



# 舰炮炮弹用炸药及其发射安全性研究进展

董军<sup>1,2</sup>, 杜茂华<sup>1</sup>, 王晓峰<sup>2\*</sup>, 王伟力<sup>1</sup>, 谭波<sup>1</sup>, 邢江涛<sup>1</sup>, 姚天乐<sup>1</sup>, 黄亚峰<sup>2</sup>, 杨雄<sup>2</sup>, 赵凯<sup>2</sup>

1. 海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033;

2. 西安近代化学研究所, 西安 710065

\*联系人, E-mail: wangxf\_204@163.com

收稿日期: 2020-11-12; 接受日期: 2021-02-25; 网络出版日期: 2021-06-10

国家自然科学基金(编号: 12072037)资助项目

**摘要** 针对高威力舰炮弹药在应用过程中存在的发射安全性问题, 对国内外舰炮弹药用炸药研制及装备情况、炸药装药发射安全性研究装置、炸药装药发射安全性影响机制和炸药装药发射安全性设计等方面的发展情况进行了分析研究. 结果表明, 虽然不同国家舰炮弹药用炸药配方各不相同, 但是研究炸药装药发射安全性所用试验装置的作用原理基本相同, 均采用模拟炸药装药在发射过程中受到的后坐加载应力及其响应情况来考核炸药装药是否满足发射安全性要求. 此外, 相关试验和研究结果也证明通过提高装药质量, 减少装药疵病等技术手段可以有效提高炮弹炸药装药的发射安全性能. 通过对炸药配方设计和装药工艺研究, 避免炸药在绝热压缩和绝热剪切等复杂受力发射环境下产生热点, 是改善舰炮弹药炸药装药发射安全性的重要技术措施.

**关键词** 兵器科学与技术, 舰炮弹药, 炸药装药, 发射安全性, 等效实验

**PACS:** 62.20.-x, 62.20.Dc, 62.20.Fe, 62.20.Mk

## 1 引言

舰炮弹药一直以来是海军舰艇主要的攻击武器之一, 其中, 大口径舰炮更是肩负着对舰作战和对岸火力支援等重要任务. 但是, 随着20世纪鱼水雷和导弹等武器出现以后, 舰炮由“大舰巨炮”的鼎盛时期逐渐势微, 不再受到广泛关注. 然而近年来, 随着海军作战需求的转变, 舰炮尤其是大口径舰炮在战场上的重要性再次凸显, 大口径舰炮以其射程远、射速高、威力大的作战特点, 成为今后远海防卫中舰对舰和舰对岸的主要攻击武器. 随之而来的就是对适应复杂环境作战的新

型舰炮弹药技术的迫切需求, 要求炮弹炸药装药在满足高威力的同时, 还要能够承受更加恶劣的发射环境, 确保装填新型高威力炸药的炮弹安全发射成为实现舰炮作战功效最重要的前提条件之一<sup>[1-8]</sup>. 此外, 建造在高价值舰船平台上的舰炮在发射过程中一旦出现膛炸或早炸, 将会造成非常严重的影响后果<sup>[9-11]</sup>. 考虑到舰炮(尤其是大口径舰炮)与同口径其他火炮的炮管内部结构相同, 均采用发射药点火燃烧作为弹丸的推进能源, 因此, 不论是舰炮还是其他火炮, 只要口径和射程相同, 弹丸在膛内发射过程中的受力环境和作用时间基本一致, 而受力和时间正是导致弹丸中炸药发生膛

**引用格式:** 董军, 杜茂华, 王晓峰, 等. 舰炮弹药用炸药及其发射安全性研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 124604  
Dong J, Du M-H, Wang X-F, et al. Research progress on explosives for naval gun shell and its launching safety (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 124604, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0355

炸的主要外因. 所以, 本文对国内外舰炮炮弹用炸药以及与炮弹发射安全性相关的进展情况进行了述评研究, 系统分析了炸药装药发射安全性试验装置、影响机制和提高炸药发射安全性设计等方面的技术进展和存在的科学问题, 并提出了对这方面发展的观点和建议, 也为从事炮弹炸药装药研究和生产的科研与技术人员提供了借鉴和参考.

## 2 舰炮炮弹用炸药研究进展

### 2.1 国外研究进展

20世纪中后期, 随着材料科学的飞速发展, 特别是高分子化学技术的进步, 高分子材料的品种也逐渐增多, 一些性能优异的热塑性高分子材料和热固性高分子材料也被用到了炸药中, 因此这类炸药被称为高聚物黏结炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX). 美国在这方面的研究较为深入, 形成了PBX系列炸药、X系列炸药(劳斯·阿拉莫斯科学实验室研究的炸药产品称为X系列)、LX系列炸药和RX系列炸药(劳伦斯·利物摩尔实验室研究的炸药产品称为LX和RX系列)等. 其中, 热固性浇注PBX炸药具有尺寸稳定性好、环境适应性强的特点, 由于配方中含有大量黏结剂体系, 炸药的不敏感性能也较为优异, 适合于口小肚大的异形炮弹装药, 因此是炮弹特别是舰炮弹药炸药装药今后重要发展方向之一<sup>[12-15]</sup>. 其典型代表炸药之一就是美国研制的以端羟基聚丁二烯为黏结剂体系, 以RDX作为主炸药, 适用于155 mm舰炮HE-VT榴弹的PBXN-106浇注炸药(其中, RDX为75%, 黏结剂为25%). 此外, 为了提高舰炮炮弹用炸药配方的固含量, 美国还研制了PBXN-106压装PBX炸药(92% HMX和8%其他组分), 并应用在127 mm舰炮炮弹上<sup>[16,17]</sup>.

以法国为代表的欧洲军事强国还开发了一系列适用于舰炮弹药的高能不敏感PBX炸药, 采用端羟基聚丁二烯作为炸药的黏结剂体系. 为了在保证能量的同时提高炸药的不敏感性能, 主炸药分别由高品质HMX, 不敏感RDX、NTO等含能材料组成, 其中代表性的炸药配方是不敏感RDX含量为88%的B2263炸药, 该炸药已应用于法国的76 mm舰炮炮弹, 在保证弹药威力的同时弹药的低易损性特点明显. 俄罗斯研制出了适用于口小肚大的异形榴弹弹丸装药工艺——分步压装工艺, 能够将RDX基含铝炸药(A-IX-II炸药)快速装填

于大中口径炮弹弹丸中, 弹药威力比TNT装药提高了50%以上, 据称俄罗斯已发射超过100万发采用分步压装工艺装填的炮弹, 至今未发生过一次膛炸事故.

### 2.2 国内研究进展

我国在炮弹用炸药研究方面, 按照装药工艺进行分类, 主要分为铸装和压装两种. 其中, 铸装装药工艺主要应用于改性B炸药, 通过在B炸药中添加钝感剂等其他组分, 有效改进B炸药装药的力学性能和发射安全性. 但是随着混合炸药及装药技术的发展, 国内也相继研制出以DNAN为基的非TNT基熔铸炸药, 并在部分口径的炮弹中进行了装填应用<sup>[18,19]</sup>. 在压装装药工艺方面, 国内研制出了适用于炮弹装药的钝黑系列炸药, 装药工艺也主要采用捣装和分步压装装药工艺. 随着压装工艺用炸药技术的发展, 国内研制出了适用于大口径榴弹用的高威力RL-F炸药并开展了相关应用研究, 在能量和发射安全性等应用效果方面较钝黑炸药有显著提高<sup>[20]</sup>.

