

文章编号: 1006-9941(2017)02-0113-05

基于三种强度准则的 PBX I 型裂纹尖端失效区研究

董天宝, 唐 维, 温茂萍, 张巍耀, 韦兴文

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 为了描述高聚物粘结炸药(PBX)裂纹尖端失效区域,采用 Mohr-Coulomb, Twin-shear 和 Drucker-Prager 强度准则,对 PBX I 型裂纹尖端失效区进行研究,得到了描述 PBX 拉压不对称的裂纹尖端失效区表达式。研究表明,Drucker-Prager 强度准则综合考虑了材料拉压比、平均应力及偏应力等因素,求解的裂纹尖端失效区相对最大。材料拉压比对裂纹尖端失效区有着显著影响,拉压比越小,材料拉压不对称越严重,裂纹尖端失效区越大。温度对 PBX 材料综合力学性能影响很大,60 °C 下裂纹尖端失效区较 20 °C 下显著增大。

关键词: 高聚物粘结炸药(PBX); 裂纹尖端失效区; 强度准则

中图分类号: TJ55; O34

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.004

1 引 言

在武器系统中,高聚物粘结炸药(PBX)部件除了具备固有的爆轰性能外,常以承受载荷的结构件形式存在。在加工、装配、运输及使用过程中,PBX 部件常处于复杂受力状态下,可能会产生裂纹并有一定的扩展,从而影响武器系统的可靠性与安全性。

小范围屈服下线弹性断裂力学认为,裂纹尖端附近应力不可能趋于无穷大,在裂纹尖端核心区域存在一定的屈服区。屈服区内材料发生屈服失效,屈服区外材料依然满足线弹性断裂力学理论^[1]。本文研究的 PBX 材料拉伸过程没有明显的屈服阶段,而裂纹尖端附近应力又不可能趋于无穷大,因此认为裂纹尖端存在相对更小的失效破坏区域。在失效区内 PBX 材料发生力学失效,失效区外材料依然满足线弹性断裂力学理论。美国阿拉莫斯实验室的 Liu C 等^[2-3]对 PBX-9501 和 PBX-9502 裂纹长期研究发现,裂纹尖端附近存在较大的损伤区域(Damage Zone)。根据其关于裂纹尖端区域应变场的监测,以及 PBX-9502 拉伸破坏应变(0.3%左右),可以估计出 PBX-9502 裂纹尖端损伤区尺寸大约

为 3 mm。PBX-9502 材料力学性能体现出较软的特点,在其损伤区边界附近区域材料仍保有力学性能,中心区域则出现材料力学失效,即本文研究的裂纹尖端失效区。美国空军实验室 Liu C T^[4-5]对另外一种颗粒填充复合含能材料(固体推进剂)的裂纹研究也发现,推进剂材料有相对更加明显的塑形力学特性,其裂纹尖端区域塑性屈服区域非常明显。因此,PBX 裂纹尖端失效区的理论研究具有一定的工程应用价值,有助于更加深入认识 PBX 裂纹尖端附近核心区域特征。

PBX 作为一类以高聚物粘接剂为连续相、高能炸药颗粒为分散相的非均质颗粒高体积填充的复合材料,由于炸药品粒、粘接剂和炸药-粘接剂界面的强度互不相同,因此 PBX 力学行为表现出拉压不对称的特性^[6]。由于粘接剂材料力学性能受温度影响非常大,在不同温度区间,PBX 力学性能也有很大差异^[7]。因此,PBX 裂纹尖端失效区研究一定要充分考虑材料拉压比和温度的影响。

根据断裂力学理论,PBX 裂纹尖端失效区计算准确与否依赖于强度准则的选取。唐维等^[8-9]基于单轴加载技术,从实验和数值模拟两个方面,对比分析四种常用强度准则在炸药强度分析中的适用性。从描述精度来看,Mohr-Coulomb 准则最优,Twin-shear 和 Drucker-Prager 准则次之,最大正应力准则由于不能体现出材料拉压比的特点描述精度最差。王鹏飞等^[10]在对 PBX 厚壁结构件热应力破坏研究中,对几种常用强度准则对比分析发现,Drucker-Prager 准则综合考虑

