

文章编号:1006-9941(2020)11-1102-07

三种典型炸药晶体微塑性与撞击感度的相关性

温茂萍,付涛,唐明峰,谭凯元,徐容,陈天娜

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳621999)

摘要: 为了研究单质炸药晶体微观性能对混合炸药宏观力学行为和撞击感度的影响,研究了梯恩梯(TNT)、黑索今(RDX)与奥克托今(HMX)三种常用炸药晶体的微塑性表征方法,并将炸药晶体的微塑性与单质炸药撞击感度进行了相关性分析。采用纳米压痕技术对三种常用炸药晶体进行了微弹性与微塑性的测试与计算,提出了以塑性能量与压痕总能量之比(η_p)量化炸药晶体微塑性的计算方法。结果表明:与压入深度计算的微塑性(δ_h)相比,本研究获得的炸药晶体微塑性 η_p 与粉末态单质炸药的撞击感度(P)达到95.8%的线性相关。本研究提出的炸药晶体微塑性量化方法将炸药晶体微塑性与其撞击感度建立起高度线性关系,为评价炸药安全等级提供了一种微观表征方法。

关键词: 炸药;单晶;纳米压痕;微塑性;撞击感度

中图分类号: TJ55; O34

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2019130

1 引言

在炸药安全性研究中一直期望能建立炸药机械感度与某些力学性能参量之间的关系,但混合炸药由多种组份组成,含有初始缺陷,内部结构比较复杂,所以直接建立混合炸药机械感度与力学性能参数之间的关系比较困难。如果从炸药晶体角度研究炸药单晶的某些力学性能与感度的相关性,可能更容易衡量炸药的安全等级。采用分子动力学方法可以计算炸药晶体的某些力学性能和感度^[1-3],但也需要与试验数据进行校验。随着炸药大单晶制备技术日趋成熟,已成功制备出毫米级梯恩梯(TNT)^[4-7]、黑索今(RDX)^[8]和奥克托今(HMX)^[9]炸药单晶,利用纳米压痕技术可以从微观尺度测试炸药晶体的力学性能,如:硬度^[10-11]、模量^[10-14]、断裂韧度^[15]等,然而这些力学性能是否与炸药的感度相关还缺乏深入研究。Hudson^[16]在研究

RDX的缺陷品质、微力学性能和冲击感度之间的关系时指出:RDX晶体缺陷越少,弹性功越高,以其为基的混合炸药的冲击感度越低。根据弹性压痕比的定义:

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elastic}}{W_{elastic} + W_{plastic}} \times 100 \quad (W_{plastic} \text{ 为压入塑性功, } W_{elastic} \text{ 为压入弹性功})$$

推断炸药晶体的塑性压痕比可能会与炸药冲击波感度具有一致性规律或是较强的相关性。

为了研究验证该观点,本研究采用纳米压痕仪表征晶体的弹性和塑性,压痕面内形貌和深度都是百纳米级,这种尺寸级别表征方法有别于宏观拉伸或压缩表征方法,两种方法表征的结果也可能会有差异,笔者认为用“微弹性”、“微塑性”定义由纳米压痕技术表征的微观弹性和微观塑性可能更明确。本研究提出以塑性压痕比(塑性能量与压痕总能量之比, η_p)量化炸药晶体微塑性的计算方法,将炸药晶体微塑性与其撞击感度建立起线性关系,为评价炸药安全等级提供一种研究思路。

2 实验方法与原理

2.1 炸药单晶

本研究按照文献[4,8-9]溶剂蒸发方法制备了炸药单晶。选取适量TNT、RDX、HMX等炸药晶体,加入

收稿日期:2019-05-12;修回日期:2019-06-01

网络出版日期:2020-08-12

基金项目:国家自然科学基金资助(11604309,11902304)

作者简介:温茂萍(1967-),女,研究员,主要从事非金属材料力学与物理性能研究。e-mail:wemmp@caep.cn

通信联系人:付涛(1982-),男,助理研究员,主要从事含能材料物理性能研究。e-mail:futao@caep.cn

引用本文:温茂萍,付涛,唐明峰,等.三种典型炸药晶体微塑性与撞击感度的相关性[J].含能材料,2020,28(11):1102-1108.

WEN Mao-ping, FU Tao, TANG Ming-feng, et al. Linear Correlation between Micro-plastic Properties of TNT, RDX and HMX Explosives Crystals and Their Corresponding Impact Sensitivities[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(11):1102-1108.

