

# 关于分形和炸药撞击感度的一点记注

章冠人

(中国工程物理研究院流体物理研究所 冲击波物理与爆轰物理实验室 成都 610003)

**摘要** 通过对现有炸药冲击感度的标度方法进行了分析和讨论。从落锤试验分幅照相结果,初步建议用分形维数作为炸药冲击感度的标度,识为是有这种可能性。并讨论了这种方法的优点。

**关键词** 炸药冲击感度 落锤试验 分形维数

## 1 引言

炸药冲击感度的研究一般应用落锤试验。用两种试验数据作为撞击感度的度量:其一是用一定锤重,一定落高,一定试样重,测试其爆炸百分数作为撞击感度值;其二是用一定锤重,一定试样重,然后确定炸药50%爆炸的落锤高。这两种数据对大多数炸药可以区分出其冲击的敏感性。但对前一种方法有时不易分出炸药的敏感性质,例如应用手册<sup>[1]</sup>上的数据,锤重为10公斤,落高为25厘米,试样重为0.05克,做50发试验,有些混合炸药如RHT-902, RHT-903, RTBa-904, JH-9006, JE-9177, JE-9204, GI-922等均不发生爆炸,单质炸药DATB, NQ和TATB也是一样分不出那种炸药较敏感;对第二种方法,感度相近的炸药有时也分不出高低,例如对JOB-9003炸药的撞击百分率为0~4,而TATB为零,前者应比后者敏感,但它们均为 $H_{50} > 130$ ,故何者敏感就区分不出来,也许不用50%爆炸的高度而用30%爆炸的高度就可以分辨。因而这些方法是模糊的,有人为性。

作为冲击感度的另一种标度是应用隔板试验,用50%起爆的隔板厚度来表示冲击感度。它的缺点是进入炸药的冲击波受到隔板和炸药阻抗匹配的影响,另外也存在50%人为性规定的同样问题。

现在问题十分清楚,对炸药冲击和撞击感度的标度应选择一个标度量,它要唯一地和炸药产生爆轰相联系。例如F. E. Walker和R. J. Wasley就选择了 $p^2\tau = \text{常数}$ 作为炸药冲击起爆的标度,但要求出 $p^2\tau$ 的数据是不容易的,又受到冲击飞片厚度、大小等条件的限制,况且到现在为止还没有定出一种标准的测定方法。不过这个数据和输入炸药内的能量相联系,比较客观和不模糊,且是唯一的。

从上面的这些讨论,可以知道作为炸药撞击和冲击感度的标度量到底用那个物理量至今还没有研究得十分清楚。以往的一些方法均是相对的。本文的目的就是想从实验上和理论上论证能代表撞击感度的物理量,当然这还是初步的分析,是否真正能代表撞击感度

还要做许多实验工作。

## 2 凝聚炸药撞击感度需具备的条件

首先来讨论凝聚炸药撞击感度需具备的条件:

- 1) 理论上客观的、唯一的可以代表炸药冲击起爆的难易程度;
- 2) 实验上是简单的,在普通实验室内简单易行、经济、快速可获得数据;
- 3) 安全。

符合这些条件的,就现有仪器设备中,以落锤试验是最理想;但我们不采用  $H_{50}$  或起爆百分率作为撞击感度的度量而选用撞击炸药的分形维数作为撞击感度的度量,这是因为它是客观地和输入炸药中的能量相联系,又是唯一的。为了说明问题先介绍一下分形的基本知识。

## 3 分形的基本知识

分形这个名词是 1975 年由 Benoit Mandelbrot<sup>[2]</sup>用以描写具有复杂结构的不规则碎片的形状,应用不同的尺度。例如要测量海岸线的长度,实际海岸线不存在一个真正的长度,它随测量的尺码(精度)而变化。根据 Kolmogorov 和 Tikhomirov<sup>[3]</sup>对复杂结构量纲的定义

$$D_t = - \lim_{\lambda \rightarrow +0} \frac{\log N_\lambda}{\log \lambda} \quad (1)$$

