

发射装药挤压应力与破碎规律研究

徐浩¹, 芮筱亭¹, 郁兆华², 姜世平¹

(1. 南京理工大学发射动力学研究所, 江苏 南京 210094;

2. 华东光电集成器件研究所, 江苏 苏州 215163)

摘要:建立了发射药粒在动态载荷下的挤压破碎过程动力学模型并进行了数值计算,基于发射装药挤压破碎试验装置,研制了挤压应力 PVDF 传感器,并进行了发射装药动态挤压应力试验。数值模拟结果与试验结果吻合较好,验证了数学模型的正确性和新型传感器设计的合理性,说明新型传感器可以用于发射装药挤压破碎试验中对发射装药颗粒间挤压应力的测量。

关键词: PVDF 压电薄膜; 破碎规律; 发射装药; 挤压应力

中图分类号: TJ303.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2012)04-0061-04

Study on Extrusion Stress and Fracture Law of Propellant Charge

XU Hao¹, RUI Xiao-ting¹, YU Zhao-hua², JIANG Shi-ping¹

(1. Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. East China Institute of Photo-electronics, Suzhou 215163, China)

Abstract: The extrusion and fracture process of propellant grains under impact loading is numerically simulated. Based on the experiment instrument of dynamic extrusion and fracture of the propellant charge, the new PVDF stress sensor of the propellant charge used in the experiment instrument is developed. The experiment of the dynamics extrusion and fracture of the propellant charge was performed. The experiment results and the simulation ones have good agreement, indicating that the computation theory and model are accurate, the design of the new sensor is reasonable and the new sensor can be used to measure the extrusion stress of the propellant charge in the experiment of the extrusion and fracture of the propellant charge.

Key words: PVDF piezoelectric film; fracture law; propellant charge; extrusion stress

引言

国内外对发射装药发射安全性引起膛炸机理的研究逐步走向“发射装药挤压-破碎-燃面增加-燃气生成速率猛增-膛压猛增”的思路^[1],即由于弹底发射装药被点燃前受到药床颗粒间的挤压应力作用,产生了破碎,引起发射药燃面的急增,从而使其燃气生成速率猛增,使弹道起始段膛压猛增,最终导致膛炸。美国 M1A2 坦克 120 mm 坦克炮、M110E2-203 毫米榴弹炮、M198-155 mm 榴弹炮、127 mm 舰炮发生膛炸事故都是由于低温下发射药

挤压破碎^[2]。

发射装药挤压破碎过程的测试已成为发射安全性研究的国际性难题,如何准确获取发射装药的挤压应力和挤压破碎过程,成为发射装药发射安全性研究的关键问题^[3-8]。

本研究介绍了发射装药动态挤压破碎试验装置及原理,在此基础上对发射装药的冲击破碎过程进行了数值模拟,设计出发射装药挤压应力 PVDF (聚偏二氟乙烯)传感器,并测得不同温度下发射装药挤压应力时间历程和相应挤压应力下的发射装药挤压破碎情况,验证了数学模型的正确性和传感器设计的合理性,为发射装药挤压破碎规律和发射

收稿日期:2012-05-14; 修回日期:2012-06-08

基金项目:国家自然科学基金(10902051,11102089);新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-10-0075);南京理工大学自主科研专项计划资助项目(No. 2011ZDJH11);总装重点预研基金;江苏高校优秀学科建设工程资助项目。

作者简介:徐浩(1983-),男,博士研究生,研究方向:兵器科学与技术。

安全性研究提供了新方法。

1 发射装药挤压破碎动力学模型的建立

从离散元法的基本原理出发,通过射线交叉法判断发射药粒在运动过程中的接触判断,获得了发射装药在重力作用下的堆积构型,建立了发射装药挤压破碎动力学模型,如图 1 所示。

将堆积构型下的发射装药离散成球单元系统,基于弹簧-球单元破碎模型和 Mohr-Coulomb 型破坏准则,将如图 2 所示的某次试验所得弹底发射装药挤压应力-时间历程加载于发射装药,相关计算参数如表 1 所示,对发射装药在弹底挤压应力作用中的挤压破碎过程进行数值模拟,再现了发射装药挤压破碎动力学过程。图 3 为采用 OpenGL 显示的计算结果动画显示在不同时刻的截取图片。

