

文章编号: 1006-9941(2020)08-0786-06

可移动式液固云爆剂绿色处理装置研究

郑占胜, 胡炳成

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对硝酸异丙酯和镁粉组成的液固云爆剂报废处理问题, 提出采用物理分离的方法将固态金属镁粉与液态硝酸异丙酯分开并回收金属镁粉, 然后采用化学水解的方法将硝酸异丙酯转变成非爆炸性物质异丙醇后再回收。测试了液固云爆剂的撞击感度和摩擦感度及其在重力过滤、减压过滤、加压过滤和离心过滤分离方式下的分离效果, 得出云爆剂对分离时的碰撞和摩擦等冲击作用具有较强的承受能力, 并且采用离心过滤分离云爆剂具有分离速度快、分离过程安全性高的优点。对影响硝酸异丙酯水解转化率的各项因素进行工艺放大研究, 确定了水解处理硝酸异丙酯的工艺条件: $V(\text{硝酸异丙酯}):V(\text{水})=1:3$, $n(\text{硝酸异丙酯}):n(\text{NaOH})=1:1.1$, 反应温度 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 反应时间 30 min 。在此基础上, 提出了液固云爆剂的可移动式处理装置的工艺流程、单元设备及其结构和各项技术参数, 并据此研制出云爆剂处理回收装置。装置试用结果表明, 2.6 kg 液固云爆剂经离心分离 3 min 后镁粉中硝酸异丙酯含量为 0.69% , 液固分离效果理想; 15 kg 硝酸异丙酯经水解处理 30 min 后硝酸异丙酯转化率达 99.4% , 硝酸异丙酯水解彻底。

关键词: 液固云爆剂; 硝酸异丙酯; 镁粉; 绿色处理装置; 可移动式

中图分类号: TJ55; TJ450.89

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2019225

1 引言

云爆剂是云爆弹的主装药, 云爆弹在一定条件下起爆后云爆剂被抛洒开与空气形成云雾状的混合物并发生剧烈爆炸, 称为云雾爆轰^[1-3]。根据云爆剂物理状态的差异, 可将其分为液体、液固及固体等三类, 其中, 以活泼金属粉(一般采用镁粉)和硝酸酯类物质(一般采用硝酸异丙酯)组成的液固云爆剂因起爆容易、威力大而成为使用最广、储存量最大的一类云爆剂^[4-5]。液固云爆剂装药的典型代表—俄罗斯开发的“什米尔”单兵云爆弹, 至今服役也已超过 20 年 ^[6]。研究表明, 液固云爆剂的最大储存年限仅为 9 年 , 超过储存年限的云爆剂, 其不稳定性和不安全性会急剧增加, 不再满足部队的作战训练要求, 成为过期和报废的火炸药^[7-9]。因此, 液固云爆剂目前已处于大批量退役报废阶段, 迫

切需要对其进行无害化安全处置。

如何安全、环保、高效地处理废弃液固云爆剂, 已经引起世界各国的重视, 并针对主要成分硝酸异丙酯的无害化处理方法开展了一些有益的探索。Carbajo 等^[10]研究发现硝酸异丙酯在紫外光照射下会发生较低程度的分解。Aschmann 等^[11]对硝酸异丙酯的自由基降解反应进行了研究, 结果发现降解产物非常复杂, 并会产生氮氧化物。刘岗等^[12]采用絮凝法开发出一套硝酸酯废水处理系统, 但是该系统只是用于降低废水中硝酸酯的含量, 并不能消除硝酸酯的燃爆特性和毒害性。陈永康等^[13]提出在硫化钠作用下水解硝酸异丙酯的方法, 虽然工艺简便、容易操作, 但是该法需要使用大量的硫化钠, 不仅造成资源的浪费, 而且硝酸酯的分解亦不够彻底。

