

文章编号: 1003-1480 (2022) 03-0075-06

国内外报废弹药处理技术发展现状

史明明¹, 万丽强¹, 陆鹏¹, 麻吉¹, 刘五一¹, 何益艳²

(1. 中国人民解放军32322部队, 新疆 乌鲁木齐, 830002; 2. 中国人民解放军陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄, 050003)

摘要: 为促进报废弹药处理向着经济、绿色、高效和安全方向发展, 简述了弹药报废失效的原因及危害, 总结了近年来国内外报废弹药处理技术发展概况, 综述了报废弹药拆卸、倒空和销毁相关技术和装备的发展现状。基于此, 认为报废弹药处理自动化作业水平不高、销毁方式相对粗放和回收利用手段单一, 造成目前人员安全风险增加、环境污染和资源浪费等问题, 相应的对策建议包括: 研发新型自动化销毁装备、创新销毁处理技术和积极开发回收利用技术等。

关键词: 报废弹药; 拆卸; 倒空; 销毁; 发展现状

中图分类号: TJ410.89 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.03.017

Present Situation of Obsolete Ammunitions Disposal Technologies Development at Home and Abroad

SHI Ming-ming¹, WAN Li-qiang¹, LU Peng¹, MA Ji¹, LIU Wu-yi¹, HE Yi-yan²

(1. 32322 Unit of PLA, Urumqi, 830002; 2. Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang, 050003)

Abstract: To improve the economic, green, efficient and safe development for obsolete ammunitions disposal, this paper briefly described the causes and harms of the obsolete ammunitions, summarized the development of the obsolete ammunitions disposal technology at home and abroad in recent years, as well as the development status of the technologies and equipment related to the disassemble, emptying and destruction of the obsolete ammunitions. Based on this, it is considered that the low level of automation in the disposal of obsolete ammunitions, the relatively extensive destruction methods and the single means of recovery and utilization have resulted in the increasing safety risk of personnel, environmental pollution and waste of resources, etc., the corresponding countermeasures and suggestions include research and development of new automatic destruction equipment, innovation of destruction treatment technologies and active development of recycling technologies, etc.

Key words: Obsolete ammunitions; Disassemble; Emptying; Destruction; Development actuality

火炸药由多种高活性化学组分构成, 易受环境和机械应力等外界因素影响, 从而使其理化性能发生变化, 进而导致相关弹药出现性能失效、过期报废问题。因弹药的特殊性, 纵使细微的变化, 其仍具有较强的危险性与杀伤力, 因此必须对此类弹药进行处理, 使其失去危害性。报废弹药处理具有危险系数高、技术要求强、工序环节多以及组织实施严等特点, 如何确保该项工作顺利高效开展而不影响部队建设和社会

稳定已成为当今热点问题, 各国为此进行了诸多研究^[1]。本文综述了国内外报废弹药处理发展概况及报废弹药拆卸、倒空和销毁技术研究现状, 总结了国内报废弹药处理技术存在的问题并提出了相应对策。

1 国内外报废弹药处理发展概况

国内外报废弹药的处理方式大致可划分为3个阶

收稿日期: 2021-11-12

作者简介: 史明明(1988-), 男, 工程师, 从事弹药检测与销毁研究。

段：以深土掩埋、深海倾倒及粗放焚烧为主的初级原始化处理阶段；以机械化拆卸、切割及倒空为主的中级机械化处理阶段，以及融合智能化、自动化及经济环保化等技术手段的高级现代化处理阶段^[2]。其中，初级原始化处理阶段主要局限于技术和社会条件的制约，存在安全隐患。中级机械化处理阶段在提高销毁效率的同时，也对处理过程中的环保问题提出了明确要求。高级现代化处理阶段处理工艺更加科学、管理程序更加规范，处理过程自动化和智能化特点更加明显，人员参与度进一步得到降低。

