

动载荷下含空气泡的TNT装药 安全性能的实验研究

段 明

(水电部长江葛洲坝工程局科研所)

徐更光

(北京理工大学)

摘要 本文采用自行设计加工的“应力发生器”装置,对被试验炸药施加上升时间为10—30 ms的压力加载;应用数理统计的方法(试验设计的“正交法”和感度试验的“上下法”),实验研究了含有各种空气泡的压装 TNT 在此压力加载下的安全性规律,并由此外推得到了不含空气泡的压装 TNT 在此压力加载下的安全性能。

关键词 爆轰 感度 应力率

1. 前言

炸药的各种安全性(即感度)是爆炸工作者极为关注的一个研究领域,无论是在军事上还是民用上,炸药的安全性是影响其应用和发展的一个重要方面。近年来,国内外在炸药的冲击感度方面进行了大量的试验研究和数值模拟计算。人们应用隔板试验,研究了炸药在冲击波作用下的安全性(即在微秒量级上升时间的压力作用下炸药的安全性),然而,一般的高级炸药,都是对应变率敏感的材料^[1],其各种力学性能和爆炸性能都与加载速率有着密切的关系。例如, Bridgman^[2]证明,炸药能够等温压缩到5 GPa 而不发生爆炸; Liddiard^[3]证明,压装B炸药在冲击压缩的压力上升时间为0.1 μs 时,压力达到0.4 GPa 时即可引起爆炸(即 $dp/dt > 4 \text{ GPa}/\mu\text{s}$)。因此在不同的加载速率下,炸药的安全性能是不同的。

与炸药在冲击波作用下的冲击感度的研究相比,炸药在毫秒量级上升时间的压力作用下(即应力波作用下)的安全性的研究则较少。过去,出于军事上的需要,美国的匹克汀尼兵工厂,弹道研究室等,对于这一问题进行过一些军用产品上的试验和分析^[4];我国个别厂家也开展了一些试验工作^[4],然而,有关这方面的报道文章还不多见。

本文采用“应力发生器”装置,产生10—30 ms 上升时间的压力加载,应用数理统计的方法(试验的正交设计法和感度试验的“上下法”),试验研究了含有各种空气泡的压装 TNT 的感度规律;并由此外推得到不含空气泡的压装 TNT 在此压力加载下的安全性。

2. 试验设计

(1) 试验装置

本试验采用“应力发生器”对含有空气泡的压装 TNT 药片加载。“应力发生器”的装

置见图1。

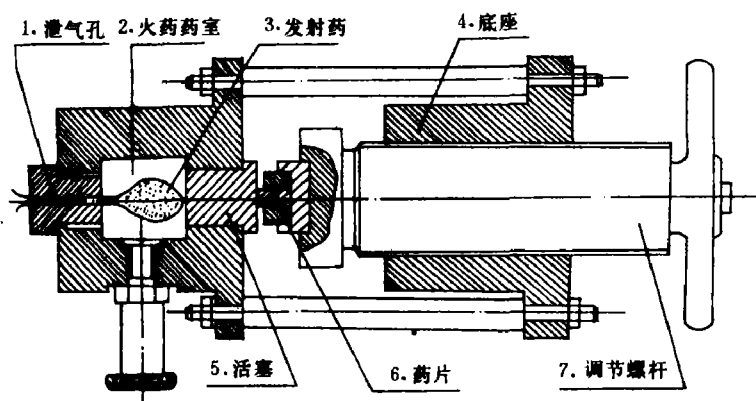


图1 应力发生器装置图

Fig.1 Installation of pressure Generator

1. Leak hole; 2. Powder chamber; 3. Powder; 4. Pedestal;
5. Piston; 6. TNT pellet; 7. Adjust screw.

将一定量的火药置于火药药室内燃烧，火药气体产生的压力推动活塞作加速运动。设活塞与腔壁之间的摩擦力忽略不计，那么，活塞与火药气体接触面所受的力应全部传递到炸药片上，即

$$\lambda = R^2 p / r^2 \quad (1)$$

式中， λ 为炸药片所受应力； p 为火药药室气体压力； R 和 r 分别为活塞端面和炸药片端面的半径。

改变火药药室的容积和泄气孔的大小，就可以改变升压时间，即改变加载速率。实验证明，前者影响明显，容积越大，升压时间越长。在实验之前需对“应力发生器”进行标定。得出不同发射药量所对应的最大应力值，作出 $\lambda-m$ 曲线（ λ 为最大应力， m 为发射药量）。并通过标定测定升压时间。标定试验测试系统框图如图2所示。标定结果列于表1中。

