

# 面向“袖箭”防空导弹固体发动机的射流倒空技术探析

徐威<sup>1</sup>, 张振<sup>2</sup>, 蒋大勇<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> 武警第一机动总队机动第1支队, 河南郑州, 中国

<sup>2</sup> 武警工程大学研究生大队, 陕西西安, 中国

<sup>3</sup> 武警工程大学装备管理与保障学院, 陕西西安, 中国

\*通讯作者

**【摘要】**高压射流技术因安全环保、处置效率高, 在固体火箭发动机倒空领域有着广泛应用。本文系统研究了高压、磨料、空化水射流、液氮、液态二氧化碳射流及液氮等六种射流技术对袖箭防空导弹固体发动机的预期处理效果, 详细分析了作用机理、工程应用、优势与挑战, 并基于安全性、环保性、成本、技术成熟度及处置效率五项指标进行了综合性能评估。通过明确不同技术的场景适配性, 得出高压水射流技术的优势所在, 为该型导弹发动机装药的无害化与资源化处置提供了一定技术参考与理论依据。

**【关键词】**袖箭防空导弹; 固体发动机; 倒空技术; 高压射流; 推进剂

## 1. 引言

“袖箭”防空导弹是我国一款单兵便携式防空导弹系统, 具有卓越的机动性、迅速的反应能力以及较高的效费比。其打击范围最高可达 2km, 在城市反恐、反无作战以及低空防御中发挥着至关重要的作用。固体火箭发动机作为其核心部件, 一旦达寿, 一般运用倒空技术将内部的装药与发动机壳体进行分离, 以实现发动机壳体的回收利用, 从而为后续推进剂无害化处置奠定基础。传统倒空技术, 如机械切割技术、蒸汽加热倒空技术、有机溶剂冲洗等在操作安全性、处理效率以及投入成本方面存在一定局限性, 导致适用范围有限[1]。相比之下, 高压射流技术通过介质冲击侵蚀, 切割效率高且精准, 特别适用于小型火箭发动机。本文通过分析 6 种高压射流技术的应用现状以及优缺点, 按照 5 个指标对其进行综合评估, 为该型防空导弹固体发动机的处废工作提供思路。

## 2. 射流倒空技术概述

当前, 各种高压射流技术在导弹发动机装药倒空方面均有所应用, 本文系统分析其优缺点, 理清其作用机理以及适用范围, 重点关注处理效率 and 安全性。

### 2.1 高压水射流技术

#### 2.1.1 切割机理

高压水射流作用到推进剂后, 在垂直方向上产生强大的水锤压力, 而后迅速转换为滞止压力。在此作用下, 推进剂壁面产生径向的剪切应力, 导致基体裂纹不断扩展。部分介质沿

裂缝渗入到推进剂内部, 形成水楔作用, 基体发生破坏, 使后续的射流更容易产生冲蚀作用。

高压水射流通过与切割区域不断进行对流换热, 使在切割面上产生的热量来不及累积便被带走。实验表明当切割压力小于 100MPa 时, 推进剂内部温度稳定在 40℃左右, 远远小于其发生热点火的临界温度[2]。相比于热解技术, 水射流在切割过程中仅产生含推进剂碎屑的废水, 无有毒有害气体排放, 避免了空气污染问题, 且废水经处理后可用于后续切割。

#### 2.1.2 应用情况

该技术在处理固体推进剂时具有较强的适用性与可靠性, 已得到广泛应用。美国密苏里大学罗拉分校 (UMR) 使用 WOMBAT 系统成功冲洗了 7 台含“三叉戟 I”发动机中的推进剂, 并开发了水处理系统用于处理工艺用水, 使其能够循环利用。加利福尼亚州 Aerojet 公司使用该技术成功冲洗了 1 台“民兵 I”三级发动机和 2 台“三叉戟 I”三级发动机, 平均去除速率分别为 290 千克/小时和 580 千克/小时[3]。乌克兰也广泛应用该技术对遗留的废旧弹药、导弹及含能材料进行销毁, 形成了 1 套包含弹药前期处理、射流倒空壳体、后期三废处理的全套处理装备。

#### 2.1.3 面临挑战

随着该技术的不断深入, 现阶段依然存在以下问题亟待解决: 一是切割产生的废水中含有高氯酸铵 (AP), 现有后处理技术成本高、效率低。二是针对含二茂铁的高感度推进剂切割过程中可能会导致内部异常升温, 从

