文章编号：1000-5773(2007)01-0020-09

PBX 代用材料动态力学行为和微观结构的实验研究*

张 鹏[1]，赵 峰[2]，白树林[1]，傅 缤[1]，张国华[1]

(1. 北京大学工学院力学与空天技术系先进复合材料中心，北京 100871；
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900)

摘要：研究了固体炸药 PBX 代用材料 D-90031 的微观结构、压制过程中产生的原生缺陷形态，以及动态力学行为和破坏特征。采用数字图像分析技术、纳米力学测试系统，以及分离式霍普金森压杆(SHPB)实验和落锤冲击技术，获得了微观结构特点、各组分的硬度和弹性模量、动态性能，以及碎片的尺寸分布规律和材料的破坏形式。研究发现，晶粒的形态随外载的作用而改变，晶粒沿垂直加载方向伸长，材料的碎块尺寸满足一定的规律。研究结果对于深入认识固体炸药的性能与微观结构的关系具有一定的指导意义。

关键词：PBX 代用材料；动态力学行为；微观结构
中图分类号：O346.5 **文献标识码**：A

1 引 言

PBX 是高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive)的简称，是以高能猛炸药为主体，加入胶粘剂、增塑剂、钝感剂等物质而成的高能固体炸药，是武器的主要装药，有非常广泛的应用。在外界环境刺激下，PBX 材料的安全性能决定了武器的安全性能。PBX 材料的力学行为不仅与武器的易损性和实用性有关，而且涉及到 PBX 发生化爆的热点形成机理以及爆炸效果，因此，对 PBX 材料力学性能进行研究具有重要的意义。

研究表明[1]，PBX 的力学性能受聚合物组分的种类和含量影响很大。因此，不同性能的聚合物及其含量，对改善 PBX 力学性能的效果差异十分显著。在同样的组分含量下，PBX 的力学性能主要受炸药颗粒尺寸的大小和粒度分布的影响[2-3]。多数情况下，在相同的炸药和聚合物含量的条件下，细颗粒比粗颗粒构成的 PBX 炸药的拉伸和压缩性能好。

采用显微观察、超声、声发射、X 射线衍射和核磁共振等手段，可以对 PBX 材料的微观结构与损伤进行直接观测与评估，也可以通过测量体积、弹性模量和泊松比等的变化来评估 PBX 材料的损伤。曹阳等[4]采用扫描电镜和 X 射线衍射等方法，研究了不同颗粒尺寸 TATB 基 PBX 体系制备过程中的微观结构，观察到一些典型的压制过程中产生的原生缺陷，并采用电子探针测定了含氟和氯的粘结剂在药柱中的分布状态。罗景润[5]采用声发射技术对 PBX 材料损伤演化过程进行了检测。陈鹏万等[6]在间接拉伸的巴西实验过程中，观察到 PBX 内炸药颗粒与粘结剂界面脱粘与穿晶断裂现象，并在裂纹扩展断裂路径上发现粘结剂拉丝现象。张鹏等[7]在对 PBX 代用材料进行压缩破坏过程中，也发现了类似的脱粘、穿晶与拉丝现象。Palmer 等[8]对 PBX 材料的破坏过程进行了显微观察，并在实验研究的基础上

* **收稿日期**：2005-11-08；**修回日期**：2006-01-18
基金项目：国防科技重点实验室基金
作者简介：张 鹏(1979—)，男，硕士研究生，主要研究方向为固体炸药的性能与结构. E-mail：xiaoqiang666@sina.com
通讯作者：白树林(1961—)，男，教授，博士生导师，主要研究方向为复合材料力学，材料的微观结构与力学行为的关系. E-mail：slbai@pku.edu.cn

对 PBX 材料几种可能的变形破坏机理进行了理论分析。Chen 等[9]采用自制的低速冲击加载系统对 PBX 进行了冲击破坏,通过对透过试样的超声波谱进行分析,将波谱主频与冲击力和破坏程度进行关联,并采用 Malvern 2000 粒子尺寸分析仪对冲击前后 PBX 炸药中颗粒尺寸的分布进行了统计。董海山[10]、Gray[11]等通过实验研究,测定了多种粘结炸药材料的力学性能、热性能与爆轰性能,研究了温度和应变率对 PBX 材料变形破坏的影响,充分证实了 PBX 材料的应变率硬化效应与热软化效应。

本工作首先对 PBX 代用材料 D-90031 的微观结构与原生缺陷形态、以及各组分的硬度和弹性模量进行了测定。随后完成了动态霍普金森压杆(SHPB)压缩实验和落锤实验,并对实验结果进行了分析。

