

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.02.012

# DNAN 基熔铸炸药的预整形同步块铸技术研究\*

金大勇 王亲会 牛国涛 黄文斌 牛 磊 曹少庭

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了提高熔铸炸药块铸装药质量,以质量比 DNAN/RDX/Al:55/20/25 的基础配方为研究载体,采用两种不同装药工艺进行装药对比试验,并对样品的内外部质量、装药密度及其均匀性进行分析。结果表明,与常规块铸工艺相比,采用预整形同步块铸技术所装填的药柱,其装药密度达到了  $1.726 \text{ g/cm}^3$ ,相对密度为 95.8%,与常规块铸工艺相比分别提高了  $0.041 \text{ g/cm}^3$  和 2.2%;同时减少了装药的缺陷,使装药内外部质量获得提高,并改善了装药的密度及其均匀性。

[关键词] 预整形;同步块铸;装药工艺;熔铸炸药;装药密度;装药质量;装药缺陷

[分类号] TQ560.7

## 引言

将熔融的炸药药浆和药块交替装入弹体内,同时搅拌(或捣实)使液态炸药和药块均匀混合在一起形成装药的方法称为块铸装药工艺。目前,块铸装药工艺已经广泛应用于各种中、大型弹药装药<sup>[1]</sup>。在传统块铸过程中,由于加入了温度较低的药块,装药内部各处凝固几乎同时进行,没有集中的缩孔和粗结晶。但是由于药块形状不规则,使装药内部容易因药块相互架空而形成夹层、搭桥等疵病<sup>[2]</sup>,同时由于炸药凝固时不能得到补缩,形成分散的气孔、缩孔和疏松等装药缺陷<sup>[3]</sup>,从而降低装药密度和质量。

为解决上述问题,炸药工作者基本上都是通过优化药浆质量的办法来提高药块和装药密度,其关键是排除药浆中由于加料、搅拌和受热成分挥发时产生的气泡。金大勇等<sup>[4]</sup>对炸药真空熔混原理进行了阐述,论述了真空作用排除药浆中的气泡,提高其密度的作用机理;董素荣等<sup>[5]</sup>对振动装药机理进行了研究,认为振动可使药浆中的气泡加快逸出,同时还能细化炸药晶粒。但是,目前通过优化成型药块的形貌特性,减少或消除常规块铸工艺中由于药块形状各异而导致装药缺陷的研究还未见报道。

2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)作为低易损性炸药,由于具有冲击波和热感度较低等优点,成为熔铸炸药重要的载体之一,并且发展成了系列化的以

DNAN 为基的不敏感炸药配方<sup>[6-7]</sup>。笔者在常规块铸工艺基础上,以质量比 DNAN/RDX/Al:55/20/25 的典型配方为研究载体,研究了一种 DNAN 基熔铸炸药新型块铸技术——预整形同步块铸技术。与常规块铸法相比,预整形同步块铸技术装药缺陷明显减少,装药质量和装药密度都有较大提高。

## 1 工艺原理

预整形同步块铸技术工艺原理是根据外形圆滑的药块堆积密实度高,不易在药浆中产生夹层和搭桥等缺陷的特点,采用药块预整形和同步铸药工艺技术,使药块外观形貌获得优化,从而减少装药内部缺陷,提高装药的密度及其均匀性。

### 1.1 药块预整形工艺原理

常规块铸工艺中药块的制备是首先将药浆浇铸成一定厚度的药板,然后机械破碎成药块。此方法制备的药块形状复杂,一般是两个平行面,而其他侧面凹凸不平并带有尖角的三角形、矩形和多边形。在块铸过程中,外形不规则的药块在加入液态药浆中时,难以密实堆积,通常会在装药内部形成大量的夹层和搭桥,最终导致装药内部产生多种装药缺陷,使装药相对密实程度仅能达到约 92%~94%。药块预整形工艺是先把不规则药块在高温药浆中加热搅拌整形,使其不规则的尖角和边缘熔化,并在相互摩擦碰撞作用下变得光滑,成为易于堆积的卵形(或近似球形),从而提高其在液态药浆中的堆

\* 收稿日期:2014-05-14

基金项目:国防科技工业基础产品创新计划火炸药科研重大专项

作者简介:金大勇(1980~),男,副研究员,主要从事混合炸药配方及战斗部装药技术研究。E-mail:jinyusyong@163.com

通信作者:王亲会(1959~),男,研究员,主要从事混合炸药配方及战斗部装药技术研究

积密度,达到消除夹层和搭桥的目的。

## 1.2 同步块铸工艺原理

常规块铸工艺是将药浆和药块交替地加入到弹体内,在药块加入到药浆中并用木棒(或铝棒等)进行搅拌和捣实的过程中,由于其表面凹凸不平,会携带大量空气气泡进入到药浆中,搅拌和捣实的操作也会使空气卷入药浆内。因为块铸装药的药浆凝固时间很短,带入药浆中的气泡来不及逸出,就会在装药中形成大量的分散性气孔,使装药密度和装药质量降低。

