

高空核爆炸形成人工辐射带的数值模拟*

顾旭东† 赵正予 倪彬彬 汪 枫

(武汉大学电子信息学院, 武汉 430079)

(2008 年 8 月 13 日收到, 2009 年 3 月 16 日收到修改稿)

基于 Stömer 关于带电粒子在地球磁场中运动的理论模型, 分析得出高能电子在地球周围的运动区域, 结合高空核爆形成放射性烟云的经验模型, 推断高空核爆在地球周围形成人工辐射带的基本区域, 进而利用高空核爆裂变特性和辐射带中高能粒子的分布特性, 计算得到高空核爆形成人工辐射带的电子密度通量, 并对高空核爆激发的人工辐射带特征与核爆炸的爆点纬度、高度及当量之间的关系作了初步的定量分析. 数值模拟结果表明, 在一定的条件下, 0.1—1Mt TNT 当量的高空核爆, 预计在地球周围可形成电子通量密度比自然辐射带高 3—4 个量级的人工辐射带. 形成的人工辐射带中心位置主要受核爆爆点地磁纬度的影响, 核爆的爆高和核爆的当量则对人工辐射带的厚度及其中高能电子的通量密度有一定的影响.

关键词: 高空核爆, 人工辐射带, 高能电子通量, 爆炸当量

PACC: 9430H, 2870

1. 引 言

地球辐射带一般可分为两个区域: 内辐射带和外辐射带. 内辐射带大约位于 $1.1R_e$ — $2.5R_e$ (R_e 为地球半径) 之间, 中心大约在 $1.5R_e$, 里面充满高能电子和高能质子, 普遍表现出长期的稳定性. 高能质子的能量主要在 10—100 MeV 之间, 被认为是由宇宙射线反照中子衰变产生的. 高能电子则源于外磁层, 能量主要位于几百 keV; 外辐射带大约在 $3R_e$ — $8R_e$ 之间, 中心区域位于 $4R_e$ — $5R_e$, 同样充满高能电子和质子, 这些高能粒子都被认为起源于外磁层, 其 1 MeV 的电子密度通量可以达到 $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的量级. 外辐射带比内辐射带更具动态性, 受太阳活动的影响更大. 在内、外辐射带之间是一个具有较低电子密度的区域, 称为槽区^[1-4]. 在地磁扰动期间, 磁层磁场和电场快速变化使得位于外磁层的粒子向内径向扩散并且得到加速, 同时, 这些高能粒子与磁层中尤其是等离子体层中的波动的相互作用导致粒子的投掷角扩散, 最后高能粒子沿着磁力线沉降到大气层中. 径向扩散导致粒子的加速与横跨磁力线的注入和投掷角扩散导致粒子损失之间的平衡效应, 很

大程度上决定了辐射带高能粒子的空间分布^[5].

辐射带中的电子能量大部分在 100 keV 到若干 MeV 之间, 其中能量不低于 1 MeV 的电子就是“相对论电子”, 能使运行于辐射带区域的卫星瘫痪或者降低卫星的使用寿命, 也能对穿行于其间的航天器和宇航员产生不利的影响. 人们为了了解辐射带的形成机制做了大量的实验研究. 在 1956—1962 年期间, 美国和前苏联相继共进行了约 24 次高空核试验, 以探索高空核爆炸的规律. 最著名的是由 Christofilos 主导的、美国空军在 1958 年进行的一系列代号为 Argus(百眼巨人)的高空核爆试验和 1962 年进行的称为 Starfish(海盘车)的高空核爆试验^[6], 爆后被地磁场捕获的电子沿着地磁场磁力线在两个磁镜点间来回振荡并且向东漂移, 在内辐射带区域形成了比自然辐射带高出 3—4 个量级的高能电子带, 证实了高能电子确实能被地球磁场捕获, 形成部分环绕地球的高能电子带, 被称之为人工辐射带. 它给运行或穿行其间的卫星、航天器和航天员带来的不利影响更为严重, 它还可能阻断无线电通信, 甚至能使运行在轨道上的弹道导弹失去作用, 因而具有潜在的军事用途^[7-9]. 因此, 有必要弄清楚高空核爆和人工辐射带之间的关系.

* 国家自然科学基金(批准号: 40774100)资助的课题.

† E-mail: whu.guxudong@gmail.com

Stömer^[10], Rossi 和 Olbert^[11]等对带电粒子在地球磁场中的运动做了大量的研究,得出了一系列的经典结论,这是我们研究高空核爆形成的人工辐射带的基础. 1956—1962 年美国和前苏联的高空核爆炸试验验证了高空核爆炸形成人工辐射带的可能性,把对高空核爆形成的人工辐射带的研究推向了一个新的阶段.

