

CNIC-01331

CAEP-0019

应用分形理论探讨炸药的撞击感度

林其文

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

炸药样品在落锤撞击下, 其分幅图像具有分形结构, 同时, 它的分形维数与炸药感度有关。根据分形几何的周长 — 面积公式及线性回归原理, 对 TATB 等六种炸药的落锤试验的分幅图像进行了图像处理 and 分形维数计算。结果发现, 越钝感的炸药, 分形维数越大。而且, 六种炸药分形维数的排序与它们的 50% 爆炸特性落高的排序是一致的。因此, 用炸药的分形维数来鉴别撞击感度是基本可行的。

Investigation on Impact Sensitivity of Explosive with Furcate Geometry

(In Chinese)

LIN Qiwen

(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

The frame photograph of explosive samples under drop hammer test have a furcate structure, in which the fractal dimension of the explosive is related to its impact sensitivity. Based on the perimeter-area relation in fractal geometry and the linear recurrent analysis, image processing and furcated dimension calculation have been done for six explosive samples (e. g. TATB, etc.) in drop hammer test. It is found that the furcate dimensions of inert explosives are greater than that of the others. Besides, the orders of the furcate dimension for the six explosives are in agreement with that of the drop hammer height. Therefore, it is feasible to characterize the impact sensitivity of explosives with their furcate dimensions.

引言

通常,在一定条件下的落锤试验中,用炸药样品的爆炸百分数或爆炸 50% 的特性落高来表示其撞击感度。这种传统方法定义感度不够严密,有一定人为性。我们从大量落锤试验的分幅图像发现,炸药样品中的几何、物理和化学等变化(如裂纹、塑性流动、熔化、燃烧等)均首先是从它的边缘开始的,理论计算也说明了越邻近周边的地方速度越大,且随时间而增加^[1]。可见,在落锤撞击下,样品周边附近得到的能量密度最大,温度最高,所以点燃是从周边开始的。这就是说,炸药的起爆难易程度,主要表现在它的周边变化情况。

在落锤试验的分幅图像中,我们还观察到了样品周边开裂而形成的锯齿状或粘性指状的不规则边界,图形具有分形结构。这种不规则图形的特征可用它的分形维数来描述。既然炸药表面能、感度等的关系,章冠人教授已发表了多篇研究论文^[2-4]。本文将进一步探讨怎样用分形维数判别炸药感度的大小,以及研究分形维数的实验方法和数据处理等问题。

1 分形与冲击感度

既然落锤试验中炸药样品的分幅图像具有分形结构,那么它们和炸药的撞击感度有何关系呢?我们知道,炸药感度表征其起爆的难易程度,比较钝感的炸药,需要的撞击阈值强度较高,即样品所得到的撞击能量较大,其周边变形的不规则程度也大,因此分幅图形将具有较大的分形维数。其次,由于落锤撞击下,周边附近获得的能量密度较多,几何形状等变化均比内部要提前,所以周边分形结构对炸药起爆特征比较敏感,或者说分形维数同它的感度的关系是比较敏感的。

从上述分析得出:落锤试验中炸药样品的分形维数可用来描述撞击感度,越是钝感的炸药,分形维数越大,而且分形维数相对于感度比较敏感。所以用炸药的分形维数值来鉴别其感度大小原则上是可行的。因感度是一个相对量,仅从理论上寻求分形维数与感度的定量关系是不可能的,本文目的是,通过实验求出不同炸药的分形维数,然后根据分形维数的大小,来比较它们与感度的关系,并验证上述规律的正确性。

我们从落锤试验得到分幅图像后,按下述方法进行分形处理。假定某瞬间,分幅图像的面积为 A , 周长为 P , 据分形几何理论,非规整几何的周长-面积公式^[3]为

$$P^{1/D} = B\delta^{(1-n)/D}A^{1/2} \quad (1)$$

式中, δ 为测量码尺, B 为图形的形状因子, D 为分形维数。

我们知道,对于一个给定的具有分形周界曲线的平面几何图形,用不同的码尺 δ_i ($i=1, 2, \dots, n$) 进行测量时,得到 n 个周长值 P_i 和面积值 A_i , 按回归分析原理,可得 (1) 式的分形维数 D 和形状因子 B :

$$D = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3)$$

$$B = \exp(b/L)$$

其中, $x_i = \ln(A_i^{1/2}/\delta_i)$, $y_i = \ln(p_i/\delta_i)$

2 落锤试验

落锤试验系统由落锤仪、光源、触发激光、光放大器、电磁铁、分幅相机和微机等组成,它的主要部分如图1所示。落锤重5.5 kg,最大落高1.5 m。落锤的升降由电磁铁控制。圆盘形的炸药样品放在两块有机玻璃圆柱之间,其冲击过程由分幅相机照相,并输入微机存储,闪光灯光源的脉宽约500 μ s,它与相机、落锤冲击过程的同步,通过氩-氟激光器和光放大器的触发装置实现控制。

