

文章编号:1006-9941(2020)04-0358-07

淹没空化水射流倒空钝黑铝炸药实验研究

张么玄¹,廉鹏¹,康超¹,陈松¹,雷靖华²,罗志龙¹,李萌¹,陈厚和³

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 中国兵器工业试验测试研究院, 陕西 华阴 714200; 3. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了探索淹没空化水射流倒空弹药装药的作用过程 and 安全性,以钝黑铝炸药为实验对象,开展了淹没空化水射流倒空弹药装药实验研究。采用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置,获得钝黑铝应力-应变力学性能;搭建空化水射流倒空实验装置,考察空化水射流对钝黑铝的冲击破碎效果和作用机理;采用扫描电子显微镜(SEM)表征破碎颗粒形貌,获得空化水射流对钝黑铝细观破碎模式;搭建热电偶测温装置测量空化水射流冲击过程中钝黑铝内部温度变化,并结合钝黑铝差示扫描量热(DSC)测试结果,探讨实验过程的安全性。结果表明,钝黑铝应力-应变曲线包括脆弹性阶段、非线性弹塑性阶段和应变软化阶段3个阶段,并且动态加载下的损伤具有应变率效应;空化水射流能够在15 min内干净倒空钝黑铝炸药,收集得到的破碎颗粒最大粒径不超过3 cm;钝黑铝的破坏主要是由空泡溃灭时产生微射流和冲击波的强大冲击作用所致,其细观破碎模式主要是晶体与黏结剂和铝粉之间的沿晶分离,并伴随少量的穿晶现象,没有发现晶粒破碎的现象;空化水射流倒空钝黑铝炸药是安全的,最高温度约达50℃,小于规定的热起爆温度(160℃),不易引发钝黑铝爆炸。

关键词: 钝黑铝炸药;淹没空化水射流;破碎模式;安全性**中图分类号:** TJ55**文献标志码:** A**DOI:**10.11943/CJEM2019189

1 引言

废旧弹药的处理是国家军事装备保障的重要组成部分,如何将装药从弹药中安全倒出是废旧弹药绿色处理面临的重要问题之一,直接影响后续弹药装药能否进一步回收再利用^[1]。目前国内有大量的高能压装类(如钝黑铝)或浇注类装药弹药进入退役期成为报废弹药,并且数量逐年递增,由于无法利用现有蒸汽熔融法(该法仅适用于装填含梯恩梯或蜡类装药弹药的倒空处理)倒出装药^[2-5],只能采用露天烧炸的方法处理,既不安全,同时也造成大气污染和含能资源的浪费,不符合国际倡导的“3R”(可回收、可利用、可循环)绿色处理理念^[6-7]。

针对上述问题,国内外研发出高压水射流倒药技术^[8-10],该技术利用高压水直接冲击装药表面,通过提高射流压力对装药进行破碎或切割,利用强大的冲击作用将装药破碎或切割从而实现倒空处理,具有效率高,适用口径范围宽的优势,如朱左明等^[11]采用30~50 MPa高压水射流倒空NEPE推进剂装药,可实现装药的有效破碎,并且射流压力越高,倒空效果越好;蒋大勇^[12]考察了60~100 MPa高压水射流对HTPB推进剂在不同工况条件下的冲击效应和切割效果,获得高压水射流破碎切割过程的最佳射流参数;何远航等^[13]通过理论计算和验证试验研究发现,丁羟固体推进剂在高压水射流作用下具有热点增长、局部反应、混合体系3种点火模式,指出在高压水射流破碎或切割试验过程中为保障安全应尽量控制或及时消除这些点火因素。高压水射流倒药技术的不足之处在于由于压力过高,对喷嘴、高压泵、管路、密封、制造加工和安装的要求都大大提高,这样使得成本大幅上升,并且对一些敏感度稍高的装药不适用,高压易引起装药爆炸,带来安全隐患。

基于高压水射流倒药技术存在的问题,本研究提

收稿日期: 2019-07-02; **修回日期:** 2019-08-21**网络出版日期:** 2019-10-12**基金项目:** 总装预研共用技术项目(4140404XXX)**作者简介:** 张么玄(1985-),女,博士,主要从事含能材料工艺研究。

e-mail: yao85225zhang@126.com

通信联系人: 陈松(1982-),男,研究员,主要从事含能材料工艺研究。

e-mail: 1064188698@qq.com

引用本文: 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.ZHANG Yao-xuan, LIAN Peng, KANG Chao, et al. Experimental Study of Emptying A-IX-II Explosive Using Submerged Cavitation Water Jet[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Caijiao)*, 2020, 28(4):358-364.

