文章编号：1006-9941(2010)03-0320-04

NEPE 推进剂易碎性研究

李 军，赵孝彬，王晨雪，关红波
(航天工业固体推进剂安全技术研究中心，湖北 襄樊 441003)

摘 要：为了研究 NEPE 推进剂的易碎性，利用撞击破碎模拟试验装置将 NEPE 推进剂以不同速度撞靶，将撞靶后不同损伤程度的 NEPE 推进剂进行密闭爆发器试验，分析 NEPE 推进剂在不同破碎程度条件下的燃烧特性。结果表明，NEPE 推进剂的最大压力随时间变化率、燃速伴随着破碎程度的增加而增加，当撞击速度大于 192 m·s^{-1}时可能发生燃烧转爆轰。

关键词：航空航天材料；结构损伤；NEPE 推进剂；易碎性
中图分类号：TJ55；V512 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.018

www.energetic-materials.org.cn 含能材料

1 引 言

随着导弹武器系统的飞速发展，总体设计对固体推进剂的性能指标提出更高的要求，为了提高固体推进剂的能量性能，配方中添加了大量的高能炸药(HMX、RDX 等)，部分推进剂炸药含量高达 40%；在提高能量性能的同时，随之带来的是安全性能的恶化。导弹武器在处理、运输、使用和贮存等过程中可能受到跌落、撞击和振动等外界刺激，致使固体推进剂药柱出现脱粘、脱湿或裂纹等结构破坏现象，造成火箭(或导弹)在发射过程中产生对流燃烧甚至引发燃烧转爆轰(DDT)。20 世纪 70 年代美国在研制“三叉戟”导弹过程中，由于固体推进剂的结构损伤产生对流燃烧，致使出现燃烧转爆轰[1]。

为了研究固体推进剂的安全性能，美国、德国、法国等军事强国针对固体推进剂的安全性能建立了系统的试验和表征方法，并开展了大量的研究工作，形成了“破碎-增燃”的共识，即固体推进剂在跌落、挤压、碰撞和振动等作用下发生破碎，燃烧表面大量增加，产生的燃气量猛增，压力急剧升高，促使燃速进一步升高，产生对流燃烧，药柱发生迸裂或破碎，形成循环式的燃速增加、燃烧表面增加和压力升高，使火箭(或导弹)发动机内产生局部高压或者超高压，发生燃烧转爆轰等危险。美国国防部弹药和爆炸物危险性分类规程(TB 700－2)中易碎性试验方法用于确定极不敏感引爆物质在撞击作用下发生危险性损坏的倾向。法国研究结果表明，当固体推进剂的最大压力随时间变化率达到 17.2 GPa·s^{-1}时，该固体推进剂在使用过程中可能发生燃烧转爆轰(DDT)[2-7]。赵孝彬等[8]研究了 NEPE 推进剂 DDT 试验方法和表征参数，阐明了 NEPE 推进剂药浆诱导爆轰距离与试样装填密度之间的关系。张泰华等人[9]采用数值模拟研究了固体推进剂损伤对燃烧稳定的影响，模拟了固体推进剂燃烧压力-时间之间的关系，与试验结果具有较好的一致性。

本试验研究了 NEPE 推进剂在不同撞击速度下的损伤程度，以及不同损伤程度 NEPE 推进剂在密闭爆发器中的燃烧特性，采用压力随时间的变化率(dp/dt)分析了 NEPE 推进剂的易碎性。

2 试验方法及数据处理

2.1 NEPE 推进剂试样制备

NEPE 推进剂采用减压-捏合工艺混合，浇注至专门模具并固化。试样按照航天行业标准(QJ1113－1998)《固体推进剂性能测试用试样》要求制备。

2.2 撞击破碎模拟试验

通过发射器将 NEPE 推进剂试样以 100～400 m·s^{-1}的速度水平撞靶，试样在碰撞、冲击、挤压等作用下发生不同程度损伤，采用专用桶收集撞靶后的 NEPE 推进剂试样，为了保证试验结果的平行性和可靠性，损伤试样的收集量不少于原试样的 97.5%。采用时间间隔测量仪记录试样的撞靶速度，高速摄影

