

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.05.017

发射装药发射安全性评估方法

芮筱亭, 冯宾宾, 王国平

(南京理工大学 发射动力学研究所, 南京 210094)

摘要: 为解决高性能火炮发射装药发射安全性问题, 对发射装药发射安全性评估方法进行研究。揭示了发射装药引起膛炸的机理, 建立了发射装药燃烧与力学环境试验方法、发射装药动态挤压破碎试验方法、发射装药动态活度试验方法, 并提出了发射装药发射安全性评估方法。该方法为科学评估发射装药发射安全性提供了理论依据与技术手段。

关键词: 发射安全性; 评估方法; 燃烧与力学环境; 挤压破碎; 动态活度

中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

Evaluation Method of Launch Safety of Propellant Charge

Rui Xiaoting, Feng Binbin, Wang Guoping

(Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the problem of launch safety of propellant charge for high performance gun, the evaluation method of launch safety of propellant charge was studied. The physical mechanism of bore burst caused by propellant charge was revealed in this paper, the test methods for combustion and mechanics situation of the propellant charge, dynamic compression fracture of propellant charge and dynamic vivacity of propellant charge were established; the evaluation method for launch safety of propellant charge was also presented. This method could provide theory basis and technology tool for evaluating launch safety of propellant charge.

Keywords: launch safety; evaluation method; combustion and mechanics situation; compression and fracture; dynamic vivacity

0 引言

发射装药发射安全性是指发射过程中发射装药产生的膛压不会超过允许值而发生膛炸、膛胀的性能^[1-2]。随着高初速、高膛压、高装填密度等现代高性能火炮的不断发展, 火炮膛内燃烧与力学环境越来越恶劣, 发射安全性问题愈来愈突出。自美军在朝鲜战场和越南战场发生 76 mm 加农炮和 175 mm 加农炮膛炸以来, 世界各国在武器弹药的研制、军事演习和战场上相继发生过数百次膛炸、早炸等灾难性事故。自从我国建国以来也已发生数十起膛炸事故, 2009 年和 2010 年韩国等国仍在发生膛炸。由于膛炸事故的灾难性后果, 使得发射安全性问题成为制约高性能武器发展的世界性难题。

多年来, 南京理工大学发射动力学研究所对发射装药发射安全性评估进行了深入的研究, 建立了较为完善的发射装药发射安全性评估理论、数值仿真及试验方法。目前, 发射装药发射安全性理论与技术仍处于发展完善之中。因此, 作者建立发射装药发射安全性评估试验方法, 为建立发射装药发射安全性判据的和科学评估发射装药发射安全性提供

了理论依据与技术手段。

1 发射装药引起膛炸的原因

20 世纪 70 年代, Clarke 等人研究膛炸问题时提出了敏感度概念, 即最大膛压对 $-\Delta P_i$ 的敏感程度。Horst 等人通过实验研究, 运用 Kolmogorov-Simirnov 统计方法确立了 $-\Delta P_i$ 的最佳样本统计分布, 并用以预测膛炸概率。作为发射装药的发射安全性标准, 美国制定了基于压力波及其敏感度的试验操作规程 (TOP)^[3-4], 为发射安全性评定提供了方法。

随着研究的深入, 人们发现难以用压力波及其敏感度试验来评价发射安全性。因此, 美、德等国采用新的测试技术, 通过检测发射药床破碎程度和发射装药力学性能, 形成了发射装药发射安全性检测及评定方法。Horst、May 和 Clarke 等人认为“在绝大多数情况下, 超高的最大膛压不能通过其伴随的压力波剧烈程度来预测, 导致膛炸的原因可能是由于发射药破碎或瞬态燃烧”^[5]。对发射装药引起膛炸的机理, 国内外经过多年研究逐步形成了“挤压—破碎—增面—增燃—增压”的共识。即发射装

收稿日期: 2011-01-19; 修回日期: 2011-03-02

作者简介: 芮筱亭 (1956—), 男, 江苏人, 博士, 教授, 从事兵器发射理论与技术、弹药发射安全性、多体系统动力学研究。

药引起膛炸的主要原因是, 由于弹底发射装药被点燃前受到发射装药颗粒间的挤压应力作用产生了破碎, 使发射装药燃面急增, 引起燃气生成速率猛增, 导致弹道起始段膛压猛增, 产生膛炸。

几乎国内外相关文献的所有数值仿真结果均表明, 如果药粒不破碎, 无论膛内力学环境如何恶劣, 也不会出现超高压和膛炸现象, 相应装药结构下的发射装药破碎是导致膛炸的根本因素。事实上, 几乎所有关于由发射装药引起膛炸的记录都与低温条件有关, 这是因为低温条件下发射药变脆, 抗冲击和抗挤压的能力减弱而容易破碎。因此, 发射装药发射安全性评估必须抓住发射装药挤压破碎这条主线。

