

文章编号:1006-9941(2024)08-0864-07

发射药与装药技术发展展望

肖忠良¹,丁亚军¹,李纯志²

(1. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 泸州北方化学工业有限公司, 四川 泸州 646003)

摘要: 发射药作为枪炮武器发射与精准毁伤的功能单元,具有关键与核心技术地位。通过总结归纳发射药与装药技术的发展历程,系统分析其演化规律,从科学、技术、产品三个层次阐述了发射药与装药技术的研究现状和主要问题。同时从科学探索发现、技术创新发明进步、产品与武器装备应用等方面对发射药与装药技术未来的发展方向进行了分析与展望,以期对发射药研究者、行业管理、制造企业提供参考,推动行业领域的发展。

关键词: 发射药;装药;科学技术;发展展望

中图分类号: TJ55;O64

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2024148

0 引言

身管武器,即枪炮武器,作为主战武器的重要构成,具有成本低廉和使用便捷等优势,在持久战争中的地位与作用尤为凸显^[1-2]。发射药是通过燃烧将化学键能转化为热能,然后以卡诺热机原理,将热能转化为弹丸动能,成为动能毁伤元或者实现对毁伤元的运载^[3-5]。一般意义上将其划分为发射药与装药两个部分。其中,发射药是指其配方组成、制备工艺和相关物理化学性能;装药是指针对武器平台,选择发射药、确定形状与尺寸、设计装药结构、点传火方式、辅助装药元器件(如消焰剂、除铜剂、缓蚀剂等),将其集成为一个能源单元。

本研究归纳总结了发射药与装药技术的发展历程,分析其演化规律,从科学、技术、产品等层次进行内涵界定,分析和展望未来的发展趋势,以期对发射药的科学研究、行业管理、生产制造提供参考。

1 演化逻辑分析

用于身管武器发射的火药,经过了黑火药、无烟火

药和现代火药三个发展时期。就组成而言,经过了氧化剂/还原剂/粘结剂的混合物,到单一分子化合物,再到多组份化合物的演化;从科学认知的视角,由经验现象认知逐步深化到分子结构、介观、微观、宏观结构的认知过程;从产品系列视角,由较为单一的黑火药发展为无烟火药多品种,再向产品谱系化的方向发展。

1.1 黑火药的起源与应用

黑火药是中国最早发明的火药,据考为唐代炼丹家们的发明,是炼丹的副产品,非属一人^[6-7]。代表人物为孙思邈,在他的《丹经内伏硫黄法》一书中第一次把黑火药的配方记录下来,也被认为是火炸药的始祖。黑火药的发明是火炸药发展史上的第一个纪元,直到19世纪初叶,黑火药一直是世界上唯一使用的火炸药。黑火药对军事技术、人类文明和社会进步所产生的深远影响,一直为世所公认并记载于史册。公元808年(唐宪宗元和三年),炼丹家清虚子在其所著的《太上圣祖金丹秘诀》中指出,黑火药是硝石(硝酸钾)、硫磺和木炭组成的一种混合物^[8-9]。到宋、元时期,黑火药的配方更趋定量和合理。在1040~1044年间宋代曾公亮等编著的《武经总要》中,曾记录了三个黑火药的确切组成。此后一直到19世纪上半叶,黑火药依然沿用延续了几百年的“一硫、二硝、三木炭”古老配方^[10-11]。

约在10世纪初,黑火药用于铳、炮的发射,开始步入军事应用,武器由冷兵器转变为热兵器。宋真宗时,

收稿日期:2024-06-13;修回日期:2024-07-06

网络出版日期:2024-08-12

作者简介:肖忠良(1957-),男,教授,博士生导师。主要从事发射药与装药设计研究。e-mail: xzl@njjust.edu.cn

通信联系人:肖忠良(1957-),男,教授,博士生导师。主要从事发射药与装药设计研究。e-mail: xzl@njjust.edu.cn

引用本文:肖忠良,丁亚军,李纯志. 发射药与装药技术发展展望[J]. 含能材料, 2024, 32(8):864-870.