目前还没有关于废弃液固云爆剂去能后回收再利用的研究报道, 国内外主要采用焚烧法来处理废弃的液固云爆剂^[14]。但是, 焚烧法不仅会造成资源的浪费和财富的损失, 而且焚烧过程存在大量的不安全因素, 产生的氮氧化物等有毒有害物质还会对环境再次造成污染^[15]。为此, 本研究研制了一套液固云爆剂绿色处理回收装置, 首先采用物理手段对液固云爆剂的液固

收稿日期: 2019-08-25; 修回日期: 2019-12-11

网络出版日期: 2020-01-21

作者简介: 郑占胜(1994-), 男, 硕士, 主要从事含能材料的合成与性能研究。 e-mail: sunzzshining@sina.com

通信联系人: 胡炳成(1969-), 男, 教授, 主要从事含能材料的合成与性能研究。 e-mail: hubc@njjust.edu.cn

引用本文: 郑占胜, 胡炳成. 可移动式液固云爆剂绿色处理装置研究[J]. 含能材料, 2020, 28(8):786-791.

ZHENG Zhan-sheng, HU Bing-cheng. Mobile Equipment for Green Treatment of Liquid-solid Fuel Air Explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(8):786-791.

组分进行分离,回收镁粉,再基于硝酸异丙酯的碱催化水解处理工艺^[16],将硝酸异丙酯转变成没有爆炸性的有机物后回收。

2 工艺研究

2.1 处理对象与方法

处理对象:从报废的某型号单兵云爆弹内取出的液固云爆剂,其主要成分为硝酸异丙酯和镁粉,两者之间的质量配比约为1:1^[6]。

处理方法:先将液固云爆剂的两种组分分离开来,再对其中的硝酸异丙酯组分进行去能化处理。硝酸异丙酯具有强氧化性和爆炸性,镁粉具有强还原性,二者共存存在较大的危险性,为此先采用过滤的方法将固态的镁粉从液态的硝酸异丙酯中分离出来,然后再采用NaOH催化水解的方法对分离出来的硝酸异丙酯进行去能化处理。

2.2 液固云爆剂组分分离方式的确定

2.2.1 感度测试结果及分析

在分离过程中,液固云爆剂及其组分不可避免地会受到碰撞、摩擦等冲击作用。为了考察液固云爆剂在分离过程中的安全性,对液固云爆剂的机械感度进行了测试。将不同质量配比的硝酸异丙酯和镁粉混合均匀作为液固云爆剂模拟物(40%、50%、60%镁粉含量),分别进行了撞击感度和摩擦感度测试,其中,镁粉含量为50%的硝酸异丙酯/镁粉混合物即为“什米尔”单兵云爆弹内装液固云爆剂的实际配方。

鉴于各种镁粉含量的液固云爆剂模拟物在混拌均匀后的一段时间内可以保持固体状态,不会立即出现液固分离的情况,因此对液固云爆剂的机械感度测试采取以新混制的液固云爆剂模拟物为测试对象和现混现测的方式,参照普通炸药的机械感度测试方法进行。撞击感度测试按照GJB772A-1997标准中601.1方法进行(爆炸概率法), (10.00 ± 0.01) kg落锤,落高 (0.500 ± 0.001) m,每发测试药量 (50 ± 1) mg,共计测试25发,现配现测。

摩擦感度测试按照GJB772A-1997标准中601.2方法进行(爆炸概率法)。 \circ 。测试条件:摆角 (96 ± 1) °,表压 (4.90 ± 0.05) MPa,每发测试药量 (30 ± 1) mg,共计测试25发,现配现测。