本文从 Stömer 提出的带电粒子在偶极子磁场中运动的理论出发,以高空核爆烟云模型为基础^[11-14],通过数值模拟来研究高空核爆(爆高、爆点的位置和当量)和人工辐射带(位置和电子密度)之间的关系.应用 Stömer 的理论,计算高能电子在地球偶极子磁场中的运动区域.以高空核爆烟云模型为基础,根据电子运动区域的边界来确定人工辐射带的基本区域.在一定的假设条件下,根据核爆产生的 β 粒子在地磁场中的运动规律,确定这个区域中人工产生的高能电子的通量密度.最后给出了数值模拟的结果并进行讨论,包括在当量一定的情况下,高空核爆产生的人工辐射带位置和爆点的位置及爆高之间的关系,并估算可能激发的人工辐射带的电子密度量级;在爆点位置和爆高一定的情况下,高空核爆产生的人工辐射带位置和电子数密度与核爆当量之间的关系.

2. 物理模型

2.1. 高能带电粒子在地球偶极子场中的运动

核爆产生的人工辐射带,是核爆烟云衰变产生的 β 粒子被地磁场捕获于其中形成的,因此为了模拟人工辐射带的生成,必须研究带电粒子在磁场中的运动.带电粒子在地球偶极子场中的运动满足洛伦兹方程,由于非电磁力在考虑辐射带时可以忽略,在相对论情况下高能粒子的动力学方程^[15]为

$$m_0 \frac{d(\gamma v)}{dt} = q(E + v \times B), \quad (1)$$

式中, m_0 为粒子的静止质量, q 为粒子的电荷, v 为粒子的速度, $\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ 为相对论因子(c 为光速), E 和 B 分别为与电子运动有关的电场强度和磁场强度, t 为时间.在研究辐射带中的高能粒子的运动时,电场 E 成为次要因素,可以忽略.在忽略电场 E 的情况下,严格求解相对论条件下的粒子运动方程(1)是比较复杂的,存在一定的困难,所以我

们需要寻找一种切实可行的方法,来确定粒子运动的区域.本文采用的是 Stömer 方法. Stömer^[10]最早提出了带电粒子在地球偶极子场中运动的理论, Rossi 和 Olbert^[11]总结了相关数值计算,运用此理论可以求得粒子的运动区域.假设空间任意点的坐标为 (r, λ, ϕ) , r 为径向距离, λ 为地磁纬度, ϕ 为经度,则粒子的运动方程^[11,14,15]可以表述为

$$\left(\frac{dr}{ds}\right)^2 + r^2 \left(\frac{d\lambda}{ds}\right)^2 = 1 - \left[h\left(\frac{r}{r_s}, \lambda\right)\right]^2, \quad (2)$$

其中 ds 由 $(ds)^2 = (dr)^2 + r^2 \cos^2 \lambda (d\phi)^2 + r^2 (d\lambda)^2$ 确定; r_s 为 Stömer 半径,对于电子有 $r_s = (eM/p)^2$, e 为电子的电量, M 为地磁场磁矩, p 为粒子的动量; $h(r/r_s, \lambda) = -(r_s/r)^2 \cos \lambda - (r_s/r) \chi (2\gamma/\cos \lambda)$, $\gamma = (1/2) \chi - (r/r_s) \cos \lambda \sin \chi - (r_s/r) \cos^2 \lambda$, χ 为常数, χ 为粒子轨道和它在子午面内投影的夹角, $\sin \chi = r \cos \lambda \cdot \phi/v$.

一般情况下,带电粒子不可能永远在同一子午面内运动,因为粒子的受力是垂直于子午面的,为了研究辐射带中的带电粒子在子午面内的分布,我们只讨论粒子在随着粒子一起运动的子午面内的运动,也就是只讨论粒子坐标的 r, λ 分量的变化.由方程(2)可知,粒子必定在 $h(r/r_s, \lambda) < 1$ 的区域内运动,粒子可进入区域的边界为 $h(r/r_s, \lambda) = \pm 1$,可得到4个解为

$$\frac{r_1}{r_s} = -\frac{\gamma}{\cos \lambda} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{\cos^2 \lambda} - \cos \lambda}, \quad (3)$$

$$\frac{r_2}{r_s} = -\frac{\gamma}{\cos \lambda} - \sqrt{\frac{\gamma^2}{\cos^2 \lambda} - \cos \lambda}, \quad (4)$$

$$\frac{r_3}{r_s} = \frac{\gamma}{\cos \lambda} - \sqrt{\frac{\gamma^2}{\cos^2 \lambda} + \cos \lambda}, \quad (5)$$

$$\frac{r_4}{r_s} = \frac{\gamma}{\cos \lambda} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{\cos^2 \lambda} + \cos \lambda}. \quad (6)$$

本文中研究的高能粒子为电子,有 $\gamma < 0$,由方程(5)可知 $r_3 < 0$,故舍去; r_1, r_2, r_4 即为粒子在地磁场中的运动区域的边界,当只考虑粒子在内辐射带区域运动时,只需要 r_2, r_4 .根据粒子的初始位置,就可以确定粒子运动的上下边界.我们假设核爆激发的高能粒子可能达到上下边界之间区域的任何地方.

