

文章编号: 1006-9941(2015)04-0351-05

基于应力应变曲线的断裂能参数表征炸药韧性

温茂萍, 庞海燕, 唐明峰, 唐 维, 贺传兰

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 高能炸药材料普遍具有脆性特点, 对其增韧改性有助于提高武器安全性及可靠性, 因此炸药韧性的表征是亟待解决的问题。针对其他工程材料常用的两种参量(冲击韧性、断裂韧性)表征炸药韧性时存在的局限性, 提出了基于应力-应变曲线断裂能量计算的韧性表征参量——断裂能, 包括拉伸断裂能和压缩断裂能两种形式。一方面, 由于不能测试炸药冲击韧性, 从测试原理上分析了断裂能参量与冲击韧性具有比较接近的物理意义; 另一方面, 试验比较了室温下三种炸药之间(HMX-P1、HMX-P2、TATB-P3)和其中一种炸药(HMX-P2)在不同温度下(20, 35, 45, 60 °C)的断裂能与断裂韧性的变化趋势, 结果表明, 不同炸药之间以及不同温度下炸药的断裂能与断裂韧性的变化趋势具有较好的一致性; 基于这两方面的对比分析, 认为断裂能可以作为炸药材料的一种韧性表征参量。

关键词: 炸药; 冲击韧性; 断裂韧性; 断裂能**中图分类号:** TJ55; TJ7; O341**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.008

1 引言

高能炸药常常由大量炸药晶体、少量粘结剂等添加剂经一定工艺成型, 一般拉伸强度小于 10MPa, 延伸率小于 2%^[1-2], 呈现出低强度脆性断裂特点, 不利于武器结构可靠性和安全性。随着先进武器实战化要求提高, 对炸药材料增韧改性也是提高武器性能的重要途径^[3], 但炸药材料韧性不同于强度、弹性模量、延伸率等其他力学性能参量, 目前还没有一个非常明确的表征方法。

在工程材料中普遍被接受的韧性表征参量是冲击韧性 A_k ^[4], 它是采用落锤或摆锤冲击加载方式测试的, 而炸药材料在冲击载荷作用下存在爆炸风险而不能测试其 A_k 。除冲击韧性 A_k 外, 也有采用断裂韧性 K_{Ic} 来表征材料韧性的^[4-5], 但该测试方法只适合于塑性变形较小的脆性材料, 当炸药材料塑性或韧性增加到一定程度时, 测试曲线往往不能满足其中“最大载荷”与“条件载荷”之比小于 1.10 等相关要求^[5], 此时

就不能采用 K_{Ic} 进行表征, 另外, K_{Ic} 测试方法比较复杂, 对于炸药材料的配方及成型技术研究而言, 测试繁琐而周期较长。

应力-应变(σ - ε)曲线是材料最为基本的力学性能测试曲线, 但一般基于 σ - ε 曲线进行计算的是强度、模量、延伸率及本构关系等, 本研究提出了基于 σ - ε 曲线的断裂能量计算的韧性表征参量——断裂能, 分析比较了断裂能与冲击韧性、断裂韧性的物理意义, 同时试验比较了室温下三种炸药(HMX-P1、HMX-P2、TATB-P3)之间以及其中一种炸药(HMX-P2)在不同温度下(20, 35, 45, 60 °C)的断裂能与断裂韧性变化趋势的异同。

2 断裂能的计算方法

材料的韧性目前只有定性的定义: 一般表示材料在断裂前吸收能量和进行塑性变形的能力, 与脆性相反。韧性好的材料要求既要具有高的破坏强度, 同时也要有高的破坏应变, 其 σ - ε 曲线见如图 1 中的 C 曲线, 如果只有高的破坏强度(A 曲线)、或只有高的破坏应变(B 曲线)等均不属于韧性好的材料。从该定性描述中可以看出, 韧性较好材料的 σ - ε 曲线的包络面积相对较大, 该包络面积对应的是材料单位体积上吸收的能量。

图 2 是一种 HMX 基炸药的拉伸、压缩 σ - ε 曲线。

收稿日期: 2014-03-03; **修回日期:** 2014-05-31**基金项目:** 国家自然科学基金(11372292), 国家自然科学基金-中国工程物理研究院联合基金(NSAF 11076002, NSAF U1330202)资助, 中国工程物理研究院发展基金资助(2013A0203006), 四川省学术和技术带头人培养资金资助项目**作者简介:** 温茂萍(1967-), 硕士, 研究员, 主要从事非金属材料力学与物理性能研究。e-mail: maoping-w@qq.com