2　D-90031 微观结构的统计分析

D-90031 主要用于模拟 PBX JO-9159 的力学性能,其主要成分如表 1 所示,其常规力学性能在参考文献[13]中给出。

图 1 是用数码相机拍摄的 D-90031 试样全貌。将试样表面喷金,在扫描电镜下观察,可以得到更为清晰的图像。图 2 是一张在扫描电镜下拍摄的 D-90031 试样表面的典型照片。由于试样中各组分导电率不同,因此在电镜下呈现出不同的图像衬度。

表 1　D-90031 的成分[12]

Table 1　The composition of D-90031[12]

Composition	Mass fraction w/(%)	Density ρ/(g/cm^3)	Surface appearance	Composition	Mass fraction w/(%)	Density ρ/(g/cm^3)	Surface appearance
$Ba(NO_3)_2$	47	3.24	Transparent, white cubic crystalsof	F_{2311}	2	—	—
$C(CH_2OH)_4$	50	1.35	White or yellow crystalline powder	As	1	—	—



图 1　D-90031 试样外观形貌

Fig. 1　The appearance of a D-90031 sample

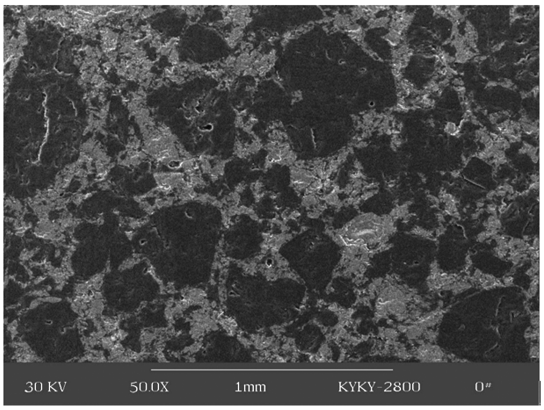


图 2　扫描电镜下 D-90031 试样表面形貌

Fig. 2　The SEM micrograph of D-90031 surface

提高放大倍率可以更仔细地观察两个主要组成相的结构。从图 3 中可以看到,硝酸钡晶体的片层状结构,由于模压工艺的影响,硝酸钡晶体中存在很多孔洞以及微裂纹。由图 4 可以看到,粉末状的季戊四醇,也是由于模压工艺的影响,季戊四醇粉末大部分都由于挤压而粘连在一起。由于模压过程中受力不均,季戊四醇粉末粘连程度不尽相同,有些部分较密实,有些部分较松散。跟硝酸钡晶体内部一样,粘连在一起的季戊四醇内部也存在许多孔洞。仔细观察不难发现,硝酸钡晶体内部的孔洞多是由于内部微裂纹扩展,导致其片层状结构断裂而产生的,而季戊四醇粘连体内部的孔洞多是由于粘连不够紧密而产生的。

区分 PBX 中主体炸药粒度的常用分析方法是采用传统的筛网分析法,即采用不同口径的筛网对主

体炸药颗粒进行筛分，取上下两筛的中间物作为一个颗粒等级，进而可以在不同等级的颗粒中按比例选取，加工成具有不同粒度级配的样品进行研究。然而在实际的造型粉模压成型制造过程中，PBX 中主体炸药颗粒要在一定的高温中承受比较大的压力，这就不可避免地导致部分炸药颗粒在加工过程中被挤压变型，甚至破碎成更细小的炸药颗粒，造成加工前后炸药颗粒的粒度极配发生变化。本工作基于数字图像分析技术，发展了一种可应用于评估成品 PBX 中炸药颗粒粒度及形貌特征的分析方法。

本工作实际测定的是硝酸钡晶粒尺寸、取向等形态参数的分布规律。由于硝酸钡晶粒的形状不规则，采用等效圆直径作为衡量硝酸钡晶粒尺寸的参数，也就是面积和原硝酸钡晶粒面积相等的圆的直径。另外为了更细致地描述晶粒的形态，还选取拟合椭圆的长轴与 x 方向的夹角作为晶粒的取向参数，并将拟合椭圆的短轴长轴比作为描述晶粒狭长度的参数。关于等效圆直径、晶粒取向与短长轴比的定义请参照表 2。其中 x 轴是试样表面沿任意直径方向，以及在横断面上平行于试样表面的方向取向。

