

文章编号: 1006-9941(2015)01-0053-04

## 落锤冲击加载下炸药基体内不同粒度 AP 颗粒破碎特征

孙培培, 王晓峰, 南海, 郭 昕

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为研究炸药基体内不同粒度高氯酸铵(AP)颗粒在落锤冲击加载下的破碎特征,用中粒径为6~8,130,300  $\mu\text{m}$ 的 AP 制备了三种 AP/HTPB 样品,用落锤冲击加载损毁样品。回收冲击试验后样品,用扫描电镜(SEM)研究 AP 颗粒的破碎特征。分析炸药基体内不同粒度 AP 颗粒在落锤冲击加载下的破碎特征。结果表明,冲击加载后,三种样品内的 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。破碎后 AP 颗粒尺寸均在10~100  $\mu\text{m}$ ,最小颗粒小于10  $\mu\text{m}$ 。结合材料剪切理论、AP 颗粒破碎特征和破碎尺度,可推断:在落锤冲击下 AP 颗粒由于样品内部的剪切作用发生脆性断裂,且 AP 颗粒破碎尺度特征与材料剪切现象中的剪切带尺寸特征相类似。

**关键词:** 含能材料损伤学;高氯酸铵(AP);落锤冲击加载;破碎特征;绝热剪切

**中图分类号:** TJ55; O34

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.011

### 1 引言

高氯酸铵(AP)作为一种氧化剂,广泛地应用于复合炸药中以提高能量。刘子如<sup>[1]</sup>对 AP 的热分解进行了详细研究;王彩玲等<sup>[2]</sup>对不同粒度的 AP 颗粒进行了感度试验,发现随着粒度的减小感度增大;田轩等<sup>[3]</sup>对单独 AP 颗粒冲击后破碎特征进行了分析,但对 AP 在基体内的破碎未进行研究,结果表明 AP 颗粒的破碎以局部脆性断裂为主。Fox<sup>[4]</sup>和 Balzer<sup>[5]</sup>使用落锤对含 AP 的炸药配方进行动态加载试验,结果表明含 400  $\mu\text{m}$  粒径 AP 的试样大概有 1/5 发生了点火,而含 30  $\mu\text{m}$  粒径 AP 颗粒的试样上只发现了 1 到 2 处的点火点,作者简略分析了 AP 颗粒在冲击加载后的破碎方式,认为样品中 AP 颗粒粒度越大,在冲击加载下,样品越容易点火。陈鹏万等<sup>[6]</sup>对低速冲击下炸药及推进剂内部晶体颗粒的破碎进行了研究,并对冲击加载后颗粒的粒度和比表面积进行了测定,发现冲击加载后,含能材料内部的黑索今(RDX)、奥克托今(HMX)颗粒均发生破碎,形成了较小的颗粒。但是,目前对于 AP 颗粒在力学加载下的破碎特征问题研究较少。

田轩等<sup>[3]</sup>已经对单独 AP 颗粒在落锤冲击下的破碎特征进行了研究,但在落锤冲击加载下,单独 AP 颗

粒与 AP 颗粒存在于炸药基体内破碎特征可能不同,且研究炸药基体内 AP 颗粒的破碎特征对实际应用更具有实际意义。故本研究采用目前常用三种规格(6~8,130,300  $\mu\text{m}$ )的 AP 颗粒制备炸药样品,对样品进行落锤加载试验,通过微观扫描电镜(SEM)对 AP 在炸药基体内的破碎特征进行了分析研究。

### 2 试验

#### 2.1 仪器与原材料

WL-1 型落锤仪,自制;FEI QUANTA 600 型微观扫描电子显微镜(SEM),美国 FEI 公司,试验电压为 20kV,环境为高真空模式。

6~8  $\mu\text{m}$  AP,西安航天化学动力厂;130  $\mu\text{m}$  AP、300  $\mu\text{m}$  AP、GJB617A-2003,大连国际工贸;GJB617A-2003,大连国际工贸;端羟基聚丁二烯(HTPB),VI型,黎明化工研究院。

