔高度 115 km 时, 归一化碎片动能沉积线密度随时间的变化如图 4 所示. 从图 4 可以看到, 试验中的碎片动能的沉积非常快, 0.5 s 以内完成绝大部分碎片能量的沉积. 爆炸高度较大时, 由于离子运动距离增大, 碎片能量沉积所需时间也会延长.

图 5 给出了爆后 1 s 时, 4 次高空核爆炸试验中归一化碎片沉积能量随海拔高度的变化. 由图 5 可知, 碎片动能沉积在 115 km 存在吸收峰. 在这个高度附近, 由于大气碰撞阻力很大, 高速离子速度下降非常快, 因此进入 115 km 以下的离子很少, 导致高度较小时能量沉积较少; 大于这个高度时, 由于空气密度下降很快, 碰撞阻力很小, 因此高度越大, 沉积能量越小. 对 Checkmate 和 K4 两次试验, 由于爆炸高度在 150 km 附近, 爆点附近碎片非常集中, 因此在爆点附近存在另一个小的吸收峰.

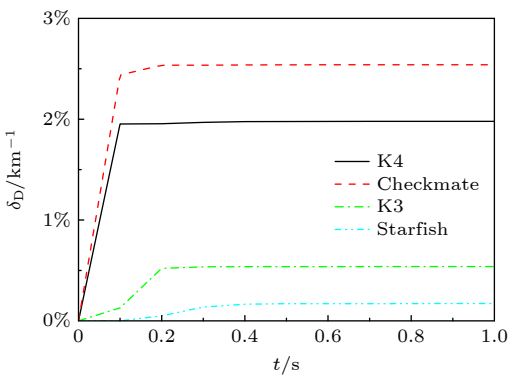

图 4 海拔高度 115 km 归一化碎片动能沉积线密度 δ_{D} 随时间的变化

Fig. 4. Time variation of the normalized debris kinetic energy line density δ_{D} at altitude 115 km.

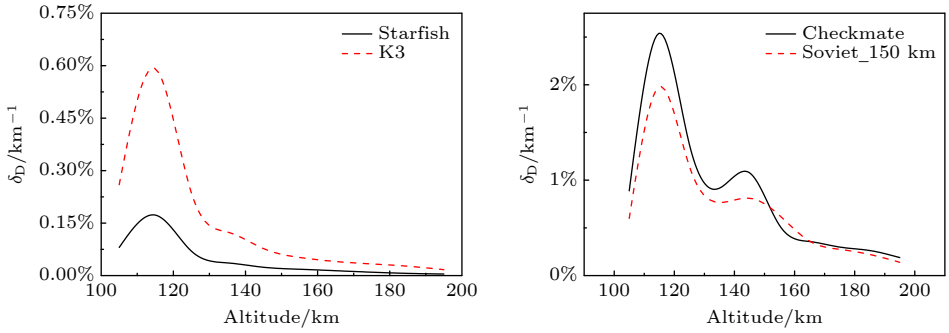

图 5 爆后 1 s 归一化碎片动能沉积线密度 δ_D 随海拔高度的变化

Fig. 5. Altitude variation of the normalized line debris kinetic energy density δ_D at 1 s after detonation.

