

文章编号: 1006-9941(2013)04-0490-05

基于圆弧压头巴西试验测试脆性炸药拉伸性能

温茂萍, 唐维, 周筱雨, 庞海燕, 朱风云

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用圆弧压头与差动变压器引伸计相结合的巴西试验方法测试脆性炸药力学性能, 并将其与单轴拉伸试验测试结果进行了显著性差异分析。以脆性显著的 HMX 基 PBX(PBX-HMX) 为对象, 研究了不同压头形式对巴西试验结果影响, 试验结果表明当试样半径与圆弧压头半径之比为 1 : 1.35 时, 圆弧压头巴西试验的破坏应力和破坏应变与单轴拉伸试验的破坏应力和破坏应变基本相等; 采用 1 : 1.35 圆弧压头巴西试验测试了 3 种脆性熔铸炸药的力学性能, 与单轴拉伸试验结果比较分析表明两种方法测试数据比较接近而且变化趋势是一致的, 圆弧压头巴西试验可用于脆性炸药拉伸性能的间接定量表征, 但显著性差异检验分析表明这两种方法测试结果还是存在一定差异而不能完全等同。

关键词: 固体力学; 炸药; 巴西试验; 单轴拉伸试验; 力学性能

中图分类号: TJ7; O34

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.017

1 引言

多种炸药材料均具有显著的低强度和脆性特征, 如高聚物粘结炸药(PBX)、熔铸炸药(RHT)等。拉伸性能是炸药材料最重要力学性能之一, 虽然炸药拉伸性能测试已有单轴拉伸试验标准, 但这些标准中采用的是长度大于 50 mm、哑铃状等较为复杂的试样, 需要炸药量较大、加工精度较高, 制样周期较长, 在配方及合成等前期研究中往往不能满足这些要求而不能获得其力学性能数据, 因此, 需要研究一种能够制备形状简单的小试样的试验方法。

巴西试验(Brazilian test)也称巴西圆盘试验, 它起初用于脆性材料如陶瓷、水泥等^[1-2], 并已有混凝土及岩石等材料测试标准^[3-4]。Johnson^[5-6]最早将巴西试验用于评价炸药材料力学性能, 由于巴西实验简单而且试样易于制作, 一直有学者研究改进巴西试验装置, 以提高巴西与单轴拉伸试验结果间的相关性。如陈鹏万^[7-8]、宋华杰^[9]等提出了平面压头巴西试验方法评价 PBX 拉伸性能, 庞海燕^[10-11]分析了平面压

头和试样等径圆弧压头两种巴西试验的局限性, 提出橡胶垫巴西试验方法可使 PBX 劈裂强度与拉伸强度基本相等, 但增加橡胶垫后不便于试样径向应变差动变压器引伸计(LVDT)测试, CHENG Liu 等^[12]提出采用 1.25 倍试样半径的圆弧压头巴西试验研究 PBX 老化前后拉伸强度, 这些研究都未能同时解决巴西试验中应力与应变准确测试问题, 更多是将巴西试验作为一种强度测试方法或加载手段。

本研究采用圆弧压头与 LVDT 相结合方法, 解决炸药巴西试验中应力与应变同时准确测试问题, 研究压头形式对测试结果的影响, 并对 1 种 PBX 和 3 种 RHT 炸药的弧面压头巴西试验结果与单轴拉伸试验的差异性进行了比较与分析。

2 实验

2.1 材料种类及试样

测试了 1 种 PBX 和 3 种 RHT, 材料编号和主要成分包括: (1) PBX-HMX: 95% HMX/5% 氟橡胶; (2) RHT-4: 34% TNT/64% RDX/2% 4 # 添加剂; (3) RHT-45: 34% TNT/64% RDX/1% 4 # 添加剂/1% 5 # 添加剂; (4) RHT-5: 34% TNT/64% RDX/2% 5 # 添加剂。