收稿日期：2009-10-20；**修回日期**：2009-12-08
基金项目：国家安全重大基础项目(No. 61337)
作者简介：李军(1981－)，男，助理工程师，主要从事固体推进剂安全性能研究工作。e-mail：nuc2005@163.com

仪观察试样的撞靶过程。试验装置如图 1 所示。

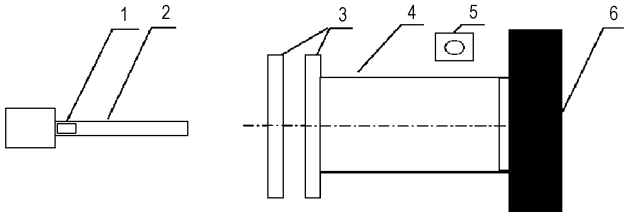

图 1 撞击破碎模拟试验装置示意图

1—试样，2—发射器，3—时间间隔测量仪，4—试样收集桶，5—高速摄影仪，6—靶基

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up with simulating device

1—sample, 2—airgun, 3—velocity measuring sensor, 4—sample catach box, 5—high speed camera, 6—hard steel target

2.3 密闭爆发器试验

密闭爆发器燃烧室容积为 90 cm^3，按照 GJB770A－1997方法 703 密闭爆发器试验方法进行实验。点火压力为 10.98 MPa。为了保证试验结果的一致性，环境温度为 20 ℃。

3 结果与讨论

表 1 给出了 NEPE 推进剂试样不同撞击速度后的试样收集量，v 为撞靶速度，m_1 为撞靶前的 NEPE 推进剂试样质量，m_2 为撞靶后的 NEPE 推进剂试样质量，m_3 为 NEPE 推进剂试样在不同撞靶速度下的质量损失百分数。

表 1 不同撞击速度下的试样收集情况

Table 1 Sample collection at different impact velocities

No.	v/m·s^{-1}	m_1/g	m_2/g	m_3/%
1	0	8.90	8.89	0
2	101.3	9.00	8.87	0.11
3	105.0	9.00	8.87	0.11
4	166.7	8.90	8.85	1.22
5	169.5	8.90	8.70	1.60
6	220.8	9.00	8.78	2.25
7	223.6	8.90	8.89	2.44

Note: m_1, m_2 is the sample mass before and after impact, respectively. m_3 is mass loss at different velocity.

图 2 和图 3 给出了不同速度撞靶后 NEPE 推进剂试样的实物和 X 射线探伤结果。通过探伤结果可以看出，NEPE 推进剂在 101.3 m·s^{-1}和 105.0 m·s^{-1}撞击速度下基体保持完成，没有可见的裂纹和缺陷，但是在 166.7 m·s^{-1}和 169.5 m·s^{-1}的撞击作用下，试样的前端发生不同程度的损伤和破碎，在 220.8 m·s^{-1}和 223.6 m·s^{-1}撞击速度作用下，NEPE 推进剂试样完全破碎。