出基于空化原理强化装药破碎的淹没空化水射流倒药技术,它是利用二十至三十兆帕的中低压射流通过一定结构设计的空化喷嘴,产生大量的空化泡,利用空泡溃灭时所产生的冲击来增强射流的作业效果^[14-15]。该法优势在于所需的射流压力较低,淹没条件下空化射流的形成,对提高射流自身空化强度、提高作业效率都有显著的效果,并且装药处于淹没水环境中可极大降低作业过程的燃爆风险,是一种极具潜力的弹药装药倒空技术,目前该技术在我国弹药倒空方面的理论和实验研究报道较少。因此,本研究以典型含铝炸药——钝黑铝装药为实验对象,开展淹没空化水射流倒空处理实验,对其破碎作用效果、作用机理、细观破碎模式和温度效应等内容进行研究,考察淹没空化水射流倒空钝黑铝装药的可行性和安全性,为含铝装药以及其他装药弹药的倒空处理提供理论基础和技术指导。

2 实验部分

2.1 实验装置与试样

2.1.1 实验试样

实验使用钝黑铝药柱,由钝黑铝炸药造型粉颗粒压制而成,药柱平均密度为 $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,试样配方(质量分数)为:76% RDX,20% 铝粉,4% 黏结剂,其中黏结剂由地蜡、硬脂酸和少量苏丹红组成,试样规格分别为: $\Phi 76 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, $\Phi 12 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$, $\Phi 50 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 。

2.1.2 实验装置和仪器

淹没空化水射流倒药实验系统如图1所示,西安近代化学研究所制,该系统主要由空化喷嘴、试样夹固旋转装置、压力表、高压泵、储水槽、药水过滤箱等装置组成,其中,高压泵压力可调,用以改变射流压力,喷嘴高度可调,用以改变靶距(喷嘴与试样之间的距离)。

力学性能测试采用分离式霍普金森压杆,西安近代化学研究所制,压杆材质为LY12铝,直径为16 mm;形貌表征采用 Quanta 600FEG 型场发射扫描电镜(SEM),美国 FEI 公司;温度测量采用 WRe5/26 热电偶,泰州双华仪表有限公司,偶丝直径为0.2 mm,热响应时间小于2 ms,测量端两点对焊,冷端用隔热材料封装在金属壳体内,动态响应误差较小,具有足够的抗爆强度;DSC 热分析测试采用 200F3 型差示扫描量热仪,德国耐驰仪器制造有限公司。

2.2 实验方法

淹没空化水射流倒药实验所用试样规格为

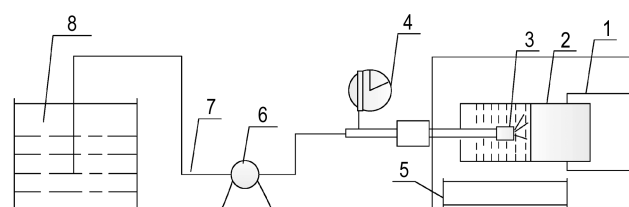


图1 空化水射流破碎钝黑铝炸药实验系统

1—夹固旋转装置,2—试样,3—空化喷嘴,4—压力表,5—药水过滤箱,6—高压泵,7—管线,8—储水槽

Fig.1 Experimental system for cavitation water jet breaking A-IX- II explosive

1—clamping rotating device, 2—explosive sample, 3—cavitation nozzle, 4—pressure gauge, 5—filter tank for explosive and water, 6— high-pressure pump, 7—water pipeline, 8—water storage tank

$\Phi 76 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,试样始终在淹没水环境中,高压泵循环吸入低压水和排出高压水,把低压水加压至实验所需的压力,送至空化喷嘴射出,获得冲击试样的空化水射流。实验所用空化喷嘴为三喷头喷嘴,如图2所示,总直径为16 mm,三个喷头轴线与喷嘴主轴线的夹角不等,这种设计使空化水射流对试样具有作用覆盖面积大、破碎快的特点,射流压力为25 MPa,喷嘴到试样表面的距离为(即靶距)为30 mm。实验过程中,试样固定于夹固旋转装置上,在夹固旋转装置带动下绕其中轴线均匀缓慢旋转,喷嘴与试样之间保持相对的旋转,空化水射流在试样表面形成的冲击轨迹如图3所示,空化水射流以不同的角度作用于试样,在其表面冲击出蚀坑,随着试样的旋转运动,空化水射流在其表面作周向移动,最终蚀坑会在试样表面发展形成环形凹槽,可在实际倒药处理过程中实现对装药的层层剥蚀倒空。



