

文章编号:1006-9941(2020)04-0352-06

## 液压致裂法在PBX炸药拉伸强度测试中的适用性

颜学坚<sup>1,2</sup>,唐维<sup>2</sup>,袁洪魏<sup>2</sup>,赵龙<sup>2</sup>,孙杰<sup>2</sup>,常双君<sup>1</sup>

(1. 中北大学环境与安全工程学院, 山西太原 030051; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川绵阳 621999)

**摘要:** 为解决高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX)拉伸强度测试中哑铃直拉法(GJB772A-1997)测试效率不高以及巴西试验测试精度欠佳的问题,基于液压致裂原理自主搭建了测试平台,发展了拉伸强度液压致裂测试方法,实现了PBX炸药的拉伸强度的准确测试。为验证该测试方法的有效性,以某PBX模拟材料哑铃试样为研究对象,在同一发试样中先后进行了标准直拉法和液压致裂法拉伸强度测试实验,并将测试结果进行对比。结果表明,液压致裂法测得的拉伸强度((9.49±0.24) MPa)与直拉法测得的拉伸强度((9.24±0.43) MPa)相对误差仅为2.70%,具有很好的测试精度。液压致裂法可在单发哑铃的残样上获得至少四个有效的拉伸强度数据,相较于直拉法具有测试用量少、测试效率高的特点,且测试稳定性良好,表明该测试方法兼具了哑铃直拉法的高精度和巴西试验的低用量高效率,同时可作为一种原位测试手段广泛运用于配方研制以及结构件不同位置的拉伸强度测试。

**关键词:** 高聚物粘结炸药(PBX);拉伸强度;直拉法;液压致裂法;原位测试

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019281

### 1 引言

高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX)是由单质炸药、黏结剂、增塑剂和钝感剂等组成的混合炸药,且常以构件的形式应用于各类武器的战斗部中<sup>[1-3]</sup>。炸药构件在使用过程中需要满足能量与强度要求,拉伸强度作为材料力学性能指标之一<sup>[4-7]</sup>,其准确测试对炸药构件的设计与评估非常重要。

目前,国内外应用于炸药领域的拉伸强度测试方法主要有直接拉伸法和间接拉伸法。直接拉伸法(简称直拉法, GJB772A-1997)<sup>[8]</sup>,试验前需要将材料压制成一定尺寸的毛坯件,进而加工成哑铃状试样,制样工序多、周期长、材料利用率低,而且试样装夹中容易出现偏心而影响实验结果。为了解决这些问题,以巴

西试验为代表的间接拉伸法应运而生<sup>[9]</sup>。巴西试验具有制样简单、操作简便、试样用料少等特点,可快速评价炸药的拉伸强度,因此在炸药配方研制阶段被广泛应用。目前测试炸药拉伸强度的巴西试验主要有三种形式,即传统巴西试验、圆弧巴西试验<sup>[10]</sup>和橡胶垫巴西试验<sup>[11]</sup>。传统巴西试验的误差较大(高达65%)<sup>[12]</sup>,并且试样上下两端受集中力作用,易破碎。圆弧巴西试验和橡胶垫巴西试验由于改变了圆盘试样上下两端受力,避免了应力集中引起的试样破碎<sup>[13]</sup>,但这两种改进的巴西试验依旧使用了传统的理论公式,缺乏严谨的理论基础。到目前为止,仍然缺少一种测试效率高、测试精度好的PBX炸药拉伸强度测试方法。

此外,不管是针对炸药配方的研制还是结构件不同位置的测量,都急需发展一种原位的观测方法。传统的直拉法和巴西实验都需要特殊的试样尺寸和试样形貌(如哑铃试样),制样过程工序复杂,且取样还会破坏试样在构件原始位置的应力应变状态,从而影响测试结果的有效性。

液压致裂又叫水压致裂,最早于1957年由Hubbert和Willis提出<sup>[14]</sup>,常用于油气资源开采<sup>[15]</sup>、地应力测量<sup>[16-17]</sup>。其作用机理是通过向地下钻孔注入高压液体直至岩体破裂,使储油层中油气沿裂缝渗出,由液体

