

# 基于冲击波、热、地震波的含能材料爆炸多威力参量综合评价方法研究

祖晓炜 孔德仁 薛冰

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

**摘要:**为了满足不同反应机理、不同装药物态含能材料爆炸能量释放过程中,冲击波、热及地震波等毁伤元综合毁伤威力的定量评价需求。采用实测冲击波、热、地震波试验数据,在冲击波超压、比冲量、热剂量及地震波振动速度峰值随爆心距、比例距离的变化规律基础上,采用归一化加权方法,构建了能够综合不同爆心距、不同威力参量作用“强弱”的综合评价模型。采用标准 TNT 试验数据对建立的综合评价模型进行了有效性验证,综合模型计算所得比当量的相对误差小于 2%;同时,该综合评价模型也实现了相同试验工况下某型含能材料冲击波、热及地震波释能特性的综合等效当量的计算。多威力参量综合评价方法能够根据不同的测试环境、试验场景及毁伤目标任意选取权重,获取特定工况下被试含能材料目标毁伤能力的等效当量,能够为含能材料的设计研发、能量释放特性的分析及目标毁伤能力的综合评价提供有效的定量分析手段。

**关键词:**冲击波;热效应;地震波;归一化综合评价方法

**中图分类号:** TJ55;TN06 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 410

## Research on comprehensive evaluation method of multi-force parameters of explosion of energetic materials based on shock wave, thermal and seismic wave

Zu Xiaowei Kong Deren Xue Bing

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

**Abstract:** In order to meet the quantitative evaluation needs of the comprehensive destructive power of the shock wave, heat and seismic wave damage elements in the explosive energy release process of different reaction mechanisms and different drug-containing energetic material states, experimental data on shock wave overpressure, impulse, heat dose, and seismic wave vibration velocity at different distances from the blast center were used. On the basis of the laws of change of shock wave overpressure, impulse, heat dose, and seismic wave vibration velocity with blast center distance and proportion distance, a comprehensive evaluation model that can comprehensively evaluate the "strength" of different blast center distances and different power parameters was established by using the normalized weighting method. The validity of the established comprehensive evaluation model was verified by using standard TNT test data, and the relative error of the computed equivalent energy was less than 2%. At the same time, the comprehensive evaluation model also realized the calculation of the comprehensive equivalent energy of the shock wave, heat, and seismic wave energy release characteristics of a certain type of energetic material under the same test conditions. The multi-power parameter comprehensive evaluation method can select arbitrary weights based on different test environments, test scenarios, and damage targets, and obtain the equivalent energy of the target damage capability of the test material under specific conditions, which can provide effective quantitative analysis methods for the design, development, and analysis of explosive energy release characteristics, as well as the comprehensive evaluation of damage capability.

**Keywords:** shock wave; thermal effect; seismic wave; normalized comprehensive evaluation method

## 0 引言

新型含能材料爆炸威力包括爆炸产生的冲击波造成的损伤、热损伤以及地震波效应带来的损伤。一般情况下冲击波压力是评价爆炸威力的主要技术指标,按照作用方式可以表征为地表反射压、自由场压力<sup>[1]</sup>。随着含能材料的研究发展,新型含能材料爆炸过程中产生的热辐射效应、地震波效应越发不可忽视。在冲击波威力评价方面,王安勇等<sup>[2]</sup>通过超压信号频谱分析,说明含能材料与 TNT 有着相同的时空特征及毁伤特性,可以使用基于冲击波压力的基础评价模型,并依据地表反射压力数据建立了冲击波压力评价模型对含能材料进行了威力评价。徐其鹏等<sup>[3]</sup>通过测量冲击波超压和比冲量,对非理想炸药和 TNT 数据比较分析进行了威力评估。Xue 等<sup>[4]</sup>构建了爆炸冲击波全过程的超压模型,以峰值、衰减和振荡 3 个因素函数的乘积来表示,使得冲击波威力评价结果更加合理。热毁伤方面,仲倩等<sup>[5]</sup>通过分析爆炸火球温度随时间的变化规律,发现基于等效热辐射强度的温度平均值在忽略热对流及热传导的前提下,可作为温压药剂热毁伤效应评估的基准。蒋泽朋等<sup>[6]</sup>通过测量两种不同药剂的爆炸火球温度和直径,对两种药剂的威力进行了评价。郭家豪<sup>[7]</sup>提出了一种非平整场地下震源能量——当量法,可用于侵彻钻地武器爆炸当量的估算。张梦妹<sup>[8]</sup>提出了采用改进的峰值速度-主频率评价方法,来评价温压战斗部爆炸场地震波对建筑物和人的影响。

众多学者对爆炸威力评价方法进行了研究,目前主要有如下几种评价方法:爆轰潜能法、冲击波能量法、冲击波参数法、等效靶法、爆炸压力圈法等<sup>[9]</sup>。爆轰潜能、冲击波能量法分别从爆热和水中冲击波能角度反映了被测含能材料与标准材料(如 TNT)热力学上的差异,忽略了威力参量传播过程中动力学的影响;常用的单威力参量评价方法,如冲击波压力峰值、比冲量等一般仅仅只能以单个毁伤作用能力作为评价依据,无法同时考虑爆炸产生的多个威力参量的综合毁伤效果,做不到对含能材料爆炸能量释过程热力学、动力学更全面的综合评价。

