

基于塑性损伤理论的 PBX 圆拱 结构变形破坏分析

李尚昆¹, 黄西成¹, 王鹏飞¹, 郝志明¹, 徐伟芳¹, 蓝林钢²

(1. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川, 绵阳 621999;
2. 中国工程物理研究院 化工材料研究所, 四川, 绵阳 621999)

摘要: 为研究 PBX 构件在复杂应力状态下的力学行为, 采用塑性损伤模型对 PBX 圆拱结构在压缩条件下的变形与破坏过程进行模拟, 分析了不同约束状态下 PBX 构件的承载能力、变形破坏过程与裂纹形貌, 发现试件的承载能力随着端部摩擦的增强而提高, 经过与实验结果的对比可知, 当摩擦因数取 0.2 时模拟得到的失效载荷为 908.9 N, 与实验结果的平均值 921.3 N 最为接近。在约束状态下圆拱的承载能力有了较大提高, 并且在裂纹出现后试件仍然能够继续承载。通过数值模拟可知端部约束条件抑制了试件的变形和裂纹的扩展。在强约束条件下试件发生了二次破坏, 通过数值模拟再现了这一过程, 通过与实验的对比发现数值模拟在描述裂纹形貌、载荷等方面有较好的结果。

关键词: 塑性损伤模型; PBX; 损伤; 有限元模拟

中图分类号: O381 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2019)10-1018-08

DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2019.10.005

Deformation and Fracture Analysis of PBX Arch Specimens Based on Plasticity Damage Theory

LI Shang-kun¹, HUANG Xi-cheng¹, WANG Peng-fei¹,
HAO Zhi-ming¹, XU Wei-fang¹, LAN Lin-gang²

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;
2. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: Plasticity damage theory was used to simulate the deformation and fracture process of PBX circular arch specimens subjected to compression. The bearing capacity and crack shape of specimens at constraint conditions were analyzed. The comparison between experiment and simulation shows that the bearing capacity of specimens rises with the increase of friction. Simulation results agree with the experiment data well when the friction coefficient equals to 0.2; the bearing capacity of specimens is greatly improved at restriction conditions, and the specimens can still bear loading when a crack appears; the specimens break twice at strong restriction when it comes to continued loading, and this process has been reproduced by simulation. The simulation have a good agreement with experimental results in terms of the shape of cracks and carrying capacity. So plasticity damage model can be used to analyze the deformation and fracture of PBX specimens.

Key words: plasticity damage model; PBX; damage; finite element simulation

收稿日期: 2018-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11472257, 11572299, 11602257)

作者简介: 李尚昆(1992—), 男, 硕士, 研究实习员, E-mail: lishangkun192@163.com.

通信作者: 黄西成(1965—), 男, 博士, 研究员, E-mail: huangx@cape.cn.

高聚物黏结炸药(PBX)是一种由高能炸药颗粒和高聚物黏结剂压制而成的混合炸药^[1]。其具有能量高、机械感度低、力学性能和加工性能良好等特点,在现代军事工业、航空航天等领域有广泛的应用。

PBX 部件在压制的过程中会产生初始缺陷(如晶体的微缺陷、孔洞等),这些缺陷经过载荷作用后会产生一系列内部裂纹^[2]。一方面,裂纹的存在会引起结构强度和刚度下降,并可能最终导致结构破坏^[3];另一方面,PBX 材料内部脆性裂纹尖端释放的机械能可能会导致局部加热升温,继而可能引发点火反应甚至造成意外起爆^[4]。因此,充分认识 PBX 构件的损伤和破坏行为,是开展复合环境下武器可靠性和安全性研究的必要条件。

国内外许多学者都对 PBX 的损伤破坏行为进行了研究。李俊玲等^[5]采用巴西实验作为间接拉伸加载手段,获得了 PBX 试样的断裂损伤形貌,并结合数字图像相关技术获得了试样的变形和破坏过程。戴开达等^[6]基于扩展有限元方法分析了不同的夹头形式对巴西实验的影响,通过将模拟结果与理论结果进行对比,认为橡胶垫巴西实验能够降低接触部位的应力集中,可以更精确地测量被测试样的拉伸强度。美国 LANL 实验室的 Rangaswamy 等^[7]基于 Visco-SCRAM 模型对 PBX9501 的三点弯曲试验和巴西圆盘对径压缩试验进行了有限元数值计算,试验和计算得到的载荷-位移曲线吻合较好,但材料模型中仍有不合理的量值。中物院化工材料所刘晨等^[8]研究了带孔 PBX 板的拉伸破坏行为,发现圆孔处的应变集中是试样破坏的主导因素。美国 LANL 的 Liu 等^[9]对含有孔洞的 PBX9502 试件在压缩载荷下裂纹的产生和扩展过程进行了实验研究,中物院总体所黄西成等^[10]基于扩展有限元结合内聚力模型的方法对 Liu 实验中 I 型裂纹的产生与扩展的过程进行了模拟得到了较好的效果。前人工作多集中于研究 PBX 部件在拉伸载荷下的变形与破坏,而对 PBX 部件在围压、端部约束等复杂应力状态下的研究较少,究其原因在于缺少一种可以准确描述 PBX 材料拉压不同、静水压力相关等特性的本构模型。