随着新型不敏感含能材料如FOX-7, DNAN等在炮弹炸药装药中的应用, 对改善弹药易损性、提高弹药毁伤威力具有一定效果<sup>[21]</sup>. 但是, 如何确保炸药装药在高膛压、高过载环境下的发射安全仍是今后新型高能炸药在炮射弹药上装备首先要解决的重要技术问题之一.

## 3 模拟炮弹炸药装药发射安全性试验装置研究

采用真实火炮武器发射炮弹来研究炸药装药的发射安全性, 其试验成本高、试验样本量小, 并且需要大量人力、物力进行试验保障<sup>[22]</sup>, 所以采用此类试验模式根本无法满足科研需求. 因此, 从20世纪50年代至今, 美国、俄罗斯、中国等国分别建立了用于炸药装药发射安全性研究的后坐冲击模拟发射试验装置等, 通过高压撞击来模拟炸药装药在膛内受到的发射过载环境<sup>[23-34]</sup>.

### 3.1 国外模拟炸药装药发射安全性试验装置研究进展

美国皮卡汀尼兵工厂最早设计研制了炸药装药后坐模拟装置(P.A Activator), 该装置采用火药进行驱动,

模拟炸药装药在膛内发射时的底部受力情况, 此后美国陆军弹道研究所(Army Ballistic Research Laboratory, BRL)对该装置进行了多次改进, 将改进后的装置称为BRL激励器(结构如图1所示). 该装置采用的压缩活塞质量为1.7 kg, 撞击活塞质量为53.5 g, 由于撞击活塞质量和测试腔室较小, 因此测试样品的尺寸规格为 $\Phi 12.7 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ , 药柱质量一般为克量级, 其试验目的是为了证明炸药中的缺陷(气泡、瑕疵、裂纹等)在加载过程中存在绝热压缩点火机制, 并采用该装置对TNT, B炸药, PBXW-113, LX-14, A3, PBX-0280等多种炸药进行了试验测试.

之后加拿大和德国也借鉴BRL激励器设计了相类似的激励器试验装置, 为了降低模拟样品尺寸效应对试验结果的影响, 加拿大国防研究中心(Defence Research Establishment Valcartier, DREV)对新设计的激励器活塞(质量)和测试腔室进行了放大(装置结构见图2), 将测试样品尺寸放大到 $\Phi 25.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$ , 并在加载装置上设置了蜂窝状缓冲层, 增加对药柱样品的加载时间, 使加载过程与炸药装药在膛内的发射过程更加接近等效; 德国国防军91号试验站的科研人员更是将测试样品质量增到120 g, 样品尺寸达到 $\Phi 50 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ , 这些手段都是希望能够更加真实地模拟火炮实际发射时炸药装药在膛内的受力情况.

20世纪70年代后, 美国海军水面武器中心(Naval Surface Warfare Center, NSWC)研制了一种新型后坐模拟装置, 该装置被称为NSWC激励器, 其作用原理与BRL激励器相同, 均采用撞击压缩作用来模拟炸药装药底隙在膛内发生早炸的点火作用, 但是NSWC装置的不同之处在于其加载活塞质量增大到450 kg, 试验用药柱装载在模拟样弹中, 并设置了缓冲层, 可以实现加载时间在1–15 ms范围内调节, 能够覆盖真实火炮膛内加载时间范围, 加载压力可以达到1 GPa, 同样试验样品质量也提高到了450 g, 以期获得更真实的炸药装药模拟发射效果. 在1981年第7届国际爆轰会议上, NSWC科技人员报道了采用该装置对炸药装药底隙厚度的研究成果, 认为为了保证炸药装药发射安全, 炸药装药的底隙应不大于0.381 mm. 此后, 美军标将过去的底隙标准由0.794 mm修改为0.381 mm. 除了后坐模拟加载实验外, 美国洛斯阿拉莫斯实验室采用了水箱试验和圆管试验来研究底隙在发射过程中的点火机理. 这两种试验方法的本质是冲击波引爆试验, 由于对试

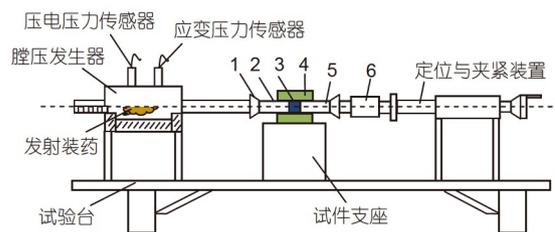


图1 (网络版彩图)膛压冲击试验装置. 1-压力活塞; 2-上击柱; 3-试验样品; 4-击柱套; 5-下击柱; 6-压力传感器

Figure 1 (Color online) The device of chamber pressure impact test. 1-Pressure piston; 2-upper impact bar; 3-test sample; 4-impact bar sleeve; 5-lower impact bar; 6-pressure sensor.

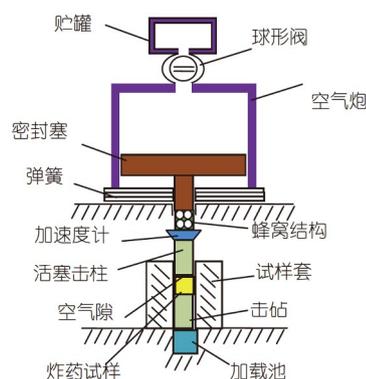


图2 (网络版彩图)加拿大DREV后坐模拟器

Figure 2 (Color online) Canadian DREV recoil simulator.

验样品的加载时间短(10  $\mu\text{s}$ 左右), 不能较好地模拟火炮发射过程中炸药装药在膛内受到的加载时间, 因此试验结果与传统的空气绝热压缩点火机制不一致, 随后洛斯阿拉莫斯实验室也放弃了这两种模拟试验方法.

英国皇家军备研究与发展局<sup>[35]</sup>在1977年公开了其仿制的PA激励器, 该试验装置为立式, 可直接驱动10 kg落锤从0.7–5 m落高范围内撞击活塞实现对炸药样品加载, 用50%点火概率来表示炸药样品的发射安全性. 英国皇家军备发展与研究中心采用该装置对TNT、B炸药、特屈儿以及HMX/石蜡(W)、RDX/W等炸药样品进行了测试, 比较了这些炸药样品的抗发射过载感度以及药柱制备工艺和疵病对发射安全性的影响. PA激励器的试验原理与美国BRL激励器相同, 只是在空间设计上更加紧凑, 并且试验样品量也无法达到与NSWC激励器相当, 因此, 可以说该装置只是BRL激励器的立式翻版, 在其他设计方面并未突破创新.