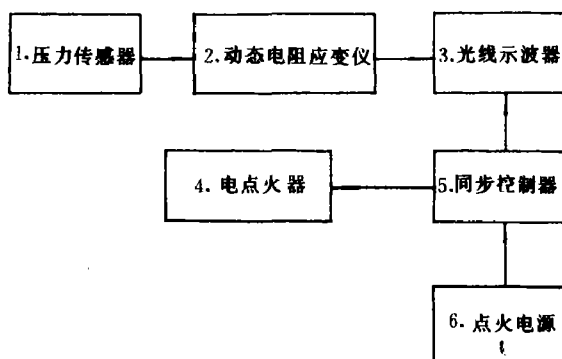


图2 标定试验测试系统框图

Fig.2 Measuring system for calibration

1. Pressure sensor;
2. Dynamic resistance strain gauge;
3. Photoelectric oscillograph;
4. Electric igniter;
5. Synchrocontroller;
6. Ignition power supply;

表1 标定试验结果

Table 1 Results of calibration

发射药量 $m / (\text{g})$	4	5	6	7	8	9
最大应力 $\lambda / (\text{GPa})$	0.376	0.461	0.528	0.632	0.748	0.789
升压时间 $t / (\text{ms})$	19.35	18.98	20.39	19.72	19.36	14.09

将表1中的 λ 、 m 数据回归得到标定曲线方程

$$\lambda = 0.026 + 0.087 m \quad (v = 0.9945) \quad (2)$$

式中, v 为回归系数; λ 为炸药片所受最大应力 (GPa); m 为发射药量 (g)。

(2) 正交试验设计

本试验主要研究在10—30 ms上升时间的压力作用下, 不同体积的空气泡对压装 TNT 安全性能的影响。为此, 我们称取 $w = 0.4 \pm 0.0002 \text{ g}$ 的粉状 TNT, 在 $\phi 10 \pm 0.005 \text{ mm}$ 的模套中压成密度 $\rho_0 = 1.60 \text{ g/cm}^3$ 的 TNT 药片, 然后在 TNT 药片上钻取各种孔, 孔深均为 1.6 mm, 通过改变孔径、孔数来改变空气泡的大小和分布。试验设计, 采用数理统计中的正交试验方法, 用正交表 $L_4(2^3)$ 以二水平正交试验来处理。试验因素、水平及结果见表2。

表2 正交试验表

Table 2 Orthogonal test table

因 子	孔径 / (mm)	孔数 / (个)	空	试验结果 (GPa)
水 平	1: 2.65	1: 1		
试验号	2: 1.50	2: 2		
1	1 (2.65)	1 (1)	1	λ_1 (0.997)
2	1 (2.65)	2 (2)	2	λ_2 (0.978)
3	2 (1.50)	1 (1)	2	λ_3 (1.118)
4	2 (1.50)	2 (2)	1	λ_4 (1.013)
$M_1 / (\text{GPa})$	M_{11} (1.975)	M_{12} (2.115)	M_{13} (2.011)	$T = \Sigma \lambda_j = 4.106$
$M_2 / (\text{GPa})$	M_{21} (2.131)	M_{22} (1.991)	M_{23} (2.096)	$\bar{\lambda} = 1.027$
$m_1 / (\text{GPa})$	m_{11} (0.987)	m_{12} (1.058)	m_{13} (1.006)	
$m_2 / (\text{GPa})$	m_{21} (1.066)	m_{22} (0.996)	m_{23} (1.048)	
$S / (\text{GPa}^2)$	S_1 (0.006)	S_2 (0.004)	S_3 (0.002)	S_T (0.012)

