

引用格式:姜夕博,王建灵,金朋刚,等. 冲击加载下两种典型抗高过载炸药的损伤特性[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 226—229
Jiang Xibo, Wang Jianling, Jin Penggang, et al. Damage characteristics of two typical anti-high-loading explosives under shock loading[J].
Science Technology and Engineering, 2018, 18(3): 226—229

武器技术

冲击加载下两种典型抗高过载炸药的损伤特性

姜夕博 王建灵 金朋刚 杨建 杨惠
(西安近代化学研究所,西安 710065)

摘要 为研究冲击加载条件下典型抗高过载炸药的损伤特性,基于隔板实验的方法开展了两种典型抗高过载炸药的冲击损伤实验。通过改变隔板厚度,在炸药中产生不同程度的损伤。利用 CT 系统和扫描电镜研究了不同冲击加载条件下样品的损伤特性。结果表明,损伤后样品的密度变化与成型工艺有关,浇注成型炸药损伤后密度变小;而压装成型炸药损伤后密度变大。浇注炸药的扫描电镜结果表明,随着冲击强度的逐渐增大,炸药晶体与黏结剂之间的脱粘现象越明显,微孔洞也逐渐增大增多。
关键词 冲击损伤 抗高过载炸药 损伤特性
中图分类号 TJ55 O389; **文献标志码** B

现代战争中需要打击的地下及地面加固目标越来越多,随着打击这些硬目标、深层次目标和多层目标的需求,抗高过载炸药得到了大力发展。然而抗高过载炸药在高速侵彻的过程中,会承受很高的冲击载荷,在勤务处理的过程中,也可能经历复杂冲击载荷的作用。这些过程会导致其内部产生各种微孔洞、微裂纹等损伤。损伤的出现不仅会导致其力学性能劣化,而且对热点的形成具有重要影响,从而影响其感度甚至爆炸性能,进而影响炸药的可靠应用。

目前,有关炸药损伤的研究越来越受到学术界的广泛关注。Field 等^[1]对 PBX 炸药进行径压缩实验,观察到了颗粒断裂、界面脱粘、变形孪晶等多种损伤破坏形式,并在实验研究的基础上对 PBX 材料几种可能的变形破坏机理进行了分析。陈鹏万等^[2,3]利用巴西实验对高聚物粘结炸药的变形破坏机理进行了研究。结果表明试样最主要的破坏机理是界面脱粘和黏结剂的成穴失效。孙培培^[4]利用落锤冲击加载不同粒度的 AP 颗粒;并用扫描电镜研究了试样在落锤冲击加载下的破碎特征。结果表明,冲击加载后 AP 颗粒均发生脆性破裂,部分晶体

上清晰可见剪切带现象,且粒度越大颗粒破碎越严重。田勇等^[5,6]对 JOB-9003 炸药的热损伤进行了超声波检测,获得了热冲击温度差与试样损伤破坏率、超声波增益之间正相关的对应关系。目前国内研究人员对炸药损伤的研究大多集中在准静态、低应变率或者温度冲击方面^[7-9],对抗高过载炸药在冲击波作用下损伤的研究开展的非常少。因此,开展这方面的研究工作可以为抗高过载炸药在冲击加载下的安全性提供一定的依据。

本文选取两种不同成型工艺的典型抗高过载炸药为研究对象,研究了不同强度冲击载荷作用下的损伤特性,采用 CT 照相和扫描电镜表征损伤程度,进而分析其损伤破坏机理。

1 实验

1.1 实验样品

实验样品选用两种常用抗高过载炸药,分别为含 HMX 的浇注炸药和压装炸药。其中浇注炸药采用真空混合,并直接浇注装填在钢管中。压装炸药压制成直径 25 mm,高 25 mm 的小药柱。

