

高空核爆炸碎片云早期扩展规律研究

杨斌[†] 牛胜利 朱金辉 黄流兴

(西北核技术研究所, 西安 710024)

(2012年3月8日收到; 2012年5月5日收到修改稿)

利用磁流体力学理论建立了描述碎片云运动的壳层模型, 采用该模型模拟了美国 Starfish 高空核爆炸试验碎片云的运动参数, 通过与文献模拟结果的对比, 验证了所建模型的正确性. 针对典型大当量和小当量核爆的不同, 重点模拟了千吨级和百万吨级核武器在 100, 400 和 1500 km 高度爆炸时碎片云运动扩展情况, 分析了当量的差异引起的扩展规律的不同. 结果表明: 高空核爆炸时不同爆炸条件和大气环境对碎片云的扩展规律有着显著的影响, 不同方向上碎片云的环境参数差异明显.

关键词: 高空核爆炸, 碎片云, 扩展半径, 磁流体力学

PACS: 28.70.+y, 52.30.Cv

1 引言

碎片云是核爆炸后弹体材料、裂变产物及周围大气在高温、高压下形成的带电粒子云. 高空爆炸场景下, 带电粒子以极高的初速度向外扩展, 对近区空间飞行器有一定的力学破坏. 碎片云是核爆炸产生的其他地球物理现象的粒子源, 对核爆炸后产生的剩余核辐射、大气电离、人造辐射带、极光及共轭区效应等地球物理现象也有重要贡献^[1], 如模拟核爆引起的人造辐射带, 须知道带电粒子在地磁场中的初始分布, 才能根据扩散损失理论得到人造辐射带的演变规律^[2]. 电离层效应的研究也存在类似问题^[3]. 因此, 研究高空核爆炸初期碎片云的运动行为有重要意义.

目前国内外针对高空核爆炸碎片云开展的研究较少. Brecht 和 Thomas 用混杂粒子的方法对观测到的核爆现象进行了模拟, 并进一步地由 Brecht 等^[4]研究了碎片速度谱、离化水平以及辐射带中的动力学问题. 在一份美国国防部的研究报告中, 报告了 Brecht 研究小组利用高性能计算机采用三维混杂粒子编码 SHYPS, 模拟了 400 km 高度 1 Mt ($1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$) 当量的核爆炸碎片云情况, 得到核素

离子的较精细的分布图像^[5].

国内对高空核爆炸碎片云开展的研究很有限, 采用基于流体力学的滚雪球模型模拟爆高在 100 km 以下碎片云扩展和卷入大气的过程已有报道^[6], 但爆高在 100 km 以上碎片云运动规律的研究较少, 特别是 250 km 以上, 由于碎片云内带电粒子在地磁场中运动产生了复杂电磁现象, 滚雪球模型不再适用. 本文采用磁流体力学方法给出的碎片云壳层模型为相关研究提供了一个有效的方法. 根据碎片云与大气相互作用的特点, 考虑地磁场和高空大气带来的影响, 通过对连续性方程、动量方程和能量方程做适当修正, 构造了描述碎片云运动的磁流体力学方程组, 利用拉格朗日差分方法进行求解, 研究了典型核爆炸场景下爆炸初期碎片云的运动扩展规律.

2 碎片云运动的理论模型

2.1 模型基本假设

碎片的运动过程是多种离子的动力学过程, 其真实的物理过程十分复杂. 考虑在磁流体力学框架下, 利用现有的计算条件进行模拟, 需要进行合理

[†] E-mail: bin.yang@sina.cn

的简化模型.

2.1.1 单一核素近似

碎片云包括裂变产物、剩余核燃料以及来自核武器其他部分的离子(如碳离子、铝离子等). 爆炸开始后, 这些核素以爆心为中心沿径向高速运动. 在碎片与大气的相互作用过程中, 不同核素间的质量差异、电荷差异等导致了扩散过程的差异. 考虑到计算模拟的需要, 可将多成分的碎片云等效处理为单一核素的流体, 做近似计算. 采用此近似在计算模拟上可以极大地降低运算量; 同时, 选取适当的核素作为考察的流体, 同样可以研究碎片云整体运动的特点, 得到比较合理的物理结论.

