

文章编号:1006-9941(2022)09-0959-07

基于X射线显微CT的PBX热冲击损伤特征

杨存丰,田勇,张伟斌,张催,肖盼

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳621900)

摘要:为研究小尺寸高聚物黏结炸药(polymer bonded explosive, PBX)半球的热冲击损伤特征,针对 $\Phi 10$ mm TATB基和HNS基PBX半球样品开展了0~100 °C水浴温度冲击实验,利用X射线显微层析成像(Micro-computed tomography, μ CT)技术研究了样品损伤的三维形态和分布特征,并采用热弹性二维轴对称模型对样品温度冲击过程的热传导和热应力进行了模拟分析。CT结果表明温度冲击后2种样品均由边角起裂,其中TATB基PBX半球沿边部环向扩展,形态曲折,具有撕裂和脆断特征;HNS基PBX半球沿轴向基本贯穿,形态平直,具有脆断特征。数字模拟结果表明温度冲击过程中TATB基PBX半球内部产生较强的拉应力,由边角区域至中心区域拉应力先后超过其拉伸强度,导致主裂纹由半球边角区域萌生并向内扩展。样品损伤形态与温度冲击作用下的应力分布特征、黏结剂温度特性吻合。本研究为TATB基和HNS基PBX温度冲击损伤机理分析奠定了基础。

关键词:高聚物黏结炸药;X射线显微层析成像;TATB;HNS;温度冲击;损伤

中图分类号:TJ55

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2021247

0 引言

高聚物黏接炸药(polymer bonded explosive, PBX)是由单质炸药晶体和高聚物黏结剂等组成的混合炸药,具有颗粒高度填充、非均相的结构特征。PBX广泛应用于各类武器,具有结构承载、爆轰破坏等重要功能。PBX制造过程中会产生微裂纹、微空隙等初始损伤^[1-3],同时在复杂的服役环境条件下,PBX承受力、热等载荷作用,初始损伤进一步扩展并产生新的损伤。损伤使PBX的力学性能劣化、安全性能和爆轰性能降低^[4-5],影响武器可靠性。

为掌握PBX在温度载荷作用下的损伤机制,研究人员综合运用数值模拟^[6-7]以及声发射^[6-7]、超声^[8-10]、光学显微镜和扫描电镜^[11-13]、工业CT^[11-14]等技术手段,研究了PBX的热损伤行为,对热损伤机理研究有了一定的认识。其中声发射和超声方法通过PBX损

伤的声发射和超声特征信号表征损伤,难以直观地表征损伤形态特征。光学显微镜和扫描电镜方法主要表征PBX的表面损伤,观测视野小且取样具有破坏性。X射线显微CT具有微米尺度分辨、三维层析成像的技术优势,可以无损地透视样品内部结构并精确地定量表征其结构与损伤的三维形态特征,为PBX损伤研究提供了重要的技术支持^[15]。

热应力是导致PBX损伤的最常见的和最主要的形式,其中温度冲击最容易使PBX产生损伤^[12],由此抗热冲击性能在PBX的设计和应用中受到广泛关注。但目前相关研究主要采用PBX柱形结构作为研究对象,而对PBX炸药半球形结构研究较少,PBX柱形结构和球形结构的温度冲击响应存在明显差异,同时PBX构型尺寸影响其温度冲击过程的热应力分布。为掌握小尺寸PBX半球形结构的温度冲击损伤特征,本研究针对 $\Phi 10$ mm的TATB(1,3,5-三氨基-2,4,6-三硝基苯)基和HNS(六硝基芪)基PBX半球样品,采用水浴对流热交换法对样品进行温度冲击实验以激发样品产生损伤,利用X射线显微CT和三维图像处理技术表征了2种PBX半球样品的温度冲击损伤的形态特征,采用热弹性二维轴对称模型对TATB基PBX样品温度冲击过程的热传导和热应力进行了模拟分析,探讨了

收稿日期:2021-09-16;修回日期:2021-12-06

网络出版日期:2022-06-08

作者简介:杨存丰(1974-),男,副研究员,主要从事工业CT应用技术研究。e-mail:icmycf@sina.com

通信联系人:田勇(1967-),男,研究员,主要从事先进制造与检测技术研究。e-mail:tianyong@caep.cn

引用本文:杨存丰,田勇,张伟斌,等.基于X射线显微CT的PBX热冲击损伤特征[J].含能材料,2022,30(9):959-965.