收稿日期: 2019-11-06; 修回日期: 2020-01-18

网络出版日期: 2020-02-27

作者简介: 颜学坚(1994-),男,硕士研究生,主要从事炸药力学性能研究。e-mail: yanxj0838@foxmail.com

通信联系人: 唐维(1981-),男,高级工程师,主要从事炸药力学性能研究。e-mail: tangwei@caep.cn

常双君(1968-),女,教授,主要从事含能材料设计及应用研究。e-mail: junchsh@163.com

引用本文: 颜学坚,唐维,袁洪魏,等. 液压致裂法在PBX炸药拉伸强度测试中的适用性[J]. 含能材料, 2020, 28(4):352-357.

YAN Xue-jian, TANG Wei, YUAN Hong-wei, et al. Applicability of Hydraulic Fracturing Method in Tensile Strength Test of Polymer Bonded Explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(4):352-357.

压力与岩体应力的力学关系实现地应力的测量。本研究首次将液压致裂原理应用于 PBX 炸药拉伸强度测试,搭建了 PBX 炸药液压致裂测试平台,开展液压致裂法与哑铃直拉法的对比测试,验证液压致裂法测试 PBX 拉伸强度的可行性与测试精度。

## 2 实验部分

### 2.1 实验原理

液压致裂时,压力作用在小孔内,当致裂的弹性体尺寸与孔口尺寸之比较大时,可近似看作受内压作用的无限大厚壁圆筒。由弹性力学可知,含有圆孔的无限大弹性体,孔半径为  $a$ ,且受压力  $p$  均匀作用(如图 1),则圆孔附近的应力状态为<sup>[18]</sup>:

$$\sigma_r = -\frac{a^2}{r^2} p \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2}{r^2} p \quad (2)$$

式中,  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  分别为径向应力和切向应力,MPa;  $p$  为孔内压力,MPa;  $a$  为小孔半径,mm;  $r$  为任意点到圆心的距离,且  $r \geq a$ ,mm。

由式(1)、(2)可知,  $\sigma_r$  为压应力(负值),  $\sigma_\theta$  为拉应力(正值)。当  $r=a$  时(即孔壁处),  $\sigma_r$  达到最大压应力,  $\sigma_\theta$  达到最大拉应力,此时有:

$$(\sigma_r)_{r=a} = -p \quad (3)$$

$$(\sigma_\theta)_{r=a} = p \quad (4)$$

由于脆性材料的拉伸强度小于压缩强度,当内压不断增加时,孔壁切向应力率先达到材料的拉伸强度,此时孔壁将出现破裂,有:

$$(\sigma_\theta)_{r=a} = \sigma_t = p_b \quad (5)$$

式中,  $\sigma_t$  为材料的拉伸强度,MPa;  $p_b$  为破裂压力,MPa。

通过测量破裂压力就可确定材料的拉伸强度,破裂时裂纹将在孔壁薄弱处随机出现。分析此时破裂处的应力状态可知,该方法的应力状态( $\sigma_3=-\sigma_1, \sigma_2 \approx 0$ )与单轴拉伸时的应力状态( $\sigma_1=\sigma_t, \sigma_2=\sigma_3=0$ )略有差异,但比巴西试验( $\sigma_3=-3\sigma_1, \sigma_2=0$ )更接近单轴拉伸应力状态(如图 2)<sup>[19]</sup>。

由圣维南原理可知<sup>[18]</sup>,在孔边较远处,内压引起的应力场将显著减小,为此测试试样尺寸仅需要满足“小孔口问题”的两个条件,即孔口尺寸远小于试样尺寸且孔边距试样边界较远。在工程应用中,通常将构