和实际多种核素的结果相比, 等效为单一铁物质的模拟结果就是多种核素的物理参量的平均结果, 两者会有一定偏差. 如扩展半径, 比铁重的离子实际会分布在外层, 扩展半径偏大; 而比铁轻的离子会分布在内层, 扩展半径偏小.

2.1.2 壳层模型假设

在扩散过程中, 碎片云表层的粒子受到高空环境的影响较大, 运动速度迅速变小; 而云体内部的粒子受环境影响较小, 速度变化不大. 由于速度的差异, 云体内部的粒子趋向云体表面, 从而内外碎片速度又趋向一致, 使得碎片的主要部分集中于表面的壳层区域. 当然由于随机扩散效应, 云体内部同样存在部分粒子. 我们将碎片云的主体部分作为计算模拟的对象, 忽略内部的少数粒子, 认为在同一个扩散方向上内外层粒子的速度是一样的, 整体的碎片云为壳层结构. 需要说明的是, 因为考虑的是分布在壳层区域上的多数粒子, 忽略了内部分布的少数离子, 说明由此可能导致我们模拟的碎片云密度会略微偏大.

2.2 理论模型的建立

核爆炸初期, 由于碎片云处于高温、高压和高速运动的状态, 而大气是相对静止的冷气体, 两者存在复杂的碰撞作用, 碰撞电离和电荷交换是重要的碰撞效应. 碰撞电离效应是指碎片云中的离子与电中性的大气分子碰撞, 使大气分子电离成离子, 并成为碎片云的一部分; 电荷交换作用是指碎片云中部分离子与周围中性分子发生电荷交换, 离子成为新的中性分子, 而原有的中性分子变为新的离子, 成为碎片云的一部分. 这些作用使碎片云与周围的

稀薄大气分子发生交换, 从而改变了自身的状态.

根据磁流体力学运动方程的一般形式^[7], 考虑碎片云运动过程中与大气分子原子的电荷交换、碰撞电离, 对一般形式进行修正, 得到描述碎片云运动的方程组:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla P + \rho g + \frac{1}{c} \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \mathbf{f}_v + \mathbf{f}_\tau, \quad (1)$$

ρ 为碎片云的密度; $\mathbf{f}_v = -\left(\rho n_n v^2 \frac{m_n}{m_i}\right)(\sigma_x + \sigma_i)$ 为碎片粒子和大气粒子碰撞的阻力项, n_n 为大气的数密度, m_n 为大气分子量, m_i 为碎片云的原子质量, σ_x 表示有效的电荷交换截面, σ_i 表示碰撞电离截面; $\mathbf{f}_\tau = -\nabla Q$ 为碎片粒子的黏滞项, Q 是黏滞压强; \mathbf{J} 为电流强度, 包括带电粒子在磁场中运动和磁场变化产生的电流项. 利用 Maxwell 应力表达式并忽略重力影响, (1) 式可表示为

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla \left(P + \frac{B^2}{8\pi} + Q \right) - \left(\rho n_n v^2 \frac{m_n}{m_i} \right) \times (\sigma_x + \sigma_i) + \sigma \mathbf{B}^2 \mathbf{v}. \quad (2)$$

(2) 式在一维球坐标下可表示为

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{d}{dr} \left(\Delta P_\perp + \frac{\Delta(B_\perp^2)}{8\pi} + Q \right) - \left(\rho n_n v^2 \frac{m_n}{m_i} \right) (\sigma_x + \sigma_i) - \sigma B_\perp^2 v, \quad (3)$$

其中 B_\perp 表示和径向相垂直的分量, P_\perp 表示垂直磁场的速度引起的压强.