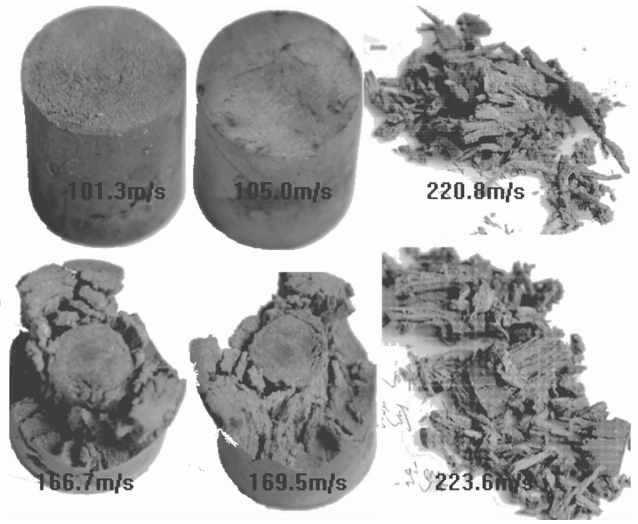

图 2 不同撞击速度下的实物图片

Fig. 2 Photographs of NEPE propellant at different impact velocities

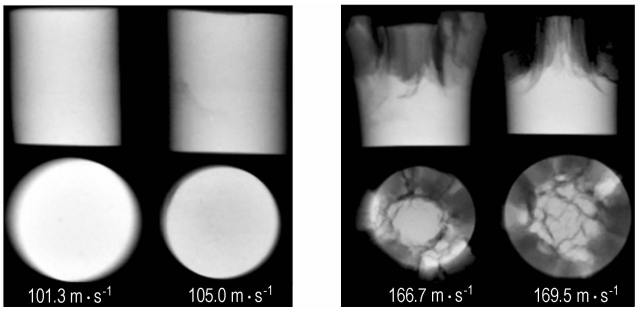

图 3 不同撞击速度下的探伤结果

Fig. 3 Photographs of crack detection of NEPE propellant at different impact velocities

将撞靶后的 NEPE 推进剂试样放入密闭爆发器中进行试验。密闭爆发器装药情况及试验结果如表 2 所示，m_2 为密闭爆发器装药量，m_4 为密闭爆发器点火药量，p_{max}、u_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 分别为不同撞击速度下 NEPE 推进剂的最大压力、最大燃速和最大压力随时间变化率。通过表 2 可以看出，p_{max}、u_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 随着撞击速度的增加而增加。

通过表 1、图 2 和图 3 可以看出，NEPE 推进剂试样的损伤和破碎程度伴随着撞击速度的增加而增加，撞靶后的试样质量损失百分数也随之增大。

不同撞击速度下 NEPE 推进剂试样的 p-t 曲线、dp/dt-p 曲线、u-p 曲线、v-$(dp/dt)_{max}$ 曲线和 v-u_{max} 曲线分别如图 4～图 8 所示。

www.energetic-materials.org.cn 含能材料

表 2 密闭爆发器装药情况及试验结果

Table 2 The charge situation of NEPE propellant in the closed bomb and the experimental results

No.	m_2 /g	m_4 /g	p_{max} /MPa	u_{max} /cm·s^{-1}	$(dp/dt)_{max}$ /GPa·s^{-1}
1	8.89	1.2	100.77	1.466	2.016
2	8.87	1.2	109.27	1.796	2.256
3	8.87	1.2	110.54	1.808	2.346
4	8.85	1.2	151.08	7.690	11.56
5	8.70	1.2	154.00	7.738	13.069
6	8.78	1.2	127.19	13.186	22.238
7	8.89	1.2	129.39	13.237	22.823

Note: m_2, m_4 is the mass of charge and initiator, respectively. p_{max}, u_{max}, $(dp/dt)_{max}$ is the maximum pressure, velocity and pressure rising rate.