2.2. 人工辐射带区域

为简化计算,又能较好地体现核爆烟云的真实情况,做如下假设(1)核爆产生的放射性烟云的形

状为薄饼状,且烟云内的放射性碎片是均匀分布的。
(2)烟云的中心相对于爆点无偏移。

烟云的尺寸由烟云中心的高度 $H_0(t)$ 及烟云的半径 $R_0(t)$ 共同给定。当给定爆点的纬度时,在子午面内,根据烟云在子午面内投影的两个端点的位置,可以用方程(4)(6)确定烟云两个端点的粒子运动的上下边界。在得到的四个值之中,取最大值为上边界 $R_{up}(\lambda)$,最小值为下边界 $R_{down}(\lambda)$,在子午面内就会形成一个区域,从烟云中释放出的 β 粒子就会在这个区域内运动,这就是我们估算的子午面内人工辐射带区域。

2.3. 人工辐射带中高能电子的通量

β 粒子主要是由核爆碎片云缓慢释放出来的,释放出来的 β 粒子一部分向下运动,在爆点下方区域和中性大气粒子相互作用,产生附加电离;一部分向上运动,到达另一个半球的镜点位置后,其中一部分 β 粒子与共轭点下方的中性大气相互作用,使大气电离,产生附加电离,另外一部分在镜点反弹,被地球磁场捕获在两个半球的镜点之间做弹跳运动,形成人工辐射带。本文中地球磁场捕获的高能电子未考虑与其他粒子或者波相互作用发生的能量损失。

首先计算在爆后 t 秒时缓发 β 粒子向上的辐射功率 $P'_\beta(t)$,即在单位时间内,核爆烟云释放的向上运动的 β 粒子的总能量。假设向上和向下传输的 β 粒子数各占总 β 粒子数的一半,则 $P'_\beta(t)$ 为^[16-18]

$$P'_\beta(t) = \frac{2.6 \times 10^{34} \eta_\beta W_f q_\beta(t)}{2}, \quad (7)$$

式中, η_β 是 β 粒子在裂变能量中所占的份额,对于高空核爆炸,一般取 $\eta_\beta = 0.035$; W_f 是裂变当量,单位为 Mt TNT,一般取 $W_f = 0.5W$, W 为核爆总当量; $q_\beta(t)$ 是缓发 β 粒子的能量释放率, $q_\beta(t) = 1/6$ ($0 < t \leq 1$), $q_\beta(t) = (1/6)t^{-1.2}$ ($t > 1$), t 的单位为 s。

向上运动的 β 粒子只有一部分被地球磁场捕获,形成人工辐射带。 t 时刻被地球磁场捕获的 β 粒子的辐射功率 $P_\beta(t)$ 为

$$P_\beta(t) = P'_\beta(t)\mu(t), \quad (8)$$

式中 $\mu(t)$ 是 β 粒子的捕获概率, $\mu(t) = (1 - B_0/B_m)^2$, B_0 为 t 时刻烟云中心处的磁场强度,与 $H_0(t)$ 有关, B_m 为镜点处的磁场强度。

粒子在由 Stömer 运动方程确定的区域中运动时,每个垂直截面的粒子通量相等,并且在垂直截面上高能电子均匀分布。本文中假定高空核爆产生的

人工辐射带的高能电子的平均能量为 1 MeV;高能电子由于垂直于子午面的运动,很快将均匀分布在地球周围的由 Stömer 运动方程确定的区域中。那么在爆后 t 时刻,人工辐射带中的任意一点 (r, λ) 其中 $R_{up}(\lambda) \leq r \leq R_{down}(\lambda)$, $-\pi/2 \leq \lambda \leq \pi/2$ 的高能电子通量密度为

$$I_\beta(r, \lambda, t) = \int_0^t \frac{P'_\beta(t) \times 10^{-6}}{\pi \pi(t) \sqrt{R_{up}^2(\lambda) - R_{down}^2(\lambda)}} dt \\ = \int_0^t \frac{2.6 \times 10^{18} \eta_\beta W_f q_\beta(t) \mu(t)}{2\pi \pi(t) \sqrt{R_{up}^2(\lambda) - R_{down}^2(\lambda)}} dt \quad (9)$$

式中 $\pi(t) = T_b(t)/2$, $T_b(t)$ 为 t 时刻粒子的弹跳周期,单位为 s,取值可参考文献[14]; $R_{up}(\lambda)$, $R_{down}(\lambda)$ 单位为 km,则高空核爆产生的人工辐射带中,任意一点的 (r, λ) 的电子总通量密度为

$$I_\beta(r, \lambda) = \lim_{t \rightarrow \infty} I_\beta(r, \lambda, t). \quad (10)$$