对于无碰撞流体, 若考虑碎片云中离子与环境中性粒子的相互作用, 其微分形式的质量连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = \sigma_i n_n v \frac{\rho}{m_i} m_n + \sigma_x n_n v \frac{\rho}{m_i} (m_n - m_i). \quad (4)$$

由 Maxwell 方程组、法拉第定律、安培定律、欧姆定律的微分形式, 可得到磁扩散方程

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \nabla \times [\mathbf{v} \times \mathbf{H}] - \frac{c^2}{4\pi\sigma} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{H}). \quad (5)$$

考虑碎片云的磁场是无源场, 在球坐标系下垂直于 r 方向上, (5) 式可简化为

$$\frac{dH_\perp}{dt} = -H_\perp \frac{dv}{dr} - \frac{2H_\perp v}{r}. \quad (6)$$

对于任意的流体, 忽略重力势能, 其体内总能量包括了动能和内能, 总能量的净增率为

$$\frac{dW}{dt} = \int_V \left(\frac{d}{dt} (\rho e) + \mathbf{v} \cdot (\rho \mathbf{e}) \right) dV, \quad (7)$$

其中, $e = \varepsilon + \frac{v^2}{2}$, ε 和 $\frac{v^2}{2}$ 分别代表内能密度和动能密度. 由能量变化和功率的关系可得

$$\frac{dW}{dt} = P1 + P2 + P3 + P4 + P5, \quad (8)$$

$P1$ — $P5$ 分别包含了应力张量、电磁力、碰撞阻力对碎片云所做功的功率, 以及离子随碎片云一起运动的动能、碰撞导致的随体能量. 代入各功率分量, 可得到

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt}(\rho e) + \mathbf{v} \cdot (\rho e) \\ &= -\nabla \cdot (p\mathbf{v}) + \mathbf{v} \cdot \nabla Q + \frac{1}{c}(\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} \\ & \quad + (\varepsilon_0 + \frac{v^2}{2})k + \mathbf{f}_v \cdot \mathbf{v}. \end{aligned} \quad (9)$$

代入压强关系式

$$P = (\gamma - 1)\rho\varepsilon, \quad (10)$$

得碎片云压强随时间演变的关系式

$$\begin{aligned} \frac{dP_{\perp}}{dt} &= \frac{2P_{\perp}}{B} \frac{dB_{\perp}}{dt} + \varepsilon_0 \left(\frac{\rho}{m_i} n_n v \right) \\ & \quad \times [\sigma_x(m_n - m_i) + \sigma_i m_n]. \end{aligned} \quad (11)$$

由 (3), (4), (6), (11) 式联立, 得模拟碎片云运动的磁流体力学方程组.

该模型相对于原有的流体力学方法的滚雪球模型, 考虑地磁场和高空大气带来的影响, 根据碎片云与大气相互作用的特点, 加入了碎片云运动过程中碰撞电离项和电荷交换项, 对连续性方程、动量方程和能量方程做适当修正, 构造了描述碎片云运动的磁流体力学方程组, 能更准确地反映碎片云的演化规律.

2.3 碎片云运动的初始参数

核爆炸使得碎片获得巨大动量, 它以爆点为中心沿径向高速运动, 粒子与粒子之间在切线方向上的相互作用可以忽略. 假设碎片云在同一个扩散方向上粒子的速度是一致的, 整体的碎片云为壳层结构, 忽略壳层区域内部随机扩散效应的少数粒子. 碎片云初始时刻的参量, 采用核爆炸的状态方程 [8] 来计算, 得到初始时刻碎片云的温度、热压强、速度、总压强:

$$E = 1.25 \times 10^{-2} \frac{\rho}{M} T + 7.65 \times 10^{-25} T^4, \quad (12)$$

$$P = 0.83 \times 10^{-2} \frac{\rho}{M} T + 2.55 \times 10^{-25} T^4. \quad (13)$$

再考虑碎片云中能量被内能 E_i 和动能 E_k 所分配, 估算得到初始速度 v_0 , 如下:

$$E_i = \frac{pV}{(\gamma - 1)} = \frac{1}{2} N k_B T, \quad (14)$$

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2, \quad (15)$$

$$E_i + E_k = \eta W. \quad (16)$$

变量的含义如下: $E = \eta W/V$ 为爆炸产物能量密度 (kJ/cm^3), W 为爆炸当量 (kt), V 为爆炸体积 (m^3), ρ 为爆炸产物密度 (g/cm^3), T 为爆炸产物温度 (K), P 为爆炸产物压力 (GPa), M 为有效分子量.