丙酮,搅拌状态下加热至一定高温,使其充分溶解,冷却至常温后过滤,将滤液放在一定温度的恒温箱中进行单晶培养,数十天后,得到毫米级 TNT、RDX 和 HMX 炸药大单晶作为实验样品。

2.2 炸药晶体结构的表征

利用 Bruker 公司的 D8 Advance X 射线衍射仪,对所制备的 TNT、RDX、HMX 单晶进行 XRD 测试,确定其晶型结构与最大显露晶面的晶面指数。测试中采用 CuK_α 射线, X 光管操作条件为 40 kV、40 mA,采用 Vantec-1 一维阵列探测器,样品扫描范围为 $10^\circ\sim 60^\circ$ (2θ)。利用德国耐驰公司 STA449C 热分析仪测试了 TNT 单晶的 DSC 曲线,升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

2.3 炸药晶体的微弹性与微塑性表征方法

利用 Hysitron 公司 Triboindenter 纳米压痕仪测试了 TNT、RDX、HMX 三种炸药大单晶微观压力性能。测试中选取 Berkovich 金刚石压针,采用“加载-恒载-卸载”与时间线性的控制方式,加载、恒载和卸载的时间分别为 10, 5, 10 s,恒载力分别为 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000 μN 和 9000 μN ,将这 7 个恒载定义为峰值载荷。加载测试完成后,采用压痕仪的 Triboindenter 原位成像功能,对 500 μN 和 9000 μN 两种恒载条件的三种晶体进行了残余压痕形貌成像。

纳米压痕测试能够获得如图 1 所示的典型“载荷-深度”曲线,根据图 1 由 Oliver-Pharr 原理可以计算材料微观力学性能参数^[12]。最常用的计算参数为压入模量 (E_{IT}),其数值与材料杨氏模量最接近,可用于表征材料弹性特性,其计算方法如公式(1):

$$E_{IT} = \frac{1 - \nu_s^2}{1 - \frac{1 - \nu_i}{E_i}} \quad (1)$$

式中, ν_s 为试样的泊松比,一般取 0.25^[14], E_i 、 ν_i 分别为金刚石压针的弹性模量和泊松比,其值分别为

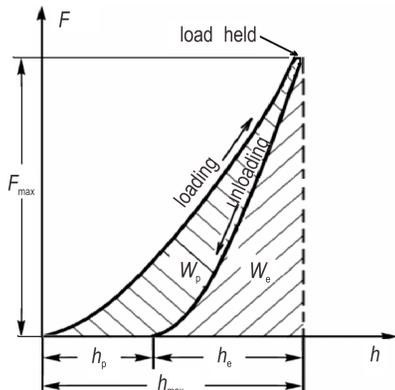


图 1 典型的“载荷-压入深度”曲线示意图
Fig.1 Typical schematic relation of loading-indentation depth

1140 GPa 和 0.07^[14]。 E_i 为压入折合模量, GPa, 计算公式见式(2):

$$E_i = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad (2)$$

式中, S 为接触刚度, $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$, 通过图 1 中的卸载曲线起始段斜率计算获得, β 是与压头形状有关的常数, 对于三角形 Berkovich 压头取为 1.034^[15], A_c 为压头和试样接触的投影面积, μm^2 , 可根据压入深度以及压头形状计算。

由于纳米压痕的晶体塑性量化表征方法还没有建立科学统一的标准, 所以采用与压痕深度相关的无量纲参数定量表征法, 用无量纲 δ_h 表示^[17], 计算公式见式(3)。

$$\delta_h = \frac{h_p}{h_{\max}} = \frac{h_p}{h_p + h_e} \quad (3)$$

式中, h_{\max} 、 h_e 、 h_p 分别为最大压入深度、弹性回复深度、残余压痕深度, 单位: nm。

本文参考公式(3)的压痕深度比方法^[17], 提出一种与能量相关的无量纲参数量化炸药晶体的微塑性, 用无量纲 η_p 表示, 计算公式见式(4):

$$\eta_p = \frac{W_p}{W_t} = \frac{W_t - W_e}{W_t} \quad (4)$$

$$W_t = \int_0^{h_{\max}} Fdh \quad (5)$$

$$W_e = \int_{h_p}^{h_{\max}} Fdh \quad (6)$$

式中, W_p 为压入塑性能量, W_t 为压入总能量, W_e 为压入弹性能, fJ。

3 结果与讨论

3.1 三种炸药单晶结构

三种炸药大单晶照片如图 2 所示, 其中 TNT 单晶呈现淡黄色, 宽度及厚度均达到数毫米以上, 长度方向已达到了厘米级, 在尺寸上已能满足纳米压痕仪的测试要求。RDX 和 HMX 两种单晶均呈现出无色透明, 虽然形状不如 TNT 那样规则, 但尺寸同样也达到数毫米, 可以用于压痕测试。

