

文章编号: 1006-9941(2004)04-0235-04

苏珊试验中弹体形变的测量和模拟计算

代晓淦¹, 韩敦信¹, 向永¹, 李涛²

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了研究苏珊试验弹在撞击中的变形情况, 对 JOB-9003 炸药进行了苏珊撞击试验, 采用 X 光测试了烟雾包裹下的壳体边界, 对其进行了数值计算, 建立了计算模型, 比较了计算与试验结果, 初步分析了炸药内部的压力以及应变。

关键词: 应用物理学; 炸药; 数值模拟; X 光测量

中图分类号: TQ560

文献标识码: A

1 引言

炸药的安全性能是保证炸药研究、生产、运输、装药、加工、使用和储存安全的重要条件。因而国内外都极为重视核武器中炸药部件的安全性能研究, 并已建立了许多炸药安全性能试验方法, 如枪击试验、滑道试验、苏珊试验、跌落试验等, 其中, 苏珊试验在模拟炸药遭受意外撞击时的安全性能和数值计算分析方面仍起着重要的作用。但由于试验条件本身的限制, 使得测试手段有限, 只能通过光电系统测量弹丸的飞行速度; 利用高速摄影技术记录弹丸的撞靶姿态以及撞靶后挤压变形直至点火爆炸的过程; 通过数据采集系统测量炸药爆炸后形成的空气冲击波超压。现今苏珊试验的结果分析是根据苏珊试验感度曲线及高速摄影结果作综合分析, 从而对试验炸药作出评定^[1]。虽然高速摄影能记录弹丸撞靶时的变形, 但是图像比较模糊, 几乎无法得到烟雾包裹下的铝壳在撞击后的壳体边界及对应时间, 故只能做半定量甚至是定性的分析。为了获得撞击后清晰的壳体的变形过程, 便于与数值计算对比, 试验中采用一种新的测试方法——X 光测试方法。

2 试验

2.1 试验方法

试验时将炸药柱装入苏珊试验弹中, 如图 1 所示。弹重约为 5.44 kg, 口径为 $\Phi 82$ mm^[2]。

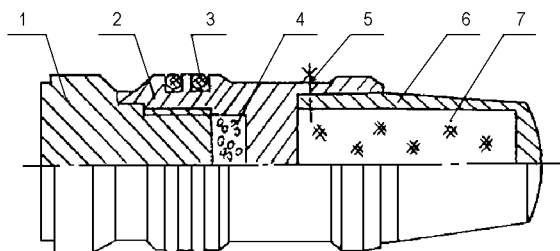


图 1 苏珊试验弹示意图

1—堵头, 2—本体, 3—密封圈,
4—配重铁砂, 5—紧定螺钉, 6—铝帽, 7—炸药柱

Fig. 1 Susan projectile

1—projectile tail, 2—steel body, 3—sealed ring,
4—small steel mass, 5—fixed bolts,
6—aluminum cup, 7—explosive charge

为了探索较低速度条件下的炸药和铝壳的变形, 采用压缩空气炮将试验弹发射出炮口, 使弹丸撞击在飞行正前方 3.7 m 处垂直竖立固定于水泥墩上的钢靶上。由于在场外进行试验, X 光机系统大部分器件都处于暴露状态, 因此采用将 X 光机放置在水泥墩后, 另加厚挡板进行防护来确保仪器的安全, 具体的试验场地平面布置图如图 2 所示。试验中除采用传统测试手段外, 还采用了左右对称的两台 Scandiflash 300 型脉冲闪光灯对苏珊弹撞靶进行动态测试。在靶上安装探针, 利用撞靶时导通产生触发电信号, 通过延时同步机给 X 光机动作信号, 并通过示波器关联时间关系, 从而触发 X 光机, 触发测试系统如图 3 所示。在撞靶

收稿日期: 2003-11-28; 修回日期: 2004-02-09

作者简介: 代晓淦(1978-), 男, 硕士, 从事炸药安全性研究。

后从两个不同角度和时刻拍摄铝壳的变形过程,X光测试布局如图4所示,图中X光源到靶中心的距离是1.33 m,到与之相对的底片盒的距离是1.73 m,底片盒尺寸200 mm×300 mm。

