

文章编号:1006-9941(2023)05-0440-08

准静态加载下 HMX 基 PBX 断裂行为的温度效应

董天宝,袁洪魏,文乾乾,庞海燕,赵龙,李云欣

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 为了研究温度对准静态加载下奥克托今(HMX)基高聚物黏结炸药(PBX)断裂行为的影响规律,利用半圆盘弯曲(Semi-circular Bending, SCB)准静态断裂试验,采用数字图像相关法(Digital Image Correlation Method, DICM)和基于裂纹扩展计(Crack Propagation Gauge, CPG)的裂纹扩展速率测试系统,研究了25,35,45,55,60℃和65℃下HMX基PBX的断裂特征、断裂阻力、损伤容限和裂纹失稳扩展速率。结果表明,随着温度升高,HMX基PBX断裂特征从脆性断裂逐渐转变为韧性断裂,表征裂纹起裂阻力的断裂韧度显著降低,损伤容限有一定的增强。半圆盘准静态弯曲脆性断裂条件下,裂纹失稳扩展速率在扩展路径上呈现出慢-快-慢的规律,最高速率约 $370\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,温度升高导致裂纹失稳扩展速率有一定程度的降低。

关键词: 高聚物黏结炸药(PBX);断裂行为;温度效应;损伤容限;数字图像相关法

中图分类号:TJ55;O346.1

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2022249

0 引言

高聚物黏结炸药(Polymer Bonded Explosives, PBX)是一类炸药晶体高体积填充高聚物的颗粒填充复合材料,作为武器系统中的核心结构,PBX既要具备高质量的爆轰性能,也要具备一定的承载能力。PBX材料断裂行为研究,受到国内外研究机构的持续关注^[1-5]。

国内外研究者一般通过弯曲断裂试验研究PBX断裂行为,试样多为长方体和半圆盘2种形状。利用长方体试样的三点弯曲准静态断裂试验确定PBX断裂韧度时,文献[6-7]采用“95%斜率法”确定临界起裂载荷,文献[8]认为加载曲线载荷最大值为临界起裂载荷,受限于断裂行为的表征技术,临界起裂载荷确定方法存在较大分歧。国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)推荐的半

圆盘弯曲断裂试验^[9],认为对于岩石类脆性断裂材料,临界起裂载荷即是加载曲线载荷最大值,半圆盘弯曲断裂试验被越来越多的研究者用于表征PBX类材料的断裂行为^[10-14]。即使对于一些韧性断裂行为明显的PBX,亦采用载荷最大值作为半圆盘弯曲断裂的临界起裂载荷,用以表征PBX材料断裂韧度^[14]。数字图像相关法作为一种全场变形监测技术,被广泛应用于PBX裂纹萌生起裂扩展行为观测^[15-20]。文献[21]在研究长方体试样断裂行为过程中,也采用数字图像相关法(DICM)给出了准确的临界起裂载荷。

文献[22]给出HMX基PBX室温下拉伸强度约6.50 MPa,拉伸破坏应变约0.065%,拉伸力学行为呈现出明显的弹脆性。脆性材料裂纹失稳扩展速率非常快,通常约为几十甚至几百米每秒。刘晨等^[11]采用高速摄影技术,以90000幅频的采样率观测半圆盘PBX裂纹扩展过程,但还是无法有效识别裂纹扩展过程,难以定量给出裂纹扩展速率。文献[23-24]针对岩石动态脆性断裂条件下的高速裂纹扩展,搭建了基于裂纹扩展计的裂纹扩展速率测试系统,有效表征了岩石材料动态裂纹扩展全过程的速率,为起裂和止裂韧度的表征提供了关键的测试数据。然而,在炸药准静态和动态加载下的高速脆断行为研究领域,公开发表文献中尚未见该方法的应用,裂纹高速扩展全过程速率数

收稿日期:2022-10-09;修回日期:2023-02-11

网络出版日期:2023-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助(12002322,12002323)

作者简介:董天宝(1989-),男,工程师,主要从事炸药力学性能研究。e-mail:dongtianbao@caep.cn

通信联系人:文乾乾(1990-),男,工程师,主要从事炸药力学性能研究。e-mail:wenqq@caep.cn

引用本文:董天宝,袁洪魏,文乾乾,等.准静态加载下HMX基PBX断裂行为的温度效应[J].含能材料,2023,31(5):440-447.

DONG Tian-bao, YUAN Hong-wei, WEN Qian-qian, et al. Temperature Effects on the Fracture Behavior of HMX-Based PBX Under Quasi-Static Loading[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(5):440-447.