件尺寸与孔口尺寸之比大于 6 的物体定义为无限大体<sup>[20]</sup>。本研究所用哑铃试样的圆柱部直径 15 mm,小孔孔径 1.2 mm,当试样进行致裂时,液压作用在钻孔内一段 5 mm 长的区域内(试样致裂段),如图 3 所示。本研究试样致裂段所在的试样尺寸均大于 10 倍孔口尺寸,符合无限大体假设。通过厚壁圆筒理论分析该假设的相对误差小于 2%,满足工程应用的需求。

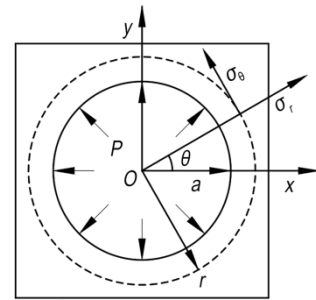


图 1 无限大带孔平面受内压作用示意图

Fig.1 Schematic diagram of the infinite plane with a hole subjected to internal pressure

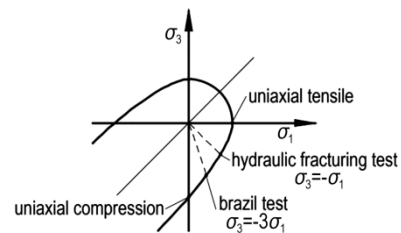


图 2 准脆性材料破坏强度包络线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the failure envelope for quasi-brittle materials

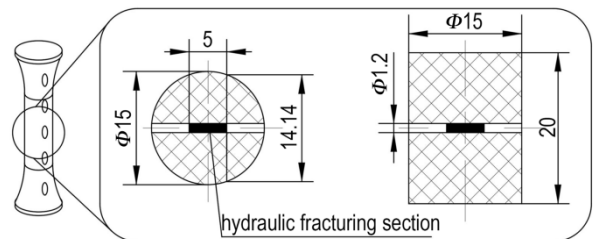


图 3 致裂段位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the hydraulic fracturing section

### 2.2 平台构成与实验方法

PBX 炸药液压致裂测试平台主要由软件部分和硬件部分组成,软件部分即液压致裂加载控制软件,硬件部分包括控制器、液压加载缸、压力传感器、致裂针管和液压管路等组成(如图 4),鉴于目前 PBX 炸药拉伸强度不超过 15 MPa,本试验平台的设计最大加载压力 15 MPa,测试精度为 0.5%FS。

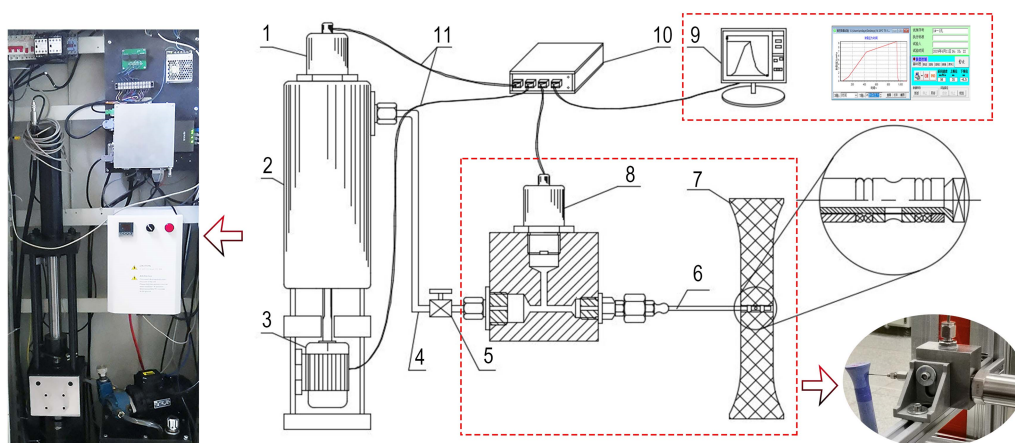


图4 PBX 液压致裂测试平台结构示意图

1—系统压力传感器,2—液压加载缸,3—伺服电机,4—液压管路,5—液压阀,6—致裂针管,7—试样,8—致裂压力传感器,9—电脑,10—控制器,11—线缆

Fig. 4 Schematic diagram of the hydraulic fracturing test platform for PBX

1—system pressure sensor,2—hydraulic loading cylinder,3—servo motor,4—pipeline,5—hydraulic valve,6—fracture tube,7—sample,8—cracking pressure sensor,9—computer,10—controller,11—cable