3 结果及分析

为验证模拟方法的正确性, 本文模拟了一次典型高空核爆炸试验的碎片云演变, 该高空核试验是 1962 年在美国进行的代号为 Starfish 的试验, 爆炸当量为 1.5 Mt, 爆点在约翰斯顿岛上空 400 km. 用碎片云程序模拟了碎片云的扩展速度、压强、温度等随时间的演化, 这里给出碎片云扩展范围和文献的比较图. 需要说明的是因为文献仅给出了 0.1—0.5 s 的结果, 为了清晰地显示结果比对情况, 从中选取了 3 个时刻. 图 1 的实心数据点为本文模拟计算结果, 空心数据点为文献 [9] 的结果, 直线表示地球磁场的方向. 核爆炸后 0.1—0.5 s, 碎片云的水平扩展尺度达 600 km 以上, 在垂直方向上, 爆点下方距离地面 300 km 处出现碎片云的沉积, 向上距离地面约 800 km 的高度. 本文结果与文献 [9] 基本符合.

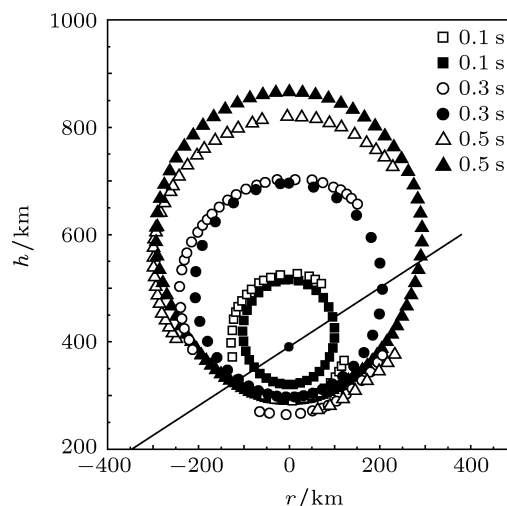


图 1 Starfish 试验子午面模拟 (实心符号) 与文献 [9] (空心符号) 的比较

为了搞清楚爆炸当量不同、爆高不同对扩展规律的影响,模拟了千吨级小当量和百万吨级大当量核武器在 100, 400 和 1500 km 高度爆炸时碎片云的运动、扩展情况,如图 2 和图 3 所示. 可见,碎片云的扩展尺度与爆炸当量和爆高有很大关系. 百万吨级爆炸碎片云的扩展尺度比千吨级的明显大得多,如 0.5 s 时向上的方向上,100, 400, 1500 km 爆高下大当量均比小当量的扩展尺度约大 20 倍. 比较千吨级与百万吨级核武器碎片云的扩展参数,得到如下结论.

1) 100 km 爆高时,百万级大当量核爆产生的碎片云初始速度大,因此扩展尺度大,受到大气环境的影响更明显,其在爆点下方 70 km 左右的高度形成沉积,不再继续向下扩散;同样爆高下,千吨级小当量核爆的碎片云初始速度小,扩展尺度小,受大

气影响产生的沉积效应不明显,呈现对称分布. 另外,小当量产生的碎片云在垂直磁场方向上明显受到磁场的约束作用,而大当量的碎片云表现不明显.

2) 400 km 高度的情况和 100 km 相比,碎片云受到大气的作用减弱,百万吨核爆产生的碎片云在爆点下方 100 km 的地方运动速度减慢,逐渐沉积,千吨级产生的碎片云沉积效应仍不明显. 此高度下,大当量和小当量产生的碎片云都会受到地磁场的作用,沿磁场方向朝北向偏移.

3) 1500 km 爆高的条件下,大气的影响十分微弱,扩展尺度成倍增加,这个高度下,大气参数随高度变化极其缓慢,碎片云在形状上呈现各个方向球对称分布. 10^6 与 2×10^3 t 核爆碎片云扩展形状类似,但是尺度大了约 20 倍,主要是碎片云初始速度的差异带来的影响.