据存在较大缺失。

为此,本研究采用数字图像相关法研究 HMX 基 PBX 裂纹失稳扩展前的起裂过程,确定 HMX 基 PBX 半圆盘弯曲断裂的临界起裂载荷和断裂行为规律。参考岩石脆断裂纹扩展速率测试方法,搭建基于裂纹扩展计的裂纹扩展速率测试系统,表征 HMX 基 PBX 半圆盘准静态弯曲断裂过程中裂纹失稳扩展速率。通过开展不同温度下半圆盘弯曲断裂试验,结合上述数字图像相关法和裂纹扩展速率测试系统,研究温度对 HMX 基 PBX 断裂特征、断裂阻力、损伤容限和裂纹失稳扩展速率的影响规律。研究成果可为 PBX 断裂行为表征提供试验方法借鉴,也可为 PBX 断裂行为的数值模拟提供材料参数和校准模型。

1 试验部分

1.1 试验样品

研究使用的奥克托今(HMX)基 PBX,黏结剂为 F2311,通过对炸药晶体和黏结剂组成的造型粉颗粒高温等静压压制成型,经过进一步机械加工得到含预制裂纹的半圆盘弯曲(SCB)试验样品,由中国工程物理研究院化工材料研究所提供。参考国际岩石力学学会推荐的试验样品尺寸要求,设计半圆盘弯曲试样半径 $R=16\text{ mm}$ 和厚度 $B=12\text{ mm}$ 。预制裂纹长度 $a_L=5\text{ mm}$ 和宽度 $a_W=0.3\text{ mm}$,支撑点跨距 $S=24\text{ mm}$,如图 1 所示。

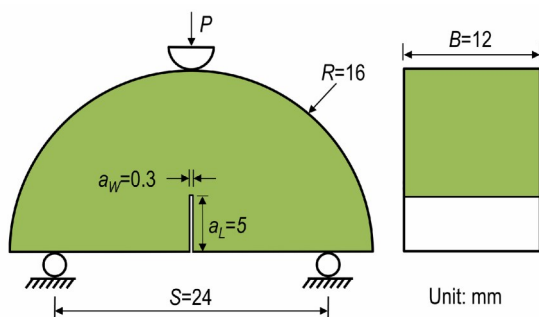


图 1 半圆盘试样尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of SCB specimen size

1.2 加载条件

利用材料试验机对 SCB 试样进行准静态加载,采用位移控制模式,加载速率为 $0.1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。准静态断裂试验温度为 $25, 35, 45, 55, 60\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $65\text{ }^\circ\text{C}$,采用温度箱控温,控温精度为 $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$,每个温度点下开展不少于 5 发试样的半圆盘弯曲断裂试验。试验样品和加载工装如图 2 所示。

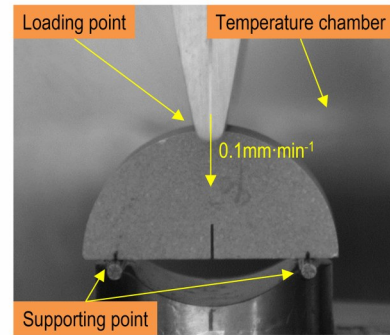


图 2 半圆盘试样及加载实物图

Fig.2 Schematic diagram of SCB specimen and loading condition

1.3 断裂韧度计算方法

国际岩石力学学会推荐的半圆盘弯曲断裂试验断裂韧度 K_{IC} 计算公式为^[9]:

$$K_{IC} = Y \frac{P_{\max} \sqrt{\pi a}}{2RB} \quad (1)$$

式中, P_{\max} 为加载曲线中载荷最大值, N; R 和 B 分别为半圆盘试样的半径和厚度, m; a 为预制裂纹长度, m。 Y 表示无量纲的几何形状因子:

$$Y = -1.297 + 9.516(S/2R) - (0.47 + 16.457(S/2R))\beta + (1.071 + 34.401(S/2R))\beta^2 \quad (2)$$

式中, S 为支撑点跨距, m; $\beta = a_L/R$ 。

1.4 数字图像相关法

本研究利用数字图像相关法(DICM)观测 $25\text{ }^\circ\text{C}$ (室温)下半圆盘试样准静态加载至断裂的全场变形云图。在 SCB 试样一侧表面喷漆制作哑光白底黑点散斑,使用工业 CCD 相机记录加载至断裂全过程的数字图像,图像采集频率为 10 Hz 。使用数字图像相关分析软件,通过分析不同加载时刻图像与参考图像灰度值的差别,计算输出全场变形云图数据。DIC 全场变形测试系统更多信息详见参考文献^[25-28]。

1.5 裂纹扩展速率测试系统

基于裂纹扩展计(CPG)搭建的裂纹扩展速率测试系统,由裂纹扩展计、惠斯通电桥、信号放大器以及数字示波器组成,如图 3 所示。惠斯通电桥(1/4 桥)桥路电压为 2 V ,信号放大倍数为 100 倍,桥臂电阻为 $120\text{ }\Omega$ 。本研究将裂纹扩展计粘贴在裂纹扩展路径上,试样发生断裂时,采用数字示波器采集裂纹扩展计栅丝断裂过程中的电压信号,获取裂纹扩展单位栅格(栅丝间距 1 mm)所需要的时间 Δt ,据此推算 PBX 炸药裂纹失稳扩展速率。用于测试裂纹扩展速率的贴有裂纹扩展计的半圆试样实物图如图 4 所示,第一根栅

