

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.12.020

## 弹药发射安全性试验方法进展

芮筱亭, 王燕, 王国平

(南京理工大学发射动力学研究所, 南京 210094)

**摘要:** 为解决因发射环境恶劣而导致膛炸、早炸和解体等发射安全性问题, 提出一种弹药发射安全性试验方法。基于武器系统发射动力学规律和多体系统动力学的研究成果, 从武器系统的角度阐述了火炮膛炸、早炸、解体的机理, 提出了弹药发射安全性评估理论和试验方法。试验结果证明: 该方法解决了多项武器系统发射安全性问题, 为建立弹药发射安全性试验标准提供关键技术和手段, 为提高弹药发射安全性试验水平提供了新途径。

**关键词:** 弹药; 发射安全性; 评估; 试验方法

**中图分类号:** TJ306 **文献标志码:** A

## Advances in Test Method of Launch Safety of Ammunition

Rui Xiaoting, Wang Yan, Wang Guoping

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

**Abstract:** In order to solve the launch safety problems of bore burst, early burst and disassembly because of the bad launch environment, the test method of launch safety of ammunition are developed. Based on the results of launch dynamics law of weapon system and multi-body dynamics, the mechanism of bore burst, early burst and disassembly was expatiated. The evaluation theory and test method of launch safety of ammunition were introduced. The test results show that many launch safety problems have been solved by using this method. The key technology and means for establishing the test standard of launch safety of ammunition, and the new way to improve the test level of launch safety of ammunition are provided.

**Key words:** ammunition; launch safety; evaluation; test method

### 0 引言

现代战争对武器性能的要求越来越高, 向着大口径、远射程、大威力方面发展, 高初速、高膛压、高过载已成为现代高性能弹药的主要特点。通常采用提高发射药装填密度和采用高能发射药的方法来提高弹丸初速, 这使得膛内发射环境越来越恶劣。膛炸、早炸和解体等发射安全性事故时有发生, 成为长期严重制约高性能弹药发展的瓶颈, 仅我国新 155 mm 自行火炮武器系统就先后多次发生了配用引信早炸、配用末制导炮弹解体等发射不安全事故。如何检测和评估弹药发射安全性成为各国竞相攻关的重大理论和技术难题。

德国于 20 世纪 80 年代经过大量的工作建立了坦克炮——装药系统内弹道安全试验方法手册, 对弹药的各组成部分, 包括发射药、点火管以及整个装药系统的安全性及安全储备进行实际评价, 用来指导坦克炮弹药研发、试验和批量生产过程中内弹道安全性试验。用于 105 mm×617 mm 和 120 mm×570 mm 等火炮使用的大多数弹药, 同时也为新型 LOVA 发射药及装药结构试验提供基础。美国弹道实验室的 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”<sup>[1]</sup>。

我国对弹药发射安全性评估研究起步较晚, 在科研人员近 30 年的不懈努力之下, 在装药设计、内弹道仿真、压力波理论、火药燃烧理论等方面取得了长足的进步<sup>[1-6]</sup>。但由于弹药发射安全性问题极为复杂、涉及学科跨度大等各方面原因, 至今还未形成系统的弹药发射安全性评估试验标准规程, 无法科学评估和提高弹药发射安全性, 成为制约我国大口径、高性能榴弹炮发展的拦路虎。建立发射安全性评估理论及试验规程, 揭示弹药发射过程中膛炸、早炸、解体事故机理, 已成为弹药发展的当务之急。

经过近 20 年的深入研究, 南京理工大学发射动力学研究所对弹药发射安全性建立了较为系统的弹药发射安全性评估理论<sup>[2]</sup>, 研制了一系列用于弹药发射安全性评估的试验装置, 形成了弹药发射安全性相关的理论方法、数值仿真手段。研究所在弹药发射安全性研究方面获授权发明专利 22 项, 出版了《弹药发射安全性导论》。弹药发射安全性研究成果获 2010 年国防技术发明一等奖, 2011 年国家技术发明二等奖。应用该成果解决了相关国家高新工程

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2012-11-12

基金项目: 国防基础科研计划资助(A2620133008)

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。

等多种武器发射安全性技术难题,保证了这些武器安全发射和发展,为弹药发射安全性设计与检测研究提供了基础技术手段。

## 1 膛炸、早炸、解体机理

发射安全性是武器使用的基本要求,是指发射过程中弹药在发射装置内及安全距离内不解除保险、不膛炸、不早炸、不解体的性能。弹药发射安全性主要包括发射装药发射安全性、炸药装药发射安全性和引信发射安全性。

