

doi: 10.7690/bgzdh.2018.01.022

一种含能炸药壳体的安全自动拆分技术

孔 森, 雷 林, 岳 显, 史慧芳

(中国兵器装备集团自动化研究所装药中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为保证含能壳体残次品的可靠有效回收, 增加壳体的利用率, 减少企业的生产制造成本, 针对 TH 和 THL 系列熔铸炸药为主装药的含能壳体的自动拆分技术进行研究。阐述了安全自动拆分技术工艺流程, 对安全溶解温度、热分解温度、气爆温度以及抗压强度、撞击感度、密度等性能进行研究, 对影响弹体拆分性能的关键安全性参数进行数据采集和远程监控。结果表明: 该方法能实现高固相熔铸炸药的弹药安全自动分离, 提高废品回收效率, 降低环境污染, 避免人身伤害。

关键词: 蒸汽控温; 高压水射流; 弹药分离

中图分类号: TJ410.3⁺4 **文献标志码:** A

Safe Automatic Separation Technology for Energetic Propellant Shell

Kong Miao, Lei Lin, Yue Xian, Shi Huifang

(Center of Ammunition Charging, Automation Research Institute of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: For ensuring reliable and effective recycle of energetic propellant shell substandard product, increasing shell utilization and reducing production cost of enterprise, research on automatic separation technology of energetic propellant shell with TH and THL in it. The paper introduces the safe and automatic separation technology process flow, research on safe melting temperature, thermal decomposition temperature, air explosion temperature and anti-pressure intensity, hit sensitivity, and density. Carry out data collection and remote monitoring for key safe security which influencing on shell separation performance. The results show that the method can realize safe and automatic separation for high solid cast explosive and improve waste recycle efficiency, reduce environment pollution and avoid personal injury.

Keywords: steam temperature control; high pressure water jet; propellant separation

0 引言

随着弹药生产技术的不断进步与发展, 各种类型的弹壳壳体越来越多地把 PBX 炸药、温压炸药、CL-20 炸药和钝黑铝高能炸药等高级炸药作为主装药^[1]。对装有这些类型炸药的废弃弹药和弹药生产过程中残次品的装药弹体, 其废弃弹药的安全处理和倒空后壳体的回收尤为重要。

目前, 国内许多弹药生产企业、废旧弹药处理单位的炸药取出方法一般采用销爆、水浴融出和蒸汽融出 3 种方式^[2-3]。但对于装填不含热熔基的受热不软化或不熔融的高能炸药装药弹体, 无法采用溶解法和加热法进行弹药倒空的处理。加热法同时存在高耗能, 熔出炸药有毒蒸汽环境污染等伤害, 对于体积容量大的战斗壳体, 加热法处理的时间为 2~3 d, 生产效率极其低下。

为了保证含能壳体残次品的可靠有效回收, 确保回收废药处理的安全、效率和环保, 同时增加其壳体的利用率, 减少企业的生产制造成本, 笔者针

对 TH 和 THL 系列熔铸炸药为主装药的含能壳体的自动拆分技术进行分析, 开展了远程自动控制、蒸汽加热拔盖、高压水射流弹体自动分离和废药自动回收等技术研究, 对影响弹体拆分性能的关键安全性参数进行数据采集和远程监控, 实现危险拆分环境的自动化人机隔离操作和实时监测。