YANG Cun-feng, TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, et al. Thermal Shock Damage Characteristics of Polymer Bonded Explosive based on X-ray Micro-computed Tomography[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(9):959-965.

温度冲击损伤特征与温度分布、热应力分布以及黏结剂温度特性的关联性,为PBX半球温度冲击损伤规律研究提供了指导。

1 实验部分

1.1 实验样品

TATB、HNS,化工材料研究所;黏结剂 F2311、F2314 为工业级,晨光化工研究院。

分别采用 TATB 和 F2311、HNS 和 F2314 材料组合,经水悬浮造粒后压制成 TATB 基和 HNS 基 PBX 半球形样品,数量各 4 发,编号分别为 A1~A4、B1~B4。样品直径为 $\Phi 10$ mm,样品密度约 $1.60 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。F2311、F2314 的玻璃化转变温度分别为 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $49.6 \text{ }^\circ\text{C}$,软化点温度分别约 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2 仪器设备

X 射线显微 CT,主要由微焦点 X 射线源、多轴运动控制精密机械系统、光耦探测器组成,射线源最大管电压 150 kV ,探测器总像素阵列 2048×2048 ,像素尺寸 $67.5 \text{ }\mu\text{m}$ 。

1.3 实验

1.3.1 温度冲击实验

采用水浴对流热交换方法开展温度冲击实验,利用高热流密度冲击激发样品产生损伤,实验方法为:在室温 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) 条件下,样品经 CT 检测后,依次浸入 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰水混合物、 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 热水中各保持 30 min ,2 种温度间的转换时间控制在 2 s ,样品由 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 热水取出 30 min 后再次进行 CT 检测。

1.3.2 显微 CT 成像与损伤表征

采用 X 射线显微 CT 对样品进行三维 CT 成像,X 射线显微 CT 检测示意图见图 1,检测参数为:射线源的管电压 50 kV 、功率 10 W ,单幅投影图采样曝光时间 2.5 s ,样品旋转 360° ,投影图采集幅数 4501 ,采集的图像像素阵列 1024×1024 ,重建后的样品三维 CT

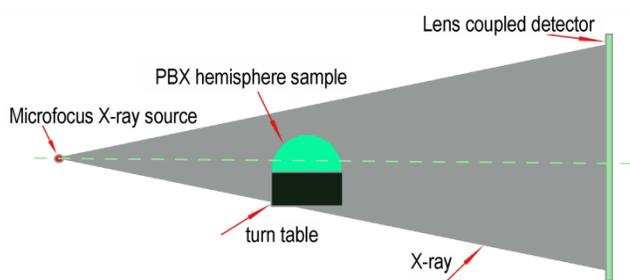


图 1 X 射线显微 CT 检测示意图

Fig.1 Schematic diagram of X-ray micro-CT

图像像素尺寸为 $11.9 \text{ }\mu\text{m}$ 。

所得样品 CT 图像为灰度值 $f(x, y)$ 的空间分布图像, $f(x, y)$ 代表样品位置 (x, y) 上材料的 X 射线衰减系数,PBX 基体和裂纹因 X 射线衰减系数不同导致影像灰度存在差异。基于图像的不连续性和相似性基本原则,利用 sobel 边缘检测改进的灰度直方图阈值分割方法^[16],提取 PBX 内部裂纹的三维形貌,观察裂纹形态特征,评估损伤的产生与扩展方向,测量裂纹的体积和表面积评估 PBX 损伤程度,测量垂直于 PBX 半球中轴线的不同位置截面的损伤面积比分析损伤与位置的关系。

1.4 数字模拟

PBX 半球温度冲击过程中,结构及载荷具有轴对称性,因此将三维空间问题简化为二维轴对称平面问题^[6-7],采用 Abaqus 有限元分析软件^[17]进行热传导和热应力分析。几何模型选取 $SR 5 \text{ mm}$ 半球的 $1/2$ 中轴面建立轴对称模型,按四结点轴对称热耦合四边形单元 CAX4T 进行网格划分。TATB 基 PBX 样品的力学性能和热性能与温度相关,其数字模拟采用的力学性能参数引用文献^[18],热物理性能参数引用实测数据,其中线膨胀系数在温度 $243\sim 303 \text{ K}$ 时为 $4.18\times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 、 $303\sim 343 \text{ K}$ 时为 $5.81\times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,比热为 $1.08\times 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,导热系数为 $0.247 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 损伤的三维形态特征