#### 2.2 样品制备

通常炸药配方中所含颗粒组分较多,若以炸药进行落锤试验后的样品进行分析研究,影响因素太多,无法较好分辨出 AP 的破碎特征。考虑到本研究主要是对 AP 颗粒破碎特征进行分析,其他组分的存在与否对试验结果影响微弱,为更好地对 AP 的破碎特征进行分析,故采用的样品主要由两种组分组成:炸药配方中最常用的粘结剂 HTPB 与三种不同粒度的 AP 颗粒。

将三种粒度(6~8,130,300  $\mu\text{m}$ )的 AP 与 HTPB

收稿日期: 2013-06-25; 修回日期: 2014-04-24

作者简介: 孙培培(1984-),女,工程师,主要从事军用混合炸药相关研究工作。e-mail: 269619821@qq.com

按质量比 7/3 真空混合, 并浇注装填在  $\Phi 20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  模具中, 固化成型退模后将药柱加工成  $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的样品, 分别编号为 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 待测。

### 2.3 落锤试验方法

GJB772A-1997 中 609.1<sup>[7]</sup> 药片撞击感度是采用落锤加载来评价炸药药片感度的一种试验方法, 其试验原理是在限制的两光滑的硬表面间放置一定量的药片, 用一定质量的落锤自某一落高自由对药片进行撞击作用, 根据药片的响应评价炸药药片的撞击感度, 其原理图如图 1 所示。

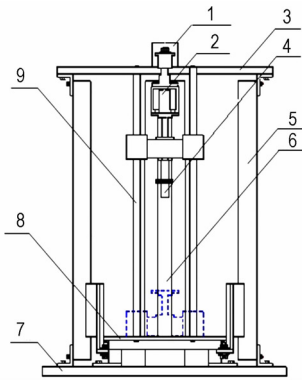


图 1 落锤加载试验原理图

1—步进电机, 2—挂锤架, 3—顶板, 4—锤头, 5—气缸, 6—滚珠丝杠, 7—底板, 8—托锤架, 9—导杆

**Fig.1** Schematic diagram for drop hammer loading instrument  
1—stepping motor, 2—hammer hanging frame, 3—backing plate 4—hammer, 5—air cylinder, 6—ball screw shaft, 7—baseplate, 8—the hammer supporting frame, 9—guide rod