由于 PBX 材料与岩土材料同属于颗粒摩擦型材料,其损伤变形的机理较为类似,在宏观力学行为方面有许多相似性^[2]。Michel Gratton 等^[11]用岩土力学中常用的塑性损伤方法来研究含能材料的准静

态力学行为。法国核武研究院的 C. Gruau 和 D. Picart 等^[12]在研究高能炸药低速冲击起爆过程中采用了塑性损伤模型来表征 PBX 的力学性能。本文运用塑性损伤模型通过实验结合数值分析方法来研究 PBX 圆拱结构在不同端部约束条件下的变形破坏特性。

1 塑性损伤模型

图 1 为 PBX9501 材料的循环加卸载响应图^[13]。从图 1 可以看出在循环加卸载过程中 PBX 材料的模量渐渐减小,这是随着应变的增加材料内部的损伤程度逐渐加深的表现。在塑性损伤模型中由于加入了与应变相关的参数来表征材料的损伤度,其可以较好地描述 PBX 材料的刚度减退的行为。

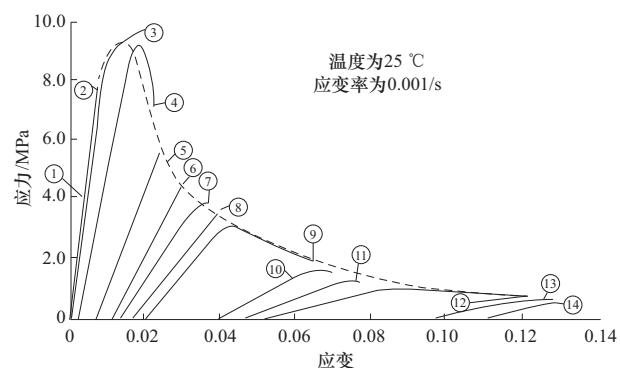


图 1 单轴压缩下 PBX 9501 炸药循环加卸载响应

Fig. 1 Loading and unloading response of uniaxial compression of PBX 9501

1.1 损伤本构

根据连续损伤力学理论^[14],将 PBX 材料的变形分为弹性部分 ϵ^e 和塑性部分 ϵ^p ,那么 PBX 材料的应力-应变关系为

$$\sigma = (1-d)\mathbf{C}_0^e : (\epsilon - \epsilon^p) = \mathbf{C}^e : (\epsilon - \epsilon^p) \Leftrightarrow \sigma_{ij} = (1-d)\mathbf{C}_{ijkl}^e (\epsilon_{kl} - \epsilon_{kl}^p), \quad (1)$$

式中: \mathbf{C}_0^e 为初始(无损)材料弹性刚度; $\mathbf{C}^e = (1-d)\mathbf{C}_0^e$ 为受损材料的刚度; d 为损伤量。

1.2 屈服面函数

PBX 在弹性变形段可采用线弹性模型来描述,假设拉压模量相同。

在塑性变形阶段,屈服函数借鉴了 Lubliner 等^[15]和 Lee、Fenves 等^[16]对 D-P 屈服函数的改进,引入了两个最大主应力项,考虑了内摩擦材料在拉伸与压缩条件下强度的差异和应力状态对材料力学

性能的影响。屈服面的演化由两个独立的等效塑性应变参量 $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ 和 $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ 来控制,

$$f = \frac{1}{1-\alpha} [\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\epsilon}_c^{pl})\langle\bar{\sigma}_{max}\rangle - \gamma\langle\bar{\sigma}_{max}\rangle] - \bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}), \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma}_{max}$ 为最大有效主应力; \bar{p} 为有效静水压力; \bar{q} 为有效 Mises 等效应力; $\alpha = \frac{\sigma_{b0} - \sigma_{c0}}{2\sigma_{b0} - \sigma_{c0}}$, 表征平面应力状态下屈服面的形状, 可以通过双轴压缩下的初始屈服应力 σ_{b0} 和单轴压缩下初始屈服应力 σ_{c0} 来确定; $\beta = (\tilde{\epsilon}_c^{pl}) = \frac{\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})}(1-\alpha) - (1+\alpha)$ 为材料拉压不对称性的参数, 其中 $\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})$ 和 $\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})$ 分别为有效压缩内聚应力和有效拉伸内聚应力; $\langle \cdot \rangle$ 定义为 $\langle x \rangle = 0.5(|x|+x)$; γ 为该屈服函数在 π 平面上形状相关的材料参数。