XIAO Zhong-liang, DING Ya-jun, LI Chun-zhi. Development Prospect of Gun Propellant and Charge Technology[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(8):864-870.

在开封创立了我国第一个火炸药厂“广备攻城作”,其中的“火药窑子作”专门来制造黑火药。宋朝军队曾大量使用过以黑火药为推进动力或爆炸物组分的武器(如霹雳炮、火枪、铁火炮、火箭等)以抗击金兵、元兵。南宋中后期,由于火药的性能已有很大提高,人们可在大竹筒内以火药为能源发射弹丸,1132年,中国发明了“长竹杆火枪”等管形火器,1259年发明了“突火枪”,它们是近代枪炮的雏形。随着铜铁管铸造技术的发展,使元朝具备了制造金属管形射击火器的技术基础,中国火药兵器便在此时实现了新的革新和发展,出现了具有现代枪械意义雏形的新式兵器——火銃^[12, 13]。1332年中国制造的“铜铸火銃”则是世界上已发现最早的身管武器。上述这些武器,均是以黑火药为能源,这些武器的问世和对黑火药的应用,是兵器史上一个重要的里程碑^[14, 15]。另外自发明黑火药后,燃烧武器和烟火技术均得以发展。在北宋的《武经总要》中,详细描述了“毒药烟毯”、“蒺藜火毯”等产生有毒烟幕和燃烧作用的武器^[16]。明代的《武备志》也记载有“五里雾”、“五色烟”等烟火药剂的配方^[17]。

自明代开始,国家军队建有火器营,成为一个重要的兵种。

13世纪前期,中国黑火药经丝绸之路传入阿拉伯国家,再传入欧洲,在进行工程爆破应用的同时,也获得军事应用。天启年间明朝军官从葡萄牙人那里购得红夷大炮,就是英国制造的早期加农炮^[18-19]。

1.2 无烟火药的发明与应用

法国化学家维也里(P. Vieine)于1884年用醇、醚混合溶剂塑化硝化棉(NC)制得了单基发射药^[20]。1888年,瑞典著名化学家和工程师诺贝尔在研究代那买特炸药的基础上,用低氮量的NC吸收硝化甘油(NG)制成了双基发射药,称为巴利斯太火药,后来广泛用于火药装药。1890年,英国人阿贝尔(F. Abel)和J. 迪尤尔(Dwyer)用丙酮和NG共同塑化高氮量NC,制成了柯达型双基发射药^[21-23]。1937年德国人在双基发射药中加入硝基胍,制成了三基发射药。这一时期出现和形成的单、双、三基发射药,显著提高了发射药的性能,促进了枪炮类身管武器系统的进一步发展^[24-25]。

与此同时,火药燃烧理论也得到广泛研究。1868~1875年间,英国化学家阿贝尔(F. Abel)和物理学家诺贝尔(A. Noble)应用密闭爆发器,确定了火药燃烧气体状态方程,即考虑气体余容的著名Abel-Noble状态方程^[26-27]。19世纪末,皮诺贝特(Piobert)等总结

前人研究黑火药的成果即无烟火药的平行层燃烧现象,提出了几何燃烧定律,从而建立起表示气体生成规律的形状函数和以实验方法确定的火药燃速方程。为高压状态下发射药能量释放规律的控制方法奠定了理论基础^[28]。

无烟火药的发明与进步,促进了线膛火炮、马沁克机枪、大威力臼炮的发明与应用,使武器性能大幅度提升,使得战争形态发生变化。

1.3 现代火药的发展

发射药与装药技术在近代得到迅猛发展。以纤维素为力学骨架、RDX为填充物的低易损发射药,进一步发展为以热塑性弹性体为力学骨架、RDX/HMX为填充物的低敏感发射药^[29-31];20世纪70年代德国研制出以NC为骨架体系,以NG/DGN混合硝酸酯为增塑剂的JA-2高能高强度发射药,用于高膛压火炮发射装药;80至90年代美国大力研究硝酸羟胺(HAN)液体发射药,同时发明再生式液体火炮。

