

高压射流处理废旧含能材料技术研究进展

韩启龙, 刘凤芹, 蒋大勇

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要: 主要介绍了高压射流的原理与分类特点, 阐述了其在废旧弹药、报废固体火箭发动机处理、野外排爆中的国内外研究进展, 探讨了处理过程安全性问题, 并对这种技术的发展前景进行了展望。

关键词: 高压射流; 废旧弹药; 报废固体火箭发动机; 安全性

中图分类号: O358; TJ41

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2011)03-0024-04

Research progress in processing waste energetic materials by high-pressure jet

HAN Qi-long, LIU Feng-qin, JIANG Da-yong

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: The working principle and classification features of high pressure jet is introduced, and its research progress at home and abroad on dealing with the waste military munitions, the discarded solid rocket engine and bomb-disposal is indicated. The security problem of the treatment process is studied, and the trend of this technology is prospected.

Key words: high-pressure jet; waste military munitions; discarded solid rocket engine; safety

在全球范围内, 各国每年都将花费巨大的人力和物力来存储和处理数量日益庞大的废旧弹药、固体发动机等含能材料, 而传统的处理方式, 如露天焚烧、控制焚烧等, 不仅效率低下、安全性差, 并且极易造成资源浪费, 这已不符合当今倡导的循环经济的理念。高压射流切割技术是近 30 年发展起来的一项新兴技术, 通过将高压水或其他介质转换成高速的高能束流, 从而对材料产生极强的冷态冲蚀作用。因其具有清洁、无热效应、能量集中、易于控制、效率高、成本低、操作安全方便等优点, 非常适合于切割、粉碎各种压敏、热敏材料和易燃、易爆材料等。从 20 世纪 90 年代开始, 在全世界裁军的环境下, 美国等军事强国开始将高压水射流切割技术逐步应用于废旧弹药、报废固体发动机装药等含能材料的非军事化处理, 取得了令人称道的效果, 现阶段它已成为处理废旧含能材料方面最为高效、环保且经济的办法, 并开始在各国得到了广泛的应用。

1 基本原理与系统组成

1.1 基本原理

高压射流切割技术是以纯水或其他液体作为携带能量的载体, 用高速射流对各类材料进行切断加工的一种方法, 被广泛地应用于不同领域(表 1)。工作时, 在增压系统的作用下, 将液体增至高压/超高压后, 高压液体通过喷嘴后流速可高达 3~4 倍音速, 当射流冲击被切割材料时, 如果压力超过材料的

破坏强度即可切断/粉碎材料。

表 1 高压射流的应用

名称	压力/MPa	水流量/L·min ⁻¹	工艺特征
管道除垢	70~80	75	水射流清洗机
油罐油槽车	50	110	三维旋转喷头
锅炉清洗	70	75	旋转喷头
机械零部件除锈	50	63	混合后磨料水射流
弹药切割处理	200~300	3	磨料水射流
固体火箭推进剂	60~100	70	水、液氨射流粉碎

高压射流按照工作介质的不同大致可以分为 2 类: 一类是以纯水或其他液体作为能量载体, 它的结构较简单, 出口压力值低, 适于切割或清洗软质材料, 如船身的锈蚀、固体推进剂等; 另一类是以添加了固体磨料(约占 90%)的混合液作为能量载体, 也叫磨料射流切割。磨料通常采用粒度为 80~150 目的二氧化硅、氧化铝、石榴石等, 由于硬度较高, 大大提高了切割功效, 适于硬质材料的切割作业, 如用于大口径炮弹外壳的环切。在相同切割速度下, 磨料射流切割的压力可以大大降低, 但结构较复杂, 喷嘴磨损快。根据工作方式还可分为脉冲射流、空化射流和调制射流等^[1]。

