

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0432

新型发射药爆炸 TNT 当量系数的实验研究*

高金明¹, 曾丹¹, 孙磊¹, 陈力², 何成龙³

- (1. 中国兵器工业火炸药工程与安全技术研究院, 北京 100053;
2. 东南大学爆炸安全防护教育部工程研究中心, 江苏 南京 211189;
3. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: TNT 当量系数是危险品工程抗爆设计和安全距离确定的重要依据。为确定 H1 和 H2 两种新型高能发射药的 TNT 当量系数, 分别开展了 10 kg TNT 和新型发射药的空气自由场静爆实验。基于修正的当量系数计算方法和测量得到的不同爆心距离处冲击波超压时程曲线, 确定了不同比例距离处两种高能发射药的超压和比冲量 TNT 当量系数。研究表明, 发射药爆炸产生的冲击波传播规律与 TNT 炸药爆炸产生的冲击波传播规律相同, 符合爆炸相似律, 相同质量发射药爆炸产生的冲击波超压和比冲量都显著高于 TNT 的。随着比例距离的增大, H1 的超压当量系数先增大后减小, 最大值为 1.34; H2 的超压当量系数逐渐减小, 最大值为 1.26。两种新型发射药的比冲量 TNT 当量系数均随比例距离的增大先减小后增大, H2 的比冲量 TNT 当量系数大于 H1 的, 最大值为 1.38。本文中修正的计算方法能更准确计算被试样品的 TNT 当量系数, 实验结果可为提高抗爆结构安全性设计提供参考。

关键词: 发射药; TNT 当量系数; 超压; 比冲量; 静爆

中图分类号: O382.1

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

Experimental study on TNT equivalent coefficients for two new kinds of propellants

GAO Jinming¹, ZENG Dan¹, SUN Lei¹, CHEN Li², HE Chenglong³

- (1. China Ordnance Engineering and Safety Technology Research Institute, Beijing 100053, China;
2. Engineering Research Center of Safety and Protection of Explosion and Impact of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;
3. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: The TNT equivalent coefficient is an important evidence to guide the blast-resistant design and safe-distance determination for dangerous goods. To find out the TNT equivalent coefficients of two new kinds of propellants (H1, H2), a series of free-field static detonation tests were performed for the two propellants (H1, H2) and flaky 2,4,6-trinitrotoluene (TNT). Five repeated tests were carried out for each explosive and the mass of the tested explosive was 10 kg in each test. And the existing method for calculating the TNT equivalent coefficients was modified. Base on the overpressure-time curves of the shock waves at different distances from the explosion centers, the TNT equivalent coefficients for overpressure and specific impulse at different scaling distances were analyzed by the modified calculation method. The results show that the propagations of shock waves induced by explosions of the propellants agree well with the similar law, and are similar with that induced by explosion of the TNT explosive. Meanwhile, the overpressures and specific impulses of shock waves induced by explosions of the two propellants are much higher than those of the TNT explosive. With the increase of scaling distance, the overpressure TNT equivalent coefficient of H1 first increases to 1.34 and then decreases, while that of H2 decrease

* 收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2020-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(51978166); 中央高校基本科研业务费专项资金(2242021R10131)

第一作者: 高金明(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, janekingeo@163.com

通信作者: 陈力(1982—), 男, 博士, 教授, li.chen@seu.edu.cn

monotonously, and the maximum value is 1.26. With the increase of the scaling distance, both the specific impulse TNT equivalent coefficients of H1 and H2 first increase and then decrease. The specific impulse TNT equivalent coefficient of H1 with the peak value 1.38 is greater than that of H2. The modified method can be used to accurately calculate the TNT equivalent coefficients of the tested samples, and the results can improve the safety design of blast-resistant structures.

Keywords: propellant; TNT equivalent coefficient; overpressure; specific impulse; static explosive

高能发射药可以使身管武器发射动能增高、质量效率和射程增大,提高弹药威力。为满足超远射程或高膛压反装甲弹药的发射需求,进一步提升高膛压火炮的穿甲威力,快速批量生产能量高、力学性能好的新型发射药迫在眉睫^[1],这也对新型发射药生产车间的抗爆隔离设计提出了要求。