实验中,首先将制孔完成的试样安装在致裂针管上,利用针管上的密封结构对孔进行密封;然后通过控制程序控制伺服电机作动,管路压力由压力传感器检测,反馈至控制程序,压力经致裂针管传递至试样,根据液压原理,当压力增大到材料的拉伸强度时,孔壁发生破裂,根据控制软件中压力-时间曲线即可确定材料的拉伸强度。

### 2.3 实验过程

实验以某PBX模拟材料为研究对象,实验样品为随机选取的哑铃试样三发(1#、2#、3#),采用哑铃试样旨在通过标准直拉法和液压致裂法的对比测试,分析液压致裂法测试PBX拉伸强度的可行性和测试精度。试样由中国工程物理研究院化工材料研究所提供,测试过程假定试样无初始内应力,具体过程如下:

① 标准直拉法测试。实验温度 25 °C,按照 GJB772A-1997 方法 413.1 执行。

② 哑铃残样通孔制备。钻头直径 1.2 mm,每发试样制通孔 5 个,依据圣维南原理<sup>[18]</sup>,孔的位置设计为 1、5 孔离试样端部 10 mm,2、3、4 孔间隔 15 mm。

③ 液压致裂法测试。试样装配完成后,综合考虑测试效率和测试的要求,加载过程分三个阶段:加载区间 0~1 MPa,加载速率 0.01 MPa·s<sup>-1</sup>;加载区间 1~7 MPa,加载速率 0.02 MPa·s<sup>-1</sup>;加载区间 7 MPa~破裂,加载速率 0.005 MPa·s<sup>-1</sup>。

## 3 结果与讨论

实验过程中致裂压力曲线如图 5 所示,通过实验曲线可知,试样破裂后压力迅速衰减。不同阶段的试样形貌如图 6 所示,图 6b 为液压致裂后的试样形貌。

### 3.1 测试稳定性分析

由于材料微观结构的分散性等原因,拉伸强度在不同试样间以及试样的不同位置处存在一定的分散性。测试结果的分散程度在体现材料分散性的同时也反映了实验方法的稳定性(可重复性),通过对比单发试样的测试结果可以有效评估液压致裂法的测试稳定性。

表 1 为采用液压致裂法测得的 PBX 模拟材料拉伸强度实验结果,三发试样中试样 1# 的分散性最小(其标准差为 0.16 MPa),试样 3# 的分散性较大(其标准差为 0.46 MPa),经计算可得,液压致裂法测得的拉伸强度离散系数为 4.06%,与标准直拉法的离散系数 4.70% 相当,表明液压致裂法在拉伸强度测试中具有良好的测试稳定性。

### 3.2 测试精度分析

采用直拉法测试时,测得的拉伸强度是整支试样最薄弱处的强度值,即最小拉伸强度。液压致裂法由于在试样中多点取样,其值反映的是整支试样不同位置处的强度水平,均值代表试样平均强度,略高于直拉法测得的拉伸强度值。