发射装药在高温、高压、快变的膛内环境运动时, 由于颗粒间相互挤压导致破碎, 美国弹道专家 Stiefel 博士曾认为难以用射击试验的途径来解决发射装药发射安全性问题^[6]。由于问题的复杂性, 直接射击试验手段无法获取发射装药膛内挤压破碎情况, 只有用专门的试验装置进行试验研究。发射装药发射安全性试验的核心技术是: 再现并测得发射装药膛内燃烧与力学环境、试验并测得发射装药在相应燃烧与力学环境下的挤压破碎过程、膛内燃烧与力学环境下挤压破碎程度与发射安全性的定量关系。

2 发射装药膛内燃烧与力学环境试验方法

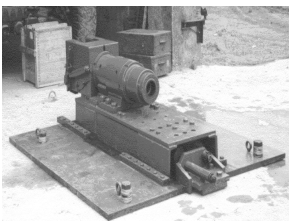


图1 高膛压滑膛炮短管炮



图2 榴弹炮短管炮

研究发射药床挤压破碎规律, 首先必须试验再现发射装药在膛内的燃烧与力学环境, 并获得弹底药床在点燃前所受到的药粒间挤压应力。为模拟并测试发射装药的燃烧与力学环境, 作者及其合作者发明研制了发射装药膛内燃烧与力学环境试验装置——短管炮及其测试系统^[7]。图1和图2分别是用于发射装药膛内燃烧与力学环境试验的高膛压滑膛炮短管炮和榴弹炮短管炮。发射装药燃烧与力学环境试验系统原理如图3。短管炮的药室中部、坡膛等处对称设置2排测压孔, 可同时测量同一截面的气体压力和火焰到达时间。发射药筒底座设置2个测试孔: 一个装入测压传感器, 测量膛底气体压力;

另一个测压孔旋入插入式测压装置, 测量药床内部火药气体压力。弹底药床应力传感器用于测量弹底附近发射药床的药粒间挤压应力。

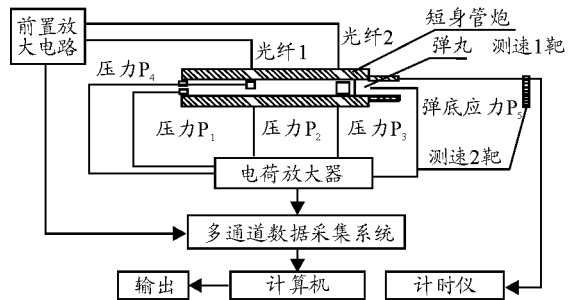


图3 发射装药燃烧与力学环境试验系统原理图

应用建立的发射装药膛内燃烧与力学环境试验系统进行了相关试验, 图4给出了某榴弹炮短管炮上测得的膛内不同位置的 $P \sim t$ 曲线, 其中, P_1 为膛底气体压力, P_2 为坡膛处膛壁气体压力, P_3 为坡膛处药床中央气体压力, P_4 为弹底总压; 图5给出了弹底发射装药挤压应力测试结果。

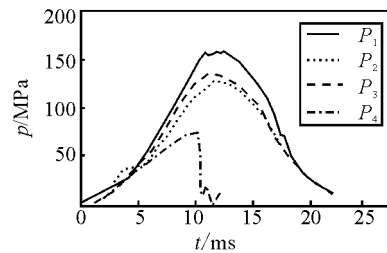


图4 膛内不同位置压力测试结果

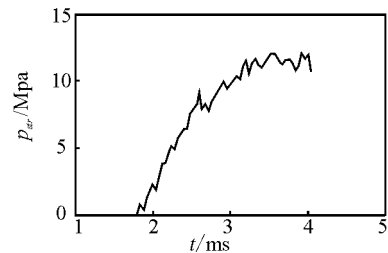


图5 弹底发射装药挤压应力测试结果

3 发射装药动态挤压破碎试验方法

由于高温、高压、高速气体与发射药粒固体以及发射药粒固体与固体间的相互作用, 使得药粒在膛内所处的燃烧与力学环境极为复杂。要模拟火炮发射过程中弹底发射装药的挤压破碎情况, 必须模拟火炮在射击时膛内药床的受力状态。为此, 作者及其合作者建立了发射装药动态挤压破碎试验系统^[8-9], 用以模拟火炮发射过程中弹底发射装药的挤压破碎情况, 进而获得在相应力学环境下的挤压破碎药床。图6是发射装药动态挤压破碎试验系统原理图, 图7是发射装药动态挤压破碎试验装置。