1 安全自动拆分技术工艺流程

图 1 为安全自动拆分技术工艺流程。所有功能按模块划分为装卸、蒸汽加热拔盖、高压水射流弹体自动分离、密封性检测、检重、传输、控制等模块。

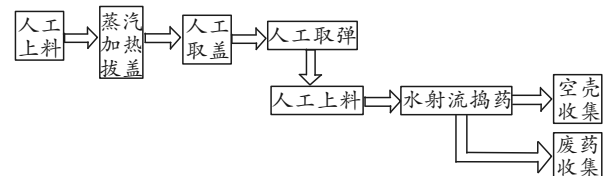


图 1 含能壳体安全自动拆分技术工艺流程

装卸模块: 完成含能壳体拆分前转运和准备工作, 包括人工上料、人工取盖和人工取弹下料环节。

收稿日期: 2017-10-20; 修回日期: 2017-11-09

作者简介: 孔 森(1978—), 女, 重庆人, 高级工程师, 从事工业自动化设备控制系统设计研究。

蒸汽加热拔盖模块：完成含能壳体旋盖部分的自动拆卸，包括蒸汽温控系统、蒸汽输送系统、自动加热拔盖系统和拔盖自动反馈系统等。

高压水射流弹体自动分离模块：完成拔盖后的含能壳体内部含能熔铸炸药与壳体的自动分离，包含高压水射流系统、水刀轨迹执行机构、弹体定位系统和药水分离回收系统等。高压水射流系统的压力、喷射系统的结构、水刀行进方式是弹体分离的关键。

控制模块：检测控制设备的运行，采集设备运行的关键参数。采用总线传输技术，将主站的人机操作和从站的信号采集、状态输出进行集中分散控制，实现了人机隔离操作，极大地保证了整条线的本质安全度。

拆弹现场配备防爆摄像机，人工可以对拆弹危险环境进行远程监控。

所有的危险工作环节均在远离操作现场的安全区域进行，人机操作系统可以对现场拆弹关键参数进行监控，同时具有故障报警和紧急故障处理功能。

与传统的热熔法相比，采取高压水射流技术具有以下优点：1) 所需分离时间更短；2) 适用于各种炸药装药；3) 相比熔化分离法消耗的能量更少；4) 水经过滤后可重复使用，污染更少；5) 显著降低室内 TNT 蒸汽浓度，有利人体健康；6) 熔化分离法分离炸药和壳体后，壳体内壁会残留炸药，但是高压水射流技术会清理得更加干净^[4]。

2 关键技术

2.1 蒸汽加热拔盖安全控制技术

1) 蒸汽加热的原理。

蒸汽加热分离的第一个重要参数是温度的控制。根据 TH 和 THL 药性参数特点，TH 药的熔解温度为 75.8 °C，THL 药的熔解温度为 77.8 °C，其热分解温度分别为 235.2 °C 和 245.8 °C，起爆温度高于热分解温度。蒸汽分离的第一关键点是需要将蒸汽加热的温度控制在药性可熔解的安全低温度区。电加热蒸汽发生器的原理是通过控制蒸汽加热的压力来实现温度的控制。在温度设置上，可以采取调节压力的方式将电加热蒸汽温度控制在 85 °C 的范围内，通过长距离的蒸汽管道供气，蒸汽加热罩体将蒸汽作用于壳体加热。由于壳体的热容率低于空气，升温慢，温度传感器直接作用于壳体，可以较为准确地把握壳体温度的变化，从而控制药柱温度的变化。通过软件算法控制，将壳体温度控制

在保证药物熔解的安全低温度区 80 °C 左右，直至药物预估熔化时间，此时开启拔盖动作。

热量计算为

$$Q=c \times m \times (t_2 - t_1) \quad (1)$$

其中： Q 为热量，kJ； c 为介质比热容，kJ/(kg/°C)； m 为介质质量，kg； t_2 为变化后的温度，°C； t_1 为变化前的温度，°C。

熔铸炸药直径约为 300 mm，熔融深度约为 10 mm，THL 的密度约为 1.71 g/cm³，加热该体积炸药熔融，要求从室温 20 °C 提高至熔点 80 °C，需要的热量大约为 120×10^4 kJ。

