

文章编号: 1000-5773(2003)03-0230-05

蘑菇云宽度变化率与核爆炸当量的函数关系*

金良安, 王孝通, 张明虎, 杨常清

(海军大连舰艇学院, 辽宁大连 116018)

摘要: 利用数值方法, 对国内外已公开的大量核试验蘑菇云宽度数据进行分析处理, 提出了蘑菇云宽度变化率的概念, 确立了它与核爆炸当量之间的函数关系, 进而构建了一种新的核爆炸当量测量方法。经核试验数据验证, 该方法的测量结果与实际吻合, 误差不大于 3%, 并且克服了原方法的种种弊端, 操作简单, 实施容易, 便于战时使用。

关键词: 蘑菇云宽度变化率; 核爆炸; 当量; 函数关系

中图分类号: TJ91 **文献标识码:** A

1 引 言

遭核袭击时, 迅速获取核爆炸当量值, 是快速估算冲击波、光辐射、早期核辐射、放射性沾染等各种因素的毁伤程度, 及时采取有效防护措施的先决条件。因此, 关于核爆当量测量方法的研究较多, 已见报道的既有基于最小照度出现时间的, 也有基于爆后不同时间蘑菇云高角的, 还有基于蘑菇云稳定参数的等等^[1~7]。然而笔者经过分析认为, 现有这些方法的实际使用价值很值得思考, 因为它们要求把精确到秒的核爆炸时刻记录下来, 或者要求在核爆炸瞬间立即启动秒表进行计时, 显然这些要求在战时都很难做得到^[8]。为此, 寻求一种新的核爆当量测量方法尤为必要。我们对美国、原苏联等国所公布的大量核试验蘑菇云宽度数据进行深入分析, 提出蘑菇云宽度变化率的概念, 并建立起它与核爆当量之间的函数关系, 进而确立以蘑菇云宽度变化率测量核爆当量的新方法。

2 核爆炸当量现有测量方法综述

目前国内外常用的核爆当量测量方法主要有四大类^[1~7, 9~10]。

方法一, 利用最小照度出现时间测当量。数学模型为

$$Q = 0.0446 t_{\min}^{2.35} / K$$

式中: Q 为当量(kt), t_{\min} 为最小照度出现时间(ms), K 为比高修正系数。

由于 t_{\min} 是一个毫秒级的数据, 人工显然无法测量, 只能依靠昂贵的自动观测仪, 而绝大部分场合并没有配备这样的自动观测仪。即使配备了, 也因其中的 K 值需由当量和爆高决定, 而当量正是所要测量的值, 虽然可用试算的方法解决, 但其复杂性显而易见。故此法实际推广起来难度很大。

方法二, 利用爆后不同时间的蘑菇云顶高测当量。数学模型为

$$Q = 345(H_t - H)^{2.09} \cdot t^{-1.45} \quad (\text{预估 } Q \text{ 小于 } 10 \text{ kt 时用})$$

$$Q = 120000(H_t - H)^{4.83} \cdot t^{-3.53} \quad (\text{预估 } Q \text{ 大于 } 10 \text{ kt 时用})$$

式中: t 为从爆炸时刻始算的爆后时间(s), H_t 为 t 时刻蘑菇云顶高(km), H 为爆高(km)。

* 收稿日期: 2002-12-26; 修回日期: 2003-03-23

基金项目: 国防基础性科研基金资助项目(435B956)

作者简介: 金良安(1966—), 男, 博士研究生, 副教授。

该方法的问题在于:如果没有精确到秒的核爆炸时刻,就根本无法得出爆后时间,当量也就无法确定。因为核武器的袭击必然要强调突然性,被袭击方不可能总是手持秒表、六分仪等着核爆炸的发生,故战时采用该方法很难成功。此外,该法还要求根据未知的 Q 值大小选用公式,也有很多的麻烦。

方法三,利用蘑菇云稳定参数测当量。数学模型为

$$Q = 1.0729 \times 10^{24} t_w^{-8.547}$$

$$Q = 7.59 \times 10^{-2} D_w^{3.29}$$

$$Q = \begin{cases} 4.0667 \times 10^{-2} (H_{wt} - H)^{2.5} & H_{wt} < 10.5 \text{ km} \\ 2.4385 \times 10^{-7} (H_{wt} - H)^{7.6306} & H_{wt} \geq 10.5 \text{ km} \end{cases}$$

$$Q = \begin{cases} 0.112 (H_{wb} - H)^{2.5} & H_{wb} < 7.21 \text{ km} \\ 3.83 \times 10^{-7} (H_{wb} - H)^{8.85} & H_{wb} \geq 7.21 \text{ km} \end{cases}$$