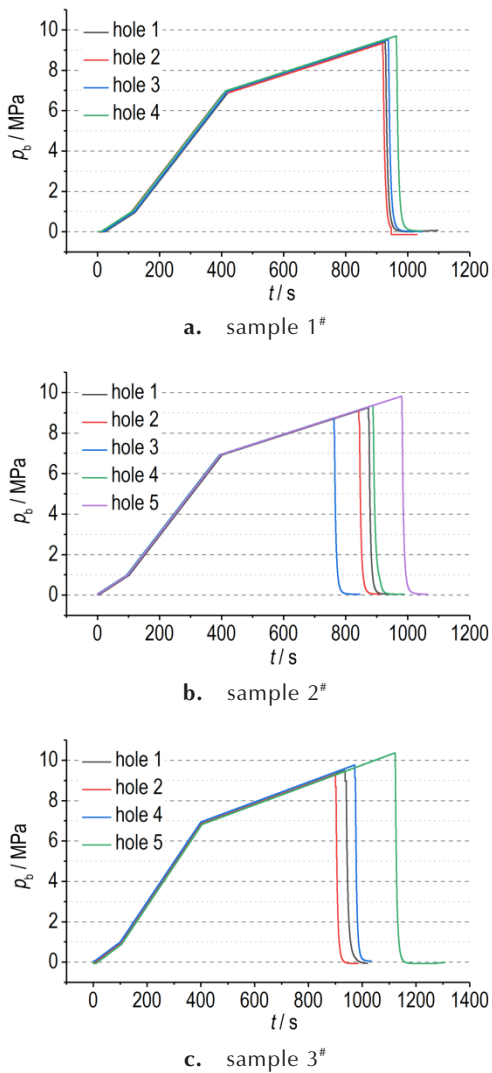


图5 液压致裂实验压力曲线  
Fig. 5 Pressure curves of hydraulic fracturing tests

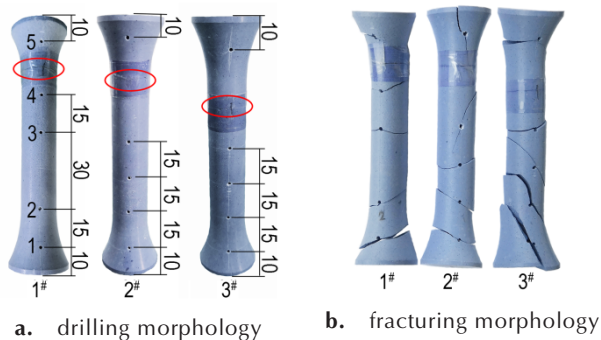


图6 不同实验阶段试样形貌照片  
Fig. 6 Photographs of sample morphology at different test stages

表1 液压致裂法测得的拉伸强度

Table 1 Tensile strength measured through hydraulic fracturing method

No.	1#	2#	3#
hole 1	9.41	9.25	9.49
hole 2	9.34	9.14	9.30
hole 3	9.52	8.75	fail
hole 4	9.70	9.36	9.75
hole 5	fail	9.81	10.36
mean value / MPa	9.49	9.26	9.73
standard deviation / MPa	0.16	0.38	0.46

图7为两种方法得到的拉伸强度测试结果,直拉法测得的强度分别为9.72,8.88,9.11 MPa,液压致裂法测得的强度均值分别为9.49,9.26,9.73 MPa,相对误差分别为2.37%、4.28%和6.80%。进一步计算可知,直拉法得出的该材料拉伸强度为(9.24±0.43) MPa,液压致裂法为(9.49±0.24) MPa,二者相对误差为2.70%,可以认为液压致裂法精度较好。

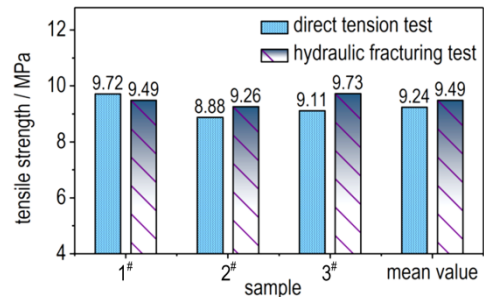


图7 试样拉伸强度的直拉法和液压致裂法测试结果  
Fig. 7 Tensile strength of the samples by the direct tension test and the hydraulic fracturing test

综上所述,液压致裂法的测试结果与标准直拉法接近,测试精度优于巴西试验,是一种具有前景的测试方法,尤其在前期配方的研制过程中,能够快速、准确、有效地评估PBX炸药及其模拟材料的拉伸强度。