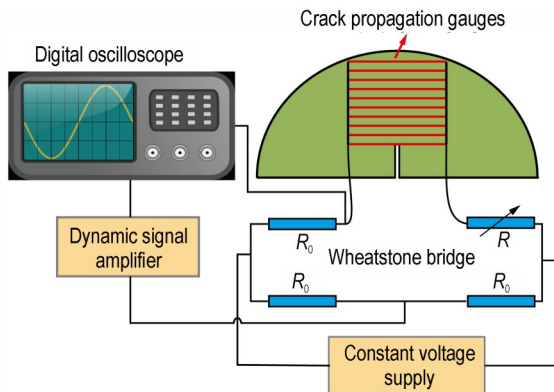


图3 裂纹扩展速率测试系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of crack propagation rate testing system

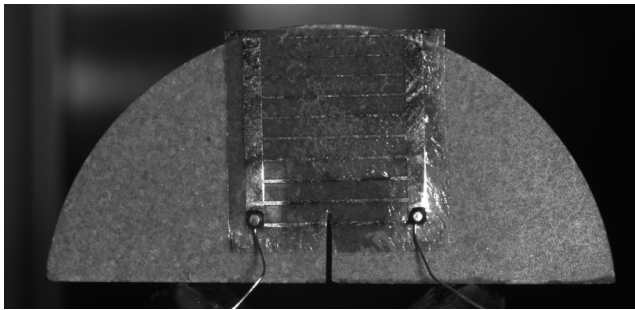


图4 贴有裂纹扩展计的半圆盘试样

Fig.4 SCB specimen attached with crack propagation gauge

格与裂纹前沿对齐,同时为保证裂纹扩展计起裂顺利,在第一根栅丝前的预制了小缺口,避免裂纹扩展计的断裂滞后于试样的裂纹扩展。

2 结果与讨论

2.1 加载曲线

为研究不同温度下的PBX的断裂行为,利用材料

试验机对不同温度下SCB试样进行了载荷加载实验,其载荷-时间曲线如图5所示。由图5可以看出,25, 35, 45 °C和55 °C下,曲线呈现出脆性断裂试验的载荷加载特征,即载荷达到最大值之前一直增大,且载荷增长速率未有明显放缓,而在载荷达到最大值后,试样发生瞬时起裂并失稳扩展;60 °C和65 °C下,加载曲线呈现出韧性断裂特征,即载荷达到最大值之前,载荷增长速率显著放缓,载荷达到最大值后,试样仍具有承载能力,载荷缓慢下降阶段伴随着裂纹的缓慢扩展。

本研究使用的HMX基PBX在超过60 °C后出现了明显的软化现象,其中炸药晶体在25~65 °C范围内物理力学性能是稳定的,这种材料软化现象主要是由于黏结剂F2311性能转变导致的。文献[22]给出了黏结剂F2311在动态热机械分析下储存模量随温度的变化曲线,在60 °C附近,黏结剂F2311发生了从橡胶态到粘流态的转变,导致PBX的断裂模式发生了从脆性断裂转变为韧性断裂。

图6为材料软化点温度附近(55, 60 °C和65 °C)半圆盘试样断裂后的断面形貌,55 °C下脆性断裂形成

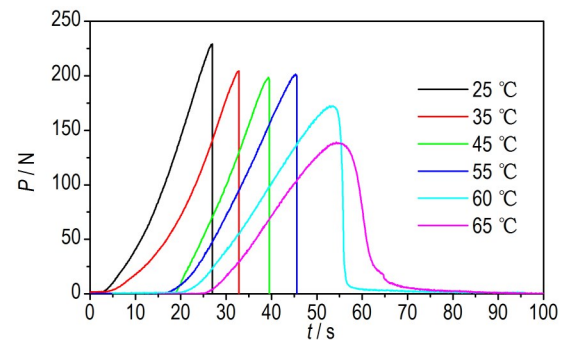
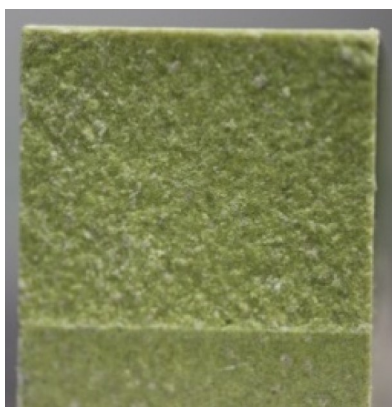
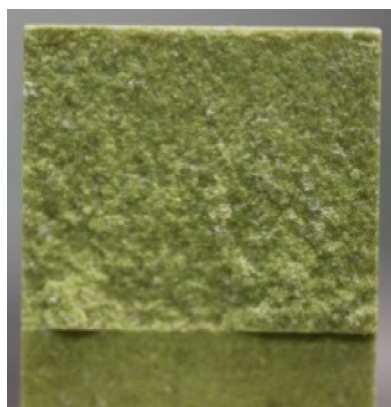


