

TNT 空中爆炸超压的相似律

仲 倩, 王伯良, 黄 菊, 惠君明

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘 要:利用高分辨率、高精度试压系统测定了静爆试验中不同装药量TNT的冲击波超压。依据试验数据,提出了描述冲击波超压峰值与比例距离关系的改良经验式,并与试验数据和文献值进行了对比分析。结果表明,系统的相对偏差小于5.3%,与文献数据相对偏差的平均值为5.61%,拟合的新公式可应用于战斗部爆炸威力评估和理论计算。

关键词:爆炸力学; TNT; 冲击波; 超压; 比例距离; 相似律

中图分类号: TJ55; O383

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2010)04-0032-04

Study on the Similarity Law of TNT Explosion Overpressure in Air

ZHONG Qian, WANG Bo-liang, HUANG Ju, HUI Jun-ming

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A pressure measurement system with high resolution and precision was employed to measure the shock wave overpressure (Δp) of different loading doses of TNT in field explosion tests. Based on the experimental data and explosion law, an improved empirical formula describing the Δp vs relative distance (\bar{R}) relation was proposed. Meanwhile, the new formula is compared with the experimental data in this experiment and literature ones. The results show that the relative deviation of the measurement system is less than 5.3%. The average relative deviation is 5.61% which compared with the experimental data in literature. The new formula can be used for the evaluation and theoretical calculation of explosion power in the future.

Key words: explosion mechanics; TNT; shock wave; overpressure; relative distance; similarity law

引 言

爆炸威力研究中,炸药爆炸产生的空气冲击波超压常常作为评价爆炸威力的一个重要参数。通常,研究人员根据实测的爆炸冲击波超压值与TNT爆炸冲击波超压值进行比较,分别求出各对应点的等效TNT药量,从而求出该战斗部爆炸威力 TNT 当量比^[1]。因此,TNT 炸药爆炸冲击波超压值的准确性直接影响到战斗部爆炸威力的评估。Brode^[2]及Henrych^[3]等总结的超压经验公式计算结果与试验数据偏差较大,无法直接应用到战斗部威力评估中。於津^[4]及杨鑫等^[5]总结的经验公式精度有所提高,但由于缺乏大量的试验数据,其经验公式的适用范围较小。所以现有的TNT冲击波超压经验公式需要进一步完善。

冲击波超压测试系统的配置是影响拟合结果的一个重要因素,根据美国军用标准的要求建立了一套冲击波超压测试系,精度为14bit,采样频率为65MHz,与以往的测压系统相比,本测试系统更加符合爆炸特性的要求^[6-7]。

本研究采用该测试系统所获得数据与理论研究相结合的方法对TNT的冲击波超压公式进行分析研究,得到TNT爆炸冲击波超压经验公式,并将经验公式与试验数据及文献试验数据进行对比,新拟合的经验公式系统偏差较小,具有一定的适用性,为战斗部威力评估提供可靠的依据。

1 实 验

1.1 冲击波超压测试系统简介

空中爆炸超压有自由场超压和壁面超压两种。

收稿日期:2009-10-14; 修回日期:2010-04-13

作者简介:仲倩(1981—),女,博士研究生,从事炸药爆炸参数测试及毁伤评估研究。

通讯作者:王伯良(1964—),男,教授,从事爆炸及其应用研究。

壁面超压是指初始冲击波到达壁面(主要是地面)产生反射后壁面所承受的压力,该压力比自由场压力高。由于爆炸的破坏作用等原因,要测定自由场超压很困难,尤其对于大药量试验基本上是不可能的,而且实际战斗部也是经反射后的冲击波作用毁伤目标。因此,本研究测试的是壁面压力。

根据美国军用标准和爆炸相关特性,建立了一套测试系统,如图1所示。由联动控制仪同步引爆爆源,爆源产生的冲击波经过各压力传感器的工作面时,其晶体在压力作用下发生形变,内部产生“极化现象”,在垂直于电轴的表面上产生电荷并由其内置的电荷放大器对信号进行放大,经过信号调理仪传送到多通道的VXI数据采集仪,然后由计算机系统对所获信号进行数据处理。

传感器选用美国PCB公司102A系列,信号调理仪选用美国PCB公司481A型号;数据采集仪是成都微测公司VXI-1115型,14位的精度,65M的采样率,符合美国军用标准。