#### 4 结论

本研究提出并研究了基于液压致裂原理的PBX炸药拉伸强度测试方法。通过自主研制的PBX液压致裂测试平台,实现了某PBX模拟材料的拉伸强度测试,并与标准直拉法进行了对比,结论如下:

(1) 液压致裂法试样用量少,同一发哑铃试样可实现5个不同位置拉伸强度的有效测试,三发哑铃试样测得的拉伸强度均值分别为9.49,9.26,9.73 MPa,标准差分别为0.16,0.38,0.46 MPa,测试稳定性好。

(2) 采用液压致裂法测得的PBX模拟材料拉伸强度为 $(9.49 \pm 0.24)$  MPa,相较于标准直拉法的测试结果 $(9.24 \pm 0.43)$  MPa,相对误差均值仅2.70%,满足实验和工程需要。

(3) 液压致裂法理论上对试样的尺寸形貌无特殊要求,可用于PBX配方研制中拉伸强度的快速评价,也可用于炸药结构件不同位置的拉伸强度原位测试。

#### 参考文献:

- [1] 郑世宗. 浇铸PBX炸药在战斗部中的应用[J]. 兵工学报, 1990(3):70-76.  
ZHENG Shi-zong. Application of casting PBX explosives in war-head[J]. *Acta Armamentarii*, 1990(3):70-76.
- [2] 吴凯,刘玉存,刘仕瑞.PBX炸药概述及其发展与前景[J]. 山西化工, 2012, 32(2):36-39.  
WU Kai, LIU Yu-cun, LIU Shi-ru. Overview and trends of PBX explosives[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2012, 32(2):36-39.
- [3] 李媛媛,高立龙. 国外浇注高聚物粘结炸药在大中口径炮弹中的应用[J]. 飞航导弹, 2016(2):80-83.  
LI Yuan-yuan, GAO Ying-long. Application of foreign casting polymer bonded explosives in large and medium caliber cannonball[J]. *Winged Missiles Journal*, 2016(2):80-83.
- [4] K. Ellis K, Leppard C, Radesk H. Mechanical properties and damage evaluation of a UK PBX[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40(23):6241-6248.
- [5] Thompson D G, Wright W J. Mechanical properties from PBX 9501 pressing study [C] // Shock Compression of Condensed Matter-2003: Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. AIP Publishing, 2004, 706(1):503-506.
- [6] 李尚昆,黄西成,王鹏飞. 高聚物黏结炸药的力学性能研究进展[J]. 火炸药学报, 2016, 39(4):1-11.  
LI Shang-kun, HUANG Xi-cheng, WANG Peng-fei. Recent advances in the investigation on mechanical properties of PBX[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(4):1-11.
- [7] 袁洪魏,赵龙,董天宝,等. TATB基PBX在不同围压下的Boltzmann-P本构模型及其数值计算方法[J]. 工程力学, 2019, 36(5):19-27.  
YAUN Hong-wei, ZHAO Long, DONG Tian-bao, et al. Boltzmann-P model for the mechanical constitutive behavior of TATB-based PBX under confined compression[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(5):19-27.
- [8] 国防科学技术工业委员会. GJB 772A-1997: 中华人民共和国国家军用标准炸药实验方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版社, 1997.  
National Defense Science and Technology Industry Committee. GJB 772A-1997: National military standard explosives experimental method of the People's Republic of China[S]. Beijing: National Defense Science and Technology Commission Military Standards Press, 1997.
- [9] 温茂萍,唐维,周筱雨,等. 基于圆弧压头巴西试验测试脆性炸药拉伸性能[J]. 含能材料, 2013, 21(4):490-494.  
WEN Mao-ping, TAN Wei, ZHOU Xiao-yu, et al. Tensile mechanical properties of brittle explosives evaluated by arc compression head Brazilian test[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(4):490-494.
- [10] 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 loading methods in Brazilian test for PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(2):205-209.
- [11] 庞海燕,李明,温茂萍,等. PBX衬垫巴西试验研究[J]. 含能材料, 2012, 20(3):382-383.  
PANG Hai-yan, LI Ming, WEN Mao-ping, et al. The elastic cushion Brazilian test of PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(3):382-383.
- [12] 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):42-44.  
PANG Hai-yan, LI Ming, WEN Mao-ping, et al. Comparison on the Brazilian test and tension test of the PBX[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(1):42-44.
- [13] 戴开达,李生涛,陈鹏万. 基于XFEM的PBX炸药巴西实验断裂行为研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(2):111-117.  
DAI Kai-da, LI Sheng-tao, CHEN Peng-wan. Study on fracture behavior of Brazilian test of PBX explosives based on XFEM[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(2):111-117.
- [14] 刘允芳. 水压致裂法三维地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(3):246-256.  
LIU Yun-fang. Three-dimensional in-situ stress measurement by hydraulic fracturing technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1991, 10(3):246-256.
- [15] 全少凯,高德利. 水力压裂基础研究进展及发展建议[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(1):101-115.  
TONG Shao-kai, GAO De-li. Basic research progress and development suggestions on hydraulic fracturing[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(1):101-115.
- [16] 石森. 我国水压致裂法首次试验喜获成果[J]. 地震, 1981(1):11.  
SHI Miao. The first test of hydraulic fracturing in China[J]. *Earthquake*, 1981(1):11.
- [17] 尤明庆. 水压致裂法测量地应力方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3):350-353.  
YOU Ming-qin. Study on the geo-stresses measurement with hydro-fracture of borehole[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(3):350-353.
- [18] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 23-65.  
XU Zhi-lun. Elastic mechanics[M]. Fourth edition. Beijing: Higher Education Press, 2006: 23-65.
- [19] 俞茂宏,彭一江. 强度理论百年总结[J]. 力学进展, 2004, 34(4):529-560.  
YU Mao-hong, PENG Yi-jiang. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20<sup>th</sup> century[J]. *Advance in Mechanics*, 2004, 34(4):529-560.
- [20] 王启智,宋小林. 拉伸正交各向异性有限宽板偏心圆孔的应力集中系数表达式[J]. 复合材料学报, 2003, 20(6):80-86.  
WANG Qi-zhi, SONG Xiao-lin. Expressions of stress concentration factors for an eccentric circular hole in a tension orthotropic finite-width strip[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(6):80-86.