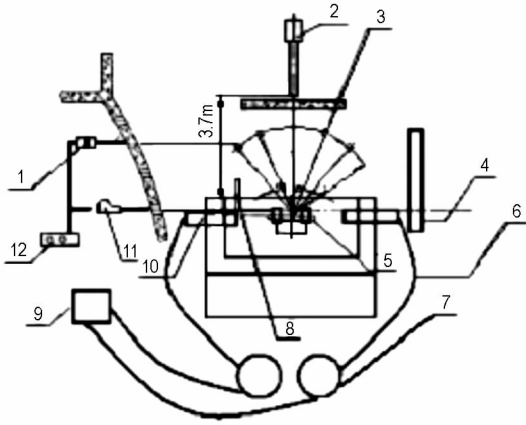


图2 苏珊试验场地平面布置图

- 1—电荷放大器, 2—发射装置, 3—压力传感器, 4—背景板,
- 5—X光底片盒, 6—X光机电缆, 7—X光主机, 8—氙灯,
- 9—X光控制台, 10—X光光源, 11—高速相机, 12—数据采集仪

Fig.2 Schematic layout of Susan test

- 1—magnified apparatus, 2—gun, 3—transducers,
- 4—background board, 5—negative box, 6—cable,
- 7—X-ray mainframe, 8—Xe-lamp, 9—X-ray console
- 10—X-ray lamp-house, 11—high speed camera, 12—osilloscope

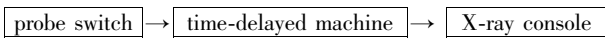


图3 X光机触发测试系统

Fig.3 X-ray switch and testing system

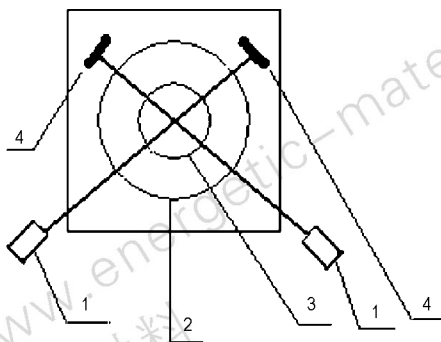


图4 X光测试布局

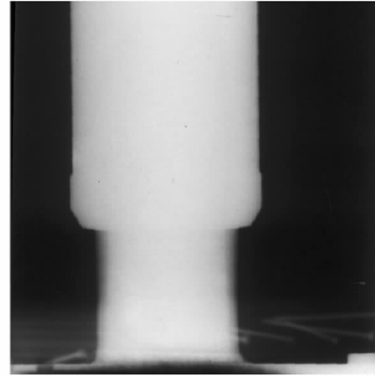
- 1—X光源, 2—靶板, 3—弹, 4—底片盒

Fig.4 Layout of X-ray testing

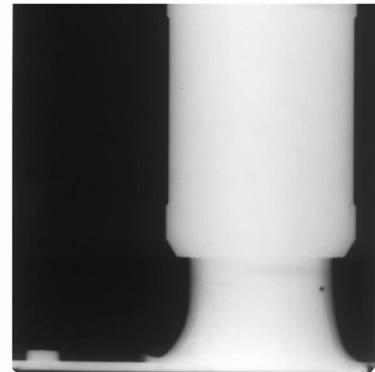
- 1—X-ray lamp-house, 2—target,
- 3—projectile, 4—negative box

2.2 试验结果

对JOB-9003炸药进行了试验,弹速为 $125\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时弹丸撞靶后X光机在 $100\ \mu\text{s}$ 和 $200\ \mu\text{s}$ 两个不同时刻拍摄的图像见图5,从图像中能较好地分辨壳体外边界的挤压变形过程。



$100\ \mu\text{s}$ 时的图像



$200\ \mu\text{s}$ 时的图像

图5 撞靶后X光机拍摄的图像

Fig.5 Images by X-ray after impact

幅频为 6×10^4 幅/s的高速相机拍摄的照片比较模糊,因此X光测试方法能弥补高速摄影方法的不足。结合图5及高速相机拍摄的照片可以知道铝壳在弹丸撞靶后开始发生变形,弹体在前部炸药随铝壳发生塑性流动,一定程度后,发生点火爆炸,并有一定的延迟时间。根据以前的试验结果,JOB-9003炸药在此速度撞击下延迟时间大约是 $450\ \mu\text{s}$ 。此种情况下炸药发生点火爆炸,这是由于炸药在撞击挤压、流动摩擦等作用下受热分解,形成点火甚至爆轰。将弹丸撞靶后X光机拍摄的图像经过处理,可得到不同时刻壳体的边界膨胀情况,如图6所示。