式中,  $N_\lambda$  为用  $d$  维以  $\lambda$  为边的超立方体度量某一对象的数目。因此如这对象为海岸线,则根据式(1)海岸线的长度为

$$L(\lambda) = \lambda N_\lambda \cong \lambda \left( \frac{\lambda_{\max}}{\lambda} \right)^D \propto \lambda^{1-D} \quad (2)$$

式中  $\lambda_{\max}$  为最大的尺码。所以海岸线的长度是随尺码  $\lambda$  而变。

B. B. Mandelbrot 等<sup>[4]</sup>讨论了冲击功和金属断口分形维数的关系。C. S. Pande 等<sup>[5]</sup>研究了断裂断裂能与断口分形维数间的关系。董连科等<sup>[6]</sup>也分析了断裂韧性  $K$  与断口分形维数的关系。这些工作均说明断裂过程中的某些能量与分形维数间的关系。他们讨论的是金属的情形,在炸药冲击情况下,冲击功和分形维数间是否存在相似的关系,这是首先要加以澄清的。

## 4 凝聚炸药样品受落锤冲击后分形的一些特征

1) 首先要说明的是凝聚炸药样品经撞击后究竟存在不存在分形的问题。如图 1 所示是我们做落锤试验中样品受撞击形变的分幅照相,依时间序列由左到右排列。可以发现其边缘的形状具有分形的特征。在各个时刻的形状具有和分形粘性指状(Fractal viscous fingering)现象十分相似的图形。

从图上可以看出不同时刻样品周边开裂的形状十分具有相似性,它们的分形结构在统计上十分相似,所以必定存在一个分形维数。

2) 炸药的微观结构是一种晶体,具有一定排列的晶格,和金属的微观结构十分相似。Mandelbrot 对不同温度热处理的同一种金属进行了冲击功和测量码尺  $\xi$  间的实验,它们

在对数坐标上是一条直线。不同温度的热处理使金属获得不同的结构。不同的结构就吸收不同的冲击功,其相应的  $D_m$  也不一样。对不同的炸药,也具有不同的结构,可以预期,也要吸收不同的冲击功,其相应的  $D_m$  也不一样。

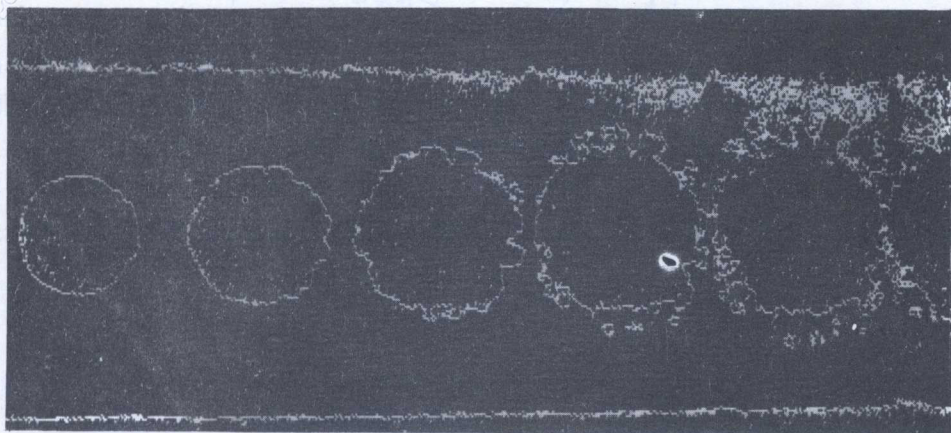


图1 TATB 落锤撞击后的分幅照相

Fig. 1 Frame photograph of TATB after drop hammer impact

3)分形维数  $D_m$  的物理意义,董连科等<sup>[6]</sup>证明材料的断裂韧性  $K_{Ic}$  和有效表面能密度  $\gamma$  之间存在关系

