

文章编号: 1006-9941(2015)06-0532-05

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

唐维^{1,2,4}, 颜熹琳², 李明², 温茂萍², 刘彤³, 章定国¹

(1. 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 3. 西南科技大学, 四川 绵阳 621010; 4. 中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621999)

摘要: 强度问题关系炸药部件的结构完整性和服役安全性, 是炸药部件结构强度评估的基础。基于单轴加载技术, 设计了圆柱试件的端部约束拉溃试验, 研究了三轴间接拉伸破坏时某 TATB 基高聚物粘结炸药 (PBX) 的强度特性。依据试验边界条件, 利用有限元方法定量分析了临界载荷下试件内部的应力场, 最后采用最先破坏位置的三向主应力数据分析了三种典型强度准则 (Uniaxial-strength, Mohr-Coulomb, Twin-shear) 描述三轴拉伸破坏的适应性。就安全阈值而言, 现炸药工程中使用的 Uniaxial-strength 准则, 三轴压缩时安全阈值最高, 达 43.77%, 但也不能安全预测三轴拉伸应力下该 PBX 的破坏行为; 就描述精度来看, Uniaxial-strength 准则最优, Mohr-Coulomb 准则次之, Twin-shear 准则最差, 试验值均比理论值偏大, 三者依次为 16.90%、19.62% 和 24.56%; 试验中该 TATB 基 PBX 三轴拉伸应力下的强度为单轴拉伸强度的 0.831 倍, Mohr-Coulomb 准则不能准确描述三轴拉伸应力下强度下限, 分析表明静水压力的影响是造成这一结果的关键原因, 建立高描述精度的多轴强度准则须考虑静水压力的影响。

关键词: 高聚物粘结炸药 (PBX); 强度准则; 三轴拉伸应力

中图分类号: TJ55; O346.4

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.005

1 引言

炸药部件在武器系统中除需提供能量外, 还要承受装配、服役环境变化等产生的力学载荷, 美国 Los Alamos 实验室的研究^[1]表明, 破坏的炸药部件不仅影响武器系统的战场表现, 更有可能诱发意外爆炸。目前炸药工程中常采用单轴强度准则 (Uniaxial-strength, 认为某点的最大拉/压应力超过其单轴拉伸/压缩强度时材料破坏, 又称最大主应力准则或第一强度准则^[2]) 评估炸药部件的承载能力, 实践中炸药部件的意外破坏事件表明了单轴强度准则的局限性, 研究高聚物粘结炸药 (Polymer Bonded Explosive, PBX) 复杂应力下的强度特性及其适用准则对于保障武器的安全性和可靠性具有现实意义。

强度问题命题简单, 求解复杂, 自 15 世纪达芬奇和伽利略研究铁丝和石料的单轴拉伸强度^[2]以来, 人

们迄今已针对不同材料提出了“上百个模型或准则”^[3], 遗憾的是还未有满足所有材料各种应力状态的准则出现。俞茂宏^[4]根据强度准则描述中主剪应力数目的多寡将众多的准则分为单剪、双剪和三剪三个系列, 该方法在业界获得了广泛的认同。炸药材料的强度问题系关炸药部件的结构完整性和服役安全性, 是破坏力学研究和结构强度评估的基础, 问题的重要性引起了业内科研人员的关注, 但由于多轴加载手段的缺失, 目前的研究大都只能基于单轴加载手段进行。Li 等^[5]采用单剪 Mohr-Coulomb 准则^[6]分析了三种炸药材料的单轴动态破坏试验, 结果表明仅有一种材料的分析结果满足工程需要; 傅华^[7]、李俊玲^[8]基于霍普金森杆研究了单轴应力下 PBX 破坏强度等参量的率相关性; 蓝林钢^[9]、赵玉刚^[10]分别就单轴动态拉伸时 PBX 的力学响应和强度特性进行了研究。上述工作有助于认识 PBX 单轴应力下的强度特性, 而对于复杂应力下的强度问题的指导意义不大, 事实上, 目前尚未系统开展过 PBX 的多轴力学性能研究, 人们对复杂应力下 PBX 的强度认识还较初浅, 不能回答炸药部件装配预紧等复杂应力环境下的强度特性和破坏行为, 笔者基于端部约束压溃试验获得了三轴压缩应力下 3 种典型强度准则描述 PBX 强度特性的适应性^[11], 而实际工程中拉伸应力主导破坏的风险远高于