温度冲击实验前后对所有样品 A1~A4、B1~B4 均进行了 CT 检测,由于同类样品的损伤形态特征相同,研究选用样品 A1 和 B1 作损伤特征分析。温度冲击实验前,样品 A1 的三维 CT 图像、样品 B1 的内部裂纹三维形貌分别见图 2a 和 2b,由图 2a 和 2b 可见,样品 A1 内部未见裂纹,样品 B1 距顶部约 1.3 mm 处存在环状初始裂纹。由图 2c 和 2d 温度冲击实验后样品 A1 和样品 B1 的三维 CT 图像可见,2 种样品均产生明显开裂,开裂宽度由样品边角向内逐渐减小,呈现由边角部位起裂并向内扩展的特征;2 种样品的主裂纹扩展形态明显不同,样品 A1 主裂纹沿其边部环向扩展,样品 B1 主裂纹沿轴向平直扩展。

图 2e 和 2f 分别为温度冲击后样品 A1 和 B1 的内部裂纹形貌,裂纹形貌图反映了裂纹宽度和边缘梯度的变化信息,垂直于梯度变化的方向为裂纹的扩展方向(如图 2e 和 2f 箭头所示)。由图 2e 可见,样品 A1 边

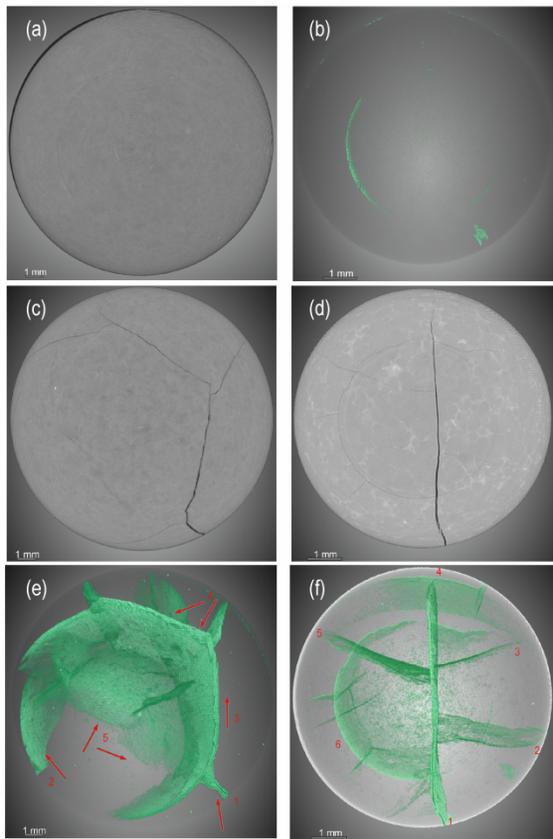


图2 样品A1与B1温度冲击前后形貌(a,b. 温度冲击前样品A1,B1的三维CT图像;c,d. 温度冲击后样品A1,B1的三维CT图像;e,f. 温度冲击后样品A1,B1内部裂纹三维形貌)

Fig.2 morphology of sample A1 and B1 before and after temperature shock(a,b. 3D CT image for sample A1 and B1 before temperature shock; c,d. 3D CT image for sample A1 and B1 after temperature shock; e,f. 3D morphology of inner cracks for sample A1 and B1 after temperature shock)

角部位产生多条裂纹并沿边部扩展,导致裂纹三维形貌整体呈环状特征,且多数裂纹的梯度纹理形态不规则、方向不一致,具有撕裂特征。由图2f可见,样品B1内部新生了严重裂纹,其中主裂纹(如图2f中位置1所示)

沿边部起裂,轴向扩展至微裂纹(图2f中位置4所示)断裂面,形态平直,具有脆断特征;次裂纹(图2f中位置2、3、5所示)轴向扩展至主裂纹面。样品B1内部的初始裂纹沿球径、环向及轴向3个方向轻微扩展。

基于图像分割处理得到的2种样品内部裂纹三维形貌特征,由裂纹所有体素的体积和计算裂纹体积,由裂纹与背景相邻的像素面积和计算裂纹表面积,分析得到温度冲击前后样品内部裂纹的体积及表面积,结果见表1。由表1可知,样品的损伤程度不相同,其中样品A1~A4损伤的体积比为0.210%~0.45%,表面积为226~601 mm²;样品B1~B4损伤的体积比为0.150%~0.34%,表面积为264~403 mm²。2种样品相比较,TATB基PBX样品损伤的体积比分布和表面积分布大,表明其损伤扩展程度大,其原因是裂纹环向扩展导致长度大、裂纹纹理不规则导致损伤体积和表面积增大。