## Applicability of Hydraulic Fracturing Method in Tensile Strength Test of Polymer Bonded Explosives

YAN Xue-jian<sup>1,2</sup>, TANG Wei<sup>2</sup>, YUAN Hong-wei<sup>2</sup>, ZHAO Long<sup>2</sup>, SUN Jie<sup>2</sup>, CHANG Shuang-jun<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of low efficiency (direct tension test method (GJB772A-1997)) and poor test accuracy (indirect Brazilian test method) in traditional tensile strength testing of polymer bonded explosive (PBX), we independently established a test platform based on the hydraulic fracturing method (HFM), developed a novel test method of PBX tensile strength, and achieved accurate testing of PBX tensile strength. To further verify the validity of the test method, the tensile strength of the same PBX dumbbell samples was obtained through direct tension test method and HFM, and the test results were compared. It showed that the relative error between the tensile strength by HFM ( $(9.49 \pm 0.24)$  MPa) and the tensile strength by direct tension test method ( $(9.24 \pm 0.43)$  MPa) was only 2.70%, showing the high accuracy. Moreover, the HFM can obtain at least four effective tensile strength data on the single dumbbell remnant samples. Compared with the direct tension test method, HFM has the characteristics of less material consumption, high efficiency, and good stability for PBX tensile strength testing. It indicates that the HFM has the advantages of the high accuracy in the direct tension method and high efficiency in the Brazilian test. Therefore, HFM can be widely applied in the in-situ test method for formulation development and tensile strength test of different positions of PBX structural components.

**Key words:** polymer bonded explosive (PBX); tensile strength; direct tension test; hydraulic fracturing method; in-situ test

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019281

(责编:高毅)