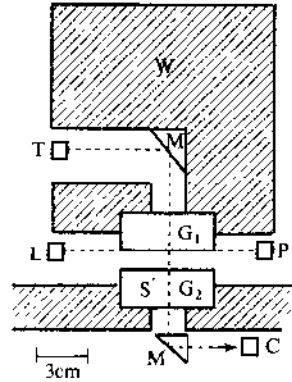


图1 落锤系统示意图

通过落锤试验,得到炸药样品撞击过程的分幅图像。为了测量这些图像的周长和面积,我们进行了如下处理。

3.1 图像校正

由于实际的照相模型是圆形的,而我们得到的图像数据确是椭圆形的,因此我们要对图像进行几何校正。具体作法是:取相对应的静态图像数据,求出其长轴和短轴,用长轴和短轴的比作为放大系统,对动态图像的短轴方向进行单向放大,使图像数据恢复到其真实情况。

3.2 图像二值化

为了将图像中的物体和背景分离开,我们对图像进行二值化处理。首先求出其最佳灰度门限,然后使用该门限将图像分为物体和背景两部分,将物体从背景中分离开来。求门限的步骤为:

(1) 计算输入图像的灰度直方图 $PHS(i)$, 其中 i 表示灰度;

(2) 计算灰度均值 $\mu_i = \sum_{i=1}^{NGR} (i-1) PHS(i)$, 式中 NGR 表示最大灰度加1 ($NGR=255+1$);

(3) 计算灰度类均值 $\mu(k) = \sum_{i=1}^k (i-1) PHS(i)$ 和类直方图 $\omega(k) = \sum_{i=1}^k PHS(i)$;

(4) 计算类分离指标 $\sigma_B(k) = \frac{[\mu_i \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k) [1 - \omega(k)]}$;

(5) 求出使 σ_B 最大的 k , 最佳灰度门限即为 $k-1$ 。

3.3 图像填充

由于照相的原因,有的图像数据不全,为此,我们用曲线拟合法求出一个相近似的图像,原图像中所缺的部分由这个图像的相应部分取代。

3.4 周长和面积的计算

在图像处理中,图像的周长和面积的概念通常是指:图像面积即为图像物体所含的像

素个数与象距平方的乘积；图像周长为其边界像素的个数与像距的乘积。在分形几何中，需采用不同的码尺进行测量，为此，令码尺=像素个数×像距。给出一组不同的码尺（改变码尺所含的像素个数），由于非规整几何的测量误差原因，将测得图像的一组不同的周长值和面积值。

4 结果分析

我们做了六种炸药的落锤试验，样品被压装成 $\phi 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的圆盘。落高均为 1.5 m。我们对每种炸药都做了多发实验，六种炸药的典型分幅照片如图 2 所示。试验记录的分幅图像进行了图像处理和分形维数计算，全部实验测得的最大分形维数值在表 1 中列出。根据表 1 中的数据，将每种炸药最大分形维数的统计平均值 $\bar{D}_{\max}$ 与它们 50% 爆炸特性落高 H_{50} 的比较列于表 2。图 3 为六种炸药典型的分形维数对时间的曲线。

表 1 TATB 等六种炸药实测的最大分形维数记录

实验号	分形维数	实验号	分形维数	实验号	分形维数
TATB. 1	1.49	HMX. 1	1.26	RDX. 3	1.22
TATB. 2	1.44	HMX. 2	1.21	RDX. 4	1.21
TATB. 3	1.48	HMX. 3	1.23	RDX. 5	1.18
TNT. 1	1.32	HMX. 4	1.22	PETN. 1	1.16
TNT. 2	1.34	HMX. 5	1.23	PETN. 2	1.18
TNT. 3	1.31	HMX. 6	1.25	PETN. 3	1.21
Tetryl. 1	1.27	HMX. 7	1.23	PETN. 4	1.17
Tetryl. 2	1.30	HMX. 8	1.20		
Tetryl. 3	1.24	RDX. 1	1.21		
Tetryl. 4	1.26	RDX. 2	1.19		

