

doi: 10.7690/bgzdh.2021.12.009

## 废旧弹药装药倒空现状与发展

施洪杰, 向红军, 吕庆敖, 苑希超, 乔志明

(陆军工程大学石家庄校区弹药工程系, 石家庄 050000)

**摘要:** 针对目前废旧弹药销毁处理需求日益增长现状, 基于弹药的绿色处理要求, 分析常见弹丸装药物理特性, 依据装药特性对装药倒空方法进行归纳分类。对比分析 7 种装药倒空方法的原理、技术及特征, 提出弹丸装药倒空方法评价体系, 指出电磁感应加热倒空法将成为未来装药倒空的主要发展方向。该分析工作对改善我国废旧弹药处理现状, 实现安全、绿色、高效处理具有重要意义。

**关键词:** 弹药; 废旧弹药; 装药倒空; 倒空方法

**中图分类号:** TJ410.89 **文献标志码:** A

## Current Situation and Development of Emptying Waste Ammunition Charge

Shi Hongjie, Xiang Hongjun, LYU Qing'ao, Yuan Xichao, Qiao Zhiming

(Department of Ammunition Engineering, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** In view of the current increasing demand for the destruction and disposal of waste ammunition, based on the green disposal requirements of ammunition, the physical characteristics of common ammunition charges are analyzed, and the methods of charge emptying are summarized and classified based on the characteristics of the charges. The principle, technology and characteristics of 7 charge emptying methods are compared and analyzed, and an evaluation system for the emptying method of projectile charge is proposed. It is pointed out that the electromagnetic induction heating emptying method will become the main development direction of charge emptying in the future. This analysis has great significance for improving the current disposal situation of waste ammunition in our country and realizing safe, green and efficient disposal.

**Keywords:** ammunition; waste ammunition; charge emptying; emptying method

### 0 引言

弹药是国家为准备军事斗争而大量储存的重要战略物资<sup>[1-3]</sup>, 但弹药的寿命有限。达到一定存储年限或者战场遗弃等原因, 导致其战术技术指标不能满足作战训练的要求而失去军事利用价值的弹药, 称之为废旧弹药<sup>[4]</sup>。废旧弹药虽然不能继续使用, 但是原有的燃爆特性并无太大改变, 在外界能量的强烈刺激下可能导致爆炸事故。同时, 废旧弹药是一种危害极大的污染源, 其装填的含能材料如果烧毁, 会产生大量的废气、废渣、废水等, 对生态环境造成极大污染; 因此, 废旧弹药的处理已经成为世界各国棘手的问题。

废旧弹药处理方法的选择, 取决于弹药结构、弹药材料、处理目标、处理技术及环境条件等。装药倒空是通过一定的技术手段, 使易燃易爆的含能材料与弹药金属壳体脱离的作业过程。装药倒空是废旧弹药无害化处理非常重要的前期步骤, 已经成为弹药处理的主体内容。各国围绕弹丸倒空相继开展研究, 已经有多种方法应用于弹丸装药倒空, 例

如蒸汽加热倒空法<sup>[5-6]</sup>、高压水射流冲洗倒空法<sup>[7]</sup>、水力空化倒空法<sup>[8-9]</sup>等, 分别应用于不同熔点、发火点、机械感度的弹丸装药倒空中, 但普遍存在安全性较低、对环境造成二次污染、设备结构复杂和综合成本较高的缺点。笔者系统分析废旧弹药装药倒空技术, 归纳总结各种倒药方法的原理及优缺点, 以安全性、技术经济性和绿色环保性 3 个评价指标, 对现有 7 种倒药方法进行系统评价。

### 1 弹丸装药情况分析

#### 1.1 废旧弹药处理技术概况

废旧弹药常用的处理技术主要有分解拆卸、倒空、烧毁、炸毁等。弹药的危险性主要是由于装药具有易燃易爆性和毒性, 所以弹药处理的核心是装药的处理。对于装药和其他功能元件可回收利用的弹药, 一般先进行分解拆卸, 后根据装药的物理化学特性, 选择不同的倒空装药方法。对于不能安全进行分解、倒空或者分离出的含能材料利用价值小的弹药, 一般利用烧毁技术进行处理, 例如引信、枪弹、少量的发射药等。炸毁法适用于数量较少、

