

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.03.007

基于爆炸现场破坏分析的 TNT 当量快速估算方法研究*

程辰^{①②} 林明^① 龙源^② 马华原^②

①成都市公安局(四川成都,610100)

②中国人民解放军陆军工程大学(江苏南京,210007)

[摘要] 综合多年一线反恐经验,针对自制爆炸装置的 TNT 当量估算展开研究。一方面,根据现场勘查得到的冲击波超压对人体的杀伤程度,并参考炸点位置和地质强度,计算得到爆炸物的 TNT 当量;另一方面,分析了在不同环境下(空气中、软性地面、硬性地面)爆炸后形成的冲击波超压 Δp_m 的计算公式,同时结合冲击波对现场的破坏程度,计算得到爆炸装置的 TNT 当量。最后,可由 TNT 当量以及现场判定的炸药类型换算得到自制爆炸装置的装药质量。该方法成功地在多次案例分析中得以运用推广。研究成果对于勘察已爆现场、侦破涉爆案件、指导公安反恐防爆工作具有重大意义。

[关键词] 冲击波超压;接触爆炸;TNT 当量

[分类号] TQ564;TD235.2⁺¹

Fast Estimation Method of TNT Equivalent Based on Onsite Damage Analysis

CHENG Chen^{①②}, LIN Ming^①, LONG Yuan^②, MA Huayuan^②

①Chengdu Public Security Bureau (Sichuan Chengdu, 610100)

②The Army Engineering University of PLA (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] TNT equivalent estimation of the self-made explosive device was studied combining years of experience in counter-terrorism. TNT equivalent of explosives was calculated according to damage degree caused by shock wave overpressure, blasting location and its geological strength. Calculating formula for shock wave overpressure Δp_m was analyzed in regard to different environments (air, soft ground or hard ground). At same time, TNT equivalent of the explosive device was calculated combining the damage degree of the shock wave to the explosion site. Finally, charge quality of the self-made explosive device could be obtained by the conversion of TNT equivalent and explosive type determined on the spot. This method has been successfully applied in many case analyses. The research results are of great significance to investigation at the detonating scene, detection of the explosion involved cases, and guidance to the anti-terrorist and anti-explosion for public security.

[KEYWORDS] shock wave overpressure; contact explosion; TNT equivalent

引言

爆炸案件具有人员伤亡大、社会影响大、作案风险小等特点,常常被一些不法分子利用来仇杀目标、炸毁建筑、甚至制造恐怖袭击。由于某市公安局对

易燃易爆品管控得当,市辖区范围内发生的涉爆案件逐年递减。然而,近年来,在全国范围内仍有个别的涉爆致伤致死亡案件发生,如“11.5.28”九眼桥公交站办公室爆炸案、“11.7.14”贝森路雷管爆炸案、“11.7.25”彭州爆炸案、“13.11.21”新津爆炸案等,这些案件给反恐形势敲响了警钟。

* 收稿日期:2017-12-03

基金项目:国家自然科学基金(11672331)

作者简介:程辰(1986-),男,硕士研究生,从事反恐防排爆研究。E-mail:89329090@qq.com

通信作者:龙源(1958-),男,博导,从事爆炸力学相关研究。E-mail:longy2017@126.com

在涉爆警情发生时,炸药量的估算结果可以作为案件侦破的重要线索,同时也能真实反映涉爆案件的危险状况。因此,有效、快速地估算出爆炸物当量是公安民警在搜爆排爆作业中的首要任务。

本文中,根据在爆炸现场人员伤亡情况、建筑物的破损程度以及爆破作用圈的大小等数据,得到了快速推算爆炸物当量的方法,对勘察已爆现场、侦破涉爆案件、指导公安反恐防爆工作具有重大意义。

1 根据冲击波超压对人体的杀伤程度估算 TNT 当量

自制爆炸装置种类繁多,在人员密集区域被引爆后,将造成巨大的伤亡。本文中,选取的研究对象为薄壳大当量爆炸物,暂不讨论爆炸装置内部固体碎片和装置外包装在爆炸后形成破片的杀伤作用,单就爆炸产生的冲击波超压 Δp_m 来分析爆炸产生的破坏效应^[1]。