苏联(俄罗斯)萨马拉大学、门捷列夫化工学院和鲍曼大学等单位针对炸药装药发射安全性研究也分别建立了专门的试验装置,采用落锤加载的方式来模拟炸药装药发射环境,研究炸药装药发生膛炸的机理,并发展了一整套炸药装药发射安全性评估技术。

由此可见,国外研究炸药装药发射安全性所采用的试验装置虽然在样品大小、应力加载方式、加载周期等方面各不相同,但是其作用原理相一致,都是采用对炸药装药轴向进行应力加载,研究装药缺陷对发射过载的响应情况。

### 3.2 国内模拟炸药装药发射安全性试验装置研究进展

西安近代化学研究所连舜华<sup>[36]</sup>对美国陆军弹道研究所、阿伯汀靶场、德国国防军91号试验站等国外研究机构建立的炸药发射安全性模拟实验装置和试验结果进行了深入研究,对比了试验药柱尺寸对研究结果的影响,根据大口径火炮发射工况(典型膛压曲线),弹丸底部受到的最大压力可达250 MPa以上,膛内最大压力可达200 MPa以上,膛内作用时间一般为10 ms,炸药装药受到的最大过载约为10000 g;而弹丸壳体(钢)的导热系数会随着温度的升高而降低,由于火药在膛内点火后对弹丸的作用时间很短,在模拟试验中一般不考虑发射环境升温(隔着较厚的弹壁)对炸药产生的影响,建议国内利用建立大尺寸药柱发射过载试验模拟装置来进行炸药装药发射安全性的相关试验研究.因此,20世纪90年代西安近代化学研究所在国内首次建立了大型落锤加载试验装置及其试验方法<sup>[37]</sup>,其落锤质量可以选择400和1200 kg,落锤的自由下落范围为0–4 m,能够产生最大的加载幅值为1 GPa,最大加载时间为5–10 ms;应力率为0.2–0.5 GPa ms<sup>-1</sup>,最大实验药量可达300 g TNT当量,该装置可以模拟炸药装药在火炮膛内发射过程中受到的主要应力特征.除此之外,北京理工大学为了研究炸药装药点火阈值和缺陷(气泡)对点火阈值影响的变化规律,建立了一套小型模拟后坐冲击试验装置<sup>[38]</sup>,能够在实验室开展小药量的模拟试验(装置结构见图3);南京理工大学芮筱亭等人<sup>[39,40]</sup>研制出了膛压式炸药装药发射模拟试验装置并建立了相应的试验方法,该装置不但能够模拟炸药装药受到的弹底应力加载,还能够模拟线膛炮发射时对炸药装药产生的旋转加速度影响,使试验样品的受

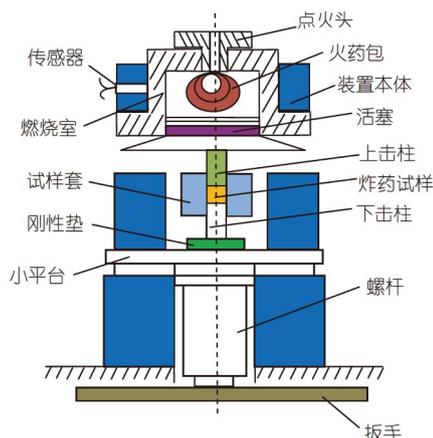


图3 (网络版彩图)应力测试装置  
Figure 3 (Color online) Stress testing device.

力情况与发射时膛内的受力情况更为接近;中国科学院力学研究所陈力等人<sup>[41]</sup>采用低速气炮系统,通过调节缓冲器内的气体压力和活塞质量,来模拟炸药装药在大口径后膛膛内受到的惯性冲击压力和脉冲时间宽度,测试炸药装药在撞击作用下发生变形、剪切、局部破坏等一系列力学变化以及是否导致炸药发生点火爆炸,研究含缺陷装药撞击起爆的基本特征量。

通过对比,国内早期在研究炸药装药发射安全性方面所建立的试验装置和作用机理与国外相似,但是随着研究认识的深入和测试技术的发展,国内已开始从模拟炸药装药单一轴向受力扩展到轴向和径向综合受力,使被试样品与真实发射时的受力情况更为符合。

## 4 弹药发射安全性影响机制研究

炮弹炸药装药在发射过程中发生的膛炸可以归结为延迟转爆轰(XDT)现象,其主要影响因素是受力和作用时间,弹丸在炮膛内的运动时间一般约10 ms,但是炮弹炸药装药在膛内发射过程中的受力情况十分复杂,通过数值模拟真实发射情况可以得到炸药装药受到的3个主要作用力分别为弹底应力、轴向加速度力、旋转加速度力等,围绕炸药装药在发射过程中的受力、作用时间和“热点生成”情况,众多学者在这方面进行了大量研究<sup>[42–52]</sup>。

### 4.1 国外研究情况

美国陆军弹道研究所<sup>[53]</sup>利用BRL激励器对预制缺

陷的B炸药进行了剪切变形点火机制研究, 通过改变压缩速率和药柱预制缺陷尺寸进行试验, 发现药柱底隙对发射过载的响应较为敏感, 而对存在凹窝缺陷的药柱在试验条件下却难以引起点火. 通过对该研究结果进行分析发现, 虽然把炸药装药发生膛炸的响应机制归结为炸药的绝热压缩点火, 但是不同缺陷类型的响应阈值不尽相同. 在对该试验装置进行分析后发现, BRL激励器的试验样品量较小, 该机构测试的凹窝直径仅有0.4 mm, 但是受到试验药柱的尺寸效应影响, 没有发现点火的试验结果并不具有代表性. 同时, 对该机构测试的B炸药和两种压装炸药(A-3和LX-14)的试验结果进行研究发现, 压装工艺成型的药柱不容易发生绝热压缩点火响应, 主要因为压装工艺成型的药柱密度高(一般达到理论密度的95%以上), 因此药柱内部缺陷少, 并且自身具有一定的力学强度, 因此表现出较好的抗发射过载性能. 而铸装工艺成型的药柱, 由于炸药载体在降温结晶过程中发生收缩现象, 因此在实际装药过程中容易在弹丸底部产生底隙, 如果降温结晶过程控制不好, 药柱内部也容易产生缺陷, 所以铸装工艺成型的药柱容易在绝热压缩环境下发生点火响应. 美军现役榴弹主要装填B炸药, 采用了熔铸装药工艺进行装填, 根据影响炸药装药发射安全性的响应机制, 美国海军武器实验室用NSWC早炸模拟器对B炸药进行了大量试验, 发现当模拟压力达到506 MPa时, B炸药装药的最大底隙不能超过0.381 mm, 否则将发生爆炸, 该试验采用了大质量被试样品, 所以这一结果具有代表性并普遍被B炸药装药企业接受作为一项装药质量控制标准.