3. 人工辐射带数值模拟

为了研究高空核爆产生的人工辐射带和核爆爆点的位置、爆点的高度、核爆当量之间的关系,利用上述模型,本文针对特定条件做了数值模拟。(1)当量和爆高一定的情况下,人工辐射带与爆点磁纬度之间的关系;(2)核爆当量和爆点位置一定的情况下,人工辐射带与爆高之间的关系;(3)爆点位置和爆高一定的情况下,人工辐射与随核爆当量之间的关系。使用的辐射带背景模型为 AE/AP-8 模型^[19],核爆形成的放射性烟云的尺寸取自美国国防部 1989 年关于电磁传播效应的报告,下面给出数值模拟的结果。

图 1 给出了高空核爆产生的人工辐射带与爆点磁纬度之间的关系。初始条件如下:核爆当量为 1 Mt TNT,爆高为 400 km,核爆的时间为世界时 29000 s,核爆的磁纬度分别取 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$,模拟结果分别如图 1(a)(b)(c)(d)所示。图 1 中 y 轴与地磁轴重合,单位为 R_e ; x 轴通过地心与 y 轴垂直,单位为 R_e ;灰度条中的对应于对辐射带中高能电子(能量不低于 1 MeV)的通量密度取科学对数后的值,单位为 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$;半圆面为地球示意图,条状区域代表高空核爆激励的人工辐射带区域。由图 1 可见,高空核爆产生的人工辐射带中的高能电子的通量密度比背景(自然辐射带)大 3—4 个量级,其形状为跨越磁赤道的“弯月”形。人工辐射带的位置与爆点的磁纬度有很大的关系,爆点的磁纬度明显影响高空核爆

产生的人工辐射带的中心位置 ;随着爆点磁纬度的增加 ,人工辐射带的中心位置逐渐向外推移 ,其 L (这里 L 是给定磁力线与赤道面的交点与地球中心之间的距离和地球半径的比值)值也就越高 ,人工辐射带在赤道面内的厚度也越来越大 ,高能电子的通量密度逐渐减小 ,这是由于随着辐射带向外推移 ,其占据的体积越来越大 .由图 1(a)可见 ,当高空核爆发生在低纬时 ,人工辐射带的中心位置距离地面较近 ,位于内辐射带与地面之间 ,其中的高能电子与中

性粒子发生相互作用的机会相比中心在内辐射带或者外辐射带之中的人工辐射带要大很多 ,因此 ,人工辐射带的生存期会比较短 .由图 1(b)(c)(d)可见 ,当爆点的纬度在 30° 左右时 ,核爆形成的人工辐射带位于内辐射带之中 ;当爆点的纬度在 45° 左右时 ,核爆产生的人工辐射带位于内外辐射带之间的槽区 ;当爆点纬度较高时 ,核爆产生的人工辐射带位于外辐射带 .