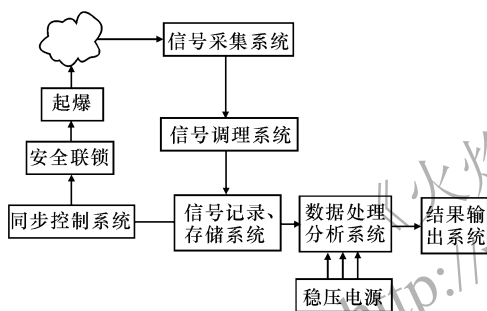


图1 测试系统示意图

Fig. 1 Measurement system chart

1.2 靶场布置和试验装置

将TNT炸药放在距地面1m的支架上,以药柱在地面上的垂直投影点为爆心,在爆心相对垂直的两条射线上布置地面传感器,传感器分别布置在距爆心3、4、5、6、8、12、14、17、20、22和24m处。

1.3 样品

试验样品为熔铸TNT药柱,药量分别为1、8、10、30和35kg,装药的长径比为1:1,以钝化RDX为传爆药,用8号雷管上端起爆。

2 结果与分析

2.1 冲击波超压的经验公式

Brode^[2]用模型相似理论给出TNT爆炸冲击波峰值超压的表达式为:

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{0.657}{R^3} + 0.098 & \Delta p > 0.98 \\ \frac{0.096}{R} + \frac{0.143}{R^2} + \frac{0.573}{R^3} - 0.019 & 0.0098 \leq \Delta p \leq 0.98 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δp 为冲击波超压,MPa; \bar{R} 为比例距离($\bar{R} = r/\sqrt[3]{W}$; r 为测试点到爆心的距离,m; W 为药量,kg)。

Henrych^[3]用试验的方法得到冲击波峰值超压公式为:

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{1.379}{\bar{R}} + \frac{0.543}{\bar{R}^2} + \frac{0.035}{\bar{R}^3} + \frac{0.006}{\bar{R}^4} & 0.05 \leq \bar{R} < 0.3 \\ \frac{0.607}{\bar{R}} + \frac{0.032}{\bar{R}^2} + \frac{0.209}{\bar{R}^3} & 0.3 \leq \bar{R} < 1 \\ \frac{0.065}{\bar{R}} + \frac{0.397}{\bar{R}^2} + \frac{0.322}{\bar{R}^3} & 1 \leq \bar{R} \leq 10 \end{cases} \quad (2)$$

Mills^[8]用相似理论及数值模拟相结合的方法得到TNT爆炸冲击波超压的表达式:

$$\Delta p = \frac{0.108}{\bar{R}} - \frac{0.114}{\bar{R}^2} + \frac{1.772}{\bar{R}^3} \quad (3)$$

M. A. Sadvoskiy^[9]根据模型相似律理论建立比例距离关系比较式,由试验确定系数,得到高爆炸药冲击波峰值超压的表达式为:

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{1.07}{\bar{R}^3} - 0.1 & \bar{R} \leq 1 \\ \frac{0.076}{\bar{R}} + \frac{0.255}{\bar{R}^2} + \frac{0.65}{\bar{R}^3} & 1 < \bar{R} \leq 15 \end{cases} \quad (4)$$

对于大药量TNT炸药爆炸,文献^[10]中给出TNT在近地面爆炸时冲击波超压的计算公式:

$$\Delta p = \frac{0.102}{\bar{R}} + \frac{0.399}{\bar{R}^2} + \frac{1.26}{\bar{R}^3} \quad 1 \leq \bar{R} \leq 15 \quad (5)$$

文献^[5]给出TNT爆炸的冲击波超压计算公式:

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{0.084}{\bar{R}} + \frac{0.27}{\bar{R}^2} + \frac{0.7}{\bar{R}^3} & \bar{R} \leq 1 \\ \frac{0.076}{\bar{R}} + \frac{0.255}{\bar{R}^2} + \frac{0.65}{\bar{R}^3} & 1 < \bar{R} \leq 15 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)只是对M. A. Sadvoskiy经验公式在比例距离小于1m/kg^{1/3}情况下的经验公式进行了修正,不具有代表性。