图 2 为屈服面函数在平面应力状态下的形状, 在平面应力的情况下该屈服函数可以较好地刻画材料的屈服性质, 包括拉、压不对称性, 单轴拉压与双轴拉压之间的关系等。

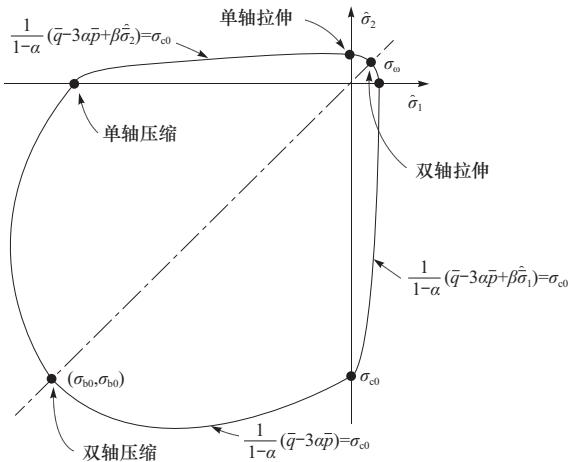


图 2 平面应力状态下 Lubliner 屈服函数的形状示意图

Fig. 2 Shape of Lubline yield function of plane stress condition

1.3 流动法则

由于 PBX 材料的剪胀特性, 所以采用非相关联塑性流动法则,

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \lambda \partial g(\bar{\sigma}) / \partial(\bar{\sigma}), \quad (3)$$

塑性流动势采用双曲线型 Drucker-Prager 函数,

$$g = \sqrt{(\Omega \sigma_{t0} \tan \phi)^2 + q^2} - p \tan \phi, \quad (4)$$

式中: ϕ 为子午面上的剪胀角; σ_{t0} 为单轴拉伸破坏应力; Ω 为偏移率。该函数是连续光滑的, 所以流动的方向是唯一的, 加卸载条件遵守 Kuhn-Tucker

条件,

$$\dot{\lambda} f = 0; \quad \dot{\lambda} \geqslant 0; \quad f \leqslant 0. \quad (5)$$

根据屈服函数和流动法则就可获得增量型弹塑性本构关系为

$$d\boldsymbol{\sigma} = \left(\mathbf{D} - \mathbf{D} \frac{1}{h} \nabla_{\boldsymbol{\sigma}} f \mathbf{D} \nabla_{\boldsymbol{\sigma}} g \right) d\boldsymbol{\epsilon}, \quad (6)$$

式中 $h = \nabla_{\boldsymbol{\sigma}} f \mathbf{D} \nabla_{\boldsymbol{\sigma}} g - H_e \phi_e \nabla_{\boldsymbol{\sigma}} f - H_t \phi_t \nabla_{\boldsymbol{\sigma}} g$.

1.4 损伤描述

由于 PBX 材料存在明显的拉压不对称的特性, 这使得只用一个变量来描述材料的损伤是比较困难的。本文采用了压缩损伤因子 d_c 与拉伸损伤因子 d_t 两个变量来表述 PBX 的损伤行为。本文采用指函数型损伤模型, 不考虑温度等因素的影响, 其演化公式为

$$\begin{cases} d_c = 1 - \exp(-\bar{\epsilon}_c^{in}/k_c) \\ d_t = 1 - \exp(-\bar{\epsilon}_t^{ek}/k_t) \end{cases}. \quad (7)$$

对于多轴加载下的材料损伤参量 d , 采用两个单轴损伤参数 d_c 和 d_t 在应力空间中加权计算而得

$$d = 1 - (1 - s_t d_c)(1 - s_c d_t). \quad (8)$$

式中: $s_t \in [0, 1]$ 和 $s_c \in [0, 1]$ 是描述材料刚度损伤恢复的应力状态的函数。

1.5 等效塑性应变的描述

双标量损伤因子 d_c 和 d_t 分别对应着两个等效塑性应变参量 $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ 和 $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$, 这是由应力空间距离函数 $r(\hat{\boldsymbol{\sigma}})$ 对 3 个主应变分量进行加权处理得到的, 同样应变率也是这样,