式中: t_w 为蘑菇云的稳定时间(s); D_w 、 H_{wt} 、 H_{wb} 分别为蘑菇云稳定时的直径、顶高、底高(km); H 为爆高(km)。

该方法的主要问题是蘑菇云稳定时刻不好把握,致使 t_w 、 H_{wt} 、 H_{wb} 和 D_w 不易测准,且易错过测量机会。同时,要等到蘑菇云稳定所需时间较长,不能满足核防护快速反应的要求。此外,稳定蘑菇云各项参数的测定,受气象条件的影响较大,甚至无法测得。同方法二,这里的 t_w 也依赖于爆炸时刻。所以,该方法一般仅作参考。

方法四,利用菜花状烟云的稳定顶高 H_w 、水柱的最大直径 D_{\max} 和最大高度 H_B 测当量。数学模型为

$$Q = \begin{cases} 95.433^{\lg H_w} & H_w < 5.2 \text{ km} \\ 1516^{\lg(H_w - 0.2747)} & H_w \geq 5.2 \text{ km} \end{cases}$$

$$Q = 85.18 D_{\max}^{3.086}$$

$$Q = \begin{cases} 1.45 \times 1.64^{\lg Q} & (\text{估计 } Q > 10 \text{ kt 时}) \\ 0.8 \times 2.887^{\lg Q} & (\text{估计 } Q < 10 \text{ kt 时}) \end{cases}$$

该方法只适用于爆炸深度约 25 m 的水下爆炸,适用范围太窄。而且也需要根据未知 Q 的大小来选用公式,同时还有类似于方法三的问题。

此外,上述各方法使用的数学模型普遍很复杂,既不便于使用,也不便于记忆。所以,有必要寻找一种新的核爆当量测量方法。

3 蘑菇云宽度变化率的含义及其求取方法

3.1 蘑菇云宽度变化率的含义

核爆炸时,随着火球的不断冷却,会渐渐形成一个蘑菇状的烟云团,通常称作蘑菇云。蘑菇云在上升的同时将不断地膨大,即其宽度会不断地增大,其增大的速率,在本文中称之为“蘑菇云宽度变化率”,用符号 D_t 表示。

3.2 D_t 的求取方法

利用现有的核探测装备,即可方便地在爆后某一任意时刻测出对应的蘑菇云宽度 D_1 (单位 m),过 δ_t (单位 s) 时间后再测出对应的蘑菇云宽度 D_2 (单位 m),然后利用以下公式即可求出 D_t 值

$$D_t = (D_2 - D_1) / \delta_t$$

需要注意以下几点:

(1) 测量应在爆后 40 s 以后进行,因为此时的蘑菇云宽度变化较有规律;

(2) 通常取 δ_t 为十几秒至几十秒较为合适,如果时间允许不妨多测几组烟云宽度数据,以求得 D_t 的平均值,可以提高精度;

(3) 蘑菇云宽度 D_1 和 D_2 值,必须在同一观测哨、从同一方向测量。

4 蘑菇云宽度变化率与当量之间函数关系的建立方法

4.1 建立 D_t - Q 函数关系的思路

在国内外已公开的核试验数据中,拥有大量的蘑菇云宽度数据。这些数据包括多种当量爆后不同时间的测量值。根据这些测量值,利用数学方法,可以确定蘑菇云宽度 D 与当量 Q 的函数关系。然后,利用所得到的 D - Q 关系式对时间 t 求导,即可获得所需的 D_t - Q 函数关系式。

4.2 蘑菇云宽度 D 与当量 Q 函数关系的建立

4.2.1 D - Q 函数关系式的样式

核爆蘑菇云宽度 D ,显然既是当量 Q 的函数,又是时间 t 的函数。即有

$$D = f(Q, t)$$

参照已有的蘑菇云顶高、底高等与核爆当量和爆后时间的函数关系的样式,把 $D = f(Q, t)$ 的表达式设定为

$$D = aQ^b + cQ^d(t - 40) \quad (1)$$

式中: a, b, c, d 是 4 个待定常数。爆后时间以 $(t - 40)$ 的形式出现,是考虑到一般蘑菇云在核爆后 40 s 时完全形成,并开始有规律变化。

4.2.2 D - Q 函数关系式的建立

建立 D - Q 函数关系式就是确定(1)式中的待定常数 a, b, c, d 。方法为:先把大量不同当量、不同时间的蘑菇云宽度数据代入(1)式,即可得到多个关于 a, b, c, d 的非线性方程,然后利用非线性方程组的数值解法即可求出这些常数值。为求解准确且方便,可分两步进行。

