

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.02.004

发射药落锤撞击试验及评价方法研究*

周 敬 杨丽侠 陈晓明 张邹邹

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 提出了一种新的评价高能发射药动态力学强度的方法,即采用落锤撞击发射药粒,用药粒发生临界损伤时的撞击能和极限抗冲应力来表征发射药的动态力学性能。结果表明,该方法能够定量评价发射药的动态力学强度,并得到太根药、硝胺药、硝基胍药等 3 种发射药的临界撞击能分别为 18.8 J/cm^2 、 14.2 J/cm^2 、 3.8 J/cm^2 ,极限抗冲应力分别为 247.2 MPa 、 214.2 MPa 、 118.5 MPa 。

[关键词] 应用化学;高能发射药;落锤撞击;临界撞击能;极限抗冲应力

[分类号] TQ562

引言

随着各种新型高能发射药及高性能火炮装药技术的发展,发射药自身的力学结构体系和其在火炮膛内所处的动态力学环境变得越来越复杂,特别是低温环境下,高能发射药的冷脆特性使其在火炮膛内易受到压力波动而破碎,导致燃面增加,改变药床的燃气生成规律,严重时导致膛压剧增而发生不安全事故^[1-3]。

为了研究高能发射药在火炮膛内的使用安全性,提高其动态力学性能,近几十年来,国内外学者从不同角度建立了多种检测装置和方法。由于火炮发射过程受力环境复杂且过程短暂,要想直接测量膛内发射药的受力状况相当困难^[4],因此多采用模拟膛内环境的方法,如气体炮冲击试验法、伺服液压试验法、霍普金森杆试验法、落锤撞击试验法^[5-6]等。其中,落锤撞击试验法可模拟发射药在膛内受到压力波冲击而撞击弹底的过程,如撞击瞬间的高应变速率、撞击能以及撞击力等,常用于高能发射药材料动态强度的对比研究^[7]。通常该方法是将撞击前后的发射药进行密闭爆发器燃烧试验,用相对燃面变化计算撞击发射药的破碎度,来评价发射药的强度;但是研究过程中发现,落锤撞击后进行药粒收集时,可能会造成药粒的二次破坏,改变损伤药粒的面积,另外在计算发射药破碎度的过程中引入了平行层燃烧以及撞击前后密度 ρ 、燃速系数 u_1 、燃速压力指数 n 不变等多个假设,这些综合因素的影响导致试验结果与实际偏差较大,造成平行试样结果重

复性、稳定性差等一系列问题,使得该方法难以区分动态力学强度相近的高能发射药,无法满足力学增强机理研究的需要。

本研究对通用落锤装置进行改进,设计了适合发射药结构形状的工装,并在装置上安装力传感器系统,直接检测撞击瞬间发射药粒受到的力值变化过程,提出采用发射药发生临界损伤时的撞击能和极限抗冲应力来表征发射药的动态力学强度,用于高能发射药配方调节、工艺改进等试验研究。

1 试验方法

1.1 试验原理

本试验系统由落锤撞击装置、力传感器、数据采集系统、撞击工装及发射药等组成,见图 1 所示。试验时,一定质量的落锤(本次试验选用 5 kg 的落锤)从某高度($0 \sim 100 \text{ cm}$)自由滑落,以一定的动态撞击能作用于安装发射药粒的工装上,并传递给发射药粒,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,获得撞击瞬间药粒所受到的轴向力值变化过程($F-t$)曲线,并观测记录样品撞击后的响应情况。