而可能引起燃烧与爆轰,安全性始终无法确保[4]。三是高压条件下喷嘴及一些密封件需要频繁更换,显著增加了前期投入和后期维修成本。四是在安全标准层面缺乏相应的专业标准和数据库作为指导,造成使用方法和质量控制标准不一,限制了推广和应用[5]。

## 2.2 磨料水射流技术

磨料水射流技术通过高速水射流带动磨料颗粒并高速撞击推进剂表面,通过磨料的碰撞、冲蚀及剪切作用对推进剂进行高效去除,切割效率相较于高压水射流显著提升。在工程应用中,仅需较低的压力即可实现理想的切割效果,一定程度上增强了切割安全性。

美国 NSWC Crane 公司研制了一套高压磨料水射流切割设备,围绕射流压力、靶距、转速、喷嘴类型和射流角度等几个重要的工艺参数开展了大量实验研究,证明该设备能够适用多种迫击炮弹和火箭发动机的装药倒空。意大利 Caretta Technology 公司研发的高压磨料水射流切割系统,可用于常规报废弹药的清洁、切割和回收等[6]。国内呼延曹婧等基于磨料水射流技术设计了一款排爆机器人,以 20mm 厚度钢板为试验对象对该机器人进行了性能试验,切割过程中最高温度为 38.1 °C,钢板穿孔的平均时间为 181.3 s[7]。

利用磨料水射流进行装药倒空虽在一定程度上提高了切割过程的安全性,但磨料通常成本较高且易损耗。此外,由于磨料的加入,射流容易对喷嘴等造成损伤,降低了使用寿命。

## 2.3 空化水射流技术

空化水射流技术是基于水力空化原理,利用空泡发展溃灭产生强大的能量增强水射流的冲击能力。研究表明其冲击能力可达到连续射流的 8.6~124 倍,仅需较低的工作压力便可取得与高压水射流几乎相同的破碎效果。

### 2.3.1 应用情况

国内,王焯军团队研究了淹没条件下空化水射流对固体推进剂的破碎特性与机理,量化了 HTPB 推进剂的应变分布与裂纹发展动态过程以及工作压力对破碎效果的影响,为该技术在工程中应用提供了数据支撑[8]。俄罗斯彼得大帝战略导弹研究院利用空化水射流技术,使空泡在炸药界面溃灭,瞬间产生高达 100MPa 的负压,实现装药连续倒空。

### 2.3.2 技术优劣分析

空化水射流技术具有如下优势:一是在淹没条件下作业,隔绝了空气中的氧气,较大的

比热容吸收切割释放的大量的热量,使热量在推进剂内部难以传递。二是通过空化泡溃灭产生的微射流和冲击波增强破碎效果,在 20~30MPa 的中低压范围内即可高效作业,提高了切割过程的安全性。然而,当前对空化水射流的作用机制还研究不清,在工程应用中多依赖经验。超出有效靶距后其切割的效能急剧下降且切割质量相对较难控制。

## 2.4 低温射流倒空技术

随着低温射流技术在其他领域的成熟,其在推进剂切割方面有着较好的应用前景。

### 2.4.1 高压液氮射流

高压液氮射流具有极低的温度,当其作用于推进剂表面时,推进剂从原本的高弹态转变为玻璃态,更易发生脆性断裂,从而降低了破坏的门限压力,提高了切割的效率。此外,低温射流还带来显著的冷却效果,进一步提升了切割过程的安全性。切割完毕后液氮在大气中气化,使切割过程产生的碎屑便于回收。当前,该技术主要应用于井底破岩、低温钻井等领域,在大气环境中的喷射机理以及推进剂的作用机理尚缺乏研究。在应用层面,美国开发出一套成熟稳定的深冷加工切削设备,但技术要求高且安全性较差,限制了推广与应用[9]。

