

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.04.004

乳化炸药空中爆炸冲击波衰减规律的研究^{*}

夏曼曼 吴红波 徐飞扬 朱可可 余 杭
安徽理工大学化学工程学院(安徽淮南,232001)

[摘 要] 为了研究乳化炸药空中爆炸冲击波的衰减规律,利用空中爆炸测试系统测定了乳化炸药空中爆炸的冲击波超压。根据试验数据,提出了描述冲击波超压峰值与比例距离关系的修正经验式,并将试验数据和经验公式计算值进行了对比分析。结果表明:当比例距离 $z=L/W^{1/3}\leq 2.4$ 时,修正公式与除 Mills 公式以外的其他经验公式吻合得较好;当 $z=L/W^{1/3}>2.4$ 时,修正公式与所有经验公式基本吻合。通过对比,乳化炸药空中爆炸修正经验式可应用于工程爆破实践,对于减少空气冲击波危害具有重要的理论和实际应用价值。

[关键词] 空中爆炸;冲击波;传播规律;乳化炸药

[分类号] TD235.2⁺1;TQ561

Attenuation Rules of Shock Wave in Air Blasting of Emulsion Explosive

XIA Manman, WU Hongbo, XU Feiyang, ZHU Keke, YU Hang
School of Chemistry Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232001)

[ABSTRACT] In order to study the attenuation rule of shock wave in air explosions of emulsion explosive, overpressure of shock wave in air blasting of emulsion explosive was measured by the an air blast test system. Based on the experimental data, a modified empirical formula to describe the relationship between peak value of overpressure of shock wave and proportional distance was proposed. Meanwhile, experimental data and calculated values of the new empirical formula were compared and analyzed. Results show that the new empirical formula agrees well with the other empirical formulas except for Mills formula when the proportional distance $z=L/W^{1/3}\leq 2.4$, and when the proportional distance is greater than 2.4, the new empirical formula is in good agreement with all empirical formulas. Through comparative analysis, the improved empirical formula of air explosions of emulsion explosive, which has theoretical and practical significance for reducing the damage of air shock wave, could be applied to the practice of engineering blasting.

[KEYWORDS] air blasting; shock wave; propagation rule; emulsion explosives

引言

近年来,乳化炸药作为工业炸药的主流品种,广泛应用于民爆行业。但乳化炸药爆炸时产生的空气冲击波超压使邻近建筑物门窗玻璃破碎、人和动物受伤的案例时有发生。因此,对乳化炸药爆炸空气冲击波产生的超压的衰减规律及影响因素的研究显得尤为重要^[1]。

国内外已有不少学者对炸药冲击波超压的特性进行了研究:仲倩等^[2]研究了 TNT 空中爆炸超压的相似律;牛余雷等^[3]通过试验与理论计算,研究了

炸药爆轰参数与空中爆炸冲击波超压的关系,得到了炸药空中爆炸冲击波超压由其爆热、爆容和爆速共同决定,且三者对冲击波超压的影响相同的结论;刘玲等^[4]对 5 种自制炸药进行了冲击波超压测试及 TNT 当量估算,得到的 5 种自制炸药当量系数计算结果与文献值基本一致,且相对误差在 2% 以内。多数学者仅限于单质炸药冲击波参数的研究,而对于混合炸药超压的传播规律的文献报道甚少。

本文中,利用空中爆炸测试系统测试乳化炸药在不同距离、药量下的超压大小,得到描述冲击波超压峰值与比例距离关系的修正经验公式,为研究乳化炸药空中爆炸冲击波的衰减规律、减少爆破冲击

^{*} 收稿日期:2017-03-20
基金项目:安徽省大学生创业创新训练项目
作者简介:夏曼曼(1992-),女,硕士,主要从事工业炸药方面的研究。E-mail:1003470289@qq.com
通信作者:吴红波(1975-),男,博士,副教授,研究生导师,从事乳化炸药性能研究及爆炸安全技术与管理的教学与科研工作。E-mail:hbwu@aust.edu.cn

波的危害提供理论指导。

1 试验部分

1.1 试验试剂与仪器

试剂:硝酸铵、硝酸钠、高分子乳化剂、复合蜡、树脂微球、水等。

仪器:电子天平、加热板、温度计、乳化器、力科数字示波器(HDO 4034)、电荷放大器、CY-8095 压电式压力传感器等。

1.2 乳化炸药的制备

按照表 1 称取各组分,分别把水相材料混合且加热溶解,油相材料加热熔化,制备乳化炸药。

表 1 乳化炸药配方

Tab.1 Formulation of emulsion explosive %				
组分	氧化剂	水	油相	敏化剂
质量分数	81.5	11.0	7.0	0.5