1.1 当量估计

根据大量的试验结果表明,TNT 球形装药(或形状相近的装药)在无限空气介质中爆炸时,空气冲击波峰值超压计算式^[2]为:

$$\Delta p_m = 0.084 \left(\frac{C}{r}\right) + 0.270 \left(\frac{C}{r}\right)^2 + 0.700 \left(\frac{C}{r}\right)^3 = \frac{0.084}{\bar{r}} + \frac{0.270}{\bar{r}^2} + \frac{0.700}{\bar{r}^3}, 1 \leq \bar{r} \leq 15. \quad (1)$$

式中: Δp_m 为无限空气介质中爆炸时冲击波的峰值超压,10⁶Pa; C 为 TNT 的装药质量,kg; r 为距爆心的距离,m; \bar{r} 为比例距离, $\bar{r} = r/\sqrt[3]{C}$,m/kg^{1/3}。

公式应用范围为:18.8r₀ < r < 188r₀,r₀ 为装药半径。

装药在钢板、混凝土、岩石一类的刚性地面爆炸时,可看作是两倍的装药在无限空间爆炸,反射系数取 2,得出 C_e = 2C。因此,计算装药在刚性地面爆炸时空气冲击波的峰值超压 Δp_m 公式^[2]为:

$$\Delta p_m = 0.106 \left(\frac{C}{r}\right) + 0.430 \left(\frac{C}{r}\right)^2 + 1.400 \left(\frac{C}{r}\right)^3 = \frac{0.106}{\bar{r}} + \frac{0.430}{\bar{r}^2} + \frac{1.400}{\bar{r}^3}, 1 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{C}} \leq 15. \quad (2)$$

装药在普通土壤地面爆炸时,地面土壤受到高温、高压爆炸产物的作用发生变形、破坏甚至抛掷到空中形成炸坑^[3]。此时,考虑地面消耗了部分爆炸能量,反射系数小于 2,一般取 1.8,得出 C_e = 1.8C。因此,计算装药在普通土壤地面爆炸时空气冲击波

的峰值超压 Δp_m 公式^[4]为:

$$\Delta p_m = 0.102 \left(\frac{C}{r}\right) + 0.399 \left(\frac{C}{r}\right)^2 + 1.260 \left(\frac{C}{r}\right)^3 = \frac{0.102}{\bar{r}} + \frac{0.399}{\bar{r}^2} + \frac{1.260}{\bar{r}^3}, 1 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{C}} \leq 15. \quad (3)$$

式(1)~式(3)的计算结果如表 1 所示。

表 1 空气冲击波超压 Δp_m 与 \bar{r} 的关系计算结果^[4]

Tab. 1 Calculated results of the relationship between the overpressure of shock wave Δp_m and \bar{r}

$\bar{r}/$ (m · kg ^{-1/3})	$\Delta p_m/kPa$		
	空中爆炸	普通土壤地面爆炸	刚性地面爆炸
2.8	100.0	151.0	163.0
3.0	84.0	125.0	135.0
3.5	62.3	91.1	98.1
4.0	48.8	70.1	75.3
4.5	39.7	56.2	60.2
5.0	33.2	48.4	49.6
6.0	24.7	33.9	36.1
7.0	19.6	26.4	28.0
8.0	16.1	21.4	22.7
9.0	13.6	18.0	19.0
10.0	11.8	15.5	16.3
12.0	9.3	12.0	12.6
14.0	7.6	9.8	10.3
15.0	7.0	8.9	9.4

不同程度的空气冲击波超压对人体的具体损伤程度如表 2 所示。

表 2 空气冲击波超压对人员的杀伤作用^[4]

Tab. 2 Effect of air shock wave on personnel

损伤程度	$\Delta p_m/kPa$
没有杀伤作用	<20
轻微(轻微的挫伤)	20~30
中等(听觉器官损伤、中等挫伤、骨折等)	30~50
严重(内脏严重挫伤,可引起死亡)	50~100
极严重(可能大部分死亡)	>100