三种不同质量配比的硝酸异丙酯/镁粉混合物在撞击感度和摩擦感度测试中爆炸概率均为0,表明它们对碰撞和摩擦等冲击作用具有较强的承受能力,从

而说明采用沉降或过滤等常规的分离手段对液固云爆剂进行组分分离从安全方面来说是可行的,安全性有保障。

2.2.2 液固组分分离方式探讨

液固云爆剂由固态的镁粉与液态的硝酸异丙酯两种成分构成,根据液固分离原理,可以采用沉降分离法或过滤分离法来分离两种组分。然而从报废云爆弹中取出的液固云爆剂实物来看,它是一种呈泥浆状的松散体,并不是具有明显两相状态的悬浮体,不适合采用沉降法进行分离,因此研究的重点主要围绕过滤分离法展开。

分别采用重力过滤法、减压过滤法、加压过滤法和离心过滤法针对1 kg液固云爆剂在过滤介质孔径均为1000目(约14 μm)的条件下进行了组分分离试验,并对分离后得到的镁粉进行取样称重,在真空烘箱中干燥至恒重,以样品在干燥前后的重量变化情况来计算镁粉中硝酸异丙酯的含量,以此来考察分离效果。其中,重力过滤法采取的方法是将1 kg液固云爆剂加入装有孔径为1000目滤布的漏斗中静置40 min;减压过滤法和加压过滤法的操作方法如下:先将1 kg液固云爆剂加入装有孔径为1000目滤布的漏斗中,然后将漏斗加盖封闭起来,减压过滤时在漏斗下部出口处适当位置接入真空管路,在抽气速率 $4 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 和压力 6×10^{-2} Pa的条件下对漏斗进行抽真空20 min,而加压过滤时在漏斗上盖开孔接入压缩空气管路,在排气压力0.8 MPa和排气量 $0.66 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下对漏斗进行加压20 min;离心过滤法采取将1 kg液固云爆剂加入装有孔径为1000目滤布的离心机中,在 $960 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速下离心过滤3 min。各种分离方式的分离效果及工艺特点见表1。

从表1可知,重力过滤根本不能实现液固云爆剂两种组分的有效分离;减压过滤和加压过滤虽然分离效果不错,分离速度适中,但是分离设备需要外接真空或加压系统,设备密封性差,操作比较麻烦,尤其是在真空或加压条件下强挥发性的硝酸异丙酯和轻质微细的镁粉容易被从分离设备内带入真空或加压系统,从而导致较大的安全隐患,而且也不利于分离后各组分的收集;离心过滤不仅分离效果极佳、分离速度快、容易操作,而且设备密封性好,可以有效防止分离过程中组分挥发或被吹散。因此,最终确定采用离心过滤法来分离液固云爆剂的两种组分。

2.3 硝酸异丙酯水解处理工艺放大条件的确定

在硝酸异丙酯的NaOH催化水解反应中,影响硝

表1 各种过滤方式的分离效果及工艺特点

Table 1 Separation effect and process characteristics of various filtration modes

method	content of isopropyl nitrate in the separated Mg powder / %	separation duration / min	sealing property of equipment	operability of equipment	complexity of equipment
gravity filtration	15.34	40	good	easy	simple
decompression filtration	1.65	20	poor	difficult	complex
pressure filtration	2.40	20	poor	difficult	complex
centrifugal filtration	0.63	3	good	easy	simple

酸异丙酯转化率的因素有 NaOH 的用量、水的用量、反应时间和反应温度。研究表明,在 NaOH 稍微过量(1.1 eq)的条件下反应 30 min,硝酸异丙酯的转化率就基本上不再发生变化^[16]。以上述研究结果为基础,在实验室条件下进行硝酸异丙酯水解工艺放大实验,主要考察水的用量和反应温度两个因素对水解反应的影响。

在硝酸异丙酯和 NaOH 投料量分别为 0.5 mol (50 mL) 和 0.55 mol、反应温度 140 °C、反应时间 30 min 的条件下,水的用量对硝酸异丙酯转化率的影响见表 2。

表2 水的用量对硝酸异丙酯转化率的影响

Table 2 Effect of water dosage on the conversion rate of isopropyl nitrate

V(isopropyl nitrate): V(water)	conversion rate of isopropyl nitrate / %
1:1	4.7
1:2	56.3
1:3	99.5
1:4	99.2
1:5	99.3