图6中横纵坐标分别表示铝壳的直径和长度,从

此图可以看出,在 100 μs 时壳体变形较小,只有几个毫米,说明炸药前端此时可能只是发生轻微变形,炸药后端由于壳体的限制而几乎没发生变形,而在 200 μs 时壳体已发生严重变形,达到 25 mm 左右,说明炸药在这一时间范围内随铝壳发生了塑性流动,在这种较大变形下仍未发生点火爆炸,可以推测此时由于挤压、流动摩擦等内部能量转化为热能,炸药逐渐受热分解,导致最后发生爆炸。

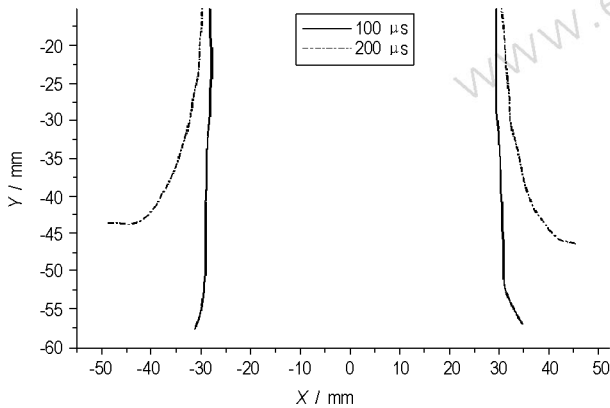


图6 两个不同时刻的壳体边界线

Fig.6 Boundary lines at two different moments

3 数值计算

为了获得铝壳及炸药内部的应力应变,对上述结构进行二维数值计算。采用有限元程序 ANSYS/LS-DYNA,由于缺乏一些材料模型的相应参数,目前暂使用弹塑性材料模型进行建模计算。DYNA 程序是用单点高斯积分,引入沙漏粘性控制零能模态,并应用中心差分法进行时间积分,其主要控制方程为:

$$\text{动量方程: } \sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i$$

式中 σ_{ij} 、 ρ 、 f_i 、 \ddot{x}_i 分别为柯西应力,当前密度,单位质量体积力,质点加速度。

$$\text{质量守恒方程: } \rho v = \rho_0$$

式中 ρ_0 为初始密度, v 为相对体积。

$$\text{能量方程: } E = v S_{ij} \varepsilon_{ij} - (p + q) v_1$$

式中 S_{ij} 和 p 分别表示偏应力和静水压力, v_1 为现时构形体积,为应变率张量, q 为体积粘性。

采用的屈服条件为:

$$\phi = \frac{1}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} = 0$$

其中

$$\xi_{ij} = S_{ij} - \alpha_{ij}$$

$$\sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p$$

$$\alpha_{ij}^{\nabla} = (1 - \beta) \frac{2}{3} E_p \dot{\varepsilon}_{ij}^p$$

式中 E_p 为弹性硬化模量, ε_{eff}^p 为有效弹性应变, $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ 为弹性应变率。

在计算模型初始网格中选取了三点,分别位于炸药顶部、中部、尾部。选取的材料参数见表 1。

表1 材料参数表

Table 1 Material parameters

materials	density /g · cm ⁻³	yield stress /Pa	Young's modulus /GPa	Poisson's ratio σ
steel body	7.85	235	212.0	0.26
aluminum cap(LY12)	2.785	370	77.5	0.33
JOB-9003	1.84	44.85	10.1	0.3