冲击波超压不仅是发射药的重要性能指标,也是火炸药、火工品生产车间进行抗爆隔离设计的重要安全参数^[2]。由于装药随载体运动爆炸产生的冲击波超压测试较复杂,量测冲击波超压主要以静爆实验为主^[3]。汪嗣良等^[4]基于锰铜压阻高压量程测试系统,对压装 CL-20 炸药开展了静爆实验,基于信号波形在同轴电缆中的衰减推导出未衰减的实际爆轰波压力。王代华等^[5]选用性能优良的 ICP 压力传感器,基于存储测试原理测定了某型弹的冲击波超压、正压持续时间和冲量。牛余雷等^[6]研究了炸药爆轰参数与冲击波超压之间的关系,基于相似理论和超压数据,计算出了炸药的爆轰参数。段晓瑜等^[7]对 3 种炸药不同距离的反射超压进行了测试,首次发现幂指数拟合公式在取对数后为线性关系。王鹏等^[8]开展了水下静爆实验,通过高速摄影研究了炸药的爆轰性能,揭示了超压及炸药能量在水中的输出规律。现有的静爆冲击波超压计算模型较多,比较经典的是基于相似律发展的 Henrych 公式^[9]、Baker 公式^[10]和 Sadoskyi 公式^[11]等。聂源等^[12]则基于 Baker 公式^[10]进行修正,得到了沿装药不同比例距离和方位角处的动态爆炸冲击波超压峰值。

除了超压,爆炸冲量是另一项非常关键的战技和安全指标^[13-14],同样能够为抗爆隔离设计提供依据。蔡林刚等^[15]基于一种简化的内爆载荷模型计算发现,有效作用时间的长短与冲击波作用时间、冲击波和准静态压力峰值以及舱室的尺寸有关。牟金磊等^[16]推导了冲击波压力/正压作用时间和比冲量与板厚之间的关系,发现比冲量随正压作用时间延长而增大;在刚性壁的情况下,比冲量为自由场的 2 倍。张德志等^[17]基于大量实验数据进行分析,发现球形装药爆炸冲击波正反射超压峰值在比例距离 $0.098 \sim 0.5 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 范围内呈指数衰减。龚莘等^[18]基于地面压力传感器、自由场压力传感器和自由场波速法量测冲击波超压,得到了入射冲击波超压和反射冲击波超压的变化规律。

我国研制的某新型发射药 H 在批量生产、运输和存储过程中具有爆炸危险性,因为尚不明确其爆炸威力的 TNT 当量数据,所以相关生产工房防护设计及安全距离划分等问题至今无法解决。为此,本文中开展一系列的大当量静爆实验,测量得到相同环境下 10 kg TNT 和两种配比的高能发射药的自由场爆炸冲击波时程数据,揭示这两种高能发射药的爆炸冲击波传播规律,计算不同比例距离处发射药超压及比冲量 TNT 当量系数,以期对相关抗爆结构设计和安全风险评估提供基础参数。

1 现场实验

1.1 实验方案

本次实验所涉及的新型发射药有两种配比,分别为 H1 和 H2。TNT 炸药选择标准军用片状产品。为降低装药形状和外壳约束条件对测试结果的影响,发射药(H1、H2)及 TNT 均采用圆柱状纸筒装药。纸筒的外径为 246.5 mm,高度为 250.0 mm,高径比近似为 1:1。为保证发射药和 TNT 能够完全爆轰,采用 8 号工业雷管起爆, JH-2 药柱传爆。JH-2 传爆药柱为压制药柱,质量为 123 g,预留 2 个雷管安装孔。实验时,先将 JH-2 药柱竖直插入 TNT 或发射药装药中,然后再将雷管插入 JH-2 药柱的雷管安装孔内(见图 1)。对发射药 H1、H2 和 TNT 炸药共进行 3 组实验,每组实验选用一种药剂。为了降低实验环境对测试结果的影响,对每种药剂均进行 5 发实验,共计 15 发爆炸实验,每发实验所用药量均为 10 kg。其中, TNT 实验作为对照组,发射药 H1、H2 实验作为实验组。

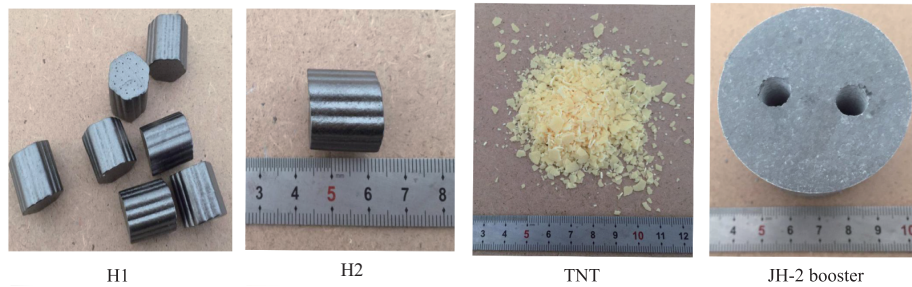


图 1 相关炸药外形尺寸特征

Fig. 1 Size characteristics of related explosives

1.2 实验场地布置及测试系统

实验在专用测试靶道进行, 测试靶道如图 2 所示, 共有 2 条同心的地面测带。2 条测带均为 1.0 m 宽, 呈 10° 夹角, 爆心及测带周围 30 m 范围内无明显影响冲击波传播的障碍物。为降低 TNT、发射药装药形状和地势对冲击波流场的影响, 实验过程中, 在 2 个测带方向上与爆心相同距离处布置了压力传感器。每条测带共计布置了 13 个测点, 与爆心距离分别为 2、3、5、7、10、15、20、25、30、40、50、60 和 85 m。

