

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.02.007

高能发射药动态力学强度的影响因素研究*

周 敬 杨丽侠 张邹邹 刘来东 刘 强
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 对 19 孔的高能发射药进行落锤撞击试验,观测药粒撞击损伤状态以及 $F-t$ 曲线,研究药粒受力方向、撞击能以及温度等对高能发射药动态力学强度的影响。结果表明,改变受力方向,裂纹和破碎均在沿发射药的轴线方向上出现,表明发射药力学强度的各向异性;因为受径向撞击作用时,发射药粒易于破碎,故装药设计时,可使发射药的主要受力方向为轴向排布,可有效防止发射药的撞击破碎。随着撞击能提高,发射药的损伤百分数增加, $F-t$ 曲线上峰值逐渐增大,增大的幅度不断减小。随着温度升高, $F-t$ 曲线峰值由 25.0 kN 降为 5.8 kN,脉宽由 1.6 ms 增加至 5.1 ms,发射药的响应情况由脆性断裂逐渐转变为塑性形变。

[关键词] 应用化学;高能发射药;落锤撞击;影响因素

[分类号] TQ562

引言

高能发射药是高膛压火炮装备实现高威力和轻量化的物质及能量基础。从材料角度讲,适合高膛压火炮的高能发射药需具备较好的耐受动态冲击的力学性能,防止在火炮膛内装药环境下,由于力学性能不佳而发生药粒破碎、改变燃烧规律,甚至因燃面骤增而发生膛炸事故。因此,迫切需要开展模拟火炮膛内受力情况下高能发射药的动态力学性能研究^[1-3]。

目前,关于发射药动态力学性能的研究方法有落锤撞击装置结合密闭爆发器试验的方法,该方法是利用相对燃面法计算的破碎度来评价发射药的动态力学强度^[4-6];另一种方法是通过在落锤撞击装置上安装力传感器,记录发射药撞击瞬间的力值变化过程^[7-9],该测试方法已为新型高能发射药的配方筛选提供了大量试验数据。然而,研究发现,发射药动态力学强度试验方法的影响因素较多,相对于材料的静态力学性能测试而言,载荷形式为冲击作用的动态力学性能测试数据散布较大,如药粒受力方向、撞击能、温度等均会影响试验结果。

本文通过对 19 孔花边高能发射药进行落锤撞击试验,观测药粒的撞击损伤情况并测得 $F-t$ 曲线,研究受力方向、撞击能、温度等条件变化对高能发射药动态力学强度的影响。

1 试验

1.1 材料与仪器

19/19 高能发射药,内径 d 为 0.53 mm,弧厚 $2e$ 为 1.84 mm,长度为 13.5 mm。

BCJ 型落锤撞击装置,天津市建仪实验机有限责任公司,落锤质量为 5 kg 或 2 kg,标尺量程为 10~100 cm;高低温试验箱,泰安科技有限责任公司,温度范围为 $(-60 \pm 2) \sim (110 \pm 2)^\circ\text{C}$;Kistler 9316B 压力传感器,瑞士奇石乐公司,量程为 ± 60 kN,固有频率为 28 kHz,灵敏度为 -4 pC/N 。

1.2 试验原理

一定质量的落锤从某高度(10~100 cm)自由滑落,撞击在安装单粒发射药的工装上,并压缩药粒,用工装底部的力传感器检测发射药粒受到的力值变化过程,并观测记录药粒撞击后的响应情况。

1.3 试验条件

改变受力方向:对低温(-40°C)发射药分别进行轴向和径向撞击试验,使发射药在两种撞击条件下均发生临界损伤(即约 50% 的发射药粒无响应,50% 出现裂纹或裂开)。每个受力方向上试验药粒数均为 50 粒,观测撞击后的响应情况及 $F-t$ 曲线,研究受力方向对发射药动态力学强度的影响。通过系列试验及计算得出,轴向撞击时,落锤质量为 5 kg,撞击高度为 30.2 cm,样品发生临界损伤;径向

* 收稿日期:2015-11-02
作者简介:周敬(1988~),女,硕士,从事发射药性能检测研究。E-mail:812602940@qq.com
通信作者:杨丽侠(1964~),女,研究员,从事发射药装药及性能检测与评估研究。E-mail:yang_lxxa@sina.com

撞击时,落锤质量为 2 kg,撞击高度为 11.5 cm,发生临界损伤。

改变撞击能:采用 5 kg 落锤,设定落锤高度分别为 26.0、28.5、31.0、33.5、36.0 cm,对应单位面积上的撞击能分别为 10.2、11.2、12.2、13.2、14.2 J/cm²,将样品在高低温箱 -40 ℃ 保温不少于 2 h,进行轴向撞击试验,研究撞击能变化对发射药动态力学强度的影响。