计算 100 μs 时的壳体边界线与 100 μs 时试验结果的壳体边界线见图 7。

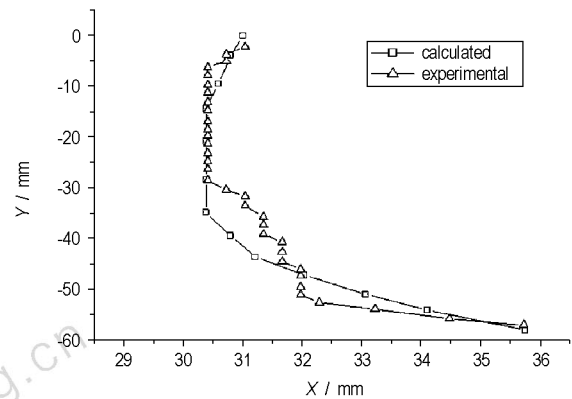


图7 计算与试验结果的壳体边界线

Fig.7 Boundary lines of numeration and experiment

从图 7 可看出,计算与试验符合得较好。但是由于炸药在动态加载行为下缺乏相应的参数,而且由于炸药内部温度、反应程度的影响,加上由于 JOB-9003 炸药的反应动力学方程中缺乏一些参数,致使难以利用反应速率方程等建立较好的模型(这方面工作还有待于以后完成)。计算的压力及应变曲线见图 8。

从图 8 中可以看出,位于炸药顶部的点最先发生变形,且变形较大,在撞靶后 200 μs 时应变在 130% 左右,且有继续增长的趋势,压力峰值约为 0.13 GPa; 位于炸药中部的点在撞击后 70 μs 左右发生变形,在 200 μs 内压力峰值约为 0.05 GPa; 位于炸药尾部的点最后发生变形,在 200 μs 内压力峰值约为 0.06 GPa。

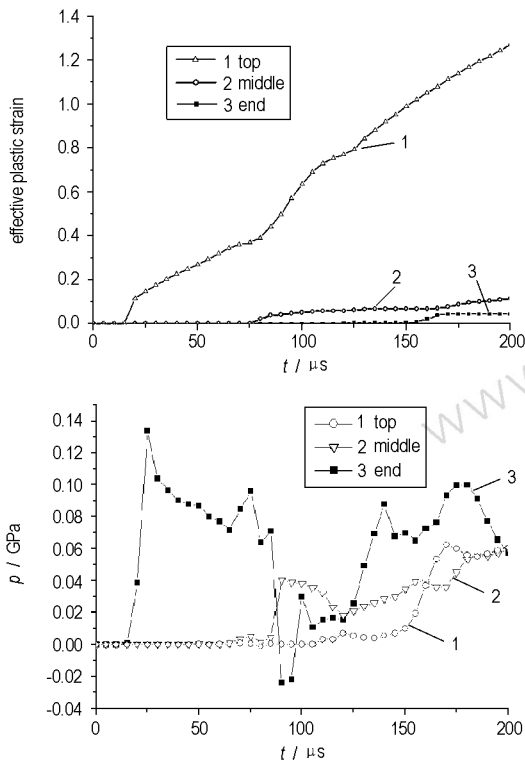


图8 三点的应变及压力图

Fig. 8 Strain and pressure at three positions

4 结论

综上所述, X光测试方法在运用到苏珊试验中时, 能清晰地拍摄出铝壳受到撞击后烟雾包裹下的边界, 弥补了高速摄影之不足。

通过数值计算, 将计算结果和拍摄的图像进行对比, 同时考虑测量出炸药内部的应力, 从而建立正确的材料模型, 能预估炸药在苏珊试验中的速度阈值, 对苏珊试验进行定量分析。

参考文献:

- [1] 章冠人, 陈大年, 等编著. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
ZHANG Guan-ren, CHEN Da-nian. Ignition Kinetics of Explosives [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991.
- [2] 中华人民共和国军用标准 GJB772A-97. 炸药试验方法[S]. GJB 772A-97. Explosive test method[S].

The Measurement and Numerical Simulation of the Projectile Deformation in Susan Test

DAI Xiao-gan¹, HAN Dun-xin¹, XIANG Yong¹, LI Tao²

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Low speed Susan test was done to study the deformation of Susan projectile during impact. In the test a new test method was adopted, and the boundary of aluminum shell wrapped by the smog was measured by X-ray. Numerical calculation was applied and the model was given. The calculation results were compared with the test results. The pressure and strain of the explosive were analyzed primarily.

Key words: applied physics; explosive; Susan test; numerical simulation; X-ray measurement