2) 蒸汽加热拔盖安全技术。

考虑到药温升高，同时药的敏感度会相应增高，拔盖引起的药物的摩擦感度会相应增高。药物在相同的预估熔化时间内，由于药性不一致，可能引起药物熔化的程度不一致。由于药物未完全熔化有可能导致拔盖困难，强行拔盖会引起药物爆炸危险。此时通过调节拔盖拉力，同时开启拉压力检测，若拉力超限，则药物未充分熔化，停止拔盖动作，继续加热，直到设定拔盖力能实现轻松拔盖。

3) 远程控制和容错技术。

在拆弹过程中，蒸汽加热和拔盖是危险工序，操作的布局均采用远程操作和监控的方式，现场装有视频监控系统，便于人工观测，同时上位机人机操作系统可以记录每发弹的加热温度和时间，以及拔盖力的控制情况。温度传感器可以将现场控温的异常情况传给上位机系统，同时紧急停止蒸汽供应。

2.2 高压水射流弹体安全分离技术

高压水射流切割药柱主要考虑药柱的抗压强度和撞击感度，TH 和 THL 的抗压强度分别为 20.74 和 37.93 MPa，撞击感度分别为 46% 和 32%。

1) 高压水射流作用下炸药装药冲蚀破碎机理。

① 高压水射流结构及流动过程。

高压水射流机构如图 2 所示。射流结构可以分为初始段、基本段和消散段。

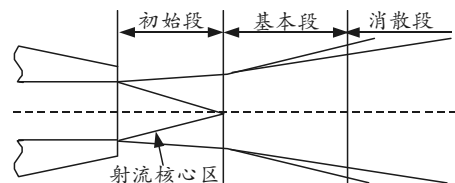


图 2 水射流结构

射流初始段：由喷嘴出口至转折面区域。射流一离开喷嘴就与环境介质发生剧烈的动量交换和紊动扩散，但仍有一部分处于中心线附近的射流介质

保持喷嘴出口初始速度，这部分介质组成了等速核心，是射流的精华。等速核心内部不存在任何速度梯度，是一整有势(无旋运动)流动，随着靶距的增加，核心区逐渐减小，其消失的点所在截面为转折面。等速核心边界与射流外边界由于卷吸周围介质而成为汽水混合物，其速度随径向距离的增大而减小，直到射流外边界变为零^[5]。

射流基本段：转折面以后至消散段间的区域，该段内，射流轴心速度及动压随着靶距的增加而减小，在垂直于轴心的截面上，轴向动压与流速自轴心上的最大值迅速减小到边界上的最小值。

射流消散段：基本段以后的区域。消散段中，射流与环境介质完全混合，射流轴向速度和动压力相对较低。射流变为水滴与空气的混合物或雾化。

② 材料在高压射流作用下破碎机理。

高压水射流或高速水滴作用在物体表面引起材料结构的破坏，主要是射流打击力(总打击力和打击压力)作用、水楔作用、射流脉冲负荷引起的疲劳破坏和气蚀破坏作用等，这些作用在材料破坏过程中同时起作用，但就不同材料及不同工况条件而言，上述作用的地位也有所不同。

对于炸药等脆性材料，在高压射流作用下，其破坏形式为炸药以不同大小的微粒从装药本体上逐层剥落下来。各种材料都具有典型的缺陷，主要是由材料的结构变形、微小裂纹、微观气泡、刮痕、凸起以及外来夹渣等引起。材料中这些微观缺陷削弱了其所在区域的强度，当高压射流冲击到这些区域时，极易发生微裂纹的产生和扩展，产生明显的破坏。

射流作用于材料，其在初始阶段必须最具破坏力。射流打击下材料表面中心部位产生的高压应力是材料破坏的首要原因。材料表面的打击区由于高压应力会在该区域产生变形(如图 3 所示)，冲击压力在射流边界上达到最大值，于是在该区域内形成最大的剪切应力，当剪切应力达到临界值时(区域 1)，裂纹伴随切削在材料表面扩展，进一步增加作用载荷，导致趋于材料的失效值的更大应力集中在 β 角限制的范围内(区域 2)。当扩展的裂纹交汇时，便有微粒从材料本体分离出来。