巴西试验试样为 $\Phi 20$ mm \times 6 mm 药柱, 每组试样为 3 发, 拉伸试验试样为长 65 mm 哑铃状, 每组试样为 5 发。每种材料的巴西试验试样和单轴拉伸试验试样均从同一炸药毛坯件上切割取样后再加工而成。

收稿日期: 2012-06-16; 修回日期: 2013-01-02

基金项目: 国家自然科学基金-中国工程物理研究院联合基金(NSAF 11076002)资助, 中国工程物理研究院发展基金资助(2010B0203023, 2009A0203010)

作者简介: 温茂萍(1967-), 女, 硕士, 研究员, 主要从事非金属材料力学与物理性能研究。e-mail: maoping-w@qq.com

2.2 仪器与测试条件

单轴拉伸试验和巴西试验均采用 5582 材料试验机,美国 INSTRAN 公司。巴西试验中径向应变测试采用差动变压器式引伸计,量程 0.5 mm,精度 0.5%,美国 INSTRAN 公司。

单轴拉伸试验执行 GJB772A-1997 方法 418.1。单轴拉伸试验和巴西试验中的加载速率均为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,测试环境温度为 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.3 巴西试验装置

试验中采用了两种巴西试验装置,一种是 Johnson^[5-6]提出的炸药巴西试验装置,见图 1,该装置采用了平面压头形式,试样的径向变形采用的是 LVDT 测试,另一种是借鉴 CHENG Liu^[12]提出圆弧压头方法,改进 Johnson 巴西试验装置,见图 2,其中圆弧压头包括了 1.35 倍试样半径和 1.25 倍试样半径两种圆弧压头形式。

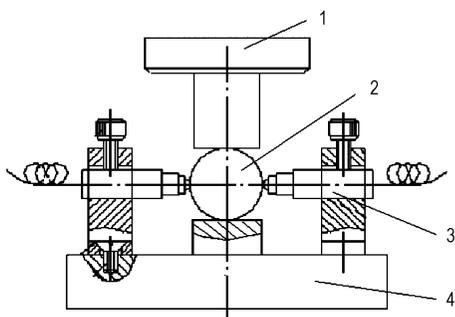


图 1 平面压头巴西试验装置示意图

1—上平面压头, 2—试样, 3—LVDT, 4—下平面压头

Fig.1 Sketch of flat compress head brazilian test device

1—super-flat compress head, 2—sample, 3—LVDT, 4—sub-flat compress head

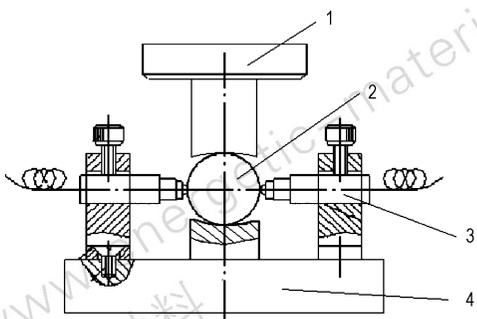


图 2 圆弧压头巴西试验装置示意图

1—上圆弧压头, 2—试样, 3—LVDT, 4—下圆弧压头

Fig.2 Sketch of arc compress head brazilian test device

1—super-arc compress head, 2—sample, 3—LVDT, 4—sub-arc compress head

3 测试结果及分析

3.1 不同压头巴西试验结果及与拉伸性能比较

PBX-HMX 是以 HMX 为基高聚物粘结炸药,具有显著脆性特点,分别采用平面压头(1:∞ 巴西试验)、1.35 倍试样半径圆弧压头(1:1.35 巴西试验)、1.25 倍试样半径圆弧压头(1:1.25 巴西试验)3 种方法测试了 PBX-HMX 的巴西试验应力-应变曲线,并将它们与 PBX-HMX 的单轴拉伸试验应力-应变曲线进行了比较,见图 3。图中平面压头巴西试验曲线与单轴拉伸试验曲线偏离较大,不论是曲线斜率还是曲线峰值均小得多,1:1.25 巴西试验曲线峰值比单轴拉伸曲线大,比较而言,1:1.35 巴西试验曲线与单轴拉伸试验曲线较为接近。