$$(1 - \gamma^2)K_{Ic}^2/E \sim 2\gamma'\xi^{1-D_F} \quad (3)$$

式中:  $E$  为弹性模量,  $\gamma$  为泊松比,  $\xi$  是码尺,  $D_F$  是断口的分形维数。上式  $\gamma'$  在欧拉坐标内为单位面积上的有效表面能,  $\xi^{1-D_F}$  乘上后表示单位面积由于码尺的不同而发生的变化。由于  $\gamma'$  应是不变的量, 码尺不同, 面积发生了变化, 量也要发生变化, 所以上式右边表示输到表面上的能量。分形维数愈大, 要求表面能愈多, 所以  $D_F$  除几何上的意义外, 还表示分形时对能量的需求。

由上面的几点看, 凝聚炸药受撞击后分形是存在的, 在不同时刻的照片, 相当于不同分形的层次。按时间由粗变细, 相当于使用由大到小的尺码。

## 5 分形和能量间的关系

由能量守恒定律, 撞击功可以分为下列几部份

$$w_0 = w_{el} + w_{pl} + w_s + w_z \quad (4)$$

式中:  $w_0$  为撞击能;  $w_{el}$  为弹性能, 它后来还原为重锤的反弹;  $w_{pl}$  为对落锤仪部件作的塑性功;  $w_s$  为作用于声波的能量; 只有  $w_z$  为作用在样品上的功, 它大约为撞击能的 15~25%。 $w_z$  被样品吸收后, 最初表现为样品的动能和热能, 以后动能变为表面能。

式中:  $w_T$  为热能;  $w_K$  为动能。

由于各种凝聚炸药的粘性和比热  $c_p$  差别不大, 均为 1J/g 左右, 所以对同一落锤高度,  $w_T$  对各种凝聚炸药是相近的。这样对各种凝聚炸药将得到相近的  $w_K$ 。根据落锤仪样品内各点速度公式<sup>[6]</sup>

$$u = \frac{2n+1}{2(n+1)} \frac{wz}{\delta} [1 - |1 - \eta|^{(n+1)/n}] \quad (5)$$

$$v = \frac{w}{2(n+1)} \{ (2n+1)\eta - n[1 \mp |1 - \eta|^{(2n+1)/n}] \} \quad (6)$$

式中： $u$  为径向速度； $v$  为轴向速度； $w$  为落锤速度； $\eta = 2z/\delta$ ； $z$  为轴向坐标； $\delta$  为厚度； $n \approx 1$ ；当  $0 \leq \eta \leq 1$  时上式中取“ $-$ ”； $1 \leq \eta \leq 2$  时上式中取“ $+$ ”。从式(5)立刻可以看出在样品四周边缘处的  $u$  最大， $v$  则各处均差不多。结合  $w$  的计算，算得样品边缘的速度  $u$  随时间的变化也愈来愈大。因而能量密度在边缘将随时间而增加， $u$  随时间的关系如图 2 所示。图 3 为文献[7]落锤试验的分幅照相，不同时刻照下的 PETN 样品的形状。从中可以看出在其四周有几处已经发生燃烧，但在中间还没有点燃。这证明在落锤试验中炸药的点燃是从边