本研究不评价样品的撞击感度, 仅把落锤试验作为冲击加载的一种手段, 目的是对样品内部造成损伤, 使内部 AP 颗粒发生破碎, 观察药柱内部 AP 颗粒的破

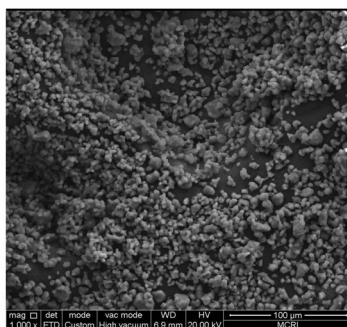
碎特征。试验采用 30 kg 的落锤, 落高为 25 cm。

### 3 结果与讨论

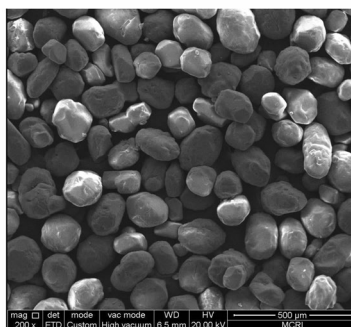
三种粒度 AP 的原始颗粒电镜照片如图 2 所示。

对三种冲击加载后的样品进行了回收, 在药柱中心处取样, 微观电镜结果如图 3 所示。对比三种粒度 AP 损伤前(图 2)与损伤后的 SEM 图(图 3)可发现, 随着 AP 粒度增大, 破碎程度呈增大的趋势。6~8  $\mu\text{m}$  AP 颗粒损伤前后基本未发生变化, 未发现破碎成更小更碎颗粒的现象, 130  $\mu\text{m}$  AP 只有部分颗粒由于穿晶断裂发生破裂, 仍可见一些未发生破碎的完整的 AP 晶体, 而 300  $\mu\text{m}$  AP 多数颗粒由于穿晶断裂导致的颗粒破碎, 破碎程度较严重, 完整未发生破碎的晶体颗粒较少; 且在含 130  $\mu\text{m}$  与 300  $\mu\text{m}$  粒径 AP 的样品中均发现较多由于粘结剂失效造成颗粒拉出或破碎所致的空洞结构, 并在部分晶体上发现了类似剪切带的现象, 如图 4 所示。为对 AP 破碎后的尺寸进行半定量分析, 对破碎后的尺寸进行了标定, 如图 5 所示。由图 5 可见, 而 6~8  $\mu\text{m}$  的 AP 颗粒在加载前后颗粒尺寸未发生变化, 颗粒尺寸均在 6~8  $\mu\text{m}$  左右, 130  $\mu\text{m}$  与 300  $\mu\text{m}$  的 AP 颗粒破碎后尺寸均在 10~100  $\mu\text{m}$  左右, 最小尺寸均在 10  $\mu\text{m}$  以下。

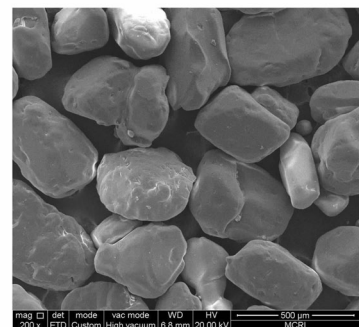
众所周知, 在冲击加载下, 药柱将发生快速的压缩和反弹。在此过程中药柱内部所承受应力可能会产生振荡现象, 这种应力振荡现象将对药柱内部颗粒进行剪切, 揉搓等作用, 使药柱内部颗粒发生破碎, 而 AP 颗粒通常较脆, 所以在冲击加载中 AP 更容易发生破碎, 形成更细的颗粒<sup>[6]</sup>, 这可由图 3 中损伤后 AP 颗粒的电镜结果证实。