因各国军事发展进程快慢、技术水平高低、综合国力强弱等不尽相同，其相应的弹药销毁处理技术水平存在一定差异，主要可划分为以 G7 国家为代表的发达国家技术层次，以及以上海合作组织等国家为代表的发展中国家技术层次。发达国家因工业基础好、科技水平高、经济实力强等优势，具备较先进的报废弹药处理技术和装备。我国作为发展中国家代表，报废弹药处理工作起步晚、基础薄，但经过几十年的实践发展，已达到中级机械化处理阶段，并在个别环节积极向自动化、智能化过渡发展^[3]。

2 国内外报废弹药处理技术研究现状

2.1 拆卸技术研究现状

拆卸是指利用一定的技术手段将报废弹药拆卸成元件或部件的技术处理过程，该技术可降低报废弹药的危险性，对有利用价值材料进行回收再利用，并对有毒害无用材料进行无害化集中处理，从而提高经济、环保和安全效益^[4]。该方法主要适用于报废弹药批量大、回收材料价值高及安全条件好的情况^[5]。

2.1.1 自动拆卸技术

随着工业自动化技术的应用与普及，计算机视觉、柔性技术和智能管控等高新技术被广泛应用于报废弹药的拆卸。其中较具代表性的是美国桑迪亚国家实验室研制的一套自动拆卸弹药系统^[6]，如图 1 所示。其运用最先进的计算机视觉技术控制机械手拆弹，可拆卸 30 ~ 120mm 口径的定装弹药或地雷等^[3,5]。此外，JAKUSZ 公司针对每种弹药的局部或全部拆卸流程，

开发了与之匹配的自动拆卸机器人，并可回收爆炸性材料^[7]。



图 1 桑迪亚自动拆卸弹药系统

Fig.1 Automatic disassemble ammunition system of Sandia

国内长春汇维科技股份有限公司研制了一种可移动弹药销毁系统，该系统可实现小口径炮弹（25 ~ 37 mm）、木柄手榴弹和无柄手榴弹的自动化分解^[8]。

2.1.2 新型切割技术

在报废弹药拆卸处理过程中，通常需对报废弹药的金属弹体进行切割以获取弹药内部装填物。采用常规物理刀具切割往往会因机械摩擦而使金属弹体急剧升温，影响报废弹药拆卸流程的安全性^[9]。为此，以下几种典型的新型切割技术因各自特有的优势被应用于报废弹药的弹体切割工艺中。

(1) 高压磨料水射流切割技术。该技术是一种利用高压（100MPa 以上）预混合磨料水射流切割报废弹药金属壳体且不产生火花、热变形或热效应的冷态物理切割技术。在切割敏感弹药时，可抑制炸药起爆，无有毒或有害气体，安全可靠度不低于 99.52%。操作过程中两相预混合磨料水射流相对三相在原理、火花、静电以及工作效率更具优势^[10]。意大利 Caretta Technology 公司研发的高压磨料水射流切割系统，如图 2 所示，可用于常规报废弹药的清洁、切割和回收等^[11]。



图 2 高压磨料水射流切割系统

Fig.2 High pressure abrasive water jet cutting system

国内北京水刀坊科技有限公司开发了适用于野外作业的便携式水射流切割系统，如图 3 所示。该系统可切割壳体厚度在 0 ~ 20mm 内的报废弹药，且设

备实战性及机动性均较高，能够在多种复杂环境下实现快速转移^[12-13]。



图3 便携式高压水射流切割系统

Fig.3 Portable high pressure water jet cutting system

(2) 高压液氮低温切割技术。该技术是一种利用高压液氮系统所具有的高压与低温特点，对报废弹药金属壳体完成瞬时切割而不与切割废料混合的冷态物理切割技术。高压液氮切割系统压力可高达 350 MPa，流量达 1~10L/min，温度达-140℃，在对弹体瞬时完成切割的同时，液氮迅速挥发，不会与切割下来的废料混合，便于材料分类回收。现阶段的实际应用表明该方法在处置主炸药及单质炸药时具有一定的有效性，且因切割完成后低温液氮的挥发，该技术切割造成的废料比较单一，不会产生二次污染^[9]。