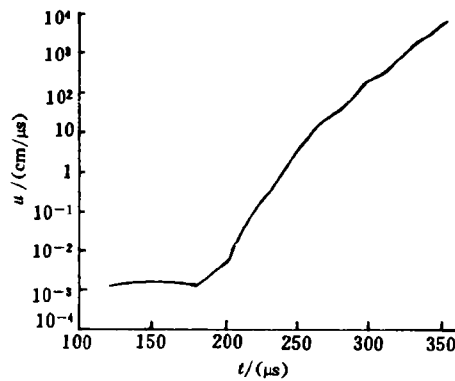


图 2  $u \sim t$  的关系

Fig. 2  $u$  vs  $t$  curve



图 3 PETN 落锤试验分幅照相

Fig. 3 Frame photograph of PETN after drop hammer impact

缘开始的，同时也证明边缘集中的能量最多，能量密度最大。因此炸药能否点燃在落锤试验中决定于边缘的能量密度。各种炸药点燃的能量阈值是不一样的，能量密度要求大的，就对撞击较钝感，能量密度要求小的，对撞击较敏感。不仅点燃是从周边开始的，其它如裂纹、熔化、爆炸等也是从周边首先开始，这可以从图 4 PETN 样品半径和时间关系看出来。

从这条曲线可以看出各种物理变化的循序为塑性流动、裂纹、熔化、燃烧、爆炸。设它

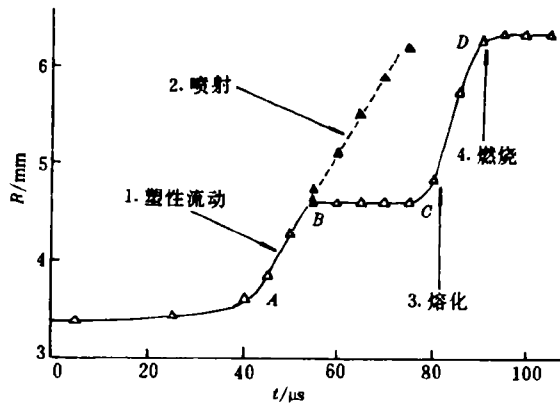


图 4 PETN 样品半径和时间关系

Fig. 4 Radius vs time relation of PETN sample

1. Plastic flow; 2. Jetting; 3. Melting; 4. Ignition;

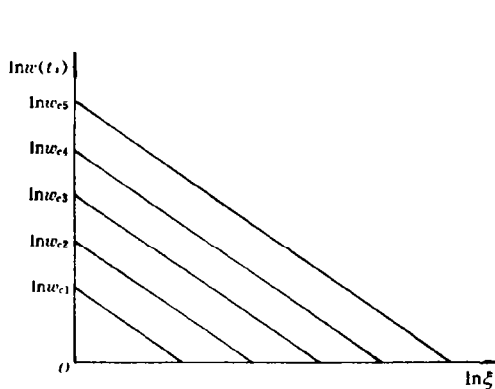


图 5 同种炸药  $\ln w(t)$  vs  $\ln \xi$  示意图

Fig. 5 Schematic diagram of  $\ln w(t)$  vs  $\ln \xi$  of a kind of explosion

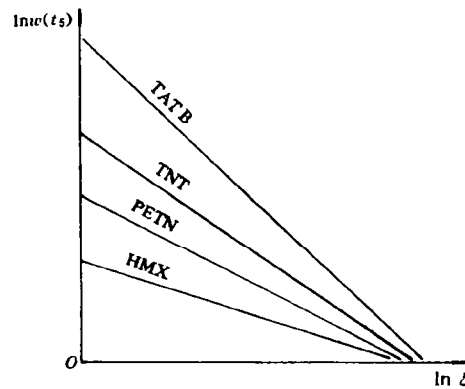


图 6 不同炸药的  $\ln w(t_s)$  vs  $\ln \xi$  示意图

Fig. 6 Schematic diagram of  $\ln w(t_s)$  vs  $\ln \xi$  of different kinds of explosives