因此为了实现未知性能参数含能材料的毁伤威力的综合评价,本文将开展标准 TNT 和新型含能材料的试验,通过对试验测得的冲击波信号、热信号、地震波信号进

行处理,分析冲击波超压、比冲量、热剂量和地震波振动速度峰值随爆心距的衰减规律。根据爆炸相似律建立各参量的单威力参量评价模型、单威力参量演化规律模型,在此基础上采用归一化加权方法,构建一种多威力参量综合评价计算方法。根据含能材料各威力参量在不同爆心距的释能特性特点,建立了一种能够综合含能材料在不同爆心距、不同威力参量作用“强弱”的归一化多威力参量综合评价模型。并进行了有效性验证,在相同试验工况下,综合模型计算结果相对误差较小,具有良好的 consistency,表明使用该综合威力评价模型计算含能材料的综合等效当量是可行的。同时该模型可以根据不同的待测试样、测试场景及毁伤目标,自由选择更为关注的毁伤元并调整相应的权重系数,并探索了一种能够实现无爆心距依赖的比当量求取方法,获得了在模型有效范围内相对平均偏差小于 2% 的综合比当量计算结果,实现了对未知性能参数含能材料综合比当量的定量计算。为后期相关武器弹药的研究提供必要的依据及分析手段。

## 1 多威力参量综合评价

### 1.1 评价流程

综合威力评价流程如图 1 所示,归一化多威力参量评价方法与现有的评价方法的对比如表 1 所示。

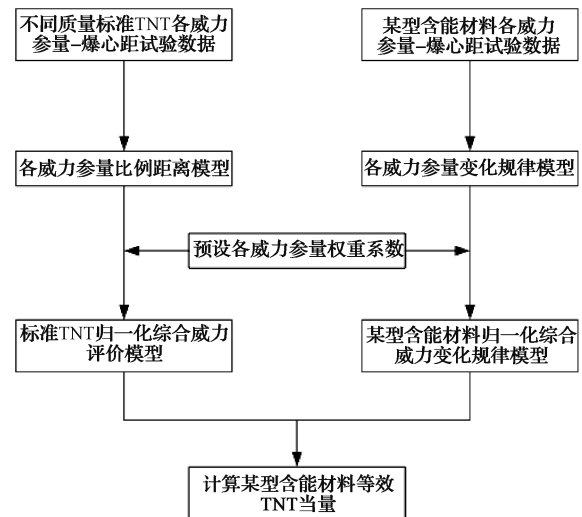


图 1 综合威力评价流程

Fig. 1 Integrated power evaluation process

表 1 本文方法与其他评价方法比较

Table 1 The method of this paper is compared with other evaluation methods

本文方法	爆轰潜能法 <sup>[9]</sup>	冲击波参数法 <sup>[2-4,10]</sup>	火球热辐射热剂量法 <sup>[4-5]</sup>	等效靶法 <sup>[11]</sup>
能够综合的反映不同爆心距、不同威力参量作用的“强弱”,实现了对未知性能参数含能材料综合比当量的定量计算。	计算过程相对简单,但忽视了爆轰潜能转化为爆炸能的转化率。	比较适用于固体理想炸药的点爆炸评价,评价形式较为单一,不适用于新型含能材料的体爆轰评价。	常用于对温压药剂的热毁伤威力评价,可以很好地反映温压药剂的热毁伤能力,但忽视了爆炸产生的冲击波作用。	试验布置简单,可评价各个过程配套关系及环境影响程度,但缺乏对综合毁伤效应的考虑。

## 1.2 单威力参量评价模型

根据对冲击波压力的大量研究以及工程经验<sup>[1]</sup>,定义比例距离:

$$R = \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}} \quad (1)$$

爆炸相似律是研究含能材料爆炸冲击波等效 TNT 当量的基础,通过对爆炸冲击波在空气中传播问题进行量纲分析,可以得到冲击波超压峰值、装药量和距离之间的关系模型<sup>[10]</sup>。因此自由场超压峰值  $p_{TNT}$  和比冲量  $I_{TNT}$  关于比例距离  $R$  的三次多项式函数模型,如式(2)、(3)所示。

$$p_{TNT} = a_{p-TNT} \left(\frac{1}{R}\right)^3 + b_{p-TNT} \left(\frac{1}{R}\right)^2 + c_{p-TNT} \left(\frac{1}{R}\right)^1 \quad (2)$$

$$I_{TNT} = a_{I-TNT} \left(\frac{1}{R}\right)^3 + b_{I-TNT} \left(\frac{1}{R}\right)^2 + c_{I-TNT} \left(\frac{1}{R}\right)^1 \quad (3)$$

式中: $p_{TNT}$  表示 TNT 自由场超压峰值; $R$  为比例距离; $I_{TNT}$  表示 TNT 自由场压力比冲量。

Kong 等<sup>[12]</sup>提出了一种热剂量与比例距离的非线性回归评价模型能有效地对热剂量的释放规律进行预测,因此本文也使用了这种方法构建关于热剂量的单项评价模型。

$$Q_{TNT} = a_{Q-TNT} \left(\frac{1}{R}\right)^3 + b_{Q-TNT} \left(\frac{1}{R}\right)^2 + c_{Q-TNT} \left(\frac{1}{R}\right)^1 \quad (4)$$

式中: $Q_{TNT}$  为 TNT 热剂量。

目前常使用萨道夫斯基经验公式来构建地震波振动速度峰值模型<sup>[13]</sup>。标准 TNT 地震波振动速度峰值与比例距离的函数模型为:

$$v_{TNT} = a_{v-TNT} \left(\frac{1}{R}\right)^a = a_{v-TNT} \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^a \quad (5)$$