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{\epsilon}}_t^{pl} \\ \dot{\tilde{\epsilon}}_c^{pl} \end{bmatrix} = h(\hat{\boldsymbol{\sigma}}) \dot{\tilde{\epsilon}}^{pl} = \begin{bmatrix} r(\hat{\boldsymbol{\sigma}}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - r(\hat{\boldsymbol{\sigma}}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\hat{\epsilon}}_1 & \dot{\hat{\epsilon}}_2 & \dot{\hat{\epsilon}}_3 \end{bmatrix}^T, \quad (9)$$

其中 $r(\hat{\boldsymbol{\sigma}})$ 为应力加权因子, 其表示材料所处状态的拉、压主应力比, 其与材料的应力状态相关, 表示材料在三个方向上主应力的综合状态,

$$r(\hat{\boldsymbol{\sigma}}) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^3 \langle \hat{\sigma}_i \rangle / \sum_{i=1}^3 |\hat{\sigma}_i|, \quad (10)$$

式中符号 $\langle \cdot \rangle$ 定义为 $\langle x \rangle = (x + |x|)/2$. 当所有的主应力 $\hat{\sigma}_i$ 为正值时, $r(\hat{\boldsymbol{\sigma}})$ 为 1; 当所有的主应力 $\hat{\sigma}_i$ 为负数时, $r(\hat{\boldsymbol{\sigma}})$ 为 0. $\dot{\tilde{\epsilon}}_t^{pl} = r(\hat{\boldsymbol{\sigma}}) \dot{\tilde{\epsilon}}_t^{pl}$, $\dot{\tilde{\epsilon}}_c^{pl} = 1 - r(\hat{\boldsymbol{\sigma}}) \dot{\tilde{\epsilon}}_c^{pl}$.

2 塑性损伤模型在数值模拟中的应用

圆拱是一种典型的 PBX 构件, 在压缩载荷的作用下其应力状态较为复杂。对圆拱结构在不同

边界约束条件下的力学行为进行研究有助于加深对 PBX 结构变形破坏特性与损伤断裂机理的认识。

实验由中物院化工材料研究所完成。实验件由 PBX-X 材料制成, 试件内径 d 为 38.1 mm, 外径 D 为 76.2 mm, 高度 H 为 38.1 mm, 厚度 W 为 12.7 mm, 形状如图 4 所示。实验中为了减小顶部应力集中对测试结果的影响, 采用 R55 的圆弧作为上压板, 圆弧高度为 0.8 mm。实验时的环境温度为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 加载速率为 0.5 mm/min。实验设计了 3 种约束条件分别是: 无约束、滑块约束、粘接约束。实验前在试件的一面喷涂了散斑, 通过采用数字图像相关方法 (DICM) 对试件全时间全场的变形进行测量。

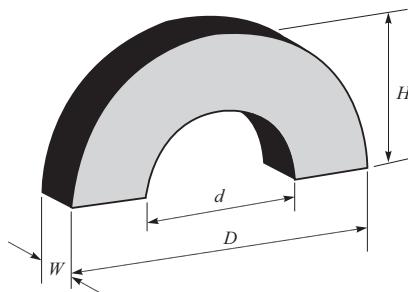


图 3 试样形状示意图

Fig. 3 Shape of experiment model

试件的材料参数由 PBX-X 在 20°C 时的拉伸、压缩曲线得到, 如图 4 所示。从图 4 中可以看出在压缩载荷作用下材料表现出较强的延性变形特征, 而在拉伸载荷下试件表现出近似脆性的特点。在数值模拟中脆断意味着材料内聚应力的不连续, 强烈的奇异性会导致计算结果难以收敛。本文通过采用数值近似的方法, 通过在拉伸曲线的峰值后增加一段软化曲线来描述材料失效后的刚度减退, 从而来减弱拉伸断裂时材料内聚应力的不连续性。本文材料的参数如表 1 所示。

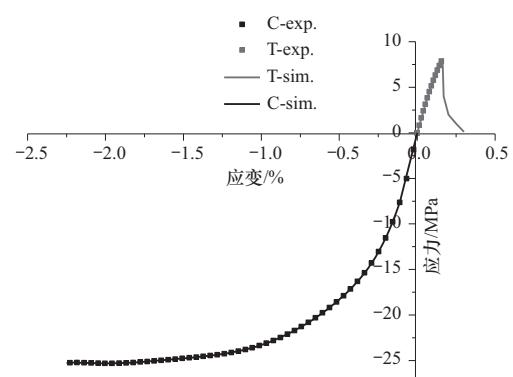


图 4 PBX-X 在 20°C 下准静态拉伸、压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Quasi-static stress-strain curve of PBX-X in tension and compression at 20°C