收稿日期: 2014-04-16; 修回日期: 2014-07-18

基金项目: 国家自然科学基金 (11372292、11302198、11102189), 中物院发展基金 (2013A0203006、2014B0201020)

作者简介: 唐维 (1981-), 男, 助理研究员, 主要从事炸药及其部件的热力学行为研究。e-mail: Will_ton@126.com

通信联系人: 刘彤 (1964-), 男, 研究员, 从事武器系统中的工程力学问题研究。e-mail: Tliu@swust.edu.cn

压缩应力,这是因为 PBX 单轴拉伸强度常不足单轴压缩强度的三分之一。本研究基于单轴加载技术,依据端部约束拉溃试验,并在先前研究^[11]的基础上采用试验测试结合数值模拟的方法,分析 Uniaxial-strength^[2]、Mohr-Coulomb^[6] 和 Twin-shear^[3] 三种典型强度准则描述某 TATB 基 PBX 三轴拉伸应力下强度特性的适应性。

2 三轴拉伸应力破坏试验

2.1 试验设计

研究对象为某 TATB 基 PBX,试验温度(20±2) °C,试验测得该批次试件的杨氏模量为 7.37 GPa,单轴拉伸强度为 8.83 MPa,单轴压缩强度 27.61 MPa,泊松比 0.365,图 1 为 20 °C 下三发 PBX 样品单轴拉伸时的应力应变曲线。

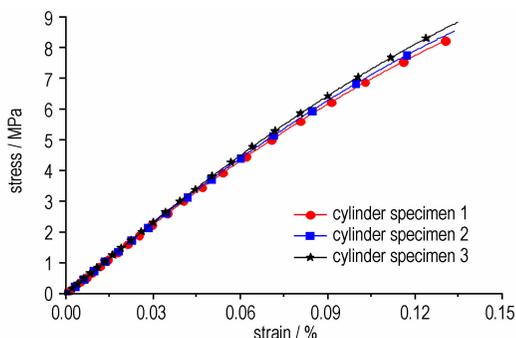


图 1 TATB 基 PBX 单轴拉伸时的应力应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of TATB based PBXs under uniaxial tension

研究中基于单轴材料试验机通过调节试样边界条件实现复杂应力下样品的破坏,试验设计遵循两个基本原则:一是试件形状和边界设置尽可能简单,以便于测试;二是试件破坏时的应力尽可能复杂。为此,选取不锈钢(1Cr18Ni9Ti,杨氏模量 206 GPa,泊松比 0.3)为工装材料,其模量为 TATB 基 PBX 的 27.95 倍,边界约束时可视为刚性约束;不同约束方式的有限元计算表明,端部约束条件下的拉伸破坏试验应力场既满足试验要求(详见 3.1),又便于实现;进一步的探索试验表明,试件同平头底座间由于粘接力局限不能造成试件的破坏,经改进,最终确定了以 $\Phi 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 圆柱体试件为测试对象,粘接头开槽(深度 3 mm 直径 $\Phi 20\text{ mm}$)粘接(图 2);试验中采用粘接性能优良且与该 PBX 相容性良好的自制配方粘接胶,粘接后样品端部及嵌入的 3 mm 柱面段均可视为边界约束。

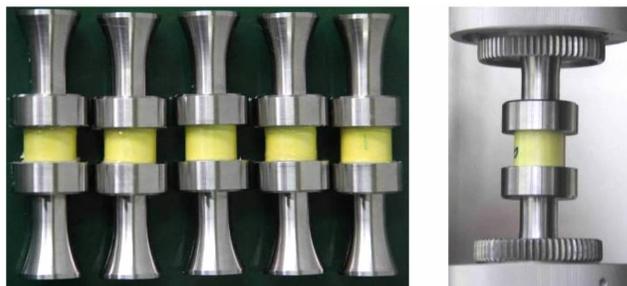


图 2 端部约束圆柱体试件的拉溃试验示意图

Fig.2 Sketch map of end-restraint cylinder collapse tests under tension conditions