收稿日期: 2021-08-28; 修回日期: 2021-09-24

基金项目: 电磁制热式弹丸装药倒空技术研究(LJ20191A050204)

作者简介: 施洪杰(1997—), 男, 福建人, 硕士, 从事电磁发射理论与技术研究。E-mail: 1024879046@qq.com。

不方便运输、装药量较大的弹丸和危险性较高、不适合烧毁的弹药。

一般后装炮弹的装药分为发射装药和弹丸装药，发射装药可直接采用分解拆卸进行倒空，而弹丸装药由于弹药装填的牢固性和高密度要求，需采用更复杂的技术手段才能倒出。

### 1.2 装药特性分析

弹丸装药种类很多，按照组分不同可分为单质炸药和混合炸药。单质炸药是只有一种化学成分的炸药，目前比较常用的单质装药主要有梯恩梯(TNT)、黑索金(RDX)、太安(PENT)、奥克托今(HMX)等。上述单质炸药中只有 TNT 可以单独装填弹丸使用，其他单质炸药由于机械感度较高在使用时必须加入适当的钝感剂、粘结剂和增塑剂等组分。混合炸药是由 2 种或 2 种以上的化学成分组成的炸药，目前比较常用的混合炸药包括梯黑炸药、钝黑铝炸药、塑性炸药、硝酸炸药、高聚物黏结炸药(PBX)等。表 1 对比了常见单质炸药的物理化学特性，表 2 列举了一些混合炸药的化学组成。由于粉末状或颗粒状的装药可以直接倒出，因而笔者讨论的是装填并粘在弹丸内的装药倒空。

表 1 常见单质炸药特性

单质炸药	化学名	熔点/℃	机械感度	发火点/℃	水中溶解性
梯恩梯	三硝基甲苯	80.2	低	275	低
黑索金	环三甲基三硝胺	204.0	高	533	低
奥克托今	环四甲基四硝胺	278.0	高	327	低
太安	季戊四醇四硝酸铵	141.3	高	139	低

表 2 常见混合炸药组成

炸药名称	组成
PBX 炸药(高聚物黏结炸药)	单质炸药(黑索金/太安/奥克托今)+黏结剂+增塑剂
B 炸药(一种梯黑炸药)	59.5%黑索金+39.4%梯恩梯+1%石蜡
梯萘混合炸药	梯恩梯+二硝基萘
钝黑铝炸药	80%钝化黑索金+20%铝粉

## 2 弹丸装药倒空方法分析

根据装药性质的不同，可以将弹丸装药倒空方法分为高温熔化、溶剂溶解和机械倒空 3 类。

1) 高温熔化，指利用外界热源对装药进行加热，使其熔化后在重力作用下流出，实现装药与壳体的分离，典型方法为蒸汽加热倒空法和电磁感应加热倒空法。

2) 溶剂溶解，指利用某些装药在不同溶剂中的溶解度差异，用相应溶剂溶解装药并分离出不可溶部分，而后再回收利用，例如硝酸炸药可以根据其

溶于水的特性用水进行溶解处理，典型方法为有机溶剂冲洗倒空法。

3) 机械倒空，指利用外力作用于装药，使装药层层剥离，达到装药倒出的目的，典型方法为高压水射流冲洗倒空法、水力空化倒空法、挖药倒空法和冷循环倒空法等。挖药倒空法由于对操作人员危害较大，目前已不再采用。

下面分别分析这几种方法。

### 2.1 蒸汽加热倒空法

蒸汽加热倒药法是利用蒸汽作为介质加热弹体，使弹体内装药温度达到其熔点以上，从而使装药熔化成液态并自动流出的倒空方法。该方法适合装药熔点较低，加热不分解、不挥发，炸药毒性较小的装药。倒药所需温度与所供蒸汽压力有关，表 3 给出了温度与蒸汽压力的关系。