第一步,确定 c, d 。先对全部蘑菇云宽度数据进行分析,筛选出所有合理的数据,再按照核试验的当量分类,然后将同一当量时的蘑菇云宽度数据及其对应的爆后时间一一代入(1)式,每代入一组数据即可得到一个方程(非线性方程)。考察所得方程的特点,显然可以看出, aQ^b 是各个方程的共同项,因此,虽然有 a, b, c, d 四个未知数,但只要利用所得到的所有方程中的任意三个组成方程组,就可解出一组 c, d 值。为使得求出的 c, d 值具有足够的精度和普适性,可采取如下措施:

(1) 先对某一当量的所有方程按 1, 2, 3, ..., n 的顺序进行编号,然后按 123, 124, 125, ..., 12 n ; 234, 235, 236, ..., 23 n ; 345, 346, 347, ..., 34 n ; ... 的方法逐一组成方程组求解,最后对所有的解求平均值。

(2) 再逐一选定其它当量,重复(1)的过程。

(3) 假设所有蘑菇云宽度数据按当量共分成了 m 类,则通过(1)和(2)后, c, d 就分别都有 m 个平均解。再分别求这 m 个平均解的平均值,即可得所需的 c, d 值。

第二步,确定 a, b 值。 c, d 值确定后, a, b 值的确定过程与第一步完全相似,唯一不同的是此时只需解由两个非线性方程组成的方程组。

上述两步的求解均由计算机自动完成。如采用爆后 40 s 至二分之一烟云稳定时间内的早期蘑菇云宽度数据进行计算,结果(根据核估算的具体要求,求解结果保留三位有效数字)为

$$a = 0.514; b = 0.316; c = 0.00229; d = 0.457$$

对应的标准差

$$S_a = 0.000317; S_b = 0.000243; S_c = 0.000386; S_d = 0.000449$$

由于对应的标准差都较小,可见得到的 4 个常数均有较好的一致性。因此,综上所述,在爆后 40 s 以后较长的一段时间内,蘑菇云宽度 D (单位 km)、爆后时间 t (单位 s)、核爆当量 Q (单位 kt)之间的函数关系为

$$D = 0.514Q^{0.316} + 0.00229Q^{0.457}(t - 40) \quad (2)$$

经验算,利用(2)式反算的蘑菇云宽度值,与核试验的实测值相比,误差在 5% 以下,表明这一函数

关系式符合估算要求,是可行的。

4.3 D_t - Q 函数关系的推导

(2)式表明,可以从核试验蘑菇云宽度数据 D 中确立它关于时间 t 的一次函数,因此 D 对 t 的变化率 D_t 将与 t 无关,即 D_t 不依赖于爆炸时刻,并且在蘑菇云稳定前的较长一段时间内,可以方便地测量它的宽度值,这是我们选用蘑菇云宽度测当量的主要原因。而核爆炸的其他参数,如蘑菇云顶高、底高或火球直径等,很难确定它们关于时间 t 的一次函数,也就是它们的变化率仍随爆后时间而变化,仍须知道精确到秒的核爆炸时刻,故不宜选用。

由(2)式两边分别对 t 求导,可得

$$D_t = d/d_t [0.514Q^{0.316} + 0.00229Q^{0.457}(t-40)] = 0.00229Q^{0.457}$$

式中 D_t 的单位为 km/s,如以 m/s 为单位,则有

$$D_t = 2.29Q^{0.457} \quad (3)$$

由(3)式变形即得

$$Q = 0.16316D_t^{2.188183807} \quad (4)$$

(4)式表明,在有了蘑菇云宽度变化率 D_t 这一参数后,核爆当量 Q 也就可以顺利求出。

4.4 D_t - Q 实用关系式的建立

显然(4)式中的两个常数较复杂,使用起来不方便,经过拟合处理,对它作如下简化

$$Q = 0.162D_t^{2.19} \text{ (kt)} \quad (5)$$

在目前常见的小当量(千吨级)至大当量(千万吨级)的范围内,用(5)式代替(4)式近似计算,所带来的附加相对误差均很小,可保证不大于 0.5%。因此,作这样的简化是可行的。深入的计算还表明,如果对(5)式作进一步的简化(比如简化成 $Q = 0.16D_t^{2.2}$),或者对(4)式作其它形式的简化(比如对两个常数进行四舍五入,简化成 $Q = 0.163 D_t^{2.19}$),则都将带来过大的误差。可见,(5)式便是所需要的由 D_t 计算 Q 的理想关系式。

