

文章编号: 1006-9941(2011)04-0464-05

## 发射药及装药的清洁燃烧技术概述

堵平, 何卫东, 廖昕

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 针对武器设计中提高能量利用率和降低射击污染的要求,对发射药及装药的清洁燃烧技术研究进行了初步概述。分析了发射药及装药清洁燃烧技术研究的重要意义,以及射击污染的来源,认为发射药设计和装药设计的不合理性是射击污染的两个主要来源;实现发射药和装药清洁燃烧的可行途径主要有:优化发射药的配方设计,设计高渐增性药型发射药,装药结构的合理化改进,新型号低污染材料的采用等,对上述措施进行集成效果则更好,建议在未来的相关研究中加以重视。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 发射药; 装药; 清洁燃烧; 射击污染

**中图分类号:** TJ5; TQ562

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.025

### 1 发射药及装药清洁燃烧研究简述

发射药作为身管武器的发射能源,自诞生之日起就发挥着极其重要的作用。为提高发射药的能量利用率和作功能力,对各种配方的发射药、发射药的药型、发射药的装药结构等都进行了充分的研究,武器的内弹道性能取得了长足的进步。随着发射药的发展,对其提出了清洁燃烧的要求;虽然对此进行了不少研究<sup>[1-3]</sup>,但问题始终未能得到充分解决。最早的黑火药,其能量低,燃烧烟雾大,射击残渣多;后来发明的单基药、双基药、三基药、混合硝酸酯发射药等,射击的污染情况有了明显的改善,但还是存在一定的问题,主要表现为:(1)变装药系统的小号装药射击残渣烟雾多(如图1,某火炮射击后炮闩和药室处可见明显的残渣)、弹道性能不够稳定;(2)自动武器的退壳、装填受到残渣的影响,射速提高困难;(3)发射药燃烧过程中产生的烟雾、火焰、热量特征信号等,易暴露作战目标,带来不安全因素;同时,燃烧的烟雾会影响士兵自身的观察视线,有毒气体对士兵的身体健康带来危害;(4)发射药及装药的不完全燃烧,降低了武器的能量利用率,造成了一定浪费;(5)产生的烟雾、毒气、固体残渣、废弃物等,对环境产生了破坏。

发射药及装药的研究,从诞生之日起到20世纪

90年代之前,主要集中在提高武器的效能上,其清洁燃烧问题并未真正引起研究者足够的重视,资料检索结果表明,关于此方面的文献报导比较有限。随着武器的发展和战争、环境的要求,人们逐渐认识到清洁燃烧的重要意义,这方面的深入研究明显增多。例如,Rose A. Pesce-Rodriguez<sup>[4]</sup>探讨了在JA2双基药中加入一定量尿素的方法,该法可减少60%左右的氮氧化物的产生,并降低火焰温度200K;王琼林<sup>[5-7]</sup>等研究了枪用发射药的射击烟雾特性,探讨了其产生的影响因素和测试方法;陈顺昌<sup>[8]</sup>等进行了射击残留物检验的研究,分析了射击污染的可能来源;Beyer, R. A.等<sup>[9-10]</sup>从改进点火着手,提高装药的清洁燃烧性能;张兆钧等<sup>[11]</sup>从装药元器件对清洁燃烧的影响入手,研究几种可燃药筒的燃烧特性,得到了装药元器件对清洁燃烧的影响规律;另外,还有研究者从氧平衡的角度<sup>[12-13]</sup>、配方设计的角度<sup>[14-18]</sup>、装药有害燃烧现象的利用<sup>[19]</sup>等方面,对发射药及装药的清洁燃烧进行了探索,取得了一定的效果。王洪杰<sup>[20]</sup>对发射药洁净燃烧技术的研究进展进行了初步的总结,主要集中于对发射药本身的非洁净燃烧进行了探讨,基本未涉及装药设计对燃烧污染产生的影响。总之,发射药及装药的清洁燃烧研究,已经取得了较大的进展;但是,离真正意义上清洁燃烧还有较大的距离,需要学者们进一步深入探索。

大力研究发射药及装药的清洁燃烧技术,是一项事半功倍的研究任务。完善的清洁燃烧技术,可以提高武器的综合性能,降低对环境的污染和对士兵健康的损

收稿日期: 2010-06-28; 修回日期: 2010-12-07

基金项目: 第九届火炸药青年基金(HZY09010301-5)