我国20世纪80年代中期成功研制出三基发射药,80年代末成功研制出以NG/TEGN混合硝酸酯为增塑剂的高能高强度发射药,90年代研制加入RDX的高能硝胺发射药和以叠氮硝胺为增塑剂的叠氮硝胺发射药。1996年我国王泽山教授发明了低温度感度发射装药^[32],2016年发明了远程等模块装药^[33],将火炮武器的穿甲威力、射程、勤务、环境适应性等方面提升到一个新高度。这些先进功能材料、新型含能材料的开发与应用,显著提升了发射药的综合性能。另外在发射药能量释放规律的控制方法方面,我国研制出了一系列高燃烧渐增性发射药。例如,变燃速发射药是利用共挤出装置将不同燃速的发射药挤出成型,制成外层燃速慢、内层燃速快的结构,进而实现高燃烧渐增性^[34-35]。梯度硝基发射药则是利用化学脱硝处理将发射药表层的含能基团梯度水解脱除,形成燃速梯度结构,具有储存稳定性高、射击有害现象少的特点^[36-37]。这些新型发射药为现代火药的发展注入了新活力。

2 科学基础内涵

科学研究的对象是客观事物,研究的内容是其本质属性与变化规律,研究方法可以是归纳、演绎、推理等。方法论可以分为定性方法论、定量方法论、实证方法论、历史方法论和比较方法论五种类型。

发射药作为发射能源,具有物质与材料的基本属

性,体现在其作为高分子复合材料,自身含有氧化剂和还原剂,具备一定的物理状态和机械性能;也有能源的特殊性,体现在高能量释放与可控燃烧规律,满足特种能源的需求。发射药还具有能量释放的基本规律,其用于武器发射时,在高温高压高冲击下和高速流场内燃烧,燃烧产生的热能,以气体为介质转化为弹丸动能,同时气体流出与空气混合作用,能量耗散。按照热力学第一定律:能量守恒原理,发射药的科学问题可以划分为能量初始状态函数、能量释放过程函数和能量终态状态函数。函数是发生在集合之间的一种对应关系,其对应法则通常用解析式表示,但存在大量无法用解析式表达的函数关系,这些可以用图像、表格及其他形式(如文字叙述)表达。

数学、物理、化学是科学认知层次较高的学科领域,其他学科均是在此基本上衍生和发展。无论火炸药,还是其中发射药的科学问题总体可以归结为反应流体动力学。该问题大致划分为控制方程和若干本构方程,包括确定热力学和传递性质、均相与非均相化学反应的速率表达式等本构方程以及边界与初始条件。在实际应用时,针对不同的问题解答,需要对诸多方程与条件进行大幅度简化,采用简化定性表达或者数值计算表达。例如,考虑余容的 Abel-Noble 气体状态方程 $p_m = f\Delta / (1 - \alpha\Delta)$, 该方程的科学意义在于,一方面是比理想状态方程更符合实际的气体状态表达,另一方面,根据该方程可以采用密闭爆发器测定在两个不同装填密度(Δ)条件下的最大压力(p_m),得到发射药火药力(f)和余容(α)两个关键性能参数。关于发射药高压燃烧速率采用正比式 $u = u_1 p$ 和几何燃烧定律 $\Psi = z(1 + \chi z + \mu z^2)$ 三项式表达,建立了内弹道学中的本构方程,使其方程组封闭可解^[38]。

当然,科学认知是阶段性、暂时认定的真实,随着科学探索的不断深化,会有更为真实的表达替代原有和现有表达。这也是科学认知的价值和永无止境的原因所在。

3 技术与产品体系

发射药技术的发展是在武器高威力、远射程的需求牵引之下,在科学认知不断深化的基础上,与相关学科领域一起协同进步与发展,技术与产品均是人为的结果。由现象与经验的认知基础,产生了传统技艺和初级产品,再结合科学认知的进步产生了现代技术与高性能产品和高效益行业。发射药技术以产品形成时