表中:

$$M_{11} = \lambda_1 + \lambda_2 \quad M_{12} = \lambda_1 + \lambda_3 \quad M_{13} = \lambda_1 + \lambda_4$$

$$M_{21} = \lambda_3 + \lambda_4 \quad M_{22} = \lambda_2 + \lambda_4 \quad M_{23} = \lambda_2 + \lambda_3$$

$$m_{ij} = \frac{1}{2} M_{ij} \quad (i = 1, 2; j = 1, 2)$$

$$S_1 = 2[(m_{11} - \bar{\lambda})^2 + (m_{21} - \bar{\lambda})^2], \quad S_2 = 2[(m_{12} - \bar{\lambda})^2 + (m_{22} - \bar{\lambda})^2],$$

$$S_3 = 2[(m_{13} - \bar{\lambda})^2 + (m_{23} - \bar{\lambda})^2], S_T = S_1 + S_2 + S_3$$

除以上的正交试验外,本文还希望得到一个孔时较系统的孔径试验数据,以便回归分析。为此,除了表2中的四组试验外,还要做一组孔径为3 mm,孔数为一个的情况下的试验。此组试验结果为 $\lambda_0 = 0.909$ (GPa)。

本试验所得出的 λ_i 值,是一种感度的特征应力值,是采用感度试验的数理统计方法——“上下法”^[5]、通过20发一组的试验,来得出一个爆炸概率为50%的特征应力 λ_i 的。本文“上下法”试验的步长为1(g)发射药量。根据“上下法”试验的误差分析公式^[6]

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{\sum i^2 n_i}{N} - \left[\frac{\sum i n_i}{N} \right]^2 \\ s &= 1.60(M + 0.04) \\ \sigma &= s \cdot d \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, i 为水平序数,从0, 1, ..., i ; n_i 和 N 分别为在水平序数 i 时的爆炸次数和一组试验中的爆炸总数; d 为步长; σ 为均方差。我们分析得到本文五组试验的相对误差均小于7%。

对于表2的正交试验结果进行误差分析,由于在95%的置信概率保证下,误差计算公式为

$$\delta = \left(F_{0.05(1, \nu_e)} \cdot \frac{S_e}{n_e} \right)^{1/2} \quad (4)$$

其中, δ 为绝对误差; ν_e 、 S_e 、 n_e 分别为误差项(即表2中的“空”列)的自由度、平均方差和及自由度系数,它们分别为 $\nu_e = 1$ 、 $S_e = 0.0009$ 、 $n_e = 4$,由此可以求得 $\delta = 0.19$,即表2中任意一种组合所得的 λ_i 值的误差都为 ± 0.19 (GPa)。

3. 试验结果的分析和讨论

对于正交表2所得到的实验结果,我们可以进行如下的正交分析。

(1) 因子各水平的比较: 由于 $m_{21} = 1.066 > m_{11} = 0.987$, 说明在孔径的二个水平中,取水平2(即1.50 mm)更安全;又由于 $m_{12} = 1.058 > m_{22} = 0.996$, 说明在孔数的二个水平中,取水平1(即1个孔)更安全。综上所述,在正交试验的四种情况中,1.50 mm直径的一个孔的情况为最安全即最难起爆的情况。

(2) 因子重要性的比较: 由于 $S_1 = 0.006 > S_2 = 0.004$, 说明在孔径和孔数这两种因子中,孔径的作用更重要、更明显。

为了便于进一步的讨论,下面按空气泡总体积 V 的大小顺序,将试验结果列于表3中。从此表中可以看出,带有空气泡的压装 TNT, 在10—30 ms 上升时间的压力作用下的安全性,与空气泡的总体积并不存在比例的对应关系。这种对应关系只在单独考虑孔径或孔数因素时存在,即:当孔径一定时,随着孔数的增加,空气泡体积增大,安全性下降;当孔数一定时,随着孔径增大,空气泡体积增大,安全性下降。

这种现象由正交分析的结果给予了数学上的证明。从正交分析中得出,孔径的作用比孔数更重要、更明显的结论。这也就是说,当 TNT 药片中存在少量的大体积的空气泡时,要比存在总体积相同的大量的小体积的空气泡时危险性大。