图2 空化喷嘴

Fig.2 Cavitation nozzle

力学性能测试所用试样规格为 $\Phi 12 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$,实验中通过记录入射杆和透射杆中的脉冲信号,从而计算获取试样动态应力-应变曲线。形貌表征是对实验后收集得到的破碎试样颗粒进行微观扫描,用以观察颗粒表面的破碎形貌。温度测量过程如图4所示,所用试样规格为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,将 WRe5/26 热电偶埋于试样内部,在空化水射流冲击试样时,试样

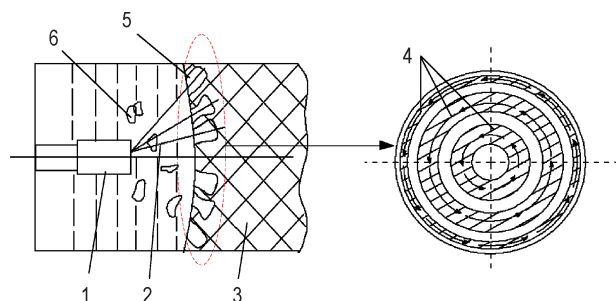


图3 空化水射流与在炸药表面形成的冲击轨迹

1—空化喷嘴, 2—空化水射流, 3—炸药, 4—环形凹槽, 5—蚀坑, 6—破碎炸药

Fig.3 Impact traces of cavitation water jet on explosive

1—cavitation nozzle, 2—cavitation water jet, 3—explosive, 4—annular grooves, 5—corrosion pits, 6—broken explosive

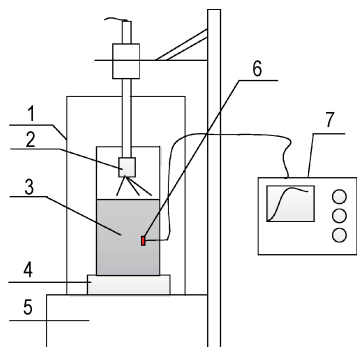


图4 炸药温度测量

1—防护箱, 2—空化喷嘴, 3—试样, 4—试样平台, 5—底座, 6—热电偶, 7—数据采集器

Fig.4 Temperature measuring device for explosive

1—protection box, 2—cavitation nozzle, 3—explosive sample, 4—sample platform, 5—substructure, 6—thermocouple, 7—data collector

夹固于试样平台上保持静止, 热电偶将模拟温度信号由数据采集器进行采集并经模、数转换后输出数字电压信号, 进而得到对应的温度值。DSC 热分析测试采用 N_2 气氛, 流量 $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 升温速率分别为 $10, 15, 20 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

3.1 钝黑铝炸药应力-应变特性

钝黑铝炸药是一种颗粒高度填充的混合物, 炸药晶粒间不可避免存在一定数量的微裂纹和空穴等初始损伤, 通常情况下含有初始损伤的炸药在动态加载下其应力-应变力学性能会表现出较强的非线性特征^[16]。空化水射流对钝黑铝的冲击作用可等同视为动态加载作用力, 为深入了解空化水射流对钝黑铝破

碎作用机理, 对其在动态加载下的应力-应变力学性能进行研究。实验结果如图5所示。

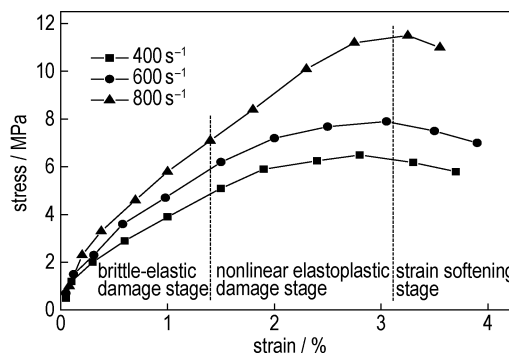


图5 钝黑铝炸药应力-应变曲线

Fig.5 The stress-strain curves of A-IX-II explosive

由图5可见, 钝黑铝应力-应变曲线包括3个阶段: 脆弹性阶段、非线性弹塑性阶段和应变软化阶段。在脆弹性阶段中, 试样内部损伤有所发展, 但不能累积; 当加载超过一定应力值后, 进入非线性弹塑性阶段, 损伤的演化将成为不可逆过程, 由于损伤带来的性能劣化使试样承载能力下降, 应力也逐渐下降, 在出现微裂纹甚至宏观裂缝的区段内, 微裂纹区和宏观裂缝损伤仍在不断扩展, 故应变将继续增长, 全曲线出现了下降段, 这就是钝黑铝的应变软化效应。在损伤演化过程中, 从弹性阶段到非线性弹塑性阶段所对应的应力-应变的临界值随着应变率不同而不同, 这表明钝黑铝的损伤具有应变率效应。