序和能量特征,划分为以下几个技术板块。

(1)发射药设计方法:根据不同武器应用需求,首先确定发射药的力学骨架,目前 NC 为最优选择;再选择氧化剂和高能组分,进行能量设计,满足能量最低的基本要求;在此基础上,进一步考虑其他性能方面的设计,包括力学、安定性、安全性、加工性能、烧蚀性等方面,一般的方法是加入功能添加剂,例如发射药中必不可少的中定剂。

(2)发射装药设计方法:发射药装药应用包括发射药种类选择、装药结构设计、点传火系统设计、能量释放过程控制、辅助装药元器件等。不同武器因战术技术需求不同,对发射药的要求不同,如穿甲弹武器要求发射药高能、高强度,大口径榴弹武器要求发射药能量适中、烧蚀性较低,中小口径武器和轻武器要求发射药在保证能量的基础上,更为注重洁净燃烧、发射环境优良。能量释放控制是装药设计的核心与关键,采用几何形状设计、物理化学结构调控、表层钝感包覆、内部预置缺陷等方法可以达到能量释放过程控制的目的,实现低膛压、高初速和环境适应性的目标。

(3)制造工艺:指劳动者利用各类生产工具对各种原材料、半成品进行加工或处理,最终使之成为成品的方法与过程。发射药与装药终是以一定宏观物理化学形态存在的物质,从化学元素到一定形态需要多个过程来完成,其中如原材料 NC、NG 等的合成是典型的化学过程,钝感包覆为物理化学过程,塑化、挤压成型、干燥等为典型物理过程。现代工艺是在对全工艺过程中物料形态演化规律科学认知的基础上,对工序、装备、工艺条件进行设计,对工艺过程进行适时和安全的控制,实现产品的高质量、高效率和高安全生产。

(4)性能表征与评价方法:发射药与装药的性能表征是对基本特性的表达,主要是对相关物理化学参数的测定。发射药与装药的评价需要按照产品自身属性、武器应用要求进行量度和参考比较,有大小、多少、优劣、取舍的判断;包括检测与评价对象、参数的选择、参数方法、手段、仪器设备的选取或者研制;进一步,建立相关物理数学模型并进行模拟仿真,获取相关参数,评价其综合性能。对于发射药与装药,高温、高压、高冲击极端环境条件下的燃烧机理、能量释放规律、力学行为等方面是研究的难点,同时也是科学探索的依据。

4 未来发射药与装药技术

任何学科行业领域的进步与发展,必须遵循其自身的客观规律,在探索其本质属性、变化规律的基础上,发明创新结构、新技术、新工艺与新方法,设计出性能更为优越的新产品。具有原创性能力和成果,是一流的学科领域、团队、企业和领军人物所需的必要条件。我国正处于历史交替、百年未有大变局时期,国家与民族的复兴与崛起需要火炸药的创新和发展。发射药具有发射能源和材料的基本属性,易燃易爆的特点使其具有危险品属性。下面从科学探索发现、技术创新发明进步、产品与武器装备应用几个方面对发射药与装药技术的发展方向进行阐述。

4.1 科学探索发现

任何事物都具有本质属性,在外界能量作用约束条件下会进行变化。发射药科学研究的主要内容在于探索发现其本质属性和变化规律。

根据其能量本质属性,结合其材料属性及其易燃易爆物质属性,从探索化学分子、介观、微观和宏观结构与能量、力学、安全性的本构关系,为发射药的设计奠定理论基础,其中,NC分子骨架含能增塑机理、晶体含能化合物纳米效应、C、H、O、N固体氧化剂等需要探索;研究从分子到宏观材料结构过程的形态演化机理与动力学机制,外界能量作用转化与耗散原理,点火燃烧机理与阈值,为发射药的加工工艺设计提供原理性支撑;掌握不同条件下燃烧转爆轰规律,确定相应阈值约束条件,为工艺设计、武器应用设计提供依据;高压和不同温度、湿度环境条件下,发射药与装药结构的点传火规律和对能量释放的影响、能量释放规律;几何燃烧定律在高速流场、狭窄流道的适应性;低温条件下发射药冲击破碎等需要深化探索研究,为高膛压、初速武器的设计提供理论依据;发射药燃烧产物基本属性与发射烟焰、残渣、毒害等相关性和影响规律需要进一步探索研究。

