

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.04.014

基于水力空化技术的照明炬冲蚀试验研究^{*}

满海涛^{①②} 罗兴柏^① 丁玉奎^① 刘国庆^① 甄建伟^①

①军械工程学院(河北石家庄,050003)

②72373 部队(河南洛阳,471900)

[摘 要] 为了验证水力空化技术在报废弹药倒空领域的应用可行性并确定相关倒药参数,以某型照明炬为研究对象,设计了水力空化倒空系统,研究了喷嘴入口压力、喷距和冲蚀时间对照明炬冲蚀效果的影响。结果表明:水力空化系统可以倒空照明炬;冲蚀效果随着喷嘴入口压力的增大而增大;喷距影响冲蚀效果,且存在最佳喷距;随着冲蚀时间的增长,冲蚀效果在一定范围内增大,之后趋于平稳。这为弹丸装药倒空探索了一种新的技术方法。

[关键词] 水力空化;照明炬;冲蚀;装药倒空

[分类号] TJ410.89

引言

弹丸装药倒空是报废弹药销毁过程中的重要工序,目前常用的方法有^[1]:蒸汽加热倒药法、热水脱药法和高压水射流倒药法等。蒸汽加热倒药法仅适用于 TNT 等低熔点的弹丸装药;热水脱药法只适用于注装装药;高压水射流倒药法主要存在作业效率低的问题,难以实现工业化。随着采用混合装药的弹丸逐步进入报废期,探索出一种通用性好、安全、高效的倒药方法,是我军报废弹药销毁工作持续发展的紧迫需求。

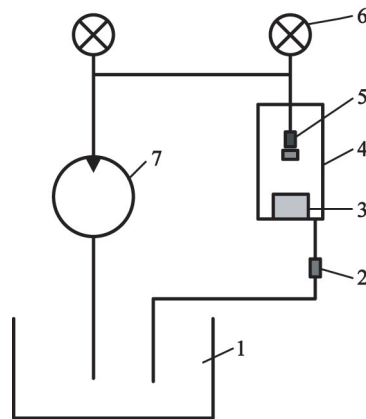
水力空化是指液体流过空化装置(如空化喷嘴)时产生空化泡的一种空化现象,空化泡溃灭瞬间形成的持续微射流和冲击波,对固体表面形成强大的破碎作用。在国内,其应用研究主要集中在污水处理、破岩及油罐清洗等方面^[2-3]。张军^[4]、姜鹏^[5]等对燃油喷嘴内部流场及空化进行了研究,分析了影响喷嘴内部空化的有关参数;卢义玉等^[6-7]对淹没条件下的空化水射流破碎岩石进行了相关研究,分析了影响空化水射流冲蚀效果的主要因素。在国外,水力空化技术在管道清洗、污水处理及过程强化等领域已有成熟应用,特别是俄罗斯等国已将该技术应用于弹丸倒药并显著提高弹丸倒药效率。

目前,我国基于水力空化技术的弹丸倒药技术还未见报道。有鉴于此,本文将以某型照明炬为研究对象,对水力空化倒空技术进行试验探索,分析水力空化水射流参数对照明炬冲蚀效果的影响,为弹丸装药倒空技术提供一定的理论依据。

1 试验

1.1 试验装置和测量方法

水力空化试验系统如图 1 所示。试验装置主要有高压水泵、空化容器和空化喷嘴。PM-3612 型高压水泵,上海熊猫机械有限公司,额定功率为 3 kW,最高压力为 17 MPa,流量为 10 L/min。空化容器材料为有机玻璃。空化喷嘴可调节高度。



1 - 水箱;2 - 控制阀;3 - 照明炬;4 - 空化容器;
5 - 空化喷嘴;6 - 压力表;7 - 高压泵

图 1 水力空化试验系统

Fig. 1 Experimental system of hydrodynamic cavitation

试验系统基本原理为:高压水泵为水力空化的发生提供足够的喷嘴入口压力,高速流体通过缩放型空化喷嘴,促使空化水射流的形成,空化容器内注满水,空化泡在空化容器内经历初生、生长、膨胀、压

