

# 用巴西实验评价炸药的力学性能\*

陈鹏万 黄风雷 张瑜

(北京理工大学, 北京, 100081)

丁雁生

(中国科学院力学研究所)

**摘要** 对巴西实验的原理、特点及其在炸药力学性能研究中的应用现状进行了介绍。设计了巴西实验装置,用巴西实验对炸药的力学性能进行了实验研究,对巴西实验进行了粘弹性近似分析。巴西实验能够比较准确、敏感地反映炸药的力学性能,具有试样制备简单、实验费用低等优点,是评价炸药力学性能的可行方法。

**关键词** 巴西实验; 炸药; 力学性能

**中图分类号** TB302; TQ560.71

巴西实验(Brazilian test),也称间接拉伸实验或劈裂实验。它起初用于脆性材料如陶瓷、水泥等。1956年在维也纳召开的“关于混凝土测试方法标准化问题”的国际会议上,将该法列为国际标准。

用巴西实验评价炸药材料的力学性能的研究始于70年代。Johnson<sup>[1,2]</sup>用巴西实验对一些塑料粘结炸药的抗拉强度、断裂应变及蠕变进行了研究,并分析了温度、颗粒度及Batherm处理等对炸药力学性能的影响。随着散斑干涉法、云纹干涉法和数字图象处理等在巴西实验中的应用,80年代以来,它被更为广泛地用于测量炸药的力学性能<sup>[3~6]</sup>。

## 1 巴西实验的原理及特点

### 1.1 原理

图1.1(a)是平面加载时巴西实验的原理图。在短圆柱体的侧表面沿径向施加两集中载荷,它沿试件的长度均匀分布,则在圆柱体内垂直于加载面的方向上产生拉应力。该力在试件中心一定范围内均匀分布,导致试件劈裂,材料的拉伸强度为

$$\sigma_t = 2P_t / D \quad (1.1)$$

式中,  $P_t$  试样劈裂时的作用力;  $D$  圆柱形试样直径;  $t$  圆柱形试样厚度。

为了避免平面加载时接触点处的接触应力导致接触区域发生坍塌, Awaji H 和 Sata S<sup>[7]</sup>采用了如图

1.1(b)所示的弧面加载方式。对于有限的接触区,中心点的拉应力可以表示为

$$\sigma_t = \frac{2P_t}{D} \left\{ 1 - \left( \frac{b}{R} \right)^2 \right\} \quad (1.2)$$

式中,  $b$  接触面的半宽;  $R$  试件半径。

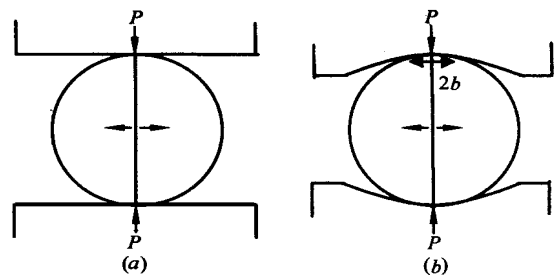


图 1.1 巴西实验原理图

Fig. 1.1 Schematic diagram of Brazilian test

### 1.2 应变测量

巴西实验的一个关键是应变测量。传统的应变计测量虽然比较简单,但由于炸药材料的模量和强度较低,在试样尺寸较小时,应变计在接触点处可能对试样起增强作用,而且这种方法只能提供单点的应变信息。

Johnson<sup>[1,2]</sup>采用位移传感器测量垂直于加载方向上直径的变化,从而得到该方向上的平均应变。

2000年12月收稿,2001年9月定稿。

\*国家自然科学基金资助项目(10002022)

这种方法比较简单,但测量得到的平均应变比试样中心实际的应变小。

80年代以来,一些光学测量技术如激光散斑干涉法、高精度云纹法等开始用于炸药材料巴西实验应变场的测量<sup>[3~6]</sup>。这些方法的优点是非接触、高精度及全场分析,缺点是测量系统比较复杂,实验费用也比较高。