4.2 技术创新发明进步

现代技术与进步建立在科学原理的基础上。根据武器与工程应用的需求,发射药在配方、结构、工艺、控制、检测、标准等多个方面进行发明创造和改进,使产品质量、武器性能不断提高,从而实现更大的效益。

(1)发射药设计方面:对现有的发射药配方体系,

从原材料标准、工艺方法、工艺装备、过程控制、产品检验等方面全面规范与标准化,进一步提高产品质量与效益;坚持以NC为骨架的发展方向,选择新的含能增塑剂和高效含能填充物,研制出高能高强度、低烧蚀发射药;目前虽尚未有新型材料可以替代NC,但是持续投入研发力量,以求发展新一代发射药;筛选出实用性氧化剂、多氢多氮化合物;以满足高初速、高安全、低有害现象、长身管寿命发射装药需要。

(2)发射装药设计方面:在装药设计数值仿真平台与计算结果的支持下,设计高装填密度、高效点传火、高效辅助装药元器件,以适应武器装备应用需求;通过几何形状、物理结构、表层钝感包覆、程序点火等技术,实现高压动态条件下的能量释放过程控制,仍然是发射装药的前沿方向,为武器实现更高初速和降低发射有害现象;将发射药集约模块化,以适应大口径武器勤务优化,需要进一步解决射程覆盖范围更大、小号装药燃烧更为完全。

(3)发射药与装药工艺方面:发射药产品需要由多个物理化学过程,也就是多个工序组合完成,对关键过程和相关工艺装备进行形态演化、物料和能量传输等数值模拟仿真,建立相应的工艺数据库;对工艺进行正向设计,对关键装备进行模块化与标准化,突破工序间物料自动安全传输接口技术,对工艺过程相关物理化学参数进行适时检测和控制;根据发射药制备各工序的物料特点,确定能量与物料输运方式与控制方法,设计意外识别、提前中断和物理防护结构;工艺的系统集成,建立工艺系统评价方法和升级途径,涵盖自动化、数字化、安全、质量、环境、效益等多个方面。采用先进的工艺技术,如3D打印技术等,创新特殊的微结构,满足武器发展对发射药结构及装药结构复杂化、微观化的需求^[39-40]。

(4)标准化方面:随着发射药技术与工艺技术的进步,在已经沿用数十年的标准体系基础上,需要对发射药的全寿命周期过程,从原材料、配方设计、装药设计、工艺过程、产线设计、产品质量检测、过期发射药处置等进行体系性重构与完善。

4.3 产品与装备应用

现代工业产品的显著特征是谱系化和不断地迭代升级。发射药以NC为力学骨架和主体能量组分,划分为单基、双基、三基和装药元器件谱系,以形状和功能组分特征为形式表达,从而建立了发射药的型谱。

在发射药的研究中,发射药的组分、特征性可以是多样性,但是达到批量产品生产与装备时,需要遵循组

分尽可能地少、形状结构尽可能简单,由此减少产品性能的影响因素,使制造工艺程序工艺参数大幅度减少,保证发射药的质量和武器性能。

5 结语

枪炮武器的战略战术重要性决定了发射药与装药

的关键与核心技术地位,现代战争的形态表明发射药仍是战争的重要组成部分。发射药技术的进步与发展(图1),无论对当前武器性能的保证,还是对未来武器发展的推动均具有重要意义。因此发射药需要在科学探索方面不断深化、技术方面不断创新、产品方面不断谱系迭代、制造工艺方面不断安全与数字化升级,整个行业领域才会健康发展。