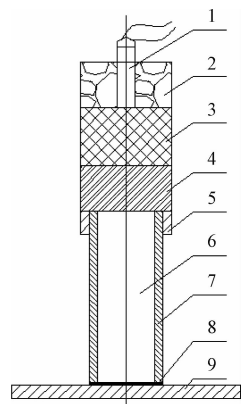
1.2 冲击损伤实验

实验采用 GJB 772 A—97 中的隔板实验对炸药试样进行冲击加载,实验装置如图 1 所示。

1.3 实验方法

(1)为研究不同冲击强度对炸药损伤特性的影

2017 年 6 月 9 日收到
总装备部预研基金
(9140C350504150C35161)资助
第一作者简介:姜夕博(1985—),女,博士。研究方向:混合炸药性能评估。



1 为 8 号电雷管;2 为雷管座;3 为主发药柱;4 为隔板;5 为支架;
6 为试样;7 为试件壳体;8 为硬纸板垫片;9 为见证板
图 1 冲击波感度实验装置示意图
Fig. 1 Sketch map of experimental device
for shock wave sensitivity

响,首先需要确定冲击损伤的加载条件。本文按照升降法调整冲击损伤实验的隔板厚度。确定隔板厚度的原则为试样不发生反应,且实验完成后样品基本完整。基于此条件,两炸药各进行三种不同隔板厚度条件下的冲击损伤实验,研究未损伤及不同冲击加载条件下炸药的损伤特性。

(2)计算机层析 X 射线摄影系统(以下简称 CT 系统),是基于 X 射线成像原理的扫描成像技术,主要用于检测产品的内部结构。CT 检测损伤炸药的一个很大优势是能够直接检测炸药整体,不需要二次处理,这样就不会对样品造成二次损伤。所以在样品损伤后整体能够保持基本完整的前提下,利用 CT 对样品进行检测是一种非常可行的方式。本文实验采用 CT 系统,不需要特殊制备,直接检测带壳体的试样。检测时,沿着样品轴向不同高度选取工作界面,两炸药检测界面如图 2 所示。

(3)为观察不同损伤条件下炸药的微观结构,

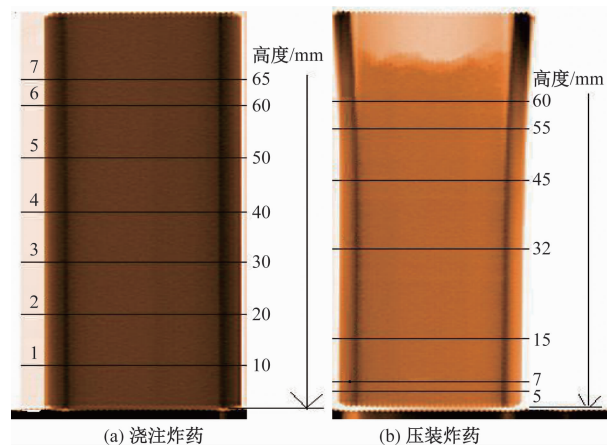


图 2 两种炸药 CT 检测工作界面
Fig. 2 CT working interface of the two explosives

采用扫描电子显微镜(以下简称扫描电镜),对回收的炸药试样喷涂导电层后进行显微观察。

2 实验结果与分析

在冲击损伤实验开展前,首先利用冲击波感度实验确定了两炸药的临界隔板值。结果为浇注炸药的临界隔板值在 33 ~ 34 mm 之间,压装炸药的临界隔板值在 38 ~ 39 mm 之间。为保证样品在冲击波作用下只产生损伤,不发生反应,进行冲击损伤实验的隔板厚度必须大于其临界隔板厚度。所以浇注炸药的冲击损伤隔板值分别选取 35.5 mm、38 mm 和 48 mm 三种,压装炸药的冲击损伤隔板厚度分别选取 40 mm、43 mm 和 45 mm。