收稿日期: 2016-05-18; 修回日期: 2016-07-16

基金项目: 中物院化工材料研究所创新基金(2015KJCX09)

作者简介: 董天宝(1989-),男,研究实习员,主要从事含能材料力学性能研究。e-mail: dongtianbao@caep.cn

通信联系人: 韦兴文(1977-),男,副研究员,主要从事炸药及高分子材料力学性能研究。e-mail: weixw@caep.cn

了拉压比、平均应力和偏应力对材料强度的影响。Drucker-Prager 准则更适合于 PBX 炸药强度分析,能描述 PBX 双轴拉伸强度比单轴拉伸强度略低的现象。

本研究基于 Mohr-Coulomb、Twin-shear 和 Drucker-Prager 三种强度准则,计算了 PBX I 型裂纹裂尖失效区。根据三种强度准则本身特点,分析其在 PBX 裂纹尖端失效区计算中的适用性。利用 Drucker-Prager 准则的优点,研究材料拉压比和温度对 PBX I 型裂纹尖端失效区大小的影响。

2 强度准则

PBX 材料具有明显的拉压强度不相等特性,本文选取已经应用于 PBX 破坏失效分析中的强度准则,即 Mohr-Coulomb 准则、Twin-shear 准则和 Drucker-Prager 准则。表达式分别如下^[8]:

$$\sigma_1 - \alpha\sigma_3 = \sigma_t \quad (1)$$

$$\sigma_1 - \frac{\alpha}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t \quad \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha} \quad (2a)$$

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_t \quad \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha} \quad (2b)$$

$$\begin{cases} \tau_8 + \frac{\sqrt{2}(1-\alpha)}{(1+\alpha)}\sigma_8 = \frac{2\sqrt{2}\sigma_t}{3(1+\alpha)} \\ \tau_8 = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\ \sigma_8 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \end{cases} \quad (3)$$

式中, σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为第一、第二和第三主应力。材料破坏强度拉压比为 $\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c}$, σ_t 和 σ_c 分别为材料拉伸和压缩破坏强度。

3 裂纹尖端失效区

3.1 裂纹尖端附近应力场

平面应力状态下, I 型裂纹尖端区域主应力场为^[1]:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2}) \\ \sigma_2 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2}) \\ \sigma_3 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, r 、 θ 为裂纹尖端附近点的极坐标, K_I 为 I 型裂纹应力强度因子。

平面应变状态, I 型裂纹尖端区域主应力场为^[1]:

当 $0 \leq \theta < 2\arcsin(1-2\nu)$ 时

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2}) \\ \sigma_2 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2}) \\ \sigma_3 = \frac{2\nu K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (5a)$$

当 $2\arcsin(1-2\nu) \leq \theta < \pi$ 时

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2}) \\ \sigma_2 = \frac{2\nu K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \\ \sigma_3 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2}) \end{cases} \quad (5b)$$

式中, ν 为材料泊松比。

3.2 Mohr-Coulomb 准则失效区

对于平面应力,将式(4)代入式(1)可推出裂纹尖端失效区失径为:

$$r = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_t^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \right]^2 \quad (6)$$

对于平面应变,当 $0 \leq \theta < 2\arcsin(1-2\nu)$ 时,将式(5a)代入式(1)可推出裂纹尖端失效区失径为:

$$r = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_t^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} (1 - 2\alpha\nu + \sin \frac{\theta}{2})^2 \quad (7a)$$

当 $2\arcsin(1-2\nu) \leq \theta < \pi$ 时,将式(5b)代入式(1)可推出裂纹尖端失效区失径为:

$$r = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_t^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[1 - \alpha + (1 + \alpha) \sin \frac{\theta}{2} \right]^2 \quad (7b)$$

3.3 Twin-shear 准则失效区

对于平面应力,当 $0 \leq \theta < 2\arcsin \frac{\alpha}{2+\alpha}$ 时,将式(4)代入式(2b)可推出裂纹尖端失效区失径为:

$$r = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_t^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \quad (8a)$$