图 2 给出了高空核爆产生的人工辐射带与爆点

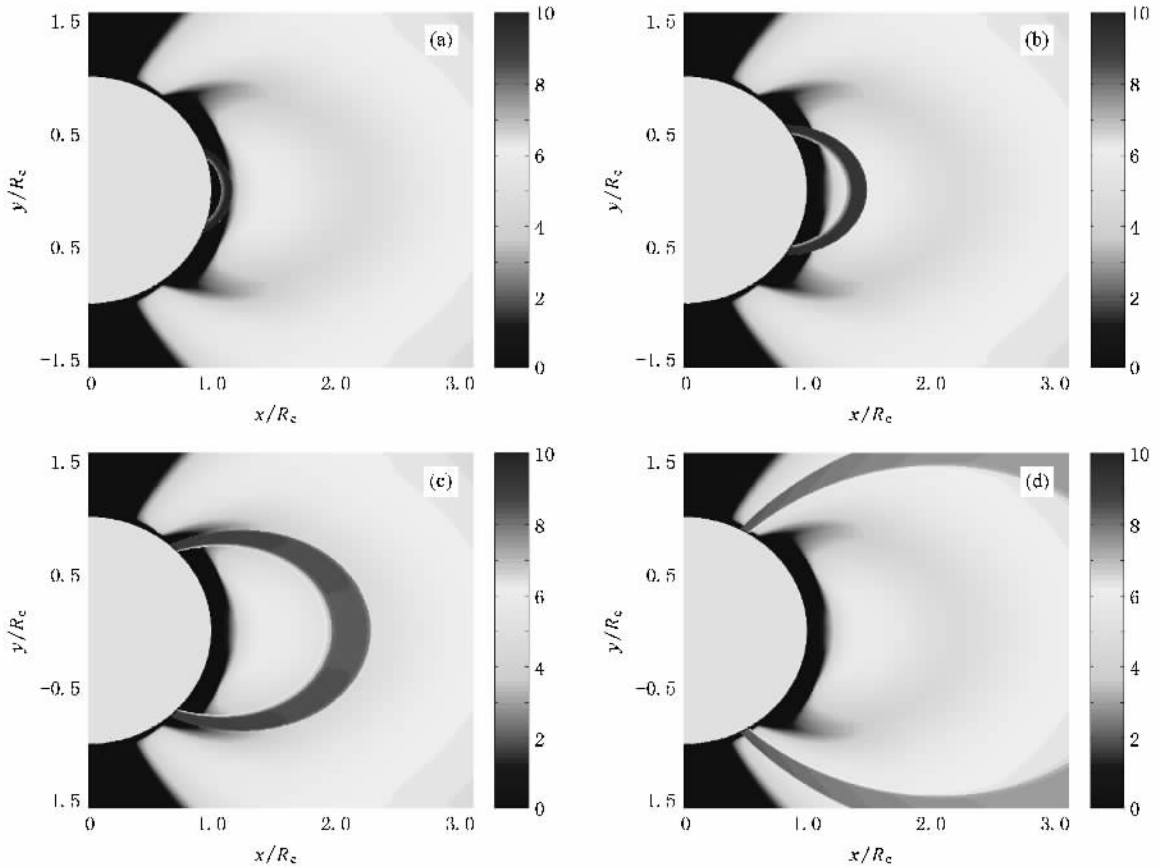


图 1 高空核爆产生的人工辐射带与爆点磁纬度之间的关系(对高能电子的通量密度取 \log_{10}) (a)爆点磁纬度为 15° 的辐射带 (b)爆点磁纬度为 30° 的辐射带 (c)爆点磁纬度为 45° 的辐射带 (d)爆点磁纬度为 60° 的辐射带

高度之间的关系 .初始条件如下 :核爆当量为 1 Mt TNT ,爆点的磁纬度为 30° ,核爆的时间为世界时 29000 s ,核爆的爆点高度分别取 100 ,200 ,300 和 400 km .模拟结果如图 2(a)(b)(c)(d)所示 .由图 2 可见 ,选取的不同爆高位置对人工辐射带中心位置的影响较小 ,但是能够影响到人工辐射带的厚度 .当核爆的爆高较低时 ,其产生的人工辐射带的厚度较厚 ,高能电子通量较低 .这是由于当核爆的爆点高度较低时 (一般小于 250 km) ,核爆炸形成的放射性烟云中心的高度在 10 min 内从爆点的高度上升到很

大的高度 ,然后在大约 2 h 内降低到大约 200 km 的高度上 (比如当量为 1 Mt TNT 时 ,爆高为 200 km 时 ,烟云中心的高度在 10 min 内从爆点高度上升到 1100 km 左右 ,在 2 h 内降低到 200 km 左右) ,从而造成烟云占据的磁力线较多 ,形成的人工辐射带较厚 .在爆点高度较高时 (一般大于 250 km) ,核爆形成的人工辐射带厚度较薄 ,高能电子的通量密度较高 .原因是爆点高度较高时 ,烟云中心上升的高度比较小 ,烟云占据的磁力线较少 .