从表 2 可以看出,随着水用量的逐渐增加,硝酸异丙酯的转化率逐渐升高,当硝酸异丙酯与水的体积比达到 1:3 时,硝酸异丙酯的转化率达到最高值 99.5%,之后水的用量再增加时硝酸异丙酯的转化率反而有所下降,因此,硝酸异丙酯与水的最佳体积比为 1:3。

在硝酸异丙酯、水和 NaOH 投料量分别为 0.5 mol (50 mL)、150 mL 和 0.55 mol、反应时间 30 min 的条件下,反应温度对硝酸异丙酯转化率的影响见表 3。

由表 3 可见,硝酸异丙酯的转化率随着反应温度的升高而升高,当反应温度达到 150 °C 时,硝酸异丙酯的转化率达到最高值 99.7%,之后趋于稳定,表明最佳水解反应温度为 150 °C。

因此,硝酸异丙酯的 NaOH 催化水解反应最佳工

艺条件确定如下: V(硝酸异丙酯): V(水)=1:3, n(硝酸异丙酯): n(NaOH)=1:1.1, 反应温度 150 °C, 反应时间 30 min。

表3 反应温度对硝酸异丙酯转化率的影响

Table 3 Effect of reaction temperature on the conversion rate of isopropyl nitrate

reaction temperature / °C	conversion rate of isopropyl nitrate / %
120	8.1
130	11.8
140	97.4
150	99.7
160	99.4
170	99.5

3 装置研制

3.1 工艺流程设计

根据上述工艺研究的结果,本着机动销毁的基本原则,并考虑到某系列单兵云爆弹单发最大装药量不超过 3 kg、云爆剂液固分离效率明显高于硝酸异丙酯水解处理等因素,针对液固云爆剂处理装置提出以下工艺方案:离心过滤机一次性处理液固云爆剂的最大量为 3 kg,离心分离时间不超过 3 min,分离后镁粉中硝酸异丙酯的含量不超过 1%;水解处理系统一次性处理硝酸异丙酯的最大量为 15 kg,水解反应时间不超过 30 min,硝酸异丙酯水解转化率不低于 97%。具体工艺流程如图 1 所示。

工艺流程简要说明如下:第一步,液固云爆剂经离心机 2 处理后分成两部分,液态的硝酸异丙酯经离心机底部的排料口流入硝酸异丙酯储罐 1 中暂存,而固态的镁粉则留在离心机的转筒内,将其取出回收;第二步,硝酸异丙酯和水经计量后加入水解反应釜 16,从硝酸储槽 6 放出硝酸至反应釜将残留在硝酸异丙酯中的少量镁粉彻底除去,然后加入计量好的 NaOH;第

