

沉降放射性粒子的活度-粒径累计份额计算

商建波^{1,2} 师全林² 王群书^{1,2} 白涛² 刘杰² 代义华² 李谋² 钟振原²

1 (清华大学 工程物理系 北京 100084)

2 (西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 根据美国 Small Boy 试验的近场远爆心区域(Off-site)剂量场分布图, 计算了不同区域内沉降至地面的放射性活度累积份额, 结合动力学沉降预报程序给出的不同粒径粒子落地范围, 计算得到了不同放射性活度累积份额下的粒子粒径下限。结果表明, 试验产生的百微米以上粒径的粒子携带的放射性活度份额约为 Bridgeman 方程估算结果的 86%。本方法可以扩展至不同爆高的地面爆炸场景, 分析其近区沉降物的放射性份额, 对于优化放射性沉降预报程序具有一定价值; 对于发展分凝模型、分析放射性物质在各种粒子中的分布规律等具有重要意义。

关键词 放射性沉降, 剂量场, 累积放射性活度-粒径分布

中图分类号 TL76

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040204

剩余核辐射是核爆炸毁伤效应之一, 在地面爆炸的情况下比较显著。放射性裂变产物和中子活化物质附着于弹体结构材料和土壤等环境物质构成的载体上, 在爆炸火球的浮力和粒子的重力及横向风的共同作用下沉降至地表, 在爆心附近形成具有较高剂量率的沾染区域(称为放射性近区沉降), 这对处于该区域的人员通过电离辐射形成杀伤。对核爆炸形成的放射性近区沉降进行计算机模拟预报是应对该毁伤效应的技术手段之一。在放射性沉降预报中, 首先需要确定沉降粒子放射性活度随粒径的分布函数, 然后模拟粒子上升及降落过程中的动力学行为^[1-4], 最终依据不同粒径粒子携带的放射性活度份额及落地范围计算剂量场分布。

归一化的放射性活度-粒径分布函数作为核爆炸放射性沉降预报源项描述的关键, 通常由粒子粒径分布函数和分凝模型来得到, 并通过实测的放射性活度-粒径分布数据来检验粒径分布函数和分凝模型的正确性或者调整其参数。放射性活度-粒径分布数据的获取需进行大量的取样、测量和分析等工作, 由于工作量和成本等原因实测数据较少。而另一方面, 核爆炸后实测的剂量率等高线图一般比较齐全, 因此可用于计算不同粒径下限的放射性累积份额, 用来检验活度-粒径分布函数。例如, Norman 等计算了不同粒径粒子从稳定烟云底部落至地表的时间, 利用粒子落地时刻的地面剂量场数据计算地面标准时间参考剂量率(Grounded Unit Time Reference Dose Rate, GUTRDR), 估算得到了不同粒

径下限的放射性累积份额。但这种方法存在两方面问题: 一是对于粒子落地时间的估计存在偏差; 二是地面剂量场数据为剂量率等高线图, 通过不同时刻剂量场分布获取 GUTRDR 值的方法偏差较大。本文根据磁盘投掷模型获取的不同粒径粒子落地范围及地面剂量分布图不同范围内的 GUTRDR 值, 计算触地爆炸下不同粒径下限的沉降粒子携带的放射性活度累积份额, 可为分凝模型计算结果的验证提供依据, 并以 Small Boy 试验为例, 修正了现有 Bridgeman 公式计算的放射性-粒径函数, 提高了预报结果与试验结果的符合程度, 证明了该方法的可行性。

1 理论及方法

1.1 落地剂量率计算

沾染区域内的 GUTRDR 值指该区域所有特征点在地面上方 1 m 处的剂量率与该点所代表的面积乘积之和, 可用于不同沉降预报动力学模型的预报结果对比, 也可以作为沉降粒子处于漂浮状态以及落至地面上携带的放射性活度份额的表征。