作者简介: 堵平(1969-),男,博士,主要从事含能材料装药设计研究。  
e-mail: dp1314@163.com

害,同时使发射药的能量得以更充分利用。本文对发射药及装药的清洁燃烧技术研究状况进行了初步概括和分析,阐述了该技术的重要意义,提出了其可能的发展方向,为发射药及装药的研究提供一定参考。



图1 某火炮刚性装药射击1发后的炮闩(左)和药室(右)状态  
Fig.1 The state of breechblock and chamber after rigid-charge of one gun having a shoot

## 2 发射药及装药燃烧的污染来源分析

### 2.1 发射药方面

发射药作为一种含能材料,其在发射过程中主要发生了以燃烧反应为主的化学反应,伴随着高压气体的膨胀作功,进行能-功转换。发射药燃烧特性主要是其燃速随着压力的增加而增加。在点火燃烧初期,由于此时尚未能建立起高的膛压,发射药在低压下燃烧,其燃烧机理与高压下不同,容易发生不完全燃烧的现象从而生成CO、NO、碳微粒残渣等,这类物质被高压气流吹出身管口后,会形成射击烟雾或二次火焰<sup>[17]</sup>等射击有害现象;发射药在高压下燃烧时,其燃烧机理与低压下不同,不完全燃烧的化学反应减少,产生的污染明显降低,此阶段非射击污染的主要来源。

发射药的配方设计,对于其清洁燃烧的影响极大。由于设计发射药配方时,需要考虑其能量性能、力学性能、加工性能、长贮性能、抗烧蚀性能等,加入了诸如增塑剂、安定剂、消焰剂、钝感剂、包覆剂等成分;这些成分多为不含能物质,易产生不完全燃烧现象,是射击污染的重要来源之一。设计发射药配方时,应尽量减少此类物质的加入。

发射药配方设计时的氧平衡是否合适也是产生射击污染的原因之一。负氧平衡程度较严重的发射药燃烧时,碳原子氧化不完全,将生成较多的CO有毒气体,甚至产生游离碳粒,而且CO易发生二次燃烧,在炮口产生二次焰。当配方为零氧平衡时,发射药燃烧理论上可完全转化为H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>和其他无害气体,并

且能量释放更加充分;正氧平衡配方的发射药在燃烧时,过剩的氧容易将硝化物中的氮元素氧化成有毒的氮氧化物(NO<sub>x</sub>),以及分子质量较大的CO<sub>2</sub>等,此时发射药的能量利用率同样会降低,而且生成了有毒气体污染环境,同时,还将带来另一负面效应——爆温明显升高。目前的一种发射药配方设计观点<sup>[12]</sup>,是将配方控制在零氧平衡或轻微的负氧平衡,在保证炮口二次焰在可接受程度下,控制燃烧产物中H<sub>2</sub>、CO等分子质量相对较小的气体成分在一定的范围内,以提高燃气的作功能力和能量利用率,此观点已得到不少研究者的认同。

### 2.2 装药方面

装药设计同样会对射击污染产生重大的影响。

(1) 不合理的发射药药型及组合,使得发射药的燃烧结束点偏前或偏后,导致烧蚀增大或燃烧不完全,从而引起射击污染。

(2) 点传火结构设计不恰当。点火药品种、数量选择不当带来污染,如选择黑火药作为点火药,其燃烧后将产生50%以上的颗粒污染物;点火后燃烧压力建立缓慢,导致低压下燃烧不完全;点火系统的结构及其在装药中的位置不恰当、传火药和传火具选择不当,会使得点传火异常;传火通道不畅使得发射药不能全面同时点火,引起局部燃烧不正常。

(3) 装药元器件带来的污染。在设计制造可燃药筒、可燃传火管、衬纸、紧塞具、中心管、装药布袋、点火药包布等参与燃烧的装药元器件时,为了保证力学强度、以及制造工艺的可行性,往往会添加不少非含能的粘合剂、补强材料、加工助剂等。这些成分相对于装药量,虽然不会占有太大的比例,但在装药的快速燃烧条件下,难以保证其充分燃尽,是残渣和烟雾的重要来源之一。

(4) 装药附加药剂如消焰剂、除铜剂、护膛剂、硅油等,其燃烧后也会带来一定程度的污染,如残渣、烟雾等。

## 3 实现发射药及装药清洁燃烧技术的可行途径

根据发射药及装药燃烧污染产生的来源分析,结合发射药及装药的具体特点,可采取以下技术途径,大幅度地降低武器射击污染,甚至实现发射药及装药的清洁燃烧。

### 3.1 发射药的配方设计

在发射药配方设计中,除考虑采用高能量、低烧蚀的材料外,应使所有物质处于合适的氧平衡;选择改善发射药氧平衡的黏结剂<sup>[12]</sup>,选用含能增塑剂改善加工性能、选择高分子含能粘合剂提高力学性能;利用新材