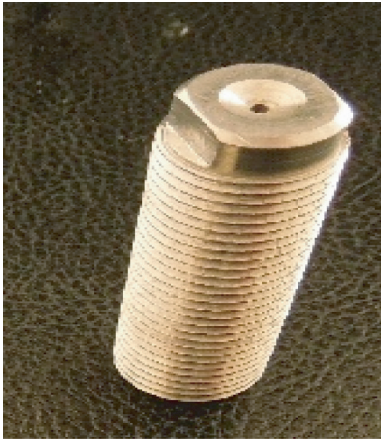
^{*} 收稿日期:2014-12-22

作者简介:满海涛(1987~),男,硕士研究生,主要研究领域为弹药系统设计与试验评估。E-mail:mantaihua@126.com

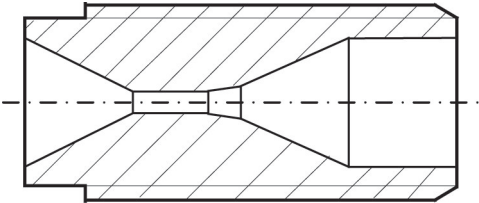
通信作者:罗兴柏(1962~),男,教授,主要研究领域为弹药系统设计与试验评估。

缩及溃灭的过程,空化泡溃灭瞬间对照明炬表面形成巨大的剥蚀作用,将照明炬逐步破碎。空化容器也用于空化冲蚀效果的可视化研究。

试验采用缩放型空化喷嘴,如图 2 所示。用游标卡尺测量冲蚀深度和冲蚀直径,用秒表记录时间。试验材料为某型照明炬。用冲蚀体积作为评定照明炬冲蚀效果的参数。



(a) 实物图



(b) 结构图

图 2 缩放型空化喷嘴

Fig. 2 Scaling cavitation nozzle

1.2 试验方法

选取 3 个相同的照明炬,进行 3 组试验。第 1 组试验固定喷嘴距(20 mm)和冲蚀时间(60 s),改变喷嘴入口压力;第 2 组试验固定喷嘴入口压力(12 MPa)和冲蚀时间(60 s),改变喷嘴距;第 3 组试验固定喷嘴距(20 mm)和喷嘴入口压力(12 MPa),改变冲蚀时间。每次试验,照明炬被冲蚀成一个近似圆柱体的凹坑,用游标卡尺测量凹坑的深度和直径,每个凹坑测量 3 次,取平均值,利用圆柱体体积计算方法,获得照明炬被冲蚀体积。

2 结果与讨论

2.1 喷嘴入口压力对冲蚀效果的影响

保持喷嘴距 20 mm,冲蚀时间为 60 s,对照明炬进行不同喷嘴入口压力下的冲蚀试验。照明炬冲蚀效果如图 3 所示;冲蚀效果参数见表 1,其中冲蚀直径为 3 次测量的平均值。

由图3和表1可以看出,随着喷嘴入口压力的增加,冲蚀深度逐渐增加,冲蚀直径逐渐减小,冲蚀



(a) $p = 12 \text{ MPa}$ (1[#])



(b) $p = 14 \text{ MPa}$ (2[#])



(c) $p = 16 \text{ MPa}$ (3[#])

图 3 不同喷嘴入口压力下的冲蚀效果

Fig. 3 Erosion effect under different inlet pressure of nozzle

表 1 不同喷嘴入口压力下的冲蚀效果参数

Tab. 1 Erosion parameters under different inlet pressure of nozzle

序号	喷嘴入口 压力/MPa	冲蚀直径/ mm	冲蚀深度/ mm	冲蚀体积/ mm ³
1 [#]	12	7.73	6.76	317.08
2 [#]	14	7.11	8.56	339.69
3 [#]	16	6.31	11.93	372.86