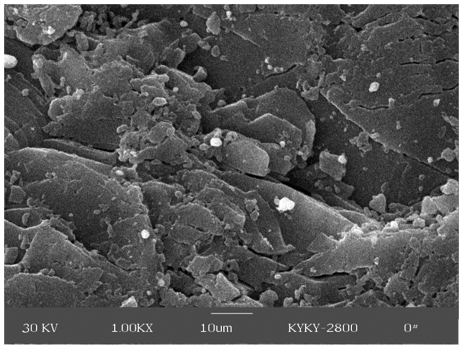


图 3 扫描电镜下硝酸钡晶体照片

Fig. 3 SEM micrograph of $Ba(NO_3)_2$ crystals

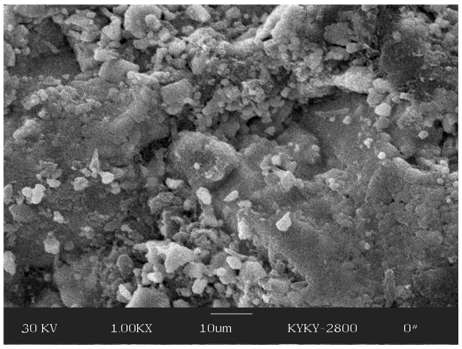
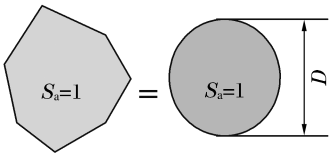
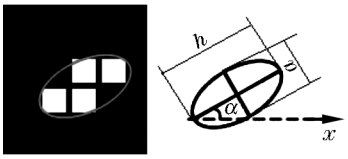


图 4 扫描电镜下季戊四醇照片

Fig. 4 SEM micrograph of $C(CH_2OH)_4$

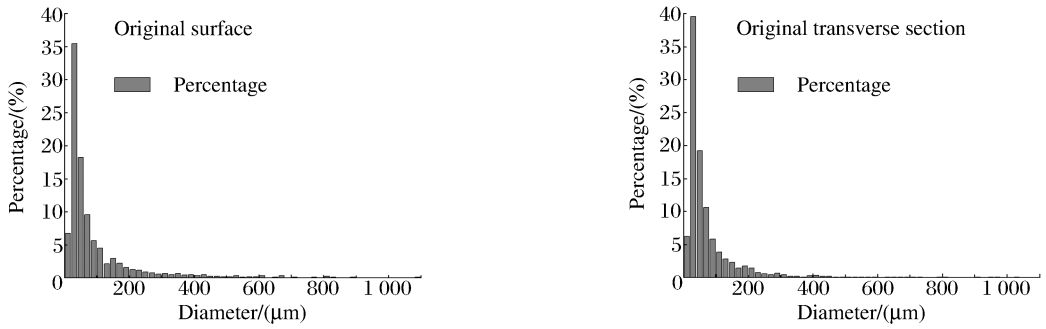
表 2 等效圆直径、晶粒取向与短长轴比定义

Table 2 The definition of equivalent circle diameter, grain orientation and aspect ratio

Parameter	Description	Schematics
Equivalent diameter D	Identical area of grain surface and equivalent circle in order to get representative diameter	
Grain orientation α	Angle formed between long-axis of ellipsoid and x-direction. Angle range [−90°, 90°]	
Ratio of short to long length of grains a/b	Description of the grain form. Value range [0, 1]	

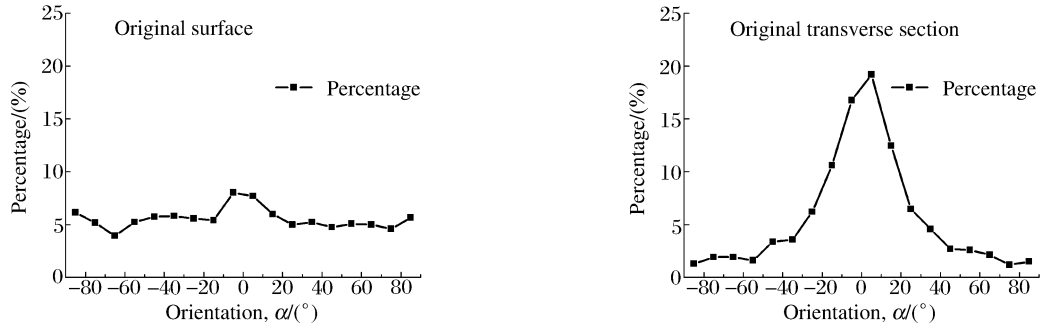
将 D-90031 试样原始表面和横断面喷金，然后在扫描电镜下选取适当的放大倍率拍摄，以使拍摄照片中既包含足够数量的硝酸钡晶粒，又保证一定的精度为准。经过电镜下的实际观测比较，选取 50 倍进行拍摄。拍摄照片的分辨率为 1 024×768 像素，最终比例为 1 像素长度对应实际的 2.16 μm。将照片经过适当的颜色调整处理后，对照片进行形态学分析，检测出硝酸钡晶粒的形貌参数，最后再对形貌参数进行统计分析。