2.1 CT 检测结果

利用 CT 系统,不仅能够得到样品的内部结构,还能得到两种炸药轴向各界面的 CT 值,结果分别见表 1 和表 2。其中浇注炸药的隔板厚度 35.5 mm 和压装炸药的 40 mm 中“—”的位置,是由于炸药在冲击损伤实验中,靠近主发药柱的部分在冲击波的作用下被打散,导致不能得到 CT 值。压装炸药未损伤炸药检测的是高度为 25 mm 的小药柱,所以只检测了三个界面的 CT 值。

从得到的 CT 值通过换算能够得到样品的密度^[10],具体算法为

$$\rho_i = \rho_0 C_i / C_0。$$

式中, ρ_0 和 C_0 为检测用模拟药柱的密度和对应的 CT 值; ρ_i 和 C_i 为样品的密度和对应的 CT 值。由于采用的模拟药柱相同,所以得到的 CT 值能反映样品的密度。

表 1 浇注炸药的 CT 检测结果
Table 1 CT testing results of casting explosive

序号	工作界面 高度/mm	未损伤 炸药	隔板厚/mm		
			48	38	35.5
1	10	3 254	3 237	3 208	3 211
2	20	3 257	3 236	3 210	3 100
3	30	3 259	3 247	3 223	3 217
4	40	3 253	3 256	3 221	3 133
5	50	3 255	3 259	3 230	2 850
6	60	3 251	3 254	3 247	—
7	65	3 261	3 249	3 237	—

从 CT 检测结果可以看出,与未损伤试样相比,冲击损伤后的样品密度均发生了变化。然而两者的变化趋势不同,浇注炸药损伤后的 CT 值有变小的趋势,压装炸药变化趋势相反。分析其原因,可能是由于两者的成型工艺不同导致的。浇注炸药为热固性炸药,采用真空浇注固化工艺制备,在制备的过程

中炸药混合物就具有一定的流动性,从而填满了各个角落。冲击损伤实验中,部分冲击波的能量转换为样品损伤破坏所需的能量,样品中出现了更多的孔隙和微裂纹等损伤,样品变得更加松散,导致密度变小。而采用压装工艺的炸药,样品本身是由造型粉颗粒在一定压力作用下压实制备。发生损伤后,造型粉颗粒不仅发生破碎,而且在冲击波的作用下发生流动,颗粒间的空隙由破碎的颗粒填充,此外小颗粒也能够填充到大颗粒的空隙中,导致颗粒间的空隙减少,使炸药整体被进一步压实,最终样品密度变大。

表 2 压装炸药的 CT 检测结果
Table 2 CT testing results of pressed explosive

序号	工作界面 高度/mm	未损伤 炸药	隔板厚/mm		
			45	43	40
1	5	3 095	3 351	3 363	3 390
2	7	3 082	3 280	3 301	3 308
3	15	3 100	3 259	3 288	3 206
4	32	—	3 270	3 233	3 283
5	45	—	3 268	3 292	3 240
6	55	—	3 233	3 270	—
7	60	—	3 214	3 279	—

2.2 扫描电镜结果

采用扫描电镜,观察未损伤及三种不同损伤程度的浇注炸药图像见图 3。由于压装炸药具有脆性断裂的性质,取样的过程会在样品中产生新的损伤,故未进行扫描电镜试验。

由未损伤样品扫描电镜结果可以看出,炸药晶体、铝粉与黏结剂之间的交界面整体粘结的较好,没有颗粒破碎以及脱粘等现象发生。表层的炸药颗粒表面光滑,有些颗粒表面没有被黏结剂完全包覆。

图 3(b) ~ 图 3(d) 三张损伤后的图像中,观察到大量的炸药晶体之间以及晶体与黏结剂之间的脱粘现象,同时炸药晶体之间以及晶体与铝粉之间出现了很多孔洞。实际上当裂纹在炸药和黏结剂的界面扩展时,断裂表面能较小,而当裂纹在黏结剂中扩展时,断裂表面能较大,后者至少比前者高两个数量级,即破坏很容易在炸药和黏结剂的界面发生。所以在损伤的图像中,即使冲击损伤的能量很大,也以界面脱粘为主,没有发现黏结剂断裂的现象。