## 4.2 国内研究情况

由于受试验条件限制和仿真技术的飞速发展, 国内越来越多的学者开始采用仿真技术+试验技术的研究方法开展炸药装药发射安全性影响机制研究<sup>[54-57]</sup>. 由于炮弹在膛内发射过程中炸药的受力情况测试难度极大, 为了获得炸药装药在不同时刻的受力情况, 利用有限元计算软件建立炸药装药在膛内发射的数值模型, 输入计算所需的参数即可获得不同工况下炸药装药的受力情况. 通过模型计算研究发现, 无底隙和缺陷的理想装药情况下, 炸药装药在膛内发射过程中受到的最大应力出现在最大膛压时刻; 设置装药底隙值使其逐渐增大, 通过计算发现, 当底隙达到一定值

后, 炸药受到的应力发生突变, 炸药装药出现破碎并与弹底发生碰撞, 很容易产生热点并引发炸药响应. 李文彬等人<sup>[58]</sup>计算得出当底隙大于0.6 mm时炸药装药膛内发射时受到应力突变, 容易发生炸药膛炸. 为了简化计算, 上述研究都是以装药轴向受力为主, 并未计算其他作用力对装药发射安全性的影响, 因此, 与美军标对B炸药装药底隙不大于0.38 mm的研究结果相符.

弹丸在膛内发射过程中, 炸药装药处于十分复杂的受力环境, 除了受到轴向应力外, 弹丸在膛内高速旋转还对装药产生径向加速度力, 谢辉<sup>[59]</sup>建立了炸药装药复杂发射环境下的数值仿真模型, 得到弹丸在发射过程中的转速高达16000 r/min, 弹丸与炮管的碰撞力也达到120 kN. 径向作用力如此之大, 使我们在建模计算时不得不将其作为作用因素之一进行考虑. 除此之外, 张奇等人<sup>[60]</sup>采用有限元软件对发射过程战斗部顶部装药受力情况进行了分析, 认为发射过程中装药与弹顶分界面处可能存在着瞬时间隙, 瞬时间隙在药柱中传播的压应力波作用下, 可能成为炸药早炸的“热点”.

建立与炸药装药抗发射过载相对应的受力响应模型, 能够更好地解释炸药装药发射安全性的内部作用机制, 周培毅等人<sup>[61,62]</sup>利用自建的应力测试装置对炸药绝热压缩点火模型、有限压缩速率模型和热-力学耦合压缩加热模型进行了分析研究, 得出了炮弹发射过程中, 底隙中截留空气在后坐冲击作用下绝热压缩形成高温热点, 加热相邻炸药层, 使得与空气相邻的炸药层产生高温热点的结论. 除了对全固型炸药装药在膛内的发射过程中的受力进行研究外, 魏可臻等人<sup>[63]</sup>采用LS-DYNA软件对液固体体系的云爆药装药发射安全性进行了数值模拟, 获知不同大小球形孔隙在不同装药位置的体积变化率情况, 揭示了孔隙在发射载荷作用下“热点”的物理过程.

通过上述研究可知, 炸药装药在膛内的发射安全性随底隙的增加而降低, 因此把炸药装药简化为不可压缩材料, 忽略炸药装药在冲击载荷下的动态响应, 这显然是不合适的. 由于弹丸炸药装药在膛内发射过程的受力情况十分复杂, 仅凭激励器等模拟加载试验装置的研究结果还不能完全说明弹药发射安全性的影响机理, 而仿真技术恰能在试验研究的基础上对机理研究做进一步的补充完善. 所以, 今后对弹药发射安全性影响机制的研究方式仍然会以试验+仿真的技术

手段为主.

## 5 炮弹炸药装药发射安全性设计研究

虽然国内外现役炮弹用炸药配方组成和装药工艺各不相同,但是在发射安全性设计和装药质量控制方面所采用的措施基本一致.不但要求炸药自身具有一定强度,还要控制装药质量,避免装药产生疵病或出现底隙.近年来国外在炮弹炸药装药发射安全性设计研究方面的报道较少,国内在这方面的研究工作也主要集中在模拟仿真和等效试验两大类型.

数值仿真是解决高成本、难实现、复杂试验的技术手段之一,因此可以利用仿真计算结果来指导炸药装药安全性设计.由对小口径炮弹到大口径炮弹炸药装药发射安全性仿真计算结果<sup>[64]</sup>可知,在选用合适的炸药配方的同时,还要设计好与之相匹配的装药工艺,进而提高装药质量的一致性,改善炸药装药在膛内发射过程中的受力情况,降低热点生成概率.此外,还要考虑与装药相接触的衬垫材料的力学性能,衬垫材料刚度过大或过小都会影响衬垫缓冲的能力<sup>[65]</sup>.因此优选泊松比较高的材料能够降低装药受到的等效应力.

等效试验能够有效降低试验成本和安全风险,因此,是一种被普遍采用的设计研究手段.采用大型落锤式加载系统模拟弹丸底部炸药的轴向应力状态,当药柱直径为40 mm时,模型与原型尺寸的加载起爆阈值接近一致<sup>[66]</sup>,根据此等效机理,利用大型落锤式加载系统(其结构示意图见图4)可以对不同装药缺陷、装药孔隙率和装药工艺的炸药经行试验研究.

由于落锤质量远远大于其他部件的质量,可以把所有的质量概括为落锤质量 $M$ ,并视为刚体,其他材料

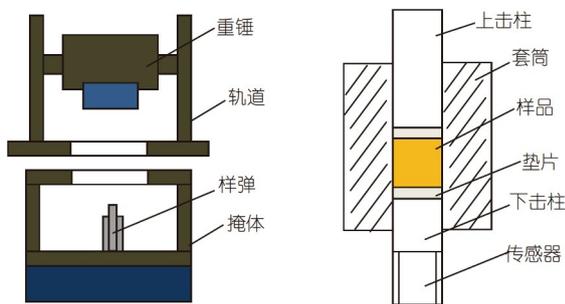


图4 (网络版彩图)落锤实验装置及样弹结构示意图  
Figure 4 (Color online) Schematic diagram of drop hammer experiment device and projectile structure.

的弹性概括为一个刚度为 $K$ 的弹簧,所以,可以把大型落锤式加载系统看作一个弹簧振子,其简化后的弹簧振子力学模型如图5所示.

简化后的模型运动方程:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = Mg - k(\Delta + x) = -kx, \quad (1)$$

其中应力 $\sigma$ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{2EMgH}{Al}} = K_1\sqrt{H}, \quad (2)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = K_2\sqrt{H}. \quad (3)$$

当 $K_1 = \text{const.}$ 时, $\sigma$ 与 $\sqrt{H}$ 成正比,但是由于缓冲材料的存在(目的是使应力脉冲作用时间与弹丸在膛内作用时间相匹配),实际上 $\sigma$ 与 $\sqrt{H}$ 的关系为

$$\sigma = a + b\sqrt{H}, \quad (4)$$

其中, $\sigma$ 为大落锤加载作用于药柱底部的应力, $H$ 为大落锤的落高, $a$ 和 $b$ 是与试验装置、缓冲材料的弹性模量及炸药力学性能有关的常数.

同样,根据试验装置的结构及其加载特性,可以计算出大落锤冲击加载的过载系数.