改变试验温度:采用 5 kg 落锤,设定落锤高度为 30.2 cm,进行轴向撞击试验,试验温度分别为低温(-40 ℃)、0℃、常温(20 ℃)和高温(50 ℃),研究温度对发射药动态力学强度的影响。

2 结果与讨论

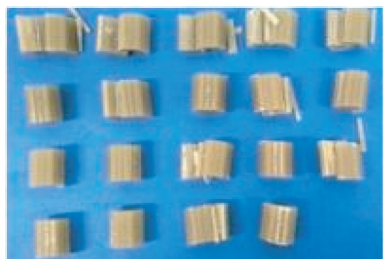
2.1 受力方向对发射药动态力学强度的影响

发射药在火炮膛内自然堆积时,药粒的排布状态是一种随机形式。目前,要想完全模拟发射药在火炮膛内的排布状态,研究发射药的动态力学强度是不可能做到的,故试验主要选取轴向和径向两个典型的放置状态来研究发射药的动态力学强度。

图 1 是 -40 ℃ 时发射药在轴向和径向发生临界损伤时的响应情况。由图 1 可见,发射药经受轴向撞击作用后,沿轴向出现裂纹或破碎,但是这些裂纹在端面出现的位置,以及药粒破碎后的状态都是不规则的;发射药经受径向撞击作用后,同样也是在轴向出现裂纹或破碎,然而裂纹和破碎都是沿着孔洞所在位置出现,一般形成两个较大碎块,和几个较小的细长碎块,断面也比较规整。发射药改变受力方向进行落锤撞击试验时,均沿轴向出现裂纹或破碎,说明发射药力学强度呈各向异性,结合发射药的损伤状态、配方组分以及成型工艺分析可知,发射



(a) 轴向放置



(b) 径向放置

图 1 -40 ℃ 时发射药在不同受力方向下的响应情况

Fig. 1 Response states of propellants under different stress directions at -40 ℃

药力学强度的这种各向异性很有可能是内部孔洞以及压伸成型过程中硝化棉(NC)等高聚物分子链沿轴向取向的共同作用结果。

为进一步研究不同受力方向下发射药的破碎机理,对常温发射药进行试验,响应情况见图 2。在受到轴向撞击作用后,发射药出现发白迹象,发生塑性变形,轴向长度变短,因其轴向发生变形,而使药粒径向受到拉应力的作用,导致样品中部向外凸起,发生明显形变;而受到径向撞击作用时,发射药的形状和颜色几乎没有任何变化,不发生塑性变形,但是在发射药的横截面上,沿内部孔洞出现十字交叉裂纹,且这些裂纹均出现在孔洞连接的延长线上。这是因为撞击能传递给发射药粒的瞬间,活塞杆与花边 19 孔发射药粒侧面为 3 条线接触,受到集中线载荷,在该区域出现应力集中,首先出现裂纹,不断向发射药内部扩展,并在药粒的孔洞部位相遇,形成十字交叉状的裂纹,进一步说明发射药的力学性能的各向异性与药粒的孔洞密切相关。



(a) 轴向放置



(b) 径向放置

图 2 常温发射药在不同受力方向下的响应情况

Fig. 2 Response states of propellants under different stress directions at ordinary temperature

因为发射药力学强度的各向异性,故对发射药在火炮膛内的受力情况进行模拟仿真计算时,单一方向的模拟试验不足以反映发射药在火炮膛内真实的受力情况,需对各方向的受力进行综合考虑。

图 3 为不同受力方向撞击后对应的典型 $F-t$ 曲线。由图 3 可见,发生临界损伤时,轴向放置 $F-t$ 曲线的峰值明显高于径向放置。其次,样品温度为 -40 ℃ 时,采用 5 kg 的落锤在轴向进行撞击试验,撞击高度为 30.2 cm 处发生临界损伤;而径向上,仅采用 2 kg 的落锤,11.5 cm 处就发生临界损伤。这两点均说明径向是发射药的薄弱环节,发射药在火炮膛内经受压力波动撞击弹底或膛臂时,受力的方向为径向时,易于破碎。故在发射药装药设计时,虽