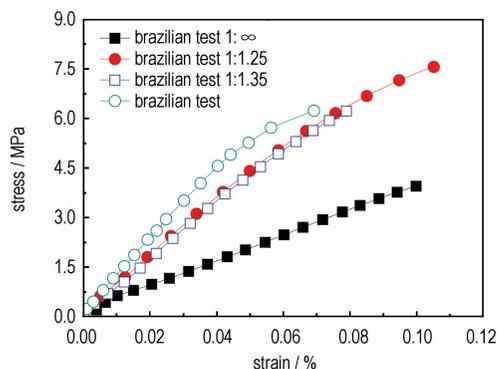


图 3 不同压头巴西试验及单轴拉伸试验测试的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of different compress head brazilian tests and single-axis tensile test

破坏强度、破坏应变及模量是材料力学性能中最为重要的性能参数,表 1 是每组试样的破坏强度、破坏应变及模量的平均值及其标准偏差。从表 1 可以看出,如果以单轴拉伸试验数据为基准值,平面压头测试得到的各项力学性能数据明显偏小,1:1.25 圆弧巴西试验中除模量偏小外,破坏强度和破坏应变均偏大,比较而言,1:1.35 巴西试验结果与单轴拉伸试验测试结果比较接近。

表 1 不同试验测试的 PBX-HMX 力学性能数据

Table 1 Experiment results of PBX-HMX by different test methods

method	break stress/MPa	break strain/%	module/GPa
Single-axis tensile test	6.22 ± 0.52	0.071 ± 0.039	11.23 ± 0.30
Brazilian test (1:1.25)	7.43 ± 0.81	0.100 ± 0.025	9.29 ± 0.27
Brazilian test (1:1.35)	6.24 ± 0.71	0.079 ± 0.019	9.20 ± 0.20
Brazilian test (1:∞)	3.94 ± 1.05	0.099 ± 0.037	3.20 ± 0.99

3.2 不同压头巴西试验中试样应力分布分析

不同压头巴西试验对 PBX-HMX 力学性能测试结果不同,与在不同压头形式巴西试验中试样受力状况不同有关。本研究进一步通过数值模拟分析在相同径向压缩变形量的情况下,不同压头巴西试验中试样上的应力分布云图,见图 4。分析采用线弹性模型, ANSYS 的 SOLID 186 单元,压头模量 200 GPa,压头泊松比 0.3,试样模量 11.23 GPa,试样泊松比 0.3。从图 4a 可以看出,平面压头巴西试验的最大拉伸应力

分布在接近两个压头的部位,存在显著应力集中问题,造成了试样在较小的应力作用下也可发生破坏。而 1 : 1.35、1 : 1.25 两种巴西试验中最大拉应力分布在试样中部,满足巴西试验间接测试拉伸性能的要求,测试结果与拉伸性能接近,但是两者应力分布还是存在差异,两者测试的破坏应力和破坏应变均不同,不过对于 1 : 1.35 圆弧压头巴西试验更接近拉伸试验结果的原因,还需进一步开展巴西试验中试样应力精确分析和 PBX 材料强度准则等相关研究,才能得到充分解释。