表 1 20°C 下 PBX-X 材料参数

Tab. 1 Material parameters of PBX-X at 20°C

E/GPa	ν	β	φ	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	σ_c/MPa	Θ	σ_t/MPa	k_c	σ_{b0}/σ_{c0}
7.22	0.368	20°	1°	1 892	8.5	0.1	3.1	0.666 7	1.16

计算时认为试件处于平面应力状态, 采用 2 维平面应力模型来进行简化。加载方法为位移加载。数值模拟中采用四边形平面应力单元网格, 网格单元尺寸约 0.5 mm。由于在计算中网格会出现较大的变形, 所以采用显式的方法来进行计算。

2.1 无外界约束条件下圆拱结构的变形破坏分析

在压缩载荷的作用下 PBX 构件与设备接触会产生摩擦从而约束试件的变形, 对结果产生较大影响。通过数字实验的方法, 对不同摩擦因数下圆拱的承载能力进行模拟。当摩擦因子处于 $0 \sim 0.3$ 的范围内时, 试件的承载能力会随着摩擦因数的升高而提升。图 5 为实验测得圆拱的时间-载荷曲线与模拟得到的不同摩擦因数下试件失效载荷的对比, 摩擦因数取 0.2 时模拟得到的失效载荷为 908.9 N, 与实验的结果的平均值 921.3 N 最为接近, 所以

下面的计算中摩擦因数均采用 0.2。

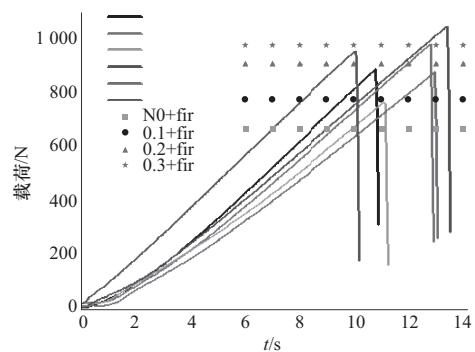


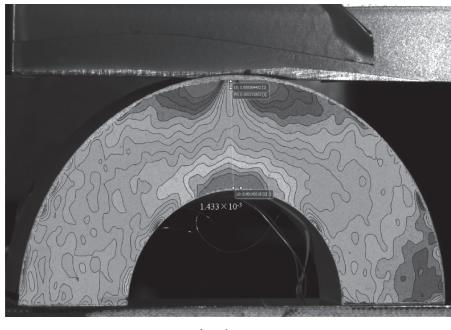
图 5 不同摩擦因数下数值模拟的失效载荷与实验值的对比

Fig. 5 Compression of failure load at different friction coefficient between experiment and simulation

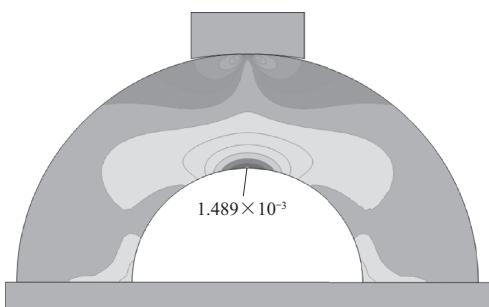
在压缩载荷作用下圆拱的变形很不均匀, 在外侧顶部产生压应变, 内侧顶部产生拉应变, 虽然压应

变的值大于拉应变但是在拉伸条件下材料的损伤发展更快,所以损伤裂纹在内侧顶部集中。图6为试件失效前一时刻在X方向的应变云图,圆拱内侧顶部

最大拉应变为 1.489×10^{-3} 而实验测得的值为 1.433×10^{-3} 。通过对比可知数值模拟得到的应变场不论是在形貌还是数值方面均与实验值吻合较好。



(a) 实验云图



(b) 数值模拟云图

图6 失效前一刻实验与模拟得到的应变云图

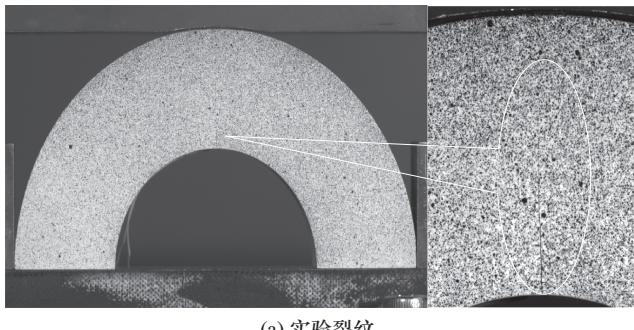
Fig. 6 Stain field of experiment and simulation at the moment before fracture