当 $2\arcsin \frac{\alpha}{2+\alpha} \leq \theta < \pi$ 时,由式(4)和式(2a)可推出裂纹尖端失效区失径为:

$$r = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_t^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[1 - \frac{\alpha}{2} + (1 + \frac{\alpha}{2}) \sin \frac{\theta}{2} \right]^2 \quad (8b)$$

对于平面应变问题,当 $0 \leq \theta < 2\arcsin \frac{\alpha(1-2\nu)}{2+\alpha}$ 时,由式(5a)和式(2b)可推出裂纹尖端失效区失径为:

$$r = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_t^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} [1 - 2\alpha\nu]^2 \quad (9a)$$

当 $2\arcsin \frac{\alpha(1-2\nu)}{2+\alpha} \leq \theta < 2\arcsin(1-2\nu)$ 时,由式

(5a)和式(2a)可推出裂纹尖端失效区失径为:

$$r = \frac{K_1^2}{2\pi\sigma_1^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[1 - \frac{\alpha}{2} - \alpha\nu + \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \sin \frac{\theta}{2} \right]^2 \quad (9b)$$

当 $2\arcsin \frac{\alpha(1-2\nu)}{2+\alpha} \leq \theta < \pi$ 时,恒有 $\sigma_2 \leq$

$\frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha}$,失径与式(9b)一样。

3.4 Drucker-Prager 准则失效区

对于平面应力,将式(4)代入式(3)可推出裂纹尖端失效区失径为:

$$r = \frac{K_1^2 (1+\alpha)^2}{8\pi\sigma_1^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[\frac{2(1-\alpha)}{1+\alpha} + \sqrt{1+3 \sin^2 \frac{\theta}{2}} \right]^2 \quad (10)$$

对于平面应变,将式(5a)或(5b)代入式(3)可推出裂纹尖端失效区失径为:

$$r = \frac{K_1^2 (1+\alpha)^2}{8\pi\sigma_1^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[\frac{2(1+\nu)(1-\alpha)}{1+\alpha} + \sqrt{(1-2\nu)^2 + 3 \sin^2 \frac{\theta}{2}} \right]^2 \quad (11)$$

当材料拉压比 $\alpha = 1$ 时,式(10)和(11)退化为

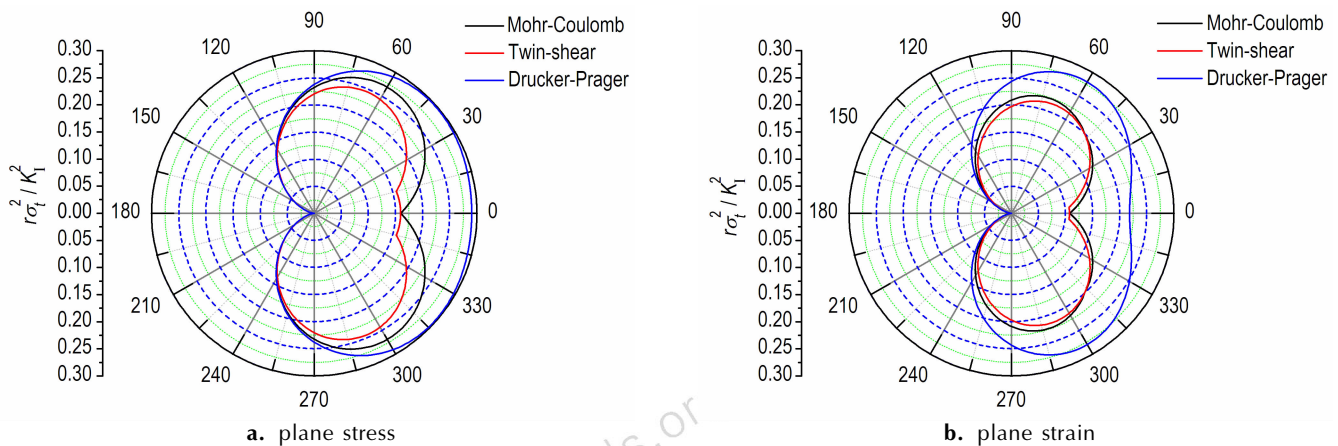


图 1 不同强度准则下 PBX I型裂纹尖端失效区($\alpha=0.3, \nu=0.3$)