图 5 列举出 D-90031 试样原始表面和横断面中硝酸钡晶粒的等效直径、晶粒取向、狭长度等形貌统计图。从图中可以看出，D-90031 试样表面和断面观测到的硝酸钡晶粒尺寸分布规律十分相近，然而晶粒的取向分布相差很多，表面观测到的硝酸钡晶粒取向分布比较平均，大体上呈随机分布，而断面观测到的硝酸钡晶粒则更趋向于与表面平行的方向排列。另外，表面和断面硝酸钡晶粒的短长轴比分布也有一定的差异，断面硝酸钡晶粒短长轴比分布拟合图更偏向左侧，也就意味着晶粒更趋于狭长。由于模压过程中会引起晶粒的变形，即沿压制方向晶粒变小，沿垂直于压制的方向晶粒伸长。



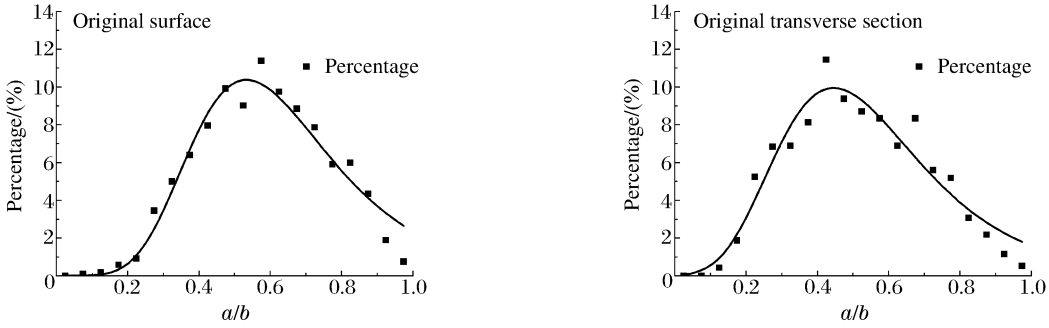
(a) 等效直径分布率

(a) Equivalent diameter



(b) 长轴与 x 方向夹角分布率

(b) Angle of long axis formed with x-direction



(c) 短长轴比分布率

(c) Aspect ratio

图 5　D-90031 中硝酸钡晶粒形态参数统计

Fig. 5　Statistics of shape of $Ba(NO_3)_2$ grains

3　D-90031 微观力学参量的测量

由于 PBX 及其代用材料的特殊结构,其宏观力学性能和内部各组分的力学性能有很大的关联,特别是在模压成型加工时,PBX 内部各组分会受到不同程度的挤压,成型后各组分的实际力学性能会产生不同程度的差异。为了研究在不同加工条件、不同工艺下制造的 PBX 内部各组分的实际力学性能对成品 PBX 力学性能的影响,测定 PBX 内部各组分的微观力学参量就非常必要。本研究使用 Hysitron 公司的 TriboIndenter 纳米压痕仪。由于纳米压痕仪在非常细微的局部加载,而 D-90031 表面又不像金属材料那样十分平整,为了避免由于表面缺陷导致的纳米压痕仪测量结果不准确,采用同一部位多点加载进行测量,将结果取平均值,这样可以有效地避免因表面缺陷而导致的加载过程中的压头抖动等造成的影响,从而过滤掉结果不准确的数据。图 6 给出典型的纳米压痕实验曲线,测量结果见表 3。表 3 中 h_{max} 为最大压入深度;p_{max} 为最大载荷;S 为刚度。

表 3 纳米压痕仪测量结果

Table 3 Testing results by nanoindentation tests

Parameter	$Ba(NO_3)_2$(1)	$Ba(NO_3)_2$(2)	$Ba(NO_3)_2$(3)	$C(CH_2OH)_4$(1)	$C(CH_2OH)_4$(2)
p_{max}/(μN)	970.150	966.113	962.224	934.111	899.767
S/(μN/nm)	32.779	20.304	26.091	8.859	11.416
h_{max}/(nm)	262.321	301.388	335.582	587.645	902.287
E_r/(GPa)	23.848	13.183	15.035	3.610	2.505
H/(GPa)	0.653	0.520	0.435	0.234	0.061

从以上结果可以明显看出,硝酸钡晶体和季戊四醇基体的微观力学参量存在差异。一般地,D-90031中硝酸钡晶体的硬度(H)、杨式模量(E_r)都要比季戊四醇基体高大约一个数量级。文献[13]中给出了几种单质炸药单晶的力学性能,其中 β-HMX 晶体的硬度为 0.392 GPa,模量为 31 GPa。β-HMX 是D-90031用于模拟的 PBX JO-9159 中的主要成分,与本工作纳米压痕仪测量的硝酸钡晶体的微观力学参数相比,发现两者的微观力学参量相近,其中本工作测出的硝酸钡模量略低,但是硬度略高。

