

【武器装备】

含能材料装药安全性在力学性能 及数值模拟方面的研究进展^{*}

张建忠,侯聪花,胡双启

(中北大学 化工与环境学院,太原 030051)

摘要:从力学特性和数值2方面研究了含能材料的安全性问题。综述了国内外关于含能材料安全性的研究现状,并讨论了关于含能材料力学性能、数值模拟和本构等方面的研究状况,提出了含能材料在安全性上的研究方向。

关键词:含能材料;安全性;力学性能;数值模拟

中图分类号:TJ410.34

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2010)05-0011-03

弹药的生产使用的历史,也是伴随着燃烧与爆炸事故不断发生的历史。因此在经济和技术允许的前提下,人们一直在研究兼顾战术需求和安全的弹药最佳设计。第二次世界大战之后,弹药安全性技术水平得到了较大提高,近年来发展的低易损性火炸药和低易损性弹药代表了这一方向。在我国受多起膛炸、早炸事故的促动,以引信安全性为先导,也已逐渐对弹药的安全性问题有所了解和重视^[1]。

随着现代高性能武器系统的飞速发展,对提高各种条件下含能材料装药安全性的要求日益迫切,含能材料损伤和力学性能的研究也越来越受到重视。近几年,这方面的研究工作正逐渐成为热点。含能材料包括炸药、推进剂和发射药等。按材料组成可分为单质含能材料和混合含能材料两大类,后者是一类特殊的颗粒填充复合材料。

1 含能材料装药安全性在力学性能方面的研究现状

含能材料的服役环境非常复杂,在生产、加工、运输、储存、发射、穿靶、破片意外撞击时,均处于不同加载速率、应力状态和温度之中。含能材料在服役过程中会产生孔洞和微裂等各种形式的损伤。这些损伤一方面使含能材料的力学性能劣化,并可能最终导致材料破坏;另一方面,损伤对“热点”的形成具有重要的影响,从而影响炸药的感受度、燃烧甚至爆炸性质^[2]。如火药破碎是影响固体火炮射击安全性的最大隐患之一,在点传火阶段,由于存在初始正向压力梯度,火药床向弹底方向运动,导致火药床在弹底区域高密度聚集在高速度撞击的弹底,而药室肩部形状收缩、分装式装药结构中的空隙以及弹丸尾翼的存在,更加剧了火药聚集的程度,一旦颗粒间应力超过临界破碎应

力或撞击速度超过临界破碎速度,则发生火药的破碎,尤其是在低温条件下,由于火药的力学性能较差,火药具有的低温冷脆性使得火药颗粒破碎更为严重。火焰在破碎颗粒床中的传播,可能出现燃烧向爆轰的转变,诱发的异常压力威胁火炮的射击安全性。自20世纪50年代火炮发生第1次膛炸事故以来,各国都投入了大量的精力研究火药的动态力学性能与火炮内弹道性能之间的关系^[3]。

国内外的大量研究结果表明,发射药在火炮上应用的安全性问题,主要与膛内的纵向压力波和发射药的低温动态力学性能有关^[4]。美国于1979年首次将膛内压力波的评定标准列入了火炮安全性试验规程,1986年又联合发布了火炮安全性试验国际操作规程(ITOP)^[5],其中的核心问题仍然是膛内压力波问题。

“压力波”(pressure wave)的概念最早是在1935年由肯特提出的,肯特(Kent P K)^[6]使用压电传感器在155mm榴弹炮上研究了底部点火对压力曲线异常现象的影响,提出了此概念。随后,一些内弹道学者开始致力于压力波的研究,海登(Hadden S E)和南斯(Nance G A)^[7]提出,火药床中的点火位置多次出现因超压而发生膛炸,在事故分析中首次注意到由点火诱发的压力波强度与最大膛压的关系。霍斯特(Horst A W)^[8]建议采用多频带滤波的数字快速傅里叶分析以压力波的整体特性建立起压力波敏感度曲线。