体积逐步增加。

喷嘴入口压力决定水力空化强度的大小,直接影响水力空化的冲蚀效果,不考虑喷嘴距、冲蚀时间对

空化强度大小的影响,拟合出喷嘴入口压力与冲蚀深度、冲蚀体积之间的关系,对研究水力空化的冲蚀效果有指导意义。根据试验数据,喷嘴入口压力 p 和冲蚀深度 H 的拟合函数为:

$$H = 24.047\,71 - 3.418\,5p + 0.165\,54p^2. \quad (1)$$

式中: H 为冲蚀深度, mm; p 为喷嘴入口压力, MPa。

曲线如图 4 所示。

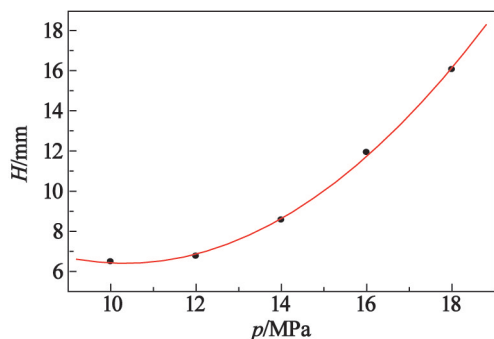


图 4 喷嘴入口压力与冲蚀深度的关系曲线

Fig. 4 Relationship between entrance pressure of nozzle and erosion depth

喷嘴入口压力 p 和冲蚀体积 V 的拟合函数为:

$$V = 408.122\,29 - 24.58p + 1.408\,21p^2. \quad (2)$$

式中: V 为冲蚀体积, mm^3 ; p 为喷嘴入口压力, MPa。

曲线如图 5 所示。

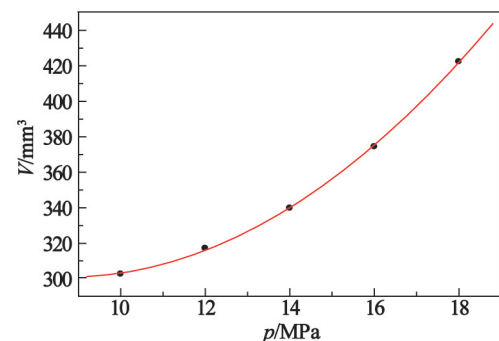


图 5 喷嘴入口压力与冲蚀体积的关系曲线

Fig. 5 Relationship between entrance pressure of nozzle and erosion volume

由图 4 和图 5 可以看出,冲蚀深度和冲蚀体积随着喷嘴入口压力的增加成二次曲线关系增加,这与文献[8]的研究结果是一致的。

空化数(N_c)是描述空化初生和衡量空化强度的参数,其表达式为^[9]:

$$N_c = \frac{p_1 - p_2}{p_2 - p_v}. \quad (3)$$

式中: p_1 为喷嘴入口压力, MPa; p_2 为喷嘴出口压力, MPa; p_v 为液体的饱和蒸汽压, MPa。

由式(3)可知,随着 p_1 的增大,空化喷嘴内部的压差会增大,空化数变大,意味着压力梯度变大,流

体速度增大,喷嘴出口处的低压区范围会增长,空化区域逐步向喷嘴出口的方向延伸,当空化数增加到一定值时,空化区域就会延伸到喷嘴的出口处,空化区域明显地增大。

因此,随着空化区域的不断向前延伸,空化泡的生长区会增长,使得空化区域内的空化泡更加充分地生长而且剧烈地溃灭,冲蚀深度就会逐步增加;随着空化强度的增大,空化泡的溃灭压力就会不断增加,冲蚀效果就会越好,即冲蚀体积会逐渐变大。

2.2 喷距对冲蚀效果的影响

喷距是指流体从喷嘴出口到照明炬上表面的垂直距离。在保持喷嘴入口压力为 12 MPa,冲蚀时间为 60 s 的条件下,调整喷距,观察记录对照明炬冲蚀效果的影响。

试验用缩放型空化喷嘴的喉部直径为 $d = 1$ mm,定义 ε 为喷距 L (mm) 与喷嘴喉部直径 d (mm) 之比,即喷距直径比 $\varepsilon = L/d$ 。