图 3 给出了高空核爆产生的人工辐射带与核爆

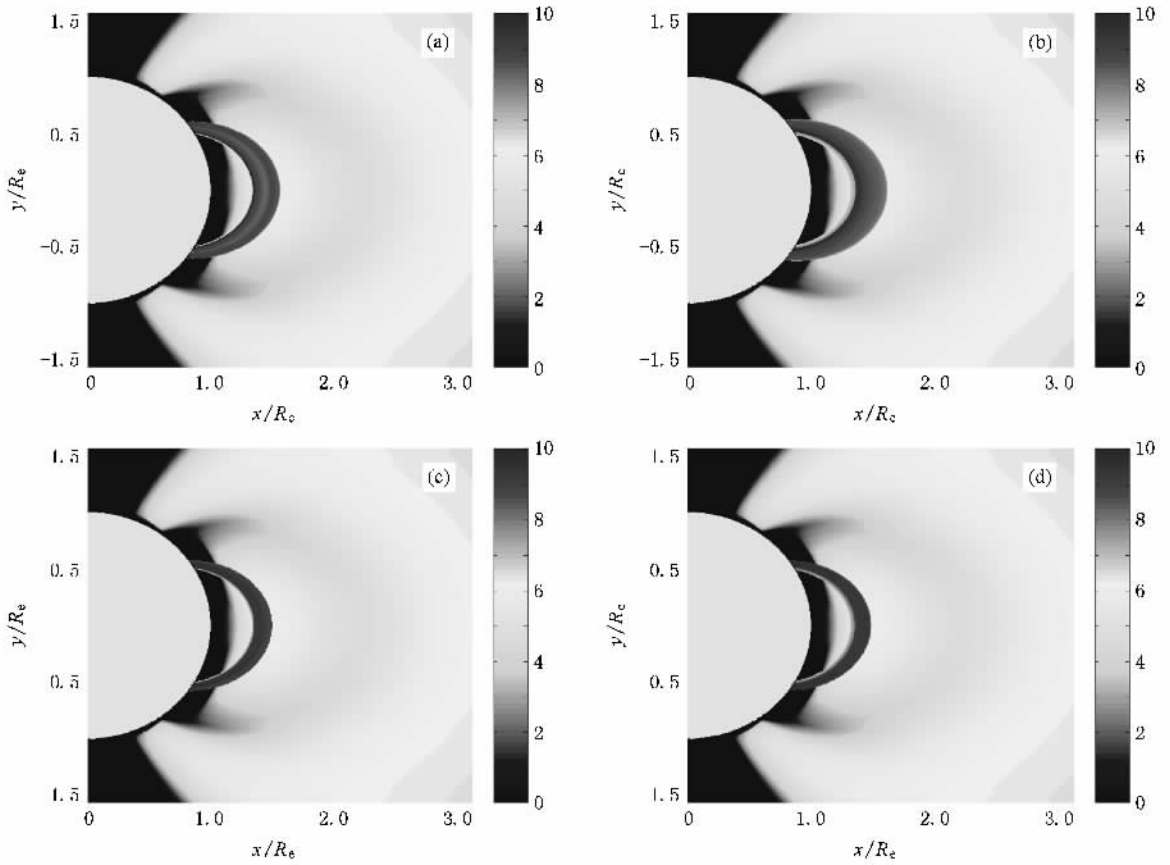


图2 高空核爆炸产生的人工辐射带与爆点高度之间的关系(对高能电子的流量密度取 \log_{10}) (a)爆点高度为 100 km 的辐射带, (b)爆点高度为 200 km 的辐射带 (c)爆点高度为 300 km 的辐射带 (d)爆点高度为 400 km 的辐射带

当量之间的关系. 初始条件如下:核爆当量为 1 Mt TNT,爆点的磁纬度为 30° ,核爆的时间为世界时 29000 s,核爆的当量分别取 10 kt TNT,100 kt TNT,1 Mt TNT,10 Mt TNT,模拟结果如图 3(a)(b)(c),(d)所示.由图 3 可见,核爆当量对人工辐射带的中心位置影响不大,但是核爆的当量越大,形成的人工辐射带的高能电子通量密度越大.由于核爆产生的放射性烟云的中心高度和烟云的半径在不同核爆当量时有很大的不同,所以人工辐射带的厚度有很大的变化.当核爆当量较低时,人工辐射带的厚度较厚.在图 3(a)的情况下,烟云的中心高度可以达到 700 km,半径可以达到 400 km 左右,烟云占据的磁力线较多,所以其形成的人工辐射带较厚.

4. 分析和讨论

1962 年 7 月 9 日,美国军方在 Johnston 岛 ($16.7^\circ\text{N}, 190.5^\circ\text{E}$)上空,进行了代号为 Starfish 的高空核爆试验,核爆的当量为 1.4 Mt TNT,爆高为 400

km.这次高空核爆试验,在地球周围形成了相当强的人工辐射带,并且持续时间长达近 10 a.文献 [6, 20—22] 利用卫星观测对这次核爆前后的辐射带进行了一系列研究,发现 Starfish 高空核爆试验在地球周围形成的人工辐射带中高能粒子的通量峰值高达 $10^9/\text{cm}^2\text{s}$ 量级,峰值的位置大约在 $L = 1.2—1.5$ 之间.与本文核爆当量为 1 Mt TNT,爆高为 400 km 的核爆对比,可以发现人工辐射带中高能电子通量的量级和 Starfish 试验的观测结果基本一致.和 Starfish 观测结果相比较,差异小于一个数量级,造成这种差异的主要原因如下:(1)模拟条件中我们假设向上运动的粒子数为总粒子数的一半,这和实际情况有差异;(2)本文模拟的人工辐射带没有考虑到粒子损失的情况,但是实际情况存在粒子损失.本文的模拟结果显示高能电子通量峰值的位置出现在 $L = 1.5$ 附近,这与 Starfish 实验的观测结果在 L 上有 0.3 的差异,造成差异的主要原因是爆点纬度的不同.本文模拟的纬度为磁纬度 30° ,Starfish 试验的纬度为 16.7° ,因此 Starfish 试验生成的高能粒子向外逃逸被背景