### 2.4.2 高压液态二氧化碳射流

高压液态二氧化碳射流作为一种新型干式加工方式,在破煤、破岩以及物体表面清理方面展现出了较好的应用。当射流从喷嘴喷出后,发生剧烈相变,射流温度降至-78°C以下,同时产生的二氧化碳气体隔绝了氧气,并营造出安全的切割氛围。此外,生成的干冰颗粒在射流的带动作用高速冲击切削物体表面,与射流共同实现对物体的侵蚀,确保了切割效率。虽然当前该技术在装药倒空方面还未有应用报道,但从理论上来说,液态二氧化碳射流降温降感的特性对高感度推进剂具有更好的应用场景,且减少了后续处废成本。然而现有研究表明高压液态二氧化碳在大气中有效切割距离有限,一定程度上影响切割效率。且液态二氧化碳作为切割介质成本较高,阻碍了该技术的推广和应用。

### 2.4.3 液氨射流

液氨射流技术是通过高速射流产生的动能以及液氨对 AP 的溶解作用共同实现推进剂的破碎。与磨料水射流相比,磨料液氨射流切割速率快约 10%。由于液氨在常温常压下难以稳定存在,萃取 AP 后的液氨易于进行回收,且闪蒸吸收热量,提高切割过程的安全性。但

正是由于这一特性, 在应用过程中需改变切割环境增加围压, 从而保证射流切割的连续性。

美国 T-C 公司研发了一套高压液氮装置开展了装药的倒空实验, 试验表明当液氮射流压力为 50MPa 时, 能将火箭发动机中固体推进剂进行安全可靠地分解[10]。国内, 高兴勇等人构建并验证了一套基于临界液氮的推进剂销毁工艺, 实现了 AP 的高效回收与液氮的循环复用[11]。

### 3. “袖箭”防空导弹及其发动机装药特性分析

#### 3.1 推进剂装药概况

该防空导弹固体火箭发动机装药为复合固体推进剂, 主要成分包括以 HTPB 为主体的粘合剂体系, 以高氯酸铵 (AP) 为主的氧化剂, 以铝粉为主的金属燃料, 以及催化剂、燃速调节剂等功能剂。尽管该推进剂机械感度和热感度已控制在较低水平, 但当受到强烈冲击、摩擦或局部高温时, 仍存在燃烧甚至爆炸的风险; 同时, 推进剂固化后与发动机壳体粘接紧密, 这就要求倒空技术必须具备良好的安全性和分离能力, 从而避免损伤发动机壳体。

#### 3.2 倒空需求与挑战

为契合“袖箭”导弹发动机“小、轻、量少”的核心特点, 其内部推进剂倒空处置需满足以下多维度技术要求:

在安全性层面, 需严格管控作业过程中的热积累与机械刺激, 尽可能杜绝切割过程中的安全风险; 在精度与损伤控制层面, 要求精准移除装药的同时最大程度保护发动机壳体, 确保其后续再利用价值; 在效率层面, 尽管单台发动机装药总量有限, 但当面对批次处理时, 仍需具备高效的处理能力; 在环保层面, 需对倒空过程中产生的 AP 废水、推进剂碎屑等废弃物进行规范化处置, 尽可能减少切割过程中的处废成本; 在成本层面, 倒空技术的前期投入及单发处理成本需维持在合理可接受的范围内。上述特性与需求也是评估各类射流倒空技术适用性的根本依据。

### 4. 射流倒空技术对“袖箭”发动机的适用性综合评估

#### 4.1 评价指标设立

基于六种射流倒空技术的机理、应用及优劣分析, 结合“袖箭”防空导弹固体发动机的具体特点与处置需求, 设置切割安全性、处置效率、环保性、成本、技术成熟度五个指标, 构建评估体系并进行综合量化对比。参照专家意见及实际工程经验, 各指标权重分别设置为 30%, 25%, 15%, 10%, 20%。在各指标下, 每项技术的评分范围为 1~6 分, 分值越高表明该项技术在该指标上的表现越优, 反之则表现越差。得分乘以其权重后累加得到, 见表 1。

表 1. 综合评分按照各指标

| 技术类型                  | 应用范围         | 安全性 | 环保性 | 成本 | 技术成熟度 | 效率 | 综合评分 |
|-----------------------|--------------|-----|-----|----|-------|----|------|
| 高压水射流                 | 低感度推进剂       | 3   | 3   | 5  | 6     | 4  | 4.05 |
| 磨料水射流                 | 高硬度推进剂       | 3   | 2   | 3  | 5     | 6  | 4.00 |
| 空化水射流                 | 适用于多数推进剂     | 5   | 3   | 4  | 3     | 5  | 4.20 |
| 液氮射流                  | 高感度推进剂, 技术复杂 | 6   | 6   | 2  | 2     | 2  | 3.80 |
| 液态 CO <sub>2</sub> 射流 | 适用于忌水或高感推进剂  | 6   | 6   | 2  | 1     | 2  | 3.60 |
| 液氨射流                  | AP 基推进剂      | 4   | 5   | 1  | 2     | 5  | 3.70 |