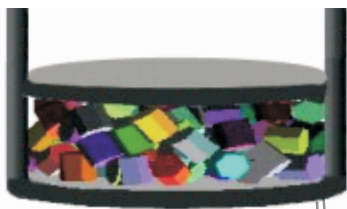


图 1 发射装药挤压破碎动力学模型

Fig. 1 Dynamic compression model of propellant charge

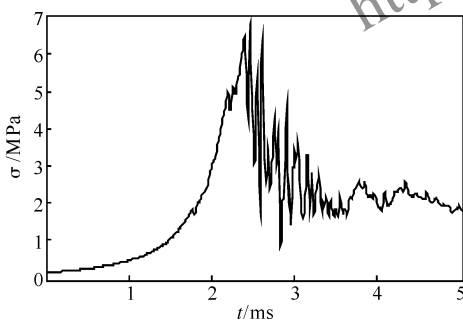


图 2 发射装药颗粒挤压应力-时间历程

Fig. 2 The extrusion stress curve of the propellant charge bed

在 0、1、2、3 ms 时刻,弹簧数量分别为 4 487、4 062、2 838、2 531。由图 3 可以看出,从 0~2 ms,法向弹簧断裂数量较少,发射装药中只有很少数的药粒发生了破碎,此阶段实际上处于药床压实阶段;从 2~3 ms,药床挤压应力达到最大值,从仿真动画中可以看出,发射装药发生了大规模破碎,法向弹簧断裂的数量猛增;3 ms 之后,药床处于破碎后的稳定状态,但在燃烧室压力的继续作用下,仍然有少量药粒发生了破碎。

表 1 相关计算参数

Table 1 Computation parameters

发射药粒形状	规则六棱柱
离散单元数	21×97
每个离散小球半径/mm	1.9
弹性模量/MPa	1600
泊松比	0.2
弹簧拉伸强度/N	800
弹簧压缩强度/N	3700
单元间摩擦系数	0.9
时间步长/s	10 ⁻⁶
时间长度/ms	3

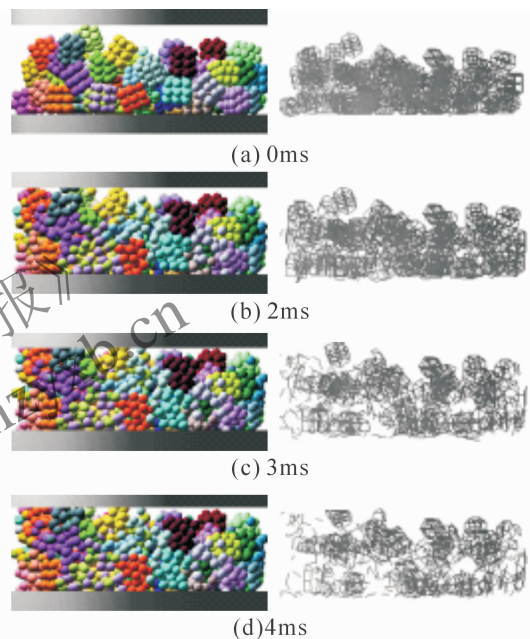


图 3 不同时刻离散药床破碎及法向弹簧断裂状况

Fig. 3 The fragmentation of propellant bed at different time

2 发射装药动态挤压破碎试验

2.1 试验装置

采用火药气体驱动活塞挤压发射装药来模拟膛内发射装药动态挤压破碎过程,使得数值计算尽量接近真实情况。发射装药动态挤压破碎试验装置见图 4。

试验时,用点火头引燃燃烧室中的硝化棉,容器内压力开始上升,提供作用于传动活塞逼近弹底发射装药挤压应力的火药气体压力,高速运动的活塞快速挤压装药室内的发射装药,这一过程可描述火炮发射过程中弹底发射装药的挤压破碎过程。

图 5 是数值计算及力学环境试验所测弹底发射

装药挤压应力—时间历程。由图 5 可以看出, 两者吻合较好, 表明发射装药动态挤压破碎试验装置可以真实刻画发射装药在膛内弹底所受的挤压应力及在此挤压应力下的破碎情况。