### 1.3 特点

采用直接拉伸时,由于炸药的强度较低,而一些炸药部件还可能受到尺寸和几何形状的限制,使得制备标准的直接拉伸哑铃状试样比较困难。另外,直接拉伸时所需药量较大,还会带来安全问题。巴西实验最大的优点就是试样制备和加载简单、所需材料少、实验费用低。可以方便地加工很小的巴西试验试样,从而在显微拉伸台上对试样的变形破坏过程进行实时原位观察,这是开展炸药材料细观力学研究的有力手段。巴西实验试样可以用压制方法直接制备,也可采用机加的方法得到。它可以用于测量炸药材料的抗拉强度、断裂应变及蠕变等性能,评价炸药和其它材料的相容性及塑料粘结炸药中新的粘结剂。巴西实验的难点是应变场的测量及力学分析。

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置

根据巴西实验的原理设计了如图 2.1 所示的加

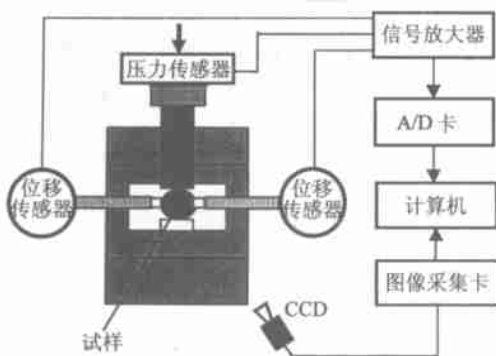


图 2.1 巴西实验装置示意图

Fig. 2.1 Schematic diagram of Brazilian test system

载装置。试样在受力过程中沿水平方向径向的变形通过两个位移传感器记录,载荷通过压力传感器记录,并通过计算机进行实时采集,从而得到试样水平方向上径向平均应变。如果需要得到中心点的应变可以通过粘贴应变计实现。采用该法可以比较方便直观地得到应变信息,缺点是只能提供单点的应变

信息,而且在接触点处对试样可能还会有一定的增强作用。该加载装置如果配合云纹法或激光散斑法还可以对整个试样的应变场进行测量,也可以对微区的变形进行测量,揭示炸药的细观变形破坏机理,目前这方面的工作正在进行。在该装置中有一个专门的加热装置对试样进行升温,从而可以考察温度对炸药力学性能的影响。试样的变形破坏过程经 CCD 图像采集卡 计算机进行实时显示和采集。

### 2.2 实验结果

图 2.2 是用巴西实验对以 HMX 为主要成分的 PBXN-5 塑料粘结炸药不同应变率下测量得到的试样中心点的拉伸应力—应变曲线。图 2.3 是测量得到的拉伸蠕变曲线。可以看出, PBXN-5 的力学性能与应变率有关,在加载头速率为 0.04mm/min (对应于平均径向应变率约  $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) 时测量得到的材料断裂时在试样中心的拉应力和拉应变分别为 0.85MPa 和 0.352%,在加载头速率为 1mm/min (对应于平均径向应变率约  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) 时拉应力为 1.16MPa,拉应变为 0.285%。在蠕变曲线上可以观察到加载时的瞬时弹塑性应变以及稳态蠕变 (AB) 和加速蠕变阶段 (BC)。试样破坏时裂纹基本上沿加载方向扩展,表明试样主要是在拉应力作用下破坏。

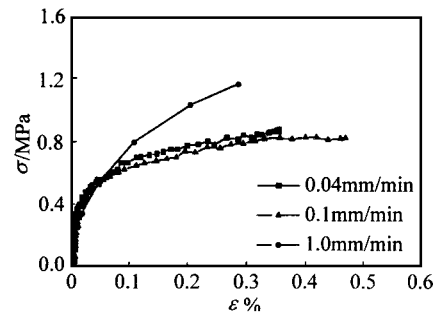


图 2.2 PBXN-5 的应力应变曲线

Fig. 2.2 Stress-strain curves of PBXN-5

有关巴西试验和直接拉伸试验结果的相关性已有过研究。Johnson 的研究表明<sup>[8]</sup>,巴西实验得到的间接拉伸强度和直接拉伸强度线性相关系数为 0.879,相关性较好;而两者的断裂应变的线性相关系数为 0.568,相关性稍差。Awaji H 等<sup>[7]</sup>还根据断裂理论由间接拉伸强度和材料的断裂韧性导出了直接拉伸强度。这表明,根据巴西试验结果可以对直接拉伸进行近似估计。