Fig. 1 PBX mode I crack tip failure zone based on different strength criterion

4.2 拉压比的影响

为了研究材料拉压比对裂纹尖端失效区的影响,利用 Drucker-Prager 计算了不同拉压比下裂纹尖端失效区,如图2所示。PBX材料拉压比约为0.3左右。图2给出了不同拉压比下,PBX 裂纹尖端失效区大小。材料拉压比对裂纹尖端失效区有着非常大的影响,随着拉压比的减小,失效区尺寸显著增大,平面应变情形下这种增大趋势更加明显。比较图 2a 和图 2b,平面应变比平面应力失效区相对较小,特别是在 $|\theta|$ 较小区域,这种现象更加显著。

表 1 给出当 $\theta=0^\circ$ 时,PBX I 型裂纹尖端失效区无

Von-Mises 准则裂纹尖端失效区失径。

对于 I 型裂纹,其裂纹失效区具有关于裂纹面对称的特点,因此只需求出 $0 \sim 180^\circ$ 的失径, $180^\circ \sim 360^\circ$ 失径根据对称性可作出。

4 结果与讨论

4.1 三种强度准则适用性

基于 Mohr-Coulomb、Twin-shear 和 Drucker-Prager 三种强度准则计算的 PBX I 型裂纹尖端失效区如图 1 所示。Mohr-Coulomb 准则比 Twin-shear 准则计算的裂尖失效区相对更大一些,平面应力下这个差别更加明显。Drucker-Prager 准则在考虑材料拉压比的基础上,综合考虑了平均应力和偏应力的影响,计算的裂尖失效区相对最大,认为 Drucker-Prager 准则相对更适合 PBX 裂尖失效区的计算。比较图 1a 和图 1b可以看出,平面应力比平面应变下 I 型裂纹尖端失效区相对更大。

量纲失径 $r\sigma_1^2/K_1^2$ 。表中数据可见,随着材料拉压比的减小,平面应变和平面应力下裂纹尖端失效区失径比明显增大。说明不断减小的拉压比对平面应变下失效区的影响更大。

4.3 温度的影响

本研究以 TATB 基某 PBX 为例,基于 Drucker-Prager 强度准则,在不同温度下,计算平面应变下该炸药 I 型裂纹尖端极限失效区。借鉴混凝土结构裂纹尖端塑性屈服区计算的材料参数选取^[11],计算所需的相关材料参数见表 2。由于该型 PBX 的粘结剂玻璃化温度较低,其高温条件下的断裂韧性和拉伸压缩强度均明显降低。