图5 不同温度下的典型载荷-时间曲线

Fig.5 Typical loading-time curves at different temperatures



a. 55 °C



b. 60 °C



c. 65 °C

图6 典型温度下的断面形貌

Fig.6 Fracture morphology at typical temperature

的断面形貌较为平整,60 °C和65 °C下韧性断裂形成的断面形貌相对粗糙很多。PBX是由黏结剂包覆炸药晶体的造型粉颗粒聚集体压制而成的,高温下HMX基PBX材料软化,裂纹更多倾向于从造型粉颗粒的界面穿过,造成更加粗糙的断面形貌。断面形貌与温度的相关性可为PBX结构在温度变化条件下破坏断面分析提供依据。

2.2 全场变形云图

为了分析SCB试样加载全过程的变形和断裂行为,采用数字图像相关技术,以0.1 s的采样间隔获取了不同时刻的全场变形云图,包括水平方向的位移场和应变场。选取的变形观测时间点对应于载荷加载过程中的各个典型时刻(图7所示的A-F时刻),全场变形云图结果如图8和图9所示。

水平方向位移场云图(图8所示)表明,SCB试样弯曲加载对称,符合半圆盘弯曲试验张开型裂纹的加载特点。水平方向应变场云图(图9所示)表明,弯曲加载过程中,载荷未达到最大值之前(E之前时刻),裂纹尖端区域出现一定程度的损伤。载荷最大值时刻(E

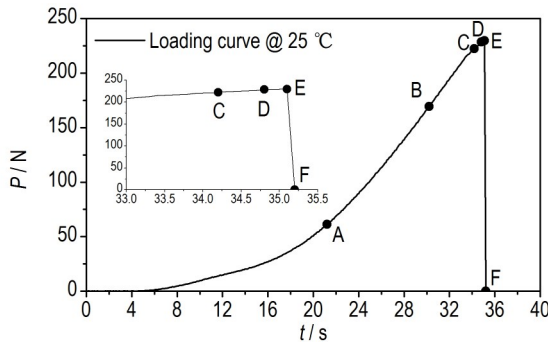


图7 25 °C下载荷-时间曲线(其中A-D为断裂前序时刻,E为起裂时刻,F为起裂后间隔0.1 s时刻)

Fig.7 Loading-time curve at 25 °C (A-D represent pre-fracture times, E represents the crack initiation time, and F is at 0.1 s after crack initiation)

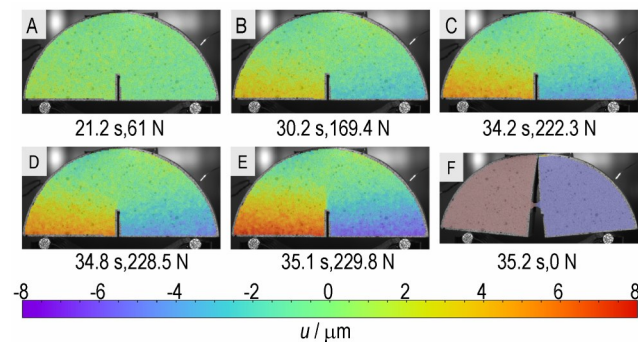


图8 水平方向位移场

Fig.8 Displacement field along the horizontal direction

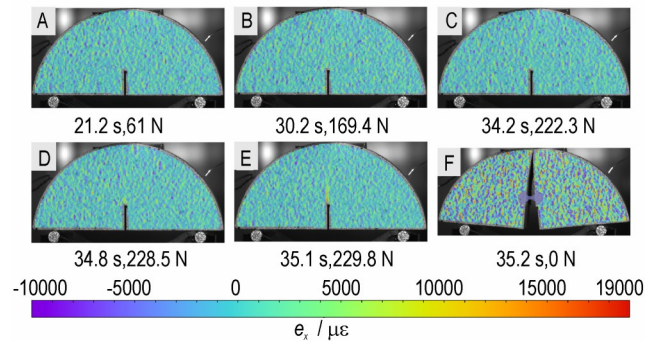


图9 水平方向应变场

Fig.9 Strain field along the horizontal direction

时刻),SCB试样裂纹起裂并在随后0.1 s时间内发生了失稳扩展(E到F时刻),呈现出明显的脆性断裂特征,和2.1节讨论的结果是一致的。也表明起裂发生在载荷最大值时刻,可以认为临界起裂载荷就是加载曲线载荷最大值,可以采用公式(1)计算HMX基PBX的准静态断裂韧度。

2.3 断裂阻力

本研究中的半圆盘弯曲断裂属于典型的I型(张开型)裂纹,其断裂韧度与拉伸力学性能具有一定的相关性。断裂韧度 K_{Ic} 、拉伸强度 σ_t 和弹性模量 E 随着温度的变化如图10所示。由图10可以看出,随着温度的升高,HMX基PBX断裂韧度和拉伸力学性能出现明显下降,断裂韧度与拉伸强度和弹性模量的变化趋势呈现出明显的正相关性。高温下(60 °C和65 °C)断裂韧度的显著下降,是由于PBX材料发生明显软化,承载能力下降导致的。