2.2 试验结果

试验在 INSTRON5582 型材料试验机上进行,拉溃试验过程中 5 发样品的载荷-时间曲线如图 3 所示,轴向破坏载荷数值见表 1,由表 1 可知轴向破坏载荷的均值为 841.60 N;试件的破坏面形态如图 4(因仅三发样品的破坏面较清晰,故未全部列出),最先破坏的位置发生在试件与工装的粘接处,整个破坏面呈现较为规则的圆锥状,依据试验样品正视图的测试结果,破坏面的水平夹角约 $14^\circ \sim 15^\circ$ 。

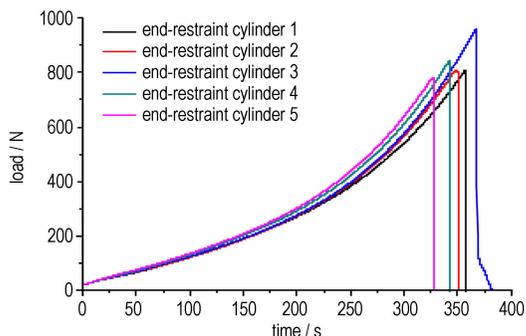


图 3 端部约束拉溃试验的载荷时间曲线

Fig.3 Load-time curves of collapse tests

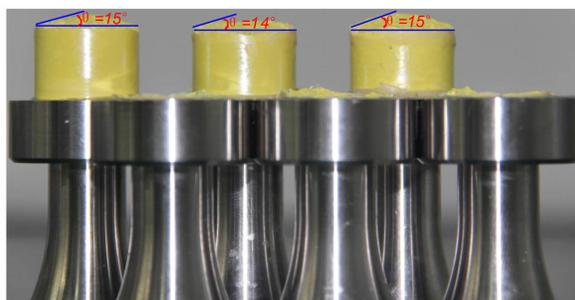


图 4 端部约束拉溃试验的试件破坏面形态

Fig.4 Failure surfaces after collapse tests

表 1 拉溃试验中的最大轴向载荷

Table 1 The maximum axial load in collapse tests

| sample | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | average |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| load/N | 808.74 | 807.31 | 963.67 | 846.26 | 782.02 | 841.60 |

3 分析与讨论

3.1 三轴拉伸应力下的强度特性

试件尺寸为 $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 边界约束条件为距试件端部 3 mm 以内的区域为刚性约束。如图 1 所