TNT 存在单斜和正交两种晶型结构, 其中单斜为稳定的常用晶型。RDX 有 I、II 两种晶型结构, 其中 I-RDX 单晶为正交晶型, II-RDX 极不稳定。HMX 存在 α 、 β 、 γ 、 δ 等四种晶型结构, 其中 β -HMX 为单斜晶型^[18]。图 3 是所制备的 TNT、RDX 和 HMX 三种单晶



图2 三种炸药单晶形貌

Fig.2 Single-crystal appearances of TNT, RDX and HMX explosives

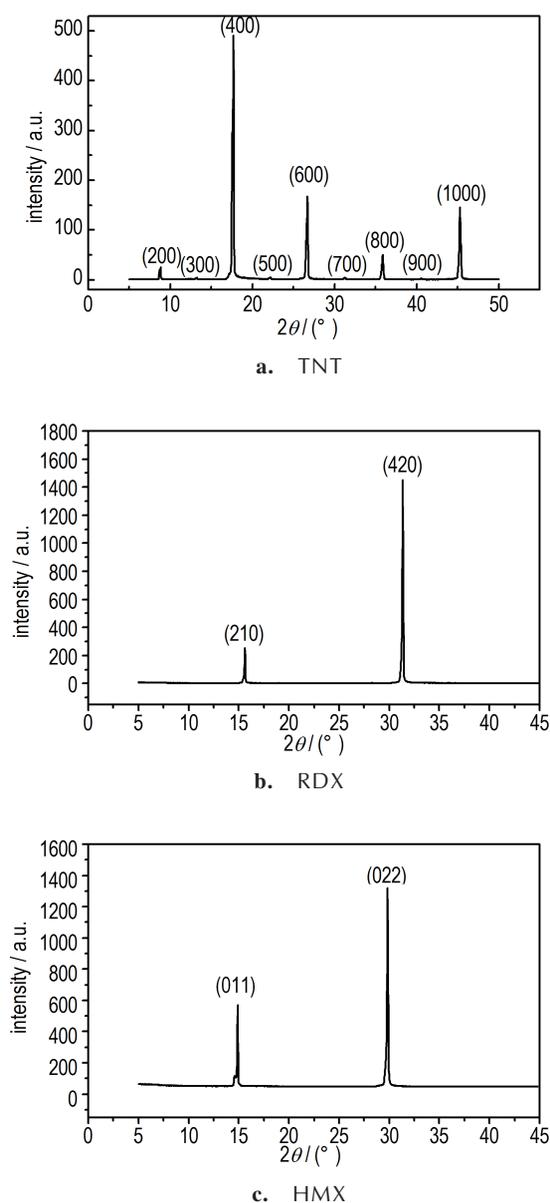


图3 三种炸药单晶的XRD曲线

Fig.3 XRD curves of TNT, RDX and HMX single-crystal

最大显露晶面的XRD曲线,与剑桥结构数据库(CSD)的晶体结构比对,发现它们均为实际使用较多的、最稳定的晶型结构:TNT近似为单斜晶型(晶胞参数: $a=21.275 \text{ \AA}$, $b=6.093 \text{ \AA}$, $c=15.025 \text{ \AA}$, $\beta=110.14^\circ$),RDX为正交晶型,最大显露晶面为(210)晶面(晶胞参数: $a=13.202 \text{ \AA}$, $b=11.601 \text{ \AA}$, $c=10.717$),HMX为单斜晶型,最大显露晶面为(011)晶面(晶胞参数: $a=6.537 \text{ \AA}$, $b=11.054 \text{ \AA}$, $c=8.7018 \text{ \AA}$, $\beta=102.8^\circ$)。为了进一步证明制备的TNT试样为单斜晶型,对TNT大单晶进行了DSC分析,结果如图4所示。由图4可见,TNT大单晶只存在一个 81.07°C 熔融峰,而正交TNT晶体除了 82°C 熔融峰外,还存在一个 72°C 较小熔融峰^[4,15],从而确定所制备TNT单晶确实为单斜晶型。