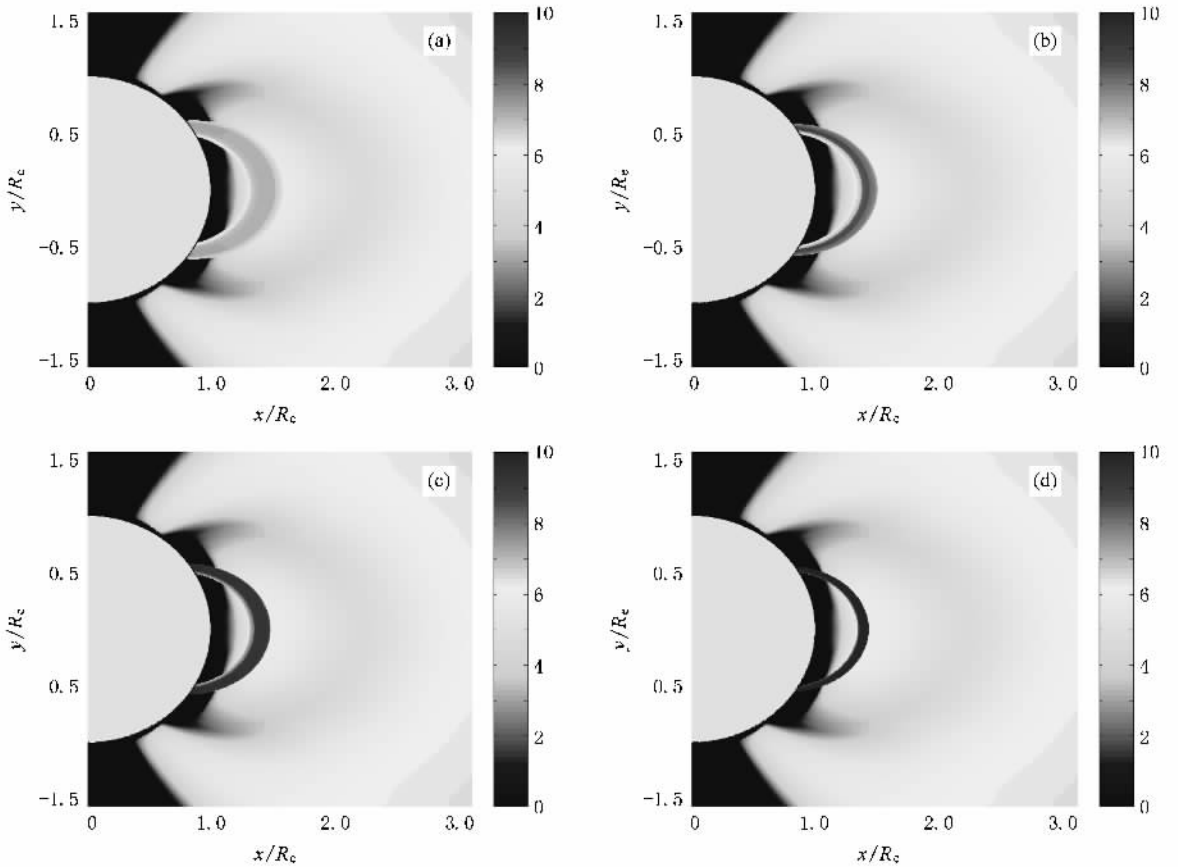


图3 高空核爆产生的人工辐射带与核爆当量之间的关系(高能电子的通量密度取 \log_{10}) (a)核爆当量为10 kt TNT的辐射带, (b)核爆当量为100 kt TNT的辐射带 (c)核爆当量为1 Mt TNT的辐射带 (d)核爆当量为10 Mt TNT的辐射带

磁场捕获在更低的 L 区域内.另外,本文模拟的人工辐射带厚度和Starfish试验的观测结果也有一定的差异,这是因为本文高空核爆炸烟云的形状和变化的模型与实际情况之间存在着差异.

高空核爆产生的放射性烟云的模型较为复杂,实际情况下并不是标准的形状,也不是标准的“薄饼”形.不同的核爆当量、爆点位置和爆点高度,产生的烟云形状和尺寸有很大的差异;本文中并没有考虑烟云中心的偏移,但是实际上核爆产生的烟云相对于爆点有一定的偏移量;在爆点高度较高时(大于250 km)核爆产生的放射性烟云可分成三个部分:烟云一,位于爆点附近;烟云二,位于烟云一附近,其尺寸由核爆当量决定;烟云三,是烟云跨过磁赤道的部分,位于烟云一的共轭位置.本文中把烟云二和烟云三等效在烟云一的位置,来确定人工辐射带.作为人工辐射带模型的输入值——核爆烟云的模型,与核爆实际形成的放射性烟云形状和尺寸存在一定的差异,造成人工辐射带数值模拟结果与真实结果存在一定的差异.

4. 结 论

运用本文得到的核爆放射性烟云的模型,通过分析本文的数值模拟结果,可以得到以下结论:

1)核爆当量在0.1—1 Mt TNT的高空核爆产生的人工辐射带的高能电子的通量密度峰值一般比自然辐射带高3—4个量级,一般大于 $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

2)爆点的磁纬度对人工辐射带位置的影响最大,决定着人工辐射带的中心位置.随着爆点磁纬度的增加,核爆形成的人工辐射带中心位置的 L 值就越大,人工辐射带的厚度就越大,高能电子的通量密度就越小.

3)爆点高度对人工辐射带中心位置影响较小.一般情况下,当爆点高度较低时(小于250 km),形成的人工辐射带厚度较大,高能电子的通量密度较小;当爆点高度较高时(大于250 km),形成的人工辐射带的厚度较小,高能电子的通量密度较大.

4)核爆当量对人工辐射带的中心位置影响较

小,但是对人工辐射带中高能电子的通量密度影响最大.当量越大,人工辐射带中高能电子的通量密度越大.核爆当量较低时,形成的辐射带厚度较大,当量较大时形成的人工辐射带厚度较小.