3.2 淹没空化水射流对钝黑铝炸药冲击破碎效果和作用机理

钝黑铝炸药在空化水射流冲击作用下的实验效果如图6所示, 倒出试样颗粒如图7所示。由图6和图7可以看出, 实验前炸药表面平整, 实验过程中炸药受空化水射流作用会在其表面形成环形凹槽, 这与图3所示空化水射流与炸药之间的冲击轨迹相符, 作用一段时间(15 min)后炸药被完全倒出, 装药壳体内部和内表面干净无残留炸药, 倒出炸药颗粒粒径大小不一, 最大粒径不超过3 cm。实验结果表明, 空化水射流可以从装药弹体中将钝黑铝炸药清洗干净, 并且破碎炸药颗粒小, 有利于后续回收再利用处理。

空化水射流对炸药表面的破坏主要是由空化泡溃灭时产生微射流和冲击波的强大冲击作用所致^[17], 空化水射流中含有大量的空化泡, 空化泡在炸药表面因受力失衡发生溃灭, 伴随产生微射流和冲击作用, 在炸药表面或其附近形成高压区, 产生极高的应力集中, 造成被冲击炸药表面的破坏, 这一作用过程如图8所示。

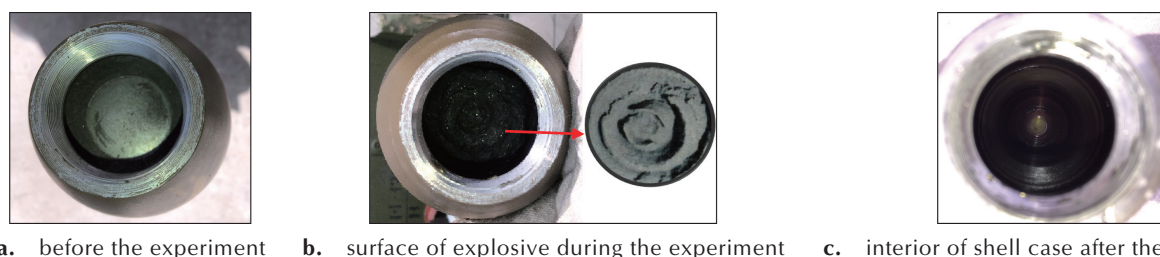


图6 实验实物图

Fig.6 Experimental factual pictures



图7 收集得到的破碎钝黑铝炸药颗粒

Fig.7 Particles of the collected broken A-IX-II explosive

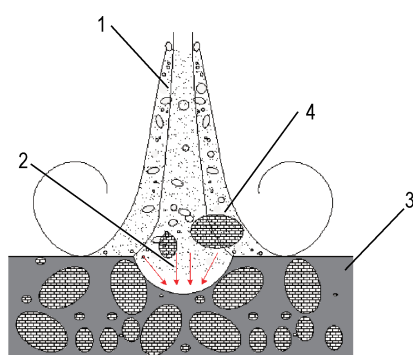


图8 空化水射流破碎炸药示意图

1—空化水射流, 2—冲击作用, 3—炸药, 4—破碎炸药

Fig.8 Schematic chart of breaking explosive by cavitation water jet

1—cavitation water jet, 2—impact action, 3—explosive, 4—broken explosive particles

为了更好地对空化水射流冲击钝黑铝炸药的破碎机理进行分析,根据空化水射流对脆性材料的破坏理论,结合前面得到的钝黑铝炸药损伤应力-应变特性,将空化水射流的持续冲击作用和空化泡溃灭瞬间产生的冲击作用假设成一个具有一定速度的刚性球体,则空化水射流对钝黑铝的破碎过程如图9所示。

根据图9所示,空化水射流对钝黑铝的破碎机理为:空化水射流刚冲击到试样表面时,在其表面一定范围形成冲击接触区域,在冲击压力作用下,表面发生了微小变形(图9a);在冲击接触区的1处切应力最大,在2处拉应力最大(图9b);随着空化水射流的持续冲击作用,当最大切应力、拉应力超过试样固有的抗切、抗