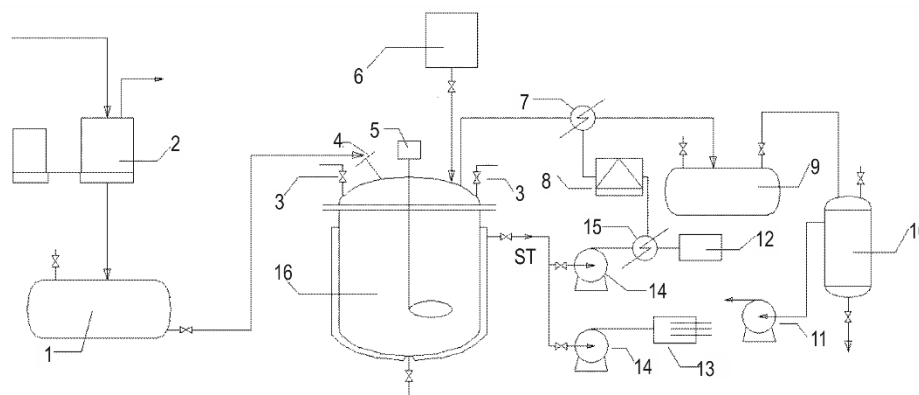


图1 液固云爆剂处理工艺流程

1—硝酸异丙酯储罐, 2—离心机, 3—排气口, 4—加料口, 5—磁力搅拌, 6—硝酸储槽, 7—蒸馏冷凝器, 8—冷冻机, 9—异丙醇储罐, 10—缓冲罐, 11—真空泵, 12—冷油箱, 13—热油箱, 14—导热油泵, 15—导热油冷凝器, 16—水解反应釜

Fig.1 The technological process of liquid-solid FAE treatment

1—storage tank of isopropyl nitrate, 2—centrifuge, 3—exhaust vent, 4—feeding port, 5—magnetic stirrer, 6—storage tank of nitric acid, 7—distillation condenser, 8—refrigerator, 9—storage tank of isopropanol, 10—buffer tank, 11—vacuum pump, 12—cold oil tank, 13—hot oil tank, 14—oil pump, 15—oil condenser, 16—hydrolysis reactor

三步, 先将反应釜密闭完好, 再采用热油泵 14 从热油箱 13 泵送热油至反应釜对反应液进行加热, 待反应液温度升至一定值之后, 继续保温反应一定时间, 硝酸异丙酯即转变成异丙醇; 第四步, 打开冷冻机 8, 使冷冻液经由导热油冷凝器 15 循环流动, 从冷油箱 12 泵送冷油至反应釜对反应液进行冷却, 将反应液温度降至一定值; 第五步, 使冷冻液经由蒸馏冷凝器 7 循环流动, 开启真空泵 11 进行减压蒸馏, 打开反应釜顶盖上的排料阀, 放出的异丙醇蒸汽经蒸馏冷凝器的冷凝作用转变成液态的异丙醇流入异丙醇储罐 9 收集回收; 第六步, 从硝酸储槽 6 放出硝酸至反应釜, 将釜内的剩余溶液中和至中性, 然后打开反应釜底部的排料阀排空釜内溶液。

3.2 装置设备组成

基于上述工艺方案研制出液固云爆剂的可移动式回收处理装置, 装置所有设备均布置在尺寸为 2200 mm×1800 mm×1800 mm (长×宽×高) 的空间内, 整体布局紧凑合理, 体积较小, 可以放入厢体内装车随车机动, 如图 2 所示。装置的组成设备主要包括: 离心机, 水解反应釜, 热油箱, 冷油箱, 导热油泵, 冷冻机, 油冷却器, 异丙醇冷却器, 异丙醇储罐, 真空泵, 滑轨托架和水箱, 等。

为保证云爆剂固液分离过程的安全性, 离心机采用直联隔爆式结构, 并配置专门的翻盖, 可以有效防止在设备运行时硝酸异丙酯的挥发。水解反应釜的搅拌装置采用磁力耦合联接, 通过静密封取代动密封, 能够

保证反应釜在高压条件下满足绝对密封的要求, 反应釜内部和外壁分别设有盘管和夹套, 用以接入热油箱中的热油或冷油箱中的冷油对釜内溶液进行加热或冷却。为便于整套装置进出车载厢体并对装置进行固定, 在装置底部设有可折叠的滑轨托架。销毁作业前, 打开厢体侧门放平托架的折叠部分, 通过滑轨将装置推移出厢体外固定好以后再进行作业; 作业结束后, 通过滑轨将装置移回厢体内固定, 收起托架的折叠部分, 关上厢体侧门, 厢体就可以装车并随车转运到其它区域开展机动作业。