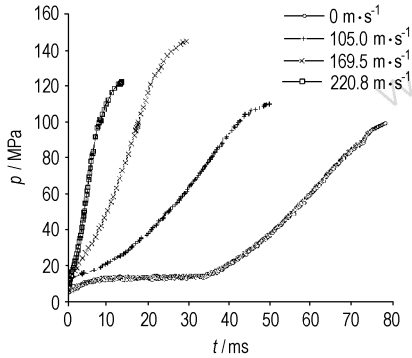

图 4 NEPE 推进剂试样的 *p-t* 曲线

Fig. 4 *p-t* curves of NEPE propellant

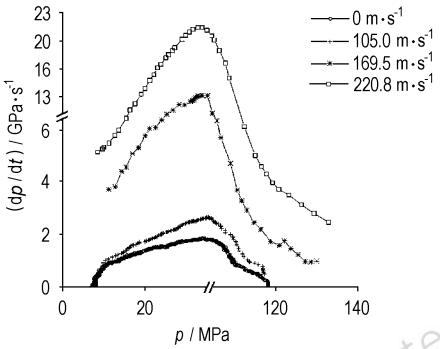

图 5 NEPE 推进剂试样的 d*p*/d*t*-*p* 曲线

Fig. 5 d*p*/d*t*-*p* curves of NEPE propellant

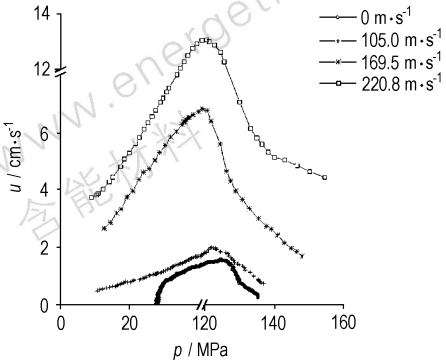

图 6 NEPE 推进剂试样的 *u-p* 曲线

Fig. 6 *u-P* curves of NEPE propellant

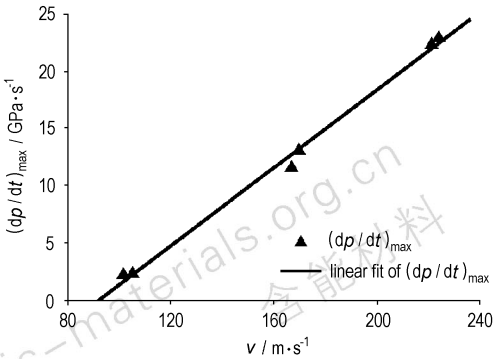

图 7 NEPE 推进剂试样 *v*-$(dp/dt)_{max}$ 曲线

Fig. 7 *v*-$(dp/dt)_{max}$ curves of NEPE propellant

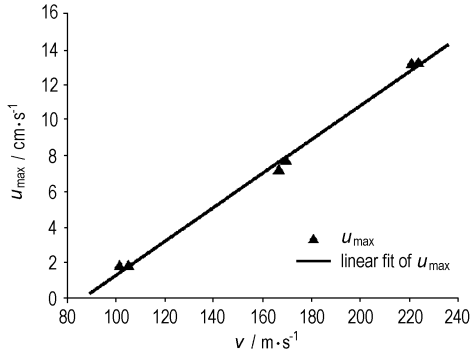

图 8 NEPE 推进剂试样 *v*-u_{max} 曲线

Fig. 8 *v*-u_{max} curves of NEPE propellant

从表 2 和图 4 可以看出，NEPE 推进剂试样的最大压力随着撞靶速度的增加而增加，而燃烧达到最大压力所需时间缩短，这与 NEPE 推进剂试样的损伤程度有关，伴随着 NEPE 推进剂试样损伤程度的不断增加，初始燃烧面积增大，燃速加快，导致最大压力增加，燃烧时间缩短。

从图 5 和图 6 可以看出，NEPE 推进剂试样在撞击速度为 105.0 m·s^{-1}时，燃速和最大压力随时间变化率没有明显变化。当撞击速度为 169.5 m·s^{-1}和 220.8 m·s^{-1}时，燃速分别为 7.738 cm·s^{-1}和 13.186 cm·s^{-1}，d*p*/d*t* 也有大幅提高，结合图 2 和图 3 可以看出，在 169.5 m·s^{-1}的撞击作用下，NEPE 推进剂试样端面发生一定破碎，内部出现大量裂纹；在 220.8 m·s^{-1}的撞击作用下，NEPE 推进剂试样几乎全部破碎，由于 NEPE 试样出现大量的破碎和裂纹，造成燃烧面积增加，促使燃速和压力随时间的变化率大幅提高。