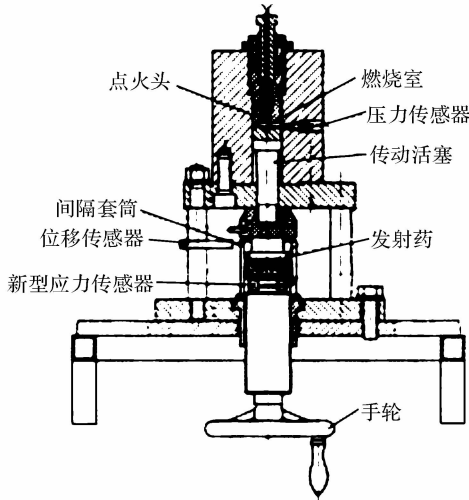


图 4 发射装药动态挤压破碎试验装置原理图

Fig. 4 Diagram of experiment instrument of dynamic extrusion and fracture of propellant charge

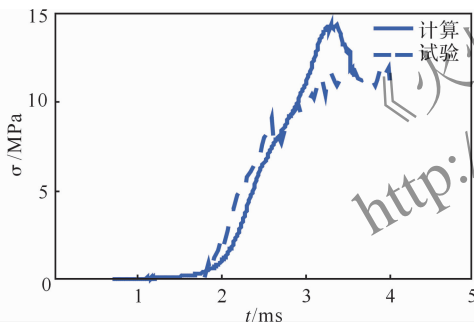


图 5 数值计算和射击试验测得发射药的挤压应力—时间曲线

Fig. 5 Extrusion stress curves by numerical simulation and firing experiment test

2.2 挤压应力 PVDF 传感器

采用辽宁锦州科信电子材料有限公司生产的 PVDF 压电薄膜作为新型发射装药挤压应力 PVDF 传感器的感受元件, 封装好的压电薄膜如图 6 所示。

新型发射装药挤压应力 PVDF 传感器由承压上盖和底座两部分组成, 用螺纹加弹簧垫圈进行连接, 结构图见图 7。

传感器的标定灵敏度比例系数为 0.204 V/MPa。试验时, 发射药药室底板与传感器承压上盖上表面接触良好, 其间不能有间隙或杂质, 保证两者的良好刚性接触和对发射装药挤压应力的准确测量。

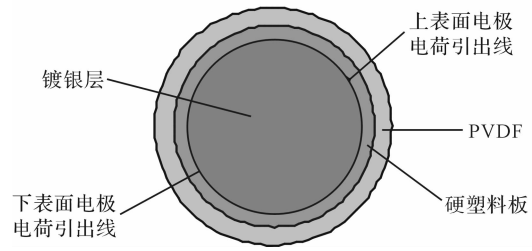


图 6 封装好的压电薄膜

Fig. 6 Encapsulated piezoelectric film

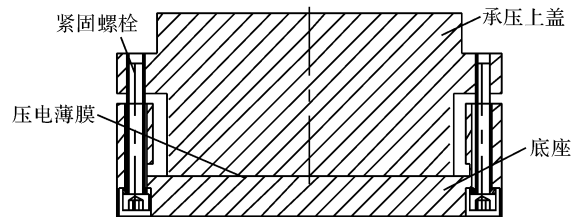


图 7 新型发射装药挤压应力传感器结构图

Fig. 7 The new extrusion stress sensor of the propellant charge bed

2.3 试验结果与讨论

将称量好的硝化棉点火药放入动态挤压破碎试验装置的燃烧室内, 然后将新型 PVDF 传感器按要求固定好, 确保新型传感器的信号输出线从间隔套筒的底端输线孔顺利引出, 其他部件按规定进行装配。当点燃燃烧室内的硝化棉火药后, 其产生的高压燃气推动传动杆及活塞, 活塞挤压试样药室内的发射装药, 导致发射药破碎。同时, 挤压应力 PVDF 传感器把压力信号转化成电荷信号传输给数据采集系统, 完成对发射装药挤压应力的测量。