式中: $v_{TNT}$  为 TNT 地震波振动速度峰值。

为了以函数形式反映爆心距范围内威力参量的变化规律,开展了 TNT 爆炸仿真分析,发现超压、比冲量、热剂量以一元三次拟合精度更高,地震波振动峰值速度以幂函数拟合精度更高。因此某型含能材料各威力参量与爆心距  $r$  的变化规律模型可表示为:

$$p_{EM} = a_{p-EM} \left(\frac{1}{r}\right)^3 + b_{p-EM} \left(\frac{1}{r}\right)^2 + c_{p-EM} \left(\frac{1}{r}\right)^1 \quad (6)$$

$$I_{EM} = a_{I-EM} \left(\frac{1}{r}\right)^3 + b_{I-EM} \left(\frac{1}{r}\right)^2 + c_{I-EM} \left(\frac{1}{r}\right)^1 \quad (7)$$

$$Q_{EM} = a_{Q-EM} \left(\frac{1}{r}\right)^3 + b_{Q-EM} \left(\frac{1}{r}\right)^2 + c_{Q-EM} \left(\frac{1}{r}\right)^1 \quad (8)$$

$$v_{EM} = a_{v-EM} \left(\frac{1}{r}\right)^\beta \quad (9)$$

式中: $p_{EM}$  表示某型含能材料自由场超压峰值; $I_{EM}$  表示某型含能材料自由场压力比冲量; $Q_{EM}$  表示某型含能材料热

剂量; $v_{EM}$  表示某型含能材料地震波振动速度峰值。

## 1.3 多威力参量综合评价模型

步骤 1) 根据毁伤形式的不同对各威力参量进行划分,第 1 级为冲击波压力、热效应、地震波,权重系数表示为  $K_{11}$ 、 $K_{12}$ 、 $K_{13}$ ,冲击波压力由自由场超压峰值、自由场压力比冲量来进行表征,权重系数表示为  $K_{21}$ 、 $K_{22}$ ,热效应使用热剂量进行表征,地震波使用振动峰值速度进行表征<sup>[14]</sup>。每一级的权重系数和都为 1<sup>[15]</sup>。因此自由场超压峰值、自由场压力比冲量、热剂量、地震波振动速度峰值的权重系数可表示为  $K_1 = K_{11} \times K_{21}$ ,  $K_2 = K_{11} \times K_{22}$ ,  $K_3 = K_{12} \times 1$ ,  $K_4 = K_{13} \times 1$ 。

步骤 2) 根据对人员的严重杀伤半径选取一个自由场超压的典型值  $P_{typical}$ ,代入 TNT 自由场超压峰值评价模型计算得到对应比例距离  $R_{typical}$ ,将  $R_{typical}$  代入 TNT 自由场比冲量评价模型、TNT 热剂量评价模型和 TNT 地震波振动速度峰值评价模型,计算得到该比例距离对应的自由场压力比冲量  $I_{TNT-typical}$ 、热剂量  $Q_{TNT-typical}$  和地震波振动峰值速度  $v_{TNT-typical}$ 。

步骤 3) 根据步骤 1) 所确定的  $K_i$  值,进行归一化处理得到 TNT 多威力参量无量纲融合模型:

$$C_{TNT} = K_1 \times p_{TNT} / P_{TNT-typical} + K_2 \times I_{TNT} / I_{TNT-typical} + K_3 \times Q_{TNT} / Q_{TNT-typical} + K_4 \times v_{TNT} / v_{TNT-typical} \quad (10)$$

步骤 4) 使用与步骤 1) 相同的权重系数分配方式和压力典型值,代入某型含能材料自由场超压峰值变化规律模型中。并采取和步骤 2) 相同的计算方法得到对应的  $r_{typical}$ 、自由场压力比冲量  $I_{EM-typical}$ 、热剂量  $Q_{EM-typical}$  和地震波振动峰值速度  $v_{EM-typical}$ 。

步骤 5) 根据步骤 1) 确定的  $K_i$  值,归一化处理得到某型含能材料多威力参量无量纲融合变化规律模型:

$$C_{EM} = K_1 \times p_{EM} / P_{EM-typical} + K_2 \times I_{EM} / I_{EM-typical} + K_3 \times Q_{EM} / Q_{EM-typical} + K_4 \times v_{EM} / v_{EM-typical} \quad (11)$$

步骤 6) 选取不同爆心距  $r_i$  进行循环计算,代入某型含能材料多威力参量无量纲融合变化规律模型,计算得到对应的  $C_{EM}$ 。

步骤 7) 令  $C_{TNTi} = C_{EMi}$ , 计算得到 TNT 多威力参量无量纲融合模型对应的比例距离  $R_i$ 。

步骤 8) 根据步骤 7) 计算得到的比例距离  $R_i$  和步骤 6) 中选取的爆心距  $r_i$ , 计算得到该情况下的某型含能材料的比当量。计算公式为:

$$\omega_i = (r_i / R_i)^3 \quad (12)$$

$$Equ_i = (\omega_i - \omega_s) / \omega_0 \quad (13)$$

式中: $\omega_i$  为不同爆心距对应的等效 TNT 当量; $\omega_s$  为某型含能材料起爆药装药质量; $\omega_0$  为某型含能材料的总质量。

## 2 试验

### 2.1 试验样品状态

试验中标准 TNT 药柱的装药量为 5、10、20、25 kg, 标准 TNT 药柱的长径比为 1:1, 装药密度为 1.58 g/cm<sup>3</sup>,

起爆方式为药柱上方起爆;含能材料的总质量为 2.055 kg。

### 2.2 测点布置与试验测试系统组成

为了保证拟合方程的置信度,自由场压力测量包含 6 个爆心距,每个半径 3 个测点;热流密度测量包含 5 个爆心距,每个半径 2 个测点;地震波振动速度峰值测量包含 7 个爆心距,每个半径 1 个测点。测点布置情况如图 2 所示。