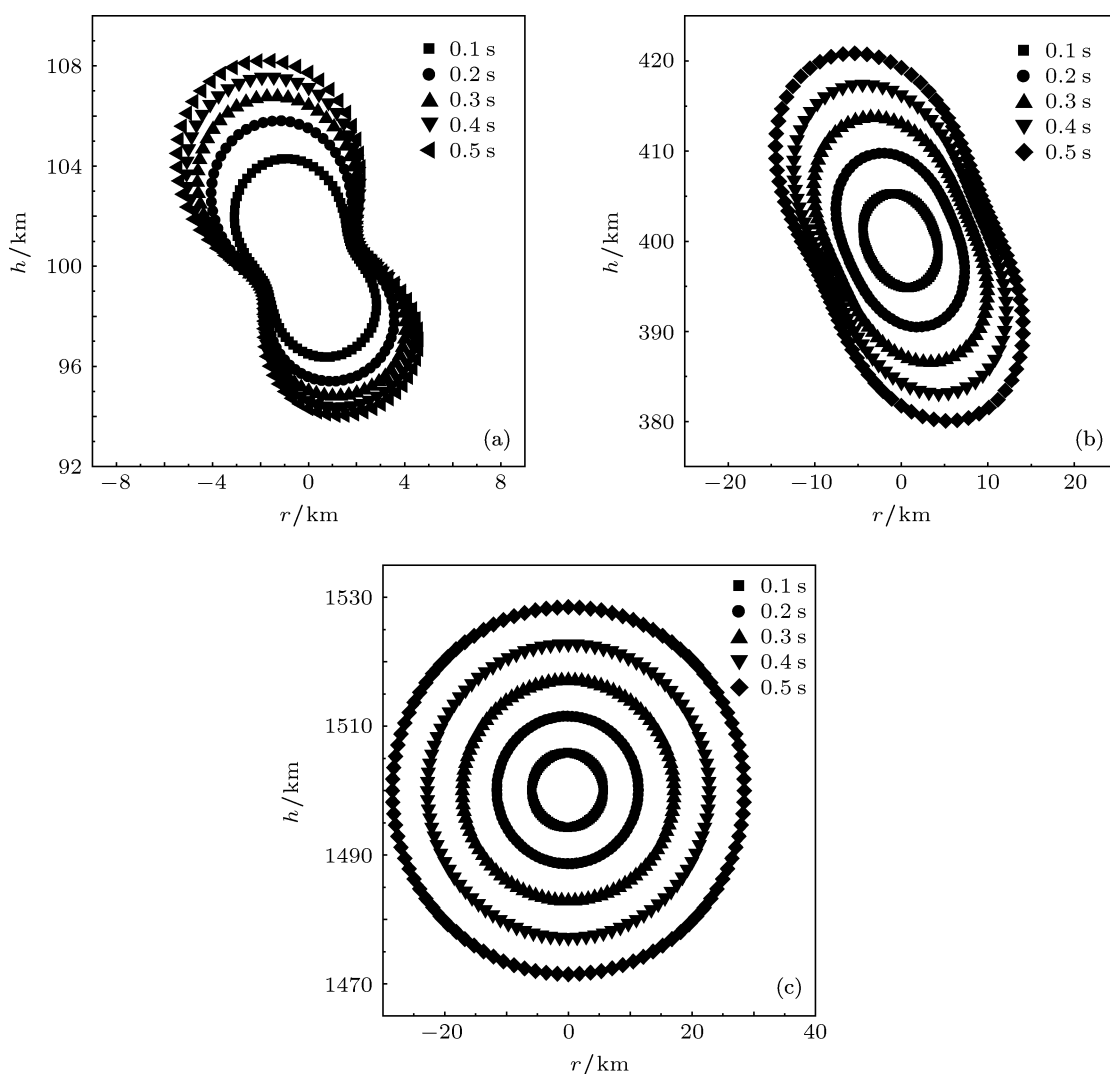


图 2 2 kt TNT 当量不同爆炸高度下碎片云的扩展尺度 (a) 100 km; (b) 400 km; (c) 1500 km

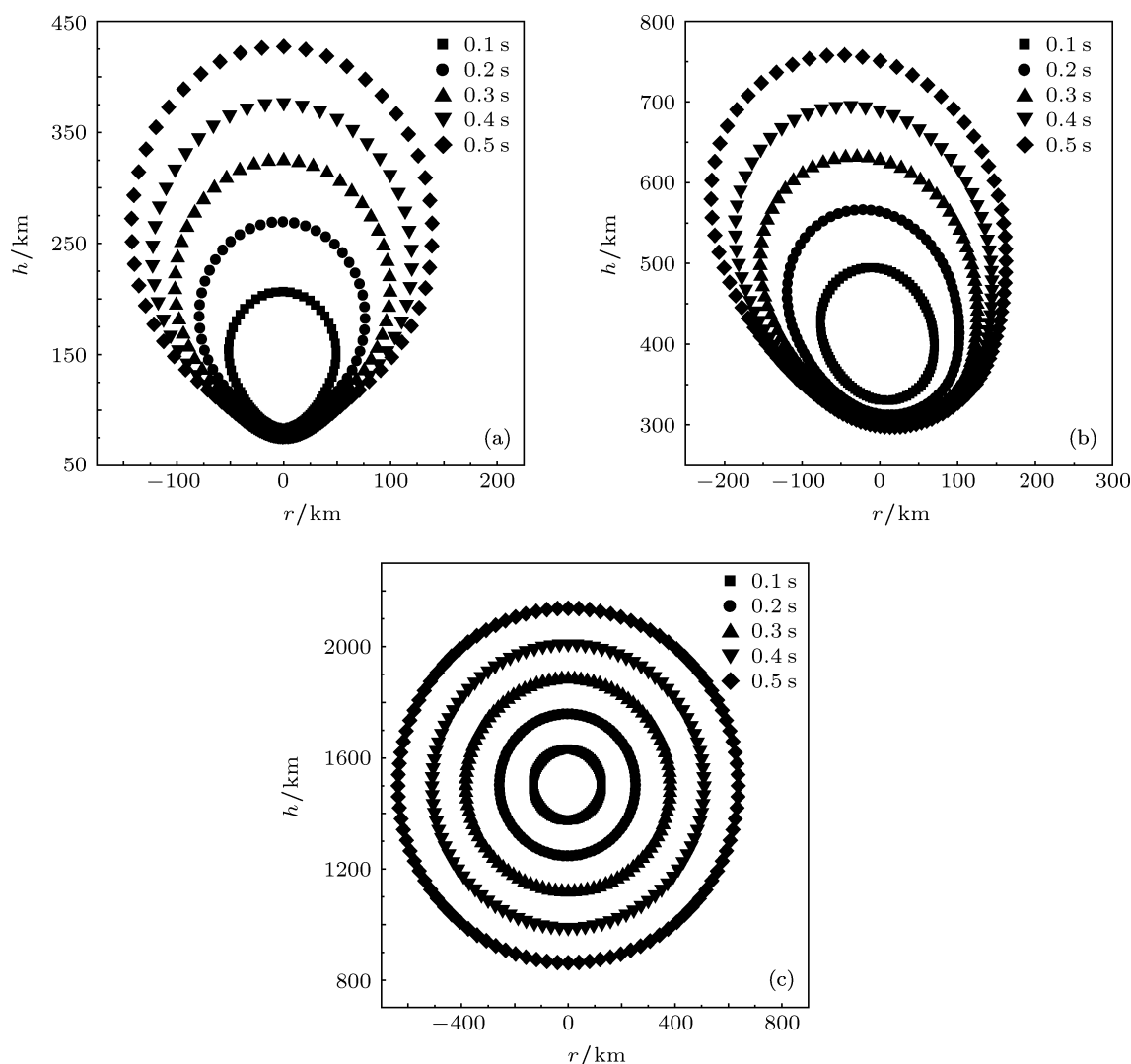


图3 1 Mt TNT 当量不同爆炸高度下碎片云的扩展尺度 (a) 100 km; (b) 400 km; (c) 1500 km

目前,小当量数据的计算结果尚无可以对比验证的数据. 当量的不同,对于 100 km 以下的爆炸会有着明显的影响,因为在这个高度会形成明显的火球现象,它是 X 射线电离大气的表现,会对碎片云的运动状态有影响. 但是对于 100 km 以上的高度,可以不考虑因为当量的不同引起的碎片云外界环境带来的不同,而主要考虑由状态方程求得的当量不同带来的碎片云初始参数的不同.