表 2 为常温 (+21℃)、高温 (+50℃)、低温 (-40℃)、不同活塞压缩量条件下某型发射装药挤压破碎试验部分结果, 药床挤压应力—时间曲线见图 8。

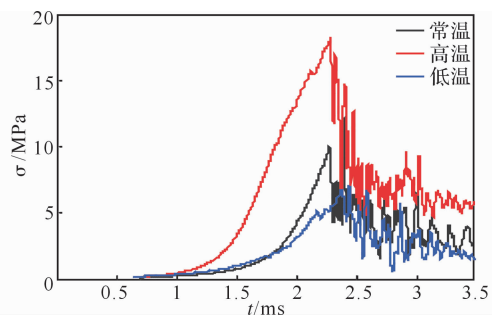


图 8 应用新型传感器测得的不同温度下药床颗粒挤压应力—时间历程

Fig. 8 The extrusion stress curves of the propellant charge bed at different temperatures measured by the new extrusion stress sensor

表 2 不同温度条件下某型发射药挤压破碎试验结果

Table 2 The results of compression fracture experiment at different temperatures

温度	h_1 /mm	m_1 /g	m_2 /g	h_2 /mm	p_m /MPa	S /mm	σ /MPa
常温	10	2	100	24.22	34.82	5	11.16
常温	10	2	100	23.80	35.71	10	18.25
常温	10	2	100	24.20	35.62	15	28.37
高温	10	2	100	23.94	34.25	5	13.73
高温	10	2	100	24.24	34.87	10	23.85
高温	10	2	100	24.26	33.77	15	33.60
低温	10	2	100	24.24	33.55	5	7.24
低温	10	2	100	24.28	34.23	10	15.88
低温	10	2	100	23.98	34.41	15	25.13

注： h_1 、 h_2 分别为点火药室高度和发射装药高度； m_1 、 m_2 分别为点火药和发射药质量； p_m 为点火药室最大压力； S 为活塞行程； σ 为药床最大挤压应力。

由图 8 可以看出，在其他条件相同的情况下，应用新型 PVDF 传感器测得的发射装药最大挤压应力高温条件下最大，低温条件下最小。

某型发射装药在相同的最大挤压应力作用下，常温、高温和低温破碎情况有较大的差别，图 9 为最大挤压应力约为 18MPa 时，不同破碎程度的发射药。



图 9 最大挤压应力相同、不同温度下发射药破碎情况

Fig. 9 Fracture propellant charge under the conditions of different temperatures and the same extrusion stress

由图 9 可以看出，低温条件下发射药破碎最厉害，常温和高温发射药破碎较少，说明某型发射药

在低温条件下具有易脆性，验证了发射装药在膛内破碎是药粒的低温脆性和着火前在弹底处受到挤压作用的结果。

3 结 论

(1)建立了发射药挤压破碎过程的动力学模型，对发射药在弹底挤压应力作用中的挤压破碎过程进行了数值计算，可再现发射药挤压破碎过程。

(2)使用新型发射装药挤压应力 PVDF 传感器测量得到的发射装药挤压应力与数值计算结果吻合较好，说明 PVDF 压电薄膜可以用于发射药挤压应力测试试验。

(3)用动态挤压破碎试验装置，在测量发射装药所处力学环境的同时还可得到破碎后的药粒，尤其低温条件下，发射药变脆，抗冲击和抗挤压的能力减弱，容易破碎，因此改善发射药粒低温冷脆性能够提高发射装药的安全性能。

致谢：在本文的撰写过程中，得到了德国 Mach 弹道研究所 Zimmermann 教授以及南京理工大学陈涛讲师、杨富锋副教授的帮助，在此表示感谢。

参考文献：

- [1] 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 Xiao-ting, WANG Hao, et al. Discussion about mechanism of breech-blow caused by gun propellant charge[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(2): 153-157.
- [2] 芮筱亭. 弹药发射安全性导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [3] 程啟华, 李永新, 卜雄洙. 火药颗粒撞击应力测试技术[J]. 弹道学报, 2008, 20(3): 20-23.
CHENG Qi-hua, LI Yong-xin, BU Xiong-zhu. Measurement technology of percussion force of powder grains[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(3): 20-23.
- [4] 崔村燕, 洪延姬, 李修乾, 等. PVDF 压力传感器标定及在激光推进实验中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(1): 31-35.
CUI Cun-yan, HONG Yan-ji, LI Xiu-qian, et al. Calibration of a PVDF sensor and its application to laser propulsion experiments [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(1): 31-35.
- [5] 潘强, 张继春, 郭学彬. 土体爆炸压密的原理及试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 165-172.