为降低偶然误差对测试结果的影响, 除爆炸近区(前 3 个测点)外, 其余测点布置 PCB 系列(113B24、113B21、113A28、113B28 型号)及 Kistler 系列(603CBA00014.0 型号)两种不同系列的壁面式高频动态压力传感器(见图 3)。

测试系统由信号采集系统、信号传输系统、数据采集系统、零时信号触发系统以及终端数据记录系统组成, 测试系统示意图如图 4 所示。



图 2 专用测试场

Fig. 2 Special test field

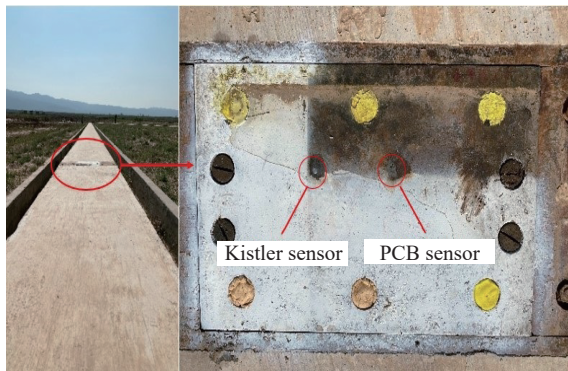


图 3 测点传感器布置

Fig. 3 Layout of sensors at measuring points

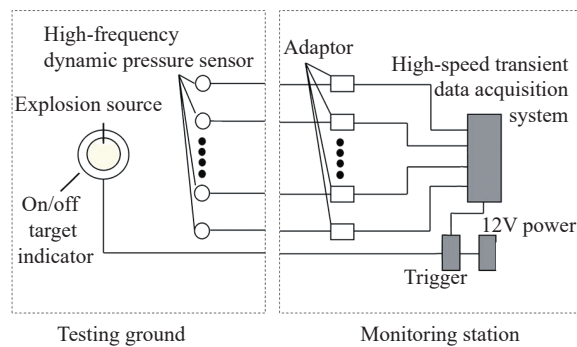


图 4 测试系统连接示意图

Fig. 4 Test system connection diagram

2 实验结果与分析

2.1 实验数据修正

2.1.1 气象条件修正

为消除气象条件对实验测试结果的影响, 对实验数据进行气象修正处理, 保证实验数据的一致性和

可比性。将超压峰值、爆心距离、正压作用时间、比冲量等参数修正到标准大气条件下的数值, 具体公式如下:

$$\Delta p = \left(\frac{p_0}{p'_0}\right) \Delta p' = f_p \Delta p' \tag{1}$$

$$R = \left(\frac{p'_0}{p_0}\right)^{1/3} R' = f_R R' \tag{2}$$

$$t = \left(\frac{p_0}{p'_0}\right)^{1/3} \left(\frac{T'_0}{T_0}\right)^{1/2} t' = f_t t' \tag{3}$$

$$I = \left(\frac{p_0}{p'_0}\right)^{2/3} \left(\frac{T'_0}{T_0}\right)^{1/2} I' = f_I I' \tag{4}$$

式(1)~(4)中的相关物理参数如表 1 所示。

表 1 式(1)~(4)中的相关物理参数

Table 1 Physical parameters for formulas (1) - (4)

量符号	含义
Δp	经气象修正后的冲击波超压峰值, 单位为MPa
$\Delta p'$	实验场大气条件下测量的冲击波超压峰值, 单位为MPa
p_0	标准大气压, 取值101.325 kPa
p'_0	现场大气压, 单位为kPa
R	经气象修正后的各测点到爆心实际距离, 单位为m
R'	实验现场大气条件下测量各测点到爆心实际距离, 单位为m
t	经气象修正后的各测点处冲击波正压作用时间, 单位为ms
t'	实验现场大气条件下测量得到的各测点处冲击波正压作用时间, 单位为ms
T_0	标准大气压条件下的绝对温度, 取值288.16 K
T'_0	实验现场大气条件下测量到的绝对温度, 单位为K
I	经气象修正后的各测点处冲击波比冲量, 单位为kPa·ms
I'	实验现场大气条件下测量并计算得到的各测点处冲击波超压比冲量, 单位为kPa·ms

2.1.2 异常数据剔除

为剔除在测量过程中由于突然的环境条件变化(如飞石等的冲击、振动、电源电压突变等)导致的异常测量数据, 首先对气象修正后的数据进行格拉布斯法误差分析, 具体方法如下。