含能材料的力学性能对装药的安全性有直接的影响。20世纪60年代以来,美国等一些发达国家开展了一系列含能材料力学性能的研究,重点是含能材料的动态(中高应变率)力学性能。近几年,低温力学性能实验也日益受到重视,与炸药材料相比,推进剂力学性能的研究比较系统和深入。在炸药材料方面,TNT(梯恩梯)和Comp B炸药是研究最多的材料^[9-11]。近几年,国内在含能材料力学性

* 收稿日期:2010-02-10

基金项目:国防“十五”预研项目资助。

作者简介:张建忠(1970—),男,博士研究生,讲师,主要从事武器系统安全性与防火防爆技术研究。

能研究方面开展了积极的工作,已建立了一些常规力学性能的测试方法。

霍普金森杆实验法就是研究高应变率下火药力学性能的一种有效方法,原理是利用应力波理论,由实验测得的火药试件的入射波、发射波与透射波的波形求得被测试件的应力、应变、应变率之间的关系。Hoffman 等^[12-13]用该方法研究了 M30, M43 火药的动态力学性能,由于用霍普金森压杆法测定火药的 $\varepsilon \sim t$ 与 $\sigma \sim t$ 时,火药的应变率可高达 $1.1 \times 10^3 \sim 2.27 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$,因此用该方法测得的数据能比较正确地反映高应变率下火药的动态力学性能。

20 世纪 80 年代以来美国能源部所属的三大国防实验室以及英国剑桥卡文迪什实验室的一些学者从实验到理论,从宏观到微观,对炸药中产生局部高温点的力学、物理、化学机理进行了广泛的理论分析和研究。对 TNT 和 B 炸药在准静态和动态以及不同温度下,分别测定了单轴、三轴压缩条件下各力学参数,讨论了温度、加载速率对这些参数的影响,并采用可能的机械破坏机理分析了实验结果。

J. Pinto, S. Nicolaides 和 D. A. Weigand^[9,10,14]对复合炸药 Comp. B 和单质炸药 TNT,在准静态和高应变率率以及不同温度下,分别测定了单轴、三轴压缩条件下各种力学参数,讨论了温度、加载速率对这些参数的影响,并采用可能的机械破坏机理分析了试验结果。

文献[15]中以微型激波管产生的冲击波发射圆柱体型药粒的装置,对单基、双基和三基火药的动态撞击性能进行了研究,可测得火药受高速撞击时的应力、应变以及他们与撞击速度之间的关系。

文献[16]中在冲击加载条件下,炸药装药中产生的应力及应力率与装药本身的弹性模量有很大的关系。降低弹性模量,装药中产生的应力与应力率随之降低,而且后座冲击载荷越大,装药中应力与应力率的降低越显著。在同样条件下,压装装药的发射安全性要优于注装装药。

韩小平等人利用 MTS 材料试验机 and 自制的含能材料三轴压缩实验装置,对国产 TNT 和 Comp. B 炸药的动态压缩进行了测试,在力学性能方面已取得了一些可喜的成果。

2 有限元分析方法在含能材料装药安全性研究中的状况

在含能材料装药安全性上,近年来,发展了对它的数值模拟和本构结构的研究。

Bennett 等^[17]在 X-9501 的力学响应及非冲击起爆的模拟中,采用了粘弹性统计断裂本构模型(Visco-SCRAM),模型中包含了粘弹性响应、统计断裂力学和热点起爆机理。

Duffy 等^[18]用 DYNA2D 对复合推进剂受落锤冲击时力学响应进行模拟,研究了很多 AP 颗粒在粘结剂中随机分布下由于材料微观结构上的非均匀性引起的应力集中。

文献[19]中用有限元方法对单颗药粒受挤压时的变形进行了数值模拟。Heis-er, Wolf^[20]则数值模拟了不同装药过程中,单颗药粒对刚性壁的碰撞和单颗药粒与其他药