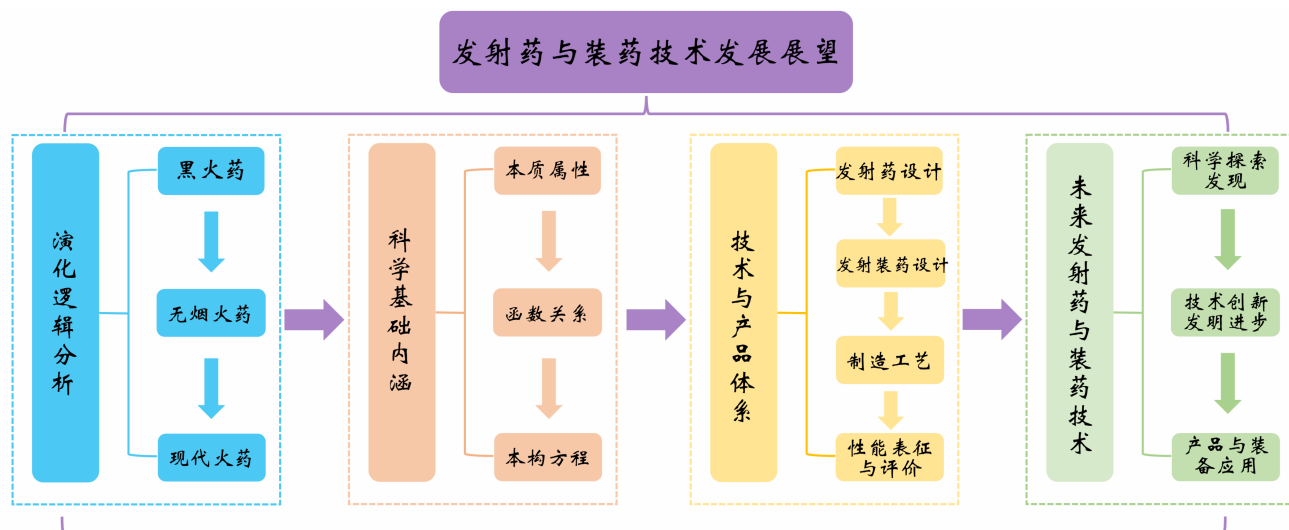


图1 发射药与装药技术的发展与展望

Fig.1 Development prospect of gun propellant and charge technology

参考文献:

- [1] 王泽山, 欧育湘, 任务正. 火炸药科学与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
WANG Ze-shan, OU Yu-xiang, REN Wu-zheng. Explosives and propellant science and technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002.
- [2] 肖忠良, 王泽山. 发射药科学技术总体认识与理解[J]. 火炸药学报, 2004, 27: 1-6.
XIAO Zhong-liang, WANG Ze-shan. The understanding and comprehension of science and technology for propellant [J]. Chinese Journal of Explosive & Propellant, 2004, 27: 1-6.
- [3] 肖忠良. 火炸药导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
XIAO Zhong-liang. Introduction to explosives and propellant [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019.
- [4] 王泽山, 何卫东, 徐复铭. 火药装药设计原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
WANG Ze-shan, HE Wei-dong, XU Fu-ming. Gunpowder charge design principles and techniques [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [5] 任务正, 王泽山. 火炸药理论与实践[M]. 北京: 中国北方化学工业总公司, 2001.
REN Wu-zheng, WANG Ze-shan. Explosives and propellant theory and practice [M]. Beijing: China North Chemical Industry Corporation (Norinco), 2001.
- [6] MASON B, ROLAND C. Solid propellants [J]. Rubber Chemistry and Technology, 2019, 92(1): 1-24.
- [7] DAVIS A. Solid propellants: The combustion of particles of metal ingredients [J]. Combustion and Flame, 1963, 7: 359-367.
- [8] 崔庆忠, 黄玉平, 徐洋. 黑火药设计与制造技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.
CUI Qing-zhong, HUANG Yu-ping, XU Yang. Design and manufacture technology of black powder [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2019.
- [9] 王学要. 论唐宋时期火药的应用与发展[J]. 魅力中国, 2009, 36: 182-183.
WANG Xue-yao. On the application and development of gunpowder in the Tang and Song dynasties [J]. Charming China, 2009, 36: 182-183.
- [10] 黄人骏, 宋洪昌. 火药设计基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
HUANG Ren-jun, SONG Hong-chang. Fundamentals of propellant design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997.
- [11] 蔺向阳, 郑文芳. 火药学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
LIN Xiang-yang, ZHENG Wen-fang. Gunpowder [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.
- [12] 王兆春. 中国火器通史[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2015.
Wang Zhao-chun. History of Chinese firearms [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2015.
- [13] 宦朱佳. 明代火器研究——以火铳和火炮为中心[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2016.
HUAN Zhu-jia. Study of firearms in the Ming dynasty - centering on Singijeon and Cannon [D]. Hangzhou: Hangzhou Nor-