隔板厚度为 48 mm 时,可以看到晶体断裂的现象,这种晶体断裂的现象仅出现了一次。这一点与 Palmer 等^[11]的计算结果吻合,近似计算中发现,界面脱粘应力和形成孔洞的临界应力显著低于炸药晶体的断裂应力,所以不会发生大面积的炸药晶体的断裂现象。

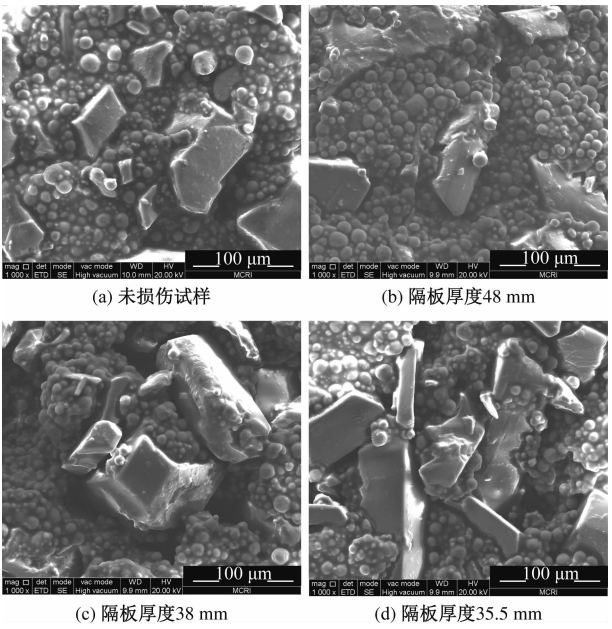


图 3 浇注炸药的扫描电镜图像
Fig. 3 Scanning electron microscope image of casting explosive

此外从损伤后的图像中可以看出,随着隔板厚度的降低,炸药晶体与黏结剂之间脱粘现象更加显著。这是由于隔板厚度变小后,冲击波衰减程度更小,作用在样品上的能量变大。当冲击波到达晶体与黏结剂界面后,产生的应力分量大于临界脱粘应力造成的。同时当损伤达到一定临界值后,微孔洞开始结合,导致孔洞进一步增大增多。

从扫描电镜的结果可以看出,在冲击波的作用下,浇注炸药损伤破坏的机制包括以下三个方面:界面的脱粘、微孔洞的扩张和少量晶体断裂。这三种现象是导致炸药力学性能劣化甚至发生最终破坏,以及影响其安全性的关键原因。

3 结论

(1) 损伤后炸药密度的变化与样品的成型工艺有关,浇注成型的炸药损伤后密度变小,而压装成型的炸药损伤后密度反而变大,这种区别会如何影响其安全性,将在后续的研究中继续开展。

(2) 冲击波在与炸药样品作用的过程中,部分能量转换为炸药晶体与黏结剂损伤破坏所需的能量。而且随着冲击波强度的逐渐增大,炸药晶体与黏结剂之间的脱粘现象越明显,微孔洞也逐渐增大增多。从扫描电镜的结果可以看出,在冲击波的作用下,浇注炸药破坏的主要原因包括界面的脱粘、微孔洞的生长以及少量炸药晶体的断裂。

