

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.05.011

DNAN 基含铝熔铸炸药倒药方法研究*

刘艳萍 金大勇 高玉玲 付改侠

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘要] 为了重复利用不合格战斗部壳体及炸药,针对战斗部装填的 DNAN 基含铝熔铸炸药进行了特性分析,对比了机械破碎法、化学试剂溶解法、间接加热熔化法等几种常用倒药方法的优缺点,最终选定了适合该炸药体系的间接加热熔化倒药方法。同时,对倒药过程的安全性进行了分析,并利用计算模型对倒药工艺参数进行了预估。试验结果表明,计算模型预估与实际结果较为吻合。该方法的应用,既节约了成本,又避免了环境污染,实现了资源的循环使用。

[关键词] 炸药 缺陷 倒药 模型 不合格 处置

[分类号] TQ 560.7

引言

炸药是战斗部实现毁伤的能源,炸药装药的质量直接影响到战斗部效能的发挥及其使用安全性。因此,为完成武器系统赋予的战术使命,许多高价值的战斗部装药已不允许有目视可见的裂纹、缩孔和气泡等装药疵病。某战斗部装填了以不敏感炸药 DNAN(2,4-二硝基苯甲醚)^[1]为基的高能含铝熔铸炸药,但在装药过程中产生了无法接受的裂纹缺陷,产品被判定为不合格。其处置方法:一是要查找裂纹产生的原因,以便改进和完善装药工艺,避免此类事件的再次发生;二是要对该发产品采取挽救措施,使高价值零部件能继续使用,从而最大限度地减少经济损失。

目前,常用的挽救措施是对产品进行返修,即将原来有缺陷的装药从战斗部壳体中倒出,战斗部壳体得以重复利用,然后重新进行炸药装填。在此过程中,倒药方法选择的合理性、工艺参数设计的准确性以及安全技术措施制定的科学性,都是关系到整个倒药工作能否安全与顺利实施的关键因素。目前国内 TNT 基熔铸混合炸药的倒药技术较为成熟,刘光烈等^[2]对中小型战斗部 TNT 装药的倒空方法及其安全技术进行了阐述,娄建武等^[3]对装填 TNT 的炮弹和炸弹在销毁时,如何利用外界可燃物燃烧的热量使弹体内部的炸药熔化并自行倒出的方法进行了说明。但是针对装填 DNAN 基含铝熔铸混合炸药的大型战斗部倒药方法还未见报道,无成熟经验可以借鉴。因此,在确保安全零风险的前提下避免

高价值零部件报废带来的损失,成为该研究亟待解决的问题。

1 炸药装药配方与战斗部结构特性分析

炸药装药的倒药方法与其配方本质特性和战斗部结构有直接关系。对这两方面进行研究是倒药方法设计的关键。

1.1 炸药配方本质特性分析

炸药配方主要特性参数见表 1。

由表 1 可知:

- 1) 炸药配方本质上是一种含铝的熔铸型炸药,可加热反复熔化,药浆可自行流动^[4];
- 2) 炸药熔点为 95.0 °C,比 TNT 高出约 15 °C,属于较高熔点的熔铸炸药;
- 3) 炸药的感度较低^[5]。其中,冲击波感度优于 TNT,机械感度和枪击感度均符合国军标的要求;
- 4) 炸药的热安全性较好,自发热温度和爆点(5 s)温度均在 198 °C 以上,远高于其熔点,并可长时间加热保持稳定;
- 5) 炸药通过了 3 项易损性试验,属于低易损性炸药^[6];
- 6) 炸药的力学强度较低,与传统的 TNT 基熔铸炸药相比仅有其 20% ~ 25%,导致炸药易产生裂纹或破碎;
- 7) 装药部分组分可溶解于特定的有机溶剂之中。