5 核试验数据的检验与讨论

利用美国公布的核试验数据对(5)式进行检验,选录了几个有代表性的结果,如表1(表中 D_t 是实测数据的平均值; Q_r 是核爆当量的实际值; Q_c 是核爆当量的计算值)。表1结果表明:当采用爆后 40 s 至二分之一稳定时间内的蘑菇云宽度数据进行计算时,所得当量与实际当量的最大相对误差不超过 3%;如果采用蘑菇云临近稳定时的宽度数据进行计算,则误差较大,越临近稳定时的误差越大。因此,采用该方法测量当量时,要尽量利用早期蘑菇云宽度数据,避免利用后期的数据。

表1 利用早期蘑菇云宽度变化率计算核爆当量的误差情况
Table 1 Error between calculating data and real data of nuclear yield

Name of nuclear test	Teapot	Veer wheel	Trinity	Sequel	Plumb	Bread II
D_t /(m/s)	5.6	7.1	8.7	12.8	16.5	17.8
Q_r	7	12	19	43	74	90
Q_c	7.05	11.85	18.49	43.08	75.13	88.7
$(Q_c - Q_r)/Q_r$ (%)	0.7	-1.3	-2.7	0.2	1.5	-1.4

6 结 论

研究表明, D_t 与 Q 是简单的对应关系,可直接用作测量核爆当量的一种新方法。该方法与有无测出精确到秒的核爆炸时刻无关,可测量的时间长,而且利用现有器材即可测量,误差又不大,与原有各种方法相比,其可靠性最高,因而有较大的实用和理论价值。

References:

- [1] Wang J, Li L X. Nuclear Weapon and Defence [M]. Beijing: BUST Press, 1993. 8–116. (in Chinese)
王 坚, 李路翔. 核武器效应及防护 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993. 8–116.
- [2] Glasstone S, Dolan P J. The Effects of Nuclear Weapons [M]. Washington D C: DoD in US, 1977. 21–85.
- [3] Army Office in US. Field Manual for NBC Defence (FM21-40) [M]. Washington D C: Army Office in US, 1999. 122–151.
- [4] DoD in US. NBC Defense Report [R]. Washington D C: DoD in US, 1999.
- [5] Мияшник В В. Protective Manual for NBC Weapon [M]. Beijing: Military Version Press, 1987. 59–77. (in Chinese)
米亚斯尼可夫 В В. 核化生武器防护手册 (吴德俊, 王成富译) [M]. 北京: 军事译文出版社, 1987. 59–77.
- [6] Zhang W G. Method to Calculate Nuclear Yield without Calculator [J]. Journal of Dalian Naval Academy, 1996, 19(3): 41–42. (in Chinese)
张卫国. 无估算装备条件下舰艇核爆当量算法探讨 [J]. 海军大连舰艇学院学报, 1996, 19(3): 41–42.
- [7] Chen S H. Calculation of Nuclear Yield by Height of Mushroom Cloud [J]. Journal of Arms of Service, 2000, 9(5): 47. (in Chinese)
陈淑花. 用早期烟云高度数据计算核爆当量 [J]. 现代兵种, 2000, 9(5): 47.
- [8] Jin L A, Zhang X. Study on Nuclear Yield Detection in Warship [J]. Journal of Chemical Defence, 1995, 7(1): 25–29. (in Chinese)
金良安, 张 骧. 对舰艇核爆当量探测的分析与思考 [J]. 防化学报, 1995, 7(1): 25–29.
- [9] DASA1251. The Corpus of Nuclear Tests Data [M]. Washington D C: DoD in US, 1979. 13–624.
- [10] Zhang Z S. Nuclear Weapon Detection and Apparatus [M]. Beijing: Chemical Defence Academy Press, 1994. 14–97. (in Chinese)
张仲山. 核爆探测原理与仪器 [M]. 北京: 防化学院出版社, 1994. 14–97.

Function Relation between Nuclear Exploding Yield and Dilating Velocity of Mushroom Cloud

JIN Liang-An, WANG Xiao-Tong, ZHANG Ming-Hu, YANG Chang-Qing

(*Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China*)

Abstract: The lots of data of mushroom cloud width were analyzed by numerical method. The new concept, dilating velocity of mushroom cloud of nuclear exploding, was put forward. The function relation between the dilating velocity and the nuclear exploding yield was set up. The new detecting method based on this function relation was established. It was tested and verified by the data of nuclear tests that the relative errors of the detecting results of this method are not exceeding 3%.

Key words: dilating velocity of mushroom cloud; nuclear exploding; yield; function relation