粒之间以及多颗药粒之间的碰撞变形过程。Gazonas^[21]推导了 M30 火药的单轴非线性压缩破碎的粘弹性本构模型和热粘弹性本构模型^[22],这些都对装药的安全性都有很重要的意义。

20 世纪 80 年代开始,美国利费莫尔实验室不断改进实验技术,用计算机模拟研究凝聚炸药的爆轰波反应结构等问题,根据实验和数值模拟计算结果预估在实际使用过程中固体炸药的事故、生存能力和其他一些性质^[23]。C. Chou 等^[24]用 EFEL 流体动力学有限元程序模拟炸药装药受撞击实验,计算结果表明,在炸药装药中出现局部高温区。国内对固体炸药起爆机理的数值模拟方面的工作尚属起步阶段,因此,针对国内目前使用或改进的高能材料,结合实验研究,采用有限元计算方法,研究冲击载荷下炸药装药的力学响应,为研制抗早爆的装药提供导向性意见,具有重要的意义。

3 含能材料装药安全性上的展望

含能材料作为一种特殊的能源,与一般材料有很大的不同,组成复杂,敏感度高,服役环境复杂,因此对它的安全性研究至关重要。作者认为应从以下几个方面作为以后研究的重点。

在力学性能方面,进一步发展与力学性能相关的实验技术,加强低温、高应变率下力学性能的研究,完善对含能材料在外界作用下损伤细观结构力学性能的研究。

在数值模拟方面,进一步完善含能材料的本构关系的研究,在此基础上进行与含能材料实际服役过程的微观与力学响应的数值模拟。

参考文献:

- [1] 王雨时,何莹台. 弹药爆炸序列中直列爆炸元件火炸药装药的感度问题[J]. 现代引信, 1997(2): 53-61.
- [2] 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(2): 212-222.
- [3] 杨均匀,袁亚雄,张小兵. 发射药破碎对火炮射击安全性影响的研究综述[J]. 弹道学报, 1999, 11(4): 92-96.
- [4] H 克里尔, M. 萨默菲尔德. 火炮内弹道[M]. 南京: 华东工程学院弹道研究所出版, 1981.
- [5] ITOP-4-2-504, U S. Army Test and Evaluation Command-Safety Test Field Artillery Ammunition [S].
- [6] Kent R H. Study of Ignition of 155mm Gun[J]. Ballistic Research Lab, Aberdeen Proving Ground, 1935, 10.
- [7] Haddon S E and Nance G A. An Experimental Study of Pressure Waves in Gun chambers [J]. Nanal Proving Ground, Dahlgren, 1957, 4.
- [8] Horst A W. Quantitative Assessment on Pressure Wave [R]. ADA100965, 1983.
- [9] Wiegand D A, Pinto J, Nicolaids S. The mechanical response of TNT and a composite composition B of TNT and RDX to compressive stress(I): uniaxial stress and