通过试验数据,可得到喷距直径比 ε 与冲蚀深度、冲蚀体积之间的关系,如图 6 所示。

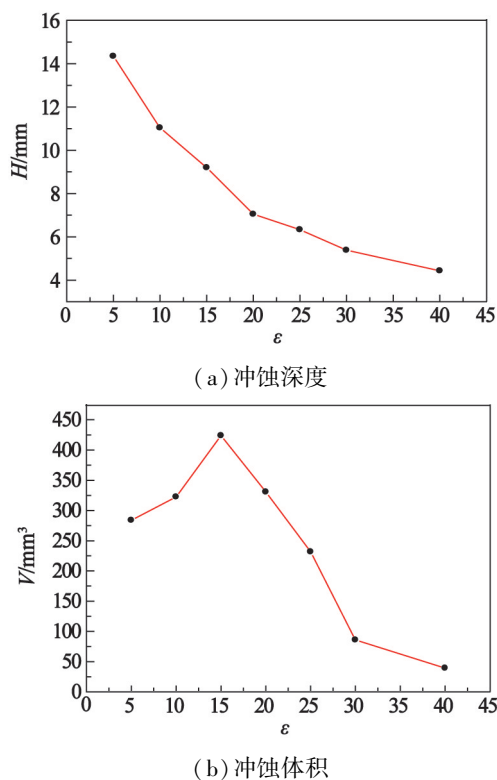


图 6 喷距直径比与冲蚀深度和冲蚀体积的关系
Fig. 6 Spray distance diameter ratio versus erosion depth and erosion volume

由图 6(a) 可看出,冲蚀深度随着喷距直径比的增大而减小。由图 6(b) 可看出,喷距直径比在 5 ~ 15 范围内,冲蚀体积随着喷距直径比的增大而增大;喷距直径比在 15 ~ 25 范围内,冲蚀体积随着喷

距直径比的增大而减小;喷距直径比在 25 以后,冲蚀体积大幅度减小。

在淹没条件下,水力空化主要靠空化泡溃灭的机械作用,目前合理的解释是空化泡溃灭产生的冲击波和微射流^[10],其作用方式如图 7 所示。

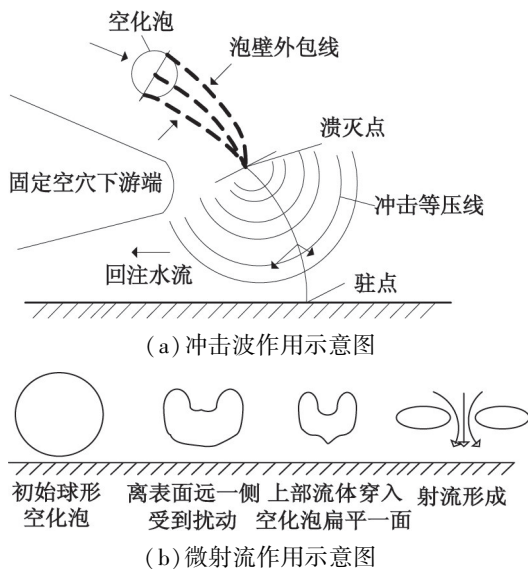


图 7 空化泡作用方式图

Fig. 7 Cavitation bubble action figure

由图 7(a)可知,游移空化泡向照明炬表面靠近时,压力越来越高,在溃灭点时(该点压力超过汽化压力)空化泡溃灭,压力冲击波则会从溃灭中心辐射传播,当传播到照明炬表面时,对照明炬表面有强大的剥蚀作用,形成一个球面凹形蚀坑。空化泡越大,空化泡游移到溃灭边界的时间越长,即空化泡越大,其溃灭点越接近照明炬表面。一般的游移空化泡如果远离照明炬表面就溃灭,不足以产生破坏性冲击,只有空化泡游移到距离照明炬表面足够近的距离溃灭,才能形成冲蚀凹坑。

由图 7(b)可知,较大尺寸的空化泡向照明炬表面游移时,空化泡表面的压力梯度逐步变大,逐渐发生变形,即空化泡先在远离照明炬表面的一侧拉平,继而凹陷,最后形成速度很大的微型液体射流,穿透空化泡体射向照明炬表面,对照明炬表面形成强烈的剥蚀作用,形成一个冲蚀凹坑。只有空化泡靠近照明炬表面一定距离,微射流才会对固壁面起到一定的剥蚀作用。