设测量得到的实验数据为 X_1, X_2, \dots, X_m (m 为测试组中的数据数量, $X_1 \sim X_m$ 为测量得到的超压峰值或比冲量数据), 其算术平均值 X_a 和标准差 S 分别为:

$$X_a = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i \tag{5}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (X_i - X_a)^2}{m - 1}} \tag{6}$$

对数据组中任意一个数据 X_i , 其与平均值 X_a 之差的绝对值为:

$$d_i = |X_i - X_a| \tag{7}$$

取危险率 $a=5.0\%$, 查格拉布斯法 $A(m, a)$ 值得到危险率 $a=5.0\%$ 的 A 值, 若 $d_i/S \geq A(m, a)$, 则数据 X_i 应剔除。

2.2 TNT、H1、H2 爆炸威力分析

2.2.1 TNT 爆炸冲击波超压峰值

对 TNT 爆炸产生的冲击波超压峰值剔除误差后的结果进行算术平均处理, 得到不同爆心距离 R 处冲击波超压峰值平均值 $\Delta p_{TNT,a}$, 如表 2 所示。

对得到的 TNT 爆炸冲击波超压峰值平均值按爆炸相似律进行三项式拟合, 得到 10 kg TNT 爆炸冲击波超压峰值 $\Delta p_{TNT,a}$ 随比例距离 Z 的变化曲线:

$$\Delta p_{TNT,a} = 0.082 6Z^{-1} + 0.011 0Z^{-2} + 2.226 8Z^{-3} \quad (8)$$

拟合结果的相关系数为 0.971 08, 残差平方和为 5.046 25。

将式(8)与 Sadovskyi 公式及软质地面经验公式^[19]进行对比分析, 如图 5 所示。从图 5 可以看出, 在比例距离大于 $1.2 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 的范围内, 实测超压峰值及拟合曲线随比例距离的变化与以上两种经验公式^[19]符合较好, 95% 置信区间内显著一致, 说明实验条件、测试系统及 TNT 超压数据准确可靠, TNT 拟合曲线能够作为发射药爆炸冲击波 TNT 当量计算的基准数据。但是, 在比例距离小于 $1.2 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 的范围内, 实验数据和现有公式^[19]还是有一定的差距, 这主要是由于现有公式^[19]是基于球形装药建立的, 而在比例距离小于 $1 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 的范围内炸药形状的影响不可忽略。这就凸显了开展圆柱形装药 TNT 爆炸实验的必要性。

2.2.2 H1、H2 爆炸冲击波超压峰值

对气象修正和误差剔除后的发射药(H1、H2)爆炸冲击波超压峰值分别进行算术平均处理, 得到不同爆心距离处的超压峰值($\Delta p_{H1,a}$, $\Delta p_{H2,a}$), 如表 3 所示。

由于 H1、H2 两种发射药的超压 TNT 当量系数未知, 其爆炸 TNT 当量和比例距离无法确定, 因此对超压峰值按三项式进行数据拟合, 得到 TNT 和两种新型发射药在 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 101.325 kPa 标准大气压条件下的超压峰值与距离 R 的关系分别为:

$$\Delta p_{TNT,a} = 0.183 0R^{-1} + 0.086 3R^{-2} + 23.101 3R^{-3} \quad (9)$$

$$\Delta p_{H1,a} = 0.197 8R^{-1} + 0.334 2R^{-2} + 23.119R^{-3} \quad (10)$$

$$\Delta p_{H2,a} = 0.187 2R^{-1} + 27.007 3R^{-3} \quad (11)$$

表 2 不同爆心距离处 10 kg TNT 爆炸产生的冲击波超压峰值平均值

Table 2 Average values of shock wave overpressure peaks induced by explosion of a 10-kg TNT charge at different distances from the explosion center

R/m	$\Delta p_{TNT,a}/\text{MPa}$	R/m	$\Delta p_{TNT,a}/\text{MPa}$
2	3.004 9	25	0.010 0
3	1.198 0	30	0.008 1
5	0.227 9	40	0.005 1
7	0.086 0	50	0.004 2
10	0.041 6	60	0.003 0
15	0.023 2	85	0.001 9
20	0.014 3		

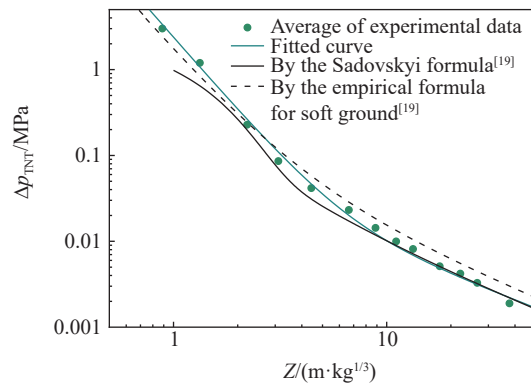


图 5 10 kg TNT 爆炸产生的冲击波超压峰值随比例距离的衰减(对数坐标)