图 4 给出了这三种爆高条件下爆点上方碎片云数密度的分布对比,可以看出随着爆炸高度的增加,碎片云数密度随时间的变化下降得更快. 图 5 给出了爆高 400 km、爆炸当量为 1, 10, 100 kt 和 1 Mt 时爆点上方碎片云数密度的分布对比,可以看出,爆点上方随爆炸当量提高,碎片云数密度同比例逐渐降低,这是由于虽然碎片离子数相同,但

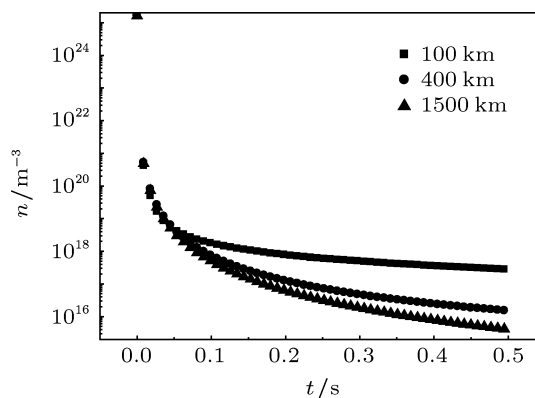


图4 三种爆高下千吨级当量核爆时爆点上方碎片云数密度的分布对比

是爆炸当量的提高使得碎片离子获得了更大的初速度,分布在更宽广的区域内,碎片体积获得了同

比例增大.

碎片云的密度, 目前尚无可以进行比对的数据, 只能根据碎片云扩展尺度, 以及碎片云扩展过程中形成壳层的特点, 说明碎片云的密度的变化规律符合物理规律, 是相对合理的.