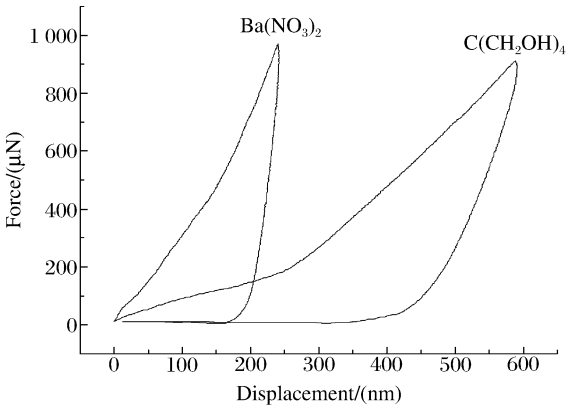


图 6 典型的纳米压痕仪实验曲线

Fig. 6 Typical curves by nanoindentation tests

4 霍普金森压杆动态实验研究

动态压缩实验是在直径为 14.5 mm 的铝质分离式霍普金森杆上进行的,入射杆和透射杆长均为 800 mm,子弹长 200 mm。试样为直径 14 mm 左右、厚度 8 mm 的圆柱形试样。采用分离式霍普金森压杆测定了 3 组试样的入射、反射与透射波形图(图 7、图 8)。实验数据在表 4 中给出。

可以看出随着应变率的提高,D-90031 的最大应力和压缩模量都相应的提高,材料表现出典型的应变率硬化效应。由于 PBX 材料中炸药颗粒的含量很高,材料整体抵抗变形的能力较弱,通常在应力达到极值点后,在很短的时间内就发生粉碎性破坏。一般地,应变在 1%以上即有可能发生断裂破坏[8]。

试样在受到霍普金森压杆冲击后被完全粉碎,对粉碎后的试样进行了回收,并统计了碎片的尺寸。从对比图 9 中可以看出,虽然碎片的等效直径分布差异不明显,但是不同的子弹速度对碎片的尺寸分布产生了一定的影响。1 号试样的平均应变率最大,因此在其回收碎片中,50～150 μm 区间的碎片比例稍大于 2 号和 3 号试样的回收碎片。

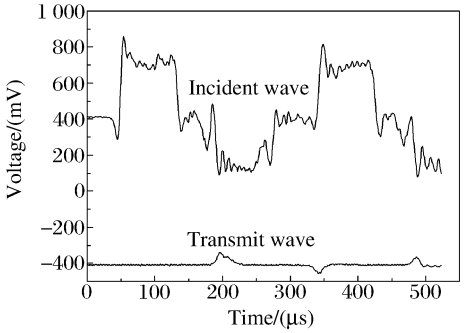


图 7 霍普金森压杆实验波形图

Fig. 7 Experimental curves by Hopkinson bar compressive tests

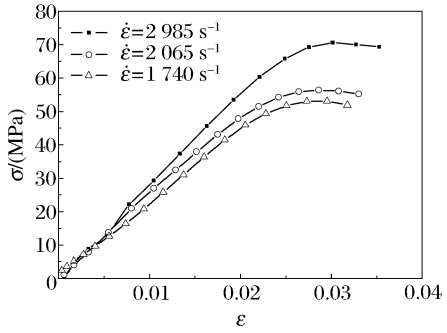


图 8 霍普金森压杆实验应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves by Hopkinson bar compressive tests

表 4　不同应变率下 D-90031 的力学参数

Table 4　Mechanical parameters under different strain rates

No.	$\dot{\varepsilon}/(s^{-1})$	$\sigma_{max}/(MPa)$	$E/(GPa)$
1	2 985	70.53	2.840
2	2 065	56.34	2.465
3	1 740	53.03	2.184

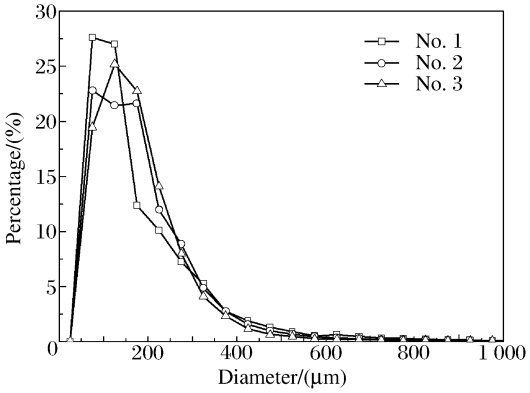


图 9　回收碎片等效直径统计对比

Fig. 9　Statistic comparison of equivalent diameter of the pieces

5　PBX 代用材料落锤实验研究

5.1　落锤实验与冲击后试样的形态与分析

落锤装置由落锤、加载棒、脱锤器与牵引绳索组成。由光电测速仪测量落锤撞击加载棒前的速度。落锤质量 3 800 g,加载棒质量 330 g。圆柱形试样厚 8 mm,直径 20 mm。表 5 给出落锤实验的相关参数。采用了 4 个不同的落锤高度对 D-90031 进行了冲击加载。实验发现,随着落锤高度的提升,试样均发生严重变形,其破坏形式大致为,试样边缘部分发生粉碎性破裂、碎片向四周飞溅、试样中央部位则被落锤压实。