同步块铸工艺是将整形完成后的药块和药浆同时铸入战斗部壳体中,以减少药块单独加入时携带进入空气气泡的可能。这是因为,首先药块经过预整形后表面已经变得圆滑,难以携带空气气泡;其次,在药块预整形过程中,需要对药浆和药块的混合物进行一定时间的搅拌,这个过程也是对混合物排气的过程,最终的药块与药浆混合物中气泡杂质大幅度减少,将药块与药浆的混合物同时注入弹体内后,不再需要搅拌和捣实,因此也可进一步消除操作过程中气泡混入的可能;最后,由于药块在整形的同时也被预热,从而降低了药块与药浆之间的温度差,使药块加入的比例大幅度提高,液态药浆的比例相对减少,这将进一步减少由于药浆凝固所产生的各种疵病,使装药密度和装药质量都得到进一步提高。根据以上基本原理设计的工艺流程如图 1 所示。

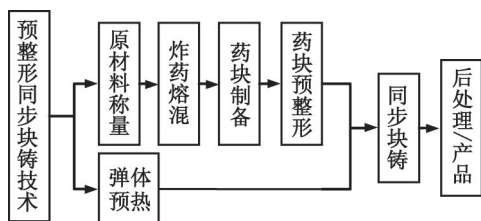


图 1 预整形同步块铸技术工艺流程

Fig. 1 Process flow of preshaping and synchronous block-molded casting

## 2 工艺试验

### 2.1 原材料及装药工艺装备

DNAN,湖北东方化工有限公司;RDX,甘肃银光化工集团有限公司;铝粉,西北铝加工厂。

熔铸炸药自动熔混系统,西安拓普电器有限公司;铝制开合模,内径 117 mm,高 140 mm,壁厚 10 mm。

### 2.2 装药工艺和样品制作

炸药配方的质量比 DNAN/RDX/Al:55/20/25。用以下两种工艺方法进行装药样品制作。

工艺 I:常规块铸工艺。开启熔铸炸药自动熔

混系统,将按配方称量好的原材料放入系统中混合均匀,先将部分药浆浇注成厚约 10 ~ 15 mm 的药板,再将药板破碎成 (10 ~ 20) mm × (10 ~ 20) mm 的药块,然后将药浆和药块依次加入模具内,用木棍搅拌和捣实。待模具注满炸药后保温冷却凝固成型。

工艺 II:预整形同步块铸技术。开启熔铸炸药自动熔混系统,将按照配方称量好的原材料放入系统中混合均匀,先将部分药浆浇注成厚约 10 ~ 15 mm 的药板,再将药板破碎成 (10 ~ 20) mm × (10 ~ 20) mm 的药块,将药块再次放入剩余药浆内加热搅拌,待药块成为光滑的卵形(或近似球形)后,将药浆和药块同时注入模具内,待模具注满炸药后保温冷却凝固成型。

### 2.3 装药质量的测试方法

外部质量测试:用目视以及卡尺测量相结合的方法检测装药样品的外部质量。

装药密度测试:将药柱加工成高度相同的圆柱体。首先测量并计算药柱体积,再称量装药量,最后用装药量除以药柱体积得到装药密度。

密度均匀性测试:将药柱按照图 2 所示进行解剖取样,采用 GJB772A—1997 方法中的 401.2“药柱(块)密度液体静力称量法”对样块进行密度测试。

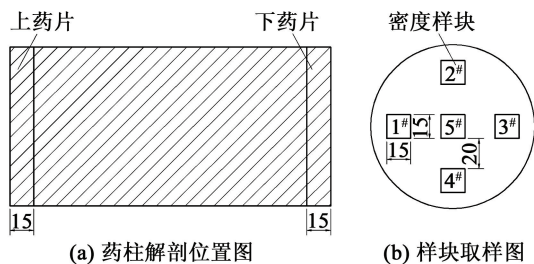


图 2 密度取样图

Fig. 2 Select of density samples

内部质量测试:对去除上、下药片后的剩余药柱进行解剖,采用目视和卡尺测量相结合的方法检测内部随机断面的质量情况。

## 3 结果与讨论

### 3.1 性能测试结果

两种工艺条件下装药密度测试结果见表 1。

表 1 两种工艺下的装药密度对比

Tab. 1 Comparison of charge densities in two kinds of processes

装药工艺	装药密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	相对密度/%
工艺 I	1.685	93.6
工艺 II	1.726	95.8