由于巴西试验试样破坏大致沿加载线方向发生,从而便于对试样变形破坏过程进行显微观察。

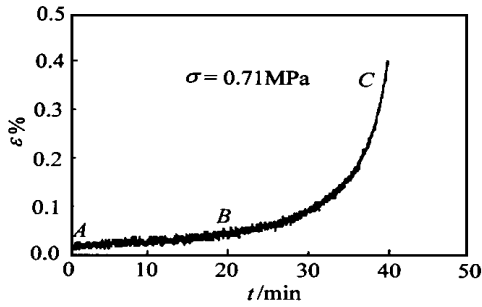


图 2.3 PBXN-5 的蠕变曲线

Fig. 2.3 Indirect tensile creep curve of PBXN-5

借助配备有显微拉伸台的扫描电镜对  $\phi 10\text{mm} \times 5\text{mm}$  的 PBXN-5 炸药试样进行了巴西实验,对变形破坏过程进行了实时原位观察。试验中观察到,破坏并不是严格地在试样中心点处开始,而是在纵轴附近,靠近集中力作用点、有初始损伤的某些部位开始,破坏的发生具有多个成核位置。由于初始损伤分布与大小的随机性,试样起裂位置是随机的,通常在大颗粒的边界首先形成,实验中看不到突然开裂。可见小裂纹逐渐扩展、贯通,最终导致试样开裂。图 2.4 为观察到的 PBXN-5 典型的断裂路径,可见断裂主要发生在颗粒与粘结剂的边界,而如图 2.5 所



图 2.4 PBXN-5 典型的断裂路径图

Fig. 2.4 A typical fracture route of PBXN-5

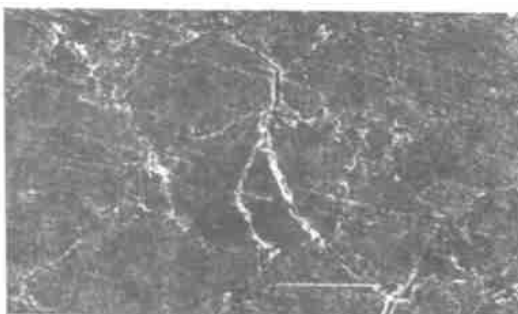


图 2.5 PBXN-5 断裂路径上的穿晶断裂

Fig. 2.5 Crystal fractures on a fracture route of PBXN-5

示的炸药颗粒的穿晶断裂却很少发生。实验结果表明, PBXN-5 受力变形后有界面脱粘、炸药颗粒断

裂、粘结剂基体开裂等多种破坏现象,其中最主要的是炸药—粘结剂界面脱粘和粘结剂基体开裂。

### 3 巴西实验的粘弹性近似分析

实验研究表明,很多炸药的力学性能与应变率和温度有关,表现出类似高聚物材料的粘弹性,其损伤破坏遵循固定应变准则<sup>[9,10]</sup>。文献[11]还表明,线性粘弹性理论可以较好地描述炸药材料的力学性能。参照纯聚合物粘弹性理论<sup>[12]</sup>,这里采用简单的四参数模型对巴西实验进行近似分析<sup>[13]</sup>。