在轴向力的作用下,药室下端面上装药的应力最大.取装药长度 $h$ 为0.2–1.2 m,过载系数 $n$ 为10000–70000,计算公式推导如下:

$$F = ma = \rho Aha, \quad (5)$$

则

$$\sigma = \frac{F}{A} = 10\rho hn, \quad (6)$$

式中, $F$ 为作用在装药上的力(N); $\sigma$ 为作用在装药上的应力(Pa); $a$ 为加速度, $a=10n=ng$  ( $\text{m/s}^2$ ),取 $g=10 \text{ m/s}^2$ ;

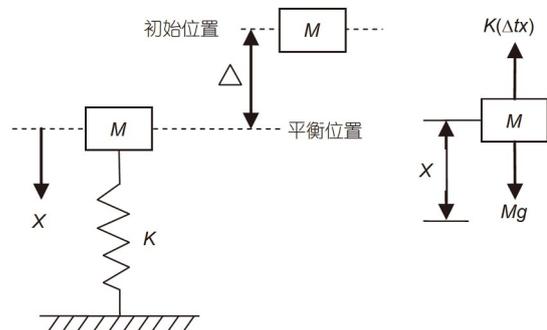


图5 弹簧振子力学模型简图  
Figure 5 Mechanical model of spring oscillator.

$A$ 为装药横截面积( $\text{m}^2$ );  $\rho$ 为装药密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )取 $\rho=1.68 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $h$ 为装药轴向长度( $\text{m}$ );  $n$ 为过载系数.

以B炸药为例, 通过试验发现, 装药缺陷(底隙、气泡、裂纹)是影响B炸药装药发射安全性的主要因素之一. 这与国外关于装药底隙和装药孔隙率变大、装药不均匀都会导致炸药装药的发射安全性变差的研究观点相一致. 因此, 为了提高装药质量, 改善装药发射安全性, 国内引进了分步压装工艺, 采用该工艺装填的炸药具有中间密度高、四周密度低的特点, 在承受发射过载时药柱颗粒间产生径向移动, 对轴向药柱的过载能量是一种分解作用, 利用大型落锤冲击加载装置对分步压装工艺成型的药柱进行研究, 药柱中的低密度部位(具有大孔隙率)在过载中能够延长药柱的应力上升时间, 降低药柱的过载应力率, 有益于提高药柱的发射安全性, 因此对改善发射安全性起到了积极作用.

除了上述炸药装药发射安全性设计外, 还要考虑存在装药缺陷的情况, 常见的缺陷类型有缩孔、气孔、裂纹、分层、底隙、混有杂质等<sup>[67,68]</sup>. 常双君<sup>[69]</sup>研究认为缩孔、气孔、裂纹等疵病在过载环境下会使炸药产生绝热压缩, 形成热点引起炸药早炸; 而裂纹、分层在过载环境中会使药柱在断裂面发生相对位移, 产生摩擦引发爆炸; 间隙在发射过程中不但形成冲击压缩的高温热点, 而且还伴随着炸药装药的轴向运动, 发生摩擦和冲击作用, 使得炸药更易发生分解、燃烧及爆轰; 弹体内壁与药柱分离(药柱与弹壁之间的黏结强度低或药柱与弹壁存在间隙), 在发射过程中药柱会发生旋转而产生旋转摩擦, 引发炸药爆炸. 在对含有不同尺寸和数量疵孔的TNT药片进行模拟加载试验研究<sup>[70-72]</sup>中发现, 疵孔面积越大, TNT装药的力学性能和发射安全性均变差; 当疵孔数量增加但疵孔面积较小且均匀分布时, 对TNT装药的发射安全性影响较小.

## 6 总结与展望

高能炸药作为舰炮弹丸实现对敌目标高效毁伤的能量载体, 在膛内发射过程中要经受高过载环境, 因此, 发射安全性成为舰炮弹丸用炸药装药的主要研究

方向之一. 通过分析研究国内外炮弹用炸药、炸药装药抗发射过载试验装置、抗发射过载响应机制以及发射安全性设计方法等进展情况, 得到如下结论: 今后舰炮弹丸用炸药会朝着高能不敏感的方向发展, 采用不敏感炸药进行装药能够降低炮弹在受到外界打击时(主要作用方式有冲击波、火焰、破片、射流等)发生爆炸或引发殉爆等次生灾害的概率. 因为炸药的不敏感性和发射安全性所对应的外界刺激因素和考核方式不同, 所以, 炮弹无论装填不敏感炸药还是高能炸药, 发射安全问题始终是每种新炸药在型号应用前必须解决的关键技术之一.

现有的发射安全性模拟试验装置虽然在装置规模和试验药量等方面存在差异, 但是其作用机理基本相同, 主要是模拟炸药装药在膛内发射过程中受到的轴向过载应力以及炸药装药的响应情况, 根据研究结果指导炮弹装药避免在研制和生产过程中产生裂纹、气孔、分层、底隙等缺陷, 由此来保证炮弹炸药装药的发射安全.

现有的等效试验装置主要模拟测试炸药装药在单一受力情况下的响应, 而弹丸在实际发射环境中的受力情况十分复杂, 所以对炸药装药的发射安全性评价不够全面. 为了提高弹丸发射安全预估的全面性, 可以利用数值仿真技术, 通过获取材料动态力学性能数据和等效模型试验数据来修正弹丸在膛内发射过程的受力模型, 计算炸药装药在膛内发射过程中的各种受力及响应情况, 提高对炸药发射安全性评估的准确性.

未来随着舰炮技术的发展, 化学能也将不再是唯一的发射动力源, 电磁发射技术已从实验室走向了实用化舞台<sup>[73]</sup>, 因此, 未来炮弹将获得更高的发射速度, 而所受的发射环境也将发生全新变化(从化学能作用转变为电磁场能作用), 炸药装药将受到由电磁场产生的洛伦兹力等作用力, 随之而来对炸药装药发射安全性研究(不论是模拟应力加载试验装置, 还是仿真模型)也将面临新的技术挑战, 不同类型炸药对电磁环境的耐受阈值、炸药装药电磁屏蔽设计、模拟电磁发射环境试验装置等新的研究内容也将纳入炮弹炸药装药发射安全性的考虑范畴.