1.2 战斗部结构特性分析

战斗部的结构特性见表 2。

* 收稿日期:2014-03-05

作者简介:刘艳萍(1974~),女,工程师,主要从事火炸药装药及性能检测。E-mail:lyp_713@163.com

表 1 某炸药配方基本性能参数

Tab. 1 Basic parameters of an explosive

性能	参数	备注
配方组成	DNAN/RDX/Al/ 钝感剂	熔铸型含铝炸药
工艺性	药浆可自行流动	—
熔点/℃	95.0	TNT 为 80.2
冲击波感度 (H_{50})/mm	29.76	TNT 为 42.50
撞击感度/%	28,12,20	3 个鉴定批
摩擦感度/%	2,4,0	3 个鉴定批
枪击感度	10 发不燃不爆	—
自发热温度/℃	198.9	—
爆发点(5s)/℃	268.0	—
DNAN 在 100℃ 下 烤燃时间/h	约为 4.6×10^{15} ^[3]	—
易损性	通过快速烤燃、慢速 烤燃和子弹撞击 3 项 易损性试验	—
抗压强度/MPa	4.63(室温)、 3.67(50℃)	TNT 基炸药 为 18~20
抗剪强度/MPa	0.960(室温)、 0.531(50℃)	TNT 基炸药 为 3~4
抗拉强度/MPa	1.35(室温)、 0.693(50℃)	TNT 基炸药 为 4~5
溶解性	可溶于丙酮、环己酮、 乙酸乙酯等有机溶剂	—

表 2 某战斗部结构特性

Tab. 2 Structural characters of a warhead

性能	参数	备注
弹体总质量/kg	1200	—
装药量/kg	480	—
装药长度/mm	1800	—
装药直径/mm	490~350	口部约 490, 底部约 350, 呈锥台形
壳体厚度/mm	3	钢
破片厚度/mm	24	钨珠和高分子胶
腐蚀性	高分子胶可溶于 丙酮、环己酮、乙酸乙酯 等有机溶剂	—

由表 2 的数据可知:

1) 战斗部总质量及装药量巨大,属于超大型装药战斗部;

2) 战斗部装药结构亦巨大,特别是装药长度接近 2 m,但是其口部大,底部小,成锥台形;

3) 弹体结构复杂,特别是含有一层高分子胶黏

结钨珠形成的破片层,导热性差;

4) 破片层的高分子胶可溶解于有机溶剂。

2 倒药方法分析及选择

目前常用的倒药方法有机械破碎法^[7]、化学试剂溶解法和加热熔化法。

机械破碎倒药法是通过采用专用的工装或设备,利用机械破碎的方法将弹体内的炸药装药从外向里依次分割成若干个小块并取出,实现装药与战斗部壳体分离。这种方法需要设计复杂的专用工装卡具及刀具,对炸药施加较大的机械冲击,操作过程风险较高^[8],一般要求人机隔离,采用监控及远距离控制等方式来进行操作。因此,仅适用于小型弹药装药的倒药。通过分析可知,炸药的力学强度较低,理论上可以进行机械破碎。由于战斗部装药量和尺寸较大,采用机械破碎法倒药时由于炸药受到破碎,机械冲击的强度高,安全性风险较大。因此,机械破碎法不适合某战斗部的倒药工作。

化学试剂溶解倒药法是根据炸药特性选用合适的溶剂对炸药装药进行部分或全部溶解,然后将溶液倒出,实现炸药与弹体分离的倒药方法。这种方法由于需要有机溶剂,污染较大,并且可能对弹体的有机涂层、黏结剂等组件具有腐蚀性,因此,这种倒药方法具有较大的局限性。该炸药组分可以溶解于部分有机溶剂中。但有机溶剂对黏结战斗部内层破片的高分子胶有腐蚀性;由于装药量大,需要的有机溶剂量也巨大,环境污染严重,同时大量易燃的有机溶剂也存在较大的安全隐患。因此,化学试剂溶解法不适合某战斗部的倒药工作。

加热熔化倒药法是利用熔铸型炸药可加热反复熔化的特点,通过对已凝固成型的炸药装药进行加热,载体炸药组分温度达到其熔点以上后由固态变为液态,从弹体内腔中自行流出,达到装药与壳体分离的目的。加热熔化法不需要复杂的专用工装与设备,操作方式简单,是熔铸型炸药装药的逆向过程^[9]。

一般可分为两种:第一种是水煮法,此方法适用于倒空熔点较低或者能溶于水的炸药,如 TNT、TNT 为基的混合炸药及硝酸炸药等。

第二种是蒸汽法,又分为直接熔化和间接熔化两种方法。即采用蒸汽直接加热炸药和利用通蒸汽的导热工装来间接加热炸药而使其熔化流出的倒药方法。由于蒸汽温度高于 100℃,因此适用于熔点较高的炸药倒药。对于含铝炸药,因蒸汽会与铝粉发生剧烈的氧化还原反应而放出易燃易爆的氢气,采用加热熔化法时要避免水蒸气与炸药相互接触。

因此,针对 DNAN 基含铝熔铸炸药及类似炸药,其热安全性较好,可根据战斗部结构呈锥台形的特点,将弹体口部向下,对装药进行加热,仅需将壳体内壁与主装药相连接的小部分炸药熔化,即可实现战斗部壳体与装药的整体分离。