基于CT检测获得的裂纹特征,可以看出在0~100℃温度冲击作用下,样品A1和B1的主裂纹由边角部位起裂并向内部扩展,表明温度冲击过程中样品边角部位的热应力先超过了其拉伸强度。样品A1和B1分别采用了F2311、F2314黏结剂,其温度特性存在明显差别,其中F2311、F2314的玻璃化转变温度分别为0℃、49.6℃,软化点温度分别约为80℃、120℃。在0~100℃温度冲击过程中,F2311由高弹态向黏流态转变,样品A1开裂特征由脆断向撕裂转变;同时随着温度升高,样品内部的黏结剂F2311逐步软化,炸药与黏结剂之间的界面作用相应减弱,造成结构强度降低,在半球内部周向热应力作用下产生环状开裂;F2314由玻璃态向高弹态转变,样品B1仍保持一定的脆性和结构强度,在周向热应力作用下产生轴向脆性开裂。

表1 裂纹的体积和表面积

Table 1 Volume and surface area of cracks

sample number	before temperature shock			after temperature shock		
	Volume/mm ³	crack volume ratio/%	surface/mm ²	volume/mm ³	crack volume ratio%	surface/mm ²
A1	-	-	-	7.85	0.450	345.47
A2	-	-	-	6.82	0.390	601.73
A3	-	-	-	4.21	0.240	248.24
A4	-	-	-	3.70	0.210	226.71
B1	0.08	0.005	17.69	5.92	0.340	403.61
B2	0.11	0.010	14.16	5.69	0.320	272.49
B3	0.04	0.002	5.06	5.31	0.300	236.26
B4	0.14	0.010	12.39	2.71	0.150	264.58

2.2 损伤的分布特征

样品 A1 和 B1 端面及距端面 1785 μm 、3570 μm 位置的径向 CT 切片见图 3。由图 3a~3c 可见,样品 A1 的 3 个切片位置上裂纹形态复杂,呈现撕裂和脆断 2 种特征。样品端面截面(图 3a)上裂纹 1 和 2 位于半球边角区域,边角处开裂宽度大,分别约 144 μm 和 101 μm ,显示裂纹由边部向内部扩展;裂纹 3 和 4 由数量较多的微裂纹构成,形态不规则,具有撕裂特征。距端面 1785 μm 截面(图 3b)上,裂纹 1、3、4 基本融合,裂纹 2、裂纹 1 及其相连的裂纹 3 处开裂宽度大,同样显示出裂纹由边部向内部扩展的特征。距端面 3570 μm 截面(图 3c)上,裂纹 3 和 4 融合,形态较平直,具有一定的脆断特征。由图 3b、3c 可见,裂纹 5 产生于样品中部并偏离中轴方向扩展。综合以上裂纹特征,可以看出:主裂纹由样品边角部位产生并向内扩

展;样品的开裂特征主要与黏结剂的温度特性相关,端面处温度高导致黏结剂迅速软化,由此出现明显的撕裂特征,随着热由样品表面向内部传递,样品内部温度逐渐升高,但在样品开裂时样品中部区域黏结剂软化尚不明显,由此开裂呈现一定的脆断特征。

由图 3d~f 可见,样品 B1 的 3 个切片位置上主裂纹(裂纹 1)形态平直、轴向基本贯穿,开裂宽度边部约为 121 μm 、向内逐渐减小。端面位置(图 3d)主裂纹扩展于裂纹 4 处停止,次裂纹(裂纹 2、5)形态较平直,但存在部分不连续。距端面 1785 μm 位置(图 3e)次裂纹(裂纹 2、5)形态平直,其扩展于主裂纹处截止。距端面 3570 μm 位置(图 3f),次裂纹(裂纹 3、5)形态平直,初始裂纹(裂纹 6)出现环向和轴向扩展特征。总体上样品 B1 内部裂纹形态整体上较为规则,呈现明显的脆断特征;主裂纹由边部向内部扩展。