## 参考文献

- 1 Qiu Z M, Sun S Y, Yi S Y, et al. Research on development of shipboard gun weapon system technology (in Chinese). *Ship Sci Technol*, 2008, 30:

- 21–26 [邱志明, 孙世岩, 易善勇, 等. 舰炮武器系统技术发展趋势研究. 舰船科学技术, 2008, 30: 21–26]
- 2 Li J J. Development trend of naval gun in the 21st century (in Chinese). *Shipborne Weapons*, 2000, 1: 37–40 [李进军. 21世纪的舰炮发展趋势. 舰载武器, 2000, 1: 37–40]
- 3 Zhang C L, Tang W. Development trend of naval gun (in Chinese). *Shipborne Weapons*, 1999, 3: 20–23 [张春来, 唐巍. 舰炮的发展趋势. 舰载武器, 1999, 3: 20–23]
- 4 Wang X S. Current situation and development trend of naval gun weapon system abroad (in Chinese). In: *Collection of Papers on Gun Technology and Weapon Equipment*. Beijing, 2004 [王新生. 国外舰炮武器系统现状与发展趋势. 见: 火炮技术与武器装备论文集. 北京, 2004]
- 5 Qiu R J, Zhang Y L. Development and trend of guided ammunition for naval gun abroad (in Chinese). *Aerodyn Missile J*, 2011, 1: 39–43 [邱荣剑, 张永录. 国外舰炮制导弹药发展概况及趋势. 飞航导弹, 2011, 1: 39–43]
- 6 Wang W F. The way out for naval gun lies in ammunition (in Chinese). *Modern Military*, 1996, 8: 40–42 [王文发. 舰炮的出路在于弹药. 现代军事, 1996, 8: 40–42]
- 7 Wu J. Development status of foreign naval gun guided projectile and its enlightenment to our army (in Chinese). *Natl Defense Technol Found*, 2010, 1: 51–53 [吴杰. 外军舰炮制导炮弹发展现状及对我军的启示. 国防技术基础, 2010, 1: 51–53]
- 8 Sun Y B, Hui J M, Cao X M. *Military Mixed Explosive* (in Chinese). Beijing: Press of Weapon Industry, 1995 [孙业斌, 惠君明, 曹新茂. 军用混合炸药. 北京: 兵器工业出版社, 1995]
- 9 Cai J, Cheng S H, Zhou L. Discussion on the development of ship's terminal defense naval gun technology (in Chinese). *Ship Sci Technol*, 2019, 41: 194–197 [蔡杰, 程守虎, 周力. 舰艇末端防御舰炮技术发展探讨. 舰船科学技术, 2019, 41: 194–197]
- 10 Sun G X. *Mixed Explosive and Its Development* (in Chinese). Xi'an: The 204th Research Institute of China Ordnance Industry Group, 2008 [孙国祥. 混合炸药及其发展. 西安: 中国兵器工业集团第二〇四研究所, 2008]
- 11 Wang Z S. *Introduction to Energetic Materials* (in Chinese). Harbin: Press of Harbin Engineering University, 2006 [王泽山. 含能材料概论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006]
- 12 Huang F J, Zhao J H. Developments of new technologies for foreign explosive charge (in Chinese). *Mine Warfare Ship Self-Defence*, 2013, 21: 55–58 [黄凤军, 赵晋宏. 国外炸药装药新技术的发展. 水雷战与舰船防护, 2013, 21: 55–58]
- 13 Li Y Y, Gao L L. Application of polymer bonded explosive in large medium gun projectile abroad (in Chinese). *Aerodyn Missile J*, 2016, 2: 80–83 [李媛媛, 高立龙. 国外浇注高聚物黏结炸药在大中口径炮弹中的应用. 飞航导弹, 2016, 2: 80–83]
- 14 Wang X. Current situation of study on insensitive composite explosives in USA (in Chinese). *Chin J Expl Propell*, 2007, 30: 78–80 [王昕. 美国不敏感混合炸药的发展现状. 火炸药学报, 2007, 30: 78–80]
- 15 Zhao C. Research progress and trend of insensitive high mixture explosives (in Chinese). *Ord Ind Autom*, 2013, 32: 67–70 [赵超. 高能钝感混合炸药的研究进展及发展趋势. 兵工自动化, 2013, 32: 67–70]
- 16 Zhao B Q, Wang S H, Zou B A. Analysis on the development of American Shen-jian guided projectile (in Chinese). *Aerodyn Missile J*, 2020, 8: 91–96 [赵保全, 王绍慧, 邹博安. 美国神剑制导炮弹发展分析. 飞航导弹, 2020, 8: 91–96]
- 17 US Navy. Raytheon test Excalibur N5 munitions. <https://www.Pnewsire.com/news-releases/us-navy-raytheon-test-excalibur-n5-munitions-300844297.html>, 2019-05-06
- 18 Meng J J, Zhou L, Cao T T, et al. Research progress of 2,4-dinitroanisole-based melt-cast explosive (in Chinese). *Chin J Energetic Mater*, 2020, 28: 13–24 [蒙君熨, 周霖, 曹同堂, 等. 2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)基熔铸炸药研究进展. 含能材料, 2020, 28: 13–24]
- 19 Dong J, Wang W L, Tan B, et al. Application of FOX-7 in explosives (in Chinese). *Exp Mater*, 2020, 49: 1–7 [董军, 王伟力, 谭波, 等. FOX-7在炸药中的应用评述. 爆破器材, 2020, 49: 1–7]
- 20 Ji T Y. *Research on DNAN Based Melt-Cast Explosive Charge and Launching Safety* (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016 [冀腾宇. DNAN基熔铸炸药装药发射安全性研究. 博士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2016]
- 21 Li K, Wang X F, Gao L L, et al. Research progress of explosives for projectile abroad (in Chinese). *Aerodyn Missile J*, 2017, 4: 69–72 [李昆, 王晓峰, 高立龙, 等. 国外炮弹用炸药研究进展. 飞航导弹, 2017, 4: 69–72]
- 22 Yu B T, Guan X Y, Jiang B W. Design of high overload environmental force measurement system in gun (in Chinese). *Electron Measure Technol*, 2019, 42: 59–62 [于波涛, 管雪元, 姜博文. 炮膛内高过载环境力测量系统设计. 电子测量技术, 2019, 42: 59–62]
- 23 Starkenberg J. *Analytical Models for the Compressive Heating Ignition of High Explosives*. Technical Report. Ballistic Research Laboratory ARBRL. TR-02225, 1980