a. 6~8  $\mu\text{m}$



b. 130  $\mu\text{m}$



c. 300  $\mu\text{m}$

图 2 三种 AP 晶体冲击加载前的 SEM 图

**Fig.2** SEM photos of three kinds of AP grains before impact

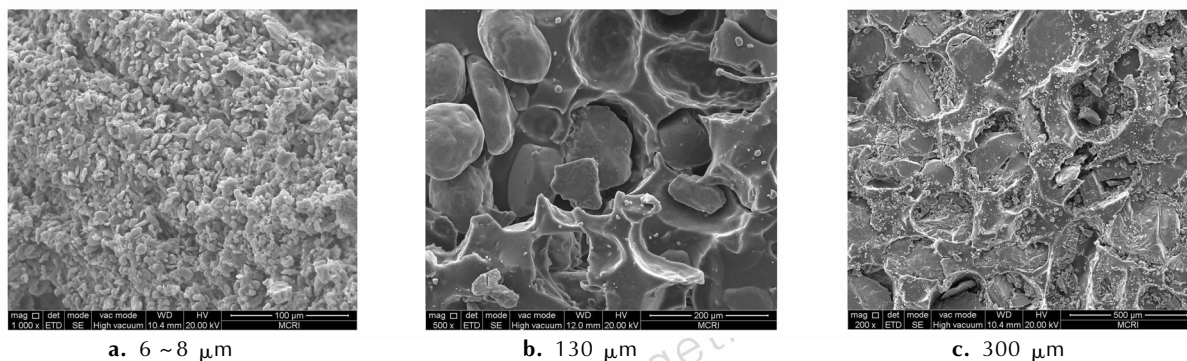


图 3 三种 AP 颗粒试验后 SEM 图

Fig.3 SEM photos of three kinds of AP after impact

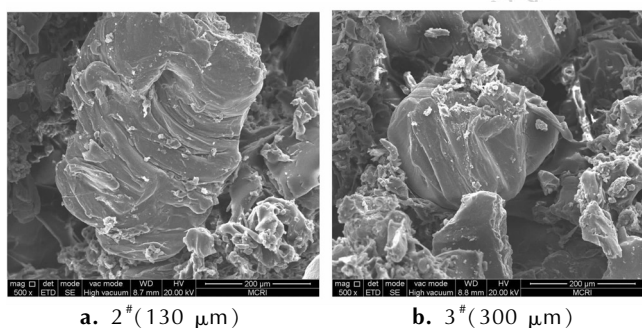


图 4 AP 晶体上剪切带 SEM 图

Fig.4 SEM photos of shear bands on AP particles

结合电镜试验中发现的剪切带现象和破碎尺度特征,推断认为,AP 颗粒的破碎可能是由于高应变率而产生的绝热剪切作用造成的。绝热剪切 (adiabatic shearing) 是材料在冲击载荷下力学行为的一个重要方面,这一现象普遍存在于高速撞击、侵彻、冲孔、高速成型、切削、冲蚀等涉及冲击载荷的高速变形过程中。之所以称之为绝热剪切,是由于这一现象一般具有两个最基本的特征:其一,从热力学的角度来说总与冲击载荷下材料的高速变形接近于绝热过程这一特征分不开;

这时,变形过程中的非弹性功所转化的热量将引起绝热温升,从而引起剪切带的形成和发展;其二,最主要的是在显微观察上总以形成剪切变形高度局域化的、宽约 10~100 μm 量级的所谓剪切带 (shear band) 为主要特征<sup>[8]</sup>。

由材料绝热剪切特征剪切带宽度为 10~100 μm 可知,当 AP 颗粒粒度大于 100 μm 时,即大于剪切带的最大宽度时,AP 颗粒较大,存在颗粒“横跨”剪切带现象,在剪切作用下颗粒将发生脆性断裂,3# 样品所采用的 AP 颗粒中粒径为 300 μm,远远大于剪切带的宽度,故在电镜照片中观察到大量破碎的 AP 晶体,且断裂后颗粒尺寸应小于或等于剪切带的宽度,即小于或等于 10~100 μm; 2# 样品 AP 中粒径为 130 μm,其中部分 AP 颗粒的粒径大于 100 μm,所以在电镜照片中观察到了颗粒破碎,但破碎程度较 3# 样品的破碎程度小,破碎后 AP 颗粒尺寸同样小于或等于剪切带的宽度;而当 AP 颗粒小于 10 μm,小于剪切带的最小宽度时,绝大多数的 AP 颗粒在剪切带运动过程中将完全“隐身”于剪切带中,随着剪切带的运动而运动,不发生破碎,1# 样品 AP 中粒径为 6~8 μm,其中 AP 颗

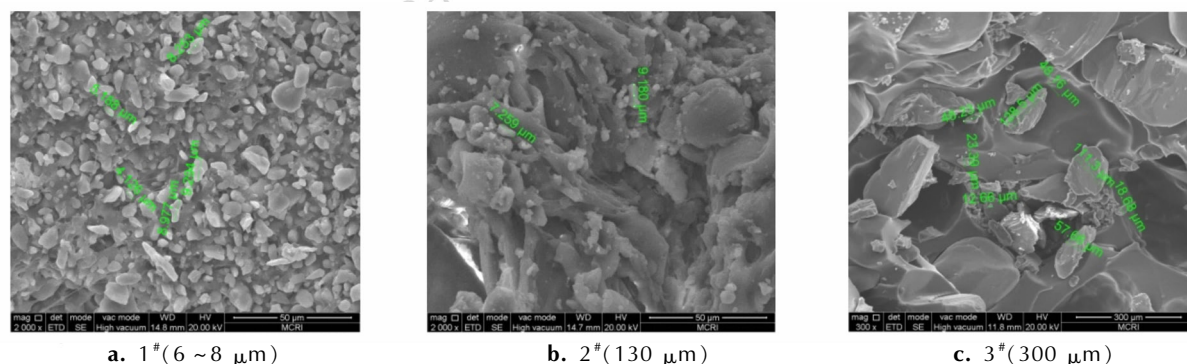


图 5 AP 颗粒冲击后尺寸标定 SEM 图

Fig.5 SEM photos of AP particles size after impact

粒绝大部分粒径是小于 10  $\mu\text{m}$  的, 所以 AP 颗粒基本未发生破碎, 从微观 SEM 图上基本看不出 6 ~ 8  $\mu\text{m}$  AP 加载前后发生变化。