1.2 系统组成

典型的高压射流系统主要包括喷头、增压系统、磨料供应系统、控制系统及辅助系统等, 通常还要配置相应工作台, 见图 1 所示^[2]。喷头通常采用单股、

双股或多股对称射流形式的特制耐磨喷嘴,同时为了达到旋转的目的,一般需要配备气旋装置;增压系统的关键部分是高压泵或增压器,它使水压势能转变为射流的动能,磨料供应系统主要由磨料流量调节系统和磨料切割头构成,其中磨料切割头是超高压射流切割的核心部件,其工作原理是:高压水经过高压管和水喷嘴至混合腔,与此同时,磨料在高速射流形成的真空作用下被吸入混合腔与水混合,再经磨料喷嘴喷射形成两相磨料射流,这种切割方法由于硬质磨料的加入,使得切割能力与效率更大,因此适合切割金属等硬质材料,控制系统在人工或计算机控制下,通过手动调节或程序预置来移动工件或切割头,完成所要求的切割,辅助系统主要包括废料废液收集装置、安全监控装置等。

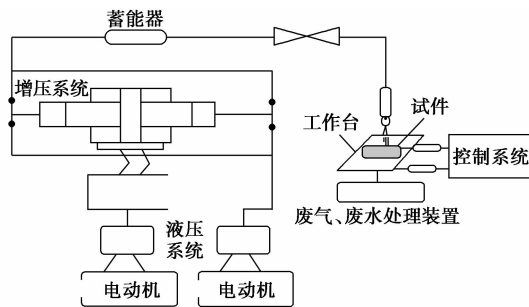


图1 高压射流装置系统组成

2 高压射流处理废旧含能材料的应用

2.1 废旧弹药的处理

在早期的高压射流处理废旧弹药过程中,首先要根据废旧弹药种类、结构进行预处理,预处理过程包括手工或机械的方式拆除引信装置和点火部件,

切除药室的端部以及一些形状不规则的部分等一系列步骤,然后利用低压力(≤ 100 MPa)、大流量的纯水射流对废旧弹药中的装药进行切割与粉碎,再将处理后的弹体金属外壳进行回收再利用^[3],虽然这种处理方法较早期的集中引爆和焚烧方式有了明显的改善,但是工作效率普遍低下,危险程度和直接成本都比较高。

近几年,随着射流技术的不断发展与完善,各种新型水射流如磨料水射流技术和高压水射流技术得到了逐步的应用,避免了早期复杂的预处理方式,使得水射流处理技术贯穿到整个销毁过程,在处理过程中先根据弹体的大小利用磨料水切割,在淹没条件分成2段或多段,然后再利用纯水射流进行内部含能材料的清洗与粉碎,同时辅以大型自动化、智能化的处理装置,极大地提高了处理的效率。美国Fossey等^[4]尝试利用高压磨料水射流来拆除曳光弹的引信和底部,发现对于这种弹壳壁厚为5~10 mm且内装TNT炸药的炮弹,当压力可以由75 MPa提高至375 MPa时,处理的数量由3发/min增加至8发/min。Hashish等^[5]利用添加了碱金属磨料的液氨射流处理M-55化学火箭,在水压276 MPa的条件下,在0.5 min内能够切割掉传爆管和引信,在1 min内清除起爆药,然后用10 min内完全清除发射药。国内从20世纪90年代末开始进行高压射流处理废旧弹药相关技术的研究与应用,近几年,中国工程物理研究院化工材料钟树良等^[6]、石家庄军械工程学院赵晓利等^[7]对高压射流切割废旧弹药的过程、工艺以及安全性进行了一定的研究及探索,目前这种技术已在部分军工企业进行了试验与应用。

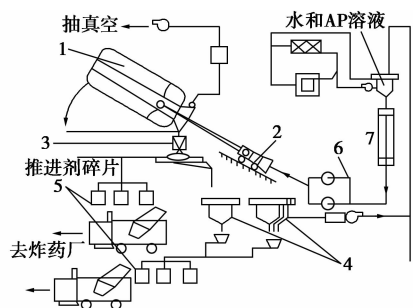
(上接第23页)