- 24 Starkenberg J J, McFadden D L, Lyman O R. Cavity collapse ignition of composition-B in the launch environment. AD-A 147046. In: 8th Symposium (International) on Detonation, 1986. 1–38
- 25 Starkenberg J, Lewis H, Ervin, et al. Air compression heating ignition of high explosives in the launch environment. AD-A 164961. 1986. 1–34
- 26 Starkenberg J, Doenee L, Mc Fadden, et al. The sensitivity of several explosives. To ignition in the launch environment. AD-A 221581. 1990. 1–43
- 27 Meyers T F, Hershkovitz J. The effect of base gaps on setback shock sensitivities of cast composition B and TNT as determined by the NSWC setback-shock simulator. In: 7th Symposium (International) on Detonation. 1981. 914
- 28 Boyle V, Pilarski D L, Blake O H. Combined Pressure-Shear Ignition Sensitivity Test. Technical Report. Ballistic Research Laboratory BRL-TR-2927, 1988
- 29 Schaefer S, Schepers H. Einfluss Von Diversen Fehlern Audie Sichev Heitseigen Schaften Von Wirkkladungen. Fraunfer-Institute fur Treibund Explosive Stoffe 18th Inter ICT Jabrestagung, 1987. 33
- 30 Belanger C. Study of explosive shell fillings with defects in simulated gun launch. In: 9th Symposium (International) on Detonation. 1989. 632
- 31 Taylor B C, Starkenberg J, Ervin L H. An experimental investigation of composition-B ignition under artillery setback conditions. AD-A095348. BRL-TR-02276. 1980
- 32 Eadie J, Lewis H, Meyers T F, et al. Auatralian test procedure for the acceptance of military energetic materials. AD-A044783. 1977. 83
- 33 Hubbard P J, Lee P R, Blake O H, et al. The sensitiveness of high explosives to impulsive loads. AD-A044783. 1977. 495
- 34 Zhao Y H, Yan G H, Liang L, et al. Projectile's overload testing method during launch process (in Chinese). J Detect Control, 2019, 41: 62–65 [赵煜华, 闫光虎, 梁磊, 等. 火炮发射过程中的弹丸过载测试方法. 探测与控制学报, 2019, 41: 62–65]
- 35 Huang X Y. A brief introduction to the Royal Arms research and development agency (in Chinese). Weapon Mater Mech, 1981, 4: 68–71 [黄秀英. 英国皇家军备研究与发展局简介. 兵器材料与力学, 1981, 4: 68–71]
- 36 Lian S H. The development trend of large caliber shell charge from the results of simulation test on the launching safety of foreign explosives (in Chinese). Chin J Explos Propell, 1992, 2: 37–46 [连舜华. 从国外炸药发射安全性模拟试验研究结果看大口径炮弹装药的发展方向. 火炸药学报, 1992, 2: 37–46]
- 37 Wang S Y, Wang S P, Hu H X. A study on a simulation experiment system for projectiles premature explosion upon launching (in Chinese). Acta Armam, 2002, 23: 541–545 [王世英, 王淑萍, 胡焕性. 榴弹炸药装药发射早炸的模拟实验系统研究. 兵工学报, 2002, 23: 541–545]
- 38 Zhou P Y, Xu G G, Zhang J Y, et al. The experimental study of Launching safety of modified comp-B explosive charge (in Chinese). Chin J Explos Propell, 1999, 4: 34–35 [周培毅, 徐更光, 张景云, 等. 改性B炸药装药发射安全性实验研究. 火炸药学报, 1999, 4: 34–35]
- 39 Rui X T, Wang Y, Wang G P. Advances in test method of launch safety of ammunition (in Chinese). Ord Ind Autom, 2012, 12: 81–84 [芮筱亭, 王燕, 王国平. 弹药发射安全性试验方法进展. 兵工自动化, 2012, 12: 81–84]
- 40 Rui X T, Huang B H, Yu Z H, et al. Influence of projectile swing in bore on launching safety of explosive charge (in Chinese). Acta Armam, 1997, 18: 230–233 [芮筱亭, 黄葆华, 俞占鸿, 等. 弹丸膛内摆动对炸药装药发射安全性的影响. 兵工学报, 1997, 18: 230–233]
- 41 Chen L, Ding Y S. Simulation experimental system of low velocity gas gun initiated by impact of explosive charge (in Chinese). In: Proceedings of the third National Conference on Experimental Technology of Explosive Mechanics. Hefei, 2004 [陈力, 丁雁生. 炸药装药撞击起爆低速气炮模拟实验系统. 见: 第三届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 合肥, 2004]
- 42 Zhang G R, Chen D N. Initiation Kinetics of Condensed Phase Explosive (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 1991 [章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学. 北京: 国防工业出版社, 1991]
- 43 Zhang G W, Han Y, Gou R J. Principle of Explosive Action (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2006 [张国伟, 韩勇, 苟瑞君. 爆炸作用原理. 北京: 国防工业出版社, 2006]
- 44 Tarver C M, Chidester S K. On the violence of high explosive reactions. In: Emerging Technology in Fluids, Structures, and Fluid-structure Interactions, 2004, 485: 3–12
- 45 Holian B L, Germann T C, Maillot J B, et al. Atomistic mechanism for hot spot initiation. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 124
- 46 Walley S M, Field J E, Greenaway M W. Crystal sensitivities of energetic materials. *Mater Sci Tech*, 2006, 22: 402–413
- 47 Katayama M. Numerical simulation method for the problem. *Explosion*, 2004, 14: 60267
- 48 Shah A, Brindley J, Griffiths J, et al. The ignition of low-exothermicity solids by local heating. *Process Saf Environ Prot*, 2004, 82: 156–169
- 49 Zou L B. Research on movement law of projectile under different shooting conditions (in Chinese). J Nanchang Instit Technol, 2018, 37: 106–109 [邹利波. 不同射击工况下弹丸膛内运动规律研究. 南昌工程学院学报, 2018, 37: 106–109]