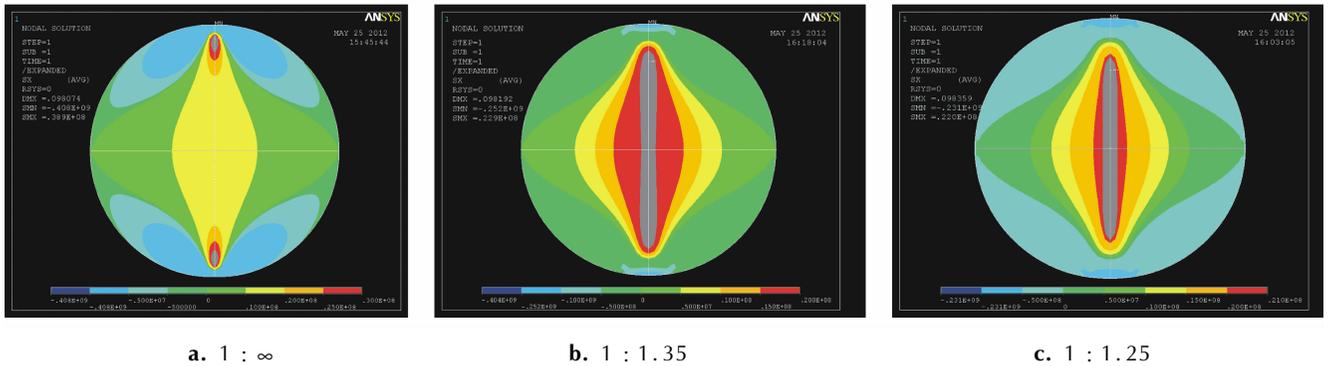


图 4 不同压头巴西试验试样在相同轴向压缩量下的应力分布

Fig.4 Stress distribute of sample in different compress head brazilian tests with same axial direction deformation

3.3 3 种熔铸炸药圆弧压头巴西试验结果

根据 3.1、3.2 分析结果,认为采用 1 : 1.35 圆弧压头巴西试验测试结果与单轴拉伸试验结果基本相等,结果进一步采用 1 : 1.35 圆弧压头巴西试验对同样具有显著脆性的 3 种熔铸炸药进行了测试如图 5 所示。同时还测试了这几种熔铸炸药的拉伸性能如图 6 所示。从图 5 和图 6 可以看出,两种方法的测试曲线变化趋势基本一致。

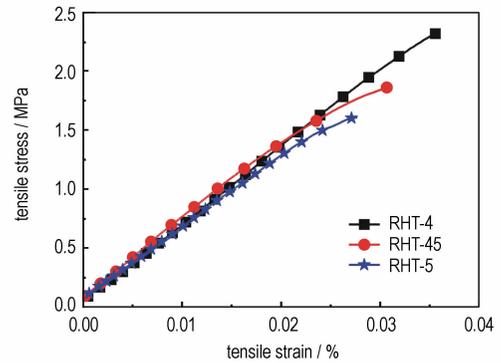


图 6 3 种熔铸炸药单轴拉伸试验应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of casting explosive by single-axis tensile test

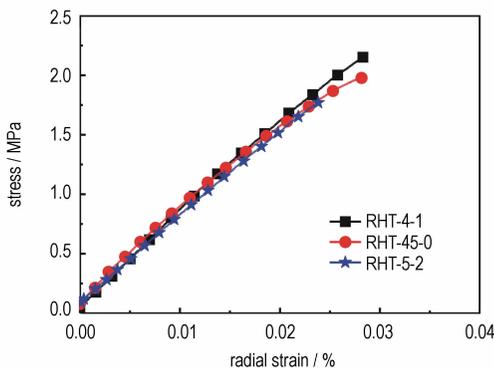


图 5 3 种熔铸炸药圆弧巴西试验应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of three kinds of casting explosives in Brazilian test

3.4 脆性炸药巴西试验与单轴拉伸试验结果差异性分析

每组试样用巴西试验和单轴拉伸试验测试得到的破坏强度、破坏应变及模量的平均值及其标准偏差见表 2 ~ 表 4。从表 2 和表 3 均可以看出,在这 3 种熔铸炸药的力学性能数据中,拉伸破坏强度、拉伸破坏应变和拉伸模量较高的 RHT-4 熔铸炸药的巴西试验的破坏强度、破坏应变及模量均相对较高。而 RHT-5 的各项拉伸性能最低,从巴西试验测试得到的数据也是最

低。结合脆性 PBX-HMX 的测试结果,分析认为,巴西试验测试的脆性炸药力学性能与单轴拉伸试验测试的性能数据具有较好的相关性,圆弧压头巴西试验可用于脆性炸药拉伸性能的间接定量表征。