参考文献

- [1] 李汉勇,宫敬,陈家庆. 油气回收技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007:123-124.
- [2] 李德旭,赵燕. 油气回收技术研究现状[J]. 现代化工,2006,26:63-66.
- [3] 吴剑,邹敏. 油气回收技术的研究进展与发展趋势[J]. 环境科技,2010,23(1):105-108.
- [4] 曹东辉. 冷凝法油气回收装置的研究及优化运行[D]. 青岛:山东科技大学,2009.
- [5] 彭星来. 吸附法轻烃回收系统研究[D]. 济南:山东大学,2007.
- [6] 黄维秋,钟秦. 油气回收技术分析比较[J]. 化学工程,2005,33(5):53-57.
- [7] 何广湘,杨春育,佟泽民. 油品蒸发损耗及油气回收技术[J]. 现代化工,2001,21(1):21-25.
- [8] 湖北楚冠实业股份有限公司. 炭吸附及超低温冷凝法油气回收联合装置:中国,200420075912[P]. 2005-07-12.
- [9] 王建基,张公敬. 冷凝和膜分离组合式油气回收工艺技术:中国,200610135849.5[P]. 2008-04-16.
- [10] 江苏惠利特环保设备有限公司. 利用吸收法与膜分离法集成技术的油气回收方法及装置:中国,200710131549.4[P]. 2008-05-28.
- [11] Cruz-Nunez Xochitl, Hernandez-Solis Jose M, Ruiz-Suarez Luis G. Evaluation of vapor recovery systems efficiency and personal exposure in service stations in Mexico City[J]. The Science of the Total Environment,2003,309:59-69.
- [12] Ghoshal A K, Manjare S D. Selection of appropriate adsorption technique for recovery of VOCs: An analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2002,15:413-421.
- [13] Geldermann J. Evaluation of VOC recovery strategies[J]. OR Spectrum,2006,28:3-20. ■

2.2 火箭发动机的处理

在处理废旧弹药的研究基础上,部分国家开始用纯水、纯水+高氯酸氨(AP)、液氨等作为高压射流的工作介质,对大型固体发动机装药的处理进行研究与实践。美国国防部于1996年制定了联合废除军备技术规划(JDTP),主要研究常规武器、战术导弹、火箭发动机和含能材料的非军事化处置,并主导了1999年乌克兰的第2轮核武器的销毁工作,利用高压水射流完成了大量洲际导弹上的固体发动机的非军事化处理,其中最大直径达到3 m,其主要处理流程如图2所示^[8]。Foldyna等^[9]在处理俄罗斯“蜘蛛”导弹(SS-23)发动机过程中,采用235 MPa的高压旋转射流将SS-23发动机装药切割成三大部分,然后利用工作压力均为235 MPa的旋转和非旋转射流把推进剂磨碎到所需的尺寸(以备回收利用),整个固体推进剂的拆除时间超过30 h。如果采用更高的射流压力、合适的射流参数与喷头,可使整个处理时间大大缩短。



1—复合推进剂药柱;2—水射流装置;3—过滤装置;
4—废水收集器;5—残渣收集器;6—泵;7—过滤装置

图2 大尺寸固体火箭发动机装药回收工艺流程

国内早期固体发动机的使用时间相对较晚,使用量偏低,但随着近10年固体发动机在航天及军事领域的大量应用,退役报废的固体发动机数量逐年增多,因此从2002年开始,航天与军工的相关单位开始对高压水射流应用于发动机壳体的回收和发动机生产过程进行探索与研究,如开展高压水粉碎固体推进剂、清除隔热层、清洗固体推进剂浇注设备和工装等方面的研究与应用。北京理工大学的郁红陶等^[10-11]进行了高压水射流冲击丁羟推进剂的一系列研究,对推进剂中组分与冲击的危险因素,如与温度、压力的关系做了深入的探讨。