如图 3.1 所示,沿 y 轴的集中力为 P,试样直径为 D,厚度为  $b$ 。考虑由 Maxwell 体和 Kelvin 体串联构成的四参数模型(如图 3.2 所示),并进行两点假设:(1)材料的体积应变是弹性的,只有应力偏量与应变偏量间满足粘弹性关系;(2)材料为小变形。应力分布不随时间变化,只是应变分布随时间变化,Chan K S 等<sup>[14]</sup>对 WIPP 盐间接拉伸蠕变的研究表明,这个假设是合理的。

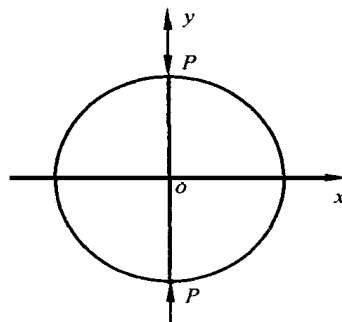


图 3.1 巴西实验示意图

Fig. 3.1 Schematic diagram of Brazilian test

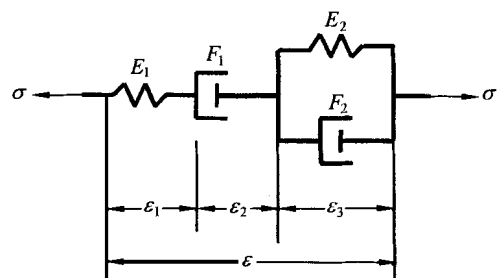


图 3.2 四参数粘弹性模型

Fig. 3.2 Four-parameter viscoelastic model

由弹性理论,巴西实验应力分布可表示为

$$\sigma_x = -\frac{4Px^2}{D} \left\{ \frac{1 - \bar{y}}{[x^2 + (1 - \bar{y})^2]^2} + \frac{1 + \bar{y}}{[x^2 + (1 + \bar{y})^2]^2} \right\} + \frac{2P}{D} \quad (3.1)$$

$$y = - \frac{4P}{D} \left\{ \frac{(1 - \bar{y})^3}{[x^2 + (1 - \bar{y})^2]^2} + \frac{(1 + \bar{y})^3}{[x^2 + (1 + \bar{y})^2]^2} \right\} + \frac{2P}{D} \quad (3.2)$$

$$xy = - \frac{4Px}{D} \left\{ \frac{(1 - \bar{y})^2}{[x^2 + (1 - \bar{y})^2]^2} - \frac{(1 + \bar{y})^2}{[x^2 + (1 + \bar{y})^2]^2} \right\} \quad (3.3)$$

无量纲自变量  $\bar{x} = \frac{2x}{D}$ ;  $\bar{y} = \frac{2y}{D}$ ; 定义

$$= \frac{1}{3} \quad kk \quad (3.4)$$

$$e = \frac{1}{3} \quad kk \quad (3.5)$$

$$S_{ij} = \quad ij - \quad ij \quad (3.6)$$

$$e_{ij} = \quad ij - \quad ij e \quad (3.7)$$

由假设(1)有如下应力—应变关系

$$P S_{ij} = Q e_{ij} \quad (3.8)$$

$$= 3 Ke \quad (3.9)$$

算子

$$P = 1 + \frac{F_1}{E_2} \left[ 1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{F_2}{F_1} \right] \frac{d}{dt} + \frac{F_1 F_2}{E_1 E_2} \frac{d^2}{dt^2} \quad (3.10)$$

$$Q = F_1 \frac{d}{dt} + \frac{F_1 F_2}{E_2} \frac{d^2}{dt^2} \quad (3.11)$$

其中,  $E_1$ 、 $F_1$ 、 $E_2$  和  $F_2$  分别为 Maxwell 体和 Kelvin 体中弹簧的弹性模量和粘壶的粘性系数,  $t$  为时间,  $K$  为体积压缩模量。

### 3.1 粘弹性近似解

由 Laplace 变换得到应变的表达式

$$ij(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t}) = ij(\bar{x}, \bar{y}, 0) - \left[ e_{ij}(\bar{x}, \bar{y}, 0) + \frac{F_2}{F_1 E_2} S_{ij}(\bar{x}, \bar{y}) \right] (1 - e^{-\bar{t}}) + \frac{F_2}{F_1 E_2} S_{ij}(\bar{x}, \bar{y}) \bar{t} \quad (3.12)$$