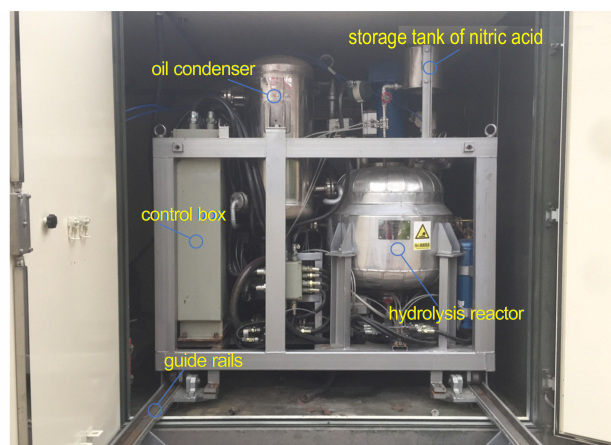


图2 液固云爆剂处理装置

Fig.2 The treatment equipment of liquid-solid FAE

4 装置试用情况

试验在某报废武器弹药销毁站的销毁试验场内进

行。液固组分分离试验针对报废的某型号单兵云爆弹(每发内装液固云爆剂 2.6 kg)进行:打开云爆弹战斗部装药筒的封盖,将药筒内的云爆剂直接倒入离心机转筒的滤袋(孔径为 1000 目)内,离心分离 3 min,分别收集镁粉和硝酸异丙酯。从分离后得到的镁粉中取 30 g 放入真空烘箱在 40 °C 下干燥至恒重,根据镁粉在干燥前后的重量来计算镁粉中硝酸异丙酯的含量;从分离后得到的硝酸异丙酯中取 10 g,采用微孔(0.6~0.8 μm)过滤器滤出固体镁粉,分析硝酸异丙酯中镁粉的含量。共进行了三次试验,结果见表 4。

表 4 处理装置对液固云爆剂的分离结果

Table 4 Separation results of the liquid-solid FAE through the treatment equipment

No.	ρ_1 / %	ρ_2 / %
1	0.60	0.10
2	0.76	0.08
3	0.71	0.15
average	0.69	0.11

Note: 1) ρ_1 is content of isopropyl nitrate in the separated Mg powder. 2) ρ_2 is content of Mg powder in the separated isopropyl nitrate.

硝酸异丙酯水解处理试验:从分离后得到的硝酸异丙酯中取 15 kg 加入水解反应釜,加入 43.2 L 水,缓慢加入硝酸将残留在硝酸异丙酯中的镁粉彻底除去,直至反应釜内溶液略显酸性。加入 6.3 kg 氢氧化钠后关闭反应釜,检查反应釜的气密性,确保反应釜密封完好,将反应液升温至 150 °C 保温反应 30 min 结束反应。将反应液降温至 80 °C,先通过反应釜侧面的取样口进行取样,用以分析计算硝酸异丙酯的转化率,然后再通过减压蒸馏回收异丙醇,并分析计算异丙醇的收率。共进行了三次试验,所得结果如表 5 所示。

表 5 处理装置对硝酸异丙酯的水解处理结果

Table 5 Hydrolysis results of isopropyl nitrate through the treatment equipment

No.	α / %	ω / %
1	99.6	74.2
2	99.5	80.4
3	99.1	71.6
average	99.4	75.4

Note: 1) α is conversation rate of isopropyl nitrate; 2) ω is the yield of isopropanol.

表 4 和表 5 的结果表明,研制的处理装置能够高效地实现对液固云爆剂的绿色无害化处理和资源化利用:2.6 kg 液固云爆剂经离心分离 3 min 后,硝酸异丙

酯中含镁粉 0.11%,镁粉中含硝酸异丙酯 0.69%,分离效果理想;15 kg 硝酸异丙酯经水解处理 30 min 后,即可以使硝酸异丙酯彻底裂解,并能较大程度地回收利用异丙醇。

5 结论

(1)液固云爆剂对于碰撞和摩擦等冲击作用具有较强的承受能力,从而可以保证其在液固分离过程中的安全性;离心过滤因分离效果极佳、分离速度快、设备密封性好、容易操作等特点而成为分离液固云爆剂液固组分的最佳方法。