综上所述,理论上可采用间接加热熔化法进行倒药。

3 间接加热的倒药工艺控制

间接加热熔化法能否适用,还取决于以下两个因素:一是加热温度能否达到炸药熔点;二是加热温度是否会使战斗部破片黏结材料老化失效而导致破片脱落变形。

3.1 加热温度控制

由表 1 可知,炸药的熔点为 $95.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,如果采用间接加热法倒药,需要在战斗部壳体外安装一套加热装置。从安全性出发,热源一般为热水或者压力蒸汽。由于间接加热时有较大的热损失,而热水温度一般不超过 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,其与炸药熔点温度梯度较小,且存在壳体、破片、高分子胶、炸药等多个界面,部分材料为热的不良导体,用其作为热源会带来因热量损失使炸药达不到其熔点等技术风险问题。压力蒸汽为目前熔铸炸药常用的一种熔药热源,其具有升温快、热效高等优点,能实现温度可调,且与炸药熔点梯度较大,因此,压力蒸汽成为实现该炸药熔融的较为理想的热源。饱和蒸汽压力与温度的对照表^[10]见表 3。由表 3 可知,蒸汽压力达到 0.10 MPa 时,其温度已达到炸药熔点以上。

表 3 饱和蒸汽压力-温度对照

Tab. 3 The saturated vapor pressure-temperature control table

压力/MPa	温度/ $^{\circ}\text{C}$
0.10	120.0
0.12	123.0
0.14	126.0
0.15	127.0
0.16	128.5
0.18	131.0
0.20	133.5

为了提高战斗部的抗过载性能或实现密封、破片黏结等功能,沥青、硅橡胶或其他高分子材料被广泛用于战斗部壳体中。不能排除某些内衬包覆缓冲材料或者破片黏结用的高分子材料耐热性较差,在高温加热过程中可能会出现老化失效、塌陷、鼓包等情况。在侵彻战斗部中,缓冲层出现起泡、鼓包或者

塌陷等缺陷一般被认为是不可接受的,如出现该情况,须进行重新包覆处理;而在爆破战斗部中,由于战斗部为一次使用产品,只要黏结破片的高分子材料的黏结性能不发生大的变化,可被认为接受;如发生大的变化,由于破片黏结用的胶与金属壳体和预制破片相比价值很小,可以将老化的胶用溶剂溶解去除,然后重新进行破片黏结即可。

为了考验该黏结胶在高温下的黏结性能,防止其在高温下发生脱黏、流液等变化,设计与战斗部结构类似的单元试验件,并加严了试验条件。具体做法为:在一个平面钢板上黏贴 3 层钨珠破片模块,垂直放置(图 1)于烘箱中,温度设定为 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验结果为:7 h 后,破片与钢板黏结牢固,高分子胶未见起泡、鼓包等异常状况,说明 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 倒药加热温度对破片黏结

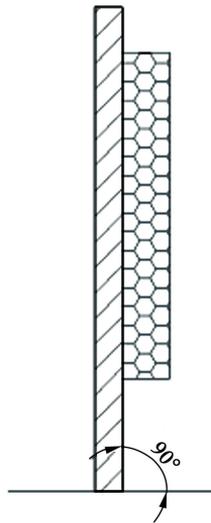


图 1 破片黏结性试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fragment binding test

性无影响。

经过以上分析及试验,表明间接加热熔化法基本可行,其适合于熔点较高、含有铝粉的 DNAN 基熔铸炸药倒药,最终选定其为该战斗部装药所采用的倒药方案。

3.2 工艺流程及其参数设计

倒药工艺流程分为前期准备、倒药和后处理等 3 个工序。

3.2.1 前期准备

弹体状态检验。倒药前首先对弹体进行全面的状况检验,包括弹体的确认、装药外观检查等。

工具、工装准备。1) 弹体端盖拆卸工具、加热工装、起吊工具各 1 套;

2) 支撑木墩:1 个,其直径略小于药面端口直径;

3) 监控装置:1 套,可对炸药熔化情况进行远程监控。

3.2.2 倒药过程

3.2.2.1 卸后端盖和弹体摆放

首先卸掉端盖。为确保熔化后的炸药顺利流出,需要将弹体翻转并支起离开操作面。同时待炸药和壳体分离后,为保证剩余的固态装药维持原状

不动,需要将装药支撑牢固,而壳体可以移动提开。为达到上述目的,可采用在装药口部支撑一个圆形木墩的方法来实现,即将一个支撑木墩放在操作面上的一个盘子内,用行吊将弹体翻转(口部朝下)倒放在木墩上,并使弹体装药对准木墩中心位置。