表 3 蒸汽温度与蒸气压的关系

蒸气压/MPa	0.101	0.143	0.199	0.271	0.362	0.460
蒸汽温度/℃	100	110	120	130	140	150

国外对蒸汽加热的研究较早。美国于 1994 年研制出高压釜熔解系统，该高压釜使用间接加热的方法将蒸汽施加到弹药的外部，在 115 ℃和标准大气压下对 340 kg 的弹药进行倒空测试，每小时产生 3.8 L 的废水。

国内对蒸汽加热倒药的研究也日趋成熟，从不同方向对该技术进行改进。黄英珂等<sup>[10-11]</sup>设计一种 TNT 炸药自动化蒸汽倒药系统，采用西门子 S7-300PLC 控制系统实现了远距离隔离操作，保证操作人员和设备的安全。李金明等<sup>[12]</sup>于 2016 年发明一种弹丸装药倒空装置，利用热水或蒸汽对炸药冲刷和加热的共同作用剥离和熔化炸药，适用于梯恩梯炸药、梯萘混合炸药、梯黑混合炸药的倒空。

加热熔融倒空法的最大优点是设备简单，倒药效率较高，操作方便、安全；因此，在我军各废弹药处理机构中被广泛采用。缺点是热利用效率较低，凝结水和保温用水中有炸药污染，需对废水进行后处理。若炸药的熔点较高(高于 120 ℃)，使用蒸汽加热法时必须大幅提高蒸汽的压力，将提高设备的复杂度和降低安全性；因此，对于熔点较高的装药不宜采用蒸汽加热倒药法。

### 2.2 电磁感应加热倒空法

针对蒸汽加热倒空法不适用于高熔点装药的情况，美国专家基于感应加热技术与装药倒空的联系，

在 2006 年提出了电磁感应加热倒空法。电磁感应加热是利用法拉第电磁感应定律、欧姆加热及接触传热理论，将电源电能最终转化成被加热物体热能的方法。其工作过程为：将交流电作用在缠绕弹丸的线圈上，线圈内产生的交变磁场在弹丸内产生涡旋电场，涡旋电场驱动金属壳体中的载流子运动产生欧姆热，传导的欧姆热使壳体内部的装药熔化而流出，从而实现装药倒空的目的。

美国用内装 B 炸药的 60 mm 迫击炮弹作为实验对象，当功率为 4 kW 时平均熔化时间为 11.9 s，99.1% 的装药被倒空。

国内对感应加热装药倒空技术的研究还处于原型阶段。军械工程学院研究了电磁感应加热系统的基本结构和工作原理，从理论上分析了系统倒药过程的安全性，设计了感应制热式弹丸倒药装置，并基于温度传感阵列和时间控制器设计了倒药装置的安全冗余防护系统<sup>[13]</sup>。

电磁感应加热倒空法相对于其他装药倒空方法，具有其自身的优点，例如：可以精确控制加热深度和加热区域；加热速度快、效率高、能耗小；采用非接触式加热，有效减少弹药燃爆的风险；倒药过程基本不产生废水，安全无污染；可以实现自动化控制等。基于以上优点，目前国内正对该技术进行工程应用攻关。该技术是未来弹药倒空技术发展方向之一。

### 2.3 高压水射流冲洗倒空法

高压水射流冲洗倒空法是利用常温高速水射流对弹体装药表面的冲击、剥离作用，使弹体装药破碎和倒出的方法。剥离后的炸药与水同时流入收集槽，经过过滤分离和净化后的水可再循环使用。由于利用常温水冲击，高比热容的水可以及时带走热量，消除热量积累，提高了处理的安全性。

美国海军水面作战中心利用该方法实现弹药中 PBX 炸药的去除了和回收<sup>[14]</sup>，已成功倒空数万发弹丸，倒空 1 发装 B 炸药的 155 mm 弹丸，用时 2.4 min。荷兰<sup>[15]</sup>应用该技术已对 40、105、155 mm 3 种型号高爆弹等进行测试，验证了高压水射流冲洗倒空的安全性。