Fig. 5 Attenuation of shock wave overpressure peak induced by explosion of a 10-kg TNT charge with scaling distance in logarithmic coordinates

表 3 不同爆心距离处发射药(H1、H2)爆炸冲击波超压峰值平均值

Table 3 Average values of shock wave overpressure peaks induced by explosion of propellants (H1, H2) at different distances from the explosion center

R/m	$\Delta p_{H1,a}/\text{MPa}$	$\Delta p_{H2,a}/\text{MPa}$	R/m	$\Delta p_{H1,a}/\text{MPa}$	$\Delta p_{H2,a}/\text{MPa}$
2	3.307 0	3.780 2	25	0.011 3	0.011 2
3	1.306 8	1.269 7	30	0.008 9	0.008 3
5	0.280 3	0.241 2	40	0.005 6	0.005 0
7	0.100 0	0.095 9	50	0.004 5	0.004 0
10	0.045 3	0.043 7	60	0.003 5	0.002 9
15	0.025 6	0.024 4	85	0.002 4	0.001 8
20	0.015 8	0.014 7			

拟合曲线的相关系数分别为 0.971 08、0.970 07、0.966 21, 残差平方和分别为 5.046 25、1.677 36、5.925 6。

图 6 给出了 TNT 和 H1、H2 冲击波超压峰值随距离的变化曲线。从图 6 可以看出, 在 2~100 m 爆心距离范围内, H1、H2 爆炸产生的冲击波超压峰值均大于 TNT 爆炸产生的冲击波超压峰值; 当爆心距离小于 10 m 时, H2 爆炸产生的冲击波超压峰值大于相同质量 H1 爆炸产生的冲击波超压峰值; 当爆心距离大于 10 m 时, H1 爆炸产生的冲击波超压峰值大于 H2 爆炸产生的冲击波超压峰值, 且随爆心距离的增大, H1 爆炸产生的冲击波超压峰值与 TNT 爆炸产生的冲击波超压峰值越接近。测点距 H1、H2 和 TNT 爆心越近, 该测点处的超压峰值衰减越快, 说明 H1、H2 爆炸产生的冲击波超压峰值衰减规律与 TNT 爆炸产生的冲击波超压峰值衰减规律相同, 符合爆炸相似律。

2.2.3 TNT、H1、H2 爆炸冲击波比冲量

爆炸威力不仅与冲击波超压峰值有关, 也与正压作用时间有关, 一般采用比冲量表征, 比冲量为冲击波超压曲线对正压作用时间的积分。同样, 对气象修正和误差剔除后的 TNT、H1、H2 爆炸产生的冲击波的比冲量分别进行算术平均, 得到不同距离 R 处的比冲量。对比冲量按三项式进行数据拟合, 得到 TNT 和 H1、H2 在标准环境下爆炸产生的冲击波的比冲量与爆心距离的关系, 分别为:

$$I_{\text{TNT},a} = 7\,269.79R^{-1} - 2\,598.06R^{-2} + 1\,195.59R^{-3}$$

$$I_{\text{H1},a} = 1\,409.38R^{-1} - 3\,868.27R^{-2} + 11\,561.76R^{-3}$$

$$I_{\text{H2},a} = 1\,485.66R^{-1} - 4\,333.38R^{-2} + 12\,172.70R^{-3}$$

拟合曲线的相关系数分别为 0.999 63、0.999 68、0.999 15, 残差平方和分别为 4.836 72、6.418 52、0.062 96。

图 7 给出了 TNT 和 H1、H2 爆炸产生的冲击波的比冲量随距离的变化曲线。从图 7 可以看出, 在 1~100 m 的距离范围内, 相同质量的 H1、H2 爆炸产生的冲击波的比冲量均大于 TNT 爆炸产生的冲击波的比冲量; 当爆心距离小于 6 m 时, H1、H2 爆炸产生的冲击波的比冲量相差不大; 当爆心距离大于 6 m 时, H2 爆炸产生的冲击波的比冲量逐渐超过 H1 爆炸产生的冲击波的比冲量, 且随爆心距离的增大, H1 与 H2 爆炸产生的冲击波的比冲量差值逐渐稳定。H1、H2 爆炸产生的冲击波的比冲量的衰减规律与 TNT 爆炸产生的冲击波的比冲量的衰减规律相同, 距离爆心越近, 比冲量衰减越快。

3 TNT 当量系数确定

3.1 修正的超压 TNT 当量系数计算方法

现有燃烧爆炸品 TNT 当量实验方法中, 通过被试样品的拟合公式计算各测点的冲击波超压峰值,

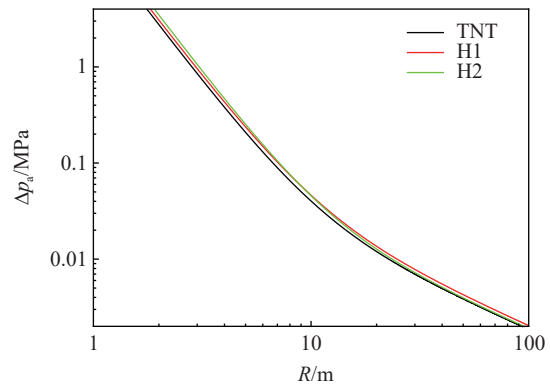


图 6 10 kg TNT、H1、H2 爆炸产生的冲击波超压峰值随爆心距离的变化(对数坐标)