近场远爆心区域剂量率图以不同剂量率值的等高线内包围区域给出。对于存在闭合剂量率等高线的区域, 落在 $I_{\min}$ 剂量率值等高线以内区域的 GUTRDR 值可以利用式(1)^[5]较为精确地获取:

$$J = \int_{\ln(I_{\min})}^{\ln(I_{\max})} A(I) d \ln(I) \quad (1)$$

第一作者: 商建波, 男, 1987 年出生, 2008 年毕业于清华大学, 现为清华大学工程物理系博士研究生, 核爆炸后放射性沉降预报
收稿日期: 2013-12-24, 修回日期: 2014-02-21

式中, I 是剂量率; $I_{\max}$ 是爆心附近区域剂量率最高值; $A(I)$ 是剂量率等高线内面积。由于本文关注的下风向不同距离处 GUTRDR 值的变化, 难以利用式(1)的方法获取。本文采取了如下的处理方法: 不同剂量率热线长度为划分下风向区域的依据, 利用式(1)计算闭合等高线内区域上 GUTRDR 值; 对于不同距离处由于水平扩散导致的热线两侧闭合曲线外的低剂量率区域, 利用两剂量率等高线值的均值与面积乘积进行计算, 见式(2)。

$$J_{re} = \sum_{i=1}^s \frac{I_{i-1} + I_i}{2} A(I_i) \quad (2)$$

式中, J_{re} 是不闭合区域内 GUTRDR 值, 该区域剂量率值介于剂量率等高线强度 I_{i-1} 和 I_i 之间; $A(I_i)$ 是不闭合区域面积。

1.2 沉降预报动力学模式

1.2.1 烟云上升过程

针对一维气泡模型对于地面爆炸放射性烟云稳定高度估计偏低的事实^[6], 本文结合经验法对烟云的上升过程处理如下: 以观测数据获取的烟云顶高、底高数据为基础, 利用时间平方根插值计算烟云上升过程中不同时刻的烟云底高、顶高数据, 具体可见式(3)、(4)。

$$Z_B(t) = Z_{Bi} + \frac{\sqrt{t} - \sqrt{t_i}}{\sqrt{t_s} - \sqrt{t_i}} (Z_{Bs} - Z_{Bi}) \quad t_i \leq t \leq t_s \quad (3)$$

$$Z_T(t) = Z_{Ti} + \frac{\sqrt{t} - \sqrt{t_i}}{\sqrt{t_s} - \sqrt{t_i}} (Z_{Ts} - Z_{Ti}) \quad t_i \leq t \leq t_s \quad (4)$$

式中, $Z_B(t)$ 和 $Z_T(t)$ 分别是 t 时刻烟云的底高及顶高; Z_{Bi} 和 Z_{Bs} 为烟云在计算开始时刻至烟云稳定时刻的底高; Z_{Ti} 和 Z_{Ts} 为烟云在计算开始时刻至烟云稳定时刻的顶高; t_i 和 t_s 分别是计算初始时刻和烟云到达稳定状态的时刻。

示踪粒子竖直方向速率由该处烟云上升速率 $\vec{u}_u$ 以及自身沉降速率 $\vec{f}_p$ 决定, 同时上升过程中粒子的水平方向速度主要受剪切风的水平输运行为控制, 见式(5)、(6)。

$$d\vec{z} / dt = \vec{u}_u + \vec{f}_p \quad (5)$$

$$d\vec{r} / dt = \vec{v}_{wind} \quad (6)$$

式中, $\vec{v}_{wind}$ 是所在位置处环境的水平风速。烟云上

升速度可以由式(7)、(8)获得。

对于烟云中心区域,

$$u_u = u_B + (z - z_B) \left(\frac{u_T - u_B}{z_T - z_B} \right) \quad (7)$$

对于烟云下方区域,

$$u_u = u_B \left(1 - \frac{z_B - z}{z_B - z_{GZ}} \right) \quad (8)$$

式中, u_T 和 u_B 分别是烟云顶高和底高在该时刻的上升速度; z 是示踪粒子的高度; z_T 和 z_B 是烟云顶高和底高; z_{GZ} 是地表高度。

1.2.2 放射性沉降粒子大气输运过程

近场远爆心区域剂量率图的范围有限, 沉降粒子的行为以重力沉降及水平输运为主。本文选用磁盘投掷方法模拟粒子行为, 其中风速数据利用时空线性插值方法获取。

在 t 时刻, 粒子中心所处水平位置由风速积分获得:

$$x_{dep} = x_i + \int_0^{t_d} v_x(z, t) dt \quad (9)$$

$$y_{dep} = y_i + \int_0^{t_d} v_y(z, t) dt \quad (10)$$

式中, x_{dep} 、 y_{dep} 为 t_d 时刻粒子中心的位置; x_i 、 y_i 为计算开始时刻粒子中心位置; $v_x(z, t)$ 、 $v_y(z, t)$ 是根据风速数据进行时间、空间线性插值获取的风速水平两方向的分量。

在粒子沉降至地面的过程中, 粒子群受湍流作用, 水平扩展标准偏差逐渐增大。Walton 参考了 Kolmogoroff-Batchelor 理论^[1], 认为粒子横向扩展的标准偏差可用下式进行计算:

$$\sigma(t)^2 = [\sigma(t_s)^{2/3} + \frac{2}{3} c \varepsilon^{1/3} (t - t_s)]^3 \quad (11)$$

$$c = [1 + (n \langle f \rangle)^2]^{-1/2} \quad (12)$$

式中, $\sigma(t_s)$ 为烟云稳定时的标准偏差; t_s 为烟云稳定时刻; $\langle f \rangle$ 为粒子下降的平均速度; n 是常数, 一般顺风方向取为 1, 垂直风向取为 2; ε 为湍流动能密度变化率, 本文的计算采用其简化公式:

$$\varepsilon = 0.03 / z \quad (13)$$

1.2.3 不同位置处放射性沉降粒子质量沉降率和剂量率的计算

落地质量沉降率、单位面积上放射性活度和地面上方 1 m 处的吸收剂量率，可以利用群落在该点处的值的叠加获得。任意群落对于该点的贡献值可以由式(14)计算得到：

$$\omega(x,y)=\frac{Q}{2\pi\sigma_{\parallel}\sigma_{\perp}}\exp\left[-\frac{(X-X_p)^2}{2\sigma_{\parallel}^2}-\frac{(Y-Y_p)^2}{2\sigma_{\perp}^2}\right] \quad (14)$$

$$X=x\cos\alpha+y\sin\alpha \quad (15)$$

$$Y=y\cos\alpha-x\sin\alpha \quad (16)$$

式中， Q 为粒子群落参数（如质量沉降率、单位面积活度以及平均分布情况下上方 1 m 处剂量率等）； x 、 y 是坐标； α 是粒子烟云底部到粒子烟云顶部落地位置连线与 x 轴夹角； X_p 、 Y_p 是粒子落地的平均位置； $\sigma_{\parallel}$ 、 $\sigma_{\perp}$ 是沿烟云落地痕迹方向以及垂直烟云落地痕迹方向上的扩展标准偏差。

1.3 放射性粒子的活度-粒径累计份额估算方法

重力沉降作用下近区沉降场中不同位置处落下的粒子具有显著不同的粒径分布特征。本文仅就特定粒径以上粒子携带的放射性活度的累积份额进行估算。为确定粒子下限，假定如果某一粒径粒子沉降在区域范围内的质量份额超过 50%，则可认为该粒径及大于该粒径的粒子均沉降于该距离范围内。用该距离范围内的 GUTRDR 值除以假定总放射性物质平均分布于单位面积地面上形成的剂量率的比值，表征大于等于该粒径粒子携带的放射性份额。

2 Small Boy 地表核爆炸的模拟及方法验证

Small Boy 试验是在地面上方 1 m 处的地表爆炸，当量约 1.65 kT，DASA1251 文件^[6]给出了下风向约 50 km 范围的近场远爆心区域剂量率图。