从图 2 可知,炸药压缩破坏强度、压缩破坏应变显著大于拉伸破坏应变与拉伸破坏强度,这也是脆性材料的显著特征之一。从图 2 可看出 $\sigma-\varepsilon$ 曲线在达到最大应力后试样开始出现裂纹,应力开始降低,由于试样破裂形式存在不确定性,即使同一组试样的曲线降低部分也会存在较大差异,因此,本研究提出只计算曲线峰值 (ε_b, σ_b) 以前的包络面积,即试样开始出现裂纹前单位体积所吸收的能量,如图 2 所示的阴影部分。因加载方式不同,可以计算出拉伸断裂能、压缩断裂能,计算公式分别见式(1)、式(2)。

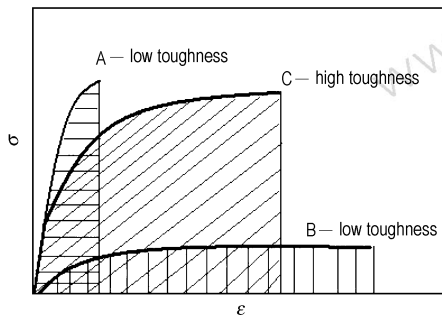


图 1 表示材料韧性高低的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线示意图
Fig.1 $\sigma-\varepsilon$ curves of materials with high or low toughness

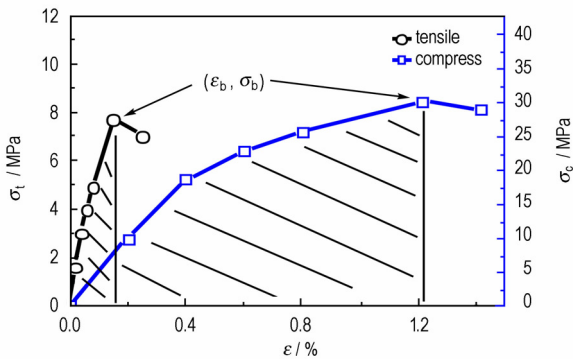


图 2 以 HMX 为基炸药的典型拉伸、压缩 $\sigma-\varepsilon$ 曲线
Fig.2 Typical tensile and compress $\sigma-\varepsilon$ curves of HMX based explosive

$$W_t = \int_0^{\varepsilon_b} \sigma_t(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

$$W_c = \int_0^{\varepsilon_b} \sigma_c(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

式中, W_t 为拉伸断裂能, $J \cdot m^{-3}$, σ_t 为拉伸应力, MPa, W_c 为压缩断裂能, $J \cdot m^{-3}$, σ_c 为压缩应力, MPa, ε 为拉伸或压缩应变, ε_b 为最大拉伸或压缩应力下的拉伸应变。

3 断裂能与冲击韧性、断裂韧性物理意义比较

断裂能参量的物理意义是在机械载荷作用下,材

料单位体积上吸收机械能量的大小,可以看出,该参量与材料韧性的定性表述的物理意义是相近的。而在材料韧性表征中最常用的冲击韧性参量 A_k 也是一种能量计算方法,冲击韧性 A_k 的测试原理如图 3 所示。试验时将具有一定重量 G 的摆锤举至高度 H_1 ,使其具有一定势能,然后释放,在摆锤下落到最低位置处将试样冲断,摆锤损失一部分能量后上升到高度 H_2 ,根据 H_1 与 H_2 高度差,计算出试样吸收的能量并计算出 A_k ,见公式(3)^[4]。尽管不能测试炸药冲击韧性,无法对炸药断裂能与冲击韧性相关性进行试验比较,但通过比较两种参量的测试原理可以发现,本研究提出的断裂能表征参量与冲击韧性具有相近的物理意义,只是断裂能采用的是静态加载方式,冲击韧性测试采用的是动态加载方式,可以推测,两者在测试值上应该具有较好的相关性。

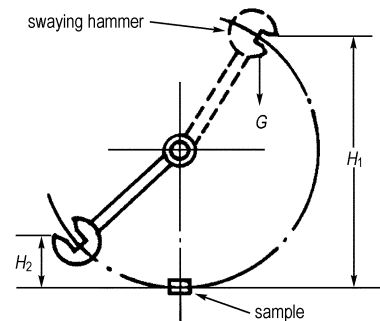


图 3 冲击韧性测试原理示意图
Fig.3 Schematic diagram of impact toughness test

$$A_k = \frac{G(H_1 - H_2)}{BD} \quad (3)$$

式中, A_k 为冲击韧性, $J \cdot m^{-2}$; G 为摆锤重量, N; H_1 为初始高度, m; H_2 为剩余高度, m; B 为试样被冲断部位横截面的厚度, m; D 为试样被冲断部位横截面的高度, m。