3.2.2.2 装药的加热熔化

1) 加热工装的安装。

在弹体外壳套上加热工装,连接牢固蒸汽管路,并在工装外部包裹一层保温棉被。

2) 加热温度参数的设计。

弹体的加热过程属于稳态导热问题,因此,通过计算来确定加热温度。

弹体为轴对称结构,传热主要由壳体、钢珠、高分子黏接胶以及主装药组成,实体模型如图 2 所示。其中壳体材料为钢,厚度为 3 mm;破片层(钢珠和 高分子黏接胶)厚度为 24 mm;主装药厚度为 245 mm。战斗部初始温度约为 25 ℃,外界环境温度为 130 ℃。

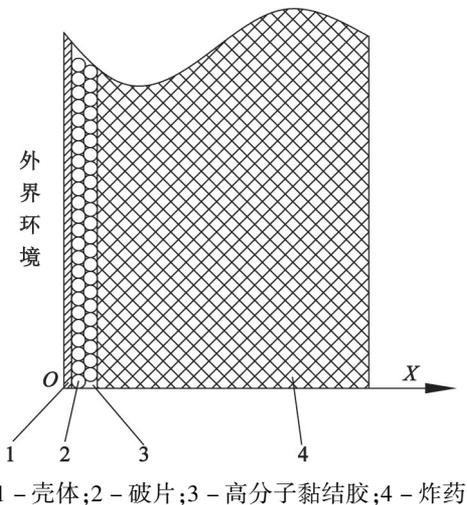


图 2 实体模型

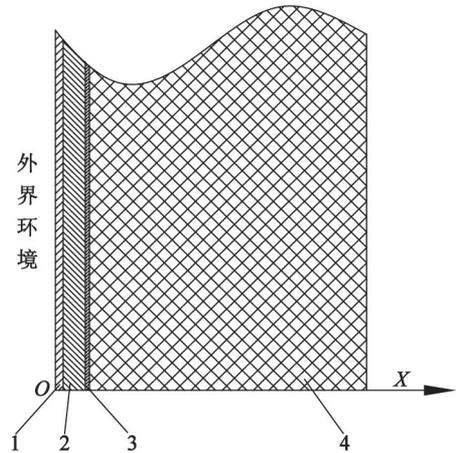
Fig. 2 Entity model

由于采用间接加热倒药法,实现壳体与炸药分离的理想状态为:在与破片接触处 5 ~ 10 mm 厚的炸药熔化后,其与破片的黏接力基本丧失,壳体在起吊工装的作用下受到向上的拉力,控制好起吊的速度,实现壳体与炸药分离。熔化的炸药厚度约为 5 ~ 10 mm,而装药直径为 350 ~ 490 mm,厚度仅为直径的 1.0% ~ 1.4%,也就是熔化的炸药是一个薄壁的环形结构,由于炸药密度基本一致,且圆环在任一轴向剖面可被看作一矩形。因此,可将沿径向和轴向的二维热传导模型简化为沿径向的一维传热模型对装药的热传导进行计算。

为方便起见,理论计算时将钨珠和高分子黏接胶按照体积比分别等效为一定厚度,则钨珠的等效

厚度为 18 mm,高分子黏接胶等效为 6 mm 厚隔热层,理论模型如图 3 所示。

由于弹体内不存在热源,一维热传导方程为:



1 - 壳体; 2 - 破片; 3 - 高分子黏结胶; 4 - 炸药

图 3 理论模型

Fig. 3 Theory model

$$\begin{cases} u_x - \alpha^2 u_{xx} = 0; \\ \alpha = \frac{k}{c_p \rho}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: u 为弹体环境温度; x 为热传导厚度; α 为热扩散系数; k 为导热系数; c_p 为比热容; ρ 为材料密度。

根据战斗部理论计算模型,可知该问题初始条件为:

$$\begin{cases} u|_{x=2} = T_0; \\ u|_{x=R_0} = T_1. \end{cases} \quad (2)$$

衔接条件为:

$$\begin{cases} u|_{x=l_1} = u|_{x=l'_1}; \\ u|_{x=l_2} = u|_{x=l'_2}; \\ u|_{x=l_3} = u|_{x=l'_3}; \\ u|_{x=l_4} = u|_{x=l'_4}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 分别为壳体、破片、黏接胶和主装药的边界。