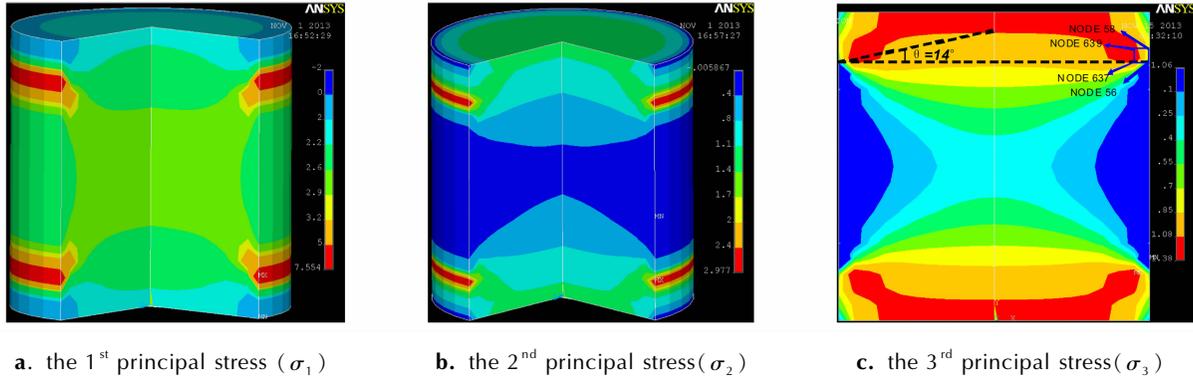


图 5 临界轴向载荷下的三向主应力分布

Fig. 5 Three-dimensional principal stress distribution under critical axial load

由图 5 可知,最大第一、第二主应力出现在试件与工装的粘接处,最大数值分别为 7.554 MPa 和 2.977 MPa (数值为正表示拉应力);最大第三主应力出现在试件端部与工装接触的区域,数值在 1.08 ~ 1.38 MPa 之间,最先破坏区域单元的三向主应力如表 2,该单元的节点编号如图 5c 右上,最先破坏位置的节点编号为 56,它所处的应力状态为三轴拉伸应力;另外结合图 4 和图 5 可以发现,破坏面的水平夹角与三向主应力分布存在关联,研究 TATB 基 PBX 复杂应力下的强度问题需要兼顾三向主应力的综合作用。

表 2 最先破坏区域的三向主应力

Table 2 Three-dimensional principal stress of initial failure position MPa

| node no. | σ_1 | σ_2 | σ_3 |
|----------|------------|------------|------------|
| 56 | 7.5536 | 2.9774 | 0.6419 |
| 58 | 2.5699 | 1.2078 | 0.7613 |
| 637 | 2.4748 | 1.5424 | 1.3794 |
| 639 | 2.1163 | 1.1449 | 1.1342 |

现有研究^[11]获得了三轴压缩应力下该 TATB 基 PBX 的强度特性规律: Uniaxial-strength 准则(式(1))的理论预测值低于试验值最多,安全程度最高; Mohr-Coulomb 准则(式(2))可用于表征表观强度下限, Twin-shear 准则(式(3))可用于描述表观强度上限,式中 σ_t 、 σ_c 及 α 分别表示单轴拉伸强度、单轴压缩

强度及二者之比, σ_t 和 σ_c 的单位为 MPa, 均取正值, α 为无量纲数。本研究基于端部约束拉溃试验数据, 考察上述三个强度准则描述三轴拉伸应力破坏的适应性, 描述误差修正为公式(4)中的算法。

$$\sigma_1 = \sigma_t \quad \text{or} \quad -\sigma_3 = \sigma_c \quad (1)$$

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \sigma_3 = \sigma_t \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sigma_1 - \frac{\alpha}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t, & \left(\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha \sigma_3}{1 + \alpha} \right) \\ \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \alpha \sigma_3 = \sigma_t, & \left(\sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha \sigma_3}{1 + \alpha} \right) \\ \alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Representation error} = \frac{\sigma_{1\text{theory}} - \sigma_{1\text{test}}}{\sigma_{1\text{test}}} \times 100\% \quad (4)$$

依据表 2 的数据, 采用 Uniaxial-strength 准则(式(1))描述时, $\sigma_{1\text{theory}}$ 为单轴拉伸强度, 8.83 MPa, 理论预测的描述误差较试验值偏大, 为 16.90%。

$$\sigma_{1\text{theory}} = \sigma_t = 8.83$$

$$\text{Representation error} = \frac{8.83 - 7.5536}{7.5536} \times 100\% = 16.90\%$$

采用 Mohr-Coulomb 准则(式(2))描述时, $\sigma_{1\text{theory}}$ 为 9.0353 MPa, 描述误差中理论值较试验值偏大, 为 19.62%。

$$\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} = \frac{8.83}{27.61} = 0.319812$$

$$\sigma_{1\text{theory}} = \sigma_t + \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \sigma_3$$

$$= 8.83 + 0.319812 \times 0.6419$$

$$= 9.0353$$

$$\text{Representation error} = \frac{9.0353 - 7.5536}{7.5536} \times 100\%$$

$$= 19.62\%$$

采用 Twin-shear 准则(式(3))描述时,根据该准则的使用判据,应使用第一个描述式,此时的 $\sigma_{1\text{theory}}$ 为 9.4087 MPa,理论值比试验值偏大 24.56%。