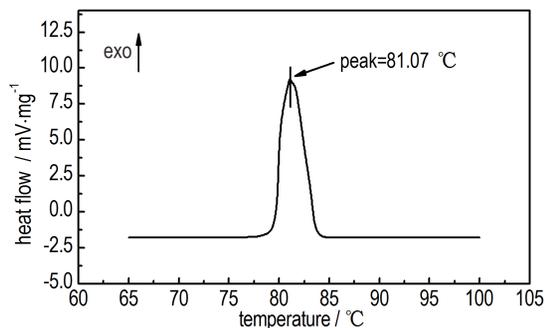


图4 TNT单晶的DSC曲线

Fig.4 DSC curvet of TNT single-crystal

3.2 三种炸药晶体的纳米压痕测试曲线

分别在所制备的单斜晶型TNT单晶(100)晶面、正交晶型RDX单晶(210)晶面和单斜晶型HMX单晶(011)晶面上,进行了500,1000,2000,3000,4000,6000 μN 和9000 μN 7个不同恒载程度的压痕试验,测试曲线见图5。由图5可见,三种炸药晶体压入深度随压入载荷的变化过程相似,当压入载荷较小时,压入深度变化较大;当压入载荷较大时,压入深度变化较小,其载荷值拐点均在2000 μN 附近。

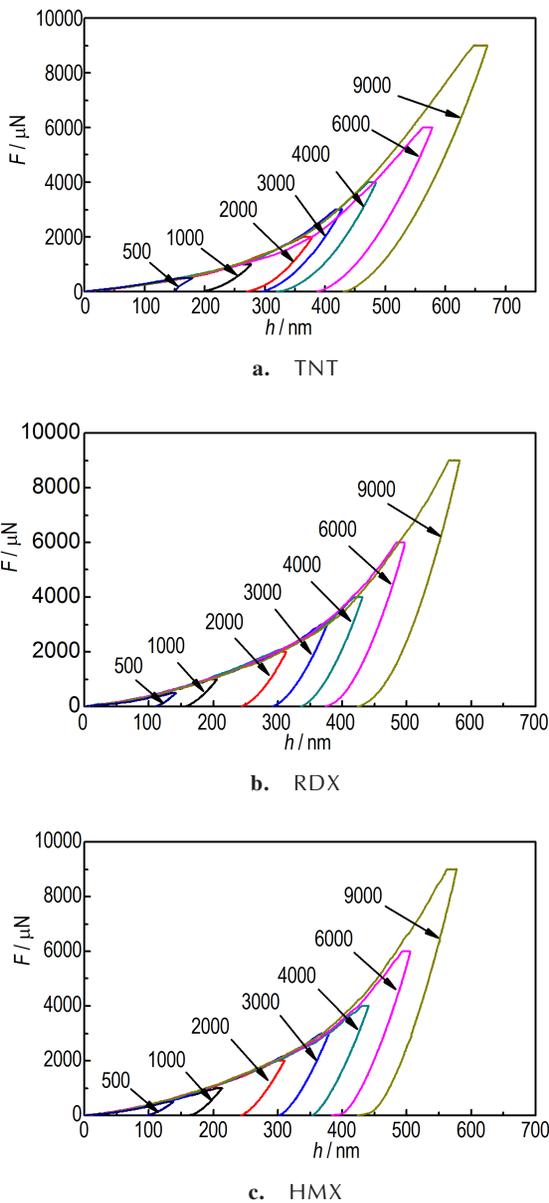


图5 三种炸药单晶的纳米压痕测试曲线
Fig. 5 Typical nano-indentation test curves of TNT, RDX and HMX single-crystal

3.3 三种炸药晶体的微弹性

根据三种炸药单晶的纳米压痕测试曲线(图5),采用公式(1)计算了三种炸药单晶在不同峰值载荷下的压入模量 E_{IT} , 得到图6。从图6可以看出,在所有峰值载荷最低时,基于纳米压痕曲线计算获得的三种炸药晶体压入模量最小,详细值见表1中 E_{min} , 与其他文献^[11,14-15]测试值相当。随着压入峰值恒载的提高,压入模量略有增加,7个压入峰值载荷计算后的平均压入模量(\bar{E})见表1。由于纳米压痕压头与试样表面接触时,试样压痕上应力分布较为复杂,还需结合炸药晶

体在不同峰值恒载下的压痕弹塑性区域分布的变化及其对压入模量计算结果影响分析,才能充分解释三种炸药晶体压入模量随压入峰值载荷的变化趋势。

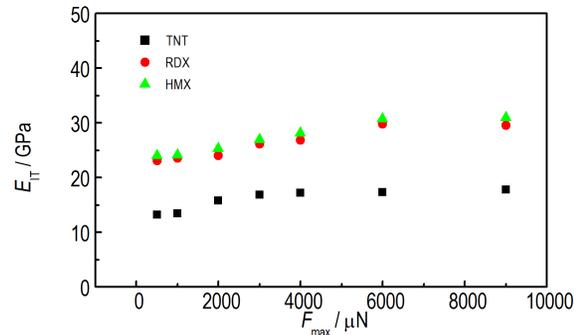


图6 不同恒载条件下三种炸药晶体的压入模量
Fig.6 The indentation modulus of TNT, RDX and HMX crystals under different holding loads