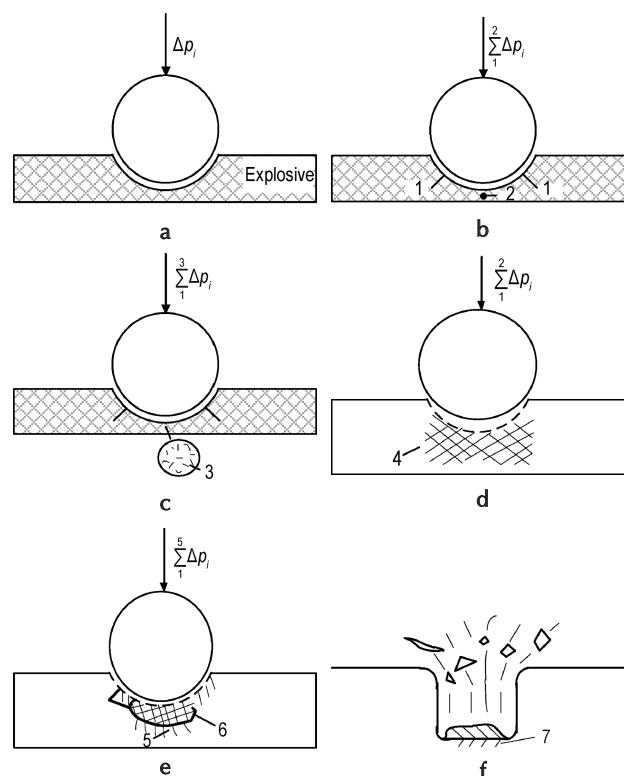


图9 空化水射流对钝黑铝炸药装药的力学破碎过程

Fig.9 The mechanical breakup process of cavitation water jet on A-IX-II explosive

拉强度时,在内部将会产生剪切及拉伸裂纹,见3区域(图9c);当空化水射流冲击作用继续增加时,试样内部剪切、拉伸裂纹会持续扩展并逐步向冲击接触面汇集,内部的微裂纹也渐渐连接成核(即裂纹集中在一个很小的范围区域内),见4区域,为试样破碎打下基础(图9d);微裂纹核区域随着空化水射流的持续冲击作用逐步被压缩,变为近似为椭球形的区域,当该区域被压缩到一定程度时,将开始膨胀使其周围试样产生切向的拉应力,当该拉应力超过试样固有抗拉强度时,试样边壁将会出现径向裂纹5,此时水射流会迅速填入这些裂纹中6(图9e),在阻力较小的自由面上将试样破碎,完成倒空过程,形成具有一定体积的凹坑(图9f),凹坑

下方为新扩展的裂纹,随着这一过程的不断反复作用,最终试样会被倒空成具有一定直径和深度的凹坑。

3.3 淹没空化水射流对钝黑铝炸药细观破碎模式

炸药的细观破碎模式有三种情况:晶粒与黏结剂分离、晶粒破碎以及黏结剂断裂^[18]。为确定钝黑铝在空化水射流作用下的细观破碎模式,选取三个钝黑铝破碎颗粒试样,如图10所示,进行SEM形貌表征,观察试样断面的SEM照片,如图11所示,其中浅色物质为黏结剂,大体积深色物质主要为RDX,小体积深色物质为铝粉。