从图 7 和图 8 可以看出，NEPE 推进剂试样最大压力随时间变化率、最大燃速随着撞击速率的增加呈线性增加，通过对 *v*-$(dp/dt)_{max}$ 曲线进行拟合得出，NEPE 推

www.energetic-materials.org.cn 含能材料

进剂最大压力随时间变化率达到 17.2 GPa · s^{-1} 时的速度为 192 m · s^{-1}。这与美国"三叉戟"用 NEPE 推进剂燃烧压力随时间变化率的最大值达 17.2 GPa · s^{-1} 时的临界冲击速度为 190 m · s^{-1} 的结果基本一致[5]。

4 结 论

（1）撞击速度小于 223.6 m · s^{-1} 时，NEPE 推进剂的最大压力随时间变化率和最大燃速伴随着撞击速度呈线性增加。

（2）NEPE 推进剂燃烧压力随时间变化率最大值为 17.2 GPa · s^{-1} 时的临界冲击速度为 192 m · s^{-1}。

参考文献：

[1] Weiss R R, Vanderhyde N, Merrill. Review of USAF treatment of NEPE propellant rocket motor hazards[C]//AGARD Conference Proceedings No. 367, 1984.

[2] Atwood A I, Price C F, Curran P O. Combustion studies of thermally damaged propellants[C]//28th ICT, Karlsruhe, 1996: 20-1 –20-14.

[3] Alexander Yu Dolgoborodov, Vladimir N Marshakov. Solid propellant combustion under shock wave loading[C]//32th ICT, Karlsruhe, 2001: 96-1 –96-9.

[4] 汪炳麟，尹瑞康，张小平，等译. 化学火箭和推进剂的危险性[M]. 西安：航天科技集团公司第四研究院出版社，1999.

[5] A · 达维纳. 固体火箭推进剂技术[M]. 张德雄，姚润森，译. 北京：宇航出版社，1997.

[6] 芮筱亭，贠来峰，沙南生，等. 发射装药安全性评定技术的研究进展[J]. 兵工学报，20005(5): 690 –696.
RUI Xiao-ting, YUN Lai-feng, SHA Nan-sheng, et al. Advance on launch safety for gun propellant charge[J]. *Acta Armamentarii*, 2005(5): 690 –696.

[7] 侯林法. 固体推进剂[M]. 北京：宇航出版社，1994: 316 –322.

[8] 赵孝彬，蒲远远，陈教国，等. NEPE 推进剂的燃烧转爆轰特性[J]. 火炸药学报，2007(1): 4 –8.
ZHAO Xiao-bin, PU Yuan-yuan, CHEN Jiao-guo, et al. Deflagration to detonation transition characteristics of NEPE propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2007(1): 4 –8.

[9] 张泰华，白以龙，王世英，等. 推进剂的撞击损伤状态对其燃烧转爆轰的影响[J]. 力学学报，2000, 32(1): 532 –539.
ZHANG Tai-hua, BAI Yi-long, WANG Shi-ying, et al. Effects of impact-induced damage on deflagration to detonation transition of high energy propllenats[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2000, 32(1): 532 –539.

Fragility of NEPE Propellant

LI Jun, ZHAO Xiao-bin, WANG Chen-xue, GUAN Hong-bo

(*Research Center of Solid Propellant Safety Technology of Aerospace Industry, Xiangfan* 441003, *China*)

Abstract: In order to study the fragility of NEPE propellant, a simulation device was adopted to test NEPE propellant samples which impacted target at different velocities. The damaged samples were tested in closed bomb and the burning performances of the damaged samples were analyzed. Results show that the maximum pressure rising rate and burning rate of NEPE propellant samples increase with increasing of damaged situation. The NEPE propellant samples firstly burn, and then detonate, when the impact velocity is more than 192 m · s^{-1}.

Key words: materials of aviation & aerospace; structural damage; NEPE propellant; fragility

CLC number: TJ55; V512 **Document code**: A **DOI**: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.018

www.energetic-materials.org.cn 含能材料