料、新技术改进发射药的燃烧性能,如采用微米或纳米级金属氧化物或有机酸金属盐<sup>[14-16]</sup>作为燃速催化剂,有目的地调节发射药在低压或高压下的燃速和燃速压力指数<sup>[21-22]</sup>,采用新型含能材料提高燃尽性等;在发射药中加入的助剂尽量采用新材料,如含氧量较高而又不含苯环的新型钝感剂<sup>[20]</sup>、不增加发射药烧蚀性的硅类纳米微胶囊包覆阻燃剂的新型缓蚀剂等。

### 3.2 发射药的药型设计

在制造发射药时,考虑利用药型的变化,调控发射药的点火性能,控制发射药燃气生成规律。目前已经使用或考虑使用的技术有超多内孔增燃、表面处理、受燃气压力作用而扩孔的燃烧、异型火药、阻燃钝感、药粒复合、变燃速发射药等。

### 3.3 装药设计

(1) 点传火设计。如采用清洁点火药(CBI)品种,改进装药结构中的点火源、点火强度和点火位置;优化传火通道的分布结构、改善的通畅性;采用分步点火技术、可变点火强度技术;采用附加药包技术,提高小号装药下的初始燃烧压力;采用新型点火技术,如等离子体点火<sup>[23]</sup>、激光点火等<sup>[9,24]</sup>。

(2) 装药结构设计。针对各类武器的不同弹道特点,对装药结构进行优化设计。采用组合装药、混合装药、异型装药、模块装药等技术集成,有目的地控制装药的燃气释放过程,使燃气的产生尽量符合内弹道各个阶段的最优要求, $p-t$ 曲线的平台效应扩大;尽量减少发射药在低压环境下的燃烧时间,同时控制装药的最大压力,在提高装药能量利用率的基础上,明显降低燃烧污染。

(3) 装药新概念、新技术的设计与应用。如采用阻燃包覆药与主装药的混合装药温度补偿技术(LTSC低温感装药技术)<sup>[25]</sup>,可实现装药射击的零梯度弹道效果,使得低温下的射击初速与常温、高温下保持一致,明显降低了传统装药在低温下射击污染的严重程度;在大口径火炮变装药系统中,利用含内孔火药的侵蚀燃烧现象<sup>[19]</sup>,改变火药的燃烧规律,提高小装药量、小射程用发射装药的膛压,这样一方面提高了初速和射程,另一方面,明显降低了射击污染;再如,采用特高燃速装药技术、提高装填密度的密实装药技术等,均可实现降低射击污染的目的。

(4) 装药元器件设计与制造。采用高度可燃的装药元器件如药筒、传火管、衬纸、紧塞具、中心管等。在保证使用强度的前提下,在设计制造时,尽量采用含能材料,减少非含能粘合剂、钝感剂等的加入,或采用含

能高分子助剂等。

发射药及装药的清洁燃烧技术,是一项系统工程,在实际运用时,应根据具体的弹道要求,进行设计和制造的技术集成优化,达到清洁燃烧的目的。例如,为解决图1中的射击污染,集成采用优化点传火和装药设计、发射药表面增燃处理、改进可燃元器件的配方等技术手段后,获得了两种改进方案,经射击试验证明,均取得了良好的效果,残余物数量最大降低了85.6%,符合设计要求,如表1所示。

表1 火炮装药方案改进前后燃烧残余物重量

Table 1 Burning residue weight of gun charge project improving fore-and-after

charge project	shoot residue weight/g	depressing ratio of residue/%
project	12.54	-
improving project 1	2.40	80.9
improving project 2	1.80	85.6

## 4 结束语

自从火药发明以来,发射药及装药的清洁燃烧技术一直在研究发展之中,但前期明显重视不够。近年来,人们充分认识了清洁燃烧对作战效能、人员健康、环境友好的重要意义,加强了此类课题的研究投入,取得了较好的效果。但是,与世界先进水平相比,我国在此方面尚存在明显的差距。例如,我国生产的某外贸型号火炮在中东技术比武时,射击的烟雾、膛内污染明显高于国外型号,严重时射击残渣的积累甚至影响下一发射击的装弹和关门击发,药室和炮闩上的射击固体残余物质量高于法国同类型火炮10倍以上;尽管我国火炮的弹道指标性能先进,但综合评判结果不理想。目前,国内关于发射药及装药的清洁燃烧技术的研究尚处于起步阶段,该新技术在制式弹药中的应用有待加强。