2.2 经验公式计算值与测试结果的对比分析

利用冲击波超压测压系统测试了两组TNT的超压,每组试验用不同药量分别做3次平行试验。为直观地分析经验公式计算值与试验数据之间的差别,绘出不同方法计算冲击波超压比例距离的关系曲线,如图2所示。

由图2可知,Brode和Henrych方法的计算值偏低,Mills经验公式的计算值和文献^[5]的计算值较其他公式相对偏高,尤其是在 \bar{R} 小于2.5m/kg^{1/3}范围内,其计算结果与试验结果偏差较大。随着比例距离 \bar{R} 的增大,经验公式的计算结果与试验数据的偏

差逐渐减小,当比例距离大于 $3 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,两者基本比较接近。

分析认为,产生上述偏差的主要原因:一是超压峰值具有一定的离散性;二是不少研究者的实验研究进行得比较早,测试仪器相对简单,而超压峰值的获取对实验装置的灵敏度、精度及采样频率的要求都很高。

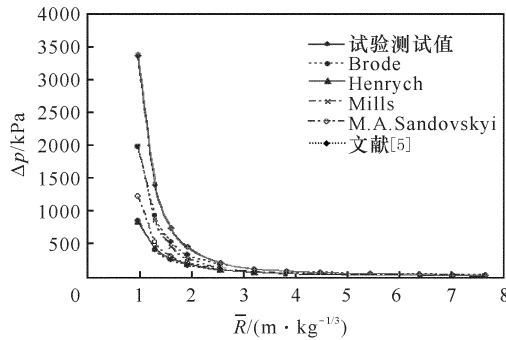


图 2 测试值与经验公式峰值超压对比

Fig. 2 Comparison of the measured values Δp with literature ones Δp

因此,在本测试系统所测得数据基础上对 TNT 的经验公式重新拟合,可为战斗部威力评估提供客观依据。

2.3 公式拟合

2.3.1 计算原理

根据爆炸相似规律,超压与比例距离的关系

式为:

$$\Delta p = x_0 + x_1/\bar{R} + x_2/\bar{R}^2 + x_3/\bar{R}^3 + K \quad (7)$$

根据试验测试数据,以公式(7)为基础,运用最小二乘法原理,对 TNT 进行经验公式拟合。

2.3.2 拟合公式

借助爆炸相似率和最小二乘法原理,对 TNT 超压测试数据进行经验公式拟合,拟合公式如下:

$$\Delta p = \begin{cases} -\frac{0.152}{\bar{R}} + \frac{0.938}{\bar{R}^2} + \frac{2.019}{\bar{R}^3} & \bar{R} \leq 2.5 \\ \frac{0.172}{\bar{R}} - \frac{0.122}{\bar{R}^2} + \frac{2.414}{\bar{R}^3} & 2.5 < \bar{R} \leq 20 \end{cases} \quad (8)$$

2.4 分析与讨论

2.4.1 相对偏差分析

经验公式的拟合过程是一个理想化的爆炸相似律的模拟,从每次测试数据来看,数据曲线并不像拟合的结果那样光滑。为验证上述拟合公式相对理论计算偏差,表 1 列出了用拟合公式(8)计算的 TNT 超压预测值与本次试验测试值。

从表 1 可以看出,试验测试数据与公式拟合值之间的相对偏差均小于 5.30%,其绝对值的平均值为 2.65%,正向偏差的平均值为 6.17%,负向偏差平均值为 5.62%。该公式可用于 TNT 冲击波超压的计算,能够满足后续的威力评价与理论分析的要求。

表 1 TNT 超压值的试验数据和计算值偏差分析

Table 1 Error analysis of the experimental data and calculated ones of the TNT overpressure

$\bar{R}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	$\Delta p/\text{MPa}$				相对偏差/%	正向偏差/%	负向偏差/%
	最大值	最小值	平均值	计算值			
0.95	3545	3182	3365	3187	-5.29	10.09	-0.16
1.27	1484	1285	1400	1437	2.57	3.17	-10.58
1.59	797	729	746	775	3.89	2.76	-5.94
1.91	489	440	460	467	1.52	4.50	-5.78
2.55	215	190	203	194	-4.43	2.79	-2.06
3.18	120	98	110	110	0.00	9.77	-10.91
3.82	89	74	77	76	-1.30	10.11	-2.63
4.46	71	58	65	62	-4.83	8.33	-6.45
5.41	47	42	45	43	-4.44	8.51	-2.33
6.37	34	31	33	33	0.00	2.94	-6.06
7.00	29	26	28	29	3.57	0.00	-10.35
8.14	27	23	24	24	0.00	11.11	-4.17