蠕变柔量的表达式

$$J_{ij}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t}) = \frac{ij(\bar{x}, \bar{y}, 0)}{S_{ij}(x, y)} - \left[ \frac{e_{ij}(\bar{x}, \bar{y}, 0)}{S_{ij}(x, y)} + \frac{F_2}{F_1 E_2} \right] (1 - e^{-\bar{t}}) + \frac{F_2}{F_1 E_2} \bar{t} \quad (3.13)$$

无量纲自变量  $\bar{t} = \frac{E_2}{F_2} t$ 。从上述表达式可以看出, 应变  $ij$ 、蠕变柔量  $J_{ij}$  均由三部分组成: (1) 瞬态响应

项, 可按弹性模型计算; (2) 指数上升项, 上升速率取决于 Kelvin 体的参数; (3) 线性上升项, 上升速率与 Maxwell 体的粘壶参数有关。

### 3.2 巴西实验的粘弹性应变分析

沿纵轴 ( $\bar{x} = 0$ ) 的拉应变

$$x(0, \bar{y}, \bar{t}) = \frac{4P}{D E_1} \left\{ \left[ \frac{1 - \quad}{2} + \frac{2}{1 - \bar{y}^2} \right] - \frac{1}{3} \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{1 - \bar{y}^2} \right] \left[ \left( 1 + \frac{E_1 F_2}{E_2 F_1} \right) (1 - e^{-\bar{t}}) - \frac{E_1 F_2}{E_2 F_1} \bar{t} \right] \right\} \quad (3.14)$$

式中,  $\nu$  为泊松比。由拉应变沿纵轴的梯度  $\frac{d}{dy} [x(0, \bar{y}, \bar{t})]$  分析知道, 当  $\bar{y} = 0$ ,  $\frac{d}{dy} [x(0, \bar{y}, \bar{t})] = 0$ , 当  $\bar{y} = \pm 1$ ,  $\frac{d}{dy} [x(0, \bar{y}, \bar{t})] \neq 0$ 。因为在  $\bar{y} = \pm 1$  邻域, 材料发生塑性变形, 实际上不会出现  $\frac{d}{dy} [x(0, \bar{y}, \bar{t})] \neq 0$  的情况。这意味着, 拉应变在试样中心未能达到最大值, 其最大值出现在靠近集中力作用点的某一位置。这样加载过程中最先出现的小裂纹不在试样中心, 而在纵轴附近、靠近集中力作用点、有初始损伤的某一位置, 这与实验观察的结果是一致的。

巴西实验试样直径沿水平轴的变化  $x$  由下面的积分式计算

$$x = 2 \int_0^{D/2} x(x, 0, t) dx = D \int_0^1 x(\bar{x}, 0, \bar{t}) d\bar{x} \quad (3.15)$$

式中,  $x(\bar{x}, 0, t)$  为试样沿  $x$  轴的拉应变。从而可以得到  $x$  轴上径向平均应变

$$\frac{x}{D} = \frac{8P}{D E_1} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{8} (1 - \quad) - \frac{1}{3} \left[ \left( 1 + \frac{E_1 F_2}{E_2 F_1} \right) (1 - e^{-\bar{t}}) - \frac{E_1 F_2}{E_2 F_1} \bar{t} \right] \right\} \quad (3.16)$$

试样中心水平方向的拉应变

$$x(0, 0, \bar{t}) = \frac{2P}{D E_1} \left[ 1 + 3 \left( 1 + \quad \right) - \frac{5}{3} \frac{E_1 F_2}{E_2 F_1} \left( 1 - e^{-\bar{t}} \right) + \frac{5}{3} \frac{E_1 F_2}{E_2 F_1} \bar{t} \right] \quad (3.17)$$