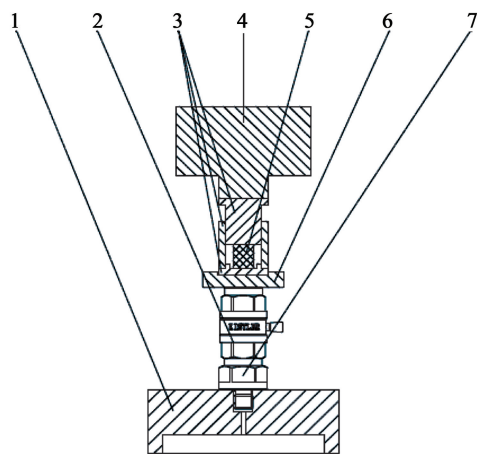
1.2 试验条件

试验样品:为对比发射药材料本身的动态力学强度,应使样品的弧厚、孔径、药粒长度尽可能一致;样品多使用制式大口径火炮常用的 19 孔花边发射药粒,与实际发射装药药形一致;为使撞击能均匀作用于被试样品的横截面上,试验前对发射药粒两端面进行磨平处理。

* 收稿日期:2013-11-05

作者简介:周敬(1988~),女,硕士研究生,从事发射药性能表征与评估研究。E-mail: zj3172@163.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_bxxa@sina.com

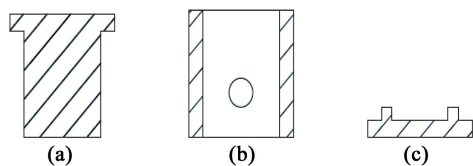


1 - 底座; 2 - 力传感器; 3 - 撞击工装; 4 - 落锤;
5 - 发射药; 6 - 传压塞; 7 - 力传感器转接头

图 1 发射药落锤撞击试验原理简图

Fig. 1 Experimental schematic of dropping hammer impact test of propellants

工装设计:如图 2 所示,工装由 3 个部分组成,分别为撞击头、套筒及底座。将药粒装入工装,可防止撞击后破碎药粒飞溅,且试验后较易收集。撞击工装设计原则:一是撞击头在落锤撞击前伸入套筒的高度不小于 5 mm,并在落锤撞击后仍具有一定向下运行的高度;二是套筒内径比药粒外径要大 6 mm 以上,但不能过大,否则易造成药粒在工装内的摆动;三是在套筒侧面进行开孔处理,用以保证落锤撞击后若药粒发生引燃有足够空间释放燃气及压力。另外,在装配好的工装外侧包裹塑料薄膜,使工装在移动和撞击过程中,结构稳固不松动。



(a) 撞击头; (b) 套筒; (c) 底座

图 2 撞击工装

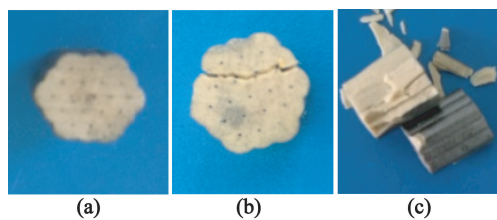
Fig. 2 Assemble tooling of propellant

试验温度:经研究发现,发射药粒在常温和高温时发生塑性变形,不易发生破碎,而低温下药粒变脆,抗冲击和抗挤压的能力减弱,容易破碎,引起不安全事故,在发射药安全性研究中也证实了这一点^[8]。故本方法重点研究低温(-40℃)发射药的动态力学强度。试验时,将装配好发射药粒的工装提前放入保温箱中,在-40℃保温 2 h 待试。

2 试验结果及表征参量分析

2.1 试验结果分析

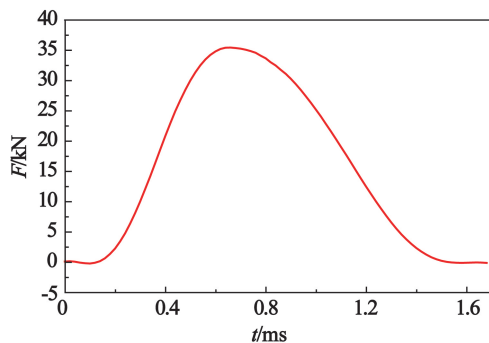
图 3、图 4 为某发射药在同一落高下出现的 3 种典型响应状态及对应的 $F-t$ 曲线。可以看出,发