(3) 激光飞秒切割技术。该技术利用能量远超报废弹药金属壳体阈值的激光脉冲，在极短时间内被金属吸收后瞬间气化，实现冷切割效果，如图 4 所示。在采用传统切割方法时，切割过程产生的热量会不断地传递到接触的炸药中，正在加工的炸药吸收的热量达到一定范围后，其热感度和机械感度随之升高，安定性降低，容易发生反应甚至爆轰。基于安全考虑，该技术针对高能炸药的切割受到一定的限制^[14]。

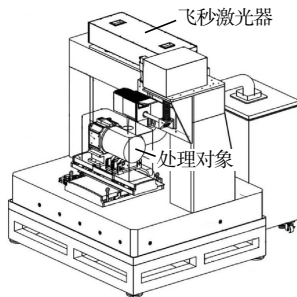


图4 激光飞秒切割系统

Fig.4 Laser femtosecond cutting system

2.2 倒空技术研究现状

倒空是指通过一定的技术手段将弹药元件壳体内部的火药、炸药等含能材料倒出的技术处理过程。常

用的倒空处理技术包括升温融化、高压液体射流和水力空化等倒空技术^[15]。

2.2.1 升温融化倒空技术

该技术主要通过高温蒸汽、高压釜或热水浴对浇铸式或压装式 TNT 装药以及梯萘混合装药的报废弹药进行加热升温，使其中低熔点的 TNT 组分温度升高至其熔点以上而熔化，进而使其顺利从弹壳中自行流出，达到倒空装药的目的。此技术仅应用于含有低熔点炸药组分的报废弹药，并且会产生污染环境的冷凝废水，如图 5 所示。



图5 蒸汽水煮融化倒空 TNT

Fig.5 TNT melting out by boiling with steam method

基于该原理，在改进加热方式方面，罗同杰和向红军等通过电磁感应加热的方式直接对金属壳体进行加热，向红军还通过造粒机将不溶于水的组分制成药粒^[16-17]。左军等^[18]分析了通过微波加热熔融 TNT 的潜在价值，并对其安全性进行了试验研究。黄英珂等^[19]通过 PLC 实现了 TNT 炸药蒸汽倒药自动控制。

2.2.2 高压液体射流倒空技术

该技术主要采用超高压水或液氮等液体产生的巨大冲击力将装药发生脆性断裂、破碎和脱落，以达到倒药的目的^[20]，如图 6 所示。



图6 高压水射流分离火炸药

Fig.6 Extraction of explosive materials by high-pressure water jet method

由于高压水射流工艺固有的缺陷，安全性问题依

然较为突出^[1]。郁红陶等^[21-22]利用数值模拟和试验手段研究了高压水射流作用下不同组分丁羟推进剂的压力、温度和组分变化,认为高氯酸铵、二茂铁组分含量对升温影响较大,可能被机械或静电火花点燃。美国伊利诺斯理工学院利用超高速摄影机,进行了高压水倒药的安全性试验,使高压水的速度高达2000m/s,未发现炸药的爆炸反应,证明了压力控制在45~70MPa时安全上是可行的。自动控制技术虽进一步确保了工作人员的安全,但处理效率低、生产成本高,特别是高压液体采用水时,将产生大量污染废水^[22-24]。

2.2.3 水力空化倒空技术

该技术主要将水流通过变径截面而改变流速和压降,形成大量3~5 μm 的空泡,其在快速接近固体壁面时迅速破裂,形成微射流和冲击波,进而对固体介质产生剥蚀作用。此技术具有安全性高、工艺流程简单、适用性强的优点。Man HT^[25]和张玄玄^[26]等分别对淹没条件下缩放型喷嘴内外的流场特性和单喷嘴空化水射流倒药筒物理模型进行了仿真分析。

郭萌萌等^[27]通过数值模拟和试验研究认为空化水射流中轴线速度总体趋势逐渐衰减,压力与药块粒径存在成反比的关系。

2.3 销毁技术研究现状

国内外在弹药销毁方面常用方法主要有焚烧、爆炸、化学分解、紫外线氧化法、微波等离子体、电子束处理等。其中,焚烧和爆炸销毁因技术要求低,是目前国内应用较普遍的技术,而其它销毁方法的技术要求和经济成本相对较高,目前尚停留在国外试验阶段或小规模的尝试性应用。