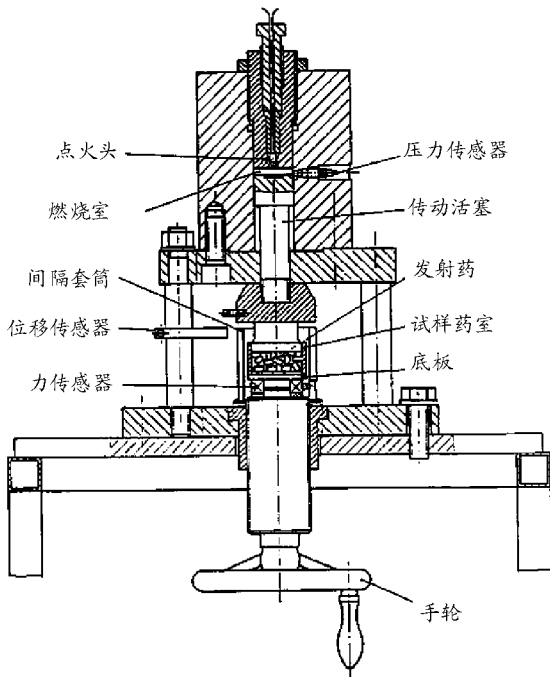


图 6 动态挤压破碎试验系统原理图

在发射装药动态挤压破碎试验中，必须做到燃烧室内的气体压力推动活塞产生的作用于发射装药的挤压应力与弹底发射装药的固体挤压应力尽可能

一致。图 8 是由发射装药动态挤压破碎试验得到的发射药颗粒间挤压应力时间历程试验结果与火炮实测结果。试验结果的对比表明，2 条曲线形状很相似，上升段吻合较好，发射装药挤压应力时间历程试验结果与射击试验实测结果基本一致。图 9 为试验获得的燃烧室压力时间历程、活塞位移时间历程、药床挤压应力时间历程和挤压破碎发射药。



图 7 发射装药动态挤压破碎试验装置

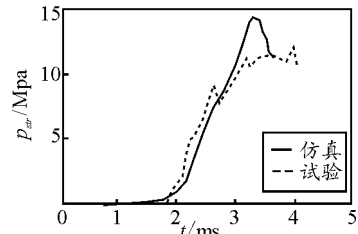
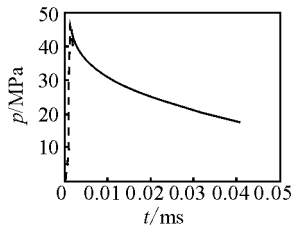
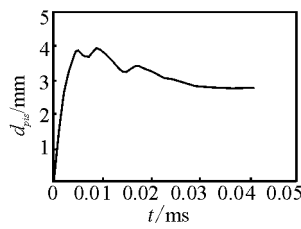


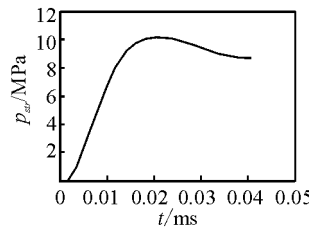
图 8 挤压应力时间历程试验与射击试验实测结果



(a) 点火药室压力时间历程



(b) 活塞位移时间历程



(c) 挤压应力时间历程



(d) 挤压破碎发射药

图 9 低温发射药床动态挤压破碎物理仿真结果

4 发射装药起始动态活度比试验方法

通过发射装药动态挤压破碎试验，得到了相应燃烧与力学环境下发射装药的破碎发射药床，此时如何确定药床的破碎程度成为评定发射安全性的关键。挤压破碎的药床对膛内压力的影响主要通过其起始燃面的增加来体现，发射装药破碎越严重则起始燃面越大。由于破碎的药粒没有统一的形状，单纯根据碎药几何形状理论计算得到碎药的起始燃面几乎不可能。对挤压破碎试验后的药床进行发射装药动态活度密闭爆发器试验，测量其 $P \sim t$ 曲线，进而获得其动态活度曲线和发射装药的破碎程度。发射装药动态活度试验系统的结构如图 10，图 11 为 1 000 mL 密闭爆发器。

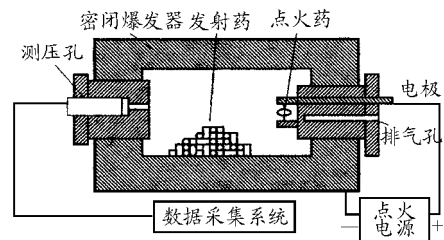


图 10 发射装药动态活度试验系统结构示意图

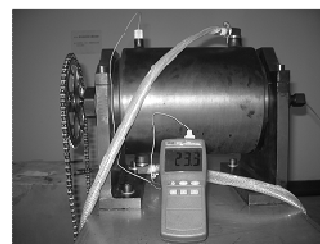


图 11 1 000 mL 密闭爆发器

发射装药动态活度测试及数据处理的步骤如下:

1) 分别对未破碎发射装药和挤压破碎发射装药进行密闭爆发器试验, 测量各自的 $P \sim t$ 曲线, 如图 12。

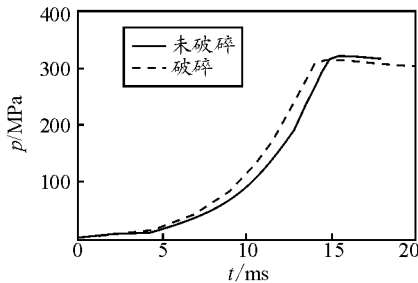


图 12 密闭爆发器内 $P \sim t$ 曲线

2) 根据发射装药动态活度定义

$$L = \frac{dP}{dt} / PP_m \quad (1)$$

将所测到的 $P \sim t$ 曲线转换为动态活度曲线, 如图 13。

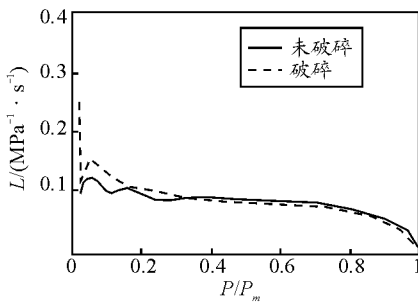


图 13 动态活度曲线

3) 根据发射装药动态活度比定义

$$\frac{L'}{L_0} = \frac{\frac{1}{P'_m} \frac{dP'}{dt}}{\frac{1}{P_0 P_m} \frac{dP_0}{dt}} \quad (2)$$

将破碎和未破碎发射装药的动态活度曲线转换为动态活度比曲线, 如图 14。

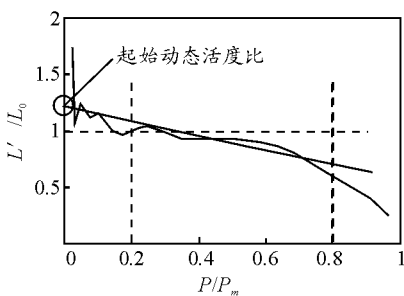


图 14 动态活度比曲线及起始动态活度比

4) 截取动态活度比曲线中部线性较好的一段拟

合一条直线, 该直线的截距就是起始动态活度比, 如图 14。

5 发射药起始动态活度比与药床最大挤压应力之间的关系

试验建立起始动态活度比与药床最大挤压应力的关系, 如图 15(a)与图 15(b)为某次试验的 19 孔发射装药在室温 (15 °C) 与低温 (-40 °C) 时测得起始动态活度比与最大挤压应力的关系。常温起始动态活度比未随最大挤压应力发生阶跃, 表明常温下该发射药力学性能较好, 在挤压应力作用下没有发生大规模破碎; 低温下发射装药起始动态活度比与最大挤压应力达某值时出现了转折点, 此时低温发射装药不再适应装药结构产生的力学环境, 当最大挤压应力再增大, 起始动态活度比将急剧增加, 发射装药挤压应力导致的破碎程度严重到使膛压“失控”的状态, 其转折点称为发射装药动态挤压破碎的“临界点”。

临界点是发射装药破碎程度与最大挤压应力关系中极为重要的特征, 射击时弹底发射装药实际最大挤压应力接近或超过该临界点对应的最大挤压应力时, 意味着弹底发射装药破碎严重程度可能在发射过程中引起膛内局部超高压或膛炸。起始动态活度比的大小以及是否产生阶跃, 是发射装药发射安全性判据的重要依据。

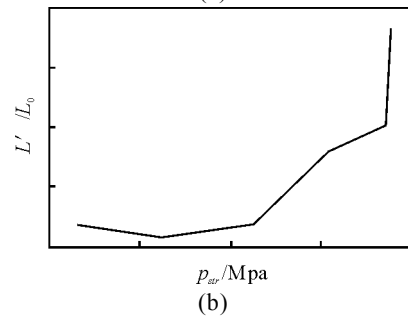
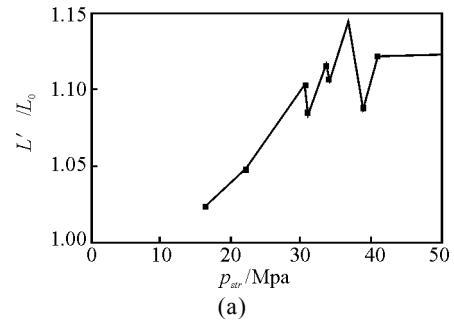


图 15 破碎发射装药起始动态活度比随药床最大挤压应力的变化关系图