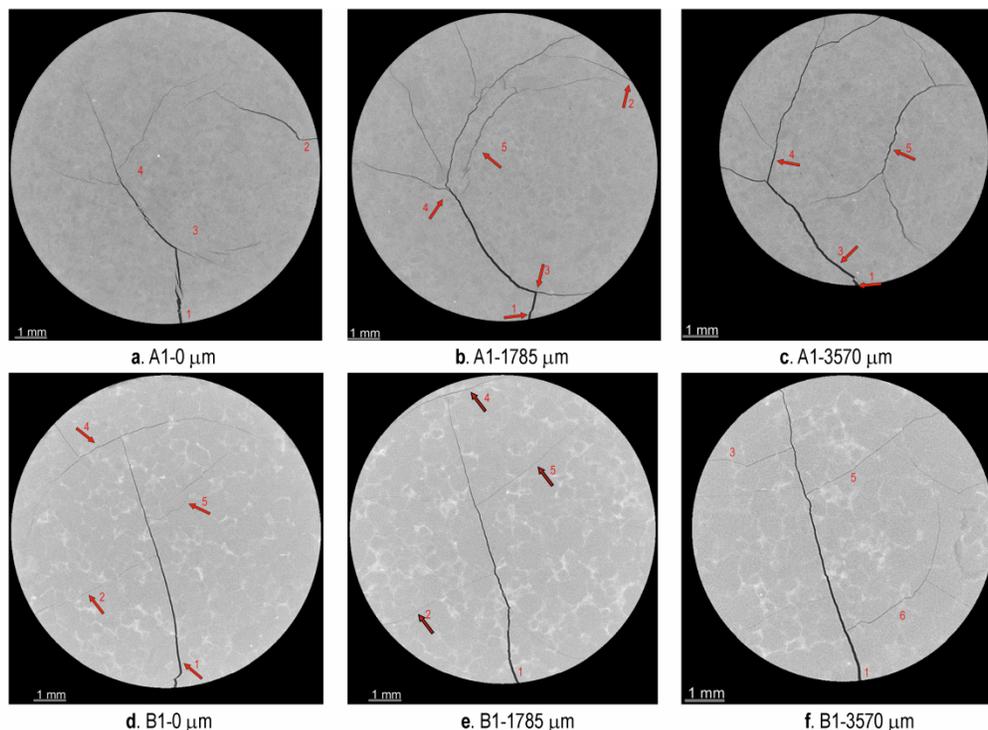


图 3 温度冲击后样品 A1 和 B1 径向 CT 切片

Fig.3 Radial CT slices of sample A1 and B1 after temperature shock

对样品所有径向切片,由样品端面至顶部,依次测量其损伤面积比(裂纹面积与总面积之比),得到样品 A1~A4 和样品 B1~B4 损伤面积比随切片位置的分布曲线见图 4,由图 4 可见,样品 A2~A4 在 0~300 切片位置的损伤面积比缓慢下降,样品 B1~B4 的损伤面积比在 0~320 切片位置的损伤面积缓慢增大,产生该分布规律的主要原因是样品 A2~A4 开裂沿边部扩展导致顶部区域损伤低、样品 B1~B4 轴向扩展导致各截面损

伤特征基本相同。

2.3 温度冲击过程的热传导和热应力有限元分析

由于 TATB 基和 HNS 基 PBX 样品均呈现由边角部位起裂向内扩展的形态特征,本研究选用 TATB 基 PBX 样品作热传导和热应力分析。TATB 基 PBX 样品受 0~100 $^{\circ}\text{C}$ 温度冲击 1.3 s 时的温度分布和应力分布见图 5,由图 5 可见,半球内部为拉应力,其最大值为 7.49 MPa,拉应力超过其拉伸强度,使 PBX 内部产生

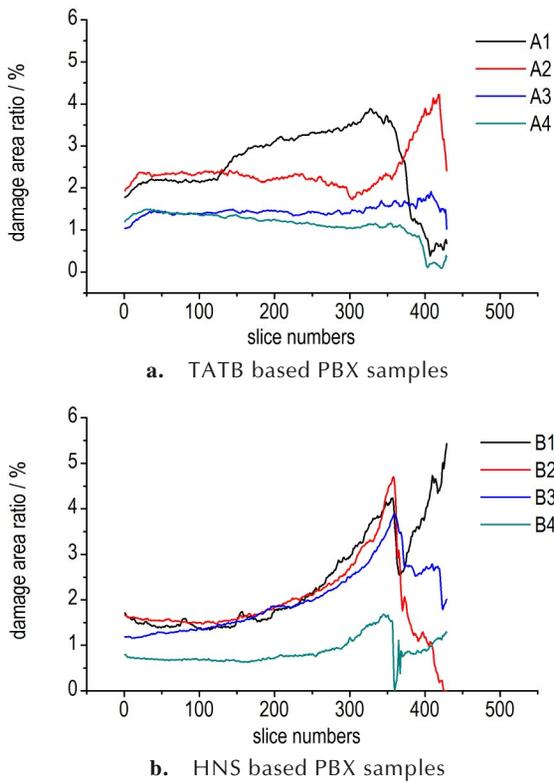


图4 不同样品的径向截面损伤面积比
Fig.4 Curves of damage area ratio at different radial slices for different samples