在扫描电镜下对试样残骸纵断面进行了微观形态观察,均发现晶体的层裂破坏(图 10)。这些层裂在破坏的成核阶段可能起关键作用,可引起界面脱粘或形成表面台阶,使得应力集中加剧[14]。当落锤高度增加时,一方面在横向出现分层现象,另一方面逐渐出现纵向裂纹。断裂似乎是既有穿晶断裂,也有沿晶断裂。

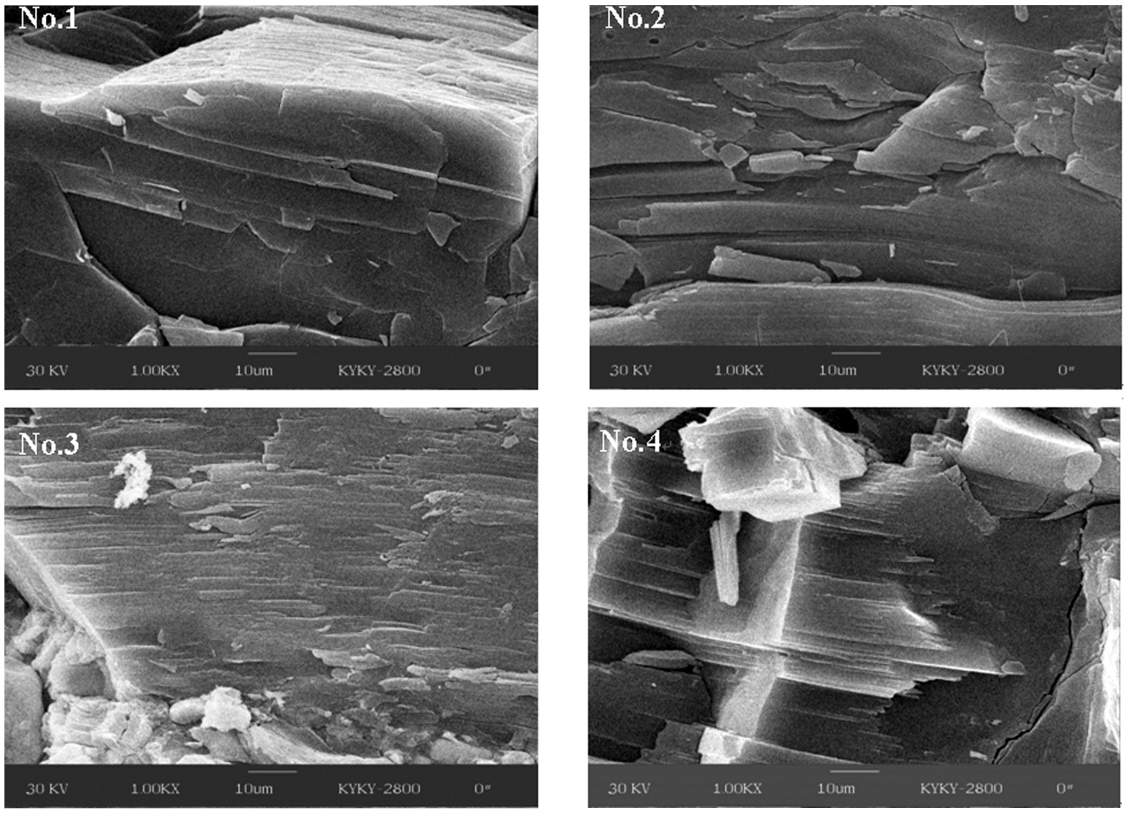


图 10　受冲击后试样的横断面形貌(载荷沿图片高度方向施加)

Fig. 10　Fractographs of longitudinal section after tests, load applied vertically

表 5 落锤实验参数

Table 5 Parameters for drop-weight tests

No.	Height H/(cm)	Thickness h/(cm)	Actual heigh $H-h$/(m)	Speed v/(m/s)
1	31.0	7.0	0.240	1.996
2	59.5	7.0	0.525	2.951
3	90.5	7.0	0.835	3.722
4	121.0	7.0	1.140	4.349