Fig. 6 Changes of shock wave overpressure peaks induced by explosions of three 10-kg explosive charges (TNT, H1, H2) with the distances from the explosion centers in logarithmic coordinates, respectively

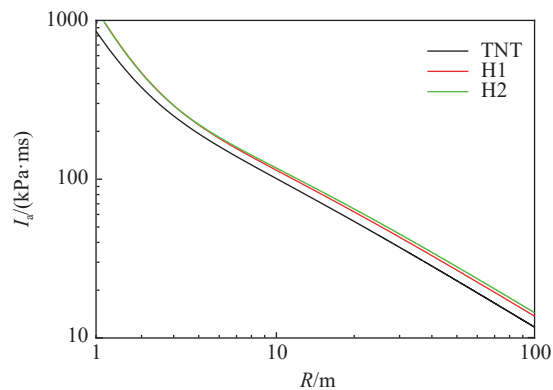


图 7 10 kg TNT、H1、H2 爆炸产生的冲击波的比冲量随爆心距离的变化(对数坐标)

Fig. 7 Changes of shock wave specific impulses induced by explosions of three 10-kg explosive charges (TNT, H1, H2) with the distances from the explosion centers in logarithmic coordinates, respectively

然后将计算得到的超压峰值代入测试得到 TNT 数据拟合公式(超压峰值-比例距离关系)中, 计算 TNT 爆炸产生相同超压峰值时的比例距离 Z_{TNT} , 并按下式计算各测点对应比例距离处 Z_{ce} 的超压 TNT 当量系数:

$$E_p = \left(\frac{Z_{ce}}{Z_{TNT}} \right)^3 = \left(\frac{R_{ce}/\sqrt[3]{W_{ce}}}{R_{TNT}/\sqrt[3]{W_{TNT}}} \right)^3 \quad (12)$$

式中: W_{ce} 为被试样品的质量, W_{TNT} 为 TNT 的质量。

此方法在计算被试样品比例距离时, 采用的是被试样品的实际质量, 不是被试样品的 TNT 当量。因此, 通过公式(12)计算得到的超压 TNT 当量系数偏小, 在抗爆结构设计和安全距离划分时偏危险。

考虑到上述计算方法存在的不足, 对该计算方法进行修正。首先, 根据被试样品拟合公式计算不同距离处的冲击波超压峰值; 然后, 将计算结果代入 TNT 拟合公式(超压峰值-比例距离关系)中, 计算 TNT 爆炸产生相同超压峰值时的比例距离 Z_i ; 接着, 通过下式:

$$W_{pi} = (R_i/Z_i)^3 \quad (13)$$

计算得到距离 R_i 处相同比例距离 Z_i 时被试样品的 TNT 当量 W_{pi} ; 最后, 通过下式:

$$E_{pi} = W_{ce}/W_{pi} \quad (14)$$

计算被试样品在距离 R_i 处的超压 TNT 当量系数 E_{pi} 。

3.2 超压当量系数确定

图 8 给出了原计算方法得到的 H1、H2 超压 TNT 当量系数及修正后的超压 TNT 当量系数随比例距离的变化曲线。从图 8 可以看出, H1、H2 发射药的超压 TNT 当量系数并非恒定值, 修正前后超压 TNT 当量系数随比例距离的变化规律一致, 但修正前系数值比修正后系数值小, 甚至在比例距离小于 $3 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 时 H1 超压 TNT 当量系数小于 1, 这与图 7 所示发射药和 TNT 爆炸产生的冲击波的超压峰值关系相反。因此, 原方法计算得到的超压当量系数对于抗爆结构设计和安全距离划分更危险, 修正后的 TNT 当量系数能更好地反映发射药的爆炸威力。

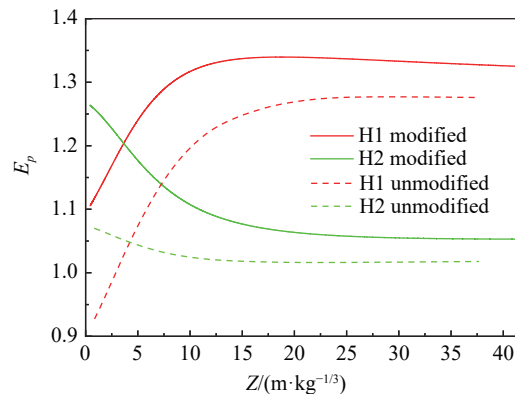


图 8 10 kg H1、H2 爆炸产生的冲击波超压 TNT 当量系数峰值随比例距离的变化

Fig. 8 Changes of peak TNT equivalent coefficients for overpressures of shock waves induced by explosions of two 10-kg propellants (H1, H2) with proportional distance, respectively