(3) 通过 CT 检测和扫描电镜进行细观观察,将有助于加深对冲击波作用下热点形成机理的认识,

为后续进一步研究损伤炸药的安全性提供支持。

参 考 文 献

- 1 Field J E, Parry M A, Palmer S J, *et al.* Deformation and explosive properties HMX powers and polymer bonded explosive. 9th Symposium (International) on Detonation, Portland, Oregon, 1989; 886—896
- 2 陈鹏万, 丁雁生. 高聚物粘结炸药的力学行为及变形破坏机理. 含能材料, 2000;8(4): 161—166
Chen Pengwan, Ding Yansheng. Mechanical behaviour and deformation and failure mechanisms of polymer bonded explosives. Chinese Journal of Energetic Materials, 2000;8(4): 161—166
- 3 周忠彬. 高聚物粘结炸药宏/微观力学行为及变形破坏研究. 北京:北京理工大学, 2012
Zhou Zhongbin. Study on macro/micromechanical properties, deformation and failure of polymer-bonded explosives. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012
- 4 孙培培, 王晓峰, 南海, 等. 落锤冲击加载下炸药基体内不同粒度 AP 颗粒破碎特征. 含能材料, 2015;23(1): 53—56
Sun Peipei, Wang Xiaofeng, Nan Hai, *et al.* Fracture feature of AP grains with different sizes within explosive substrate under drop hammer impact loading. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015;23(1): 53—56
- 5 田 勇, 张伟斌, 温茂萍, 等. JOB-9003 高聚物粘结炸药热冲击损伤破坏相关性研究. 含能材料, 2004;12(3): 174—177
Tian Yong, Zhang Weibin, Wen Maoping, *et al.* Research on correlation of thermal shock damage of PBX JOB-9003. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004;12(3): 174—177
- 6 田 勇, 张伟斌, 郝 莹, 等. 炸药热冲击损伤破坏及超声波特性参量检测. 火炸药学报, 2000;23(4): 13—15
Tian Yong, Zhang Weibin, Hao Ying, *et al.* Thermal shock damage of explosive and its ultrasonic characterization. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2000;23(4): 13—15
- 7 丁雁生, 潘 颖, 蔡瑞娇, 等. PBX 材料的蠕变损伤本构关系. 含能材料, 2000;8(2): 86—92
Ding Yansheng, Pan Ying, Cai Ruijiao, *et al.* The creep-damage constitutive relation of PBX. Chinese Journal of Energetic Materials, 2000;8(2): 86—92
- 8 李俊玲, 傅 华, 谭多望, 等. PBX 炸药的拉伸断裂损伤分析. 爆炸与冲击, 2011;31(6): 624—630
Li Junling, Fu Hua, Tan Duowang, *et al.* Fracture damage analysis of PBX. Explosion and Shock Waves, 2011;31(6): 624—630
- 9 颜嘉琳, 李敬明, 周 阳, 等. 高聚物粘结炸药温湿度载荷加速老化试验研究. 含能材料, 2009;17(4): 412—415
Yan Xilin, Li Jingming, Zhou Yang, *et al.* Temperature-humidity-load accelerating age tests of PBX. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009;17(4): 412—415
- 10 高玉玲, 张 峰, 马 燕, 等. 一种工业 CT 定量检测炸药装药密度的方法. 火炸药学报, 2014;37(1): 58—61
Gao Yuling, Zhang Feng, Ma Yan, *et al.* A method of industrial CT quantitative detection of explosive charge density. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014;37(1): 58—61
- 11 Palmer S J, Field J E, Huntley J M. Deformation, strengths and strains to failure of polymer bonded explosives. Proc R Soc Lond A, 1993;440: 399—419

Damage Characteristics of Two Typical Anti-high-loading Explosives under Shock Loading

JIANG Xi-bo, WANG Jian-ling, JIN Peng-gang, YANG Jian YANG Hui

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

[Abstract] To study the damage characteristics of typical anti-high-loading explosive under shock loading conditions, a series of shock damage experiments were conducted in casting explosive and pressed explosive based on card gap test. Different card thicknesses were used to achieve different damage degree. The damage characteristic of samples before and after shock loading were studied by use of CT system and scanning electron microscope (SEM). The results show that the density changing of damaged samples are related to moulding techniques. The densities of explosive by casting moulding decrease and explosive by pressed fitting increase after shock damage experiments. The SEM of casting explosive results show that with the increase of shock strength, the interface debonding between explosive crystal and binder become more obvious and the microvoid become more bigger.

[Key words] shock damage anti-high-loading explosive damage characteristics