- mal University, 2016.
- [14] 刘旭. 中国古代火药火器史[M]. 郑州: 大象出版社, 2004.
LIU Xu. History of ancient Chinese gunpowder and firearms [M]. Zhengzhou: Elephant Press, 2004.
- [15] 于璞, 史爱君. 火药武器在宋代的产生与发展[J]. 经济师, 2006, 12: 290-291.
YU Pu, SHI Ai-jun. The creation and development of gunpowder weapons in the Song dynasty [J]. *Economist*, 2006, 12: 290-291.
- [16] (宋)曾公亮, 丁度. 武经总要 四十卷[M]. 北京: 商务印书馆, 1935.
(Song dynasty) ZENG Gong-liang, DING Du. *Wujing Zong-yao*, 40 volumes[M]. Beijing: The Commercial Press, 1935.
- [17] 赵凤翔. 《武备志》研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
ZHAO Feng-xiang. Research on WU BEI ZHI [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [18] 黄一农. 红夷大炮与明清战争[M]. 成都: 四川人民出版社, 2022.
HUANG Yi-nong. The red barbarian cannon and the Ming and Qing wars [M]. Chengdu: Sichuan People's Publishing House, 2022.
- [19] 刘鸿亮. 明清之际红夷大炮的威力概述[J]. 河南科技大学学报, 2003, 21(1): 13-17.
LIU Hong-liang. Outline on the power of Hong Yi Cannon during Ming and Qing dynasties [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Social Science)*, 2003, 21(1): 13-17.
- [20] MARK H F, KROSCWITZ J I. *Encyclopedia of polymer science and engineering*, 2nd edition [M]. New York: Wiley, 1985.
- [21] BIZOT A, BECKSTEAD M. A model for double base propellant combustion [C]//The Combustion Institute: Twenty-Second Symposium (International) on Combustion. 1989: 1827-1834.
- [22] Bhalarao M M, Gautam G K, Subramanian G V, et al. Nitramine double base propellants [J]. *Defence Science Journal*, 1996, 46(4): 207-214.
- [23] LI X, LIU X, CHENG Y, et al. Thermal decomposition properties of double-base propellant and ammonium perchlorate [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014, 115(1): 887-894.
- [24] SANGHAVI R, PILLAI A, VELAPURE S, et al. Studies on different types of nitrocellulose in triple base gun propellant formulations [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2003, 21(2): 87-95.
- [25] DAMSE R. Studies on the decomposition chemistry of triamino-guanidine azide and guanidine nitrate [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(2-3): 1383-1387.
- [26] OLIVIER L M, RICHARD S. The Noble-Abel stiffened-gas equation of state [J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(4): 046102.
- [27] RADULESCU M I. On the Noble-Abel stiffened-gas equation of state [J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(11): 111702.
- [28] JUHASZ A A, ROBBINS F W, BOWMAN R E, et al. Effects of perforation L/D ratio and slotting on stick propellant combustion [OL]. 1984.
- [29] 徐复铭. 21世纪先进发射药(2): 低敏感高能发射药——新配方、装药、点火和理论模拟技术[J]. 火炸药学报, 2003, 26(4): 1-4+22.
- XU Fu-ming. The insensitive high energy propellants in the 21th century [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellant*, 2003, 26(4): 1-4+22.
- [30] 王亚微. 高能低敏感发射药安定性与安全性研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
WANG Ya-wei. Study on stability and safety of high energy and low sensitive gun propellant [D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [31] 张远波, 轩春雷, 刘波. NC基高能低敏感发射药的低温抗冲击强度[J]. 火炸药学报, 2015, 38: 78-81.
ZHANG Yuan-bo, XUAN Chun-lei, LIU Bo. Low temperature impact strength of nitrocellulose based high energy-low vulnerability gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellant*, 2015, 38: 78-81.