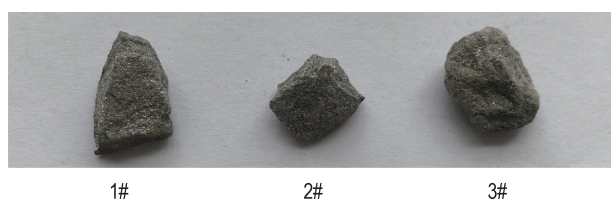


图10 钝黑铝炸药破碎颗粒SEM测试试样

Fig.10 Broken A-IX-II explosive samples used for SEM testing

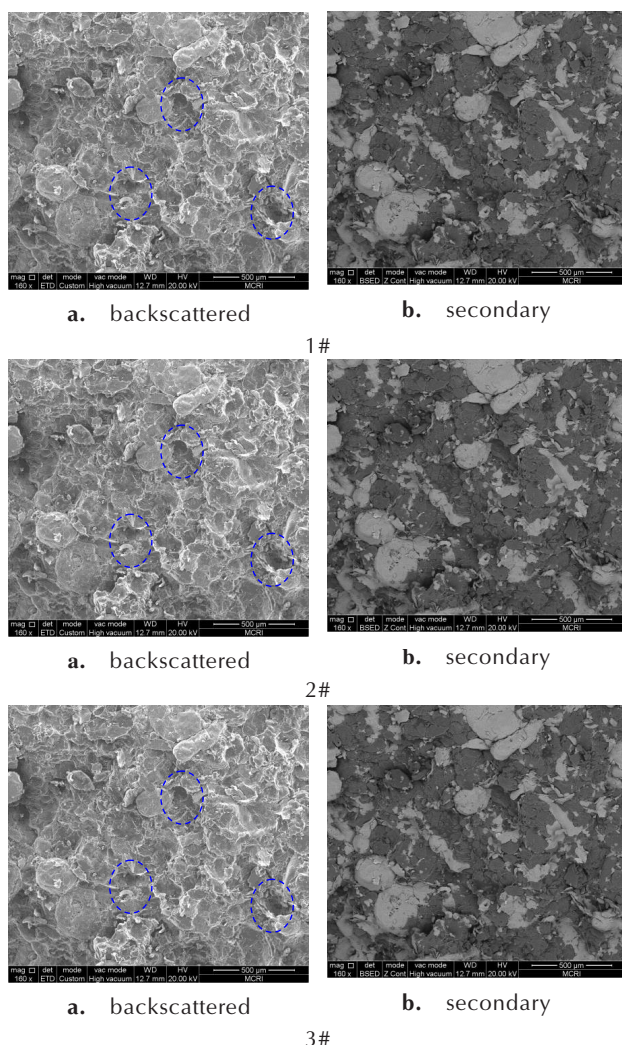


图11 破碎钝黑铝炸药SEM图

Fig.11 SEM images of broken A-IX-II explosive

由图11可见,RDX晶体与黏结剂脱粘后留下有凹坑(1#),RDX晶体有裂纹(2#)及少量的穿晶现象(3#),钝黑铝断面细观破碎模式主要是晶体与黏结剂和铝粉之间的沿晶分离,并伴随少量的穿晶现象,没有发现晶粒破碎的现象,分析原因可能为钝黑铝中含有石蜡,起钝感作用,同时其强度较低,与晶粒的黏结力较弱,在外力作用下容易首先弱化形成宏观破坏,避免炸药晶粒出现破碎。

钝黑铝炸药在一定压缩作用下,其内部应力增加,在内部会积累一定的能量,这部分能量若未能及时以宏观破坏的形式释放出去,就会积累在内部造成宏观裂纹的形成和扩展。当这部分能量大于一定数值的时候会引发RDX晶粒的破碎,同时在这一过程中伴随着炸药内部微裂纹的传播,其传播路径比较复杂,但总是沿着比较薄弱的路径进行;如果黏结剂与晶粒表面的黏结强度大于黏结剂的强度,则表现为黏结剂的断裂,反之,则表现为黏结剂与晶粒的分离,如图11(1#)所示。

3.4 淹没空化水射流冲击破碎钝黑铝炸药的温度效应

对钝黑铝炸药进行空化水射流冲击实验,空化喷嘴进水口水温为30℃,冲击持续8 min后连接热电偶的数据采集器显示试样内部温度趋于稳定,此时停止实验,检测到试样在空化水射流冲击作用下的最高温度约50℃。钝黑铝炸药在实验过程中的温度变化曲线如图12所示。由图12可见,钝黑铝炸药在空化水射流冲击

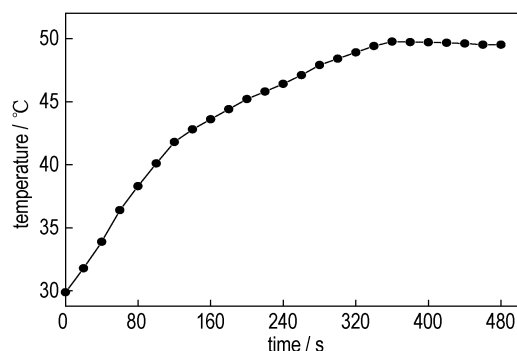


图12 空化水射流作用下钝黑铝炸药内部温度随时间的变化

Fig.12 Internal temperature versus time curve of A-IX-II explosive during the impact process of cavitation water jet

击过程中温度有升高现象,温升过程可分为两个不同升温速率阶段,空化水射流作用140 s之前的的炸药升温速率高于后期的炸药升温速率,整个过程温度升高约20℃。分析原因可能为:前期升温速率快是由于空化水射流作用于试样时,冲击摩擦生热在试样内部产生热量积累,并且试样组分中含有铝粉,铝粉与射流水及水蒸气直接接触发生放热反应,这些热量来不及散失从而

引起温度突升;后期温升速率缓慢是由于试样在空化水射流的冲击作用下形成凹槽通路,热量不容易积累,加之热量迅速被大量射流冷态水包围,并随之迅速流出而带走多余的热量,导致后期温度升高缓慢。