(2)硝酸异丙酯在 NaOH 催化下水解反应的最佳工艺条件为: $V(\text{硝酸异丙酯}):V(\text{水})=1:3$, $n(\text{硝酸异丙酯}):n(\text{NaOH})=1:1.1$,反应温度 150 °C,反应时间 30 min。

(3)设计制作的可移动式液固云爆剂回收处理装置所有设备均布置在尺寸为 2200 mm \times 1800 mm \times 1800 mm(长 \times 宽 \times 高)的空间内,整体布局紧凑合理,体积较小,可以放入厢体内装车随车机动,装置试用结果表明,2.6 kg 液固云爆剂经离心分离 3 min 后,镁粉中硝酸异丙酯的含量为 0.69%,硝酸异丙酯中镁粉的含量为 0.11%,分离效果理想;15 kg 硝酸异丙酯经水解处理 30 min 后,硝酸异丙酯转化率和异丙醇收率分别达到 99.4% 和 75.4%,硝酸异丙酯水解彻底,异丙醇回收利用程度高。

参考文献:

- [1] 余荣华. 单兵云爆弹-21 世纪步兵发射的“小原子弹”[J]. 国防科技, 2002(5): 44-45.
YU Rong-hua. Single FAE-"small atomic bombs" launched by infantry in the 21st century [J]. *National Defense Science & Technology*, 2002(5): 44-45.
- [2] 许化珍, 彭朝晖, 李向东. 云爆弹杀伤效能研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(3): 114-116.
XU Hua-zhen, PENG Zhao-hui, LI Xiang-dong. The research on damage efficiency of FAE [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(3): 114-116.
- [3] 吴力力, 丁玉奎, 甄建伟. 云爆弹关键技术发展及战场运用[J]. 飞航导弹, 2016(12): 41-46.
WU Li-li, DING Yu-kui, ZHEN Jian-wei. Key technology development and battlefield application of cloud bomb [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2016(12): 41-46.
- [4] 阚金玲, 曾秀琳, 陈网桦. 硝酸正丙酯和硝酸异丙酯的红外光谱和热分解动力学研究[J]. 爆破器材, 2007, 36(4): 1-3.
KAN Jin-ling, ZENG Xiu-lin, CHEN Wang-hua. Study on infra-red spectra and thermal decomposition kinetics of n-propyl nitrate and isopropyl nitrate [J]. *Explosive Materials*, 2007, 36(4): 1-3.