从修正后超压当量系数看, H1 超压 TNT 当量系数在比例距离 $0\sim 18 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 范围内递增, 由 1.10 增大到 1.34; 在比例距离 $18\sim 40 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 范围内递减, 由 1.34 逐渐减小并稳定于 1.32。与 H1 超压 TNT 当量系数随比例距离的变化不同, H2 超压 TNT 当量系数随比例距离的增大单调递减。在比例距离 $0\sim 18 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 范围内, H2 超压 TNT 当量系数衰减较快, 由 1.26 下降至 1.07; 在比例距离 $18\sim 40 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 范围内, H2 超压 TNT 当量系数衰减减慢并趋于恒定值, 由 1.07 下降至 1.05。总体来说, H1、H2 修正后的超压 TNT 当量系数大于 1。

3.3 比冲量当量系数确定

与修正后超压 TNT 当量系数计算方法相同, 图 9 给出了 H1、H2 修正前后比冲量 TNT 当量系数 (E_t) 随比例距离的变化曲线。从图 9 可以看出, 修正前后 H1、H2 的比冲量 TNT 当量系数的变化规律相似, 均呈现先减小后增大的趋势, 但修正前系数值比修正后系数值小, 尤其在爆炸近区修正后当量系数比修正前大约 20%。显然, 修正后的系数值能更精确地表征发射药的爆炸威力。从修正后比冲量 TNT 当量系数看, 随着比例距离的增大, H2 比冲量 TNT 当量系数下降到最小值 1.13, 小于同位置的 H1 比冲量 TNT 当量系数最小值 1.22。不同的是, H2 比冲量 TNT 当量系数变化较大, 在比例距离 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 范围内, 从 1.29 迅速减小为 1.13; 在比例距离 $2 \sim 40 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 范围内, 从 1.13 迅速增大并趋于稳定值 1.33。随着比例距离进一步增大, H2 比冲量 TNT 当量系数大于 H1 的。

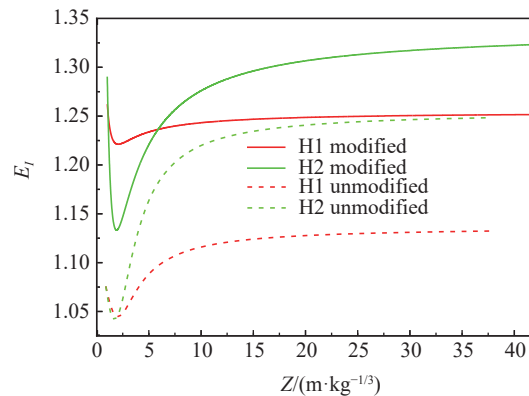


图 9 10 kg H1、H2 爆炸产生的冲击波比冲量 TNT 当量系数峰值随比例距离的变化

Fig. 9 Changes of peak TNT equivalent coefficients for specific impulses of shock waves induced by explosions of two 10-kg propellants (H1, H2) with proportional distance, respectively

4 结 论

(1) 实测 TNT 超压峰值拟合曲线与比例距离的关系与 Sadovskyi 公式、软质地面经验公式计算的结果符合性较好, 95% 置信区间内显著一致, 说明本文的实验条件、测试系统及测试数据准确可靠, TNT 拟合曲线能够作为发射药爆炸冲击波 TNT 当量计算的基准数据。

(2) 现有爆炸品冲击波 TNT 当量实验方法中, 对被试样品比例距离的计算采用的是被试样品的实际质量, 而非 TNT 当量, 依据该方法计算的结果进行抗爆结构设计和安全距离设定危险性偏高。本文中提出的修正的比例距离计算方法, 能更准确地计算被试样品的 TNT 当量系数, 进而提高抗爆结构设计的安全性。

(3) H1、H2 两种新型发射药爆炸冲击波衰减规律与 TNT 的相似, 符合爆炸相似律, 相同质量的 H1、H2 爆炸产生的冲击波超压峰值和比冲量均大于 TNT 的。随着比例距离的增大, H1 的超压 TNT 当量系数先增大后减小, 最大值为 1.34, H2 的超压 TNT 当量系数逐渐减小, 最大值为 1.26。两种新型发射药的比冲量 TNT 当量系数均随比例距离的增大先减小后增大, H1 的比冲量 TNT 当量系数最大值为 1.26, H2 的比冲量 TNT 当量系数最大值为 1.33。

参考文献:

- [1] 王泽山. 发射药技术的展望 [J]. 中北大学学报 (社会科学版), 2001(S1): 36-40; 103. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1646.2001.z1.011.
WANG Z S. Development and prospect of propellant techniques [J]. Journal of North China Institute of Technology (Social Sciences), 2001(S1): 36-40; 103. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1646.2001.z1.011.
- [2] 宁培毅. 梯恩梯当量 [J]. 现代兵器, 1982(7): 33-38.
- [3] 张光莹, 周旭, 黄咏政, 等. 动爆冲击波特性分析方法研究 [C]// 第四届全国计算爆炸力学会议论文集. 北京: 中国力学学会, 2008: 282-287.
- [4] 汪嗣良. 压装 CL-20 炸药爆轰特性参数测试 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 26-43.
WANG S L. Detonation characteristic parameters testing of pressed CL-20 explosive [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 26-43.

- [5] 王代华, 宋林丽, 张志杰. 基于 ICP 传感器的存储式冲击波超压测试系统 [J]. *传感技术学报*, 2012, 25(4): 478–482. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.04.012.
WANG D H, SONG L L, ZHANG Z J. A stored overpressure measurement system based on ICP sensor for shock wave [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25(4): 478–482. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.04.012.
- [6] 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; 64. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2013.04.010.
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 and Propellants*, 2013, 36(4): 42–45; 64. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2013.04.010.
- [7] 段晓瑜, 崔庆忠, 郭学永, 等. 炸药在空气中爆炸冲击波的地面反射超压实验研究 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(12): 2277–2283. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.12.013.
DUAN X Y, CUI Q Z, GUO X Y, et al. Experimental investigation of ground reflected overpressure of shock wave in air blast [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(12): 2277–2283. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.12.013.
- [8] 王鹏, 魏晓安, 何卫东. 含双芳-3 发射药的灌注炸药爆轰性能 [J]. *含能材料*, 2013, 21(1): 92–96. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.020.
WANG P, WEI X A, HE W D. Detonation performance of perfusion explosive containing SF-3 double-based propellants energetic materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2013, 21(1): 92–96. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.020.
- [9] HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use [M]. Amsterdam: Elsevier, 1979: 218–219.
- [10] BAKER W E. Explosions in air [M]. Austin: University of Texas Press, 1974: 6–10.
- [11] SADOVSKIY M A. Mechanical action of air shock waves of explosion, based on experimental data [M]. Moscow: Izd Akad Nauk SSSR, 1952: 1–2.
- [12] 聂源, 蒋建伟, 李梅. 球形装药动态爆炸冲击波超压场计算模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(5): 951–956. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0951-06.
NIE Y, JIANG J W, LI M. Overpressure calculation model of sphere charge blasting with moving velocity [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(5): 951–956. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0951-06.
- [13] 李党娟, 吴慎将, 杨远生. 基于 LabVIEW 的冲量测试系统开发 [J]. *国外电子测量技术*, 2012, 31(1): 63–66. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8978.2012.01.018.
LI D J, WU S J, YANG Y S. Development impulse measurement system based on LabVIEW [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2012, 31(1): 63–66. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8978.2012.01.018.
- [14] 董守华, 李晓杰, 王海波, 等. 事故爆炸冲击波破坏准则综述 [J]. *石油化工安全技术*, 1996, 12(4): 40–41.
- [15] 蔡林刚, 李晓彬, 杜志鹏, 等. 密闭空间中内爆载荷冲量饱和现象研究 [J]. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2020, 44(1): 85–90. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2020.01.016.
CAI L G, LI X B, DU Z P, et al. Study on impulse saturation of internal explosion load in confined space [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2020, 44(1): 85–90. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2020.01.016.
- [16] 牟金磊, 朱锡, 黄晓明. 近壁面水下爆炸冲击波载荷参数研究 [J]. *海军工程大学学报*, 2011, 23(1): 23–27. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3486.2011.01.005.
MU J L, ZHU X, HUANG X M. Parameters of shock waves from underwater explosion near structures [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2011, 23(1): 23–27. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3486.2011.01.005.
- [17] 张德志, 李焰, 王等旺, 等. 球形装药近距离爆炸正反射冲击波试验研究 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(12): 1663–1667. DOI: 10.3321/j.issn.1000-1093.2009.12.018.
ZHANG D Z, LI Y, WANG D W, et al. Experiment investigations on normal reflected blast wave near the spherical explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(12): 1663–1667. DOI: 10.3321/j.issn.1000-1093.2009.12.018.
- [18] 龚苹, 吴宏斌, 翟永兵, 等. 装药近地爆炸的冲击波理论与试验研究 [C]// 第九届全国爆炸力学学术会议论文集. 北京: 中国力学学会, 2012.
- [19] 罗兴柏, 张玉令, 丁玉奎. 爆炸力学理论教程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 291–292.

(责任编辑 张凌云)