表1 TNT、RDX、HMX单晶的压入模量

Table 1 Single-crystal indentation modulus of TNT, RDX and HMX from different researches GPa

sample	this work		other papers
	E_{min}	\bar{E}	E
TNT	13.11	16.08	13.58 ^[11]
RDX	22.62	26.46	22.93 ^[15]
HMX	23.85	27.54	23.18 ^[14]

3.4 三种炸药晶体的微塑性

材料塑性最为直接的表现是材料在所施加载荷卸载后会残留不可恢复的变形,三种炸药单晶在经过500 μN 压载后的残余压痕形貌如图7所示。但仅从残留的压痕形貌量化材料的塑性还不够严谨,因此一般采用公式(3)提及的压痕深度比 δ_n 来量化材料的微塑性。

采用Hysitron公司Triboindenter纳米压痕仪测量的最大压入深度和残余压痕深度如图8所示。

结合图6炸药晶体的压入模量,从图8a可以看出,压入弹性模量小的TNT单晶,最大压痕深度在相同的峰值载荷下均为最深,而RDX与HMX的压入弹性模量相近,两者最大压痕深度也相近。从图8b可以看出,在500~9000 μN 峰值载荷范围内的压痕加载后,三种炸药晶体表面均会产生残余压痕。当峰值载荷较小时,三种炸药晶体残余压痕深度差异相对较大,可以认为是三者晶体的塑性不同;随着恒载压力增加,残余压痕差异减小,在峰值载荷为9000 μN 时,三种炸药晶体的残余深度几乎相等,其残余压痕形貌如图9所示。

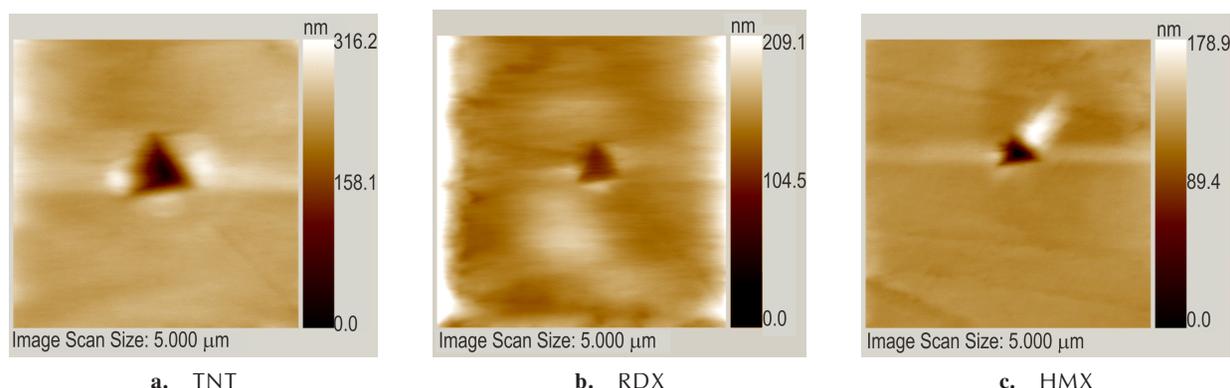


图7 恒载为500 μN 时三种炸药晶体的残余压痕形貌

Fig.7 Residual indentation patterns of TNT, RDX and HMX crystals after 500 μN holding loads