$$\frac{\sigma_1 + \alpha \sigma_3}{1 + \alpha} = \frac{7.5536 + 0.319812 \times 0.6419}{1 + 0.319812}$$

$$= 5.8788 \geq \sigma_2 = 2.9774$$

$$\sigma_{1\text{theory}} = \sigma_t + \frac{\alpha}{2} (\sigma_2 + \sigma_3)$$

$$= 8.83 + \frac{0.319812}{2} (2.9774 + 0.6419)$$

$$= 9.4087$$

$$\text{Representation error} = \frac{9.4087 - 7.5536}{7.5536} \times 100\%$$

$$= 24.56\%$$

由上可知,TATB 基 PBX 三轴拉伸应力下的强度特性较三轴压缩应力下的强度特性^[11]存在明显差异:炸药工程中现用的 Uniaxial-strength 准则在描述三轴压缩应力下的破坏时,描述误差的理论值较试验值偏小 43.77%(式(4)),体现出了数个强度准则中最好的安全阈值,而在描述三轴拉伸应力破坏时,描述误差的理论值却较试验值偏大 16.90%,表明最为保守的 Uniaxial-strength 准则也不能有效地预测三轴拉伸应力下炸药材料的许用强度上限;Twin-shear 准则和 Mohr-Coulomb 准则可分别用于描述三轴压缩应力下 TATB 基 PBX 的表观强度上下限,但在三轴拉伸应力下各自描述的理论值均大于试验值,最多偏大 24.56%,三种强度准则的描述精度从高到低的排序为 Uniaxial-strength 准则、Mohr-Coulomb 准则和 Twin-shear 准则。

试验中三轴拉伸主应力的比例为 11.768 : 4.638 : 1,此时的最大主应力仅为单轴拉伸强度的 0.831 倍 ($\sigma_{1\text{test}} = 0.831 \sigma_t$),GB50010-2010^[12]规定混凝土结构设计中三轴拉伸应力状态下的强度不能超过 0.9 倍单轴拉伸强度 σ_t ,可见三轴拉伸强度较单轴拉伸强度低在工程材料中具有普适性,目前炸药材料尚没有类似的标准,建立该标准还需要开展更多的工作。

另外,强度理论的研究表明^[2-5],Twin-shear 准则

和单剪 Mohr-Coulomb 准则分别处于强度体系的上下限,材料的强度特性不仅受应力状态影响,还与静水压力(σ_m ,又称平均应力,等于三个主应力的平均值)有关,因此,本研究中 Mohr-Coulomb 准则的表观强度低于试验测试结果的可能关键原因是静水压力的影响,建立该 TATB 基 PBX 高描述精度的强度准则除了要考应力状态外,还须考虑这一影响。

4 结 论

(1) 现炸药工程中使用的 Uniaxial-strength 准则的安全阈值相对最高,优于 Mohr-Coulomb 准则和 Twin-shear 准则,但仍不能安全预测三轴拉伸应力下的 TATB 基 PBX 破坏,试验测试结果较理论预测值偏大约 16.90%。

(2) 描述精度方面,三种强度准则的描述精度由高到低的排序(误差)为: Uniaxial-strength 准则(16.90%) > Mohr-Coulomb 准则(19.62%) > Twin-shear 准则(24.56%),误差均为试验值偏大理论值。

(3) 三轴拉伸应力(主应力比例 11.768 : 4.638 : 1)破坏时的最大拉应力 σ_1 为 $0.831 \sigma_t$,炸药部件的结构设计需考虑这种关系,建立 TATB 基 PBX 描述精度高的强度准则须同时考虑应力状态和静水压力的影响。

参考文献:

- [1] Scott I Jackson, Larry G. Runaway reaction due to gas-dynamic choking in solid explosive containing a single crack[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2307-2313.
- [2] Mao-hong Y U. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th Century [J]. *Appl Mech Rev*, 2002, 55(3), 169-218.
- [3] 俞茂宏, Yoshimine M, 强洪夫, 等. 强度理论的发展和展望[J]. *工程力学*, 2004, 21(6): 1-20.
YU Mao-hong, Yoshimine M, QIANG Hong-fu, et al. Advances and prospects for strength theory [J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(6): 1-20.
- [4] 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.
- [5] Jun-ling LI, Fang-yun LI. Effects of temperature and strain rate on the dynamic responses of three polymer-bonded explosives [J]. *Journal of Strain Analysis*, 2011, 47(2), 104-112.
- [6] 俞茂宏, 胥月稳, 范文, 等. 20 世纪岩石强度理论的发展——纪念 Mohr-Coulomb 强度理论 100 周年[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(5): 545-550.
YU Mao-hong, ZAN Yue-wen, FAN Wen, et al. Advances in strength theory of rock in 20 century 100 years in memory of the Mohr-Coulomb strength theory [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(5): 545-550.

- [7] 傅华, 李俊玲, 谭多望. PBX 炸药本构关系的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(3): 231-236.
FU Hua, LI Jun-ling, TAN Duo-wang. Experimental study on constitutive relations for plastic-bonded explosives[J]. *Explosion and Shock Wave*, 2012, 32(3): 231-236.
- [8] 李俊玲, 卢芳云, 傅华, 等. 某 PBX 炸药的动态力学性能研究[J]. 高压物理学报, 2011, 25(2): 159-164.
LI Jun-ling, LU Fang-yun, FU Hua, et al. Research on the dynamic behavior of a PBX explosive[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(2): 159-164.
- [9] 蓝林钢, 温茂萍, 李明, 等. PBX 一维动态拉伸性能实验研究[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 684-688.
LAN Lin-gang, WEN Mao-ping, LI Ming, et al. One dimension dynamic tensile properties of PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(6): 684-688.
- [10] 赵玉刚, 傅华, 李俊玲, 等. 三种 PBX 炸药的动态拉伸力学性能[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 194-199.
ZHAO Yu-gang, FU Hua, LI Jun-ling, et al. Dynamic tensile mechanical properties of three types of PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(6): 194-199.
- [11] 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): 56-61.
TANG Wei, LI Ming, WEN Mao-ping, et al. Adaptability of four strength criterions in polymer bonded explosives strength analysis[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2013, 34(6): 56-61.
- [12] 混凝土结构设计规范国标编写组. 混凝土结构设计规范[S]. 中华人民共和国国家标准 GB 50010-2010, 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

Adaptability Analysis of Strength Criterion on TATB Based PBX by Indirect Triaxial Tensile Collapse Test

TANG Wei^{1,2,4}, YAN Xi-lin², LI Ming², WEN Mao-ping², LIU Tong³, ZHANG Ding-guo¹

(1. School of Sciences, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 3. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 4. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: Strength plays an important role in structural integrity and safety for explosive parts, and is also the basis for estimation of the structural strength. Based on uniaxial loading technique, strength property of TATB based polymer bonded explosive (PBX) under triaxial tension stress state was studied by an end-restraint cylinder tension collapse method. The stress field under critical load was quantitatively analyzed through finite element simulation according to the tested boundary conditions. At last, the adaptability of three typical criterions (uniaxial-strength, Mohr-Coulomb, twin-shear) in strength analysis was illustrated using principal stresses of initial failure position. Results show that among these three criterions, uniaxial-strength criterion, which is most often used in explosive engineering, has the best safety threshold, about 43.77%, under triaxial compression stress state, but even so, it still can not supply a safety forecast for this TATB based PBX strength failure under triaxial tension stress state. For the representation accuracy, uniaxial-strength criterion has the best precision with an error about 16.90%, Mohr-Coulomb criterion and twin-shear criterion take second and third place with the error of 19.62% and 24.56%, respectively. Moreover, the triaxial tension strength is 0.831 times of the uniaxial tension strength, while Mohr-Coulomb criterion can not predict the strength lower bound precisely. It may be mainly caused by hydrostatic pressure, which must be considered further to establish multiaxial strength criterion with high precision.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); strength criterion; triaxial tension stress

CLC number: TJ55; O346.4

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.005