2.3.1 焚烧销毁技术

该技术通过高能燃烧剂燃烧产生的高温火焰熔穿弹药金属外壳体,进而使弹体内装药稳定燃烧。对于无和已失去爆炸性,或虽有爆炸性但在燃烧时不易由燃烧转为爆轰的弹药,均可采用该技术进行销毁。此销毁方式对技术和场地的要求不高,在销毁过程操作简单。其缺点是设备维护和销毁成本高,且会产生有毒有害物质。王浩和宋佳星等分别研究了不同高能燃烧剂在弹药销毁过程中的效果,常见的用于销毁未

爆弹药的高能燃烧剂以铁铝型高能燃烧剂为主^[28-29]。为保护环境不受污染,部分焚烧销毁系统将燃烧后的所有气体通过过滤系统净化,产生的废钢料可再次回收用于再加工,且销毁过程产生的热能可用于房屋供热等^[30]。

2.3.2 爆破销毁技术

该技术是将引爆炸药放在待销毁弹药的特定位置,通过引爆炸药引爆报废弹药,从而达到销毁的目的(图7)^[31]。



图7 爆破销毁技术

Fig.7 Ammunition disposal with blasting destruction technology

对于技术状态无法确认以及能完全爆轰或被爆轰所毁坏的爆炸物品,通常采用爆破技术进行销毁。根据爆破销毁的组织形式可分为露天销毁和封闭销毁或平地销毁和坑道销毁。封闭销毁相对露天销毁安全性和可靠性较高,但初期投资大,适合于销毁业务相对频繁的单位。坑道销毁相对平地销毁破片飞散距离小、爆破彻底,但不适用于起爆后的未爆弹和装黄磷的弹丸。

3 国内外报废弹药处理技术发展特点

随着世界各国对报废弹药处理技术安全、绿色和经济的重视以及社会科学技术的发展,报废弹药处理技术发展特点主要集中在技术安全可靠、科学合理性以及环保经济性3个方面。

3.1 确保处理技术安全可靠

随着现代控制技术、电子技术及计算机技术发展,报废弹药处理自动化程度逐渐升高,在一定自动化水平下,智能化和柔性化成为了当前报废弹药处理技术的发展趋势。以上技术的应用减少了人工现场作业,一方面确保了弹药工作人员的安全,另一方面也

加快了处理速度、节约了费用及提高了效率。

3.2 确保技术发展科学合理

随着报废弹药处理逐步摆脱传统的原始化处理,其技术体系逐渐趋向全流程、全链条和全系统,并逐渐注重其回收再利用处理技术和环境适应性技术,而在相关火炸药设计时就考虑到了相应弹药的后期报废处理的“可回收、可利用、可再循环”特性。

3.3 确保技术应用环保经济

随着环保成为全球性问题,报废弹药处理无污化逐渐得到世界各国的重视,露天烧毁或炸毁已不能满足要求。结合当前先进技术,炸药与弹体分离技术、含能材料回收利用技术、高价值元部件再利用机制等应运而生,均为报废弹药处理的可回收和可利用奠定了技术基础,进而确保报废弹药处理环保经济。

4 国内处理技术存在的问题及对策

4.1 存在问题

4.1.1 自动化作业水平不高

报废弹药处理技术研究较多,但相关成熟装备少,且不成体系,各环节还依赖人工操作和半自动化。因待销毁的报废弹药本身存储较久,安全状况不稳定,在外部环境控制不力情况下,极易因外力的作用发生燃烧或爆炸。另外,作业过程中人员长期接触有毒危险品,也会对身体健康造成损害。

4.1.2 销毁方式相对粗放

因弹药销毁资源回收利用技术的限制,当前多数弹药的销毁仍停留在炸毁和烧毁,销毁作业产生的“三废”问题并未得到妥善解决。特别是对于不便于分解拆卸的弹药和火工品元件,多是采取以上2种处理方式,销毁过程中无法在源头上控制“三废”问题的产生,环保问题日益尖锐^[9]。