统计爆炸现场人员受损伤程度,结合查询表 1、表 2,并处理现场收集的数据,可供爆炸勘验人员估算出爆炸物的 TNT 当量^[5]。其具体方法为:

- 1) 确定自制爆炸物的炸点位置并判断该位置地质强度;
- 2) 将受伤人员所处的位置记下,并测量与炸点之间的直线距离 r;
- 3) 将爆炸后受伤人员的受损程度记下,在表 2

中查出空气冲击波超压的一个范围数值;

4)列表统计估算。

1.2 实际案例剖析

2014年4月30日,在某城市生活广场发生一起恶性爆炸案件;广场是由水泥硬化过的地面(刚性地面);爆炸现场发现a、b、c一共3名伤亡群众(图1)。a已死亡,距离爆炸中心1.5 m,全身组织都有淤血并伴有创口渗血情况;b耳膜穿孔,距离爆炸中心6.2 m,肝和脾脏有内出血症状;c视力受到损伤,距离爆炸中心11.1 m,眼球有局部充血,轻微脑震荡^[6]。



图1 爆炸现场俯拍

Fig. 1 Explosion scene view

对受伤人员进行数据统计后,估算爆炸物的TNT当量,见表3。

\bar{r} 的估算可以通过分析伤者的受伤程度,查询表2,可以得到 Δp_m , Δp_m 带入表1得出的范围,也可通过冲击波超压公式(1)精确求得,进而求得 $\sqrt[3]{C}$ 和C的数值。

采用上述计算方式,不同涉爆案件得出的TNT当量数值可能会有偏差。影响偏差的因素包括^[7-10]:爆炸位置地面土质有软硬分层变化、受伤人员有非爆炸冲击波因素的移动、爆炸飞散出的破片造成伤情加重、统计计算时取值不精确等。为克服上述因素的影响,需要侦查人员在工作中仔细勘验现场痕迹,精确测量,根据实际情况综合判断,对比各种涉爆案件的复原模拟计算结果来积累经验,最后获取更为精确的结果^[11]。

表3 统计数据后估算爆炸物的TNT当量

Tab. 3 Estimated TNT equivalent of explosives

受伤人员	距离 r/m	受伤程度	Δp_m (刚性地面)/kPa	$\bar{r}/$ ($m \cdot kg^{-\frac{1}{3}}$)	$\sqrt[3]{C}/kg^{\frac{1}{3}}$	C/kg
a	1.5	极严重	>100	<3.5	>0.429	
b	6.2	中等	30~50	5.0~7.0	0.886~1.240	1.072~1.074
c	11.1	轻微	20~30	7.0~9.0	1.233~1.586	

2 根据药量简化计算公式来估算TNT当量

2.1 当量估计

由于爆炸装置在接触地面时爆炸产物对目标的直接作用,炸点附近的石头和土壤会被抛掷而形成炸坑^[12]。因此,可以测定爆坑深度来计算所用药量,此时可采用炸药内部爆破的药量计算简化公式:

$$C = A \cdot B \cdot R^3. \quad (4)$$

式中:C为集团装药的药量,kg;A为与炸药的性能和材料性质有关的系数,炸药一定,仅与材料的性质有关,称为材料抗力系数,kg/m³;B为填塞系数;R为破坏半径,m。

表4列举了各种材料的抗力系数。表4中的抗力系数适用于中级炸药,用硝酸炸药接触爆破时需增加50%;坚硬材料中有裂缝,A可减少50%。表5则列举了不同位置装药的填塞系数。

表4 材料的抗力系数

Tab. 4 Resistance coefficient of materials

材料名称		A/ ($kg \cdot m^{-3}$)
石灰砂浆砌 的砖墙	不对称的 坚固的	0.77 1.08
水泥砂浆砌的砖墙		1.24
料石砌的墙		1.45
混凝土	200 [#] ~300 [#] 500 [#] ~600 [#]	1.50 1.80
钢筋混凝土	炸散混凝土不炸断钢筋 炸断部分钢筋	5.00 20.00