从图 2 看出，落锤冲击炸药样品的图像，周边发生破碎，有粘性指状或碎片，即边缘不规则，具有分形结构。越钝感的炸药，如 TATB，周边破碎越厉害。越敏感的炸药，如 PETN，周边破损不大，不规则性较小。

表 2 TATB 等六种炸药的最大分形维数平均值 $\bar{D}_{\max}$ 与特性落高 H_{50} 的比较

炸药	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	试验次数	$\bar{D}_{\max}$	H_{50}/cm
TATB	1.85	3	1.47	>320.0
TNT	1.59	3	1.32	157.0
Tetryl	1.63	4	1.27	33.5
HMX	1.77	8	1.23	26.0
RDX	1.70	5	1.20	23.3
PETN	1.64	4	1.18	12.5

从表 1、表 2 和图 3 可见，越钝感的炸药分形维数越大，反之，越敏感的炸药，分形维数越小。根据分形维数的大小，试验的六种炸药从钝感到敏感的顺序依次为：TATB, TNT, Tetryl, HMX, RDX 和 PETN。这个结果与这些炸药 50% 爆炸的特性落高 H_{50} 的顺序是一

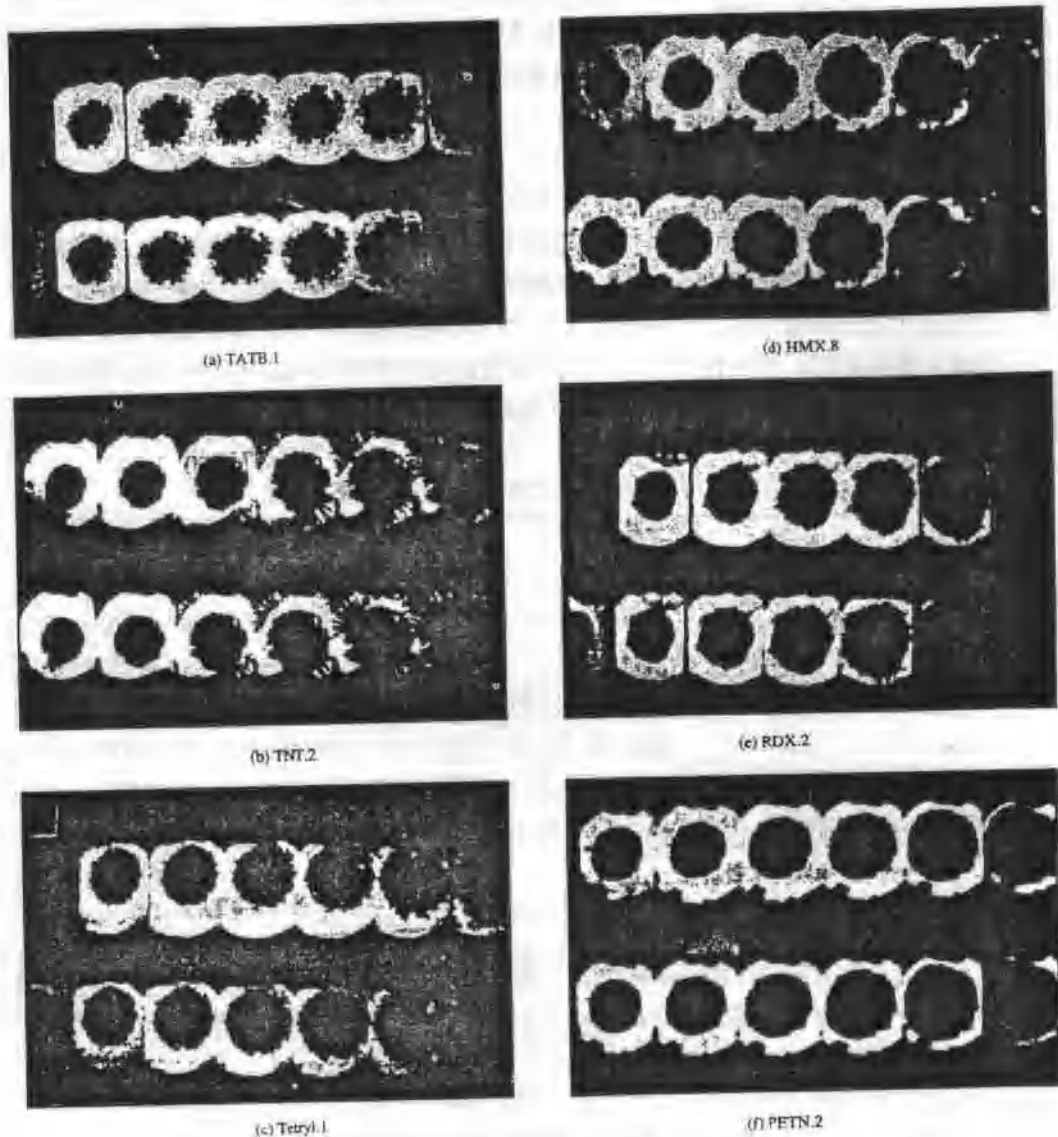


图 2 TATB 等六种炸药的分幅图像
(分幅图像的时间顺序为从上至下, 从左至右)

致的。不过, 从图 3 看出, HMX, RDX 和 PETN 的分形维数相差不大, 所以它们的感度顺序分辨比较困难。

通常, 炸药样品在撞击加载下, 需经过弹性、塑性、熔化阶段直至起爆。从图 2 看出, 较敏感的炸药, 图像周边较规则, 已达到塑性或熔化阶段, 分形维数也小; 较钝感的炸药, 图像周边破碎严重, 甚至有许多碎片, 表明材料呈脆性, 屈服强度高, 需更高的撞击强度才能达到塑性阶段, 分形维数也大。由此得出, 在低于炸药起爆阈值的同等冲击加载条件下, 也能用分形维数来判别不同炸药的感度大小, 这是分形方法量度炸药感度的一个特点。

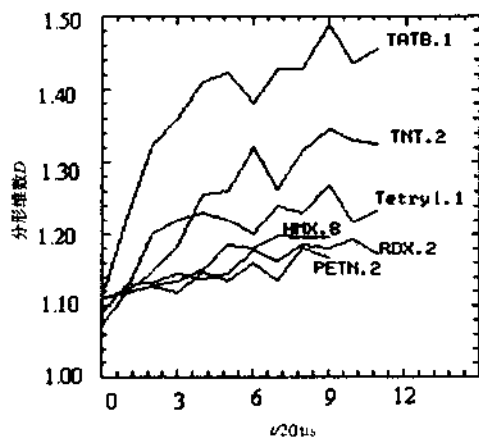


图3 TATB等六种炸药的分形维数 D 对时间的变化曲线

利用落锤试验的分幅图像,可得到分形维数对时间的分布曲线。从这些分布曲线能较详细的了解样品的变形过程,也能较全面地比较炸药分形维数的大小。