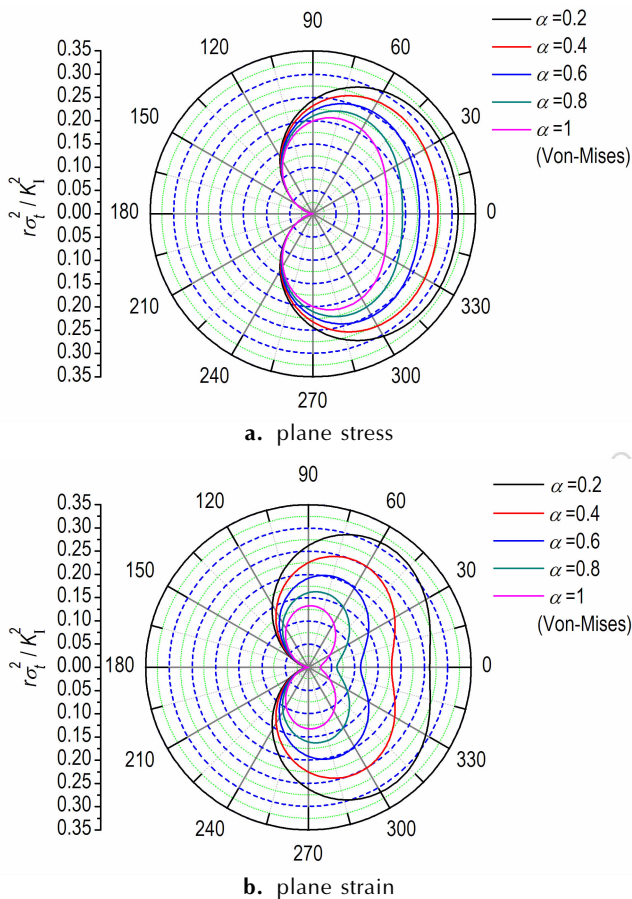


图2 材料拉压比对裂纹尖端失效区的影响
Fig.2 Effects of tension-compression strength ratio of the material on the crack tip failure zone

表1 $\theta=0^\circ$ 时裂纹尖端失效区无量纲矢径
Table 1 Dimensionless radius vector of crack tip failure zone at $\theta=0^\circ$

dimensionless radius vector	$\alpha=1$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.2$
r_0	0.159	0.193	0.229	0.269	0.312
r'_0	0.025	0.061	0.112	0.179	0.261
r'_0/r_0	0.157	0.316	0.489	0.665	0.837

Note: r_0 (plane stress) and r'_0 (plane strain) are crack tip failure zone dimensionless radius vector, α is tension-compression ratio.

表2 PBX 断裂及力学性能参数^[12]
Table 2 Fracture and mechanics properties parameters of PBX

temperature / $^\circ\text{C}$	K_{IC} / (MPa \cdot m ^{1/2})	tension strength σ_t /MPa	compression strength σ_c /MPa	tension-compression strength ratio α	Poisson ratio ν
20	0.392	7.70	30.3	0.254	0.296
60	0.325	5.00	17.5	0.286	0.290

Note: K_{IC} is plane strain fracture toughness, σ_t is tension strength, σ_c is compression strength.

图3 给出了该 PBX 平面应变 I 型裂纹尖端极限失效区区域。由图3 可见,当 $\theta=0^\circ$ 时,常温 20°C 下,该 PBX 裂纹尖端失效区失径约为 0.61 mm 。高温 60°C 下,失效区失径约为 0.95 mm ,失径显著增大,这是粘接剂超过其玻璃化温度 ($T_g=35\sim 55^\circ\text{C}$)^[12],材料发生软化导致的。

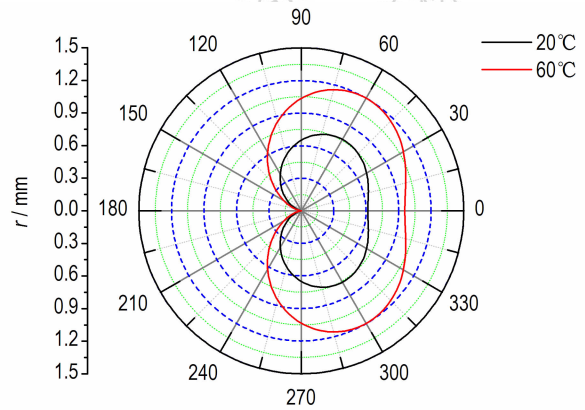


图3 不同温度下 PBX I 型裂纹尖端极限失效区(平面应变)
Fig.3 PBX mode I crack tip ultimate failure zone at different temperature (plane strain)

5 结论

基于几种常用于 PBX 破坏分析的强度准则,计算了 I 型裂纹尖端失效区,给出了反应材料拉压比性能差异的裂纹尖端失效区失径表达式。获得了以下结论:

(1) 基于不同强度准则计算的 PBX 裂纹尖端失效区差别很大,选取适合 PBX 材料的强度准则非常重要。Drucker-Prager 强度准则综合考虑了材料拉压比、平均应力及偏应力等因素,计算的裂纹尖端失效区相对最大,认为该准则更适合 PBX 裂纹尖端失效区求解。研究发现,平面应力下比平面应变下裂纹尖端失效区相对更大。

(2) 材料拉压比对于裂纹尖端失效区影响非常大,随着拉压比的减小,裂纹尖端失效区明显增大。PBX 属于典型的拉伸和压缩力学性能不对称的复合材料,其裂纹尖端失效区计算需要充分考虑材料拉压比的影响。