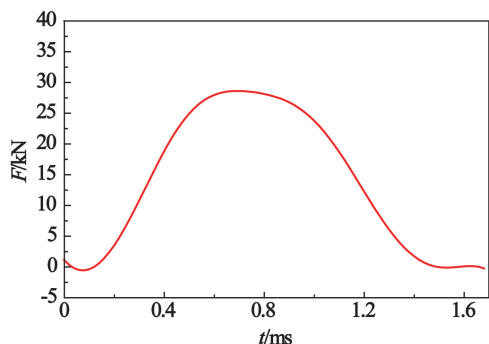
(a) 无响应; (b) 裂纹; (c) 破碎

图 3 发射药同一落高下的 3 种响应状态

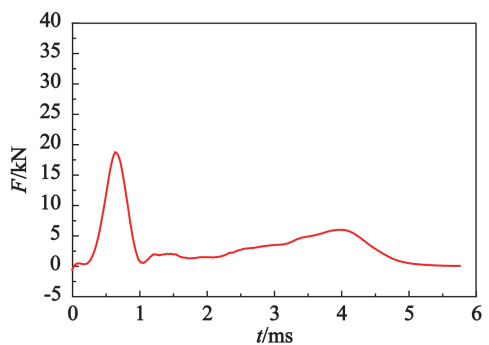
Fig. 3 Three response states of propellants under the same impact height



(a)



(b)



(c)

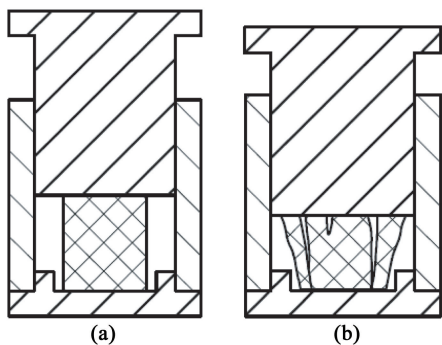
(a) 无响应; (b) 裂纹; (c) 破碎

图 4 发射药不同响应状态对应的 $F-t$ 曲线

Fig. 4 $F-t$ curves of propellants in different response states

射药无响应时,承受的力值最大,脉宽最窄;破碎时力值最小,脉宽最宽;出现裂纹时,力值及脉宽均介于无响应和破碎两种状态之间。另外,也可看出药粒在无响应和出现裂纹时,曲线走势大致相同,都为单峰,但药粒无响应时, $F-t$ 曲线波峰较为尖锐,出现

裂纹时, $F-t$ 曲线较平缓, 最大力值下降约 10% ~ 20%; 而药粒发生破碎时, 最大力值与无响应状态相比, 最大可下降 50% 左右, $F-t$ 曲线也发生明显变化, 出现两个峰值。这是因为在撞击瞬间, 药粒无响应和出现裂纹时, 落锤没有继续向下运动的空间, 在撞击工装反作用力下就会向上反弹, 故出现单峰; 而发射药破碎时, 药粒向周围散开 (图 5), 落锤会随撞击工装的撞击头一起向下运动, 继续撞击挤压发射药, 延长药粒受力时间。整个受力过程中, 落锤撞击瞬间会出现第一个力的变化峰, 药粒破碎, 落锤继续向下撞击挤压的过程出现第二个峰值。由此可知药粒的撞击损伤情况可通过 $F-t$ 曲线反映出来。



(a) 未破碎; (b) 破碎

图 5 发射药破碎前后的响应示意图

Fig. 5 Response schematic of a propellant before and after broken

在试验过程中, 有些微裂纹用肉眼较难分辨, 故在平行试验中, 若某样品撞击后的最大力值比其它无响应的发射药明显下降, 则需仔细观测其响应状态, 必要时在放大镜下观察。

2.2 动态力学强度表征参量分析

经过撞击试验可得到发射药在不同撞击高度下的响应情况和对应的 $F-t$ 曲线, 根据落高可计算发射药粒受到的撞击能, 经过分析提出采用临界撞击能和极限抗冲应力两个特征参量来表征发射药的动态力学强度。