- [5] Oxley J C, Smith J L, Evan R A. Fuel combustion additives: a study of their thermal stabilities and decomposition pathways [J]. *Energy & Fuels*, 2008, 14(6): 1252-1264.
- [6] 张彦存, 孟凡友. PF97式93 mm单兵云爆火箭[J]. *轻兵器*, 2002(2): 3-4.
ZHANG Yan-cun, MENG Fan-you. PF97 93 mm single fuel air explosive rocket[J]. *Small Arms*, 2002(2): 3-4.
- [7] 宣卫芳, 陈世英, 袁艺. 云爆剂贮存化学稳定性的研究[J]. *装备环境工程*, 2007, 4(3): 1-4.
XUAN Wei-fang, CHEN Shi-ying, YUAN Yi. Study of chemical stability of fuel air explosives in storage environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2007, 4(3): 1-4.
- [8] 曾秀琳. 硝酸酯热安定性的理论与试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
ZENG Xiu-lin. Theoretical and experimental study on thermal stability of nitrate[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [9] 王阵, 李海广, 贲旭东, 等. 储存条件下云爆火箭弹云爆剂质量变化研究[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(3): 82-85.
WANG Zhen, LI Hai-guang, BI Xu-dong, et al. Research on deterioration of rocket FAE under storage condition[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(3): 82-85.
- [10] Carbajo P G, Orr-Ewing A J. NO₂ quantum yields from ultraviolet photodissociation of methyl and isopropyl nitrate[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2010, 12(23): 6084-6091.
- [11] Aschmann S M, Tuazon E C, Arey J, et al. Products of the OH radical-initiated reactions of 2-propyl nitrate, 3-methyl-2-butyl nitrate and 3-methyl-2-pentyl nitrate[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(9): 1695-1701.
- [12] 刘岗, 刘振斌. 硝酸酯废水处理系统: 中国, 205556346U[P]. 2016-09-07.
- [13] 陈永康, 陈明华, 葛强, 等. 硝酸异丙酯的安全高效处理方法: 中国, 106186266A[P]. 2016-12-07.
- [14] 郭涛, 齐世福, 王树民, 等. 大批量废旧弹药爆破销毁技术的应用[J]. *工程爆破*, 2011, 17(2): 89-91.
GUO Tao, QI Shi-fu, WANG Shu-min, et al. Applications of destruction technology of large quantities of discarded ammunitions[J]. *Engineering Blasting*, 2011, 17(2): 89-91.
- [15] 李金明, 高欣宝, 丁玉奎. 报废弹药爆破销毁过程中的防事故措施[J]. *爆破*, 2011, 28(3): 116-118.
LI Jin-ming, GAO Xin-bao, DING Yu-kui, et al. Safe measure during waste ammunition disposal work[J]. *Blasting*, 2011, 28(3): 116-118.
- [16] 郑占胜, 肖勇, 孙韬, 等. 硝酸异丙酯 NaOH 催化水解工艺[J]. *含能材料*, 2018, 26(9): 760-764.
ZHENG Zhan-sheng, XIAO Yong, SUN Tao, et al. Catalyzing the hydrolysis process of isopropyl nitrate by NaOH[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(9): 760-764.

Mobile Equipment for Green Treatment of Liquid-solid Fuel Air Explosive

ZHENG Zhan-sheng, HU Bing-cheng

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the disposal of waste liquid-solid Fuel Air Explosive (FAE) composed of isopropyl nitrate and magnesium powder, a physical separation method was proposed to separate magnesium powder from isopropyl nitrate and to recycle metal magnesium powder, and then the isopropyl nitrate was converted into non-explosive isopropanol by chemical hydrolysis and was recycled. The impact sensitivity and friction sensitivity of liquid-solid FAE were tested, and the separation effects of liquid-solid FAE by various methods, i.e., gravity filtration, decompression filtration, pressure filtration, centrifugal filtration, were studied. The results show that the liquid-solid FAE has a strong ability to bear the impact of collision and friction during the separation, and the separation of liquid-solid FAE by centrifugal filtration has advantages of fast speed and high safety. The scale-up process for hydrolysis of isopropyl nitrate were studied and the hydrolysis conditions of isopropyl nitrate were determined: $V(\text{isopropyl nitrate}) : V(\text{water}) = 1 : 3$, $n(\text{isopropyl nitrate}) : n(\text{NaOH}) = 1 : 1.1$, reaction temperature at 150 °C, reaction time of 30 min. On this basis, the process flow, unit devices, structure and technical parameters of the mobile equipment for treating the liquid-solid FAE were proposed, and the treatment equipment was developed accordingly. The test results of the equipment are shown as follows: after centrifugal filtration process of 2.6 kg liquid-solid FAE for 3 min, the content of isopropyl nitrate in magnesium powder is 0.69%, which indicates the liquid-solid separation effect is perfect; after hydrolysis process of 15 kg isopropyl nitrate for 30 minutes, the conversion rate of isopropyl nitrate reaches 99.4%, which indicates the hydrolysis of isopropyl nitrate completes thoroughly.

Key words: liquid-solid FAE; isopropyl nitrate; magnesium powder; green treatment equipment; mobile

CLC number: TJ55; TJ450.89

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019225

(责编: 王艳秀)