本研究还采用 t 检验法分析了巴西试验结果与拉伸性能数据之间的显著性差异,分别计算了两种试验得到的破坏强度、破坏应变及模量之间的 t 值。 t 值的计算采用公式(1)和(2)。

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \quad (1)$$

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (2)$$

式中, \bar{x}_1 、 S_1^2 分别为某一单轴拉伸试验数据的平均值、试样发数 ($n_1 = 5$)、实验方差。 \bar{x}_2 、 n_2 、 S_2^2 分别为某一巴西试验数据的平均值、试样发数 ($n_2 = 3$)、实验方差。根据该公式计算得到的巴西试验和单轴拉伸试验测试得到的破坏强度、破坏应变及模量的 t 值分别见表 2、表 3 和表 4。如果置信概率取 95%,本研究的检验自由度为 6,根据 t 分布表查得 $t_p(6) = 2.45$,只有当 t 值小于 $t_p(6)$ 时,两者才没有显著差异。将表中的各个 t 值与 $t_p(6)$ 比较,可以看出,多数 t 值小于或接近 $t_p(6)$,表明巴西试验结果与单轴拉伸试验测试结果相关性较好,但是还是有部分 t 值超过了 $t_p(6)$,尤其是模量数据,这表明巴西试验结果与单轴拉伸试验测试结果还是存在一定差异,两者不能完全等同。

表 2 炸药巴西破坏强度与单轴拉伸破坏强度

Table 2 Brazilian break stress and single-axis tensile break stress of explosives

casting explosive	Brazilian break stress /MPa	single-axis tensile break stress/MPa	t
RHT-4	2.090 ± 0.134	2.350 ± 0.194	2.90
RHT-45	2.031 ± 0.094	1.780 ± 0.079	3.83
RHT-5	1.791 ± 0.097	1.600 ± 0.206	1.74
PBX-HMX	6.240 ± 0.710	6.220 ± 0.520	0.78

表 3 炸药巴西破坏应变与单轴拉伸破坏应变

Table 3 Brazilian break strain and single-axis tensile break strain of three kinds of casting explosives

casting explosive	Brazilian break strain /%	single-axis tensile break strain/%	t
RHT-4	0.0288 ± 0.0041	0.0365 ± 0.0023	2.98
RHT-45	0.0286 ± 0.0006	0.0300 ± 0.0014	1.86
RHT-5	0.0257 ± 0.0012	0.0242 ± 0.0042	0.76
PBX-HMX	0.0790 ± 0.0190	0.0710 ± 0.0390	0.99

表 4 炸药巴西模量与单轴拉伸模量

Table 4 Brazilian module and single-axis tensile module of three kinds of casting explosives

casting explosive	Brazilian module /GPa	single-axis tensile module/GPa	t
RHT-4	8.32 ± 0.67	6.79 ± 0.28	3.74
RHT-45	9.12 ± 0.63	6.86 ± 0.30	5.85
RHT-5	8.08 ± 0.60	6.74 ± 0.43	3.38
PBX-HMX	9.20 ± 0.20	11.23 ± 0.30	5.77

4 结 论

(1) 采用圆弧压头与 LVDT 引伸计解决炸药巴西试验中应力与应变同时准确测试问题,结果表明当圆弧压头半径与试样半径之比为 1 : 1.35 时,PBX-HMX 巴西试验与单轴拉伸试验结果相近。

(2) 测试了 3 种 RHT 脆性熔铸炸药力学性能与其单轴拉伸性能进行比较,结果表明两种方法测试结果的高低变化趋势是一致的,圆弧压头巴西试验可用于脆性炸药拉伸性能的间接定量表征。

(3) 采用 t 检验方法对 PBX-HMX 和 3 种 RHT 炸药的巴西试验结果与单轴拉伸试验结果之间的差异进行了分析,检验分析表明这两种方法测试结果还存在一定差异,圆弧巴西试验还不能完全替代拉伸试验。