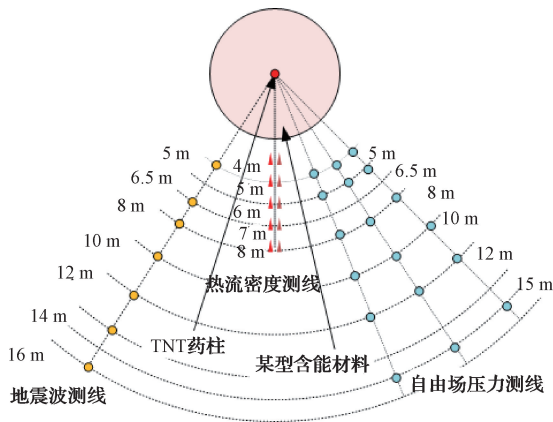


图 2 测点布置示意图

Fig. 2 Measuring point layout diagram

试验测试系统如图 3 所示。由自由场压力传感器、热电偶、地震波传感器以及相对应的传感器工装、安装支架、触发控制器、电缆线、数据采集仪、计算机组成。自由场压力传感器采用 PCB 的 137B 系列 ICP 型压电式压力传感器,热流密度传感器采用一种基于红外探测的新型热流密度传感器<sup>[16]</sup>。地震波传感器采用中科测控公司的磁电式单向速度传感器和 TC-4850 测振仪。数据采集系统采用 ELSYS 生产的 TranNET 408DP<sup>[17]</sup>。

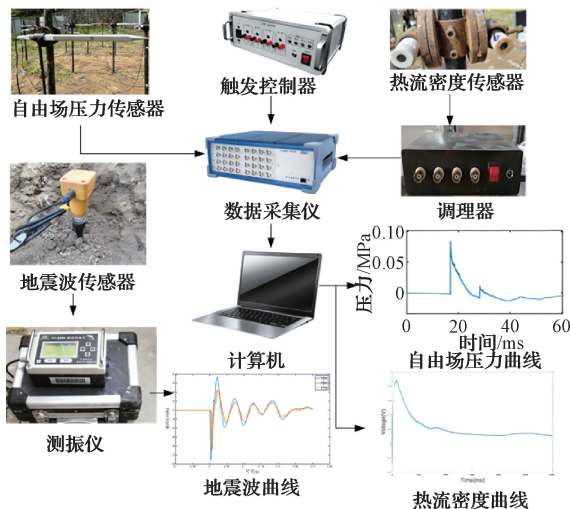


图 3 测试系统组成示意图

Fig. 3 Test system composition diagram

### 2.3 试验结果

对不同当量标准 TNT 和某型含能材料进行了试验,进行数据处理后,试验所获得的典型冲击波压力波形、热流密度原始曲线和地震波振动速度峰值波形如图 4~6 所示。得到的测试数据如表 2~4 所示。对同一半径处的数据取平均值后的 TNT 和含能材料的各威力参量测试数据对比如图 7 所示。