们所需要的阈值能量为  $w_{c1}, w_{c2}, w_{c3}, w_{c4}, w_{c5}$ , 则由图 2 可见, 样品周边的能量密度  $w(t)$  也是按时间循序而增加, 如此  $w(t)$  达到某一阈值能量密度时, 就发生某种物理变化, 设发生上面五种物理变化的时刻为  $t_i$

$$w(t_i) = w_{c_i}, \quad i = 1, 2, \dots, 5$$

因为分形的一个层次相当于某一时刻, 此时如应用一种尺码  $\xi$  对表面积进行度量, 由定义则应有

$$w(t_i) = w_{c_i} \xi^{D_f - 1}$$

式中: 当  $\xi=1$  时就是欧拉坐标系中的尺码;  $\xi$  为尺码;  $D_f$  为分形维数, 对一种炸药有同一值。

这样,在对数坐标系中应有

$$\ln w(t_i) = \ln w_0 + (D_r - 1) \ln \xi$$

对一种炸药存在上面一张图,见图 5。对不同的炸药由于阈值能量不同,而  $\xi$  的范围均是差不多的(由于一般凝聚炸药从冲击到静止总作用时间均在 200 $\mu$ s 左右,约有 10 幅分幅照片),因此在上述图上,对各种炸药将有不同的直线斜率,如图 6 所示。能量阈值愈大,斜率愈大,因此可以应用  $D_r$  来代表炸药的各种撞击感度。

## 6 几点结论

这样做有几点优点:

1) 显然  $D_r$  代表某种物理变化的感度和用阈值能量来代表是一致的,也是唯一的。

2) 做实验时无须将炸药一定要到起爆的程度,只要做一次不起爆的撞击试验,利用图象分析仪测出样品面积和周边的关系,利用下式就可以求得  $D_r$ <sup>[8]</sup>

$$D_r = \frac{\ln P_E - \ln \xi}{\ln A^{1/2} - \ln \xi + \ln a}$$

式中:  $P_E$  为欧拉坐标内的长度;  $A$  为欧拉坐标内的面积;  $\xi$  为任选尺码;  $a$  为比例因子或叫形状因子。

3) 安全,节约。

以上仅为一点设想和分析,须进行实验来加以验证,但由于实验工作需要投出大量资金,一时无法实现,只得先发表理论探讨文章以引起大家讨论。

本文应用了夏先贵同志计算的图,特此表示谢意。

## 参 考 文 献

- 1 董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物性能. 北京: 科学出版社, 1989. 105~107
- 2 Mandelbrot B B. Les Objects Fractal: Forme Hasarde et Dimension. Paris: Flammarion. 1975.
- 3 Kolmogorov A N, Tikhomirov V M.  $\epsilon$ -entropy and  $\epsilon$ -capacity of Sets in a Function Space. Usp Mat. Nauk, 1959, 14(4): [Russ Math. Surv, 1961, 17: 277]
- 4 董连科, 王晓伟.  $K_{1c}$  与  $D_r$  关系的几点注记. 高压物理学报, 1989, 3(4): 302~307
- 5 Pande C S, Richards L E, et al. Acta Metall Mater, 1987, 35: 1633
- 6 Дубовик А В, Боболев В К. Чувствительность Жидких Взорывчатых Систем к Удару. Москва: Наука, 1978. 24~25
- 7 Heavens S N, Field J E. The Ignition of a Thin Layer of Explosive by Impact. Proc R Soc(Lond): A, 1974, 338: 77~93
- 8 王晓伟, 董连科, 龙期威. 周长-面积关系及分形维数的计算机模拟. 高压物理学报, 1991, 5(2): 124~129

## A NOTE ON FRACTAL AND SHOCK SENSITIVITIES OF CONDENSED EXPLOSIVES

Zhang Guanren

*(South-west Institute of Fluid Physics, Laboratory for Shock Wave and  
Detonation Physics Research, Chengdu, China P. O. Box 523, 610003)*

**ABSTRACT** By means of analysis and discussion, the method of grading of the shock sensitivities of condensed explosives is presented in this paper. From the frame camera results of drop hammer tests, the author primarily suggests the fractal dimension probably may be used as the method of grading of the shock sensitivities of condensed explosives. The superiorities of the method are discussed as well.

**KEY WORDS** shock sensitivities of condensed explosives, drop hammer test, fractal dimension