5.2 硝酸钡晶体形态统计分析

经落锤冲击后试样变成扁饼状残骸，对残骸纵断面在电镜下进行了观测和形态分析，并测定了残骸横断面内的硝酸钡晶粒的等效直径、晶粒长轴与 x 方向间的夹角、晶粒短长轴比等形态分布规律。虽然实测的 D-90031 横断面硝酸钡晶粒尺寸分布变化并不明显(图 11)，但是落锤高度的增加还是对试样内部硝酸钡晶粒的取向以及形态产生了一定的影响。从图 12 的曲线图中可以看出，随着落锤高度的增加，试样残骸中取向平行于加载方向的硝酸钡晶粒含量逐渐减少，取向垂直于加载方向(即与表面平行的方向)的晶粒含量呈增加趋势。另外，从图 13 中可以看出，随着落锤高度增加，残骸断面观测到的硝酸钡晶粒短长轴比分布向左侧偏移，表明落锤高度越大，硝酸钡晶粒越趋狭长。

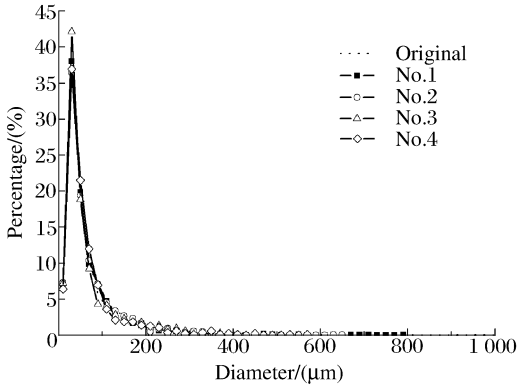


图 11 横断面内硝酸钡晶粒等效直径分布

Fig. 11 Distribution of equivalent diameter of $Ba(NO_3)_2$ along transverse section

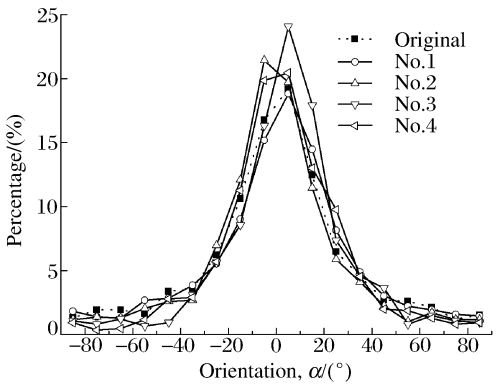


图 12 横断面内硝酸钡晶粒取向分布

Fig. 12 Distribution of grain orientation of $Ba(NO_3)_2$ along transverse section

以上结果显示，晶粒的形状发生变化(短长轴比 a/b 减小)，但是等效直径没有发生变化，意味着晶粒的截面积没有变化。同时晶粒发生小量的旋转。这一变形机理揭示了在动态载荷作用下炸药替代品 D-90031 的变形规律。

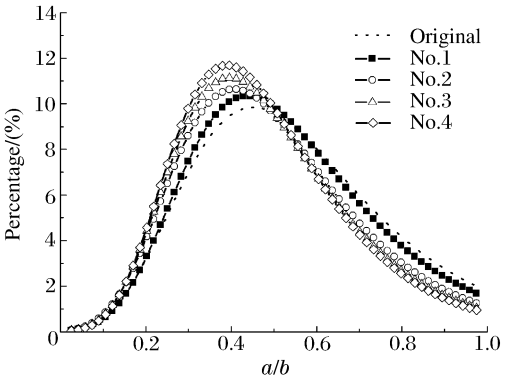


图 13 横断面内硝酸钡晶粒短长轴比分布率

Fig. 13 Aspect ratio of $Ba(NO_3)_2$ grains along transverse section

6 结 论

研究了固体炸药代用品 D-90031 的微观结构、组成相的性能，以及动态力学行为和微结构的演化。研究发现，D-90031 的组成相硝酸钡晶粒取向大体上呈随机分布，表面和断面硝酸钡晶粒的短长轴比的分布有一定的差异，意味着加工工艺对微观结构有一定的影响。纳米硬度测量表明，硝酸钡和季戊四醇的模量相差接近一个数量级。

采用分离式霍普金森压杆(SHPB)完成了动态实验,结果表明,随着应变率的提高,D-90031 的最大应力和压缩模量都相应的提高,小尺寸碎片(50～150 μm)的含量呈上升趋势,大尺寸碎片(直径 1 000 μm 以上)分布的变化规律不明显。对落锤冲击后残骸的横断面进行显微观测表明,冲击后硝酸钡晶粒短长轴比减小,但等效直径分布率无明显变化,同时晶粒发生小量旋转,趋于与落锤加载方向垂直的方向。

本工作得到中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室的资助。

References:

[1] Sun Y B, Hui J M, Cao X M. Mixed Explosive for Defence [M]. Beijing: Armory Industry Publisher, 1995. (in Chinese)
孙业斌,惠君明,曹欣茂. 军用混合炸药 [M]. 北京:兵器工业出版社,1995.