不含热源的一维热传导方程的解析解为:

$$\frac{u - u|_{x=0}}{u|_{t=0} - u|_{x=0}} = f_{er} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right). \quad (4)$$

式中: f_{er} 为误差函数,被定义为:

$$f_{er} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/2\sqrt{\alpha\tau}} e^{-z^2} dz. \quad (5)$$

加热时,弹体外部环境温度保持为 130 ℃,即 $u|_{x=0} = 130$ ℃,将边界条件及材料的热扩散系数代入式(4)和式(5)可得,炸药内表面温度随时间的变化曲线,其结果如图 4 所示。由图 4 可以得到,在保

温约 3 h 炸药内表面温度约为 95℃,即炸药装药已经开始熔化,5 h 之后温度达到了约 115℃,之后上升空间很小,基本保持稳定。

另外,由表3可知,蒸汽压力在0.15~0.20MPa 之间时,其温度为127.0℃~133.5℃。综上所述,

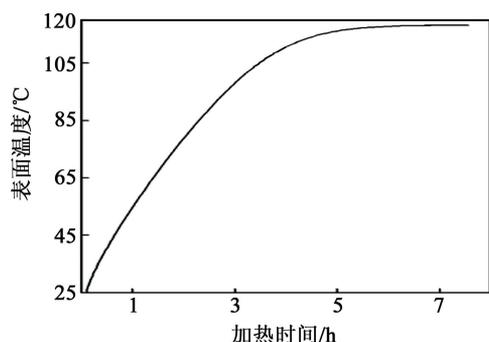


图4 炸药内表面温度随时间的变化曲线

Fig.4 Curves of internal surface temperature of the explosive changing with time

加热的蒸汽压力设计为0.15~0.20 MPa。

3.2.2.3 过程监控和装药与壳体的分离

为确保整个倒药过程受到监控,通过远程监控装置不间断观察炸药的熔化状况。待装药与壳体分离后,利用行吊将壳体提起移走,将装药整体倒出。

3.2.3 后处理

将药柱用木榔头逐步粉碎成小药块后移走;采用溶剂对弹体、中心管和隔板内外表面进行清理;检验弹体、中心管和隔板的状况。

4 倒药过程的安全性分析

炸药装药的倒药过程分为以下几个工序:弹体检查及工具、工装准备→卸端盖和弹体摆放→装药加热熔化→过程监控及装药与壳体的分离→后处理。主要的工艺参数是加热的温度和时间。

经过倒药流程进行梳理和风险辨识,倒药过程中的主要危险因素是爆炸,引起爆炸的主要原因有:炸药受到外界的热刺激导致意外爆炸;装药受到外界的机械刺激导致意外爆炸。

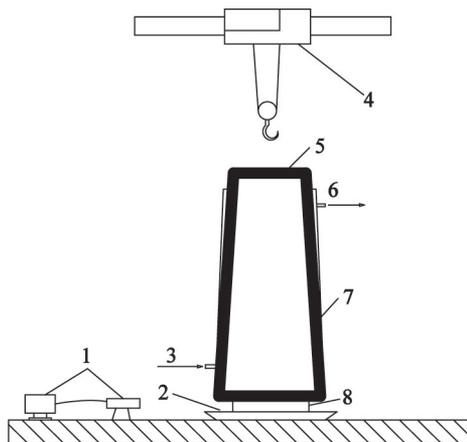
针对倒药的工艺过程,由表1的内容可知,炸药配方的机械感度满足国军标的要求,热安全性也十分优异;通过第3.2.2节对倒药过程炸药温度变化的数值计算,结果表明炸药在长时间加热时基本保持稳定,热安全性可以得到保证;倒药工艺过程中使用的工具均为铜、铝等非黑色金属工具,满足防爆安全要求;倒药过程中所用器具均接地良好,避免静电积累造成电火花的安全距离;倒药的场地留有适当的安全距离,尽量减少意外发生时的附带损害;编制了详

细的倒药方案和应急预案,对人、机、料、法、环等环节进行了检查、确认。

综上所述,倒药过程的安全性是有保证的。

5 倒药试验结果

倒药现场布置示意图见图5。对加热工装通蒸汽加热,5 h 左右炸药开始熔化,与战斗部壳体相接触的炸药从垫板处流出。通过观察炸药的流出状况,待炸药基本上不再流出后,利用行吊和吊具将与装药脱离的战斗部壳体提起移开,实现了两者的成功分离,倒药试验结果见图6和表4。