材料表面一旦形成裂纹，水流高速冲击时，会契入到裂纹中，契入裂纹中的水由于材料表面的高速射流冲击，具有一定的压强，于是在材料裂纹内部边界形成拉应力并且产生应力集中，由于材料的

抗拉强度一般低于抗压强度，所以更容易促进裂纹的扩展，此外，契入裂纹中的水也会软化材料而使材料的机械强度降低，进一步促进裂纹的扩展。

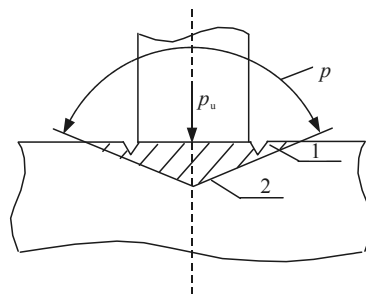


图 3 受射流冲击的材料表面的失效原理

除了上述作用机理，还有水锤压力的作用，射流刚接触到材料表面时，由于材料状态突变，在内部形成极大的应力波(水锤压力)，该应力波的传播，反射和碰撞可能破坏材料分子结构，产生脆变性破坏，加快破碎过程。此外，汽水混合介质的打击也会由于气泡的溃灭在材料内部产生脉冲负荷引起疲劳破坏，加快破碎过程。

高压水射流作为装药的冲击源时，由于刚性特征明显，属于强冲击载荷范围，符合动态响应理论：当高速水射流的头部刚刚接触到装药表面时，一旦射流速度达到某一临界值，装药的表面状态参数会发生突变，并形成应力波以加速物料破坏，即水锤压力。水锤压力作用于装药表面的持续时间仅为微秒级，然后会迅速衰减，随着冲击作用的持续，形成准静态加载过程，即滞止压力。

理想情况下，射流出口处动压力等于射流压力，因此在射流初始段上，速度保持不变的等势核心区的滞止压力也处处等于射流出口动压力。

2) 高压流体作用下装药安全性研究。

高压流体拆分弹药装药必须具有足够的安全性，在装药冲蚀破碎的整个过程中必须不发生爆燃或者爆轰。按照凝聚炸药起爆动力为依据，进行了高压流体作用下装药安全性研究。以 TH 炸药装药为研究对象，TH 炸药主要性能为：

密度：1.69 g/cm³；抗拉强度：20.74 MPa；撞击感度：46%；摩擦感度：5%；5 s 爆发点：275 ℃；热分解温度：210.2 ℃；熔点：72.8 ℃；临界起爆压力：7.62 GPa。

① 基于冲击起爆机理的装药安全性分析。

高压流体作用于装药表面引起瞬间的极大水锤压力，相当于输入一个近似方波的压力脉冲，应用非均质炸药的飞片冲击起爆模型，冲击波诱导爆轰

的判据为

$$p_1^2 \tau = K. \quad (2)$$

在忽略水锤压力作用时间的情况下, 将上述判据近似简化为水锤压力是否大于临界起爆压力。表 1 为不同射流压力下应用式(2)计算的水锤压力。

表 1 不同射流压力下的水锤压力大小

射流压力/MPa	射流速度/(m/s)	水锤压力/GPa
60	346.2	0.76
80	399.8	0.92
100	447.0	1.07
120	489.7	1.21
140	528.9	1.35

从表中可以看出: 当射流压力为 140 MPa 时, 冲击材料引起的水锤压力为 1.35 GPa, 对 B 炸药 (TNT/RDX=40/60), 其冲击波临界起爆压力约为 7.62 GPa, 可见仍有相当大的安全裕度。事实上, 由于炸药表面并非完全刚性, 水锤压力会低于上述计算值。此外, 由于水锤压力作用时间极短, 也会限制冲击起爆的发生。