2.1 Small Boy 试验不同粒径粒子携带放射性活度份额估算

2.1.1 Small Boy 试验近场远爆心区域剂量率图处理及 GUTRDR 值计算

对于 Small Boy 试验近场远爆心区域剂量率图进行数字化，以图中某一点色阶代表周围区域的剂量率强度，得到了数字化的 Small Boy 试验近场远爆心区域剂量率图(图 1)。以爆心为原点，图中 4 条闭合剂量率等高线距原点的最大距离为半径做弧线，由近至远划分为区域 1、2、3 和 4。

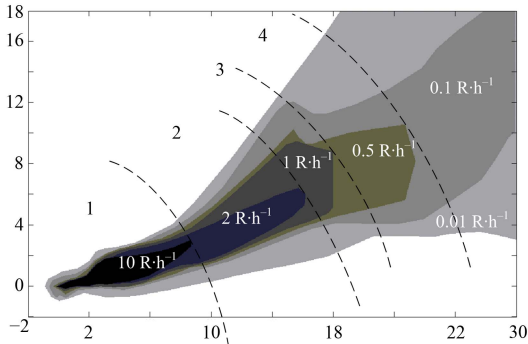


图 1 数字化的 Small Boy 试验近场远爆心区域剂量率图
Fig.1 Digital Small Boy off-site contours of residual gamma radiation.

爆心至下风向不同距离区域内，剂量率等高线内面积见表 1。其中部分高剂量率等高线内面积取自文献[1]，近场远爆心区域剂量率分布图中的不同剂量率等高线内面积，由数字化剂量率图中该区域内的点数以及每点所代表的面积的乘积计算。其中，下风向不同位置的选择，导致区域内存在闭合剂量率等高线最低值不一，不同区域利用式(1)计算时，闭合剂量率等高线的最低值分别为 10 R·h⁻¹、2 R·h⁻¹、1 R·h⁻¹ 以及 0.5 R·h⁻¹。

表 1 不同区域内剂量率等高线内面积
Table 1 Areas inside different exposure rate contours.

剂量率 Exposure rate / R·h ⁻¹	区域 1 内区域面积 Areas in region 1 / km ²	区域 2 内区域面积 Areas in region 2 / km ²	区域 3 内区域面积 Areas in region 3 / km ²	区域 4 内区域面积 Areas in region 4 / km ²
1 000	0.216	0.216	0.216	0.216
500	0.528	0.528	0.528	0.528
200	0.942	0.942	0.942	0.942
100	3.75	3.75	3.75	3.75
50	9.03	9.03	9.03	9.03
10	24.9	24.9	24.9	24.9
2	10.6	50.2	50.4	50.4
1	7.1	42.8	71.1	71.1
0.5	5.3	15.0	29.0	88.0
0.1	8.8	29.9	50.6	101.3
0.01	19.9	61.9	81.3	151.7

依据表 1 及式(1)和式(2)计算得到的不同区域内 GUTRDR 值,由内至外分别为 $662.5 \text{ R}\cdot\text{mile}^2\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $787.0 \text{ R}\cdot\text{mile}^2\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $806.8 \text{ R}\cdot\text{mile}^2\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $864.4 \text{ R}\cdot\text{mile}^2\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2.1.2 不同沉降区域内不同粒径粒子的质量份额

利用动力学预报程序,计算了不同粒径粒子的落地范围,并对于不同区域内部粒子沉降至地面后的不同位置处的质量沉降率进行归一化后累积求和,得到不同区域内不同粒径粒子的质量累积份额如图 2 所示。由图 2,就某一区域而言,存在部分粒径粒子未能够全部落入该区域内。以区域 1 为例,最大粒径粒子至约 $180 \mu\text{m}$ 的粒子,均 100%落至该区域范围的地面上; $100\text{--}180 \mu\text{m}$ 的粒子在该区域内部分落地。因此认为沉降粒子粒径范围的大尺度,其放射性比活度等信息具有连续性,而上述小尺度相对于沉降粒子粒径范围而言,宽度极窄。假定比活度不发生明显变化,在这种情况下,假定若某一粒径粒子落在该区域的质量累积份额超过 50%,该粒径及大于该粒径的粒子均沉降于该距离范围内,就可以获得不同区域内沉降粒子的粒径下限。