将表3中孔数为1个的三种不同孔径的实验结果回归得到

$$\lambda = 1.150 - 0.009 \phi^3 \quad (r = -0.9972) \quad (5)$$

表3 试验结果顺序排列表

Table 3 Orderly arrangement table of experiment results

空气泡情况	空气泡总体积 $V / (\text{mm}^3)$	最大应力 $\lambda / (\text{GPa})$	爆炸难易程度
孔径 1.50 mm 孔数 1 个	2.82	1.118	5 (最难)
孔径 1.50 mm 孔数 2 个	5.65	1.013	4
孔径 2.65 mm 孔数 1 个	8.81	0.997	3
孔径 3.00 mm 孔数 1 个	11.29	0.909	1 (最易)
孔径 2.65 mm 孔数 2 个	17.62	0.978	2

式中, λ 、 ϕ 、 v 的意义同上。可见, 当压装 TNT 中存在一个孔时, λ 值随孔径 ϕ 的增加, 按三次方规律下降, 如图 3。

4. 结论

本文通过对含有空气泡的压装 TNT, 在 10—30 ms 上升时间的压力作用下的安全性试验, 得到以下结论:

1. 空气泡对压装 TNT 的安全性有很大的影响。在空气泡的大小和个数这两种因素中, 前者更重要, 影响更大;

2. 在空气泡数量一定时, 随空气泡大小的增加, TNT 的安全性下降; 在空气泡大小一定时, 随空气泡数量的增加, TNT 的安全性下降。而 TNT 的安全性在同时考虑空气泡数量和小时, 与空气泡的总体积不存在比例关系;

3. 在含有单个空气泡时, 压装 TNT 的安全性能随该空气泡直径的增加, 按三次方规律下降。

致谢 实验是在北京理工大学爆炸技术实验室中进行的。该实验室的张宝平副教授等, 对本工作进行了热心的帮助, 作者对他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 兵器部第 210 所, 国外兵器技术 (化工类 5), 1980 年 5 月。

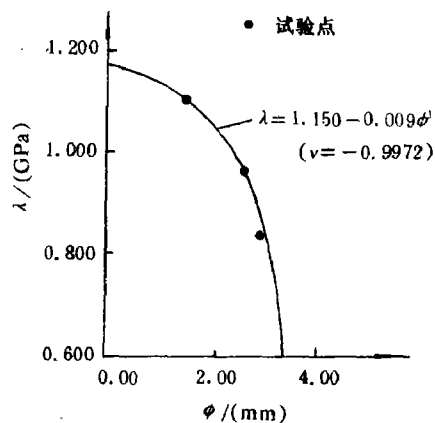


图 3 单空气泡时的 λ - ϕ 变化曲线
Fig.3 λ - ϕ curve for single air hole
• — Experimental point

- [2] Bridgman, P. W., *J. Chem. Phys.*, **15** (1974), 311.
- [3] Liddiard, T. P., Fourth Symposium on Detonation, October, (1965), 487.
- [4] 段 明, 北京工业学院研究生毕业论文, 1988年1月.
- [5] 北京工业学院八系编, 爆炸及其作用 (上册), 国防工业出版社, 1979年7月.
- [6] Statistical Research Group, Princeton University, Statistical Analysis for a New Procedure in Sensitivity Experiments, Report to Applied Mathematics Panel, NDRC, AMP Rep. No101.1R, SRG P No40 (1944).

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE SENSITIVITY OF TNT CHARGE WITH AIR HOLE UNDER DYNAMIC LOAD

Duan Ming

(The Scientific Research Institute of Changjiang Gezhouba Engineering Bureau)

Xiu Genguang

(Beijing Institute of Technology)

ABSTRACT In this paper, an installation called "pressure generator", made by us for generating pressure loadings with different rise time ranging 10–30ms, was used to investigate the sensitivity of explosives which contain internal air holes. Up-and-down method were utilized to perform, the sensitivity measurement for pressed TNT samples with internal air holes, and in turn the characteristic sensitivity of the same samples but without air holes was deduced from extrapolation method.

From these experiments, we found that both volume and number of the air holes exhibit significant influence on the sensitivity of the pressed TNT, and the volume effect appears more important. The bigger the air hole volume, the lower the sensitivity of the TNT is, while the number of air holes keeps constant. The more the air holes, the lower the sensitivity of TNT is, while the volume of the air holes keeps constant. It is also showed that if there contained a single air hole, the characteristic sensitivity of the TNT will increase with increasing the diameter of the hole with cubic power law.

KEY WORDS detonation, sensitivity, pressure rate.