2.3 野外排爆

未爆炸弹主要来自于2个方面:一种是历次战争遗留的未爆炸弹,这类炸弹通常因为故障原因落地后未爆炸,但同样具有毁伤威胁;另一种是用来破

坏和迟滞部队机动的专用弹药,如装配延期定时引信或动磁感应引信的杀伤爆破弹,这种炸弹落地后处于战斗状态,对部队机动威胁极大。在科索沃战争中,美军空袭遗留下的未爆炸弹对南联盟部队的行动产生了巨大影响,因此对于未爆炸弹必须快速、安全地排除。传统的野外排爆方法,如露天引爆和机械排爆等方法存在效率低,操作危险性高的缺点,而高压水射流这种冷态切割方式对排爆非常适用,尤其是采用轻便型磨料高压水射流设备^[12]装备工程部队后,使得排爆过程实现了机动、快速的目的。具体的方法是:将落在土壤内或地面上的未爆炸弹固定好,在辅助工具的定位下,调整好喷枪与未爆炸弹的距离和角度,采用前混合磨料水射流,快速在弹体上切开大小适中的切口,然后调整靶距、压力或工作介质,继续冲刷弹体内的装药,使装药与弹体彻底分离,最终使未爆炸弹失效,达到安全高效排除未爆炸弹的目的。

2.4 处理过程的安全性分析

在高压水射流处理废旧弹药、固体发动机装药、排爆过程中,首先必须考虑的问题就是含能材料在水射流作用下产生化学反应的危险性。为了确保处理过程中绝对的安全,需要针对不同的含能材料种类、构造进行验证性的实验与研究。因此,需要确切知道的参数是冲击过程中含能材料温度和受压变化情况,而对这2个参数的考量主要是通过埋植传感器方式获得。

处理废旧弹药和固体发动机装药时,由于水射流直接作用的是含能材料,因此压力控制在50~100 MPa,在切割过程中,由于冷态侵蚀的作用使得含能材料的内部温度不超过100℃^[10],而这些废旧含能材料的临界热反应温度通常都在200℃以上,同时由于切割过程中的冲击压力(水锤和滞制压力)峰值远小于落锤撞击压力^[11]。因此在这种切割过程中废旧含能材料被热起爆和撞击起爆的可能性微乎其微。

在切割弹药金属壳体时,通常压力控制在200~400 MPa,由于高速磨料粒子与金属弹体材料和金属切屑之间的高速撞击和摩擦,在弹体材料的断口附近将会产生大量的机械火花,如果磨料具有压电效应(如石英砂等),则在切割中还将产生压电火花,因此必须考虑切割时火花引爆含能材料的危险性。通常在切割废旧弹药的同时,高压磨料水射流也要对金属壳体内部的炸药和推进剂(引信与传爆部分已经被单独切除)进行清除,而在高压磨料

水射流的冲蚀和雾化作用下,空气中将存在一定浓度的可燃气体氛围^[4],特别是当被切割的含能材料中含有铝、铁等金属添加剂时,与水快速反应后将会在切割现场形成相当浓度的氢气/空气混合气体或可燃性粉尘云,当这些可燃气体的浓度处于它们的爆炸浓度范围内时,切割时所产生的大量火花就有可能引发快速燃烧甚至爆轰,从而对人员、设备和环境带来灾难。对于一定浓度的可燃气体,火花引爆的危险程度取决于火花的尺寸、温度和热容以及环境温度,因此为了降低或避免切割时火花引爆可燃气体的危险性,在切割过程中必须及时采取破坏产生的可燃性气体环境的措施,如安装抽滤、通风装置。

因此为了确保高压水射流处理含能材料过程的绝对安全,必须在处理前认真研究待切割含能材料(包括金属壳体和含能材料)的物理化学性质,如组分、感度、壳体材料的屈服强度等,针对不同的含能材料种类和处理目的来选择最佳的射流切割参数,如射流压力、靶距、射流介质(水、氨液等)、射流直径、磨料的种类及粒径等,在保证安全性第一的条件下选择最佳的工艺技术参数。