注:平均值为每组测试平均值,最大值和最小值指每组测试值中每个对比距离上测到的最大值和最小值。

2.4.2 与参考文献数据的比较

为验证上述拟合公式适用的普遍性,选取文

献^[11]中的 TNT 实测数据带入拟合公式进行比较分析,文献^[11]中的测试方法及系统配置与本研究相

似, 分析结果如表2所示。

由表2可见, 文献中测试值与拟合值之间的相对偏差绝对值的平均值为5.61%, 说明该拟合公式可普遍适用于TNT冲击波超压的计算。

表2 与文献试验数据对比分析

Table 2 Comparison of the experimental values Δp with the experimental ones Δp in literature

$\bar{R}/$ ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)	$\Delta p/\text{kPa}$		相对偏差/%
	实测值	计算值	
1.16	1912	1860	-2.74
1.86	484	503	3.96
2.50	208	218	5.05
3.46	110	98	-11.09
4.00	75	73	-2.54
5.50	46	42	-9.24
6.30	36	34	-5.88
7.00	26	29	12.00
8.35	23	23	0.00
9.28	21	20	-4.10
10.00	18	18	2.19
12.60	13	14	8.38
15.00	11	12	5.82

3 结 论

(1) 根据美国军用标准和爆炸相关特性, 建立了一套高精度和高分辨率的冲击波超压测试系统。

(2) 总结出能较好描述冲击波超压峰值与对比距离相似律关系的表达式。通过与试验数据分析比较, 可知该公式的预测值与试验值相对偏差均小于5.30%, 其绝对值的平均值为2.65%。

(3) 通过对文献试验数据与本研究表达式预测值的结果比较, 其相对偏差绝对值的平均值为5.61%, 表明该拟合公式可适用于TNT冲击波超压的计算。

致谢: 感谢范能跃、房莹莹、王凤丹等对本实验的帮助。

参考文献:

[1] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用(下册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.

- [2] Brode H L. Blast wave from a spherical charge[J]. Phys Fluids, 1959(2):217.
- [3] Henrych J. The Dynamics of Explosion and Its Use [M]. Amsterdam: Elsevier, 1979.
- [4] 於津, 彭金华, 张陶, 等. 基于MATLAB的FAE战斗部超压计算的公式拟合[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(3):306-308.
YU Jin, PENG Jin-hua, ZHANG Tao, et al. Formula fitting to overpressure calculation of FAE warhead in MATLAB [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004, 24(3): 306-308.
- [5] 杨鑫, 石少卿. 空气中TNT爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟[J]. 爆破, 2008(2):15-19.
YANG Xin, SHI Shao-qing. Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shockwave in air[J]. Blasting, 2008(2):15-19.
- [6] 王建玲, 郭炜, 冯晓军. TNT、PBX和Hexel空中爆炸冲击波参数的实验研究[J]. 火炸药学报, 2008, 31(6): 42-44.
WANG Jian-ling, GUO Wei, FENG Xiao-jun. Experimental research on the air explosion shock wave parameters of TNT, PBX and hexel [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008, 31(6):42-44.
- [7] Muzychuk E, Mayselless M, Belsky I. Influence of the post-detonation burning process on blast wave parameters in air[C]// 22nd International Symposium on Ballistics. Canada: Destech Publications, 2005:536-543.
- [8] Ahmed Fahmy Farag Tolba. Response of FRP-Retrofitted Reinforced Concrete Panels to Blast Loading [D]. Canada: Carleton University, 2001.
- [9] Sadovskiy M A. Mechanical action of air shock waves of explosion, based on experimental data [M]. Moscow: Izd Akad Nauk SSSR, 1952.
- [10] 惠君明, 陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995.
- [11] 张陶, 惠君明. FAE爆炸场超压与威力的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004(3):176-181.
ZHANG Tao, HHI Jun-ming. Experimental research on the overpressure and power in the FAE blast field [J]. Explosive and Blast, 2004(3):176-181.