对高空核爆生成的人工辐射带进行更准确的定量模拟,有待于利用更精确描述高能带电粒子在更

真实的地球电磁场背景下的运动方程,有待于获取更完善的核爆放射性烟云模型,有待于将本文采用的单粒子模型发展成多粒子模型,还有待于确定人工辐射带中高能电子的损失机制.这将是本文今后工作的方向.

- [1] Van Allen J A ,Frank L A 1959 *Nature* **183** 430
- [2] Van Allen J A 1963 *Space Science* (New York :John Wiley & Sons Inc.) p226
- [3] Van Allen J A ,McIlwain C E ,Ludwig G H 1959 *J. Geophys. Res.* **64** (3) 271
- [4] Freden S D ,White R S 1960 *J. Geophys. Res.* **65** 1377
- [5] Lyons L R ,Thome R M 1973 *J. Geophys. Res.* **78** 2142
- [6] O'Brien B J ,Laughlin C D ,Van Allen J A 1962 *Nature* **195** 939
- [7] Defense Threat Reduction Agency 2001 *High Altitude Nuclear Detonations Against Low Earth Orbit Satellites* (Maryland : Defense Threat Reduction Agency and Advanced Systems and Concepts Office)
- [8] Hoerlin H 1976 *United States High-Altitude Test Experiences* (California : United States Energy Research and Development Administration) p23
- [9] Van Allen J A 1961 *Rad. Res.* **14** 540
- [10] Stömer C 1955 *The Polar Aurora* (London :Oxford University Press)
- [11] Rossi B ,Olbert S 1970 *Introduction to the Physics of Space* (New York :McGraw-Hill Book Co.)
- [12] Glasstone S ,Dolan P J 1977 *The Effects of Nuclear Weapons* (Washington. : United States Department of Defense and the Energy Research and Development Administration)
- [13] Dolan P J 1971 *Capabilities of Nuclear Weapons* (Washington : Defense Nuclear Agency) Chap 8
- [14] Tu C Y 1988 *The Sun-Earth Space Physics* (Beijing : Science Press) (in Chinese)[涂传诒 1988 日地空间物理学(北京 :科学出版社)]
- [15] Xu R L ,Li L 2005 *The Magnetospheric Particle Dynamics* (Beijing : Science and Technology Publishing House)(in Chinese)[徐荣栏、李 磊 2005 磁层粒子动力学(北京 :科学技术出版社)]
- [16] Latter R ,Lelevier R E 1963 *J. Geophys. Res.* **68** 1643
- [17] Guan R S ,Li Q 1997 *J. Wuhan Univ. (Nat. Ed.)* **43** 381 (in Chinese)[管荣生、李 钦 1997 武汉大学学报(自然科学版) **43** 381]
- [18] Qiao D J 2003 *The Introduction to Nuclear Explosion Physics* (Beijing : National Defense Industry Press)(in Chinese)[乔登江 2003 核爆炸物理概论(北京 :国防工业出版社)]
- [19] Vette J I 1991 *The AE-8 Trapped Electron Model Environment* (Maryland :NSSDC/WDC-A-R&S)
- [20] Van Allen J A ,Frank L A ,O'Brien B J 1963 *J. Geophys. Res.* **68** 619
- [21] Hess W N 1963 *J. Geophys. Res.* **68** 667
- [22] Hess W N ,Nakada P 1962 *Science* **138** 3536

Numerical simulation of the formation of artificial radiation belt caused by high altitude nuclear detonation^{*}

Gu Xu-Dong[†] Zhao Zheng-Yu Ni Bin-Bin Wang Feng

(*School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China*)

(Received 13 August 2008 ; revised manuscript received 16 March 2009)

Abstract

According to the previous theory of the motion of charged particles in the Earth's magnetic field, we derive the spatial region to which energetic particles around the Earth can extend. Using an empirical model for radiative debris produced by the high altitude nuclear detonation (HAND), we investigate the primary region where HAND-induced artificial radiation belt can form. Finally, in terms of the fission property of HAND and the characteristic features of energetic electron distributions in the natural belts, the electron flux within the artificial radiation belt is calculated and the preliminary study of its dependences on explosion latitude, altitude, and equivalence are carried out quantitatively. The numerical results show that, under certain circumstances, the HAND with 0.1—1 Mt TNT explosion equivalence can be expected to produce an artificial radiation belt near the Earth with the flux 3—4 orders of magnitude higher than the natural ones. The central location of the artificial belt largely relies on the magnetic latitude where the detonation takes place while the thickness and electron flux of the artificial radiation belt are affected by the explosion altitude and equivalence.

Keywords : high altitude nuclear detonation, artificial radiation belt, energetic particle flux, explosion equivalent

PACC : 9430H, 2870

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40774100).

[†] E-mail : whu.guxudong@gmail.com