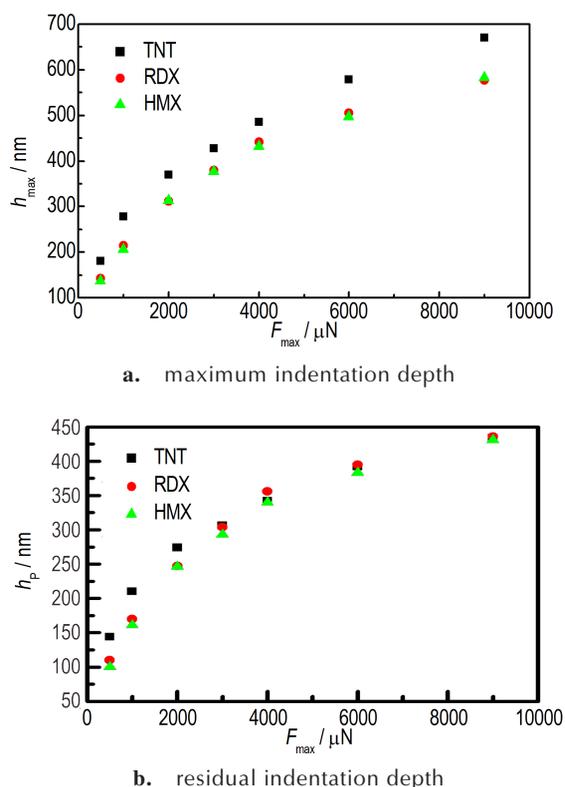


图8 三种炸药晶体最大压痕深度、残余压痕深度随峰值载荷变化曲线

Fig.8 Relationships of maximum and residual indentation depths and corresponding peak loads for TNT, RDX and HMX crystals

利用公式(3)计算出三种炸药单晶的微塑性 δ_h 与最大恒载力有关,如图10所示。由图10可以看出,在压入峰值载荷不大于2000 μN 时,三种炸药晶体微塑性参数 δ_h 值差异较小,在压入峰值载荷大于2000 μN 后,RDX和HMX的微塑性 δ_h 差异较小,TNT的微塑性 δ_h 值小于前两者。

但是,笔者认为也可以从能量相关角度来量化炸药晶体的微塑性,以 η_p 表征,按照公式(4)计算出500~9000 μN 压痕载荷范围内的 η_p ,结果如图11所示。由图11可见, η_p 与 δ_h 类似,呈下降趋势。由于采用的计算方法不同,三种炸药晶体的塑性特征参量的排序有所不同,在2000 μN 恒载以上,规律比较明显,以 δ_h 表征时,三者的微塑性排序为TNT<HMX<RDX,以 η_p 表征时,微塑性排序为TNT<RDX<HMX。两种表征量化方式都有一定的科学依据,但 η_p 不仅包含深度因素,还包含力的因素,整体表现出做功(或称为机械能)。在机械载荷作用下,机械能量的一部分储存为晶体可恢复变形的弹性能量,另一部分造成了晶体出现不可恢复的塑性形变。因此,用与能量相关的 η_p 表征的微塑性与炸药晶体的机械敏感度更紧密关联。

目前尚未有毫米级炸药晶体的机械敏感度数据,但在董海山^[19]先生论著中有对微细晶体单质炸药的落锤撞击感度的测试方法和数据:TNT为4%,RDX为80%,HMX为95%。将本研究测试获得的 δ_h 、 η_p 与三种单质炸药落锤撞击感度 P 进行了相关性分析,结果见图12。由图12可见, δ_h 与 P 相关性不强,而 η_p 与 P 的线性相关度高达95.8%。分析认为, δ_h 表征的晶体微塑性只包含变形部分,而 η_p 中不仅包含变形,还含有与能量相关的载荷和压入位移,所以以可量化的微观力学性能分析与能量相关的感度具有合理性。另外,炸药在撞击作用下发生爆炸反应,本质上是撞击能量转换的结果。这一结果再次支撑了“以能量相关量化的炸药晶体微塑性与炸药撞击感度具有高度线性相关”的结论是比较合理的。

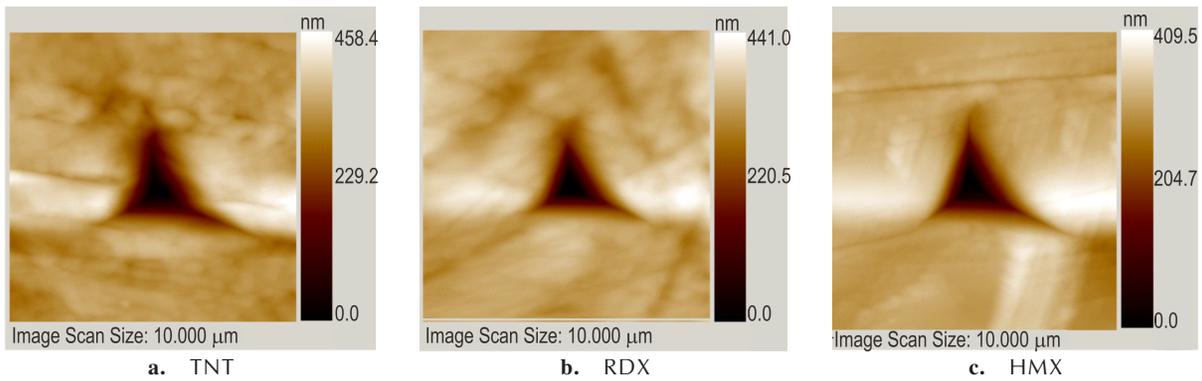


图9 恒载为9000μN时三种炸药晶体的残余压痕形貌图

Fig.9 The residual indentation patterns of TNT, RDX and HMX crystals after 9000μN holding load