断裂韧性表征了材料抵抗裂纹扩展的能力,可采用三点弯曲试验进行测试,试样为矩形,其 L 为长度、 B 为厚度、 D 为高度、 a 为预制裂纹深度、 S 为跨距(图 4a)。采用材料试验机对试样进行静态加载至断裂,测试获得“负荷-裂纹开口位移”($P-V$)曲线, P_Q 为 $P-V$ 曲线中裂纹失稳扩展时的条件载荷,确定方法见图 4b, 直线 1 是曲线起始部分的割线, 直线 2 斜率是直线 1 斜率的 95%, P_Q 为直线 2 与 $P-V$ 曲线交点, P_m 为最大载荷, 断裂韧性测试要求 $P_m/P_Q \leq 1.10$ ^[5]。最后根据公式(4)计算出断裂韧性 K_{Ic} , 公式中 $F(a/D)$ 为裂纹深度与试样高度的函数^[5]。

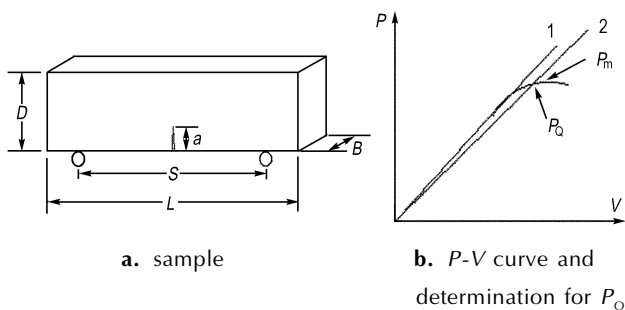


图4 断裂韧性测试原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of fracture toughness test

$$K_{Ic} = \frac{P_Q S}{BD^{3/2}} F\left(\frac{a}{D}\right) \quad (4)$$

式中, K_{Ic} 为断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; P_Q 为条件载荷, N; S 为跨距, m; B 为试样厚度, m; D 为试样高度, m; a 为预制裂纹深度, m; $F(a/D)$ 为裂纹深度与试样高度的函数。

从断裂韧性的测试原理和计算方法看, 断裂韧性的物理意义与本研究提出的断裂能显著不同。由于断裂韧性测试属于静态加载, 试验安全, 国内外已有对某 HMX 基炸药、某 TATB 基炸药的断裂韧性测试的文献报道^[6-8], 本研究将试验比较 HMX 基炸药 (HMX-P1、HMX-P2) 和 TATB 基炸药的断裂能与断裂韧性的相关性, 试验包括: 三种炸药材料常温下断裂能与断裂韧性比较, 其中一种 HMX 基炸药在不同温度下的断裂能与断裂韧性的变化规律比较。

4 试验条件

4.1 试样种类及尺寸

试样材料种类及制备: 炸药种类包括 HMX 基炸药 (HMX-P1, HMX-P2)、TATB 基炸药 (TATB-P3)。

试样形状及尺寸: 拉伸 σ_t - ε 曲线试样为 $\Phi 25$ mm

$\times 65$ mm 圆哑铃, 压缩 σ_c - ε 曲线试样为 $\Phi 20$ mm \times 20 mm 圆柱, K_{Ic} 试样为 80 mm \times 18 mm \times 9 mm, 并预置裂纹深度为 4.0 mm。每组试样数为 3 发。

4.2 仪器设备及试验条件

仪器设备: INSTRON-5582 电子万能试验机及其高低温环境试验箱。

试验温度: 常温下 HMX-P1、HMX-P2、TATB-P3 的 σ - ε 曲线与 K_{Ic} 测试温度为 20 $^{\circ}\text{C}$; 不同温度下 HMX-P2 的 σ - ε 曲线与 K_{Ic} 测试温度为 20, 35, 45, 60 $^{\circ}\text{C}$ 。