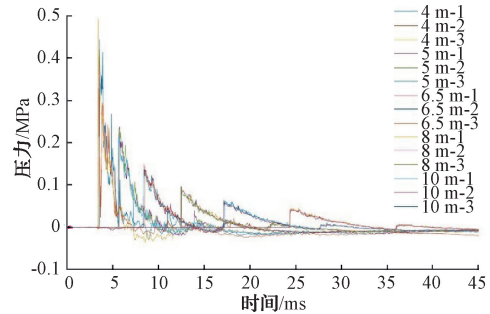


图 4 典型冲击波压力波形

Fig. 4 Typical shock wave pressure waveform

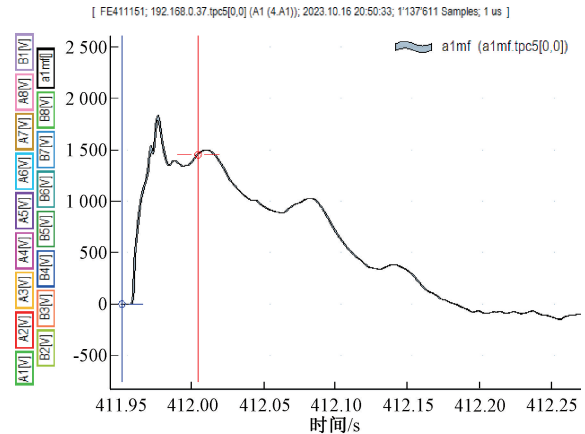


图 5 热流密度原始曲线

Fig. 5 Original heat flux curve

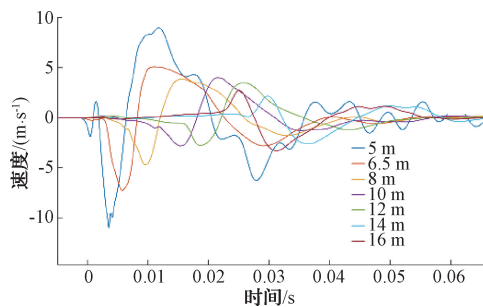


图 6 地震波振动速度峰值波形

Fig. 6 Peak vibration velocity waveform of seismic wave

由图 7 可知,随着爆心距的增加,TNT 和含能材料的 4 个威力参量在总体上都是一个逐渐衰减的趋势。但是



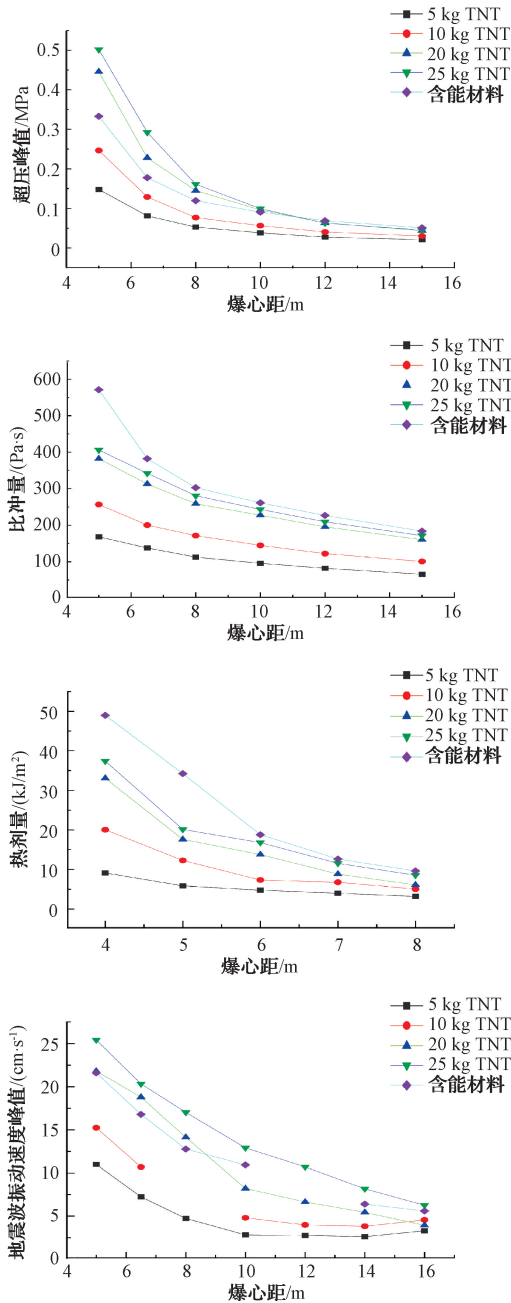


图7 TNT和含能材料的各威力参量测试数据对比  
Fig. 7 Comparison of test data of various power parameters of TNT and energetic materials

从单个威力参量上看,含能材料的释能规律与TNT又有所不同。在超压峰值方面含能材料在5~10 m处的超压数值位于10和20 kg的TNT之间,在10 m以后与25 kg TNT超压数值相当;在比冲量方面,含能材料的比冲量数值在全过程都大于25 kg TNT的比冲量数值;在热剂量方面,含能材料在5~8 m范围内的数值都大于25 kg TNT的数值;在地震波方面,5~8 m范围内含能材料的振动速度数值略小于20 kg TNT数值,10 m后数值在20和25 kg TNT之间。由此可见,相较于TNT,含能材料的

冲击波超压在远场的衰减速度要更加缓慢且在整个过程中正压作用时间要远大于TNT爆炸的冲击波;含能材料的热毁伤能力也强于25 kg的TNT。因此在进行综合威力评价时,适当增大比冲量和热剂量的权重所得出的评价结果可能更加接近真实值。

### 3 归一化多威力参量综合评价方法的典型应用

#### 3.1 基础评价模型

根据试验数据,建立各威力参量标准 TNT-比例距离单项评价模型和某型含能材料-爆心距变化规律模型。

TNT 自由场超压峰值评价模型:

$$p_{TNT} = 0.991 \frac{1}{R^3} + 0.839 \frac{1}{R^2} + 0.032 \frac{1}{R} \quad (14)$$

TNT 自由场比冲量评价模型:

$$I_{TNT} = 531.5 \frac{1}{R^3} - 307.8 \frac{1}{R^2} + 740.5 \frac{1}{R} \quad (15)$$

TNT 热剂量评价模型:

$$Q_{TNT} = 36.14 \frac{1}{R^3} + 36.86 \frac{1}{R^2} + 5.184 \frac{1}{R} \quad (16)$$

TNT 地震波振动速度峰值模型:

$$v_{TNT} = 50.45 \left(\frac{1}{R}\right)^{1.295} \quad (17)$$

某型含能材料自由场超压峰值变化规律模型:

$$p_{EM} = 26.37 \frac{1}{r^3} + 0.025 \frac{1}{r^2} + 0.586 \frac{1}{r} \quad (18)$$

某型含能材料自由场压力比冲量变化规律模型:

$$I_{EM} = 8877 \frac{1}{r^3} + 6.414 \times 10^{-8} \frac{1}{r^2} + 2436 \frac{1}{r} \quad (19)$$

某型含能材料热剂量变化规律模型:

$$Q_{EM} = 1017 \frac{1}{r^3} + 550.4 \frac{1}{r^2} + 6.42 \times 10^{-11} \frac{1}{r} \quad (20)$$

某型含能材料地震波振动速度峰值变化规律模型:

$$v_{EM} = 132.506 \left(\frac{1}{r}\right)^{1.118} \quad (21)$$

#### 3.2 评价模型验证

由于冲击波参量的测点半径为5~15 m,热剂量测点半径为4~8 m,地震波振动速度峰值测点半径为5~16 m,因此建立的多威力参量综合评价模型的有效评价范围为5~8 m,8~15 m为综合评价模型预测区域。因此对5~8 m范围内的综合评价模型进行验证。由于目前对于综合评价的权重系数选取还没有完善的标准。因此为了验证综合评价模型评价结果的可靠性,参考Kong等<sup>[17]</sup>提出的一种方法,选取多组不同的权重系数并代入综合评价模型进行比当量验证。由于根据试验数据分析得到该含能材料有着优秀的比冲量和热剂量效果,因此对权重系数赋值时需要加大比冲量和热剂量的比重,这样计算得到的综合比当量将更加符合真实的综合比当量。多组权重系数具体取值如表5所示。不同权重系数模型验证比当量计算结果如图8所示。

表2 TNT和含能材料自由场超压峰值、比冲量测试结果

Table 2 Free field overpressure peak and specific impulse test results of TNT and energetic materials