2.2.1 临界撞击能

由于发射药药形不可能做到完全一致, 为相互比较, 故选用单位面积上的撞击能为表征参量。在某撞击高度下, 50% 发射药粒无响应, 其余 50% 出现裂纹或裂开, 此时发射药单位面积上受到的撞击能为该高度下的临界撞击能^[9], 撞击高度为临界损伤落高。根据式(1)可算得发射药的临界撞击能:

$$E_R = \frac{mgH_R}{S} \quad (1)$$

式中: E_R 为发射药单位面积上的临界撞击能, J/cm^2 ; m 为落锤质量, kg ; g 为当地重力加速度,

m/s^2 ; H_R 为临界损伤落高, cm ; S 为样品端面面积, mm^2 。

要确定发射药的临界撞击能, 必须先确定临界损伤落高 H_R , 在 H_R 上下各选择 5 个不同落高 H_i , 对应每个落高 H_i , 试验一组样品 (逐个撞击每个药粒, 记录药粒响应情况和 $F-t$ 曲线), 得到该落高下药粒无响应的百分数 y_i , 全部落高试验结束后, 得到一组数据 (H_i, y_i) , 利用一元线性回归分析的方法^[10], 求出 y 和 H 的回归方程, 将 $y = 50$ 代入方程, 求出临界损伤落高 H_R 。

2.2.2 极限抗冲应力

极限抗冲应力是指发射药发生临界损伤, 药粒无响应时单位面积受到的最大力值。根据式(2)可算得各发射药的极限抗冲应力, 该值同样可用来表征发射药的动态力学强度。

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S} \quad (2)$$

式中: σ_m 为样品承受的极限应力, MPa ; F_m 为临界点处样品能承受的最大力值, kN 。

图 6 为 3 种典型发射药 (太根药、硝铵药、硝基胍药) 在临界撞击能处, 无响应药粒对应的 $F-t$ 曲线。由图可知, 3 种发射药最大力值 F_m 差别明显, 但脉宽值相差不大。故可采用临界撞击能下, 药粒无响应时的 F_m 值来表征发射药动态力学强度。另外, 考虑到药形的微小差别, 则采用药粒无响应时单位面积上的最大力值, 即极限抗冲应力来表征发射药动态力学强度。

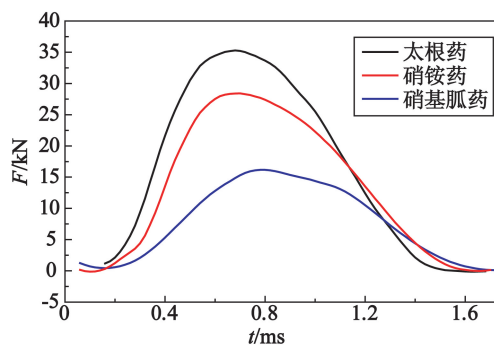


图 6 3 种发射药临界撞击能处的 $F-t$ 曲线

Fig. 6 $F-t$ curves of three kinds of propellants at the state of critical impact energy

3 典型发射药评价试验

采用该试验方法, 对太根药、硝铵药、硝基胍药等 3 种典型 19 孔花边形发射药的动态力学强度进行评价。其中, 3 种发射药的药形尺寸按照 GJB770B—2005 中 412.1 小型药药形尺寸测量法测量, 按照式(3)计算各发射药的横截面积 S ^[11], 结果

见表 1。

$$S=\frac{\pi}{4}[3(4e+d)^2+\frac{36\sqrt{3}(2e+d)^2}{\pi}-21d^2]。(3)$$

表 1 3 种发射药的药形尺寸

Tab. 1 Grain sizes of three kinds of propellants				
样品	孔道直径 d/mm	弧厚 2e/mm	药粒长度 h/mm	横截面积 S/mm ²
太根药	0.40	2.09	13.50	143.4
硝胺药	0.46	1.98	13.50	135.3
硝基胍药	0.42	2.04	13.50	139.1