4.3 测试方法

拉伸 σ_t - ε 曲线测试执行“GJB772A-1997 方法 417.1 拉伸应力-应变曲线 电子引伸计法”; 压缩 σ_c - ε 曲线测试执行“GJB772A-1997 方法 418.1 压缩应力-应变曲线 电子引伸计法”; 断裂韧性测试采用的测试装置见图 4、计算公式见式 (4)。

5 试验结果与讨论

5.1 常温下三种炸药材料的断裂能与断裂韧性比较

图 5 是 HMX-P1、HMX-P2、TATB-P3 在常温下的拉伸 σ_t - ε 曲线、压缩 σ_c - ε 曲线以及 P - V 曲线。从测试曲线可以看出, TATB-P3 与 HMX-P1、HMX-P2 存在显著差异, HMX-P1 与 HMX-P2 差异较小。

根据图 5a、图 5b 所示的三种炸药的拉伸与压缩 σ - ε 曲线, 采用公式 (1)、公式 (2) 计算了三种炸药的拉伸断裂能 W_t 和压缩断裂能 W_c 。根据图 5c, 采用公式 (4) 计算获得三种炸药的断裂韧性 K_{Ic} 。计算结果见表 1, 表 1 中数据均为 3 发数据的平均值。从表 1 可以看出三种炸药的断裂韧性存在一定差异, 其中 TATB-P3 的断裂韧性值最大, 表示该炸药的韧性相对较好, HMX-P1 与 HMX-P2 的断裂韧性值接近, HMX-P1

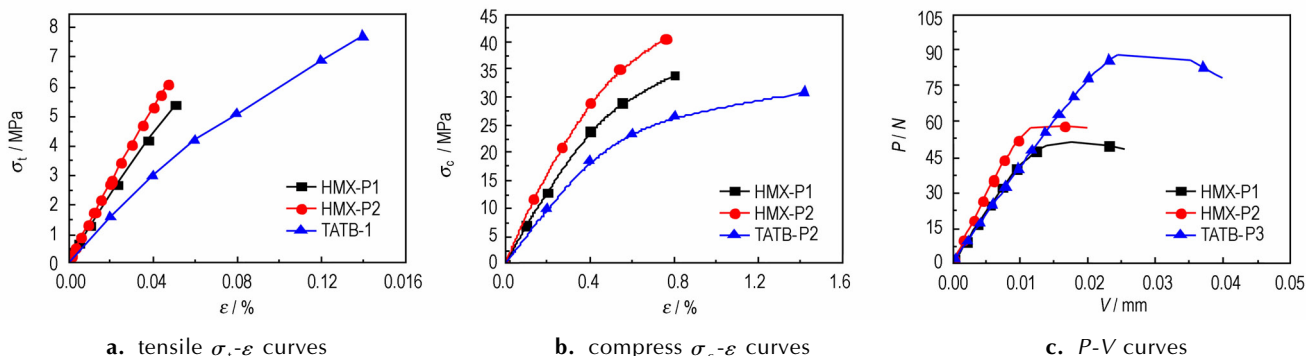


图5 3种炸药常温下的拉伸压缩 σ - ε 曲线与 P - V 曲线

Fig.5 Tensile σ_t - ε curves, compress σ_c - ε curves, P - V curves of three explosives at room temperature

最小,表明 HMX-P1 的韧性最差。从计算结果来看,三种炸药的拉伸断裂能 W_t 、压缩断裂能 W_c ,都表现出与断裂韧性相同的变化规律,其中 HMX-P1 的拉伸、压缩断裂能最小,TATB-P3 的拉伸、压缩断裂能最高。

表 1 三种炸药的断裂能与断裂韧性比较

Table 1 Comparison of fracture energy and fracture toughness for three explosives

sample	fracture toughness $K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	fracture energy	
		$W_t/\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$	$W_c/\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$
HMX-P1	0.220 ± 0.015	14.69 ± 0.99	1690 ± 66
HMX-P2	0.247 ± 0.011	15.09 ± 0.78	1894 ± 45
TATB-P3	0.389 ± 0.015	61.33 ± 0.77	3073 ± 99