- 50 Ye X, Sun S Y, Tan B. Analysis of influence factors on the vibration of ship gun swing motion ammunition (in Chinese). *J Ord Equipm Eng*, 2019, 40: 44–47 [叶辛, 孙世岩, 谭波. 舰炮摆弹运动弹药振动的影响因素分析. *兵器装备工程学报*, 2019, 40: 44–47]
- 51 Ye X, Sun S Y, Tan B, et al. Simulation analysis of firing strength of medium and large caliber shipboard projectile (in Chinese). *Ship Electron Eng*, 2019, 39: 91–94, 114 [叶辛, 孙世岩, 谭波, 等. 某中大口径舰炮弹丸发射强度仿真分析. *舰船电子工程*, 2019, 39: 91–94, 114]
- 52 Long Y, Chen J. Progress of atomistic simulations for plastic bonded explosives (in Chinese). *Chin J High Pressure Phys*, 2019, 33: 1–15 [龙瑶, 陈军. 高聚物黏结炸药的分子模拟进展. *高压物理学报*, 2019, 33: 1–15]
- 53 Jin Z M, Weng C S, Zhang G Q. Types of breech blows and analyses on their mechanisms (in Chinese). *Acta Armam*, 2001, 22: 448–450 [金志明, 翁春生, 张国强. 膛炸模式及其机理分析. *兵工学报*, 2001, 22: 448–450]
- 54 Yan S G, Qi Y F. Applied research on simulation of naval gun modeling (in Chinese). *J Ord Equipm Eng*, 2019, 40: 10–14 [颜世刚, 齐亚峰. 舰炮建模仿真应用研究. *兵器装备工程学报*, 2019, 40: 10–14]
- 55 Yan H, Yu Y C, Rui X T, et al. Effects of bottom gap of explosive on launching safety (in Chinese). *J Ballist*, 2019, 31: 46–51 [严涵, 于艳春, 芮筱亭, 等. 炸药底隙对炸药装药发射安全性的影响. *弹道学报*, 2019, 31: 46–51]
- 56 Yan H, Yu Y C, Chen W D, et al. Analysis of the safety of explosives based on viscoelastic statistical cracking model (in Chinese). *J Harbin Eng Univ*, 2019, 3: 495–500 [严涵, 于艳春, 陈卫东, 等. 黏弹性统计裂纹模型的炸药安全性分析. *哈尔滨工程大学学报*, 2019, 3: 495–500]
- 57 Lian S H. Simulation test research on the launching safety of foreign explosive charge (in Chinese). *J Ord Eng*, 1992, 2: 78–84 [连舜华. 国外炸药装药发射安全性的模拟试验研究. *兵工学报弹箭分册*, 1992, 2: 78–84]
- 58 Li W B, Wang X M, Zhao G Z, et al. The research of the effect of base gap on the stress of explosives and the launching safety (in Chinese). *J Ballist*, 2001, 13: 64–67 [李文彬, 王晓鸣, 赵国志, 等. 装药底隙对弹底应力及发射安全性影响研究. *弹道学报*, 2001, 13: 64–67]
- 59 Xie H. Simulation and Experimental Study of Safety of Explosive Charge under Launch Environment (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2015 [谢辉. 发射环境下炸药装药安全性仿真与试验研究. 硕士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2015]
- 60 Zhang Q, Cui J M, Ji Y H, et al. Instantaneous void between thermo-baric charge and warhead shell under launching (in Chinese). *Chin J High Pressure Phys*, 2008, 1: 48–52 [张奇, 崔俊梅, 纪艳华, 等. 发射载荷下温压战斗部装药内的瞬时间隙. *高压物理学报*, 2008, 1: 48–52]
- 61 Zhou P Y, Xu G G, Wang T Z. Ignition models of explosive charge subjected to setback impact (in Chinese). *Chin J Explos Propell*, 2000, 1: 1–5 [周培毅, 徐更光, 王延增. 炸药装药在后座冲击条件下的点火模型研究. *火炸药学报*, 2000, 1: 1–5]
- 62 Zhou P Y, Xu G G, Wang T Z. Experimental study of dynamic response of explosive charge subjected to setback impact (in Chinese). *J Beijing Instit Technol*, 1999, 19: 92–95 [周培毅, 徐更光, 王延增. 炸药装药在后座冲击下的动态响应实验研究. *北京理工大学学报*, 1999, 19: 92–95]
- 63 Wei K Z, Zhang Q. The numerical simulation on transformative characteristic of global hole in charging under launching load (in Chinese). *J Project, Rockets, Missiles Guid*, 2008, 28: 99–101, 108 [魏可臻, 张奇. 发射载荷下装药内球形孔隙变形特性的数值模拟. *弹箭与制导学报*, 2008, 28: 99–101, 108]
- 64 Wang X F, Tao G, Ding G P, et al. Analysis of strain rate and over-loading safety of explosive charge when 30 mm small-caliber shell are fired (in Chinese). *J Ord Equipm Eng*, 2017, 38: 9–14 [王小峰, 陶钢, 丁贵鹏, 等. 30 mm小口径炮弹发射时炸药装药应变率及过载安全性分析. *兵器装备工程学报*, 2017, 38: 9–14]
- 65 Wang H. Effect on stress and temperature of explosive charge density under launch load (in Chinese). *J Sichuan Ord*, 2011, 32: 28–31 [王豪. 发射载荷下炸药装药密度对炸药应力和温度的影响. *四川兵工学报*, 2011, 32: 28–31]
- 66 Sui X, Wei Z J, Wang N F, et al. Analysis of effect of the pad material on stress in the grain during launching artillery missile (in Chinese). *Acta Armam*, 2009, 30: 709–713 [隋欣, 魏志军, 王宁飞, 等. 炮射导弹发射过程中装药衬垫材料对抗过载能力的影响计算分析. *兵工学报*, 2009, 30: 709–713]
- 67 Hu Z. Research on the safety of ammunition launching (in Chinese). *High Tech China*, 2019, 49: 46–47 [胡照. 弹药发射安全性研究. *中国高新技术*, 2019, 49: 46–47]
- 68 Sun H, Shen Y N, Chen T. Transient response and crack propagation of polymer bonded explosive under launching environment (in Chinese). *J Nanjing Uni Sci Technol*, 2019, 43: 230–236, 243 [孙泓, 沈煜年, 陈涛. 发射环境下高聚物黏结炸药的瞬态响应及裂纹扩展. *南京理工大学学报*, 2019, 43: 230–236, 243]
- 69 Chang S J. Effect of charging quality on launching safety (in Chinese). *China Safety Sci J*, 2004, 14: 76–78 [常双君. 炸药装药质量对发射安全性的影响. *中国安全科学学报*, 2004, 14: 76–78]

- 70 Xu G G, Duan M, Wang T Z, et al. Effect of the existence of cavities in a charge upon its launching safety (in Chinese). *Acta Armam*, 1993, 2: 51–55 [徐更光, 段明, 王廷增, 等. TNT装药疵孔对发射安全性的影响. *兵工学报*, 1993, 2: 51–55]
- 71 Xu G G, Zhang J Y, Huang Z P. Influence of porosity and mechanical properties of explosive charge on launching safety (in Chinese). Technical Report. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1999 [徐更光, 张锦云, 黄正平. 炸药装药的孔隙率和力学性能对发射安全性的影响. 技术报告. 北京: 北京理工大学, 1999]
- 72 Miao S, Wang T, Wang Y L. Theoretical calculation on effects of void defects on properties of composition B (in Chinese). *J Atom Mol Phys*, 2019, 36: 675–681 [苗爽, 王涛, 王玉玲. 空洞缺陷对B炸药性能影响的理论计算. *原子与分子物理学报*, 2019, 36: 675–681]
- 73 Ma W M, Lu J Y, Li X P. Electromagnetic launch hypervelocity integrated projectile (in Chinese). *J Natl Uni Defense Technol*, 2019, 41: 1–10 [马伟明, 鲁军勇, 李湘平. 电磁发射超高速一体化弹丸. *国防科技大学学报*, 2019, 41: 1–10]

## Research progress on explosives for naval gun shell and its launching safety

DONG Jun<sup>1,2</sup>, DU Mao-Hua<sup>1</sup>, WANG Xiao-Feng<sup>2\*</sup>, WANG Wei-Li<sup>1</sup>, TAN Bo<sup>1</sup>,  
XING Jiang-Tao<sup>1</sup>, Yao Tian-Le<sup>1</sup>, HUANG Ya-Feng<sup>2</sup>, YANG Xiong<sup>2</sup> & ZHAO Kai<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Ordnance Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;*

<sup>2</sup> *Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China*

To investigate the launch safety problems in the application of powerful naval gun ammunition, this paper analyzes and studies the development of domestic and foreign explosives and weaponry for naval gun ammunition, the research equipment for explosive charge launching safety, impact mechanism of explosive charge launching safety, and the design of numerical simulation and equivalent test for explosive charge launching safety. Results show that although the explosive charge of naval gun ammunition varies among countries, the principle of the test device used to study the explosive charge launching safety is basically the same. To verify whether the explosive charge meets the launch safety requirements, the recoil force stress and its response to explosives in the launching process is simulated. Additionally, the relevant test and research results prove that the launching safety performance of explosive charge can be effectively enhanced by improving the charge quality and reducing the charge defects. By exploring the explosive formula design and charging technology, avoiding the hot spot of explosives in a complex stress launching environment, such as adiabatic compression and shear, is a crucial technical measure, as well as improving the launching safety of naval gun shell explosive charge.

**ordnance science, naval gun ammunition, explosive charge, launch safety, equivalent experiment**

**PACS:** 62.20.-x, 62.20.Dc, 62.20.Fe, 62.20.Mk

**doi:** [10.1360/SSPMA-2020-0355](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0355)