2.1.3 不同粒径粒子携带放射性活度累积份额估算结果与 Bridgeman 估算结果对比

GUTRDR 值与理论上的该爆炸装置产生的所有放射性平均分布于单位面积上形成的剂量率的比值(k 因子与当量乘积并进行地面粗糙度及仪表响应

修正获得,本文暂取 k 因子值为 $2\,350 \text{ R}\cdot\text{mile}^2\cdot\text{h}^{-1}$,上述两项修正因子乘积约为 0.5),即认为该粒径以上粒子携带的放射性份额。Bridgeman 对于 F-T 模型计算的沉降粒子的放射性活度与粒径函数关系进行了拟合^[8],并认为放射性核素在不同粒径粒子上的分布是体分布与面分布的线性函数。取内华达试验场地地面爆炸后沉降粒子粒径分布的一般函数,针对上述放射性活度累积份额进行求解,获取了上述放射性核素累积份额的粒子下限,结果列于表 2。

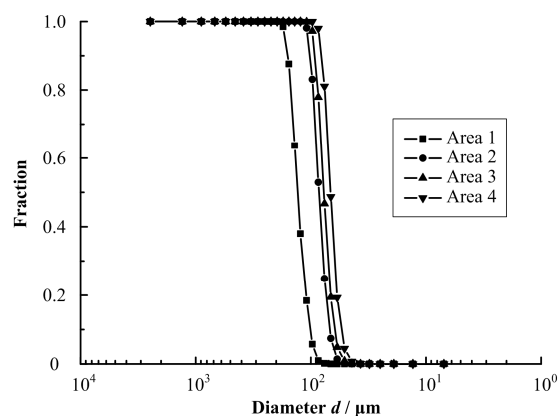


图 2 Small Boy 试验不同区域内不同粒径沉降粒子的质量累积份额

Fig.2 Cumulate mass fraction of particles with different sizes grounded in different regions.

表 2 Small Boy 试验获取及 Bridgeman 拟合结果的粒子下限

Table 2 Lower limits of particle size with special cumulate activity fraction from Small Boy test calculation and Bridgeman equation.

GUTRDR / $\text{R}\cdot\text{mile}^2\cdot\text{h}^{-1}$	放射性活度份额 Activity fraction	动力学模型获取的粒子下限 Lower limit of particle size calculated by dynamic model / μm	Bridgeman 估算粒子下限 Lower limit of particle size calculated by Bridgeman equation / μm
662.5	0.33	130	144
787.0	0.39	97	109
806.8	0.41	86	105
864.4	0.43	76	91.5

表 2 中可以看出,相同放射性活度累积份额情况下,Bridgeman 估算的粒径下限高于试验获取结果,这表明 Bridgeman 的估算结果的大粒子的放射性核素累积份额高于 Small Boy 试验值。

2.2 Small Boy 地表核爆炸放射性活度-粒径累积函数的调整验证

对于动力学程序获取不同区域沉降粒子的粒径

下限,利用 Bridgeman 拟合公式分别计算放射性活度累积份额,则计算结果与试验获取结果的对比如表 3 所示。

表 3 中可以看出,试验测量的放射性活度累积份额低于 Bridgeman 估算结果,其比值均值约为 86%。

表 3 相同粒径下限下 Bridgeman 拟合结果与 Small Boy 试验测量结果对比
Table 3 Cumulate activity fractions with same lower limits of particle size from Small Boy test and Bridgeman equation.