发射药及装药的清洁燃烧技术,是新世纪发射药研究的一个重要发展方向。王泽山院士曾经指出<sup>[26]</sup>,作为身管武器的能源——新世纪内,其它能源很难替代发射药的地位,但20世纪忽视了发射药发展所带来的负面效应,已经对世界的生态和环境造成了影响。对发射药清洁燃烧技术的研究,是提高能量利用率和保护环境的有效、双赢的举措,应该引起相关学者的充分重视。

## 参考文献:

- [1] Cohen N S, Strand L D. Nitramine smokeless propellant research. ADA054311 [R], 1977, 11.
- [2] Per-Anders Persson. Can re-use of demil explosives and propellants in commercial blasting be made environmentally acceptable [C] // The Proceedings of the 26th DoD Explosives Safety Seminar (26th), 1994, 8.
- [3] Lamnevik S, Dyhr K, Pettersson M L. Skadliga metaller i tillsatsmedel till kanonkrut och dubbelbasraketrut (environmentally harmful metals in additives for propellants). PB2000103138 [R], 1999, 1.
- [4] Rose A Pesce-Rodriguez, Robert A Fifer, Joseph M Heimerl. "Clean Burning" low flame temperature solid gun propellants. ADA307269 [R], 1996, 4.
- [5] 王琼林, 刘少武, 吴建军. 钝感剂对发射药枪口烟雾特性影响的研究[J]. 火炸药学报, 1998(3): 17-19.  
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, WU Jian-jun. Study on effect of deterrents on gun muzzle smoke [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1998(3): 17-19.
- [6] 王琼林, 刘少武, 谭惠民, 等. 具有洁净燃烧特征的高分子钝感枪药[J]. 火炸药学报, 2003, 26(4): 5-7.  
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, TAN Hui-ming, et al. Study on the clean-burning gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(4): 5-7.
- [7] 王琼林, 刘少武, 张远波, 等. 枪用发射药燃烧残渣的测试方法[J]. 火炸药学报, 2006, 29(5): 57-59.  
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, ZHANG Yuan-bo, et al. Test method of combustion remains of gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(5): 57-59.
- [8] 陈顺昌, 杨瑞琴. 射击残留物检验研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2009, (59)1: 13-17.  
CHEN Shun-chang, YANG Ri-qin. Studies of gunshot residue test [J]. *Journal of Chinese People's Public Security University (Science and Technology)*, 2009, (59)1: 13-17.
- [9] Beyer R A, Boyd J K, Howard S L, et al. Laser ignition of standard and modified 155-mm howitzer charges. ADA368860 [R], 1999, 8.
- [10] Gehring J W, Rindner R M, Seals William. Hazard classification testing of M-10 and M-1 propellants used in 81 mm. ADA073764 [R], 1979, 6.
- [11] 张兆钧, 徐文娟, 张会生. 三种可燃药筒燃烧特性分析[J]. 兵工学报, 1996, 17(1): 26-31.  
ZHANG Zhao-jun, XU Wen-juan, ZHANG Hui-sheng. Analyses on the burning properties of three kinds of combustible cartridges [J]. *Acta Armamentarii*, 1996, 17(1): 26-31.
- [12] 郑东升, 梁磊. 提高发射药氧平衡的途径[J]. 山西化工, 2009, 29(4): 29-31.  
ZHENG Dong-sheng, LIANG Lei. Perspectives of high-oxygen-balanced gun propellant [J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2009, 29(4): 29-31.
- [13] 吕智星, 贺增弟, 萧忠良, 等. 单基发射药氧平衡调节途径[J]. 含能材料, 2010, 18(5): 587-591.  
Lü Zhi-xing, HE Zeng-di, XIAO Zhong-liang, et al. Adjustment of oxygen balance for single-based propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(5): 587-591.
- [14] Makoto Kohga, Saeko Nishino. Burning characteristics of ammonium nitrate-based composite propellants supplemented with ammonium dichromate [J]. *Propellants Explos Pyrotech*, 2009, 34: 340-346.
- [15] Ward J R, White K J. Effect of igniter gases on wear-reducing additive in the 155 mm XM201E2 propelling charge. ADA0560433 [R], 1978, 8.
- [16] Egorshv Viacheslav Yu, Sinditskii Valery P, Zbarsky Vitold L, et al. Synthesis and combustion study of metallic salts of trinitrophenol [C] // The 2003 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics, 2003: 30-37. Guilin, China.
- [17] 郑东升. AN对枪炮二次焰的影响[J]. 天津化工, 2010, 24(3): 36-38.  
ZHENG Dong-sheng. Effect of AN on muzzle flash of gunnery [J]. *Tianjin Chemical Industry*, 2010, 24(3): 36-38.
- [18] 马忠亮, 吴昊, 何利明, 等. HAN基凝胶发射药的性能[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(3): 3-5.  
MA Zhong-liang. Performances of HAN-base gel propellant [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2008, 29(3): 3-5.
- [19] 张洪林. 侵蚀燃烧在发射药内弹道中的应用研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(2): 129-133.  
ZHANG Hong-lin. Application research of erosive burn in propellant charge interior ballistics [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(2): 129-133.
- [20] 王洪杰. 发射药洁净燃烧技术研究进展[J]. 山西化工, 2008, 28(3): 26-28.  
WANG Hong-ji. Study on the clear burning gun propellant [J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2008, 28(3): 26-28.
- [21] 廖昕, 马方生, 堵平, 等. 不同催化剂对降低双基火药燃速压力指数效果的影响[J]. 火炸药学报, 2007, 30(4): 25-28.  
LIAO Xin, MA Fang-sheng, DU Ping, et al. Influence of different catalyzers on decreasing burning-rate pressure exponent of double-base propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(4): 25-28.
- [22] 赵凤起, 徐司雨, 郑林, 等. 燃烧催化剂对太根发射药燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2007, 30(4): 38-42.  
ZHAO Feng-qi, XU Si-yu, ZHENG Lin, et al. Effect of combustion catalysts on the combustion properties of TEGDN gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(4): 38-42.
- [23] 肖正刚, 应三九, 周伟良, 等. 低敏感高能发射药等离子体点火研究动态[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 633-638.  
XIAO Zheng-gang, YING San-ji, ZHOU Wei-liang, et al. Progress in plasma ignition of insensitive high energy propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 633-638.
- [24] 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: 275-277.  
WANG Ze-shan, HE Wei-dong, XU Fu-ming. Theory and Technology of Propellant Charge Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 275-277.
- [25] 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. Propelling Charges with Low-temperature Sensitivity [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [26] 王泽山. 发射药技术的展望[J]. 华北工学院学报(社科版), 2001: 36-40.  
WANG Ze-shan. Development and prospect of propellant techniques [J]. *Journal of North China Institute of Technology (Social Sciences)*, 2001: 36-40.