		TNT			EM					
装药量/ kg	爆心距/ m	超压峰值/ MPa	比冲量/ (Pa·s)	装药量/ kg	超压峰值/ MPa	比冲量/ (Pa·s)	装药量/ kg	超压峰值/ MPa	比冲量/ (Pa·s)	
5	5	0.146	163.51	10	0.236	271.64	2.055	0.350	629.14	
		0.147	169.20		0.272	272.41		0.352	562.74	
		0.149	171.54		0.232	226.30		0.296	521.60	
		0.083	135.02		0.136	198.41		0.178	378.88	
	6.5	0.081	145.17		0.125	206.41		0.178	397.19	
		0.079	131.74		0.126	195.25		0.176	370.27	
		0.055	121.09		0.078	178.91		0.118	310.10	
		0.053	108.21		—	172.76		0.120	—	
	8	0.051	108.45		0.076	162.11		0.120	295.46	
		0.037	97.14		0.056	145.27		0.094	266.47	
		10	0.039		96.32	0.057		145.30	0.091	261.60
			0.039		94.70	0.057		143.39	0.087	256.08
		12	0.028		80.70	0.039		122.14	0.071	227.90
			0.027		76.91	0.041		116.77	0.067	215.80
			0.027		88.98	0.041		127.17	0.069	235.83
			0.022		64.77	0.031		98.87	0.053	182.08
15	0.021	68.09	0.031	105.33	0.052	187.26				
	0.020	64.19	0.028	98.95	0.048	181.07				
20	5	0.443	406.68	0.517	445.90					
		0.402	352.60	0.554	414.79					
		0.492	386.64	0.434	357.67					
		0.237	310.98	0.311	335.44					
	6.5	0.235	328.52	0.271	353.17					
		0.212	299.32	0.295	337.45					
		0.150	272.34	0.157	292.43					
		0.140	252.32	0.163	276.04					
	8	0.145	251.58	0.163	273.97					
		0.096	229.80	0.100	246.06					
		10	0.096	227.32	0.098	243.98				
			0.097	224.78	0.100	240.13				
	12	0.065	198.39	0.065	212.43					
		0.063	187.44	0.062	201.38					
		0.062	200.13	0.062	214.08					
		0.043	159.17	0.045	172.37					
15	0.045	165.59	0.046	172.70						
	0.042	155.24	0.045	168.76						

通过使用同等环境下 TNT 测试结果对不同权重系数下的归一化多威力参量综合评价模型验算结果表明,该综合评价模型的相对误差均小于 2%,表明该评价模型计算得到的综合比当量结果是可靠的,可以较准确地反映在同等试验环境下含能材料的综合比当量。

### 3.3 典型应用综合评价结果

根据对人员的严重杀伤半径,选取自由场超压峰值的

典型值为  $P_{\text{typical}}=0.1 \text{ MPa}$ 。根据 1.3 节的计算步骤计算得到  $R_{\text{typical}}=3.511 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、 $I_{\text{TNT-typical}}=198.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $Q_{\text{TNT-typical}}=5.301 \text{ kJ/m}^2$ 、 $v_{\text{TNT-typical}}=9.920 \text{ cm/s}$ 、 $r_{\text{typical}}=9.077 \text{ m}$ 、 $I_{\text{EM-typical}}=280.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $Q_{\text{EM-typical}}=8.040 \text{ kJ/m}^2$ 、 $v_{\text{EM-typical}}=11.26 \text{ cm/s}$ 。对权重系数  $K_i$  进行赋值得到 TNT 多威力参量无量纲融合模型和某型含能材料多威力参量无量纲融合变化规律模型。不同权重系数的综合评

表3 TNT和含能材料热剂量测试结果

Table 3 Thermal dose test results of TNT and energetic materials

TNT						EM				
装药量/ kg	爆心距/ m	热剂量/ (kJ/m <sup>2</sup> )	装药量/ kg	热剂量/ (kJ/m <sup>2</sup> )	装药量/ kg	热剂量/ (kJ/m <sup>2</sup> )	装药量/ kg	热剂量/ (kJ/m <sup>2</sup> )	装药量/ kg	热剂量/ (kJ/m <sup>2</sup> )
5	4	8.69	10	18.63	20	31.95	25	35.07	2.055	49.55
		9.51		21.51		34.15		39.72		48.40
	5	5.99	10	12.02	20	17.42	25	20.03	2.055	36.80
		5.68		12.51		17.83		20.27		31.64
	6	4.76	10	7.26	20	13.76	25	16.79	2.055	19.16
		4.79		7.35		—		—		18.45
	7	4.02	10	6.43	20	8.21	25	11.90	2.055	12.12
		3.99		7.02		9.41		11.16		13.11
	8	3.24	10	4.93	20	6.01	25	8.69	2.055	9.63
		3.17		5.19		6.14		8.35		9.57

表4 TNT和含能材料地震波振动峰值速度测试结果

Table 4 Test results of peak vibration velocity of TNT and energetic materials

TNT						EM				
装药量/ kg	爆心距/ m	振动峰值 速度/ (cm·s <sup>-1</sup> )	装药量/ kg	振动峰值 速度/ (cm·s <sup>-1</sup> )	装药量/ kg	振动峰值 速度/ (cm·s <sup>-1</sup> )	装药量/ kg	振动峰值 速度/ (cm·s <sup>-1</sup> )	装药量/ kg	振动峰值 速度/ (cm·s <sup>-1</sup> )
5	5	10.995	10	15.252	20	21.811	25	25.434	2.055	21.607
	6.5	7.240		10.69		18.799		20.327		16.811
	8	4.733		—		14.138		17.044		12.767
	10	2.827		4.802		8.209		12.910		10.937
	12	2.765		3.980		6.645		10.705		—
	14	2.615		3.823		5.438		8.170		6.399
16	2.597	3.550	3.928	6.265	5.596					