4.1.3 回收利用手段单一

作为报废弹药处理的核心技术之一,回收利用技术主要包括高价值成分回收和高性能转化回收技术。当前火炸药利用技术薄弱、组分萃取技术不成熟,报废弹药弹丸装药倒空仅依赖于加热法,其他炸药缺少

很有效的利用方法,技术力量整体不强,技术研究不足^[32]。

4.2 对策建议

在分析国内报废弹药销毁研究成果基础上,考虑到国内在此方面存在的不足,国内报废弹药的发展建议重点关注以下3个方面。

4.2.1 研发新型自动化销毁装备

结合国内报废弹药销毁任务的特点,在确保新型装备研发针对性的基础上,加强自动控制技术、机器人技术、物联网技术以及配套设备的应用研究,使销毁设备能配套、成体系、全流程,逐步实现销毁作业自动化、智能化、一体化和无人化,以提高销毁作业安全性和作业效率。

4.2.2 创新销毁处理技术

针对不同类型的报废弹药,积极探索和研究销毁作业的新技术、新方法和新工艺,从源头上不断提高销毁作业过程中可回收材料的纯度,降低“三废”的排放量,并可融合环境工程领域“三废”处理技术,对销毁作业过程中产生的“三废”进行处理,进一步减轻报废弹药销毁给环保带来的压力。

4.2.3 积极开发回收利用技术

根据弹药的处理过程,按照安全、环保、高效和经济,从系统和体系出发积极借鉴及研究适合我国报废弹药处理现状的炸药与弹体分离技术和含能材料回收技术,提高高价值元部件返厂再利用,从而降低消耗,提升资源利用效率。

5 结语

报废弹药处理是世界各国共同面对的重要课题,采取先进的技术手段对报废弹药进行安全、绿色、经济处理是报废弹药处理的重要发展方向。发达国家在报废弹药处理上积累了丰富经验,而我国起步晚、进度慢,总体销毁处理技术水平不高。借鉴和吸收发达国家成熟经验,对我国低成本、绿色、高效安全回收处理废旧弹药具有重要意义。为此,通过对国内外废旧弹药处理技术的研究归纳,可为国内自动化销毁装

备研发、销毁处理技术创新及回收利用技术开发取得新的突破提供重要参考。

参考文献:

- [1] 全毅,刘炎,黄风雷. 废旧弹药销毁处理技术研究进展[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(05): 1 910-1 923.
- [2] 曹海庆,刘万波,白冬龙. 报废弹药销毁处理的安全防范措施[J]. 价值工程, 2012, 31(28): 320-321.
- [3] 徐其鹏, 陈松, 罗志龙, 等. 国外废旧弹药回收全流程技术进展[J]. 飞航导弹, 2016(01): 67-73.
- [4] 李金明, 王国栋, 张玉令, 等. 报废弹药拆卸销毁安全性探讨[J]. 工程爆破, 2016, 22(01): 46-48.
- [5] 李全俊, 王国辉, 雷林, 等. 废旧弹药拆分技术现状与发展[J]. 兵工自动化, 2018, 37(05): 93-96.
- [6] 蓝海星智库. 全商用现货构建的弹药拆卸机器人[EB/OL]. 2019-9-16[2020-1-28]. <http://dy.163.com/v2/article/detail/EN2BSL980515E3KM.html>.
- [7] Jakusz. Jakusz offer munitions dismantling technologies [EB/OL]. 2019-10-12[2020-1-28]. <http://www.cn.jakusz.com/offer/munitions-disposal/munitions-dismantling-technologies.html>.
- [8] 徐兆明, 闫立凯, 杨晓波. 手榴弹与小口径炮弹移动式销毁系统[J]. 兵工自动化, 2019, 38(08): 43-45,84.
- [9] 任青君,李宾频,姚勇. 浅谈常规报废弹药销毁新技术[J]. 科协论坛(下半月), 2010(10): 69-70.
- [10] 呼延曹婧,蒋大勇,贾鹏. 基于前混合磨料水射流技术排爆机器人的设计与试验[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(09): 85-89.
- [11] Army Technology. Caretta technology-waterjet robotic demilitarisation systems [EB/OL]. [2020-1-31]. <https://www.army-technology.com/contractors/mines/caretta-technology/>.
- [12] 水刀坊科技有限公司. 产品中心[EB/OL]. 2020-1-10 [2020-4-1]. <http://www.bjsdf.net/product.asp?a=1>.
- [13] 罗同杰,孙长稳,杜文胜,等. 废旧单兵破甲弹高压水切割拆解设计和技术探析[J]. 价值工程, 2014, 33(04): 305-306.
- [14] 曹涛,陈炜,金建峰,等. 基于 Held 判据的线型聚能切割器结构优化[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(08): 85-89.
- [15] 霸书红,沙育林,陈永进,等. 废旧弹药装药倒空方法的研究进展[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 291-295.
- [16] 罗同杰, 杜文胜, 赵运, 等. 基于电磁加热法的防坦克地雷中所装药料处理技术[J]. 兵工自动化, 2014, 33(02): 27-29.
- [17] 向红军, 雷彬, 邢彦昌. 感应制热式弹丸装药倒空技术安全性分析与设计[J]. 火箭与制导学报, 2015, 35(04): 47-50.
- [18] 左军,韩超,雍炼. 微波加热熔融 TNT 安全性的实验研究[J]. 含能材料, 2006(04): 283-285,289.
- [19] 黄英珂, 郭胜强, 李惠明, 等. 梯恩梯蒸汽倒药自动化控制系统研究[J]. 爆破器材, 2012, 41(01): 38-40.
- [20] 郁红陶, 张庆明, 何远航. 高压水射流与丁羟推进剂相互作用的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(03): 266-270.
- [21] 郁红陶, 何远航, 张庆明. 高压水射流冲击固体推进剂的温度效应实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2008(03): 189-191.
- [22] 伍凌川,雷林,张博,等. 废旧弹药高压水射流处理技术国外应用现状[J]. 兵工自动化, 2016, 35(10): 77-79.
- [23] 罗同杰,张保良. 仿形钻削与干冰喷射复合倒空弹丸装药自动生产线[J]. 兵工自动化, 2016, 35(02): 90-92.
- [24] 罗同杰,张保良,宁灵生. 高压水射流技术倒出弹体装药的试验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2014, 35(02): 122-126.
- [25] Man H T, Luo X B, Ding Y K, et al. Study on the effect of nozzle inlet pressure on the efficiency of explosive removal using hydrodynamic cavitation [J]. Computer Simulation, 2016, 33(03): 13-17.
- [26] 张玄玄,陈松,廉鹏,等. 空化水射流倒空弹药装药的试验研究及数值模拟[J]. 火炸药学报, 2019, 42(04): 415-420.
- [27] 郭萌萌,廉鹏, 陈松,等. 基于水力空化原理倒出装药的模拟与实验[J]. 兵工自动化, 2019, 38(08): 58-61.
- [28] 王浩,郭涛,丁文,等. Al/MnOx 锰系高能燃烧剂对模拟金属外壳弹药的销毁能力研究[J]. 火工品, 2018(6): 14-18.
- [29] 宋佳星,靳向,周鹏,等. 火焰射流型高能燃烧剂在废旧弹药销毁中的应用刍探[J]. 火工品, 2016(5): 46-49.
- [30] Jakusz. Munitions destruction technologies [EB/OL]. 2020-4-14[2021-5-12]. https://en.jakusz.com/offer/munitions_disposal/nunitions-destruction-technologies.html.
- [31] 警用装备网. 美军如何销毁过期弹药 [EB/OL]. 2019-11-29 [2021-7-15]. <http://cpspew.com/news/997693>.
- [32] 田轩,王晓峰,黄亚峰,等. 国内外废旧火炸药绿色处理技术进展[J]. 兵工自动化, 2015, 34(04): 81-84.