- fracture[J]. *J Energetic Materials*, 1991, 9(5): 19-80.
- [10] Pinto J, Wiegand D A. The mechanical response of TNT and a composite composition B of TNT and RDX to compressive stress(Ⅱ): triaxial stress and yield[J]. *J Energetic Materials*, 1991, 9(5): 205-263.
- [11] Wiegand D A, Pinto J. The mechanical response of TNT and a composite, composition B, of TNT and RDX to compressive stress(Ⅲ): dependence on processing and composition[J]. *J Energetic Materials*, 1991, 9(5): 349-414.
- [12] Lieb R J. The mechanical response of M 30, JA 2 ant XM 39 gun propellant to high rate deformation[R]. BRL-TR-3023, 1989.
- [13] Lieb R J, Fischer T J, Hoffman H J. High strain rate response of gun propellant using the Hopkinson split bar[R]. BRL-TR-3200, 1991.
- [14] J. Pinto, S. Nicolaidss, D. A. Weigand. Dynamic and quasistatic Mechanical Properties of Comp. B and TNT[R]. Techni-cal Rept, AD-B097999, 1985.
- [15] 黄人俊, 宋洪昌. 火药设计基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
- [16] 周培毅, 徐更光, 王廷增. 炸药装药在后座冲击下的动态响应实验研究[J]. 北京理工大学学报, 1999, 19(S1): 91-94.
- [17] J G Bennett, K S Haberman. A constitutive model for the non-shock ignition and mechanical response of high explosives[J]. *J Mech Phys Solids*, 1998, 46(12): 303-322.
- [18] K P Duffy, A M Mellor. Numerical modelling of composite propellant response to drop weight impact[J]. *Journal of Energetic Materials*, 1993(11): 61-92.
- [19] 杨均匀. 高膛压火炮发射安全性实验研究及数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 1997.
- [20] Heiser R, Wolf K. About the mechanical strength of propellant grains[C]//numerical simulation. 16th International Symposium on Ballistics-San Francisco. U. S.: [s. n.], 1996.
- [21] Gazonas G A. A uniaxial nonlinear viscoelastic constitutive model with damage for M30 gun propellant[R]. ADA263748, 1993.
- [22] Gazonas G A. A uniaxial nonlinear thermoviscoelastic constitutive model with damage for M30 gun propellant[R]. ADA283626, 1994.
- [23] 章冠人. 炸药起爆机理的研究[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(2): 184-190.
- [24] Chou P C. Adiabatic Shear Band Formation in Explosives due to Impact [C]//Inter Conference on Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials. San Diego: [s. n.], 1990.

(责任编辑 周江川)

(上接第10页)

3 结束语

电磁手枪作为一种新概念武器,具有很强的应用潜力,它不需要很高的发射速度,也不需要发射很大质量的物体。本文中在线圈式电磁手枪的基本工作原理进行了介绍,并从驱动线圈匝数、弹丸壁厚、电容器电容值、电容器充电电压等方面分析了其对弹丸电磁力、出口速度及能量利用率等方面的影响,为下一步实验研究奠定了基础。

从仿真的结果来看,弹丸的出口速度不是很高,一般都在 50 m/s 以下,这主要是因为电源电压限制和材料选取还存在一些瓶颈,但是随着对超导技术和高性能电磁技术的深入研究,这些问题都将得到很好的解决。

参考文献:

- [1] Egeland A. Birkeland's electromagnetic gun: ahistorical review[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1989, 17(2): 73-82.
- [2] Brooks A L. Design and Fabrication of Large and Small Bore Rail guns[J]. *IEEE Transactions on MAG*, 1981, 18(1): 68-72.
- [3] 卫锦萍. 电能武器的最新进展与应用前景[J]. 国外兵器动态, 1999(41): 25-27.
- [4] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防出版社, 1994: 5-7, 93-178.
- [5] Ying W, Marshall R A. Physics of Electric Launch[M]. [S. L.]: Science Press, 2004: 11-19.
- [6] Engel T G, Nunnally W C, Neri M. High-Efficiency, medium caliber helical coil electromagnetic launcher[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41(11): 4299-4303.
- [7] McNab R. Early electric gun research[J]. *IEEE Transactions on Magnetic*, 1999, 35(1): 250-261.
- [8] Mongeau P, Milliams F. Helical Rail Glider Launcher[J]. *IEEE Trans on MAG*, 1982, 18(1): 190-193.
- [9] 朱洪强, 徐万和. 电磁枪械(磁阻线圈式)的有关问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [10] 张海燕, 魏新劳. 线圈炮电磁过程动态仿真技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2005.
- [11] 程健, 任兆杏. 单级线圈加速电枢的机理分析[J]. 电工技术, 1997, 5: 29-31.
- [12] 曹鸿钧. 线圈炮电枢(圆柱壳)的屈曲分析[J]. 应用力学学报, 1998, 15(4): 37-42.
- [13] 崔鹏, 刘少克. 磁阻型线圈发射器弹丸速度与截面积关系[J]. 兵工自动化, 2006, 25(12): 39-41.
- [14] Cown M. The Reconnection Gun[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1986, 22(6): 1429-1434.

(责任编辑 陈松)