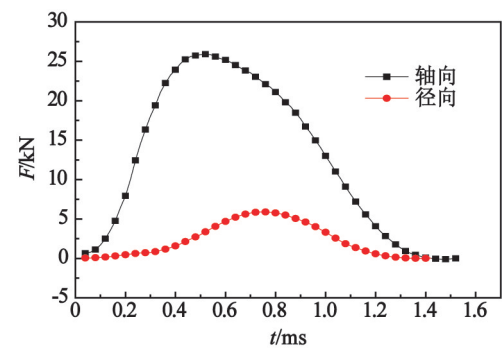


图 3 不同受力方向下的 $F-t$ 曲线

Fig. 3 $F-t$ curves under different stress directions

然不可以对其排布状态完全固定,但可使发射药在主要受力方向上为轴向排布。这样,发射药受到膛内压力的波动而发生撞击和挤压时,不易发生破碎等损伤,可以有效防止因燃面剧增而导致的膛炸等不安全事故的发生。

2.2 撞击能对发射药动态力学强度的影响

图 4 为不同撞击能下发射药响应情况,由图 4 可见,在撞击能为 10.2 J/cm^2 时,仅少数样品沿中间部位出现裂纹,随撞击能提高,样品开始出现裂开以及不规则的破碎情况。表 1 是不同撞击能下,样品损伤情况的统计结果,当撞击能从 10.2 J/cm^2 提

高至 14.2 J/cm^2 ,样品损伤百分数由 26% 增加至 74%。

表 1 落锤撞击试验统计结果

Tab. 1 Statistical results of drop hammer impact test

撞击能/ ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	试验粒数	损伤粒数	损伤百分数 $y_i/\%$
10.2	50	13	26.0
11.2	50	20	40.0
12.2	50	27	54.0
13.2	50	33	66.0
14.2	50	37	74.0

图 5 为不同撞击能下样品典型的 $F-t$ 曲线,表 2 为对应的峰值及脉宽。由图 5 可知,随撞击能增加, $F-t$ 曲线上的力值逐渐增大,但是增大的幅度越来越小。这是因为发射药是一种复合高分子材料,分散在连续相中的微小颗粒在发射药受到冲击力的时候,可引发大量微裂纹,吸收部分冲击能量,撞击能越高,微裂纹越多,吸收的能量越多,所以药粒受到的力增大幅度也越来越小。