发射装药发射安全性,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。国内外经过长期的理论与实验研究,对由发射装药引起的膛炸事故原因已逐步形成共识,即:相应装药结构下的发射装药挤压破碎是导致膛炸的根本因素,发射装药在膛内破碎是药粒的低温脆性和弹底发射装药着火前受到挤压作用的共同结果<sup>[2-4]</sup>。

炸药装药发射安全性,指在发射过程中炸药装药不会发生自燃、膛炸、早炸的性能。炸药装药引起膛炸的机理主要有炸药装药应力超过允许范围和装药内空气绝热压缩加热点火。影响炸药装药安全性的主要因素有:炸药装药非惯性运动产生的惯性力引起的应力分布,炸药装药的气孔、缩孔、底隙中的空气受高速加载压缩加温和摩擦加热作用。

引信发射安全性,指发射过程中引信在发射装置内及安全距离内不解除保险或不爆炸的性能。炮弹引信的发射安全性包括膛内安全性和炮口安全性。膛内安全性是指发射时引信在炮管内不解除保险或不爆炸的性能,炮口安全性是指发射过程中引信在以炮口起始安全距离内不解除保险或不爆炸的性能。膛炸和早炸等引信发射安全性事故的原因是,难以用数值仿真或物理仿真的方法准确获得引信机构的运动规律,难以准确给出引信对弹道环境响应的时间历程,从而引信的安全性设计,不能做到完全心中有数。引信系统在发射过程中受各种复杂载荷的作用,由于零件的相对运动、强度不能满足要求或雷管的超量窜动等,可能引起零件松动、变形、脱落、破坏或动作混乱,使得引信系统不能按预定方式作用。

助推发动机弹体解体,指炮弹未出炮口时助推发动机与弹体提前分离,导致弹丸无法完成特定功能和性能。主要是由于末制导炮弹发动机漏气引燃推进剂和推进剂应力超限自燃导致助推发动机和弹体分离,使得弹丸不能按预定方式工作。

## 2 弹药发射安全性评估理论

提出基于弹、炮、药、引信武器系统动力学规

律评估弹药发射安全性的思想与方法,形成了发射动力学及发射环境物理与数值仿真技术、发射装药发射安全性评估理论、炸药装药发射安全性评估理论和引信发射安全性评估理论。

### 2.1 发射动力学及发射环境物理与数值仿真技术

发射环境对发射安全性的影响主要体现在:对发射装药挤压破碎的影响,对炸药装药的过载及应力分布的影响,对引信机构的过载及动力响应的影响,从而影响发射装药发射安全性、炸药装药发射安全性、引信发射安全性。事实上,引起发射安全性事故的原因来自多方面,要全面解决发射安全性问题,就必须从引信、装药、弹箭、火炮武器全系统的角度,从理论、计算、试验 3 方面深入研究,建立发射环境物理与数值仿真的手段,通过研究弹、炮、药、引信武器系统在发射过程中的动力学规律评估弹药发射安全性。

发射动力学是研究武器系统在发射过程中的受力和运动规律,进而控制受力和运动规律的一门新兴学科。该学科研究跨度大,涉及内弹道学、外弹道学、中间弹道学、燃烧气体动力学、空气动力学、弹箭设计理论、火炮动力学、振动理论、多体系统动力学等方面,是当代兵器科学关注的热点。南京理工大学发射动力学研究所建立了基于多体系统传递矩阵法的发射动力学理论<sup>[5-6]</sup>。建立了弹、炮、药、引信武器系统总体结构参数与诸如发射装药燃烧过程及膛压、炸药装药的力学行为及应力分布、引信机构运动及失效规律等武器系统动力学规律之间的定量关系,为弹药发射安全性评估提供发射环境物理与数值仿真手段。

### 2.2 发射装药发射安全性评估理论

根据发射装药挤压-破碎-增燃-增压的膛炸机理,评价发射装药发射安全性要能再现发射装药膛内燃烧与力学环境,刻画在此环境下发射装药挤压破碎动力学过程,准确建立在相应发射环境下发射装药挤压应力与其破碎程度之间的定量关系。发射装药发射安全性评估方法如下:1)用膛内燃烧与力学环境试验系统进行各种恶劣条件下发射装药燃烧与力学环境试验,得到发射条件膛内燃烧与力学环境下弹底发射装药点燃前弹底发射装药的应力时间历程;2)以步骤 1)的测试结果为基础,用发射装药动态挤压破碎试验系统进行系列的发射装药动态挤压破碎试验,获得逼近发射装药燃烧与力学环境下弹底发射装药的挤压破碎过程;3)用发射装药动态活度试验系统进行动态活度试验,确定发射条件发射装药燃烧与力学环境下弹底破碎药床的动态活