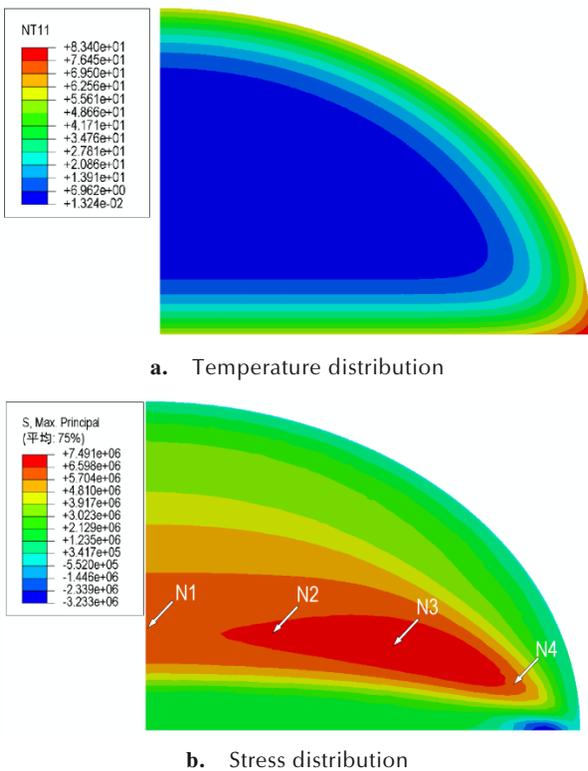


图5 温度冲击1.3 s时的温度分布和应力分布
Fig.5 Temperature distribution and stress distribution at high temperature shock 1.3 s

开裂;半球外表面为压应力,端面边部压应力最大,最大值为 3.2 MPa,远低于其压缩强度,压应力不会使 PBX 产生开裂。

为研究 TATB 基 PBX 样品内部温度和应力分布规律,在应力最大的方向,由半球中轴至边角部位依次选取 4 点 N1~N4(图 5b),采用有限元方法分析得到 N1、N2、N3、N4 点的温度和应力历史,结果如图 6 所示。由图 6a 可见,温度冲击过程中,由边角至中部(N4、N3、N2、N1 点)温升梯度依次减小;由图 6b 可见,温度冲击数秒内,N4、N3、N2、N1 各点的拉应力迅速增大,拉应力升高梯度基本相同、应力峰值依次增大,应力峰值分别为 7.46、11.43、12.90、13.63 MPa。结合不同温度下的拉伸强度数据^[18],样品由边角至中部的拉应力先后超过其拉伸强度,这与样品沿边角处起裂向角内扩展的形态吻合。

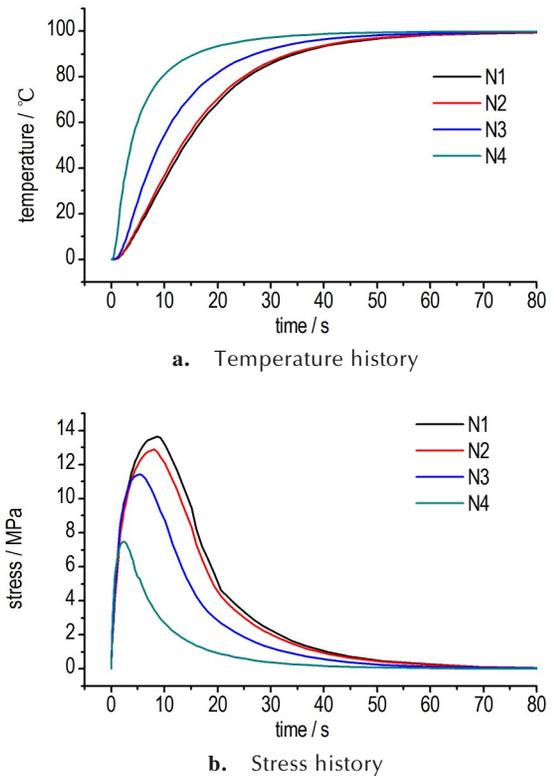


图6 N1~N4点的温度和应力历史
Fig.6 Temperature and stress history of point N1-N4

另外,TATB 基 PBX 样品由 0 °C 转至 100 °C 环境后,由表及里温度逐渐升高,TATB 基 PBX 样品中的黏结剂 F2311 软化,导致其脆性降低、韧性增强,在拉应力作用下样品开裂由脆断向撕裂转变,尤其半球近表面撕裂特征更明显。根据 TATB 基 PBX 半球样品温度冲击后的损伤形态 CT 检测结果,主裂纹由边角区域起