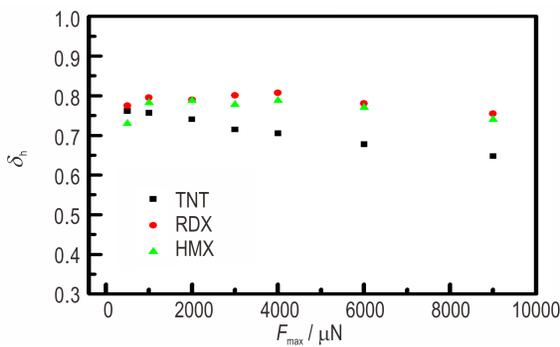


图10 三种炸药晶体的 δ_h - F_{max} 关系

Fig.10 Relationship of δ_h - F_{max} of TNT, RDX and HMX crystals

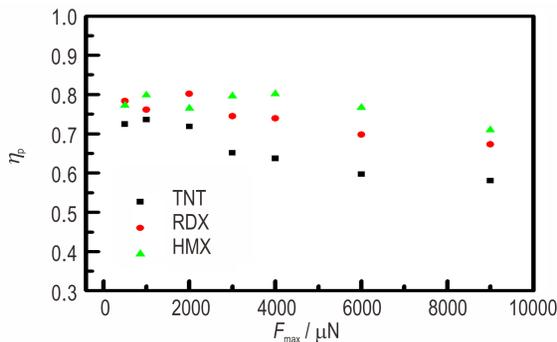


图11 三种炸药晶体 η_p - F_{max} 关系

Fig.11 Relationship of η_p - F_{max} of TNT, RDX and HMX crystals

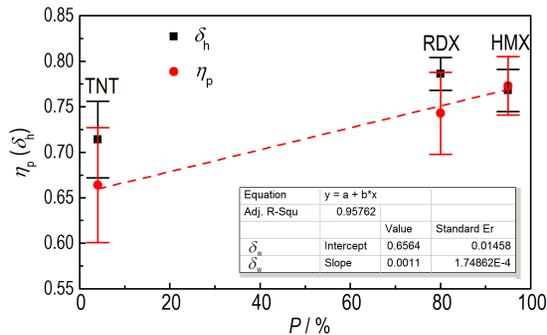


图12 炸药晶体微塑性与其粉末态撞击感度的关系

Fig.12 Relationships between micro-plastic performance of TNT, RDX and HMX explosives crystals and their impact sensitivity in powders

4 结论

采用纳米压痕技术获得了TNT、RDX和HMX三种炸药晶体的“加载-恒载-卸载”测试曲线,提出了一种与炸药感度密切相关的微观塑性量化方法,结论如下:

(1)基于纳米压痕技术提出了一种以能量相关的炸药晶体微塑性量化方法,获得的TNT、RDX和HMX三种常用炸药晶体微塑性 η_p 与压入深度计算获得的 δ_h 排序略有不同,从三者的撞击感度与它们的微塑性高度线性相关结果分析,认为所提出的微塑性量化方法更合理。

(2)此外,测试获得了TNT、RDX和HMX三种常用炸药的微弹性参数 E_{IT} ,RDX与HMX的 E_{IT} 比较接近,TNT的 E_{IT} 明显小于RDX和HMX。

参考文献:

- [1] Sewell T D, Menikoff R. A molecular dynamics simulation study of elastic properties of HMX [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2003, 119(14):7417-7426.
- [2] Stevens L L, Eckhardt C J. The elastic constants and related properties of β -HMX determined by Brillouin scattering [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2005, 122(17): 174701.
- [3] Hang G, Yu W, Wang T, et al. Theoretical investigations on structures, stability, energetic performance, sensitivity, and mechanical properties of CL-20/TNT/HMX cocrystal explosives by molecular dynamics simulation [J]. *Journal of Molecular Modeling*, 2019, 25(1): 10-20.
- [4] Gallagher H G, Vrcelj R M, Sherwood J N. The crystal growth and perfection of 2, 4, 6-trinitrotoluene [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2003, 250(3): 486-498.
- [5] Vrcelj R M, Sherwood J N, Kennedy A R, et al. Polymorphism in 2-4-6 trinitrotoluene [J]. *Crystal Growth & Design*, 2003, 3(6): 1027-1032.
- [6] Gallagher H G, Sherwood J N. Polymorphism, twinning and morphology of crystals of 2, 4, 6-trinitrotoluene grown from so-