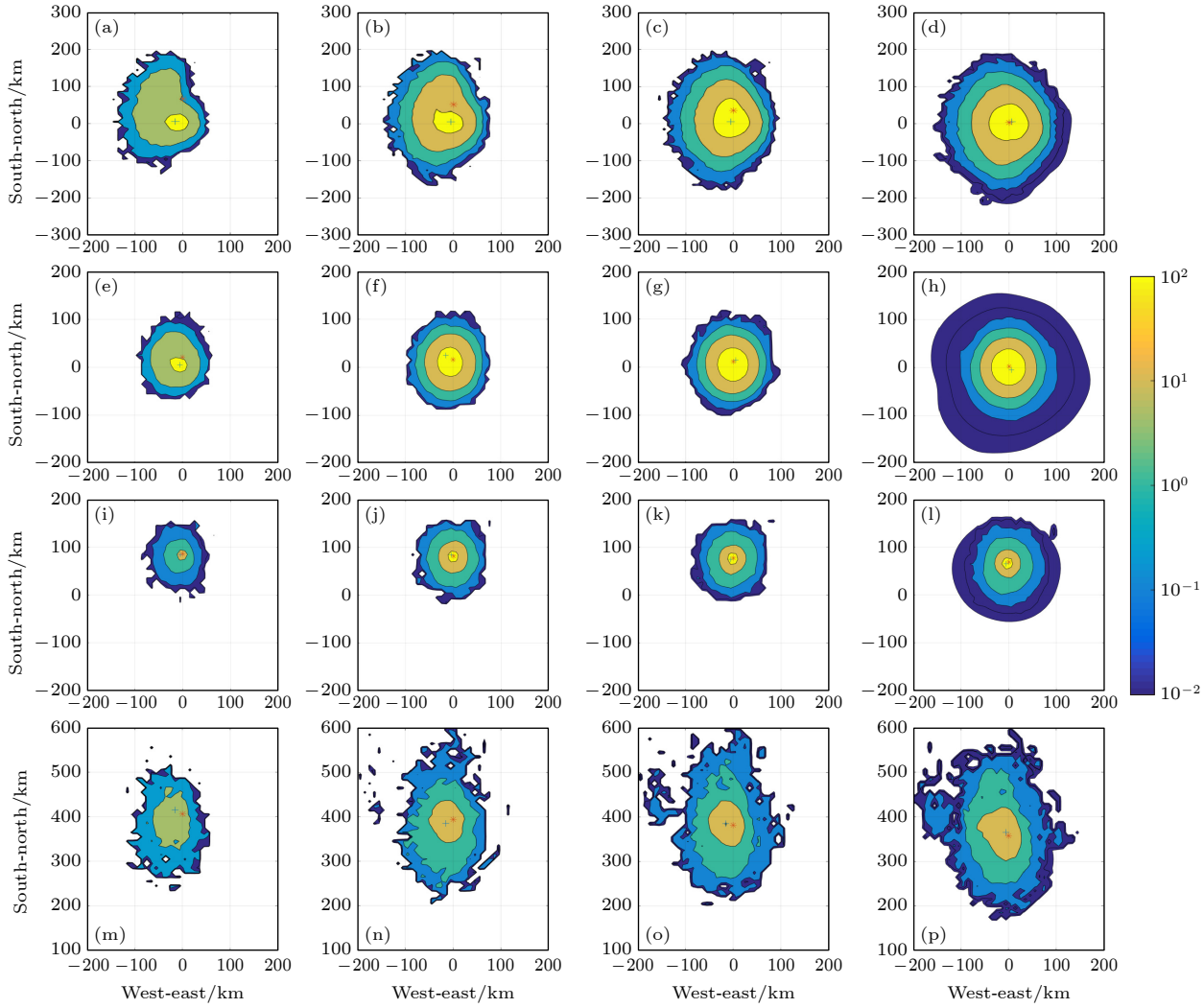

图 6 不同海拔的归一化碎片动能沉积云图, 图中, *为过爆点的背景地磁场磁力线在面内的位置, +为动能沉积密度最大的位置 (a) Checkmate, altitude = 105 km ; (b) Checkmate, altitude = 115 km; (c) Checkmate, 海拔高度为 125 km; (d) Checkmate, 海拔高度为 145 km; (e) K4, 海拔高度为 105 km; (f) K4, 海拔高度为 115 km; (g) K4, 海拔高度为 125 km; (h) K4, 海拔高度为 145 km; (i) K3, 海拔高度为 105 km; (j) K3, 海拔高度为 115 km; (k) K3, 海拔高度为 125 km; (l) K3, 海拔高度为 145 km; (m) Starfish, 海拔高度为 105 km; (n) Starfish, 海拔高度为 115 km; (o) Starfish, 海拔高度为 125 km; (p) Starfish, 海拔高度为 145 km

Fig. 6. Normalized debris energy accumulation at various altitudes, where, "*" denotes the magnetic field line which crosses the burst point, and "+" denotes the peak of the accumulated kinetic energy density: (a) Checkmate, altitude = 105 km; (b) Checkmate, altitude = 115 km; (c) Checkmate, altitude = 125 km; (d) Checkmate, altitude = 145 km; (e) K4, altitude = 105 km; (f) K4, altitude = 115 km; (g) K4, altitude = 125 km; (h) K4, altitude = 145 km; (i) K3, altitude = 105 km; (j) K3, altitude = 115 km; (k) K3, altitude = 125 km; (l) K3, altitude = 145 km; (m) Starfish, altitude = 105 km; (n) Starfish, altitude = 115 km; (o) Starfish, altitude = 125 km; (p) Starfish, altitude = 145 km.

为便于比较, 定义归一化的碎片动能沉积密度为碎片动能沉积密度与大气内能之比:

$$\eta_{\mathrm{D}} = e_{\mathrm{D}}/e_{\mathrm{air}}. \tag{14}$$

η_{D} 的大小能表征碎片动能对大气运动的影响程度, η_{D} 小于 0.1 时可忽略当地的大气运动受碎片动能的影响.