罗同杰<sup>[7]</sup>等设计了高压水射流试验装置，采用 70 和 85 MPa 的高压水做倒药试验，结果发现弹体内炸药完全倒空，倒出的炸药大多数为块状，但是内膛涂层有局部损坏。黄玉平等<sup>[16]</sup>采用数值模拟的方法，研究了高压水射流倒空装药过程的安全性和

有效性。结果表明：当高压水射流速度低于 800 m/s 时，可采用高压水射流对废旧弹药装药进行破碎倒空。

利用高压水射流处理废旧弹药，不仅能有效地将装药从战斗部中完全分离出来，而且具有安全性等优点。也存在一些问题，例如：高压环境对机器部件的要求高、设备维护频率高；容易产生大量密集的难以消除的泡沫、产生废水量多且处理难度大；不适用于机械感度高的炸药等。

### 2.4 水力空化倒空法

针对高压水射流倒空法不适用于高敏感度装药的情况，俄罗斯专家发明了水力空化倒空法。根据伯努利原理，当高压作用下大截面水流流过小截面空化器时，流速增加，静压下降；静压下降到一定程度，水体内部会产生直径 3~5 μm 的空泡；空泡遇到炸药或内壁等固体界面时迅速产生形变、溃灭，由此形成 100 MPa 的瞬间负压，从而逐层剥离炸药。俄罗斯专家根据该原理已研制了多种类型的倒空装置，实现了装药的连续倒空和废旧弹药的综合利用。

国内近几年也开始对水力空化技术进行研究。满海涛等<sup>[8]</sup>基于 FLUENT 软件仿真得出淹没条件下缩放型喷嘴内外的流场特性，并利用水力空化试验系统验证了水力空化在报废弹药倒空领域的可行性。张么么等<sup>[17]</sup>仿真模拟空化水射流对装药的作用机理，研制了淹没空化水射流倒药实验系统，并利用该系统开展了钝黑铝炸药倒空试验。结果表明，空化水射流能够在 15 min 内安全且干净倒空钝黑铝炸药。

水力空化倒空法具有安全性高、与高压水射流相比所需射流压力较低（不超过 32 MPa）、工艺流程简单、装药适用性强的优点，适用于处理 TNT、浇筑 PBX 炸药和固体火箭用推进剂等较敏感的装药产品，缺点是水力空化设备结构复杂，自动化程度要求也较高，难以在部队中大规模推广使用。

### 2.5 冷循环倒空法

该方法又称低温、室温冷冻法，其原理是将弹药置于低温条件下冷冻后取出，反复进行温度循环操作，使弹丸装药在不同的温度梯度中产生分布不均的热应力，形成裂纹，进而发生崩裂，产生破碎的药块并取出，实现装药倒空的目的。倒空产生的碎片大小取决于炸药的特性。美国于 1994 年利用该方法对 LX-17 高爆炸药和 PBX9404 进行装药倒空实验<sup>[18]</sup>，将装药反复在 -196 °C 的液氮浴中进行快速

冷却循环, 然后升温至环境温度。LX-17 在 15 min 后分解为 8 mm 或更小的碎片, 而 PBX9404 容易冷冻成约 1 mm 的碎片。

冷循环倒空法的优点是使用惰性气体氮气进行冷却, 降低了装药的敏感性, 安全可靠; 倒空操作中无机械撞击和摩擦作用, 同时不产生污染。缺点是装药适用范围小、效率较低、能耗较大, 不利于大规模工业化推广。

### 2.6 有机溶剂冲洗倒空法

有机溶剂冲洗法是利用有机溶剂的溶化作用、高压冲刷作用以及选择性溶解作用, 去除炸药装药并回收其组分的方法。溶化作用可增强溶剂对装药的破碎作用; 选择性溶解作用可把混合炸药分离成可溶和不可溶组分。美国曾选用甲苯进行 B 炸药的倒空试验, 利用黑索金(RDX)和 TNT 在不同温度下的溶解度差异, 通过调节温度和溶剂压力, 使得 TNT 溶解在热的甲苯中, 而 RDX 处于不溶解状态, 最后通过沉淀槽和溶剂储槽的处理获得 TNT 和 RDX。