从上述结果分析看出:落锤试验的炸药样品分幅图像具有分形结构;它的分形维数与炸药的感度相关,较钝感的炸药分形维数较大,反之较小;测量分形维数不一定需炸药起爆,且分形维数是一条随时间上升的曲线。

为了区分感度相近的炸药样品,需要提高测量精度,最好能加大撞击强度,使炸药样品分别接近其起爆阈值,并测量其相应的最大分形维数。然而这在实验条件,测试技术和图像处理技术等方面都存在一定困难。其次,曲线的锯齿形涨落,尾部的下降等现象,主要是由于相机变相管放大率畸变(特别是前沿和后沿部分)致使分幅图像有误差(5%~10%),周边过度模糊,以及残缺图像填补取舍等因素所致。码尺的大小和测量次数太少也对分形维数有一定影响。所有这些工作,都有待于今后进一步改进。

5 结 论

从上述结果分析得出,通过落锤试验的分幅图像所得到的分形维数来判别炸药的感度是基本可行的。这种方法对于感度差别大的炸药,容易鉴别。为了准确鉴别感度相近的炸药样品,还需进一步改进实验条件、测试及图像处理等技术。

参 考 文 献

- 1 Zhang Guanren, Lin Qiwen. Evolution of the surface energy at the circumference of an explosive sample in drop test. 含能材料的理论与实践, 487~489; 英文/冯长根, 欧育湘编著. 北京: 兵器工业出版社, 1997. 9
- 2 章冠人. 关于分形和炸药撞击感度的一点记注, 爆炸与冲击, 1994, 14 (2): 105~111
- 3 Zhang Guanren. Application of fractal geometry to dynamical impacting of condensed explosives and other materials. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1996, 21: 166~168
- 4 章冠人. 落锤试验中炸药样品表面能的多重分形性质. 爆炸与冲击, 1996, 16 (1): 1~14
- 5 董连科. 分形理论及其应用. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1990
- 6 Terry R Gibbs, Alphonse Popolato. LANL Explosive Property Data, 1980