对钝黑铝炸药进行DSC热分析测试,结果如图13所示。由图13可见,钝黑铝炸药在不同升温速率下的吸热峰和放热峰在205℃和240℃附近,当温度升至205℃附近时钝黑铝炸药发生融化而吸收大量热量,继续升温至240℃附近时钝黑铝炸药发生化学分解反应而释放出大量热量。钝黑铝炸药在温度为205℃时会发生融化而影响炸药的结构性能,减去炸药生产部门给出的安全系数50℃^[19],认为钝黑铝炸药的破碎工艺温度不应超过155℃。由图12得知钝黑铝炸药在空化水射流冲击作用下的最高温度约为50℃,低于160℃,表明空化水射流冲击钝黑铝炸药引起的温升效应在安全范围内,不易引发钝黑铝炸药爆炸。

4 结论

(1)钝黑铝应力-应变曲线包括脆弹性阶段、非线性弹塑性阶段和应变软化阶段,其在动态加载下的损伤具有应变率效应。

(2)空化水射流能够干净倒空钝黑铝炸药,实验过程中试样受空化水射流作用会在其表面形成环形凹槽冲击轨迹,倒空后壳体内部和内表面无残留炸药,倒出炸药颗粒粒径大小不一,最大粒径不超过3 cm,有利于后续回收再利用处理。

(3)空化水射流对钝黑铝表面的破坏主要是由空泡溃灭时产生微射流和冲击波的强大冲击作用所致,在作用过程中试样受到切应力和拉应力的作用,当应力超过其自身的屈服极限时,形成裂纹,随着空化水射流的持续冲击作用,裂纹成核并不断扩展,最终钝黑铝被破碎倒空。

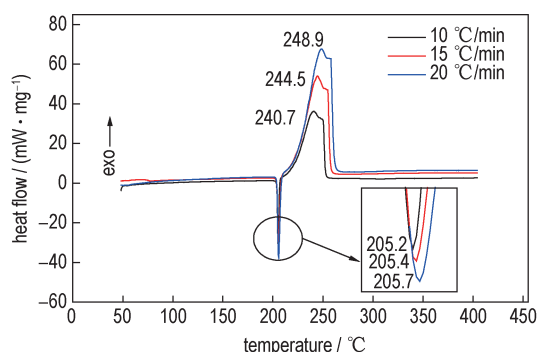


图13 钝黑铝炸药DSC曲线

Fig.13 DSC curves of A-IX-II explosive

(4)钝黑铝细观破碎模式主要是晶体与黏结剂和铝粉之间的沿晶分离,并伴随少量的穿晶现象,没有发现晶粒破碎的现象。

(5)钝黑铝在空化水射流冲击过程中引起的温度效应在安全范围内,最高温度约为50℃(低于160℃),不易引发钝黑铝炸药爆炸。

参考文献:

- [1] 李金明, 雷彬, 丁玉奎. 报废通用弹药销毁处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012:66-67.
LI Jin-ming, LEI Bin, DING Yu-kui. Technology of conventional ammunition disposal [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012:66-67.
- [2] 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.
XIANG Hong-jun, LEI Bin, XING Yan-chang. Analysis and design on technology of emptying explosive from pellet by EM-induction heating [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2015, 35(4): 47-50.
- [3] 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.
YAN Guo-bin, YU Ya-lun. Technical exploration of destruction of discarded ammunition[J]. *Engineering Blasting*, 2011, 17(3): 92-94.
- [4] 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.
GUO Tao, QI Shi-fu, WANG Shu-min, et al. Applications of blasting technology of large quantities of discarded munitions[J]. *Engineering Blasting*, 2011, 17(2): 89-91.
- [5] 孔森, 雷林, 岳显, 等. 一种含能炸药壳体的安全自动拆分技术[J]. 兵工自动化, 2018, 37(1): 89-92.
KONG Miao, LEI Lin, YUE Xian, et al. Safe automatic separation technology for energetic propellant shell[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2018, 37(1): 89-92.
- [6] 王昕. 绿色火炸药及相关技术的发展与应用[J]. 火炸药学报, 2006, 29(5): 67-71.
WANG Xin. Development and application of green propellants and explosives and related technologies[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(5): 67-71.
- [7] 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): 25-28.
YI Jian-hua, ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, et al. Research progress of green destruction and reclamation technology of obsolete rocket motor charge in America and Russia[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2006, 4(6): 25-28.
- [8] Dr. Steve Schmit. Ultra-high pressure water jets in demilitarization [C]//2013 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, USA: IEEE, 2013: 162-171.
- [9] Hashish M, Miller P. Cutting and washout of chemical weapons with high-pressure ammonia jets [C]//The Conference of Jetting Technology, 2000: 81-91.
- [10] 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, 23(3): 17-19.
ZHANG Bao-liang. The demand analysis on the formulation of "specification for emptying projectile by high pressure water