表5 权重系数取值

Table 5 Weight coefficient value

	K <sub>11</sub>	K <sub>12</sub>	K <sub>13</sub>	K <sub>21</sub>	K <sub>22</sub>
权重1	0.9	0.05	0.05	0.6	0.4
权重2	0.9	0.05	0.05	0.4	0.6
权重3	0.6	0.35	0.05	0.6	0.4
权重4	0.6	0.05	0.35	0.6	0.4
权重5	0.6	0.35	0.05	0.5	0.5

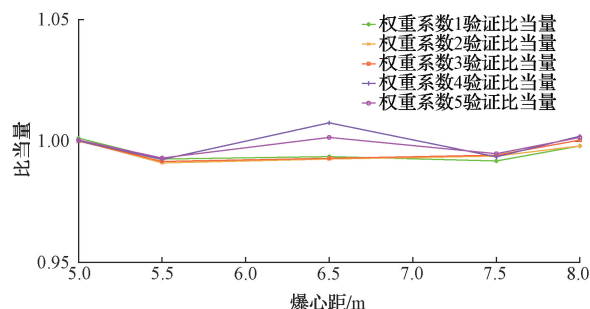


图8 不同权重系数模型验证比当量计算结果

Fig. 8 The model with different weight coefficients verifies the equivalent calculation results

价方法比当量计算结果对比如图9所示,在综合评价模型有效范围内计算结果如表6所示。有效区域内综合比当量相对平均偏差如表7所示。

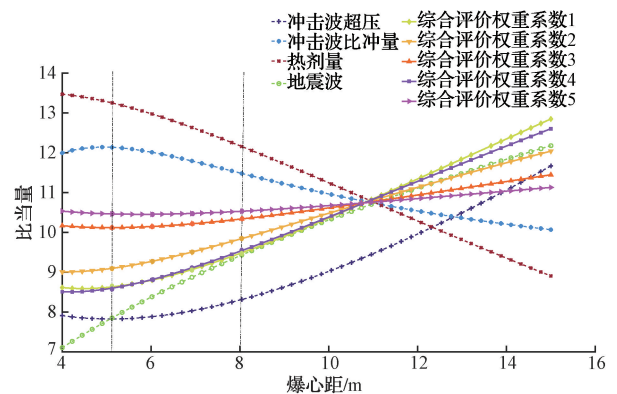


图9 不同权重系数综合评价方法比当量计算结果

Fig. 9 The calculation results of the relative equivalent of the comprehensive evaluation methods with different weight coefficients

表6 有效区域内综合比当量计算结果

Table 6 The comprehensive ratio equivalent calculation results in the effective area

半径/m	权重 1	权重 2	权重 3	权重 4	权重 5
5	8.62	9.09	10.11	8.59	10.46
6	8.79	9.27	10.14	8.81	10.45
7	9.14	9.56	10.23	9.18	10.48
8	9.48	9.84	10.33	9.54	10.53

表7 有效区域内综合比当量相对平均偏差

Table 7 Relative mean deviation of comprehensive ratio equivalent in effective area

半径/m	权重 1	权重 2	权重 3	权重 4	权重 5
5	4.30%	3.71%	0.91%	4.78%	0.19%
6	2.41%	1.80%	0.61%	2.44%	0.29%
7	1.47%	1.27%	0.27%	1.66%	0.05%
8	5.25%	4.24%	1.25%	5.65%	0.48%

由图9可以看出,在模型有效区域内含能材料以冲击波超压和地震波振动速度峰值单独计算得到的比当量与爆心距成正比,以比冲量和热剂量单独计算得到的比当量与爆心距成反比,符合各威力参量测试结果的变化规律;但是以单个威力参量计算得到的含能材料比当量之间有着巨大的差距,无法确定含能材料的准确的比当量。在赋予权重系数进行综合评价之后得到的结果在一定程度上可以减小比当量曲线随爆心距波动的程度,且权重系数3和5计算得到的综合比当量结果受爆心距的影响较小。由表6、7可以看到使用权重系数3和5计算得到的有效区域内的综合比当量相对平均偏差均小于2%,表明这两种权重系数计算得到的综合比当量有较好的可靠性。综合评价模型能够作为一种实现无爆心距依赖的比当量求取方法,在一定程度上定量的反映含能材料的综合比当量。

#### 4 结论

为了实现对不同反应机理、不同装药物态含能材料在一定空间区域内综合毁伤威力的定量评价,在现有单参量威力评价、单威力参量演化规律的基础上,本文采用归一化加权方法,构建了多威力参量综合评价计算方法。在同等试验环境条件下,开展不同当量标准 TNT 静爆试验,根据不同装药质量、爆心距及各威力参量数据,建立了该环境条件下,以柱型顶端起爆标准 TNT 药柱为基础的综合评价模型。经过对试验数据和计算结果分析研究得出如下结论。

1)该含能材料的冲击波超压和地震波在5~10 m 接近10倍的 TNT 当量,10 m 以后超过10倍 TNT 当量,爆炸冲击波超压衰减缓慢,有着更长的正压作用时间。地震波衰减速度相较于 TNT 更加缓慢。比冲量和热剂量均

超过10倍 TNT 当量,热剂量在4~6 m 衰减速度更快,6 m 以后与 TNT 相当。以冲击波超压和地震波单一计算计算得到的比当量与爆心距成正比。以比冲量、热剂量单一计算得到的比当量与爆心距成反比。