2.3 温度对发射药动态力学强度的影响

图6为粒状发射药在不同温度撞击条件下的损

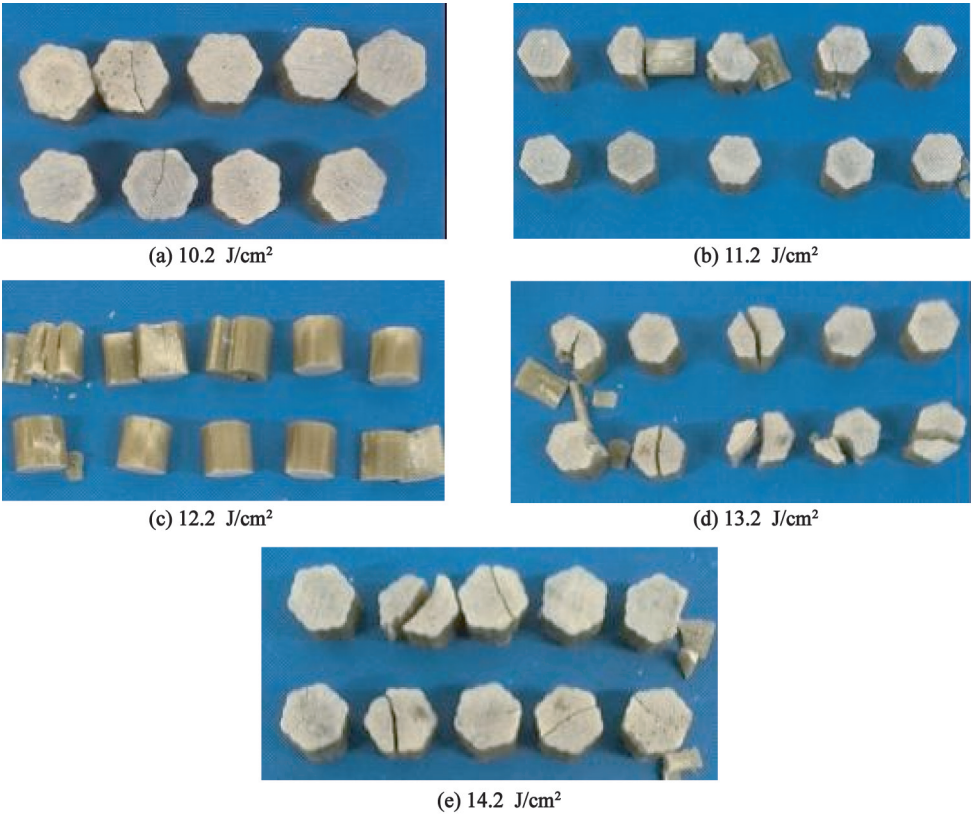


图 4 不同撞击能下发射药的响应情况

Fig. 4 Response states of propellants in different impact energies

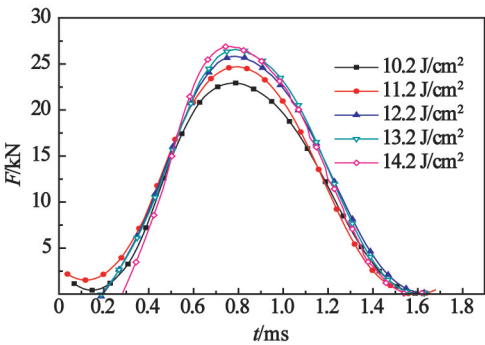


图 5 不同撞击能下典型 $F-t$ 曲线
Fig. 5 Typical $F-t$ curves of propellants
in different impact energies

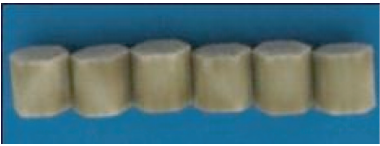
表 2 不同撞击能下 $F-t$ 曲线的峰值及脉宽
Tab. 2 Peak and pulse-width of $F-t$ curves
in different impact energies

撞击能/($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	F_m/kN	$\Delta t/\text{ms}$
10.2	22.9	1.30
11.2	24.7	1.32
12.2	25.8	1.28
13.2	26.6	1.26
14.2	26.9	1.16

伤图片。由图6可见， $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，药粒经受撞击作用后，部分样品依然完整，部分出现裂纹，其余则发生破碎。 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，样品仅出现发白迹象，未见裂纹和破碎。常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)与高温($50\text{ }^{\circ}\text{C}$)下，样品出现发



(a) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) $0\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) $20\text{ }^{\circ}\text{C}$



(d) $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 6 不同温度下发射药的损伤状态

白迹象,而且发生明显的塑性形变,药粒长度变短,由于挤压,药粒中间凸起,高温下($50\text{ }^{\circ}\text{C}$),塑性变形更为明显。经计算得出 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)和高温($50\text{ }^{\circ}\text{C}$)温度下,粒状发射药的应变率分别为 0% 、 2% 、 14% 、 25% 。

图 7 为不同温度下发射药撞击以后对应的典型 $F-t$ 曲线,表 3 为 $F-t$ 曲线上的峰值及脉宽。从 $-40\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,随温度的升高, $F-t$ 曲线峰值由尖锐逐渐转为平缓,峰值由 25.0 kN 降为 5.8 kN ,脉宽由 1.6 ms 增加至 5.1 ms ,即力的作用时间越来越长。结合图 6 发射药的损伤情况分析可知,随温度升高,发射药的响应情况由脆性断裂逐渐转变为塑性形变,这是因为发射药属于复合高分子材料,在低温下,它的冷脆特性加剧,更容易产生裂纹甚至发生破碎。

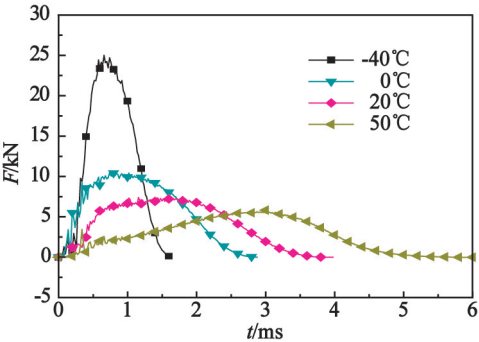


图 7 不同温度下发射药的典型 $F-t$ 曲线
Fig. 7 Typical $F-t$ curves of propellants
at different temperatures

表 3 不同温度下 $F-t$ 曲线的峰值及脉宽
Tab. 3 Peak and pulse-width of $F-t$ curves
at different temperatures

参量	温度/ $^{\circ}\text{C}$			
	-40	0	20	50
F_m/kN	25.0	9.8	6.9	5.8
$\Delta t/\text{ms}$	1.6	2.6	3.6	5.1

在实际应用过程中,发射药的低温冷脆特性使其在火炮膛内易受到压力波动而破碎,使其初始燃烧面积增加,改变装药燃烧规律,引起弹道性能异常,甚至造成膛炸事故。所以,在对发射药自身力学性能的考察时,选择低温发射药为主要研究对象,只要发射药的低温力学强度符合应用要求,那么常温和高温也能满足要求。