#### 4.2 结果与讨论

表 1 表明: 高压水射流技术在技术成熟度与成本方面表现最为突出, 处置效率也能够满足“袖箭”发动机小批量、快速处理的需求。尽管该技术存在一定的热风险与废水处理难题, 但通过建立严格的工艺规程与高效的废水循环处理系统, 可有效管控风险, 使其成为当前最为可靠且易于实施的方案。

磨料水射流技术处置效率高, 在快速去除装药方面优势明显, 适用于大批量处理任务。然而, 由于磨料与推进剂碎屑混合形成的复杂固废, 增加了后续处理难度和成本。此外, 高速磨料颗粒会对发动机壳体内壁产生显著的冲刷与磨损作用, 对壳体的结构完整性或内部

绝热层存在潜在的损伤风险, 从而影响其回收再利用的价值, 需谨慎选用。空化水射流技术由于在淹没环境中作业, 能有效抑制热积累, 在安全性方面具备显著优势, 特别适合处理感度较高的推进剂。一旦弄清射流技术与推进剂的作用机理, 以及解决有效靶距短导致切割质量难以控制的难题, 将成为非常具有前景的替代技术。液氮和液态 CO<sub>2</sub> 等低温射流技术在理论上具备高安全性与环保性, 对于高感度推进剂切割具有广阔的应用前景。但受限于当前极低的技术成熟度与高昂的成本, 尚未具备工程应用条件, 综合评分相对较低。液氨射流技术由于对 AP 具有独特的溶解萃取作用, 在处置“袖箭”内部固体推进剂时具有独特优势。但

为实现液氮稳定喷射需提供高围压环境,高昂的成本和后续的回收限制了该技术的投入使用。

## 5.结束语

本文针对“袖箭”防空导弹固体发动机的内部固体推进剂的倒空需求,系统梳理了高压水射流、磨料水射流、空化水射流、液氮射流、液态二氧化碳射流及液氮射流六种射流倒空技术的作用机理、优缺点与应用现状,并依据安全性、环保性、成本、技术成熟度及效率五项指标对各技术进行了评分。评估结果表明,高压水射流技术技术成熟、成本低廉、效率较高,是当前工程应用背景下最现实、最综合的技术选择。上述研究对于排除贮存风险,实现“袖箭”防空导弹固体推进剂以及发动机壳体的资源化利用具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 向红军,施洪杰,吕庆敖等.电磁感应加热弹丸装药倒空技术分析研究[J].兵器装备工程学报, 2022, 43 (01): 146-151.
- [2] 朱左明,高鑫,王煊军等.高压水射流冲击HTPB推进剂的安全性分析[J].爆炸与冲击, 2015, 35 (03): 366-371.
- [3] Burch D, Johnson M, Sims K. Value added products from reclamation of military munitions[J]. Waste management, 1998, 17(2-3): 159-163.
- [4] 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.
- [5] 张保良.关于制定《高压水射流倒空装药弹体规范》的需求分析[J].国防技术基础, 2010 (03): 17-20.
- [6] 史明明,万丽强,陆鹏等.国内外报废弹药处理技术发展现状[J].火工品, 2022 (03): 75-80.
- [7] 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.
- [8] Zhou W, Zhao M, Liu B. Investigation of hydroxyl-terminated polybutadiene propellant breaking characteristics and mechanism impacted by submerged cavitation water jet[J]. Defense Technology, 2024, 33: 559-572.
- [9] 周亚萍,林智辉,王茂余等.退役报废固体火箭发动机装药倒空及回收再利用技术研究进展[J].航空兵器, 2025, 32 (03): 20~30.
- [10] 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): 1910-1923.
- [11] 高兴勇,巩永校,杜仕国等.用临界液萃取技术处理复合固体推进剂的工艺研究[J].火炸药学报, 2001 (01): 49-51.