2.2 实际案例剖析

2011年12月1日下午5时30分左右,某市关山中学旁边的建设银行发生爆炸。据该市公安局介绍,这次爆炸造成过路群众2人死亡、10余人受伤(图2)。案件发生后,市公安局迅速组织警力对案

表 5 填塞系数
Tab. 5 Filling coefficients

装药位置	填塞系数 B	
	无填塞物	有填塞物(土壤)
表面上 (外部装药)	9.0	5.0 (爆破钢筋混凝土取 6.5)
药瓮中	6.0	4.5
目标 1/3 厚度的 药洞中	1.7	1.5
目标中央	1.3	1.2
桥台挡土壤后 的土壤中	1.7	1.5

情展开调查,其中,现场爆炸物当量分析就是重要一环^[13-15]。



图 2 爆炸现场俯拍

Fig. 2 Explosion scene view

案件的勘测过程中,测得爆坑深度为 0.35 m,爆坑周围环境为水泥硬地,属于普通混凝土硬化路面,查表 4 得: A 取 1.50 kg/m^3 ;装置爆炸时的位置刚好处于地表,查表 5 得填塞系数 B ,取值为 9.0;因此,由式(4)可得出现场爆炸物当量:

$$C = A \cdot B \cdot R^3 = 1.50 \times 9.0 \times 0.35^3 = 0.579 \text{ kg}。$$

表 6 常见高能炸药的 TNT 当量系数

Tab. 6 TNT equivalent coefficient of common high energy explosives

炸药名称	质量比能/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	密度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	爆压/ GPa	TNT 当量系数
RDX	5 360	1.65	8.70	34.0	1.185
HMX	5 680	1.90	9.11	38.7	1.256
氯化铅	1 540	3.80	5.50		0.034
斯蒂芬酸铅	1 910	2.90	5.20		0.423
雷汞	1 790	4.43			0.395
硝化甘油(液)	6 700	1.59			1.481
苦味酸	4 180	1.71	7.26	26.5	0.926
氯化银	1 890	1890	5.10		0.419
特屈儿	4 520	1.73	7.85	26.0	1.000
TNT	4 520	1.60	6.73	21.0	1.000
C4	4 870	1.58			1.078

3 TNT 当量系数换算炸药质量

由于 TNT 是一种常用的军用炸药,大部分爆炸试验都是以 TNT 为爆源,爆炸相似理论的经验公式也都是建立在以 TNT 装药为爆源的基础上。若爆源不是 TNT,就需要一个转换系数以便能够应用由 TNT 装药得到的数据和公式。这一转换系数称为 TNT 当量系数或 TNT 的等效药量系数。表 6 为常见的高能炸药的 TNT 当量系数。质量比能为 E/M , TNT 当量系数为 $(E/M)_i / (E/M)_{\text{TNT}}$ 。

高密度的军用炸药能量密度大,爆温、爆压等参数高,用 TNT 当量系数来评价所产生的爆炸波不致引起太大的偏差。但是民用炸药,特别是火药和烟火剂作为爆源时,其能量密度较低,其爆炸波效应与以热为基础求得的 TNT 当量相比有较大差别。因此,需采用爆炸输出来确定爆源 TNT 当量系数的办法,即测定其冲击波峰值来估计 TNT 当量系数^[16]。表 7 为常见炸药的冲击波峰值下估计的 TNT 当量系数。

通过查取表 6 和表 7 的数据,可以计算出实际炸药的质量 $C_{\text{实}}$ 。

$$C_{\text{实}} = f_i C_{\text{TNT}}。 \quad (5)$$

式中: f_i 为该炸药的 TNT 当量系数。

4 结论

1) 计算炸药的 TNT 当量适用于已爆现场的推演复原。介绍了公安爆炸案件现场勘验时两种计算

表7 常见普通炸药的冲击波峰值
压力下估计 TNT 当量系数

Tab.7 Peak pressure TNT equivalent coefficient
of shock wave of common explosives