裂后,在拉应力的作用下,裂纹偏向于沿拉应力超过其拉伸强度、相对的软化区和非软化区中间的强度薄弱部位扩展。HNS基PBX半球中黏结剂F2314在半球内部起裂时处于玻璃态,随着最大拉应力由半球边角向中心演变,裂纹迅速向内扩展,形成了垂直于端面的、形态平直的主裂纹,同时产生部分形态平直的次裂纹等,裂纹具有脆断特征。

3 结论

(1)0~100℃高温冲击下,PBX半球内部拉应力由边角到中心区域先后超过其拉伸强度,导致半球内部产生由边角区域起裂并向内扩展的主裂纹。

(2)由0℃转至100℃高温环境,PBX半球内部温度由表及里温度依次升高,TATB基PBX半球中的F2311黏结剂逐步软化,导致其开裂呈脆断和撕裂特征,裂纹偏向于沿半球边部环状扩展。HNS-PBX半球中的F2314黏结剂处于玻璃态,导致其开裂呈脆断特征,裂纹偏向于沿半球轴向扩展。

(3)HNS-PBX半球顶部的初始裂纹在高温冲击作用下沿径向及环向、轴向扩展,扩展程度远低于半球内部新生的主裂纹和次裂纹。

参考文献:

- [1] 梁华琼,雍炼,唐常良,等.RDX为基的PBX炸药压制过程损伤形成研究[J].含能材料,2009,17(6):713-716.
LIANG Hua-qiong, YONG Lian, TANG Chang-liang. Pressing damage of RDX-based polymer bonded explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 713-716.
- [2] 梁华琼,雍炼,唐常良,等.压制过程中PBX炸药颗粒的破碎及损伤[J].火炸药学报,2010,33(1):27-30.
LIANG Hua-qiong, YONG Lian, TANG Chang-liang, et al. Crack and damage of PBX during pressing[J]. *China Journal of Explosive and Propellants*, 2010, 33(1): 27-30.
- [3] 张伟斌,李敬明,杨雪海.TATB颗粒温压成形PBX的初始微观损伤[J].含能材料,2015,23(2):202-204.
ZHANG Wei-bin, LI Jing-ming, YANG Xue-hai, et al. Initial mesoscopic damage of TATB based PBX pressed by warm compaction[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(2):202-204.
- [4] 陈鹏万,黄风雷.含能材料损伤理论及应用[M].北京:北京理工大学出版社,2006.
CHEN Peng-wan, HUANG Feng-lei. Damage theory and applications of energetic materials[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [5] 唐明峰,温茂萍,涂晓珍,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.
- [6] 韦兴文,吴束力,唐兴.HMX基PBX炸药热损伤的数值计算与实验研究[J].火炸药学报,2014,37(4):9-13.
WEI Xing-wen, WU Shu-li, TANG Xing. Numerical calculation and experimental study on thermal damage of HMX based polymer bonded explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(4):9-13.
- [7] 唐明峰,甘海啸,温茂萍,等.含缺口PBX药柱热冲击响应的数值模拟及试验[J].含能材料,2021,29(1):41-47.
TANG Ming-feng, GAN Hai-xiao, WEN Mao-ping, et al. Simulation and experimental study on the thermal shock behavior of notched PBX cylinders[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(1):41-47.
- [8] 田勇,张伟斌,郝莹,等.炸药热冲击损伤破坏及超声波特性参量检测[J].火炸药学报,2000,23(4):13-15.
TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, HAO Ying, et al. Thermal shock damage of explosive and its ultrasonic characterization[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2000, 23(4):13-15.
- [9] 田勇,罗顺火,张伟斌,等.JOB-9003“激热”冲击损伤破坏及超声特征[J].火炸药学报,2002,25(3):17-19.
TIAN Yong, LUO Shun-huo, ZHANG Wei-bin, et al. Water-bathed thermal shock damage of PBX JOB-9003 and its ultrasonic characteristics[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 25(3):17-19.
- [10] 田勇,张伟斌,温茂萍,等.JOB-9003高聚物粘结炸药热冲击损伤破坏相关性研究[J].含能材料,2004,12(3):174-177.
TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, WEN Mao-ping, et al. Research on correlation of thermal shock damage of PBX JOB-9003[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(3): 174-177.
- [11] 邵珠格,刘如沁,吴艳青,等.高温作用后HMX基PBX热损伤表征试验研究[J].火炸药学报,2020,43(4):406-412.
SHAO Zhu-ge, LIU Ru-qin, WU Yan-qing, et al. Experimental study on thermal damage characterization of HMX based PBX after high-temperature treatment[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(4):406-412.
- [12] 尹俊婷,袁宝慧,牛鹏俊,等.炸药损伤及损伤炸药环境适应性的实验研究[J].火炸药学报,2008,31(2):78-80.
YIN Jun-ting, YUAN Bao-hui, NIU Peng-jun, et al. Experimental study on the explosive damage and environment adaptability of damaged explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(2): 78-80.
- [13] 张冬梅,韩芳,贾林,等.温度循环载荷作用下压装A-IX-II装药的裂纹机理研究[J].含能材料,2016,39(1):89-93.
ZHANG Dong-mei, HAN Fang, JIA Lin, et al. Study on crack formation mechanism of pressed charge A-IX-II under temperature cyclic load[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 39(1):89-93.
- [14] 刘瑞鹏,王红星,王浩.高低温环境对不同炸药结构影响研究[J].含能材料,2005,13(20):20-22.
LIU Rui-peng, WANG Hong-xing, WANG Hao, et al. Effect of environment temperature on different explosive structures[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(20):20-22.
- [15] 刘本德,陈华,张伟斌,等.基于CT图像序列的围压TATB基PBX冲击损伤特性[J].含能材料,2019,27(3):196-201.
LIU Ben-de, CHEN Hua, ZHANG Wei-bin, et al. Impact dam-