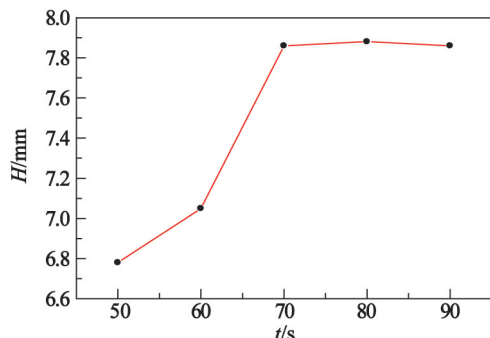
当保持喷嘴入口压力为定值时,空化数为定值,表明空化试验系统产生稳定的空化区域(长度值和宽度值一定)。因此,当喷距小于最优喷距时,随着喷距的逐步增大,对照明炬有效作用的空化泡逐步增多,冲蚀效果越好;当喷距为最优喷距时,冲蚀效果最好;当喷距大于最优喷距且在有效空化区域内

时,随着喷距的增大,对照明炬有效作用的空化泡逐步减小,冲蚀效果逐步减小;当喷距超出有效空化区域时,冲蚀效果急剧下降,直至起不到冲蚀效果。

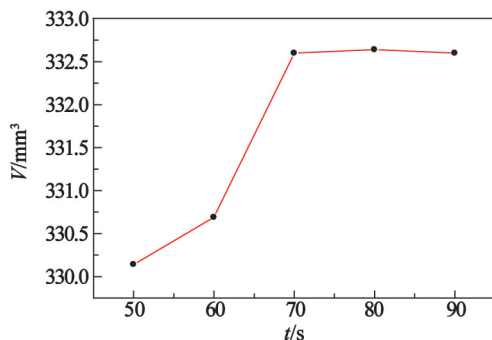
综上所述,不是所有的空泡都对固壁面起剥蚀作用,只有当空泡距离固壁面一定距离范围内才能发挥剥蚀作用。因此,存在一个最优喷距,本试验系统的最优喷距为 15 倍的喷嘴喉部直径。

2.3 冲蚀时间对冲蚀效果的影响

在保持喷嘴入口压力 12 MPa、喷距 20 mm 的条件下,改变冲蚀时间,得到的试验结果如图 8 所示。



(a) 冲蚀深度



(b) 冲蚀体积

图 8 冲蚀时间与冲蚀深度和冲蚀体积的关系

Fig. 8 Erosion time versus erosion depth and erosion volume

由图 8 可知,冲蚀深度和冲蚀体积在一定时间内都是随着冲蚀时间的增加而增加,当增加到一定值时,冲蚀深度和冲蚀体积增加不明显,处于一个相对稳定的阶段。本试验系统最佳冲蚀时间为 70 s。

当空化区域及喷距一定时,随着照明炬冲蚀深度的增加,相当于间接增加了喷距。已经分析了喷距对照明炬冲蚀效果的影响,在有效喷距内,冲蚀体积和冲蚀深度随着时间的增加而增大,当照明炬破碎到某一距离时,即喷距超出了有效喷距,冲蚀效果变差,不再随着时间的增加而增大,而是处于一个相对稳定的阶段。

3 结论

通过设计的试验系统,进行了基于水力空化技术的某型照明炬冲蚀试验。根据试验结果,经过分

析研究,得到如下结论:

1)本系统将照明炬冲蚀成一个球面凹形蚀坑,验证了水力空化在报废弹药倒空领域的可行性;

2)喷嘴入口压力影响水力空化的冲蚀效果,即照明炬的冲蚀效果在变化趋势上与喷嘴入口压力成二次曲线关系,随着喷嘴入口压力的增加成二次曲线关系增加;

3)淹没条件下,水力空化冲蚀照明炬存在最优喷距,对照明炬起到最佳冲蚀效果,本试验条件下的最优喷距为 15 倍的喷嘴喉部直径;