炸药类型	$\Delta p_m/kPa$		
	30~50	100~200	300~400
4#炸药	86	114	101
泰安	133	117	124
2#岩石	59	74	66
三硝基萘	30	43	36
黑火药	35	32	35

TNT 当量的方法:一是根据冲击波超压对人体的杀伤情况来计算;二是根据炸药对介质的直接作用计算,两种计算方法一繁一简,可配合案件验证结果。

2)介绍了各类常见炸药的 TNT 当量系数,可用于换算得到涉爆案件现场实际炸药的质量,对案件侦破工作具有重大意义。

3)依据爆炸冲击波超压伤害原理来计算炸药 TNT 当量也可应用于未爆现场的预警处置。公安力量处置涉爆案件中的未爆现场时,通过对现场各要素的观察和分析,估算出爆炸装置的炸药量,可反向推算出爆炸冲击波超压致人伤残的极限距离。这对于确定现场的安全范围,合理布置公安警戒区域,有效安排攻坚处置力量具有重要的指导意义。

参 考 文 献

[1] 公安部. 公刑[2012]2154号:公安机关处置重特大爆炸案件现场工作规范[Z]. 2012.
Ministry of Public Security. Public Penalty [2012] 2154; The Public Security organs handle the field work standard of the heavy explosion cases [Z]. 2012.

[2] 徐全军,毛益明,武双章. 爆炸及其作用[M]. 南京:解放军理工大学野战工程学院,2015:251-255.
XU Q J, MAO Y M, WU S Z. Explosion and its effect [M]. Nanjing: College of Engineering, PLA University of Science and Technology, 2015:251-255.

[3] 钱七虎. 反爆炸恐怖安全对策[M]. 北京:科学出版社,2005.

[4] 叶序双. 爆炸作用基础[M]. 南京:解放军理工大学工程兵工程学院,1991:259-265.
YE X S. Foundation of explosion action [M]. Nanjing: Engineering College, PLA University of Science and Technology, 1991:259-265.

[5] 王百姓. 爆炸犯罪案件侦查要略[M]. 北京:群众出版社,2004:93.

[6] 王圆圆. 缉捕持爆炸物犯罪嫌疑人行动的处置指挥[J]. 湖南公安高等专科学校学报,2009,21(5):127-129.
WANG Y Y. The commanding of arresting the holding-exploder suspects [J]. Journal of Hunan Public Security College, 2009,21(5):127-129.

[7] 刘亚琴. 浅谈爆炸案件的现场处置及勘查[N]. 人民公安报,2006-01-03.

[8] 陈立宏,张洪国,张彦春. 常见遥控类爆炸装置关键组成部件及其爆炸碎片研究[J]. 中国刑警学院学报,2015(4):56-58.

[9] 万红. 实用爆炸装置图解与处置[M]. 北京:中国人民公安大学出版社,2006:175-179.

[10] 白海娟,屈耀伦. 新疆恐怖主义犯罪的特点和新动向[J]. 南都学坛:南阳师范学院人文社会科学学报,2016,36(6):75-79.

[11] 张连生. 关于建立健全反恐防暴机制的实践与思考[J]. 铁道警察学院学报,2015,25(2):15-18.

[12] 王文,皮建华,代勇. 刑事科学技术专业综合实验实训的构建[J]. 四川警察学院学报. 2013,25(1):98-104.
WANG W, PI J H, DAI Y. On construction of comprehensive experiment and training for criminal science and technology professional [J]. Journal of Sichuan Police College, 2013,25(1):98-104.

[13] 陈蕊丽. 模拟实训课程在公安专业教学中的作用探讨[J]. 求实,2011(增1):263-264.

[14] 侯碧海. 加强实验实训教学提高刑事技术人才培养水平[J]. 广西警官高等专科学校学报,2007(2):10-12.

[15] 姜平,贾洁萍,孔庆兵. 公共危机管理与突发事件应对[M]. 北京:红旗出版社,2011.

[16] 陈猛,孙剑. 浅谈现场物证的规范化管理[J]. 河南公安高等专科学校学报,2008,(6):172.