(3) PBX 材料断裂和力学性能参数受温度影响非常大。基于 Drucker-Prager 强度准则,当 $\theta=0$ 时, 20°C 下的裂纹尖端极限失效区失径为 0.61 mm ; 60°C 下 PBX 裂纹尖端极限失效区失径为 0.95 mm 。

裂纹尖端极限失效区在高温 60 °C 下显著增大。

参考文献:

- [1] 程靳, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 24-29.
CHENG Jin, ZHAO Shu-shan. Fracture mechanics[M]. Beijing: Science press, 2006: 24-29.
- [2] Liu C. Fracture of the PBX 9501 high explosive[C]// Shock Compression of Condensed Matter, American Institute of Physics, 2003: 786-791.
- [3] 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.
- [4] Liu C T. Crack growth behavior in a solid propellant[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1997, 56(1): 127-135.
- [5] Liu C T, Tam M. Investigating the effects of pressure on the near tip behavior and crack growth in a particulate composite material [C]// Fatigue Damage of Materials: Experiment and Analysis, 2003: 243-251.
- [6] Belmas R, Reynier P. Mechanical behavior of pressed explosives [C]// International Symposium Energetic Materials Technology, 1994: 360-365.
- [7] Rae P J, Parker G R, Dickson P M. The high temperature stress/strain and stress relaxation response of unconfined PBX 9501 between 21 and 210 °C[C]// 14th International Detonation Symposium, 2010: 677-683.
- [8] 唐维, 李明, 温茂萍, 等. 四种强度准则在高聚物粘结炸药强度分析中的适应性[J]. 固体力学学报, 2013, 34(6): 550-556.
- TANG Wei, LI Ming, WEN Mao-ping, et al. Adaptability of four strength criteria in polymer bonded explosives strength analysis [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2013, 34(6): 550-556.
- [9] 唐维, 颜熹琳, 李明, 等. 基于间接三轴拉伸破坏试验的某 TATB 基 PBX 强度准则适应性分析[J]. 含能材料, 2015, 23(6): 532-536.
- TANG Wei, YAN Xi-lin, LI Ming, et al. Adaptability analysis of strength criterion on TATB based PBX by indirect triaxial tensile collapse test [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(6): 532-536.
- [10] 王鹏飞, 黄西成, 何颖波, 等. 热弹性环境下 HMX 基 PBX 厚壁结构件失效破坏分析[J]. 含能材料, 2016, 24(2): 129-136.
- WANG Peng-fei, HUANG Xi-cheng, HE Ying-bo, et al. Failure damage analysis of HMX based PBX thick wall structure under thermoelastic environment [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(2): 129-136.
- [11] 赵均海, 魏雪英, 马淑芳. 混凝土结构 I 型裂纹裂尖塑性区研究 [J]. 工程力学, 2006, 23(9): 141-145.
- ZHAO Jun-hai, WEI Xue-ying, MA Shu-fang. Crack tip plastic zone of type I crack for concrete structure [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(9): 141-145.
- [12] 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.

Failure Zone of PBX Mode I Crack Tip Based on Three Strength Criteria

DONG Tian-bao, TANG Wei, WEN Mao-ping, ZHANG Wei-yao, WEI Xing-wen

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

Abstract: To describe the crack tip failure zone of polymer bonded explosive (PBX), mode I crack tip failure zone of PBX were studied based on the Mohr-Coulomb, Twin-shear and Drucker-Prager strength criterion. The expressions describing the crack tip failure zone of the tension-compression asymmetry for PBX were obtained. Results show that the Drucker-Prager strength criterion takes into account the factors such as tension-compression strength ratio, average stress and deviatoric stress, the solving crack tip failure zone is the biggest. The tension-compression ratio of the material has a significant effect on the crack tip failure zone, the smaller the tension-compression ratio, the more serious the tension-compression asymmetry of material, the greater the crack tip failure zone. The temperature has great influence on the mechanical properties of PBX materials, and the crack tip failure zone at 60 °C is significantly larger than that at 20 °C.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); crack tip failure zone; strength criterion

CLC number: TJ55; O34

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.004