② 基于热起爆机理的装药安全性分析^[6]。

高压射流冲蚀破碎炸药过程中, 炸药的碰撞、摩擦以及水的打击等机械作用都会引起炸药局部温度的升高, 当温度高到一定值时, 炸药发生分解反应放出热量, 进入自加热过程, 若热量来不及扩散, 放热反应加速, 可能导致点火甚至起爆。高压射流冲蚀破碎炸药过程中, 炸药的温度应始终不高于热分解温度或 5 s 爆观点, 去除安全系数 40 °C, 则炸药在破碎过程中温度升高极限应不高于 195 °C。

由于炸药在受水射流冲击过程中, 打击区域始终被高速流动的冷态水包围, 水流会带走大部分热量, 极大地抑制了炸药温度的升高。根据一些学者所做的大量水射流冲击炸药试验来看, 炸药的温度在冲击过程中一般不会高于 80 °C。此外, 如果炸药在冷态水流带走热量的情况依然升高到某一较高温度(100 °C), 水射流接触到材料时便迅速汽化, 水的汽化过程也会消耗热量, 抑制炸药温度的进一步升高。所以从理论上可以得出, 炸药在高压水流作用下, 不会发生热起爆。

3) 射流压力参数设计。

① 射流压力设计。

根据射流破碎炸药的机理, 为保证射流初始阶段具有足够的破坏力, 门限压力设定为炸药的抗压强度 20.74 MPa, 即滞止压力只要大于 20.74 MPa, 射流便可对装药实施有效破坏, 但考虑到效率、时间及比能问题, 射流压力一般大于门限压力, 工程

上通常选择射流以最低比能工作时的压力为射流压力, 根据比能关系式, 理论上当射流压力为 3 倍门限压力, 即 62 MPa 时比能最小, 但考虑到实际射流从喷嘴出口至材料表面有各种能量的损失, 打击力会低于出口压力, 所以射流打击压力暂定为 65~90 MPa。对于最终确定的最合理的压力, 需要进一步通过试验研究不同射流压力下装药破碎情况(碎块大小、破碎时间及功率等), 经过对比分析, 选择最合理的射流压力^[7]。

② 靶距设计。

目前对靶距的选取通常是用试验方法确定射流的合理靶距, 根据工业上水射流用于切割或破碎时的实践经验, 将靶距范围暂定为 6~16 mm。

3 应用效果

该自动拆分技术现已在国内某弹箭拆分现场进行拆分试验, 其拆分效率从 1 发/2d 减少了 1/3, 使弹药分离效率极大提高。由于高压水射流属于冷处理, 也提高了拆分药物的稳定性, 其拆分过程中药水分离有效率达到 95%以上, 弹壳回收率 100%。

4 结束语

笔者采用蒸汽加热拔盖技术、高压水射流技术和远程监控技术, 实现了高固相熔铸炸药的弹药安全自动分离。这种安全拆分技术有效提高了废品回收效率, 降低了环境污染, 避免了人身伤害, 其研究试验数据在大体能的含能炸药残次品处理上具有较为重要的意义。

参考文献:

- [1] 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, 2014, 32(2): 122-125.
- [2] 闫国斌, 于亚伦. 销毁废旧弹药的技术探讨[J]. 工程爆破, 2011, 17(3): 92-94.
- [3] 郭涛, 齐世福, 王树民, 等. 大批量废旧弹药爆破技术的应用[J]. 工程爆破, 2011, 17(2): 89-91.
- [4] 伍凌川, 雷林, 张博, 等. 废旧弹箭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.
- [5] 蒋大勇. 高压水射流切割 HTPB 推进剂的实验分析[J]. 解放军理工大学学报, 2013, 14(4): 430-436.
- [6] 康灿, 刘海霞, 杨敏官, 等. 高压水射流技术基础及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 13-20.
- [7] 马宏亮. 成型药柱密度检测装置及技术方案[J]. 兵工自动化, 2016, 35(2): 60-61.