参考文献:

- [1] Claesson J, Bohlohi B. Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution [J]. *Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, 39: 991 - 1004.
- [2] Wanga Q Z, Jiaa X M, Kou S Q. et al. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results[J]. *Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41: 245 - 253.
- [3] ASTM C496 - 2004, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens[S].
- [4] GB/T 50266 - 1999, 工程岩体试验方法标准[S]. GB/T 50266 - 1999, Standard for test method of engineering rock mass[S].
- [5] Johnson H D. Mechanical properties of LX-10-1 evaluated with the diametric disc test[R]. MHSMP-78-08, 1978.
- [6] Johnson H D. Diametric disc and standard tensile test correlation study[R]. MHSMP-81-22, 1981.
- [7] CHEN Peng-wan, HUANG Feng-lei, DING Yan-sheng. Micro-structure, deformation and failure of polymer bonded explosives [J]. *Material Science*, 2007, 42: 5272 - 5280.
- [8] 陈鹏万, 黄风雷, 张瑜, 等. 用巴西实验评价炸药的力学性能 [J]. *兵工学报*, 2001, 22(4): 533 - 537. CHEN Peng-wan, HUANG Feng-lei, ZHENG Yu, et al. Brazilian test and its application in the study of the mechanical properties of explosives[J]. *Acta Armamentari*, 2001, 22(4): 533 -

- 537.
- [9] 宋华杰, 郝莹, 董海山, 等. 用直径圆盘试验评价小样品塑料粘结炸药拉伸性能的初步研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 35-40.
SONG Hua-jie, HAO Ying, DONG Hai-shan, et al. A preliminary evaluation of tensile properties of small plastic bonded explosive sample by diametric disc test[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(1): 35-40.
- [10] 庞海燕, 李明, 温茂萍, 等. PBX 巴西试验与直接拉伸试验的比较[J]. 火炸药学报, 2011, 34(1): 42-58.
PANG Hai-yan, LI Ming, WEN Mao-ping, et al. Comparison on the brazilian test and tension test of the PBX[J]. *Explosives & Propellants*, 2011, 4(1): 42-58.
- [11] 庞海燕, 李明, 温茂萍, 等. 不同加载形式的 PBX 炸药巴西试验[J]. 含能材料, 2012, 20(2): 205-209.
PANG Hai-yan, LI Ming, WEN Mao-ping, et al. Different load methods in brazilian test for PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*. 2012, 20(2): 205-209.
- [12] CHENG Liu, Darla G. Thompsonz, Manuel L. Lovatoy, et al. Macroscopic Crack Formation and Extension in Pristine and Artificially Aged PBX 9501 [C] // Proc. 14th int. detonation symposium, 2010, Coeurd'Alene, USA.

Tensile Mechanical Properties of Brittle Explosives Evaluated by Arc Compress Head Brazilian Test

WEN Mao-ping, TANG Wei, ZHOU Xiao-yu, PANG Hai-yan, ZHU Feng-yun

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Tensile mechanical properties of HMX based brittle explosives were investigated by Brazilian test with arc compress head and LVDT, and the difference between the results of the Brazilian test and single-axis tensile test was also analyzed by the *t* check method. For the brittle PBX-HMX, results show that PBX-HMX's break strength and break strain tested by arc compress head Brazilian test are very close to that of the single-axis tensile method when the radius ratio of sample to the arc compress head is 1 : 1.35. Then, mechanical properties of three kinds of casting explosive were obtained at ratio of 1 : 1.35 by arc compress head Brazilian. The mechanical properties of casting explosive tested by two methods show the same trend and are very close too. So the arc compress head Brazilian test can be used to determinate the tensile mechanical properties of PBX. However, the *t* check analysis shows that there are still some differences between the two methods, the arc compress head Brazilian test can not replace tensile method completely.

Key words: solid mechanical; explosive; Brazilian test; single-axis tensile test; mechanical property

CLC number: TJ7; O34

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.017