用一元线性回归的方法分别求出 3 种发射药的临界损伤落高 H_R , H_R 处药粒无响应的最大力值 F_m 、脉宽 Δt (脉宽计算的起点和终点为 5% 的最大力值对应的时间点)分别是 H_R 附近各高度处 F_m 、 Δt 的统计平均值,根据式(1)、(2)计算的特征参量见表 2。其中在计算 F_m 、 Δt 、 σ_m 过程中,按照统计方法剔除粗大误差。

表 2 3 种发射药特征参量计算结果

Tab. 2 Characteristic parameters of impact energy for three kinds of propellants				
样品	临界撞击能/ (J·cm ⁻²)	F_m / kN	σ_m / MPa	Δt / ms
太根药	18.8	35.5	247.2	1.2
硝胺药	14.2	29.0	214.2	1.2
硝基胍药	3.8	16.5	118.5	1.3

根据临界撞击能和极限抗冲应力,得到 3 种发射药的动态力学强度由强至弱的顺序是:太根药、硝胺药、硝基胍药,这与典型发射药在实际应用过程中的经验相吻合。

因为太根药中含有增塑剂 TEGN,它对硝化棉有很好的溶解和塑化能力,减少了发射药体系中的应力集中点,故表现出较高的强度;而硝胺药和硝基胍药都含有固体组分,质量分数均在 25% 以上,在受到撞击时,易发生“脱湿”现象,故强度均低于太根药。硝胺药中固体组分为 RDX,质量分数为 25%,硝基胍药中固体组分为硝基胍(NGU),质量分数为 47%,一方面是由于硝胺药的固体组分较少,另一方面是因为 RDX 与吸收药片的界面张力较小^[12],表面能比较相近,具有较好的相容性,而硝基胍的表面能较高,对发射药力学性能有不利影响,故硝胺药的强度高于硝基胍药。

上述试验及分析表明,该方法可用于表征高能发射药动态力学强度。

4 结论

1)对落锤装置进行了改进,建立了高能发射药动态力学强度试验方法。

2)提出了定量表征发射药动态撞击强度的特征参量,即药粒发生临界损伤时的临界撞击能和极限抗冲应力。

3)对典型发射药进行了评价试验,得到太根药、硝胺药、硝基胍药 3 种发射药在 -40℃ 的临界撞击能分别为 18.8 J/cm²、14.2 J/cm²、3.8 J/cm²,极限抗冲应力为 247.2 MPa、214.2 MPa、118.5 MPa。

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 Xiaoting, Yun Laifeng, Wang Guoping, 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.
Rui Xiaoting, Feng Binbin, Wang Guoping. Evaluation method of launch safety of propellant charge [J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 30(5): 56-59.

[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 Binbin, Rui Xiaoting, Xu Hao, 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] 陈言坤, 罗兴柏, 甄建伟, 等. 发射药动态力学性能的研究进展 [J]. 含能材料, 2013, 21(5): 675-680.
Chen Yankun, Luo Xingbai, Zhen Jianwei, et al. Review on dynamical mechanical properties of propellants [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(5): 675-680.

[5] Lieb R J. Correlation of the failure modulus to fracture-generated surface area in uniaxially compressed M43 gun propellant [R]. Spring Field: NTIS, 1995.

[6] Lieb R J, Fischer T J, Hoffman H J. High strain rate response of gun propellant using the hopkinson split bar [R]. Spring Field: NTIS, 1991.

[7] 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.