不同温度下断裂韧度与弹性模量的关系如图11所示。线弹性断裂理论下,断裂韧度 K_{Ic} 、弹性模量 E 和能量释放率 G_{Ic} 关系如下^[29]:

$$G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad (3)$$

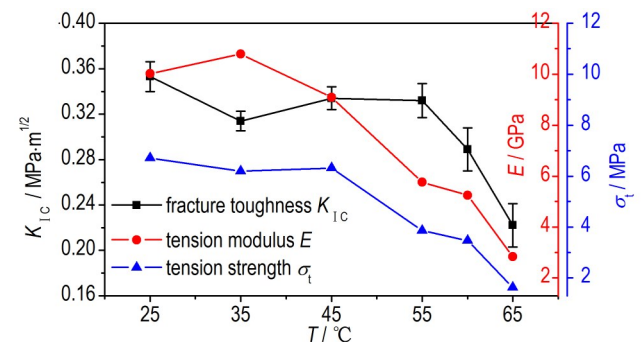


图10 断裂韧度、拉伸强度和弹性模量随温度的变化曲线

Fig.10 Variation of fracture toughness, tensile strength and elastic modulus with temperature

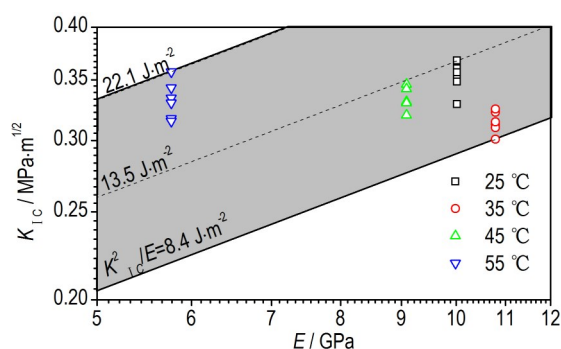


图 11 不同温度下断裂韧性-弹性模量图

Fig.11 Fracture toughness versus elastic modulus at different temperatures

式中, K_{IC} 为断裂韧性, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; E 为弹性模量, GPa 。

图 11 给出了对数坐标下断裂韧性和弹性模量, 可以看出在脆性断裂条件下, 温度接近材料软化温度点 ($60\text{ }^\circ\text{C}$ 左右) 时, $55\text{ }^\circ\text{C}$ 下 HMX 基 PBX 的能量释放率出现了较为明显的增大, 说明此温度下 HMX 基 PBX 尽管断裂行为整体上仍呈现出脆性断裂特征, 但材料已经出现了一定程度的软化。

2.4 损伤容限

损伤容限 (Damage Tolerance) 指的是结构中能够容忍损伤尺寸的临界值^[29-30]。本研究中损伤临界尺寸 (D_c) 指的是当裂纹尺寸趋近于零 ($A \rightarrow 0$) 时, 两倍的裂纹尖端过程区 (Crack Tip Process Zone) 尺寸 ($2r_p$), 如图 12a 所示。值得指出的是, 临界损伤尺寸大小与裂纹尖端应力状态和强度准则选取有一定的影响^[31-32], 本研究选取的是最为经典的第一强度准则^[33]。损伤临界尺寸为:

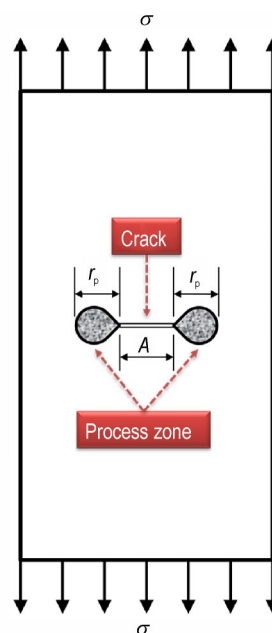
$$D_c = 2r_p = K_{IC}^2 / (\pi\sigma_t^2) \quad (4)$$

式中, r_p 为裂纹尖端过程区尺寸, mm ; K_{IC} 为断裂韧性, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; σ_t 为拉伸强度, MPa 。

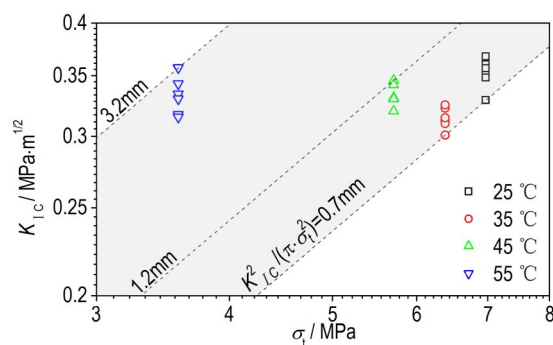
不同温度下断裂韧度与拉伸强度关系如图 12b 所示, 在脆性断裂前提下, 随着温度的升高 ($25\sim 55\text{ }^\circ\text{C}$), 拉伸强度出现了显著减小, 损伤临界尺寸明显增大, 对损伤的容忍程度也更高一些。值得注意的是, 这种损伤容限的增大是以拉伸强度降低为代价的, 研究 PBX 结构使用状态时需要注意温度带来的损伤容限变化。当 PBX 作为承载结构时, 材料研发阶段进行配方筛选过程中, 需要在满足设计强度要求的前提下, 优先筛选断裂韧度大, 损伤容限高的材料。