#### 4 结 论

(1) AP/HTPB 样品内 AP 颗粒在落锤冲击作用下发生破碎, 且随着粒度增大, 破碎程度越严重, 在某些颗粒上可观察到剪切带的特征。AP 颗粒破碎后的尺寸均在 10 ~ 100  $\mu\text{m}$ , 最小尺寸小于 10  $\mu\text{m}$ 。

(2) 结合 AP 颗粒破碎存在的剪切带特征、破碎尺度特征和材料剪切带理论, 可以推断在落锤冲击下 AP 颗粒由于药柱内部剪切作用发生脆性断裂, 且 AP 颗粒破碎尺度特征与材料剪切现象中的剪切带尺寸特征相类似。

#### 参考文献:

- [1] 刘子如. 含能材料热分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.  
[2] 王彩玲, 赵省向. 不同粒度 AP 的机械感度[J]. 火炸药学报, 2006, 29(6): 27-29.

- WANG Cai-ling, ZHAO Sheng-xiang. Mechanical sensitivity of AP with different particle size[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*. 2006, 29(6): 27-29.  
[3] 田轩, 王晓峰, 南海, 等. 撞击加载下炸药晶体的破碎特征[J]. 火炸药学报, 2012, 35(1): 27-31.  
TIAN Xuan, WANG Xiao-feng, NAN Hai, et al. Fracture feature of explosive crystal under impact loading[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(1): 27-31.  
[4] Fox P G, Soria-Ruiz. Fracture-induced thermal decomposition in brittle crystalline solids [J]. *Proc R Soc Lond, A*, 1970, 317: 79-90.  
[5] Balzer J E, Siviour C R, Walley S M, et al. Behaviour of ammonium perchlorate-based propellants and a polymer-bonded explosive under impact loading[J]. *Proc R Soc Lond A*, 2004: 781-806.  
[6] 陈鹏万, 黄风雷. 含能材料损伤理论及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 59-65.  
CHENG Peng-wang, HUANG Fei-lei, et al. The damage theory and implement of energetic materials[M]. Beijing: Beijing Institute of Press, 2006: 59-65.  
[7] 国防科技工业委员会. GJB772A-1997, 炸药试验方法[S].  
[8] 胡八一, 董庆东, 韩长生, 等. 绝热剪切研究的现状与意义[J]. 爆轰波与冲击波, 1996(2): 26-32.  
HU Ba-yi, DONG Qing-dong, HAN Chang-sheng, et al. Present situation and significance of the adiabatic shear[J]. *Detonation and Shock Waves*, 1996(2): 26-32.

### Fracture Feature of AP Grains with Different Sizes within Explosive Substrate under Drop Hammer Impact Loading

SUN Pei-pei, WANG Xiao-feng, NAN Hai, GUO Xin

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

**Abstract:** To investigate the fracture characteristics of ammonium perchlorate (AP) grains with different sizes within explosive substrate, three kinds of AP/HTPB samples were prepared using three kinds of AP grains with intermediate diameter of 6-8  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  and 300  $\mu\text{m}$ . The samples were damaged by drop hammer impact loading. The samples after impact test were reclaimed and the fracture feature of AP grains was studied using scanning electron microscope (SEM). The fracture characteristics of AP grains with different sizes within explosive substrate under drop hammer impact loading were analyzed. Results show that after impact loading, lots of brittle ruptures of AP grains in three kinds of samples occur, the shear bands can be seen in some samples, and the bigger the particles, the worse the fracture. The sizes of AP grains after fracture are between 10-100  $\mu\text{m}$ , and the minimum size is less than 10  $\mu\text{m}$ . Combined the shear band theory, the AP rupture characteristic and the rupture size of AP, ones can deduce that under drop hammer impact loading, the brittle ruptures of AP grains take place because of the shear effect of the sample inside, and the fracture size feature of the AP grains is similar to that of the shear bands in shear phenomena of materials.

**Key words:** damage of energetic materials; ammonium perchlorate (AP); drop hammer impact loading; fracture feature; adiabatic shearing

CLC number: TJ55; O34

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.011