- age characteristics of TATB based polymer bonded explosive under confining pressure based on the CT image sequences[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(3): 196–201.
- [16] RAFAEL C Gonzalez, RICHARD E Woods. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2017: 443–492.
Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. *Digital Image Processing* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 443–492.
- [17] 岳小亮. 温度冲击载荷下药柱的力学响应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 18–24.
YUE Xiao-liang. Study on the mechanical response of grain under temperature impact load[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013: 18–24.
- [18] 涂小珍, 张波, 韦兴文, 等. TATB基高聚物粘结炸药高温力学性能[J]. *含能材料*, 2013, 21(3): 306–309.
TU Xiao-zhen, ZHANG Bo, WEI Xing-wen, et al. Mechanical properties of TATB based PBX at high temperature[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(3): 306–309.

Thermal Shock Damage Characteristics of Polymer Bonded Explosive based on X-ray Micro-computed Tomography

YANG Cun-feng, TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, ZHANG Cui, XIAO Pan

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

Abstract: In order to study thermal shock damage characteristics of small-size polymer bonded explosive (PBX) hemispheres, 0–100 °C water-bathed thermal shock test was carried out for $\Phi 10$ mm TATB based and HNS based PBX hemispheres. 3D morphology and distribution characteristics of the damages in the PBX hemisphere were studied by X-ray micro-computed tomography, and the thermal conduction and thermal stress of the sample during the thermal shock process were simulated and analyzed by using the 2D axisymmetric thermal elastoplastic model. The CT results show that the two kinds of samples both started to crack from hemisphere corner, in which the cracks in TATB based PBX hemisphere propagate in a circumferential direction along the edge, with tortuous shape and characteristics of tearing and brittle fracture; The cracks in HNS based PBX hemispheres basically penetrate along the axial direction, with the morphology of straight and characteristics of brittle fracture. The simulation results show that strong tensile stress is generated in the in the hemisphere of TATB based PBX during temperature. And the tensile stress from hemisphere corner to hemisphere center region successively exceeds tensile strength, resulting in the initiation of the main cracks from the edge of hemisphere and propagated inward. The damage characteristics of the sample is consistent with the stress distribution characteristics and the temperature characteristics of the binder under temperature shock. This study lays a foundation for the analysis of temperature shock damage mechanism of TATB-based and HNS-based PBX.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); X-ray micro-computed tomography; TATB; HNS; temperature shock; damage

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021247

(责编: 姜梅)