2.2 端部约束下圆拱构件的变形与破坏分析

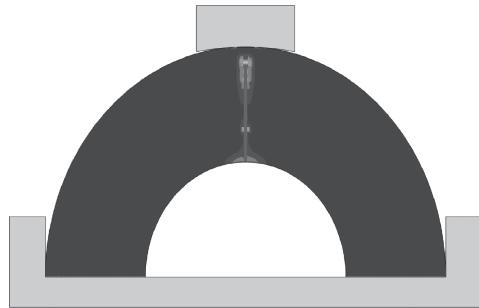
为探究端部约束条件对构件承载能力和破坏模式的影响,通过在圆拱两侧增加限制块来约束试件的位移,从而开展圆拱在端部约束条件下的加载实验。加载与测量方式与上述实验相同。

图7为滑块约束后试件的破坏形貌,通过与无约束条件下的实验对比可知试件的起裂位置没有变化,裂纹从下向上在慢慢减弱直到消失,由于滑块限制了试件的位移,所以试件没有发生倾倒。

在数值模拟中可以看出试件的损伤裂纹长度相比无约束条件下的结果较短且没有发生贯穿。图8为滑块约束下产生裂纹前一时刻实验、模拟所得的应变场云图。实验测得构件破坏前一刻的最大拉应变为 1.46×10^{-3} ,模拟得到的结果为 1.50×10^{-3} ,与无约束条件下的结果相比增加了2%。试件的最大压缩应变处位于底部外侧且较为集中,所以试件与滑块接触的部分较容易产生压缩破坏。



(a) 实验裂纹



(b) 数值模拟裂纹

图7 滑块约束下实验、模拟得到的裂纹形貌图

Fig. 7 Shape of crack taken by experiment and simulation at the condition of slider restraint

实验中发现若只采用限制块约束,试件的端部仍有小的位移。为了增强约束效果,实验中采用胶粘的方法将限制块牢牢固定(强约束),这样试件端部与滑块接触处的横向位移可以认为是0。

在端部黏接约束的条件下,产生的拉伸裂纹没有贯穿构件,在继续加载的情况下其仍能够承载,直

到产生“八”字形裂纹贯穿构件,引起二次破坏,如图9所示。图10为模拟构件从第1次破坏到第2次破坏的过程图。构件产生中间裂纹后,在继续加载的情况下新的损伤在裂纹顶端两侧形成并发展,由于计算误差的影响其两侧损伤的发展略有不对称。当损伤发展到临界值时构件的一侧先产生新的裂纹,随即

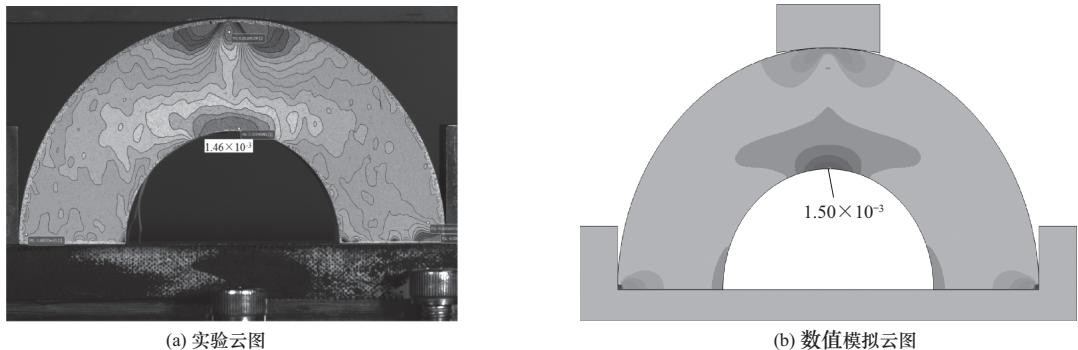


图 8 裂纹产生前一时刻的应变云图

Fig. 8 Stain field of experiment and simulation at the moment before crack initiation

另一侧的裂纹也产生形成“八”字形，并且中间裂纹的长度也在增加。由于构件被裂纹贯穿，其承载能力急剧下降，构件整体发生破坏。

图 11 为强约束条件下实验与模拟的载荷-位移曲线的对比，从图上可以看出实验与模拟的曲线均有 3 个峰值分别与产生的 3 条裂纹对应。在前半段（第 1 次破坏）数值模拟与实验吻合较好，后半段中数值模拟与实验值的趋势相同但结果相差较大，其可能是由于产生的裂纹引起了构件与夹头接触的改变和裂纹面之间的摩擦所造成的。