1.3 乳化炸药超压的测定

超压测试主要利用压电式压力传感器、电荷放大器、数字示波器等试验仪器。称取一定质量的乳化炸药,制作球形药包。按图 1 所示的测试系统原理图连接好仪器,使药包中心与传感器保持水平,按下起爆装置,炸药爆炸时产生冲击波作用于压电式压力传感器,经电荷放大器将信号放大,再经存储示波器以电压的形式输出。药包质量不变,改变药包与传感器的距离,测得 5 组数据;保持药包与传感器距离不变,改变药包质量,另测得 5 组数据。试验结束后,取 3 发雷管对测试系统灵敏度进行标定。

2 试验结果与分析

对测试系统电荷灵敏度进行标定,传感器的压力电荷灵敏度 $S_q = 189.5 \text{ pC/MPa}$ 。

2.1 冲击波超压的经验公式

1955 年, Brode 提出高爆炸药爆炸冲击波超压峰值的表达式为^[5]:

$$\Delta p_m = \begin{cases} \frac{0.67}{z^3} + 0.1, & z > 1; \\ \frac{0.0975}{z} + \frac{0.1455}{z^2} + \frac{0.5850}{z^1} - 0.0019, & 0.01 \leq z \leq 1.00. \end{cases} \quad (1)$$

1979 年, Henrych 阐述空气中冲击波的超压峰值表达式为^[6]:

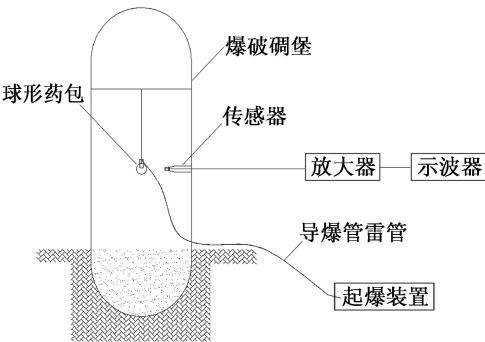


图 1 测试系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the test system

$$\Delta p_m = \begin{cases} \frac{1.40717}{z} + \frac{0.55397}{z^2} + \frac{0.03572}{z^3} + \frac{0.000625}{z^4}, & 0.05 \leq z < 0.30; \\ \frac{0.61938}{z} - \frac{0.03262}{z^2} + \frac{0.21324}{z^3}, & 0.3 \leq z < 1.0; \\ \frac{0.0662}{z} + \frac{0.4050}{z^2} + \frac{0.3288}{z^3}, & 1 \leq z \leq 10. \end{cases} \quad (2)$$

Mills 用相似理论及数值模拟相结合的方法得到 TNT 爆炸冲击波超压峰值的表达式为^[7]:

$$\Delta p_m = \frac{0.108}{z} - \frac{0.114}{z^2} + \frac{1.772}{z^3}. \quad (3)$$

Sadovskyi 根据模型相似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超压峰值的表达式为^[8]:

$$\Delta p_m = \begin{cases} \frac{1.07}{z^3} - 0.1, & z \leq 1; \\ \frac{0.076}{z} + \frac{0.255}{z^2} + \frac{0.650}{z^3}, & 1 < z \leq 15. \end{cases} \quad (4)$$

文献[9]给出 TNT 爆炸冲击波超压计算公式:

$$\Delta p_m = \begin{cases} \frac{0.084}{z} + \frac{0.270}{z^2} + \frac{0.700}{z^3}, & z \leq 1; \\ \frac{0.076}{z} + \frac{0.255}{z^2} + \frac{0.650}{z^3}, & 1 < z \leq 15. \end{cases} \quad (5)$$

式(1)~式(5)中: z 为比例距离,定义为

$$z = \frac{L}{\sqrt[3]{W}}. \quad (6)$$

式中: L 为爆心距, m; W 为等效 TNT 药量, kg。

对其他炸药,需要换算成 TNT 当量后进行等效计算:

$$W_T = \frac{WQ_v}{4.184 \times 10^6}. \quad (7)$$

式中: Q_v 为乳化炸药爆热, J/kg, 经查阅文献, 计算

得 $Q_v = 3\,008.01\text{ kJ/kg}$ 。由传感器标定结果可知,测定的乳化炸药超压值可由下式计算:

$$\Delta p_m = \frac{V_m}{K \times S_q} \quad (8)$$

式中: V_m 为峰值电压,mV; K 为电荷放大器灵敏度,mV/pC; S_q 为传感器的压力电荷灵敏度,pC/MPa。

2.2 经验公式计算值与测试结果的对比分析

计算值和实测值如表 2 所示。表 2 中,根据文献[9]计算出的 Δp_m 用 $\Delta p_{m\text{文}}$ 表示。

为了更直观地分析经验计算值与试验数据之间的区别,绘出不同距离处和不同药量时的超压峰值,如图 2、图 3 所示。

观察图2发现,试验所测的超压峰值小于经验公式计算值。一般说来,相对误差率随着距离的增大而减小,当距离较大时,实测值与经验公式匹配较好。分析误差产生的原因:经验公式是早期试验所得,试验进行的时间早,测试仪器简单,而超压峰值的获取对试验装置的灵敏度、精度及采样频率的要求都很高,本试验中所使用的力科数字示波器(HDO4034)采样频率大,CY-8095压电式压力传感

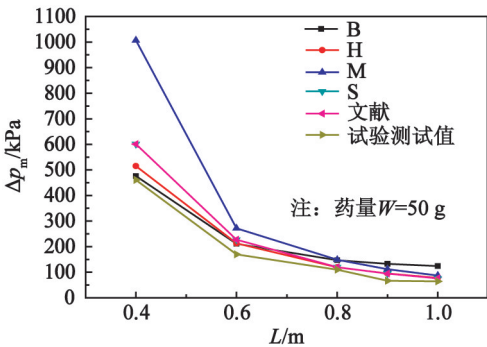


图 2 不同距离时测试值和经验公式超压峰值
Fig.2 Overpressure peak from test with different distances and the empirical formula

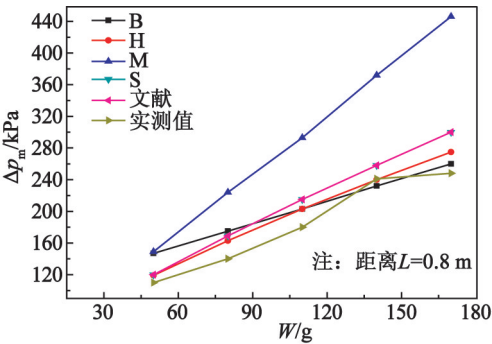


图 3 不同药量时测试值和经验公式超压峰值
Fig.3 Overpressure peak from test with different charges and the empirical formula

器灵敏度、精度高,因此,所得试验结果更为可信。

但是,无论是试验值还是经验计算值,两者都随着距离的增加迅速下降。其原因为:空气冲击波以球形向四周传播,随着球半径 R 的增加,球表面以 $4\pi R^2$ 的速率增加;因而,即使在没有其他能量损耗的条件下,通过冲击波波阵面单位面积上的能量也不断减少。另一方面,由于冲击波传播过程是不等熵过程,空气受冲击压缩后要将部分机械能转变成热能而消耗掉,使维持冲击波运动的能量减少;因此,空气冲击波在传播过程中必然要迅速衰减。

观察图 3 可知,在药量较少时,Brode 公式和其他经验公式偏差较少,随着药量增加,偏差越来越大;不同药量测试值与经验计算值相比偏差较大,其他各个经验公式所得数值之间差距也较大;随着药量的增加,试验冲击波峰值变大,但药量和峰值之间无规律可循,爆心距一定时,可以借助 Henrych 公式对其进行粗略估算。

借助爆炸相似率原理,可得超压与比例距离的关系为:

表 2 乳化炸药超压经验公式计算值和实测值

Tab.2 Theoretical value and measured value of overpressure of emulsion explosives

药量/ g	距离/ m	比例距离 $z/$ ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)	V_m/mV	$\Delta p_{mB}/$ kPa	$\Delta p_{mH}/$ kPa	$\Delta p_{mM}/$ kPa	$\Delta p_{mS}/$ kPa	$\Delta p_{m\text{文}}/$ kPa	实测值 $\Delta p_m/$ kPa
50	0.40	1.212	873	476	515	1007	601	601	461
50	0.60	1.818	322	211	213	272	227	227	170
50	0.80	2.424	208	147	119	149	120	120	110
50	0.90	2.727	127	133	95	112	94	94	67
50	1.00	3.030	121	124	78	87	76	76	64
80	0.80	2.073	266	175	163	224	169	169	140
110	0.80	1.864	341	203	203	293	215	215	180
140	0.80	1.720	456	232	240	372	258	258	241
170	0.80	1.612	470	260	275	446	300	300	248

$$\Delta p_m = x_0 + \frac{x_1}{z} + \frac{x_2}{z^2} + \frac{x_3}{z^3} + K. \quad (9)$$