4)当喷嘴入口压力及喷距一定时,冲蚀效果随着时间的增加而增加,当增加到一定值时,冲蚀效果无明显变化,本试验条件下的最优冲蚀时间为 70 s。

参 考 文 献

- [1] 巩永孝,王宝全. 弹药处废技术[M]. 石家庄:中国人民解放军军械工程学院,1996.
- [2] 张淑君,陈可. 基于水力空化技术的降解特性研究[J]. 力学与实践,2013,35(1):26-30.
Zhang Shujun, Chen Ke. Study of degradation characteristics based on hydrodynamic cavitation [J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(1): 26-30.
- [3] 管金发,邓松圣,雷飞东,等. 空化水射流理论 and 应用研究[J]. 石油化工应用,2010,29(12):15-19.
Guan Jinfa, Deng Songsheng, Lei Feidong, et al. Research on the theory and application of cavitation water jet[J]. Petrochemical Industry Application, 2010, 29(12): 15-19.
- [4] 张军. 柴油机喷嘴内空化效应的机理及射流破碎特征的研究[D]. 天津:天津大学,2010.
Zhang Jun. Investigations of cavitation in nozzle and characteristic of breakup for diesel spray[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [5] 姜鹏. 喷嘴内部流场及空化现象的数值模拟[D]. 太

原:太原理工大学,2011.

- Jiang Peng. Numerical simulation internal flow field and cavitation phenomena in a nozzle[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [6] 向文英,李晓红,卢义玉,等. 空化射流效应的实验研究[J]. 中国机械工程,2006,17(13):1388-1391.
Xiang Wenying, Li Xiaohong, Lu Yiyu, et al. Experimental study of domino effect on cavitating water jet[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(13): 1388-1391.
- [7] 卢义玉,葛兆龙,李晓红,等. 高压空化水射流破岩主要影响因素研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2009,41(6):1-5.
Lu Yiyu, Ge Zhaolong, Li Xiaohong, et al. Study on main factors of rock breakage with high-pressure cavitating water jets[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(6): 1-5.
- [8] 吴亚丹. 文丘里管内空泡及空泡群的演变及其溃灭过程[D]. 大连:大连理工大学,2009.
Wu Yadan. The evolution and collapse characteristics of bubble and bubble cluster in venturi[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [9] 王忠远,孙剑,董庆兵,等. 柴油机喷空内部空化效应的可视化实验研究[J]. 燃烧科学与技术,2012,18(3):280-287.
Wang Zhongyuan, Sun Jian, Dong Qingbing, et al. Visualization of cavitation in diesel nozzle orifice[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012, 18(3): 280-287.
- [10] 占梁梁. 水力机械空化数值计算与试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2008.
Zhan Liangliang. Study on numerical calculation and experiment of hydraulic machinery cavitation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.

Experimental Study on Erosion of Illuminant Candle Based on the Hydrodynamic Cavitation Technology

MAN Haitao^{①②}, LUO Xingbai^①, DING Yukui^①, LIU Guoqing^①, ZHEN Jianwei^①

^①Ordnance Engineering College (Hebei Shijiazhuang, 050003)

^②No. 72373 Unit of PLA (He'nan Luoyang, 471900)

[ABSTRACT] In order to verify the application of hydrodynamic cavitation in the charging removal from waste ammunition and identify correlative parameters, the hydrodynamic cavitation removal experiment system was designed and applied using a certain type of illuminant candle to study the influences of the nozzle inlet pressure, spraying distance and erosion time on the erosion effect of the illuminant candle. Experimental results show that the hydrodynamic cavitation experiment system can be used in erosion of illuminant candle. The erosion effect is enhanced with the boosting of nozzle inlet pressure. Spraying distance influences the erosion effect, in which there exists an optimal spraying distance. The erosion effect increases in a certain extent and then tends to be stable with the boosting of erosion time. It is an innovative way for removing explosive from waste ammunition.

[KEY WORDS] hydrodynamic cavitation; illuminant candle; erosion; charging removal