3 发展趋势

作为一种处理废旧含能材料的新技术,高压射流切割有着十分广阔的应用前景。与国外发达国家相比,我国的高压水射流处理废旧含能材料技术与理论还存在着一定的差距,发展方向主要有以下几个方面:

(1)向自动化智能化方向发展。随着机器人、计算机大规模应用于工业,高压射流处理弹药过程的控制系统由目前的半智能化向高智能化、二维向三维发展,操作过程的工艺参数可自动适应不同种类材料的可靠处理。

(2)向安全高效方向发展。用于处理废旧含能材料的高压水射流处理设备的可靠性要求较高,因此,在保证提高设备功率的前提下,必须确保设备的组件与材料在超高压的环境中稳定可靠地运行;同时需要对不同种类、不同环境条件下实现废旧含能材料“超安全化”处理进行深入的研究与实践。

(3)向无污染及再利用方向发展。水射流处理废旧含能材料完成后,需要对大量含能废水进行无害化处理及废料的资源化回收与再利用,传统、单一的废水处理方法不能适用规模化处理后遗留的大量废水,因此需要寻求更为有效、经济、安全的含能废

水的处理途径,如超临界氧化法、生物降解法等;而对于大量的废料可通过进一步处理,如粉碎、提取、降感后转制成为附加值较高的民用产品等。

(4)向集中化、一体化处理方向发展。随着报废弹药数量及固体发动机日益增多,加上环保、安全等方面的制约,高压射流处理废旧含能材料逐渐向着集中化、一体化处理模式发展,如英国国防部三军弹药处理站和美国、德国等的报废弹药处理中心的建立。这样才能最大限度地降低处理过程的风险与成本,并减少污染与提升效率。

4 结语

尽管由于目前技术水平及经济条件的原因,使高压射流技术在处理废旧含能材料的应用受到一定的限制,但是由于其在处理废旧含能材料方面的独特优势,这种处理方法将会成为将来处理废旧含能材料的主要方式之一,有着非常广阔的应用前景和军事意义。

参考文献

- [1] 刘忠伟. 高压水射流技术综述[J]. 湖南冶金职业技术学院学报, 2005, 5(3): 230 - 233.
- [2] 刘丽萍, 王祝炜. 高压水射流切割技术及应用[J]. 农业机械学报, 2000, 31(5): 117 - 119.
- [3] 何远航, 李海军, 张庆明. 水射流拆弹的安全性[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(增刊): 253 - 256.
- [4] Fossey R D. The use of an abrasive waterjet system at 700bar for the cutting of military munitions as part of a demilitarization program [C]//The Conference of Jetting Technology, 1998: 453 - 465.
- [5] Hashish M, Miller P. Cutting and washout of chemical weapons with high-pressure ammonia jets [C]//The Conference of Jetting Technology, 2000: 81 - 91.
- [6] 钟树良, 李振泉, 柏平, 等. 水射流切割炸药的安全性及试验研究[J]. 四川兵工学报, 2006, 27(3): 44 - 46.
- [7] 赵晓利, 李虎泉, 许铁路. 磨料水射流切割弹药的安全性与效能研究 [C]//国际机械工程学会联合会会议 2000, 6: 56 - 57.
- [8] 仪建华, 赵凤起, 李上文, 等. 美俄废弃火箭发动机装药绿色销毁与回收技术研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2006, 4(6): 25 - 27.
- [9] Foldyna J, Hauner M, Sedlarik A. Utilization of waterjets in SS-23 missiles dismantling [C]//The Conference of Jetting Technology, 1998: 485 - 489.
- [10] 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, 28(3): 189 - 191.
- [11] 何远航, 郁红陶, 张庆明. 固体推进剂在高压水射流作用下的点火模式[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(2): 97 - 99.
- [12] 陆国胜, 龚烈航, 金轩. 前混合磨料水射流技术在排爆炸弹中的应用[J]. 工兵装备研究, 2006, 25(3): 32 - 35. ■