2.5 裂纹失稳扩展速率

$25\sim 55\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, HMX 基 PBX 呈现出明显的脆性断裂特征, SCB 试样起裂后, 裂纹出现失稳快速扩展。



a. schematic diagram of critical damage dimension



b. fracture toughness versus tensile strength at different temperatures

图 12 不同温度下的断裂韧度-拉伸强度及其损伤容限

Fig.12 Fracture toughness, tensile strength and damage tolerance at different temperatures

从 2.2 节全场变形数据分析可以看出, 在 0.1 s 的时间内完成了约 11 mm 路径上的扩展 (速率大于 $0.11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 无法得到裂纹扩展路径上的速率分布。利用本研究搭建的裂纹扩展速率测试系统, 针对脆性断裂条件, 测试获取扩展路径上裂纹失稳扩展速率, 测试结束后经过裂纹扩展后的试样和典型示波器信号如图 13 所示。从图 13 可以看到, 测试结束后的裂纹扩展片上的栅丝断裂位置和试样的裂纹扩展路径基本重合, 从示波器信号上也可以看到非常明显的信号跳跃现象, 说明裂纹扩展计能够有效的测试裂纹扩展速率。采集到的示波器信号经过数据处理后获得的扩展速率随温度变化情况如图 14 所示。图 14 中不同温度下裂纹扩展速率在扩展路径上均呈现出慢-快-慢的规律, 最高速率

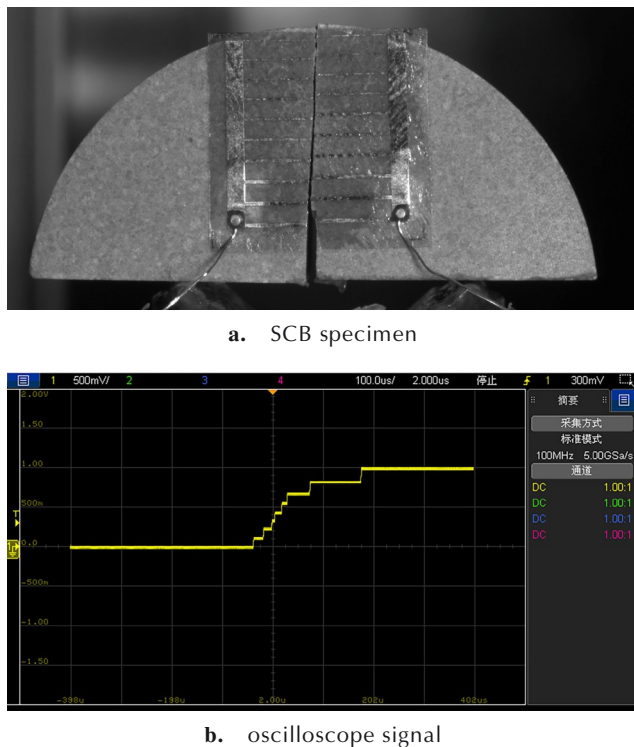


图 13 断裂扩展后的试样和典型示波器信号结果
Fig.13 Specimen after fracture extension and typical oscilloscope signal results

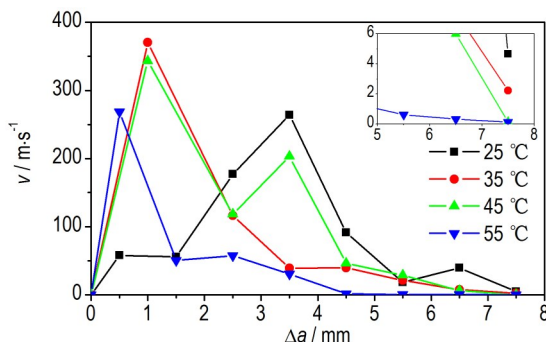


图 14 不同温度下裂纹失稳扩展速率-扩展距离曲线
Fig.14 Crack unstable propagation rate extension distance curve at different temperatures

在 $370 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。随着温度升高, HMX 基 PBX 裂纹扩展速率有一定程度降低, 这种规律在裂纹失稳扩展的后半程更加明显。60 °C 和 65 °C 下, 软化后的 PBX 炸药呈现出韧性断裂, 本研究搭建的裂纹扩展速率测试系统不再适用。

3 结论

基于半圆盘弯曲断裂试验, 利用数字图像相关技术和裂纹扩展速率测试系统, 研究了一定温度范围内

(25~65 °C) 准静态加载下 HMX 基 PBX 断裂特征、断裂阻力、损伤容限和裂纹失稳扩展速率的温度效应, 得到如下结论:

(1) 温度对 PBX 断裂行为的影响非常明显, 25~55 °C 范围内呈现出典型脆性断裂特征, 裂纹起裂出现在载荷最大值, 起裂后裂纹失稳并发生脆性断裂。60 °C 和 65 °C 下, 本研究中的 PBX 材料发生软化, 呈现出韧性断裂特征, 即裂纹起裂后试样仍具有承载能力, 承载能力随着裂纹的缓慢扩展而减小。脆性断裂形成的断面形貌较为平整, 而材料软化后韧性断裂形成的断面形貌较为粗糙。

(2) 不同温度下断裂韧度与拉伸强度和弹性模量呈正相关, 随着温度的升高 (25~65 °C), 断裂韧度、拉伸强度和弹性模量明显减小。在脆性断裂温度范围内, 拉伸强度随着温度升高的降低程度要大于断裂韧度, 温度的适当升高有助于 HMX 基 PBX 损伤容限的提高。

(3) 脆性断裂行为下, PBX 裂纹起裂后失稳扩展速率呈现出慢-快-慢的规律, 最高速率约 $370 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 低速起裂后快速失稳, 最终以一个相对更低的速率完成裂纹扩展。裂纹失稳扩展速率随着温度的升高有一定程度降低, 这一现象在裂纹扩展的后半程更加明显。

参考文献:

- [1] LIU C. Fracture of the PBX 9501 high explosive[C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2004, 706(1): 786-791.
- [2] GUO H, LUO J R, SHI P A, et al. Research on the fracture behavior of PBX under static tension[J]. *Defence Technology*, 2014, 10(2): 154-160.
- [3] LIU Z W, XIE H M, LI K X, et al. Fracture behavior of PBX simulation subject to combined thermal and mechanical loads[J]. *Polymer Testing*, 2009, 28(6): 627-635.
- [4] WILLIAMSON D M, PALMER S J P, PROUD W G, et al. Fracture studies of PBX stimulant materials[C]//Shock Compression of Condensed Matter, American Institute of Physics, 2005: 829-832.
- [5] WALLEY S M, TAYLOR N E, WILLIAMSON D M. Temperature and strain rate effects on the mechanical properties of a polymer-bonded explosive[J]. *European Physical Journal Special Topics*, 2018, 227: 127-141.
- [6] 温茂萍, 庞海燕, 田勇, 等. PBX 平面应变断裂韧度随温度的变化规律[J]. *火炸药学报*, 2005, 28(3): 63-65.
WEN Mao-ping, PANG Hai-yan, TIAN Yong, et al. Regulations of plane strain fracture toughness of PBX changed with temperatures[J]. *Chinese Journal of explosives & Propellants*, 2005, 28(3): 63-65.
- [7] ZHOU Z B, CHEN P W, DUAN Z P, et al. Comparative study