- jet"[J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2010, 23(3): 17-19.
- [11] 朱左明, 王焯军, 韩启龙. 高压水射流清理 NEPE 推进剂装药的可行性分析[J]. *火炸药学报*, 2013, 36(6): 55-59.
- ZHU Zuo-ming, WANG Xuan-jun, HAN Qi-long. Feasibility analysis of high-pressure waterjet clearing NEPE propellant charge[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(6): 55-59.
- [12] 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): 430-435.
- JIANG Da-yong. Chipping performance of HTPB propellant by high-pressure water jet[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2013, 14(4): 430-435.
- [13] 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.
- HE Yuan-hang, YU Hong-tao, ZHANG Qing-ming. Ignition mode of solid propellant processed with high-pressure water jet[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(2): 97-99.
- [14] 张国文, 陈新发. 炸药模拟件水射流切割参数的试验研究[J]. *含能材料*, 2001, 9(1): 24-27.
- ZHANG Guo-wen, CHEN Xin-fa. Research on water jet cutting parametrization test for simulated material of explosive[J]. *Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001, 9(1): 24-27.
- [15] 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.
- MAN Hai-tao, LUO Xing-bai, DING Yu-kui, et al. Jian-wei. Experimental study on erosion of muminant Candle Based on the Hydrodynamic Cavitation Technology[J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(4): 60-64.
- [16] 张冬梅, 常海, 郑朝民, 等. A-IX-II 压装炸药失效模式分析[J]. *火工品*, 2014, 2(1): 29-32.
- ZHANG Dong-mei, CHANG Hai, ZHENG Chao-min, et al. Failure modes analysis of pressed charge A-IX-II[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2014, 2(1): 29-32.
- [17] 刘瑞鹏, 王世英. 不同增塑剂含量对含铝炸药环境适应性能的影响[J]. *四川兵工学报*, 2013, 34(2): 35-37.
- LIU Rui-peng, WANG Shi-ying. Environmental compatibility of aluminum explosives with different contents of plasticizer[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2013, 34(2): 35-37.
- [18] 卢芳云, 林玉亮, 王晓燕, 等. 含能材料的高应变率响应实验[J]. *火炸药学报*, 2006, 29(1): 1-4.
- LU Fang-yun, LIN Yu-liang, WANG Xiao-yan, et al. Experimental investigation on dynamic response of energetic materials at high strain rate[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(1): 1-4.
- [19] 林兴华. 空化射流流场结构与冲击特征的数值模拟研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2016.
- LIN Xing-hua. The numerical simulation research of the cavitation impact jet flow field structure and characteristics [D]. Shenyang Ligong University, 2016.

Experimental Study of Emptying A-IX-II Explosive Using Submerged Cavitation Water Jet

ZHANG Yao-xuan¹, LIAN Peng¹, KANG Chao¹, CHEN Song¹, LEI Jing-hua², LUO Zhi-long¹, LI Meng¹, CHEN Hou-he³

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. China Ordnance Industry Institute of Experiment and Test, Huayin 714200, China; 3. Chemical Engineering Institute, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To explore the process and safety of emptying ammunition charge by submerged cavitation water jet, relative experimental research was carried out with A-IX-II explosive as the experimental object. The split Hopkinson pressure bar (SHPB) device was applied to obtain stress-strain mechanical properties of A-IX-II. The emptying experimental system was set up to investigate the impact crushing effect and mechanism of cavitation water jet on A-IX-II. Scanning electron microscope (SEM) was used to characterize the morphology of broken particles and gain the mesoscopic breakup mode of A-IX-II. The internal temperature of A-IX-II during the impact process of cavitation water jet was measured with a self-designed thermocouple temperature measurement device, and the experimental safety was discussed by combining the results of differential scanning calorimetry (DSC) of A-IX-II. The results show that stress-strain curves of A-IX-II include three stages: brittle-elastic stage, nonlinear elastoplastic stage and strain softening stage, and the damage under dynamic loading shows strain rate effect. It is greatly available to use cavitation water jet to empty A-IX-II explosive in fifteen minutes and the maximum particle size of the collected A-IX-II explosive is no more than 3 cm. The damage of A-IX-II is mainly caused by the strong impact of micro-jet and shock wave when the cavitation bubble collapses. The mesoscopic breakup mode is mainly the intercrystalline separation of crystals from binder and aluminum powder, accompanied by a small amount of transgranular phenomenon, and no crystal breakup is found. It is safe to empty A-IX-II explosive by using submerged cavitation water jet as the highest temperature in the experiment is 50 °C, which is lower than the temperature required for thermal initiation (160 °C).

Key words: A-IX-II explosive; submerged cavitation water jet; breakup mode; safety

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019189

(责编: 王艳秀)