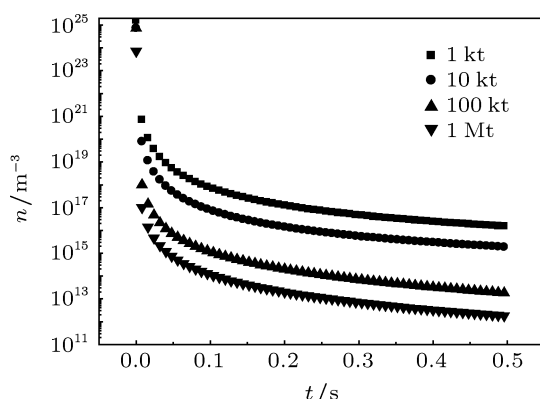


图5 爆高 400 km 四种不同爆炸当量爆点上方碎片云数密度的分布对比

4 结论

高空核爆因为爆点周围环境的特点, 爆炸后碎片云的扩展规律明显不同于低空和地面爆炸. 本文根据碎片云与大气相互作用的特点, 考虑地磁场和高空大气带来的影响, 通过合理简化复杂的物理过程, 修正连续性方程、动量方程和能量方程, 构造了描述碎片云运动的磁流体力学方程组, 利用该模型研究了典型核爆炸场景下爆炸初期碎片云的运动扩展规律, 通过分析可以得到以下结论.

1) 对于百千米以上核爆碎片的演变, 已经不再是单纯卷入空气的变质量物理过程. 由于空气变得稀薄, 地磁场的影响开始显著增强, 碎片云的早期扩散以壳层的形式存在, 采用磁流体力学方法对碎片云的统计性规律开展研究, 可以更准确地对其物理过程加以模拟.