度曲线和起始动态活度比阶跃的临界点。

### 2.3 炸药装药发射安全性评估理论

炸药装药发射安全性理论与技术在国内外仍处于发展完善中。炸药装药发射安全性判据可表述为“炸药装药的底隙和气孔尺寸小于相应弹道环境下的允许值”。在研究炸药装药发射安全性时,无论是研究炸药装药的气孔、缩孔、底隙、裂纹、摩擦加热点火这一气体与固体的动态耦合问题,还是研究弹炮碰撞的压缩点火等各因素对炸药装药发射安全性的影响,都需对发射动力学提供的发射环境进行研究。炸药发射安全性试验必须较准确地模拟炮弹的发射环境,综合考虑炸药装药的点火敏感性、点火及燃烧的响应特性、反应猛烈程度(爆炸性)、炸药的机械性质、炸药装药的结构响应对膛炸、早炸的影响等因素,才能准确评估炸药装药发射安全性。

### 2.4 引信发射安全性评估理论

发射环境下引信机构的运动规律是引信设计、研制、故障分析、性能评价重要依据和基础。作者及其合作者应用发射动力学的最新研究成果,建立引信系统动力学的理论和方法,用于考察引信响应是否满足要求,提高引信发射安全性。通过建立引信弹道环境模拟装置,并应用非接触测量方法,可以再现弹丸自转、章动、进动弹道环境,定量测试其对引信机构运动规律的影响。

### 2.5 助推发动机弹体发射安全性评估理论

利用发明的末制导炮弹预应力试验方法、末制导炮弹强度落锤试验方法、助推发动机密封性能检测方法等,揭示末制导炮弹发动机漏气和推进剂应力超限自燃两大解体机理,进而提出避免解体故障的系统改进设计方案,为解决助推发动机弹体解体故障提供理论依据和技术手段。

## 3 弹药发射安全性试验技术

### 3.1 发射装药发射安全性试验技术

南京理工大学发射动力学研究所对火炮的发射装药发射安全性进行了系统、深入的研究,建立了发射装药膛内燃烧与力学环境试验系统与技术、发射装药动态挤压破碎试验系统与技术、发射装药起始动态活度比试验系统与技术、发射装药发射安全性试验方法。

1) 发射装药膛内燃烧与力学环境试验系统与技术。

研制了发射装药膛内燃烧与力学环境试验装置及测试系统。图1为研制的不同口径火炮发射装药

膛内燃烧与力学环境试验装置。利用该试验系统能够真实再现发射装药在内弹道初期的燃烧与力学环境,获得给定装药结构下弹底发射装药挤压应力的时间历程。



图1 火炮膛内燃烧与力学环境试验装置

2) 发射装药动态挤压破碎试验系统与技术。

为真实模拟膛内发射装药在弹丸底部的挤压破碎过程,南京理工大学发射动力学研究所发明研制了发射装药动态挤压破碎试验系统,如图2所示。试验时,在点火室中加入火药,燃烧后生成的高压气体推动活塞,高速运动的活塞快速挤压装药室内的发射装药,模拟火炮发射过程中弹底发射装药的挤压破碎过程。模拟获得了火炮发射环境下挤压破碎的发射装药。

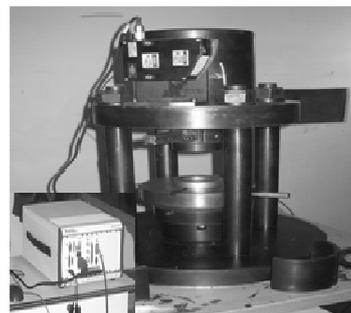


图2 发射装药动态挤压破碎试验系统

3) 发射装药起始动态活度比试验系统与技术。

为了定量表征发射装药破碎程度和发射安全性,首次提出了发射装药起始动态活度比概念,发明了发射装药起始动态活度比试验方法,研制了发射装药动态活度试验装置,如图3所示。获得了定量表征发射装药发射安全性的发射装药起始动态活度比曲线,如图4所示。