## A Brief Summary about Clean Burning Technology of Gun Propellant and Charge

DU Ping, HE Wei-dong, LIAO Xin

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Aiming at the request of improving energy availability and reducing shoot pollution, clean burning technological research of gun propellant and charge is summarized. Primary source of shoot pollution and the important significances of clean burning technological research of gun propellant and charge have been analysed. It is considered that two primary source of shoot pollution are irrationalities of gun propellant design and charge design. The feasible approaches of realizing gun propellant and charge clean burning have been summarized, they are optimizing design-balance of propellant prescription, designing high progressive propellant, improving reasonable propellant charge structure, adopting new low-pollution materials, etc., and integrating those methods will obtain better effect. It is suggested that clean burning technology should be emphasized in the relevant research in the future.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnic technology; gun propellant; charge; clean burning; shot pollution

**CLC number:** TJ5; TQ562

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.025



### 第三届中俄青年“材料学-新型与先进材料”科技研讨会通知

为促进中国工程物理研究院与俄罗斯联邦原子能集团公司青年科技人员之间的学术交流,中国工程物理研究院与俄罗斯原子能集团公司拟定于2011年11月16~18日在中国举办第三届中俄青年科技研讨会。会议由中物院化工材料研究所,主题为“材料学-新型与先进材料”。

**会议主题: 材料学-新型与先进材料**

- 1) 新型含能材料: 高品质含能材料、微纳米含能材料、新型单质炸药、高性能复合炸药;
- 2) 特种合金材料: 钷、铀等合金材料;
- 3) 纳米功能材料: 纳米高分子材料、纳米陶瓷、纳米多孔金属材料、纳米薄膜材料;
- 4) 材料先进分析、检测与评估: 材料的物理性能、化学结构、无损检测; 材料环境模拟、性能变化、失效分析、模拟计算、寿命评估。

联系人: 曾俊玮(0816-2485316,18681677377); 肖泽梅(0816-2490411,13668335879)

传 真: 0816-2495856

E-mail: zengjw@caep.ac.cn; gjb@caep.ac.cn