(下转第 68 页)

有一 N_3 基团的特征吸收, 这表明, 改性单基球形药中确实有 GAP 的成分, 达到了 GAP 与 NC 复合成球的目的。

3 结 论

(1) 制备的样品为 GAP 改性的单基球形药。随着 GAP 质量分数从 20% 增加到 40%, 改性单基球形药表面由光滑密实变得具有粗糙蓬松感, 有利于提高改性单基球形药的塑化速度。

(2) GAP 改性单基球形药的圆球率较高, 颗粒间无粘结, 流散性好。驱溶时间从 10 min 提高到 50 min 时, GAP 改性单基球形药的假密度由 0.5467 g/cm^3 提高到 0.8306 g/cm^3 , 适宜的驱溶时间为 40~50 min。

(3) 当搅拌速度从 700 r/min 增加到 1500 r/min 时, 改性单基球形药的 d_{50} 从 $134.53 \mu\text{m}$ 降低至 $59.80 \mu\text{m}$, 适宜的搅拌速度为 1000~1500 r/min。

参考文献:

[1] Olsen F Tibbitts G C. Manufacture of smokeless powders: US, 2 206 916[P]. 1936.

[2] Camp A T. Nitrocellulose plastisol propellants manufacture[J], Hazards and Testing, 1969, 88:29.

[3] 王明东. 球形药工艺研究[D]. 南京: 华东工学院, 1962.

[4] 张柏生. 球形药和小粒药制造中脱水剂控制药体密度的作用[R]. 南京: 华东工学院, 1964.

[5] 李江存, 焦清介, 任慧, 等. 层层组合法制备 NC-BA-RDX 包覆球[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(3): 246-250. LI Jiang-cun, JIAO Qing-jie, REN Hui, et al. Preparation of NC-BA-RDX coating ball particles by means of layer-to-layer assembly technique[J]. Journal of Solid

Rocket Technology, 2008, 31(3): 246-250.

- [6] 徐建华, 王泽山. 改性双基球形药的制备工艺研究[J]. 火炸药学报, 2001, 24(2): 9-11. XU Jian-hua, WANG Ze-shan. Study on the property modification of double-base propellants to ball propellant[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2001, 24(2): 9-11.
- [7] 单文刚, 孙铁刚, 张国东, 等. 硝化棉包覆催化剂球形药的制备工艺研究[J]. 含能材料, 1996, 4(2): 75-79. SHAN Weng-gang, SUN Tie-gang, ZHANG Guo-dong. Preparation of nitrocellulose ball propellant containing combustion catalyst[J]. Energetic Materials, 1996, 4(2): 75-79.
- [8] Frankel M B, Grant L R, Flanagan J E. Historical development of glycidyl azide polymer[J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8(3): 560-563.
- [9] 庞爱民, 郑剑. 高能固体推进剂技术未来发展展望[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(4): 289-293. PANG Ai-min, ZHENG Jian. Prospect of the research and development of high energy solid propellant technology[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 27(4): 289-293.
- [10] 刘晶如, 罗运军, 杨寅. GAP 推进剂粘合剂固化体系为学性能的研究[J]. 精细化工, 2007, 24(11): 1128-1130. LIU Jing-ru, LUO Yun-jun, YANG Yin. Study of mechanical properties of GAP propellant binder curing system [J]. Fine Chemicals, 2007, 24(11): 1128-1130.
- [11] 罗运军, 吴艳光, 葛震, 等. 一种由叠氮类含能聚合物改性的单基球形药的制备方法: CA, 201218000653. 1. [P]. 2012.

(上接第 64 页)

PAN Qiang, ZHANG Ji-chun, GUO Xue-bin. The principle of soil compaction by explosion and its experimental investigation [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(2): 165-172.

[6] Prakash A. Computational Structural mechanics provides a new way to "test" behind-armor debris[C]// High Performance Computing Contributions to DoD Mission Success. [s. L.]: DoD HPC Modernization Of-

fice, 2002.

- [7] 席道瑛, 郑永来. PVDF 压电计在动态应力测量中的应用[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(2): 174-179. XI Dao-ying, ZHENG Yong-lai. Application of PVDF gauges to dynamical stress measurements[J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(2): 174-179.
- [8] 强锡富. 传感器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.