- of the fracture toughness determination of a polymer-bonded explosive simulat[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(17): 2991–2997.
- [8] FERRANTI J L, GAGLIARDI F J, CUNNINGHAM B J, et al. Measure of quasi-static toughness and fracture parameters for mock explosive and insensitive high explosive LX-17[C]//Proceeding of the 14th International Detonation Symposium, Coeur d'Alene, Idaho. 2010: 11–16.
- [9] KURUPPU M D, OBARA Y, AYATOLLAHI M R, et al. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen [J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2014, 47(1): 267–274.
- [10] LIU Y L, CENDON D A, CHEN P W, et al. Fracture of PBX notched specimens: experimental research and numerical prediction [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2017, 90: 268–275.
- [11] 刘晨, 蓝林钢, 陈华, 等. TATB基PBX张开型裂纹起裂及扩展行为[J]. 含能材料, 2019, 27(3): 190–195.
LIU Chen, LAN Lin-gang, CHEN Hua, et al. Opening model crack initiation and propagation behavior of TATB-based PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(3): 190–195.
- [12] ZHOU Z B, CHEN P W, HUANG F L. Study on dynamic fracture and mechanical properties of a PBX simulat by using DIC and SHPB method [C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2012, 1426(1): 665–668.
- [13] CHEN R, CHENG L, LIN Y, et al. Studies on the dynamic fracture properties and failure modes of a PBX [J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2014, 6(4): 1–15.
- [14] RABBI M F, MACH R, CATZIN C A, et al. Novel method to characterized and model the multiaxial constitutive and damage response of energetic materials [R]. SAND-2017-13820, 2017.
- [15] WANG S N, LAN L G, LIU Y Y, et al. Effects of local coating on strengthening and crack suppression of notched PBX beams [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2019, 44 (11) : 1361–1367.
- [16] WANG S N, TANG W, LIU C, et al. Digital image correlation measurement of the deformation and failure in PBX Brazilian discs reinforced with CFRP patches [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2021, 46(4): 548–554.
- [17] ZHOU Z B, CHEN P W, DUAN Z P, et al. Study on Fracture Behavior of a Polymer-Bonded Explosive Simulant Subjected to Uniaxial Compression Using Digital Image Correlation Method[J]. *Strain*, 2012, 48(4): 326–332.
- [18] LI J L, FU H, TAN D W, et al. Fracture behavior investigation into a polymer-bonded explosive [J]. *Strain*, 2012, 48(6) : 463–473.
- [19] LIU C, THOMPSON D G, LOVATO M L, et al. Macroscopic crack formation and extension in pristine and artificially aged PBX 9501 [C]//14th International Detonation Symposium, 2010: 1247–1256.
- [20] LIU C, THOMPSON D G. Crack initiation and growth in PBX 9502 high explosive subject to compression[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2014, 81(10): 101004.
- [21] LIU C, CADY C M, RAE P J, et al. On the quantitative measurement of fracture toughness in high explosive and mock materials [C]//14th International Detonation Symposium, 2010: 347–355.
- [22] 唐明峰, 温茂萍, 涂小珍, 等. 高温及机械应力对PBX力学行为的影响规律及机理分析[J]. 含能材料, 2018, 26(2): 150–155.
TANG Ming-feng, WEN Mao-ping, TU Xiao-zhen, et al. Influence and mechanism of high temperature and mechanical stress on the mechanical behaviors of PBXs [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(2) : 150–155.
- [23] WAN D Y, ZHU Z M, LIU R F, et al. Measuring method of dynamic fracture toughness of mode I crack under blasting using a rectangle specimen with a crack and edge notches [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104104.
- [24] LIU R F, ZHU M., LI M, et al. Study on dynamic fracture behavior of mode I crack under blasting loads [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 117: 47–57.
- [25] TOMASZ R, MAGDALENA K. Characterization of biocompatible materials using stereo microscope 3D digital image correlation [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2016, 18 (9) : 1651–1660.
- [26] ALEXANDRU F, LIVIU M, OCTAVIAN P. Experimental determination of strain distribution on printed circuit boards using digital image correlation [J]. *Procedia Structure Intensity*, 2019, 18: 214–222.
- [27] WANG W Z, MOTTERSHEAD J E, SIEBERT T, et al. Frequency response functions of shape features from full-filled vibration measurements using digital image correlation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 28: 333–347.
- [28] LI J R, XIE X, YANG G B, et al. Whole-field thickness strain measurement using multiple camera digital image correlation system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 19–25.
- [29] ASHBY M F. Materials selection in mechanical design [M]. Fourth Edition, Butterworth-Heinemann, 2010: 74–75.
- [30] DEMETRIOU M D, LAUNEY M E, GARRETT G, et al. A damage-tolerant glass [J]. *Nature Materials*, 2011, 10 (2) : 123–128.
- [31] 董天宝, 唐维, 温茂萍, 等. 基于三种强度准则的PBX I型裂纹尖端失效区研究[J]. 含能材料, 2017, 25(2): 113–117.
DONG Tian-bao, TANG Wei, WEN Mao-ping, et al. Failure zone of PBX mode I crack tip based on three strength criteria [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(2): 113–117.
- [32] 董天宝, 袁洪魏, 赵龙, 等. 考虑T应力的PBX裂纹尖端失效区和起裂行为[J]. 含能材料, 2020, 28(5): 456–463.
DONG Tian-bao, YUAN Hong-wei, ZHAO Long, et al. PBX crack tip failure zone and fracture behavior considering the T-stress [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(5): 456–463.
- [33] 俞茂宏. 强度理论百年总结 [J]. 力学进展, 2004, 34(4) : 529–560.
YU Mao-hong. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century [J]. *Advances in Mechanics*, 2004, 34(4): 529–560.

Temperature Effects on the Fracture Behavior of HMX-Based PBX Under Quasi-Static Loading

DONG Tian-bao, YUAN Hong-wei, WEN Qian-qian, PANG Hai-yan, ZHAO Long, LI Yun-xin

(*Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China*)

Abstract: To investigate the temperature effects on fracture behavior of HMX-based polymer bonded explosives (PBX) under quasi-static loading, the digital image correlation method (DICM) and crack propagation gauge (CPG) testing system were used in quasi-static fracture tests of the semi-circular bending (SCB). The fracture characteristics, fracture resistance, damage tolerance and crack unstable propagation rate of HMX-based PBX at different temperatures (25, 35, 45, 55, 60, 65 °C) were studied. The results show that with the increase of temperature, the fracture characteristics of HMX-based PBX gradually transform from brittle fracture to ductile fracture, the fracture toughness which indicates the crack initiation resistance significantly decreases, and the damage tolerance is slightly improved. Under the brittle fracture condition of SCB, the crack unstable propagation rate shows a slow-fast-slow law on the propagation path, with a maximum rate of about $370 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The increase in temperature leads to some reduction in the crack unstable propagation rate.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); fracture behavior; temperature effects; damage tolerance; digital Image Correlation Method

CLC number: TJ55; O346.1

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022249

Grant support: National Natural Science Foundation of China (Nos. 12002322, 12002323)

(责编:王馨逸)