利用有机溶剂冲洗倒空装药, 适用于 2 组分炸药, 能一次完成 2 组分炸药的分离和回收, 并且喷射射流的温度和喷射压力较低, 能耗较小; 但是该方法也有明显弊端: 需要有机溶剂, 污染较大, 且可能对弹体的有机涂层、粘结剂等组件具有腐蚀性,

同时大量易燃的有机溶剂也存在较大的安全隐患。

### 2.7 高压氨射流倒空法

高压氨射流倒空法综合利用了高压水射流冲洗倒空和有机溶剂倒空的原理, 利用高压氨射流的动能连续冲击弹体中的炸药, 将其破碎并溶解于液氨中。1996 年, 美国的 T-C 公司首次将液氨加压作为切割射流应用于废旧弹药倒空工序中, 通过多次试验, 当氨射流压力为 50 MPa 时, 能将有毒有害的化学试剂、炸药、固体推进剂的弹丸和火箭发动机进行安全可靠地分解。

与高压水射流技术相比, 氨射流技术速度更快, 效率更高; 但是, 该方法使用的前提是炸药在液氨中的溶解性较好, 例如黑索金、奥克托今等, 一定程度上限制了高压氨射流技术的使用范围, 并且与水射流技术相比成本更高。

## 3 装药倒空方法评价

装药倒空方法较多, 每种方法都有其应用范围; 但是综合安全性、经济性、环保性等因素, 方法之间有优劣之分。选择合适的装药倒空方法, 能最大程度地减少人力物力的消耗。在分析常见装药倒空方法的原理、技术、特征基础上, 笔者把上述 7 种装药倒空方法的应用范围、优缺点进行归纳总结如表 4 所示, 并按照安全性、是否绿色环保、技术实现难易 3 个评价指标进行打分。

表 4 装药倒空方法对比与评价

倒药方法	原理	应用范围	优点	缺点	安全性	是否绿色环保	技术实现难易	总得分
蒸汽加热倒空法	利用水蒸汽对弹丸装药加热, 使其溶化	装药熔点较低, 加热不分解, 不挥发, 毒性较小的装药	简单易行、投资费用小、使用维修方便	能量利用率低、产生废水、不适合处理高熔点炸药	0	0	1	1
电磁感应加热倒空法	利用电能对弹丸装药传导加热, 使其溶化	基本适用于所有装药	加热温度和速度可控、效率高, 不产生废水	还处于技术开发阶段	0	1	1	2
高压水射流倒空法	利用高压水射流冲击、剥离装药, 使其溶解破碎	机械感度较小的装药	安全性好、分离彻底无残药	产生密集的难以去除的泡沫、废水量多且处理难度大、设备维护频率高	1	0	0	1
水力空化倒空法	利用水流流经空化器时产生的空泡破碎形成的负压, 剥离装药	基本适用于所有装药	安全性高、工艺流程简单	设备结构复杂、自动化程度要求较高	1	1	-1	1
冷循环倒空法	弹丸装药在不同的温度梯度下产生热应力, 形成裂纹, 然后破碎	冷冻后能形成较小碎片的装药	无机械撞击安全性好、不产生污染	效率较低、能耗较大	1	0	-1	0
高压氨射流倒空法	利用氨对某些装药的溶解性, 在高压射流的冲洗下装药破碎后溶解倒出	在液氨中溶解性较好的装药	速度快、效率高	适用装药范围小、成本较高	1	0	-1	0
有机溶剂冲洗倒空法	利用不同组分对有机溶剂的溶解度差异分离装药	易溶于有机溶剂的装药	一次完成 2 组分炸药的分离回收、能耗较小	污染较大、对弹体具有腐蚀性、安全性较低	0	0	0	0

安全性评价指标以 1 分为基准，若该方法本身存在安全隐患，则在基准上减 1 分；若在使用时可能使弹药爆炸，则在基准上减 1 分。绿色环保评价指标以 1 分为基准，若该方法增加了污染源，则在基准上减 1 分；若该方法能耗较大，则在基准上减 1 分。技术实现难易评价指标以 1 分为基准，若该方法技术较复杂，则在基准上减 1 分；若该方法成本较高，则在基准上减 1 分。3 项指标得分总和为该项方法在本评价体系的总得分，得分越高，表明该方法实用性越好。