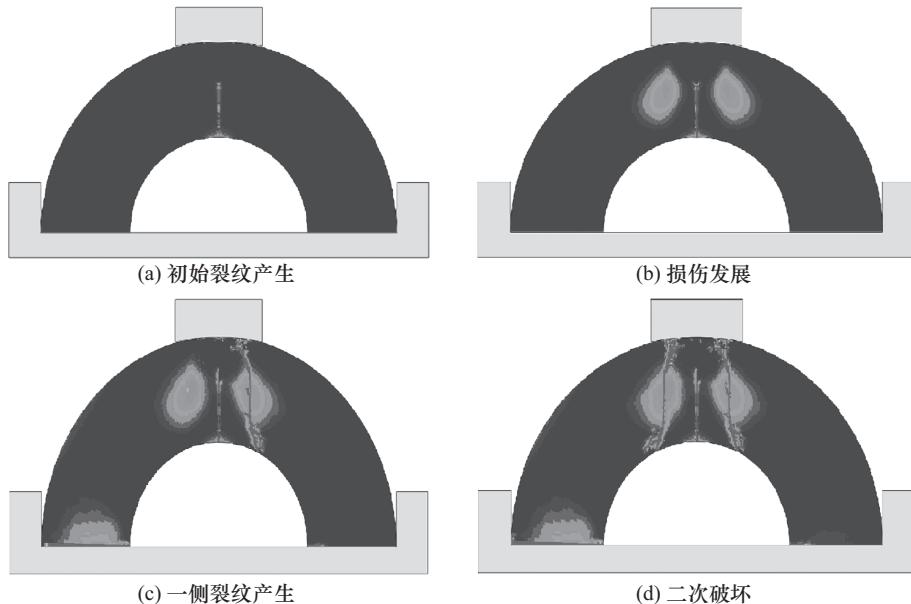
图 9 强约束条件下试件裂纹的形貌
Fig. 9 Shape of crack at the condition of strong restraint

图 10 强约束下试件从第 1 次破坏到第 2 次破坏的过程图

Fig. 10 Process from first failure to second failure at the condition of strong restraint

表 2 为不同约束条件下实验与模拟得到的构件承载能力的对比。随着端部约束的增强，试件的承载能力大大提高。相比于非约束状态，滑块约束状态下出现裂纹时的载荷提高了 87%，黏接约束状态

下出现裂纹时的载荷提高了 151%，并且在出现裂纹后构件仍然能够继续承受载荷，不会出现瞬时“崩溃”现象，所以增强边界约束有助于提高 PBX 构件的承载能力。

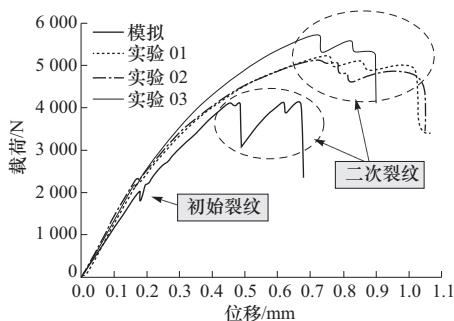


图 11 强约束下试件的位移-载荷图

Fig. 11 Displacement vs. load curve at the condition of strong restraint

表 2 不同约束条件下通过实验与模拟得到的试件承载能力的对比

Tab. 2 Bearing capacity of experiment and simulation at different constraint conditions

编号	约束状态	试验 载荷/N	平均 值/N	模拟 值/N	误差/%
09	滑块约束	1 928			
10	滑块约束	1 545	1 725.3	1 563.2	-9.4
11	滑块约束	1 703			
01	黏接约束	2 351			
02	黏接约束	2 381	2 312	2 058.3	-10.9
03	黏接约束	2 204			

经过对比可知数值计算值与实验平均值有一定的误差，并且误差随着约束状态的增强而增大。经分析其原因可能为：① PBX 材料中含有的细观缺陷会导致材料力学性能具有一定的分散性；② 显式计算会产生一些误差；③ 数值计算中采用的是平面应力单元，没有考虑圆拱与夹具在厚度方向的摩擦力，而在实验中厚度方向上的摩擦力相当于增强了边界约束，能提升结构的承载能力，并且这种效应会随着载荷的增高而增强。