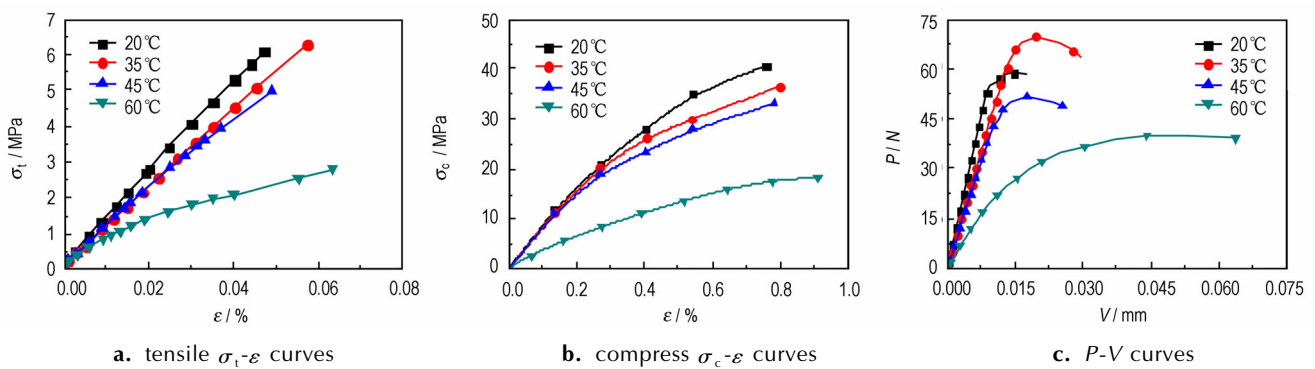


图 6 HMX-P2 在不同温度下的拉伸、压缩 σ - ϵ 曲线和 P - V 曲线

Fig. 6 Tensile σ - ϵ curves, compress σ - ϵ curves, P - V curves for HMX-P2 at different temperature

W_t 和压缩断裂能 W_c 与断裂韧性 K_{IC} 变化趋势比较,总体来看,拉伸断裂能 W_t 、压缩断裂能 W_c 、断裂韧性 K_{IC} 随温度变化趋势化存在较好一致性。当温度从 20°C 增加到 35°C 时,拉伸断裂能 W_t 、断裂韧性 K_{IC} 均增大,压缩断裂能 W_c 略有降低,当着温度从 35°C 增加到 60°C 时,拉伸断裂能 W_t 、压缩断裂能 W_c 、断裂韧性 K_{IC} 均随温度增加而降低。比较而言,拉伸断裂能 W_t 与断裂韧性 K_{IC} 随温度变化趋势更好,这与断裂韧性测试时采用的三点弯曲试验与拉伸试验的加载方式有关。

基于以上对断裂能参量与冲击韧性测试原理的物理意义比较分析及三种炸药的断裂能与断裂韧性的变化趋势的试验对比,认为断裂能可以作为炸药的韧性表征参量。同时 σ - ϵ 曲线是炸药材料及成型技术研究中必须进行的基本力学性能测试试验,该试验方法成熟而且容易实现,因此,本研究提出的基于 σ - ϵ 曲线能量计算的断裂能,可以在炸药增韧改性及成型技术研究中,作为韧性表征参量。

5.2 不同温度下 HMX-P2 的断裂能与断裂韧性比较

图 6 是 HMX-P2 炸药在不同温度下的拉伸 σ - ϵ 曲线、压缩 σ - ϵ 曲线以及断裂韧性 P - V 测试曲线。由图 6 可见,在 $20 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围,随着温度增加, HMX-P2 炸药三种曲线的斜率均有所降低,但是拉伸 σ - ϵ 曲线的最大应力值以及断裂韧性 P - V 测试曲线的最大载荷值均存在随温度升高开始增加而后降低的规律。

根据图 6a,图 6b 所测试的 HMX-P2 炸药的拉伸、压缩 σ - ϵ 曲线,基于公式(1)、公式(2)计算了不同温度下 HMX-P2 的拉伸断裂能 W_t 和压缩断裂能 W_c 。根据图 6c,采用公式(4)计算获得 HMX-P2 在不同温度下的断裂韧性 K_{IC} 。图 7 是 HMX-P2 的拉伸断裂能