从表 4 可以看出：蒸汽加热倒空法、高压水射流倒空法、水力空化倒空法得分均为 1 分，是目前大多数装药倒空所采用的方法。而高压氨射流倒空法、冷循环倒空法、有机溶剂冲洗倒空法得分为 0 分，属于较少采用或者在特殊场合下使用的装药倒空方法。电磁感应加热倒空法总得分最高为 2 分，与其他方法相比，无论从安全性、经济性还是环保性上都具有独特优势，能够适用于绝大部分装药的倒空。该方法将成为未来研究的主要方向之一，推动装药倒空技术的快速发展。

#### 4 结束语

废旧弹药装药倒空是一项重要工作，对于排除潜在爆炸危险、提取较高价值的有用资源、促进绿色可持续发展以及弹药更新换代和装备技术发展有重要意义。笔者在分析废旧弹药处理技术概况及主要装药物理特性的基础上，根据装药的熔点、溶解性、机械结构特性的不同，将弹丸装药倒空方法分为高温熔化、溶剂溶解和机械倒空 3 类；并对 7 种具体倒药方法的概念、工作原理、技术实现、技术特征和适用范围等进行系统性梳理述评；最后对比 7 种倒空法的应用范围和优缺点，并依据安全性、是否绿色环保和技术实现难易 3 种评价指标对 7 种倒药方法进行评价，得出如下结论：1) 蒸汽加热倒空法、高压水射流冲洗倒空法、水力空化倒空法属于现阶段常用的倒空方法；2) 冷循环倒空法、高压氨射流冲洗倒空法和有机溶剂倒空法为在特殊情况下使用的倒药方法；3) 电磁感应加热倒空法优势明显，具有广泛的发展前景，值得深入探索和推广。上述工作为推动我国的倒药技术发展及改善废旧弹药处理现状提供了参考。

#### 参考文献：

- [1] 尹建平, 王志军. 弹药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 1-2.
- [2] 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(1): 67-73.
- [3] 李金明, 雷彬, 丁玉奎. 通用弹药销毁处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [4] 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(5): 93-96.
- [5] 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.
- [6] WILKINSON J, WATT D. Review of demilitarization and disposal techniques for munitions and related materials[R]. Springfield: NATO Munitions Safety Information Analysis Center, 2006.
- [7] 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(2): 122-126.
- [8] 满海涛, 罗兴柏, 丁玉奎, 等. 基于水力空化技术的照明炬冲蚀试验研究[J]. 爆破器材, 2015, 44(4): 60-64.
- [9] 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(8): 58-61.
- [10] 罗发, 张亚军. 小型蒸汽倒药系统改进设计构想[J]. 四川兵工学报, 2007(3): 67-68.
- [11] 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(1): 38-40.
- [12] 李金明, 高欣宝, 刘国庆, 等. 一种弹丸炸药倒空装置及倒空方法[P]. CN106091855A. 2016-11-09.
- [13] 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]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(4): 47-50.
- [14] BURCH D, JOHNSON M, SIMS K. Value added products from reclamation of military ammunition[J]. Waste Management, 1997, 17(2/3): 159-163.
- [15] VAN HAM N H A. Recycling and disposal of munitions and explosives[J]. Waste Management, 1998, 17(2/3): 147-150.
- [16] 黄玉平, 崔庆忠, 徐洋, 等. 高压水射流破碎炸药过程数值模拟[J]. 含能材料, 2019, 27(5): 385-391.
- [17] 张么玄, 廉鹏, 康超, 等. 淹没空化水射流倒空钝黑铝炸药实验研究[J]. 含能材料, 2020, 28(4): 358-364.
- [18] LIPKIN J, KASBERG D, WHINNERY L, et al. Cryocycling of energetic materials: status report for FY94[R]. Springfield: U. S. Department of Commerce National Technical Information Service, 1995.