图 6 给出了 4 次高空核试验在不同海拔的归一化碎片动能沉积等值线云图及峰值点的位置. 从图 6 可以看到, 动能沉积区的总体形状一般为椭圆形. 纬度较高时 (K3, K4), 磁倾角较大 (大约 65°), 磁力线更接近垂直方向, 磁泡在南北方向的投影长度较短, 动能沉积区为偏心率较小的椭圆形; 纬度较低时 (Checkmate, Starfish), 磁倾角较小 (大约 31°), 磁力线更接近水平方向, 磁泡在南北方向的投影长度更长, 动能沉积区为偏心率较大的椭圆. 同一次试验中, 动能沉积区的面积随海拔高度增大而增大; 纬度、当量相似的两次试验中 (K3, K4), 爆高越高, 动能沉积区的面积越小. 从爆高较高的两次试验图像中 (图 6(i)—(p)) 可以看到, 在距爆心下方较远的水平面上, 动能沉积的峰值点出现在穿过爆心的地磁场磁力线与水平面的交点附近; 从爆高较低的 Checkmate 试验图像中 (图 6(a)—(d)) 可以看到, 在距爆心下方较远的水平面上, 动能沉积的峰值点更接近爆心在水平方向的投影点; K4 试验中, 由于爆心较低且磁倾角较大, 磁力线与爆心在水平方向的投影点 (0, 0) 非常接近, 动能沉积的峰值点与它们的距离都不大. 这是由于试验过程中在爆点附近产生了磁泡, 改变了地磁磁力线的位置, 在磁泡内部磁场为 0, 离子做直线运动, 在磁泡外部离子沿磁力线做螺旋运动, 故在远离磁泡区域动能沉积的峰值点在地磁磁力线附近, 磁泡内部动能沉积的峰值点在爆心投影点附近.

5 结 论

本文根据高空核爆炸的特点, 建立了高空核爆炸 X 射线辐射能在大气层沉积的解析计算模型和碎片动能大气沉积的数值计算模型, 计算了美国和苏联的 4 次大威力高空核爆炸试验 (Checkmate, Starfish, K3, K4) 的能量沉积情况, 分析了海拔 100—200 km 大气层中的碎片动能沉积规律, 得到以下结论.

1) 与 X 射线沉积区相比, 动能沉积区范围较小, 但其能量密度远高于 X 射线能量沉积密度.

2) 爆炸高度较高时, 动能沉积所需时间也会延长. 4 次高空核爆炸试验, 爆后 0.5 s 绝大部分动能沉积已完成. 动能沉积在爆心附近和海拔 115 km 附近存在吸收峰.

3) 动能沉积区在水平面上的总体形状一般为椭圆形, 爆炸纬度越高, 椭圆偏心率越小. 动能沉积区的水平截面积随海拔高度增大而增大; 纬度、当量相当时, 爆高越高, 动能沉积区的水平截面积越小.

4) 距爆点较远、远离磁泡时, 动能沉积峰值点在穿过爆心的地磁场磁力线附近; 距爆点较近、磁泡内部的动能沉积峰值点在爆心投影点附近.

参考文献

[1] Dyal, P. 2006 *J. Geophys. Res.* **111** A12211

[2] Gilbert J, Kappenman J, Radasky W, Savage E 2010 Meta-R-321

[3] Keith S, Earl W 2019 DTRA-TR-19-41

[4] Tesche F M, Barnes P R, Sakis A P 1992 DE92-010365

[5] Ouyang J M, Ma Y Y, Shao F Q, Zou D B, Liu J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 242801 (in Chinese) [欧阳建明, 马燕云, 邵福球, 邹德滨, 刘建勋 2012 物理学报 **61** 242801]

[6] Tao Y L 2010 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [陶应龙 2010 博士学位论文 (北京: 清华大学)]

[7] Yang B, Niu S L, Zhu J H, Huang L X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 202801 (in Chinese) [杨斌, 牛胜利, 朱金辉, 黄流兴 2012 物理学报 **61** 202801]

[8] Peng G Lg, Zhang J J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 180703 (in Chinese) [彭国良, 张俊杰 2021 物理学报 **70** 180703]