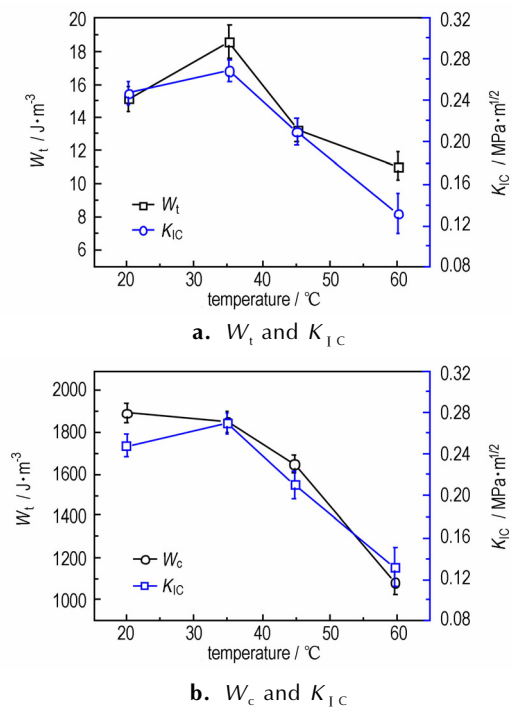


图 7 HMX-P2 的 W_t 、 W_c 与 K_{IC} 随温度变化趋势比较

Fig. 7 Comparison of W_t , W_c and K_{IC} at for HMX-P2

5 结 论

(1) 针对其他工程材料中常用的两种韧性参量(冲击韧性 A_k 、断裂韧性 K_{IC}) 在表征炸药材料韧性时的局限性, 提出了基于 σ - ε 曲线的断裂能量计算的韧性表征参量——断裂能, 包括拉伸断裂能和压缩断裂能两种形式。

(2) 分析比较了断裂能与冲击韧性、断裂韧性这三个参量的物理意义, 认为断裂能与冲击韧性具有相近物理意义。

(3) 试验比较了室温下 HMX-P1, HMX-P2 与 TATB-P3 这三种炸药材料之间的断裂能与断裂韧性差异, 其中 HMX-P1 的断裂能和断裂韧性均最小, TATB-P3 的断裂能和断裂韧性均最高; 同时还测试了 HMX-P2 在 20, 35, 45, 60 °C 下的 W_t , W_c , K_{IC} , 总体来看 W_t , W_c , K_{IC} 随温度变化规律基本一致; 基于以上分析和对比试验, 认为基于 σ - ε 曲线断裂能量计算的断裂能可作为炸药的韧性表征参量。

参考文献:

[1] Charles L Mader, Terry R Gibbs, Charles E Morris, et al. LASL

explosive property data[M]. 1980.

[2] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989.

[3] 马卿, 舒远杰, 罗观, 等. TNT 基熔铸炸药: 增韧增弹的途径及作用[J]. 含能材料, 2012, 20(5): 618-629.

MA Qing, SHU Yuan-jie, LUO Guan, et al. Toughening and elasticizing route of TNT based melt cast explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(5): 618-629.

[4] 梁光启, 林之为. 工程材料学[M]. 上海: 上海科学出版社, 1986.

[5] 崔振源. 断裂韧性测试原理和方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社出版, 1981.

[6] 温茂萍, 马丽莲, 田勇, 等. 高聚物粘结炸药平面应变断裂韧度实验研究[J]. 火炸药学报, 2001(2): 16-19.

WEN Mao-ping, MA Li-lian, TIAN Yong, et al. Experimental study on the plane strain fracture toughness of high polymer bonded explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives&Propellants*, 2001(2): 16-19.

[7] 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.

[8] Louis Ferranti Jr, Franco J Gagliardi, Bruce J Cunningham, et al. Measure of quasi-static toughness and fracture parameters for mock explosive and insensitive high explosive LX17[C]//Proceedings of the 14th Symposium (International) on Detonation. 2010.

Toughness Measurement of Explosive Based on Fracture Energy of the Stress-strain Curve

WEN Mao-ping, PANG Hai-yan, TANG Ming-feng, TANG Wei, HE Chuan-lan

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

Abstract: The impact toughness(A_k) and the fracture toughness(K_{IC}) are main parameters to characterize the fracture toughness of the engineering materials. In order to solve the the limits of A_k and K_{IC} in characterization of explosive fracture toughness, the tensile fracture energy W_t and the compress fracture energy W_c based on the stress-strain curve were put forward. The similarity between the physical meanings of the fracture energy parameters (W_t , W_c) and the impact toughness A_k , was found via analyzing the test principle although they could not be directly measured. W_t , W_c and K_{IC} for different explosives HMX-P1, HMX-P2, TATB-P3 at room temperature were studied by experiments as well as for HMX-P2 at 20, 35, 45 °C and 60 °C. Results show that the W_t , W_c and K_{IC} of explosives have the same change trend whether for different type explosives or at different temperatures, which indicates they can be used to characterize the toughness of explosive materials.

Key words: explosive; impact toughness(A_k); fracture toughness(K_{IC}); fracture energy

CLC number: V512; TJ7; O341

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.008