[8] 负来峰, 芮筱亭, 王浩, 等. 对发射装药引起膛炸机理的讨论 [J]. 兵工学报, 2007, 28(2): 153-157.
Yun Lai feng, Rui Xiaoting, Wang Hao, et al. Discussion about mechanism of breech-blow caused by gun propellant charge [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(2):

- 153-157.
- [9] 赵毅. 高能发射药的力学性能及刚性模块装药研究 [D]. 南京:南京理工大学,2004.
- Zhao Yi. Study of mechanical performance of the high-energy propellant and rigid modular charge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [10] 邢浴仁. 粒状发射药抗冲强度落锤试验方法 [J]. 火炸药,1994 (2) : 12-18,22.
- [11] 金志明. 枪炮内弹道学 [M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [12] 赵毅,黄振亚,刘少武,等. 改善高能硝胺发射药力学性能研究 [J]. 火炸药学报,2005, 28(3) :1-3.
- Zhao Yi, Huang Zhenya, Liu Shaowu, et al. Study of improving mechanical performance of high-energy nitroamine propellant [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2005, 28(3) :1-3.

Research on the Experiment and Evaluation Methods of Propellants in Dropping Hammer Impact Test

ZHOU Jing, YANG Lixia, CHEN Xiaoming, ZHANG Zouzou
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] A new evaluation method of dynamic strength of high energy propellants was proposed. Dynamic mechanical property of the propellants is characterized by the critical impact energy and the limit impact stress when the critical damage to the granular propellants by a dropping hammer occurs. Results indicate that the evaluation method can quantitatively reflect the dynamic mechanical strength of the propellants. The critical impact energy of TEGDN propellant, nitramine propellant and nitroguanidine propellant is 18.8 J/cm², 14.2 J/cm² and 3.8 J/cm², and the limit impact stress 247.2 MPa, 214.2 MPa and 118.5 MPa, respectively.

[KEY WORDS] applied chemistry; high energy propellant; dropping hammer impact; critical impact energy; limit impact stress

第十六届中国科协年会第九分会场 含能材料及绿色民爆产业发展论坛即将召开

由中国科协和云南省人民政府联合主办的第十六届中国科协年会将于2014年5月24~26日在云南省昆明市举行。中国兵工学会承办其第九分会场,主题是“含能材料及绿色民爆产业发展”。含能材料(火炸药)与民爆产业的发展对国家安全和社会经济发展影响巨大。研讨含能材料以及绿色民爆器材技术,对于促进我国含能材料技术水平提高,推进民爆行业结构调整和技术进步,实现安全、绿色、可持续发展,具有十分重要的意义。

该论坛由中国兵工学会、南京理工大学、云南省国防科技工业局联合承办,中国兵器工业第二〇四研究所、中国工程物理研究院化工材料研究所、北理工火炸药研究院、北方特种能源集团有限公司、云南省民爆集团联合协办。

第九分会场主题:含能材料及绿色民爆产业发展,探讨的范围有:含能材料(火炸药)及民爆器材的发展战略与方向;设计原理与设计方法;新型基础原材料的合成与制备;新工艺与新设备;性能测试与评估;产品应用技术;安全、环保与节能减排技术;工业化与信息化;军民技术融合;火工品与烟花爆竹相关技术;工程爆破技术;管理科学与企业文化。

论坛将邀请相关领域的院士、专家、国防科技工业部门、军队系统以及中国兵器工业集团公司和中国兵器装备集团公司领导及所属单位的专家、论文作者参加。

会议报到时间:2014年5月23日全天

报到地点:云南昆明云安会都

联系方式:

1)中国兵工学会学术交流部

安玉德:13601231652 电话:010-68962552 祝 翠:13810108511 电话:010-68963154 传 真:010-68963154

Email: anyd@cos.org.cn; bqzscui@163.com

2)南京理工大学

陆 明:025-84315030, 13851804485 周 勤:025-84315530, 13813988227

3)云南省国防科技工业局

吕云枫: 0871-65326134, 13700650073

这是一次火炸药和民用爆破技术领域的高端学术盛会,欢迎全国从事含能材料及民爆器材研究、设计、教学、生产、使用、安全评价、工程爆破和管理工作的广大科技人员积极参加。

(《爆破器材》编辑部)