图3 发射装药动态活度试验装置

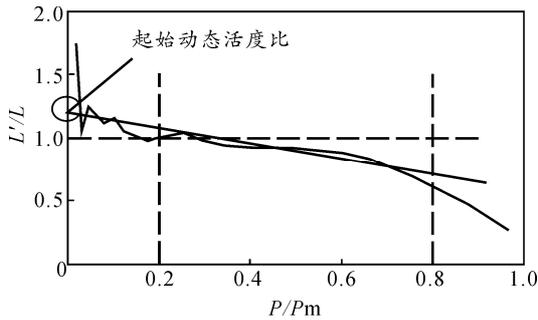


图 4 破碎发射装药动态活度比曲线

### 3.2 炸药装药发射安全性试验技术

国内研究机构对炸药装药发射安全性进行了系统研究，南京理工大学发射动力学研究所建立了膛压发生器炸药装药发射安全性试验装置。兵器 204 所建立了装药落锤试验装置和试验方法，北京理工大学建立了装药小型后坐冲击模拟实验系统，中国科学院力学研究所研究了含底隙炸药装药低速气炮模拟试验与有底隙炸药装药发射模拟试验之间关系的规律。炸药发射安全性试验装置所依据的原理是，炮弹发射过程中的非惯性运动产生的惯性力引起的炸药装药应力，一般在弹腔底部最大，弹丸轴向加速度引起的应力在其总应力中占主要部分；因此，试验装置主要模拟弹腔底部的轴向应力。膛压发生器炸药装药发射安全性试验装置如图 5 所示。膛压发生器炸药装药发射安全性试验装置能够逼真模拟发射过程中火药气体压力对弹丸从而对炸药装药作用力的时间历程，逼真模拟发射过程中的弹丸加速度和炸药装药应力与应力率的时间历程。由于较真实地模拟了发射环境，从而保证了炸药装药发射安全性物理仿真的真实性，这一点正是发射安全性研究的立足点。

上述几种类型的炸药装药发射安全性试验装置中，由于膛压发射器炸药装药发射安全性试验装置模拟的弹丸加速度引起的炸药装药的应力、应力率及作用时间最接近真实火炮发射时的实际情况，其炸药装药发射安全性试验结果的可信度最高。

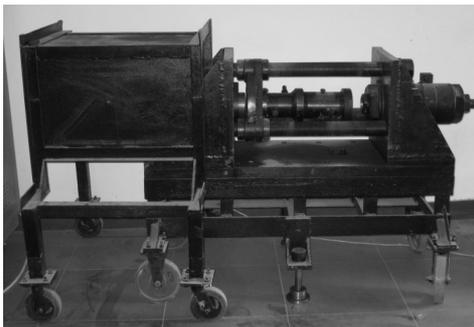


图 5 膛压发生器炸药装药发射安全性试验装置

### 3.3 引信发射安全性试验技术

南京理工大学发射动力学研究所对引信发射安全性进行了系统研究，建立了基于武器系统发射动力学规律的引信发射安全性评估理论、引信发射环境及引信机构动力响应与武器系统总体参数之间的定量关系。发明了高速旋转弹丸三自由度角运动模拟装置，如图 6 所示。针对引信机构体积小、部件多、质量小的特点，用非接触测量方法实现了在不影响引信机构动态特性前提下，获得引信机构在自转、章动和进动弹道环境下的运动规律，提供了确定引信机构动态响应与弹道环境之间定量关系的试验与测试手段。图 7 为试验获得的发射环境下迫榴炮通用引信涡轮角加速度及其突变曲线，由此揭示了引信转子在击针拔出盲孔后迅速旋转到位，使击针接触雷管的早炸机理。



图 6 高速旋转弹丸三自由度角运动模拟装置

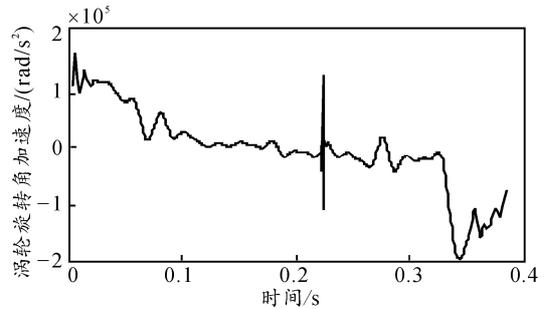


图 7 引信涡轮旋转角加速度及其突变点测试曲线

### 3.4 助推发动机弹体发射安全性试验技术

南京理工大学发射动力学研究所对助推发动机弹体发射安全性进行了系统研究，发明了系列的末制导炮弹发射安全性检测装置，试验获得模拟发射环境下末制导炮弹发动机振动变形曲线和外压漏气现象等，如图 8 和图 9 所示，揭示了末制导炮弹发动机漏气引燃推进剂和推进剂应力超限自燃两大解体机理，试验再现了末制导炮弹发射解体现象，解决了末制导炮弹解体原因定位难题。