[9] Peng G L, Zhang J J, Chen J N 2021 *Phys. Fluids* **33** 076602

[10] Winske D 1991 AD-A243198

[11] Thomas V A, Brecht S H 1986 *Phys. Fluid* **29** 2444

[12] Brecht S H, Thomas V A 1988 *Comput. Phys. Commun.* **48** 135

[13] Gladd N T, Brecht S H 1995 DNA-TR-94-161

[14] U. S. Standard Atmosphere 1976 ADA035728

[15] Wang J G, Niu S L, Zhang D H 2010 *Parameter Handbook of High Attitude Nuclear Detonation Effects* (Beijing: Atomic Energy Press) p35 (in Chinese) [王建国, 牛胜利, 张殿辉 2010 高空核爆炸效应参数手册 (北京: 原子能出版) 第35页]

[16] Douglas S H 1982 *J. Comput. Phys.* **47** 452462

[17] Gargaté L, Bingham R, Fonseca R A, Silva L O 2007 *Comput. Phys. Commun.* **176** 419

[18] Lipatov A S 2002 *The Hybrid Multiscale Simulation Technology* (Berlin: Springer)

[19] Holland D H, Kaufman A M, O'Dell A A 1977 DNA-4501 F

[20] Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (Emp) Attack 2017 Vol. II: Recommended E3 HEMP Heave Electric Field Waveform for the Critical Infrastructures

High-altitude nuclear explosion energy accumulation law in atmosphere

Peng Guo-Liang [1)2)†] Zhang Jun-Jie [2)] Wang Zhong-Qi [1)] Ren Ze-Ping [2)]
Xie Hai-Yan [2)] Du Tai-Jiao [2)]

1) (*College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

2) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *China*)

(Received 3 June 2022; revised manuscript received 29 August 2022)

Abstract

An accumulation model of X-ray and debris in a high altitude nuclear explosion is built in this work. Using the established model, we simulate the energy accumulations of four large scale experiments (i.e. the Checkmate, Starfish, K3 and K4) conducted by the United States and the Soviet Union. The dynamics of the kinetic accumulation at 100–200 km altitude is analyzed. Our simulation results show that the kinetic patch spreads a relatively small spatial region and has a large energy density compared with the X-ray patch. The accumulation of the debris ions can be finished within around 0.5 s, and two absorption peaks (hence two kinetic patches) can be observed at an altitude of about 115 km and the burst point. The shape of the kinetic region projected onto the horizontal plane is roughly elliptical, the eccentricity will be smaller at higher latitudes, and the area will be larger at higher altitudes. Away from the bursting point, the maximum energy density of the kinetic patch is near the magnetic field line that crosses the bursting point. Within the magnetic bubble, the maximum energy density of the kinetic patch occurs near the bursting point.

Keywords: high altitude nuclear explosion, X-ray energy accumulation, debris kinetic accumulation

PACS: 07.77.Ka, 28.70.+y, 52.40.–w **DOI:** 10.7498/aps.71.20221112

† Corresponding author. E-mail: pgl02@163.com

物理学报 Acta Physica Sinica

Chinese Physical Society

Institute of Physics, CAS

高空核爆炸能量在大气层中的沉积规律

彭国良 张俊杰 王仲琦 任泽平 谢海燕 杜太焦

High-altitude nuclear explosion energy accumulation law in atmosphere

Peng Guo-Liang Zhang Jun-Jie Wang Zhong-Qi Ren Ze-Ping Xie Hai-Yan Du Tai-Jiao

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 71, 200702 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221112

在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.71.20221112

当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于流体-磁流体-粒子混合方法的高空核爆炸碎片云模拟

Hydro-Magneto-PIC hybrid model for description of debris motion in high altitude nuclear explosions

物理学报. 2021, 70(18): 180703 https://doi.org/10.7498/aps.70.20210347

基于大气声传播理论的爆炸声源能量估计

Energy estimation of explosion sound source based on atmospheric sound propagation theory

物理学报. 2021, 70(24): 244203 https://doi.org/10.7498/aps.70.20210562

高能质子在散裂靶中的能量沉积计算与实验验证

Calculation and verification for energetic proton energy deposition in spallation target

物理学报. 2021, 70(5): 052401 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201504

沉积态铀薄膜表面氧化的X射线光电子能谱

Surface oxidation of as-deposit uranium film characterized by X-ray photoelectron spectroscopy

物理学报. 2018, 67(2): 027301 https://doi.org/10.7498/aps.67.20172055

强场X射线激光物理

High field X-ray laser physics

物理学报. 2021, 70(8): 084101 https://doi.org/10.7498/aps.70.20210096

脉冲硬X射线能注量测量技术

Energy fluence measurement for pulse hard X-ray

物理学报. 2020, 69(14): 145202 https://doi.org/10.7498/aps.69.20191700