3 结论

1) 改变受力方向,裂纹和破碎均在沿发射药的轴线方向上出现,表明发射药力学强度的各向异性;经受径向撞击作用时,发射药粒易于破碎。故装药

Fig. 6 Damages of propellants at different temperatures

设计时,可使发射药的主要受力方向为轴向排布,可有效防止因燃面剧增而导致的膛炸等安全事故的发生。

2)随着撞击能提高,发射药的损伤百分数增加, $F-t$ 曲线上峰值逐渐增大,增大的幅度不断减小。

3)随着温度升高, $F-t$ 曲线峰值由25.0 kN降为5.8 kN,脉宽由1.6 ms增加至5.1 ms,发射药的响应情况由脆性断裂逐渐转变为塑性形变。

参 考 文 献

- [1] 芮筱亭, 负来峰, 王国平, 等. 弹药发射安全性导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
RUI X T, YUN L F, WANG G P, et al. Direction to launch safety of ammunition[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [2] 芮筱亭, 冯宾宾, 王国平. 发射装药发射安全性评估方法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(5): 56-59, 71.
RUI X T, FENG B B, WANG G P. Evaluation method of launch safety of propellant charge[J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 30(5): 56-59, 71.
- [3] 冯宾宾, 芮筱亭, 徐浩, 等. 发射过程中某硝胺发射装药的动态挤压破碎情况[J]. 火炸药学报, 2012, 35(2): 70-73, 85.
FENG B B, RUI X T, XU H, et al. Dynamic compression fracture condition of one nitroamine propellant charge during launch course[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2012, 35(2): 70-73, 85.
- [4] 堵平, 何卫东, 王泽山. 低温感发射药包覆层的力学性能[J]. 火炸药学报, 2005, 28(2): 35-38.
DU P, HE W D, WANG Z S. Mechanical performance of coating-layer of LTSC propellant [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2005, 28(2): 35-38.
- [5] 黄金. 发射药动态力学性能检测技术及评价方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
HUANG J. Study on the detection technology of dynamic mechanical properties of propellants and evaluation methods [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [6] LIEB R J. Correlation of the failure modulus to fracture-generated surface area in uniaxially compressed M43 gun propellant [R]. Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD, 1995.
- [7] 周敬, 杨丽侠, 陈晓明, 等. 发射药落锤撞击试验及评价方法探讨[J]. 爆破器材, 2014, 43(2): 15-19.
ZHOU J, YANG L X, CHEN X M, et al. Research on the experiment and evaluation methods of propellants in dropping hammer impact test [J]. Explosive Materials, 2014, 43(2): 15-19.
- [8] 张邹邹, 周敬, 杨丽侠, 等. 温度对粒状发射药动态力学性能的影响[J]. 火炸药学报, 2015, 38(2): 86-88.
ZHANG Z Z, ZHOU J, YANG L X, et al. Effects of temperature on the dynamic mechanical properties of granular gun propellant [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2015, 38(2): 86-88.
- [9] 周敬, 杨丽侠, 陈晓明, 等. RDX基高能发射药的抗撞击损伤性能[J]. 火炸药学报, 2013, 36(6): 86-90.
ZHOU J, YANG L X, CHEN X M, et al. Anti-impact fracture property of rdx-based high-energy gun propellants [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2013, 36(6): 86-90.

Study on the Influence Factors of Dynamic Mechanical Properties of High-energy Gun Propellant

ZHOU Jing, YANG Lixia, ZHANG Zouzou, LIU Laidong, LIU Qiang
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] High-energy gun propellant was impacted by the drop hammer device, and the influences of stress direction, impact energy and temperature for the dynamic mechanical property of propellant were studied by observing the response of propellants and $F-t$ curves. The results indicate that the fissure or broken is appeared on axial side, no matter the stress is on the axial or radial side, which show the anisotropy of mechanical strength of propellant. The propellant is easily broken when the force on the radial side, so the propellants should be place on axial side with the main press direction when charge design for propellant, which can effectively prevent the impact crushing of propellant. With the impact energy increases, the fracture percent of gun propellant and the peak of $F-t$ curve is increased, but the growth rate is decreased. With the increase of the temperature, the response of propellants are changed from brittle fracture to plastic deformation, the peak of $F-t$ curve is reduced from 25.0 kN to 5.8 kN, and the pulse width is increased from 1.6 ms to 5.1 ms.

[KEY WORDS] applied chemistry; high-energy gun propellant; the dropping hammer impact; influence factors