- [32] 王泽山, 史先杨. 低温度感度发射装药[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
WANG Ze-shan, SHI Xian-yang. Low temperature sensitive launch charge [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [33] 周烨. 王泽山: 让中国火炸药技术傲视全球[J]. 中国科技产业, 2017, 5: 36-37.
ZHOU Ye. Wang Ze-shan: Making China's explosives and propellant technology stand out globally [J]. *Science & Technology Industry of China*, 2017, 5: 36-37.
- [34] 杭辽阔, 程劲松, 李立远, 等. 变燃速发射药的研究进展[J]. 山西化工, 2011, 31(2): 43-47.
HANG Liao-kuo, CHENG Jin-song, LI Li-yuan, et al. Current situation of variable-burning rate propellant [J]. *Shan Xi Chemical Industry*, 2011, 31(2): 43-47.
- [35] 萧忠贺, 贺增弟, 刘幼平, 等. 变燃速发射药的原理与实现方法[J]. 火炸药学报, 2005, 28(1): 25-27.
XIAO Zhong-liang, HE Zeng-di, LIU You-ping, et al. Principle and realizable approach of variable burning rate propellant [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellant*, 2005, 28(1): 25-27.
- [36] 李世影, 肖忠良, 李宇, 等. 某中小口径武器用梯度硝基发射装药效应[J]. 含能材料, 2023, 31(11): 1134-1140.
LI Shi-ying, XIAO Zhong-liang, LI Yu, et al. Study on the effect of nitro gradiently distributed propellant charge for a small and medium caliber weapon [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(11): 1134-1140.
- [37] SHI-YING LI, YU LI, YA-JUN DING, et al. One-step green method to prepare progressive burning gun propellant through gradient denitration strategy [J]. *Defence Technology*, 2023, 22(4): 135-143.
- [38] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
JIN Zhi-ming. Interior ballistics of guns [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [39] 王沫茹, 周拥荣, 金国瑞, 等. 双基发射药挤出式3D打印技术[J]. 含能材料, 2022, 30(9): 897-902.
WANG Mo-ru, ZHOU Yong-rong, JIN Guo-rui, et al. Extrusion 3D printing technology of double base gun propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(9): 897-902.
- [40] WANG Moru, JIN Guorui, HE Weidong, et al. 3D printing of gun propellants based on laminated object manufacturing [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2022, 37(9/12): 1246-1256.

Development Prospect of Gun Propellant and Charge Technology

XIAO Zhong-liang¹, DING Ya-jun¹, LI Chun-zhi²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Luzhou North Chemical Industries Co., Ltd., Luzhou 646003, China)

Abstract: As the functional unit to achieve the shooting and precise destruction of barrel weapons, the gun propellant holds a key and core technology status. In this paper, the development histories and evolutionary patterns of the gun propellant and charge technology were systematically summarized and analyzed. The research status and main problems were described across three levels: science, technology and products. Meanwhile, the future development trends of the gun propellant and charge technology were analyzed and prospected in terms of scientific exploration, technological innovation, and the application of products in weapon systems. This paper aims to provide reference for gun propellant researchers, industry management, and manufacturing companies to promote the industry's healthy development.

Key words: gun propellant; charge technology; science and technology; development prospects

CLC number: TJ55;O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024148

(责编:姜梅)