1 - 远程监控装置;2 - 接药盘;3 - 蒸汽入口;4 - 行吊装置;5 - 弹体;6 - 蒸汽出口;7 - 加热的工装;8 - 支撑工装

图5 倒药现场布置示意图

Fig.5 Schematic diagram of the site layout



图6 装药与弹体分离

Fig.6 Separate graph of the charge and shell

由表4和图6可以看出,利用一维传热模型计算的结果与试验结果较为吻合,证明了模型的正确性。另外,装药与弹体成功实现了完全的安全性分离,证明了设计的DNAN基含铝熔铸炸药倒药方法的正确性。

6 结论

1) 间接加热倒药方法适合于熔点较高、含有铝

表 4 倒药试验结果

Tab. 4 Results of charge-inverted test

蒸汽压力/ MPa	温度/ ℃	炸药熔化开始 时间/min	炸药停止流出 时间/min	熔化厚度/ mm	装药与壳体 分离状况
0.18 ~ 0.20	129.0 ~ 133.5	312	355	6 ~ 7	完全安全分离

粉的 DNAN 基熔铸炸药倒药;

2) 压力蒸汽升温快、热效高、温度可调, 适合作为间接加热的热源;

3) 一维传热模型计算结果与试验结果较为吻合, 可为今后类似大型战斗部倒药工艺参数设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] 王浩, 王亲会, 黄文斌, 等. DNAN 降低 DNTF 冲击波感度研究[J]. 含能材料, 2010, 18(4): 435-438.
Wang Hao, Wang Qinhui, Huang Wenbin, et al. Shock sensitivity of DNTF reduced by using DNAN[J]. Chinese Journal of Energetic materials, 2010, 18(4): 435-438.
- [2] 刘光烈, 朱啸宇, 孟天财. 炸药与装药安全技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 335-336.
- [3] 姜建武, 龙源, 谢兴博. 废弃火炸药和常规弹药的处置与销毁技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 161.
- [4] 王红星, 王晓峰, 罗一鸣, 等. DNAN 炸药的烤燃实验[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 183-186.
Wang Hongxing, Wang Xiaofeng, Luo Yiming, et al. Cook-off test of explosive [J]. Chinese Journal of Energetic materials, 2009, 17(2): 183-186.
- [5] 王亲会. 熔铸混合炸药用载体炸药评述[J]. 火炸药学

报, 2011, 34(5): 25-28.

Wang Qinhui. Overview of carrier explosive for melt-cast composite explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(5): 25-28.

- [6] 王昕. 美国不敏感混合炸药的发展现状[J]. 火炸药学报, 2007, 30(2): 78-80.
Wang Xin. Current situation of study on insensitive composite explosives in USA [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2007, 30(2): 78-80.
- [7] 李金明, 雷斌, 丁玉奎. 通用弹药销毁处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 75.
- [8] 金大勇, 贾宪振, 王亲会, 等. RTHLDu-1 炸药注装工艺安全性分析[J]. 火工品, 2011(6): 41-46.
Jin Dayong, Jia Xianzhen, Wang Qinhui, et al. Security analysis for RTHLDu-1 explosive casting technology[J]. Initiators & pyrotechnics, 2011(6): 41-46.
- [9] 金大勇, 王亲会, 牛国涛, 等. 一种高固相含量炸药精密铸装技术[J]. 火工品, 2013(2): 40-43.
Jin Dayong, Wang Qinhui, Niu Guotao, et al. The technology of precise melt-casting charge with high solid contents[J]. Initiators & pyrotechnics, 2013(2): 40-43.
- [10] 中国石化集团上海工程有限公司. 化工工艺设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

Study on the Charge-inverted Method of DNAN-based Aluminized Melt-cast Explosive

LIU Yanping, JIN Dayong, GAO Yuling, FU Gaixia

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (shaanxi xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to re-use unqualified warhead shell and its filling explosive, the characteristics of DNAN-based aluminized melt-cast explosive were analyzed. The advantages and disadvantages of several common charge inversions, including mechanical disruption, chemical dissolution, melting through indirect heating and so on, were compared. The last method was finally selected to suit this explosive system best. Meanwhile, the safety analysis was conducted in the charge-inverted process. The simulated process parameters had a good agreement with real results according to test verification. The application of this method not only can save cost, but also avoids environmental pollution to achieve the recycling of resources.

[KEY WORDS] explosive; drawback; inversion of charge; model; unqualified products; treatment

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权, 并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有, 未经书面许可, 不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部