- lution [J]. *J Chem Soc Faraday Trans*, 1996, 92(12): 2107–2116.
- [7] Vrcelj R M, Gallagher H G, Sherwood J N. Polymorphism in 2, 4, 6-trinitrotoluene crystallized from solution [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2001, 123(10): 2291–2295.
- [8] Beard, Bruce C. Energetic Materials. I. Pure single crystal cyclo-1, 3, 5-trinitramine-2, 4, 6-trimethylene, RDX by XPS [J]. *Surface Science Spectra*, 1992, 1(1):136–142.
- [9] Stevens L L, Haycraft J J, Eckhardt C J. Single-crystal, polarized Raman-scattering study of the molecular and lattice vibrations for the energetic material cyclotetramethylenetetranitramine, β -polymorph (β -HMX) [J]. *Crystal Growth & Design*, 2005, 5(6): 2060–2065.
- [10] 温茂萍, 徐容, 张浩斌, 等. 纳米压痕仪测试 TNT 单晶(100)晶面的模量与硬度[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 430–432.
WEN Mao-ping, XU Rong, ZHANG Hao-bin, et al. Modules and hardness of TNT single crystal (100) plane by a nanoindenter [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(3): 430–432.
- [11] 朱一举, 涂健, 常海, 等. 纳米压痕技术对比研究 DNAN 和 TNT 晶体的微观力学性能[J]. 火炸药学报, 2017, 40(3): 68–71, 84.
ZHU Yi-ju, TU Jian, CHANG Hai, et al. Comparative study on micromechanical properties of DNAN and TNT crystals by nanoindentation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2017, 40(3): 68–71, 84.
- [12] Oliver W C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology [J]. *Journal of Materials Research*, 2004, 19(1):3–20.
- [13] Kan Q, Yan W, Kang G, et al. Oliver-Pharr indentation method in determining elastic moduli of shape memory alloys-A phase transformable material[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2013, 61(10): 2015–2033.
- [14] Li M, Tan W J, Kang B, et al. The elastic modulus of β -HMX crystals determined by nanoindentation[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2010, 35(4): 379–383.
- [15] 王东冬, 舒远杰, 李明, 等. RDX 和 HMX 单晶的压痕断裂韧性[J]. 火炸药学报, 2011, 34(1): 28–31
WANG Dong-dong, SHU Yuan-jie, LI Ming, et al. Fracture toughness of RDX and HMX single-crystal by indentation [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2011, 34(1): 28–31.
- [16] Hudson R J, Zioupos P, Gill P P. Investigating the mechanical properties of RDX crystals using nano-indentation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, 37(2): 191–197.
- [17] Milman Y V, Chugunova S I, Goncharova I V. Plasticity characteristic obtained by indentation technique for crystalline and noncrystalline materials in the wide temperature range[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 25(1–2): 39–46.
- [18] Mader C L, Gibbs T R, Morris C E, et al. LASL explosive property data[M]. 1980.
- [19] 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: 128.

Linear Correlation between Micro-plastic Properties of TNT, RDX and HMX Explosives Crystals and Their Corresponding Impact Sensitivities

WEN Mao-ping, FU Tao, TANG Ming-feng, TAN Kai-yuan, XU Rong, CHEN Tian-na

(Institute of Chemical Material, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: In order to study the effect of the crystal microscopic properties of elemental explosives on their macro-mechanical behavior and impact sensitivity of composite explosives, the micro-plastic characterization methods of TNT, RDX and HMX were studied. And the correlation analysis between the micro-plasticity of the explosive crystals and their impact sensitivities of the elemental explosive was carried out. Nano-indentation technology was used to test and calculate the micro-elasticity and micro-plasticity of TNT, RDX and HMX explosive crystals, and a calculation method based on the ratio of plastic energy and indentation energy (η_p) was proposed to quantify the micro-plastic properties of explosive crystals. The results showed that, compared with the micro-plasticity (δ_h) calculated by the indentation depth, the linear correlation coefficient between the micro-plastic properties (η_p) of the explosives crystals obtained in this research and impact sensitivities (P) of explosives in simple powders reached 95.8%, or micro-plastic properties of simple explosives were highly related to their impact sensitivities on the micro-characterization method of plastic properties of explosives crystals proposed in this paper. This research provided a micro-characterizing method for evaluating safety levels of explosives.

Key words: explosives; single crystal; nano-indentation; micro-plastic property; impact sensitivity

CLC number: TJ55; O34

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019130

(责编: 王艳秀)