区域 Region	试验获取活度份额 Activity fraction from test	Bridgeman 估算份额 Activity fraction from Bridgeman equation	试验结果与估算结果比值 Ratios of test to Bridgeman results
1	0.34	0.38	0.89
2	0.38	0.44	0.86
3	0.4	0.48	0.83
4	0.43	0.50	0.86

3 结果与讨论

针对 Small Boy 试验而言，本方法计算的百微米以上粒子的累积放射性活度份额约为 Bridgeman 拟合结果的 86%。这表明利用 Bridgeman 的拟合结果对于粒径中放射性活度分布的计算结果有过高估计大粒子中份额的倾向。这部分粒子携带放射性份额的减少，一方面可能是由于爆后瞬间由于火球内复杂的温度气压变化导致存在部分亚微米细微粒子，另一方面也可能是由于爆心附近抛洒物吸附了部分放射性核素，而抛洒物的影响现在难以利用粒径描述函数及分凝模型进行分析。

本文针对 Small Boy 试验进行了分析，计算了携带特定放射性活度份额时的粒径下限，并初步验证了该方法的合理性。在放射性沉降预报研究中，本文所述方法可以进行不同地面爆炸场景下放射性活度-粒径累积份额计算，对于进一步发展更为理想的放射性沉降模式具有重要意义。

参考文献

1 Norment H G. DELFIC: Department of defense fallout prediction system. Volume I – fundamentals[R]. Washington D. C.: Defense Nuclear Agency, 1979

2 O’Day B E. Estimation of weapon yield from inversion of

dose-rate contours[D]. Wright Patterson AFB: Air Force Institute of Technology, 2009

3 Moroz B E, Beck H L, Bouville A, *et al.* Predictions of dispersion and deposition of fallout from nuclear testing using the NOAA-HYSPLIT meteorological model[J]. Health Physics, 2010, **99**: 252–269

4 Miller A D. A comparison in the accuracy of mapping nuclear fallout patterns using hpac, hysplit, delfic fpt and an afit fortran95 fallout deposition code[D]. Wright Patterson AFB: Air Force Institute of Technology, 2011

5 Norman C D. Particle size determination from local fallout[D]. Wright Patterson AFB: Air Force Institute of Technology, 1986

6 Zalewski D E. Assessment of the effects of entrainment and wind shear on nuclear cloud rise modeling[D]. Wright Patterson AFB: Air Force Institute of Technology, 2001

7 Compilation of local fallout data from test detonations 1945-1962 extracted from DASA 1251. Volume I – continental U.S. tests[R]. Washington D. C.: Defense Nuclear Agency, 1979

8 Bridgmen C J, Bigelow W S. A new fallout prediction model[J]. Health Physics, 1982, **43**: 205–218

Calculation of cumulative activity-size distribution of fallout particles

SHANG Jianbo^{1,2} SHI Quanlin² WANG Qunshu^{1,2} BAI Tao² LIU Jie²
DAI Yihua² LI Mou² ZHONG Zhenyuan²

1(Tsinghua University, Department of Engineering Physics, Beijing 100084, China)

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

Abstract Background: Activity-size distribution of fallout particles plays an important role in fallout prediction project. It also suggests how radioactive nuclides attached by carriers such as soil particles or debris and helps us know why fractionation happens. It should be determined by sampling, measurement and analysis, but not all this work well done in each ground explosion. **Purpose:** Feasibility of work to calculate the lower limit of particle size with special cumulate activity fraction by off-site contours of residual gamma radiation and dynamic model that can trace fallout particles was examined. **Methods:** Off-site contours of residual gamma radiation from Small Boy test were digitized, and the cumulative activity fraction in each area was estimated. Based on the spatial distribution of particles of different sizes deposited on the ground surface, which is calculated with a dynamic fallout prediction code, the lower limit of particle size with special cumulate activity fraction was discovered. **Results:** The results show that cumulative activity contribution from particles with diameter of a few hundred micrometer was 14% less than obtained with Bridgeman Equation. **Conclusion:** It's feasible to calculate cumulative activity-size distribution of fallout particles from off-site contours of residual gamma radiation, and this work can help us to know activity-size distribution in different ground nuclear explosions.

Key words Fallout, Radiation field, Cumulative activity-size distribution

CLC TL76