2) 碎片云高空扩展规律和核爆的爆炸当量、爆点高度紧密相关. 爆炸当量主要带来同高度下扩展尺度的明显变化; 爆点的高度则直接决定了爆点周围大气的环境特点, 而大气环境通过大气密度、温度、压强、分子量等参量将影响传递给碎片云, 使得碎片云在不同方向上扩展的对称性、沉积的特点呈现明显不同; 另外, 高空地磁场的分布也引起碎片云扩展形态的细微变化, 对扩展尺度影响不大.

本文的数值模拟工作仅考虑了碎片云与中性空气分子的作用, 与离子的作用并未加入, 这部分研究结果将在以后的研究中给出. 基于本文研究的是爆高在百千米以上碎片云的情况, 首先随着高度的增加, 大气粒子的数密度下降好几个数量级, 大气对碎片运动的影响会越来越小; 其次, 大气中离子所占比例很小, 即使考虑了与离子的作用, 其对模拟结果造成的影响也比较有限.

通过本文的研究, 可以对核爆炸形成的碎片云环境特点有一个比较清楚的认识, 研究结果可应用于核爆炸人造辐射带、电离层等环境研究的粒子源, 并为进一步开展混杂粒子模拟方法的研究打下基础.

- [1] Wang J G, Niu S L, Zhang D H 2010 *Parameter Handbook of High Altitude Nuclear Detonation Effects* (Beijing: Atomic Energy Press) p130 (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: 原子能出版社) 第 130 页]
- [2] Gu X D, Zhao Z Y, Ni B B, Wang F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5871 (in Chinese) [顾旭东, 赵正予, 倪彬彬, 汪枫 2009 物理学报 **58** 5871]
- [3] Tao Y L, Wang J G, Niu S L, Zhu J H, Fan R Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5914 (in Chinese) [陶应龙, 王建国, 牛胜利, 朱金辉, 范如玉 2010 物理学报 **59** 5914]
- [4] Brecht S H, Gladd N T, Ferrante J R 1995 DNA-TR-95-56
- [5] Brecht S H 1999 DTRA01-99-C-0204
- [6] Qiao D J, Hua M 1986 *Antinuclear Hardening* **3** 98 (in Chinese) [乔登江, 华鸣 1986 抗核加固 **3** 98]
- [7] Wu Q F, Li H 2007 *Magnetic Hydrodynamic* (Changsha: National University of Defence Technology Press) p23 (in Chinese) [吴其芬, 李桦 2007 磁流体力学 (长沙: 国防科技大学出版社) 第 23 页]
- [8] Qiao D J, Han X A, Li R S 2002 *Phenomenological Introduction of Nuclear Detonation* (Beijing: National Defence Industrial Press) p43 (in Chinese) [乔登江, 韩学安, 李如松 2002 地下核爆炸现象学概论 (上册) (北京: 国防工业出版社) 第 43 页]
- [9] John Z, Herman H, Petschek A G 1967 *Radiation Trapped* (New Mexico: Los Alamos Scientific Laboratory) p671

Research of the early debris expansion from high-altitude nuclear explosions

Yang Bin[†] Niu Sheng-Li Zhu Jin-Hui Huang Liu-Xing

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

(Received 8 March 2012; revised manuscript received 5 May 2012)

Abstract

Based on magnetohydrodynamic theory a shell model is developed to describe debris motion of high-altitude nuclear explosion. The debris motion parameter of Starfish is simulated. The model is verified by comparison with the results available from the literature. For the comparison between typical high-yield and low-yield nuclear explosion, the debris motions of kiloton and megaton at 100 km, 400 km and 1500 km are especially simulated. The difference in expansion law, caused by explosion yield, is analyzed. The results show that explosion condition and atmospheric environment have a significant influence on the expansion of the law of the debris cloud, and the debris environmental parameters in different directions are significantly different from each other.

Keywords: high-altitude nuclear explosion, debris cloud, expansion distance, geomagnetism

PACS: 28.70.+y, 52.30.Cv

[†] E-mail: bin_yang@sina.cn