3 结 论

本文详述了塑性损伤模型的理论和推导过程，并将之运用到 PBX 构件变形与破坏的分析中。通过数值模拟与实验结果的对比可得到如下结论：

① 在无端部约束的条件下，利用塑性损伤模型对不同摩擦因数下圆拱的受力行为进行模拟，发现试件的承载能力随着端部摩擦的增强而提高。经过与实验结果的对比可知，当摩擦因数取 0.2 时模拟得到的失效载荷为 908.9 N，与实验结果的平均值

921.3 N 最为接近，在该条件下模拟得到圆拱内侧顶部最大拉应变为 1.489×10^{-3} ，与实测值 1.433×10^{-3} 吻合较好。

② 在端部约束的状态下圆拱结构的承载能力有了较大提高，相比非约束状态，不仅裂纹出现时的载荷大大提高，并且在裂纹出现后构件仍然能够继续承载，不会出现瞬时崩溃现象。通过数值模拟可知端部约束限制了试件的变形，当试件出现裂纹后由于端部约束的作用，裂纹的扩展被抑制，试件还有继续承载的能力。所以增强端部约束有助于提高试件的承载能力，防止试件破坏。

③ 在黏接约束的条件下，第 1 次产生的裂纹并没有贯穿试件，在继续加载的情况下损伤裂纹在仍能够承载，直到产生“八”字形的裂纹贯穿了试件，引起二次破坏，通过数值模拟可以较好的对这一过程进行仿真，但是由于未考虑试件在厚度方向上的约束与摩擦使得后半段过程的误差较大。

参 考 文 献

- [1] 王东旭, 陈树森, 李丽洁, 等. ϵ -HNIW/F3211 PBX 界面结构力学行为模拟 [J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(2): 213–217.
Wang Dongxu, Chen Shusen, Li Lijie, et al. Simulation on the mechanical behavior of the interface structure in ϵ -HNIW/F3211 PBX[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(2): 213–217. (in Chinese)
- [2] 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 Shangkun, Huang Xicheng, Wang Pengfei. Recent advances in the investigation on mechanical properties of PBX [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2016, 39(4): 1–11. (in Chinese)
- [3] 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 Pengwan, Huang Fenglei. Damage theory and application of energetic materials[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [4] Siviour C R, Laity P R, Proud W U, et al. High strain rate properties of a polymer-bonded sugar: Their dependence on applied and internal constraints [J]. Proceedings of the Royal Society: A, 2008, 464 (2093): 1229–1255.
- [5] 李俊玲, 傅华, 谭多望, 等. PBX 炸药的拉伸断裂损伤分析 [J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 624–629.
Li Junling, Fu Hua, Tan Duowang, et al. Fracture dam-

- age analysis of PBX[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(6): 624–629. (in Chinese)
- [6] 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 Kaida, Li Shengtao, Chen Pengwan. Study on fracture behavior of the brazilian test of PBX explosives based on XFEM[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(2): 111–117. (in Chinese)
- [7] Rangaswamy P, Thompson D G, Liu Cheng. Modeling the mechanical response of PBX 9501[C]// Proceedings of the 14th International Detonation Symposium. Idaho: [s. n.], 2010: 126–132.
- [8] 刘晨, 蓝林刚, 唐明峰, 等. 数字图像相关方法分析 PBX 带孔板拉伸应变场[J]. 含能材料, 2016, 24(4): 368–374.
Liu Chen, Lan Lingang, Tang Mingfeng, et al. Strain analysis for PBX plate with hole under tension based on digital image correlation method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2016, 24(4): 368–374. (in Chinese)
- [9] Liu C, Thompson D G. Crack initiation and growth in PBX 9502 high explosive subject to compression[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2014, 81: 101004–1–13.
- [10] 黄西成, 李尚昆, 魏强, 等. 基于 XFEM 与 Cohesive 模型分析 PBX 裂纹产生与扩展[J]. 含能材料, 2017, 25(8): 694–700.
Huang Xicheng, Li Shangkun, Wei Qiang, et al. De-
- formation and fracture analysis of PBX under compression based on plasticity damage theory[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(8): 694–700. (in Chinese)
- [11] Gratton M, Gontier C, Bouchou A, et al. Mechanical characterisation of a viscoplastic material sensitive to hydrostatic pressure[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2009, 28: 935–947.
- [12] Gruau C, Picart D, Belmas R. Ignition of a confined high explosive under low velocity impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36: 537–550.
- [13] Wiegand D A. Constant strain criteria for mechanical failure of energetic materials[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2003, 21: 109–124.
- [14] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
Yu Tianqing, Qian Jicheng. *Damage theory and application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [15] Lubliner J, Oliver J, Oller S. A plastic-damage model for concrete[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25: 299–329.
- [16] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124 (8): 892–900.

(责任编辑: 刘雨)