式中, 含泊松比的项表示纵向压缩对横向膨胀的贡献。根据(3.16)式和(3.17)式即可对巴西实验测量

得到的炸药蠕变性能的第一、第二阶段进行描述,对本文的实验结果分析表明,该模型能较好地与实验结果符合。但对于蠕变第三阶段的描述则还需要考虑损伤的影响。

#### 4 结束语

在设计巴西试验装置的基础上,用巴西试验对炸药力学性能进行了实际研究,并进行了初步理论分析。与直接拉伸试验相比,它具有试样制备和加载简单、所需材料少、实验费用低等诸多优点。在对炸药力学性能进行初步评价,特别是进行直接拉伸试验有困难时巴西实验无疑是一种很好的选择。但是其结果较之直接拉伸结果分散性相对较大,这就需要增加试验次数进行弥补。

**致谢** 本研究得到了中科院力学研究所所长择优基金的资助,实验中所用的 PBXN-5 炸药由华北工学院张景林教授提供,在此表示感谢。

#### 参考文献

- Johnson H D. Mechanical properties of high explosives. MHSMP-74-19, 1974.
- Johnson H D. Mechanical properties of LX-10-1 evaluated with diametric disc test. MHSMP-79-08, 1979.
- Field J E, Parry M A, Palmer S J P, et al. Deformation and explosive properties of HMX powders and polymer bonded explosives. In: Proc of 10th Symposium (International) on Detonation. Portland: 1989. 886 ~ 896
- Palmer S J P, Field J E, Huntley J M. Deformation, strengths and strains to failure of polymer bonded explosives. Proc R Soc Lond A, 1993, 440: 399 ~ 419
- Goldrein H T, Huntley J M, Palmer S J P, et al. Optical techniques for strength studies of ploymer bonded explosives. In: Proc of 10th Symposium (International) on Detonation. Boston: 1993. 525 ~ 535
- Rae P J, Goldrein H T, Palmer S J P, Field J E. Studies of the failure Mechanisms of polymer-bonded explosives by high resolution moire interferometry and environmental scanning electron microscopy. In: Paper summaries-11th International Detonation Symposium. Snowmass: 1998. 235 ~ 239
- Awaji H and Sata S. Diametral compressive testing method. J Eng Mater and Tech. 1979, 101: 140 ~ 147
- Johnson H D. Diametric disc and standard tensile test correlation study. MHSMP-81-22, 1981.
- Gray C I. High and low strain rate compressive properties of several energetic material composites as a function of temperature and strain rate. In: Paper summaries-11th International Detonation Symposium. Snowmass: 1998. 229 ~ 231
- Weigand D A. Constant critical strain for mechanical failure of several particulate polymer composite explosives and propellant and other explosives. AD-A327298, 1997.
- 马丽莲. 高能炸药拉伸应力—应变曲线测定方法的研究. 含能材料, 1993, 1(3): 28 ~ 35
- 蓝立文. 高分子物理. 西安:西北工业大学出版社, 1993. 112 ~ 116
- 潘颖. PBX 复合材料内应力和损伤的初步研究:[学位论文]. 北京:北京理工大学, 2000.
- Chan K S, Brodsky N S, Fossum A F, et al. Creep-induced cleavage fracture in WIPP salt under indirect tension. J Eng Mater and Tech, 1997, 119: 393 ~ 400

## BRAZILIAN TEST AND ITS APPLICATION IN THE STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF EXPLOSIVES

Chen Pengwan Huang Fenglei Zhang Yu

(Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Ding Yansheng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

**Abstract** Some basic concepts of Brazilian test and its applications in the study of mechanical properties of explosives are reviewed. A brazilian test system was designed, established, and used to study the mechanical properties of PBXN-5. A simple viscoelastic theory was used to analyze the Brazilian test. Its simplicity and low cost ensured it as an efficient way to characterize mechanical properties of explosive materials. General applicability of the technique developed in this paper for explosive materials is emphasized.

**Key words** Brazilian test, explosive, mechanical property