[2] Siviour C R, Gifford M J, Walley S M, et al. Particle Size Effects on the Mechanical Properties of a Polymer Bonded Explosive [J]. J Materials Science, 2004, 39: 1255-1258.

[3] Liu Y C, Wang Z Sh, Chai T, et al. Influence of HMX Particle Size and Gradation on the Shock Sensitivity and Output of a PBX Explosive [J]. Acta Armamentarii, 2000, 21: 357-360. (in Chinese)
刘玉存,王作山,柴　涛,等. HMX 粒度及其级配对塑料粘结炸药冲击波感度和爆炸输出能量的影响 [J]. 兵工学报,2000,21:357-360.

[4] Cao Y, Nie F D, Li Y Sh. Analysis of Microstructure of TATB Based PBX [J]. Chinese J Explosives & Propellants, 2004, 27: 58-61. (in Chinese)
曹　阳,聂福德,李越生. TATB 基 PBX 复合材料的微观结构分析[J]. 火炸药学报,2004,27:58-61.

[5] Luo J R. Study on Damage, Fracture and Constitutive Relation of PBX [D]. Mianyang: CAEP, 2001. (in Chinese)
罗景润. PBX 的损伤、断裂及本构关系研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2001.

[6] Chen P W, Ding Y Sh. Mechanical Behaviour and Deformation and Failure Mechanisms of Polymer Bonded Explosives [J]. Energetic Materials, 2000, (2): 86-90. (in Chinese)
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 [J]. 含能材料,2000,(2):86-90.

[7] Zhang P, Bai Sh L, Zhou W L. Study on Microstructures and Damage Evolution of a Substitute of Polymer Bonded Explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003, 17(4): 319-325. (in Chinese)
张　鹏,白树林,周文灵. 一种高分子粘结炸药代用材料的微观结构及损伤演化的研究 [J]. 高压物理学报,2003,17(4):319-325.

[8] Palmer S J P, Field J E, Huntley J M, et al. Deformation, Strengths and Strains to Failure of Polymer Bonded Explosives [J]. Proc R Soc Lond A, 1993, 440: 399-419.

[9] Chen P W, Huang F L, Dai K D, et al. Detection and Characterization of Long-Pulse Low Velocity Impact Damage in Plastic Bonded Explosives [J]. Inter J Impact Eng, 2005, 31: 497-508.

[10] Dong H Sh, Zhou F F. Highe Energy Expolsive and Relative Physical Properties [M]. Beijing: Science Press, 1989. (in Chinese)
董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物理性能 [M]. 北京:科学出版社,1989.

[11] Gray G T, Idar D J, Blumenthal W R, et al. High and Low Strain Rate Compression Properties of Several Energetic Material Composites as a Function of Strain Rate and Temperature [A]//11th International Detonation Symposium[C]. Snowmass, Colorado, 1998.

[12] Zhang G R, Chen D N. Explosion Dynamics of Agglomerated Explosive 学 [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991. (in Chinese)
章冠人,陈大年. 凝聚炸药起爆动力学 [M]. 北京:国防工业出版社,1991.

[13] Chen P W, Ding Y Sh, Chen L. Progress in the Study of Damage and Mechanical Properties of Energetic Materials [J]. Advances in Mechanics, 2002, 32: 212-222. (in Chinese)
陈鹏万,丁雁生,陈 力. 含能材料装药的损伤及力学性能研究进展 [J]. 力学进展,2002,32:212-222.

[14] Skidmore C B, Phillips D S, Howe P M, et al. The Evolution of Micro Structural Changes in Pressed HMX Explosives [A]//11th International Detonation Symposium [C]. Snowmass, Colorado, 1998.

Experimental Study on the Microstructures and Dynamic Behavior of a PBX Substitute Material

ZHANG Peng[1], ZHAO Feng[2], BAI Shu-Lin[1], FU Bin[1], ZHANG Guo-Hua[1]

(1. *Center for Advanced Composite Materials, Departtment of Mechanics and Aerospace Technology, College of Engineering, Peking University, Beijing* 100871, *China*;
2. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The microstructures and intrinsic defects engendered during the compression process of manufacture of a PBX substitute material D-90031, as well its dynamic behavior and failure mechanisms were studied. By using digital image treatment technique, in-situ nano-indenter system, Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) and weight dropping tests, we obtained the features of microstructures, modulus and hardness of each constituent, dynamic properties, as well as the size distribution of pieces and failure modes. It was found that the grain shape changed with the applied compressive load, such as the grain was elongated along the direction vertical to the load application direction. The size distribution of pieces after impact meets a certain statistical rule. The results obtained are meaningful to deeply understand the relationship between the properties and microstructures of solid explosive.

Key words: PBX substitute; dynamic behavior; microstructures