根据最小二乘法原理,利用表 2 测试数据,对乳化炸药超压测试数据进行公式拟合,拟合公式如下:

$$\Delta p_m = \begin{cases} \frac{0.147}{z} + \frac{1.951}{z^2} - \frac{3.013}{z^3}, z \leq 2.4; \\ -\frac{0.411}{z} + \frac{1.834}{z^2} - \frac{0.004}{z^3}, z > 2.4. \end{cases} \quad (10)$$

同时将修正公式与经验公式所得结果作图比较,如图 4 所示。

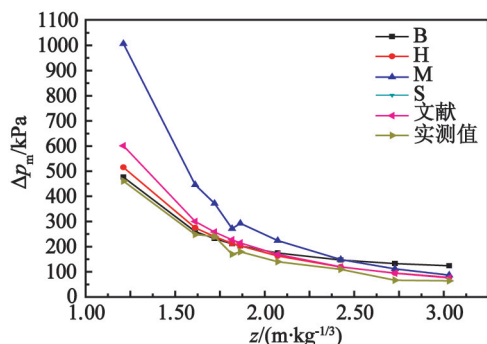


图 4 不同比例距离时测试值和经验公式超压峰值

Fig. 4 Overpressure peak from test with different proportional distances and the empirical formula

由图 4 可知,比例距离较小时,修正公式与除 Mills 公式以外的其他经验公式的超压峰值接近,偏差较小;比例距离越大,修正公式和经验公式的超压峰值越接近,偏差越小。揭示了乳化炸药冲击波超压峰值随比例距离的衰减规律。

3 结论

利用空中爆炸测试系统研究了乳化炸药不同距离、药量与超压的关系,结果表明:

1) 在乳化炸药冲击波传播规律研究中,得到乳化炸药超压峰值和比例距离的改良经验公式:

$$\Delta p_m = \begin{cases} \frac{0.147}{z} + \frac{1.951}{z^2} - \frac{3.013}{z^3}, z \leq 2.4; \\ -\frac{0.411}{z} + \frac{1.834}{z^2} - \frac{0.004}{z^3}, z > 2.4. \end{cases}$$

2) 试验所测数据与除 Mills 公式以外的其他经验公式接近,尤其在冲击波传播后期冲击波衰减特性吻合较好,说明乳化炸药空中爆炸冲击波传播规律研究中超压公式的拟合和试验方法是有效的。

3) 通过试验分析了实际情况下炸药爆炸冲击波的传播规律,对于减少爆炸冲击波产生的安全事

故具有理论和实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] 乔小玲,胡毅亭,彭金华,等. 岩石型乳化炸药的 TNT 当量[J]. 爆破器材,1998,27(6):5-8.
QIAO X L, HU Y T, PENG J H, et al. TNT equivalence of a rock emulsion explosive[J]. Explosive Materials, 1998,27(6):5-8.
- [2] 仲倩,王伯良,黄菊,等. TNT 空中爆炸超压的相似律[J]. 火炸药学报,2010,33(4):32-35.
ZHONG Q, WANG B L, HUANG J, et al. Study on the similarity law of TNT explosion overpressure in air[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010,33(4):32-35.
- [3] 牛余雷,冯晓军,李媛媛,等. 炸药爆轰参数与空中爆炸冲击波超压的关系[J]. 火炸药学报,2013,36(4):42-45.
NIU Y L, FENG X J, LI Y Y, et al. Relation of air explosion shock wave overpressure and detonation parameters of explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013,36(4):42-45.
- [4] 刘玲,袁俊明,刘玉存,等. 自制炸药的冲击波超压测试及 TNT 当量估算[J]. 火炸药学报,2015,38(2):50-53.
LIU L, YUAN J M, LIU Y C, et al. Shock wave overpressure test and evaluation of TNT equivalent of self-made explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015,38(2):50-53.
- [5] BRODE H L. Blast wave from a spherical charge[J]. Physics of Fluids,1959(2):217.
- [6] 亨利奇. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国,译. 北京:科学出版社,1987.
HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use[M]. XIONG J G, translated. Beijing: Science Press, 1987.
- [7] TOLBA A F F. Response of FRP-retrofitted reinforced concrete panels to blast loading[D]. Ottawa, Canada: Carleton University, 2001:12.
- [8] 叶晓华. 军事爆破工程[M]. 北京:解放军出版社,1999:8.
- [9] 杨鑫,石少卿,程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟[J]. 爆破,2008,25(1):15-18,31.
YANG X, SHI S Q, CHENG P F. Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shock wave in air[J]. Blasting, 2008,25(1):15-18,31.