2)同等试验条件下综合模型计算的比当量相对误差均小于2%,具有良好的 consistency,证明建立的综合评价模型在任意权重组合条件下计算得到的等效 TNT 当量的正确性。同时探索了一种能够实现无爆心距依赖的综合比当量求取方法,有效区域内综合比当量的相对平均偏差小于2%,实现了对同等试验环境下的含能材料综合比当量的定量计算。通过采用该计算方法,可以根据不同测试环境下,标准含能材料(如不同装药、起爆条件标准 TNT)与待测试样的实验数据,获取待测试样与特定工况下标准含能材料的等效当量,为未来含能材料的设计研发、能量释放特性综合评价提供有效的定量分析手段。

#### 参考文献

- [1] 施宇成,孔德仁,徐春冬,等.爆炸场冲击波压力测量及其传感器技术现状分析[J].测控技术,2022,41(11):1-10,34.  
SHI Y CH, KONG D R, XU CH D, et al. Analysis of current situation of shock wave pressure measurement and sensor technology in explosion field [J]. Measurement and Control Technology, 2022, 41(11):1-10,34.
- [2] 王安勇,张学辉,张俊锋,等.某含能材料爆炸冲击波威力评价[J].兵器装备工程学报,2021,42(9):248-254.  
WANG AN Y, ZHANG X H, ZHANG J F, et al. Evaluation of explosive shock wave power of an energetic material [J]. Journal of Ordnance Engineering, 2021,42(9):248-254.
- [3] 徐其鹏,张玉磊,李芝绒,等.非理想炸药爆炸试验及威力评估(英文)[J].火炸药学报,2020,43(3):287-292.  
XUE Q P, ZHANG Y L, LI ZH R, et al. Explosion test and power assessment of non-ideal explosives [J]. Journal of Explosives, 2020,43(3):287-292.
- [4] XUE Z Q, LI S, XIN C L, et al. Modeling of the whole process of shock wave overpressure of free-field air explosion [J]. Defence Technology, 2019, 15(5): 815-820.
- [5] 仲倩,刘大斌,秋珊珊,等.温压药剂爆炸火球温度测量研究[J].爆破器材,2019,48(1):23-26,31.  
ZHONG Q, LIU D B, QIU SH SH, et al. Study on temperature measurement of pyrospheric explosion of thermobaric agents [J]. Explosive Material, 2019, 48(1):23-26,31.



- [6] 蒋泽朋,王伯良,李席,等.某固体温压药剂与“什米尔”药剂爆炸威力特性对比研究[J].火工品,2015(6):28-31.  
JIANG Z P, WANG B L, LI X, et al. Comparative study on the explosive power characteristics of a solid thermobaric agent and "Simir" agent [J]. Explosive Explosive, 2015(6):28-31.
- [7] 郭家豪.基于地震波的战斗部爆炸当量估算方法研究[D].太原:中北大学,2020.  
GUO J H. Research on warhead explosion yield estimation method based on seismic wave [D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [8] 张梦妹.温压战斗部爆炸场地震波测试方法研究[D].南京:南京理工大学,2017.  
ZHANG M M. Study on seismic wave measurement method of explosion field of thermobaric warhead[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [9] 毛致远,段超伟,胡宏伟,等.水下爆炸威力试验与评价方法综述[J].水下无人系统学报,2022,30(3):384-390.  
MAO ZH Y, DUAN CH W, HU H W, et al. A review of test and evaluation methods of underwater explosion power [J]. Journal of Underwater Unmanned Systems, 2022, 30(3):384-390.
- [10] 唐亦康.典型含能材料爆炸冲击波作用能力评价方法研究[D].南京:南京理工大学,2021.  
TANG Y K. Study on evaluation method of blast wave action capability of typical energetic materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [11] 陈艳,林玉亮,李翔宇,等.等效靶弹药空气中爆炸威力评估[J].中国测试,2021,47(1):15-21,35.  
CHEN Y, LIN Y L, LI X Y, et al. Evaluation of explosive power of equivalent target ammunition in air [J]. China Test, 2021, 47(1):15-21,35.
- [12] KONG X, XU C, ZHANG X, et al. Testing and evaluation of the thermal damage caused by an explosion of energetic materials [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 186:108121.
- [13] 闫常陆,王峰.基于萨道夫斯基公式拟合的爆破振动规律研究[J].现代矿业,2018,34(6):109-111.  
YAN CH L, WANG F. Study on blasting vibration law based on Sadowski formula fitting [J]. Modern Mining Industry, 2018, 34(6):109-111.
- [14] SOCHET I. Blast Effects: Physical Properties of Shock Waves [M]. Berlin: Springer, 2017.
- [15] KONG X F, XU C D, ZHANG X H, et al. Weight-based evaluation of the explosive power of new energetic materials [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1000210.
- [16] 姜韬,孔德仁,郭雨岩.基于红外探测的新型热流密度传感器设计[J].国外电子测量技术,2017,36(11):38-42.  
JIANG T, KONG D R, GUO Y Y. Design of a new heat flux sensor based on infrared detection [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(11):38-42.
- [17] 陈家辉,孔德仁,徐春冬,等.坑道内冲击波压力测试与分析[J].国外电子测量技术,2022,41(12):63-68.  
CHENG J H, KONG D R, XU CH D, et al. Test and analysis of shock wave pressure in tunnel [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(12):63-68.

## 作者简介

祖晓炜,硕士研究生,主要研究方向为动态参量测试。  
E-mail:1135332712@qq.com

孔德仁(通信作者),博士,教授,主要研究方向为仪器与测试技术、动态参量测试、现代测试与测量理论应用等。  
E-mail:derenkong@hotmail.com