由表 1 可以看出,采用预整形同步块铸技术装

填的药柱密度达到了  $1.726\text{ g/cm}^3$ , 相对密度达到了  $95.8\%$ , 与常规块铸工艺相比, 装药密度提高了  $0.041\text{ g/cm}^3$ , 相对密度提高了  $2.2\%$ 。这说明预整形同步块铸技术可以明显提高装药密度。

两种不同工艺条件下装药内、外部质量检测结果见图 3 和表 2。



(a) 常规块铸工艺装药



(b) 预整形同步块铸技术装药

图 3 不同工艺条件下装药内部质量对比图

Fig. 3 Comparison of internal charge quality in different processes

从图 3 可以直观地看出, 常规块铸工艺装填的药柱, 内部出现了熔铸炸药几乎所有典型的疵病, 如气孔、缩孔、空隙、疏松等; 而预整形同步块铸技术装

填的药柱, 内部质量明显获得改善, 这有利于装药密度的提高。

由表 2 中的检测数据可知, 采用预整形同步块铸技术与常规块铸工艺装填的药柱相比, 装药外部的缩孔和内部的空隙缺陷获得完全消除, 同时未充满区、气孔和疏松等缺陷也大幅度减少。检测数据进一步证明了新工艺可以有效消除装药的典型缺陷, 优化装药内外部质量, 这是采用新工艺使装药密度提高的根本原因。

表 3 是不同工艺条件下装药密度均匀性对比。由表 3 可以看出, 采用常规块铸工艺的密度极差比预整形同步块铸技术装药的密度极差大, 这是因为常规块铸工艺装药内部缺陷更多, 造成密度样品质量不均匀, 这说明预整形同步块铸技术可以改善装药的密度均匀性。

不同工艺条件下装药密度分布曲线见图 4。由图 4 可以直观地看出, 采用预整形同步块铸技术装药的密度分布曲线, 不但整体高于常规块铸工艺, 而且密度分布曲线更平滑。这说明新工艺不但能提高装药密度, 更能进一步改善装药的密度均匀性。

3.2 预整形同步块铸技术对装药密度及质量的影响

由性能测试可以看出, 预整形同步块铸技术与

表 2 两种工艺下的装药质量检测结果对比

Tab. 2 Comparison of test results of charge quality in two kinds of process

装药工艺	外部质量			内部质量			
	缩孔	气孔	未充满区	缩孔	气孔	空隙	疏松
工艺 I	Ø6.0 mm 缩孔 1 个	Ø4.0 mm 气孔 6 个, Ø2.0 mm 以下气孔若干个	深 1.5 mm, 面积 $25.0\text{ cm}^2$ 和深 1.5 mm, 面积 $9.0\text{ cm}^2$ 未充满区各 1 个	Ø 14.0 mm × 3.5 mm 缩孔 1 个, Ø8.0 mm × 2.0 mm 缩孔 3 个, Ø 2.0 mm 以下可见缩孔若干个	Ø7.0 mm 和 Ø3.0 mm 气孔各 1 个, Ø1.0 mm 以下可见气孔 5 个以上	20.0 mm × 0.5 mm 空隙 1 个	约占断面总面积的 20% ~ 25%
工艺 II	无	Ø3.0 mm 气孔 1 个	深 0.8 mm, 面积 $4.0\text{ cm}^2$ 未充满区 1 个	Ø2.5 mm × 2.0 mm 缩孔 1 个, Ø 2.0 mm 以下可见缩孔 2 个	Ø3.4 mm 气孔 1 个, Ø2.0 mm 气孔 1 个。Ø1.0 mm 以下无气孔	无	约占断面总面积的 5% ~ 8%

表 3 不同工艺条件下装药样品的密度均匀性对比

Tab. 3 Comparison of charge density of samples in different processes

							( g · cm <sup>-3</sup> )
装药工艺	样块位置	样块密度					密度极差
		1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	
工艺Ⅰ	上	1.683	1.687	1.682	1.681	1.694	0.013
	下	1.686	1.692	1.690	1.679	1.684	0.013
工艺Ⅱ	上	1.733	1.722	1.724	1.729	1.727	0.011
	下	1.725	1.731	1.731	1.722	1.720	0.011

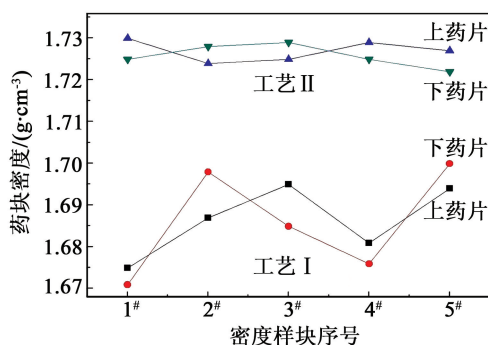


图 4 不同工艺条件下装药密度分布对比图

Fig. 4 Distribution and comparison of charge densities in different processes

常规块铸工艺相比较,前者不但可以提高装药密度,还可以优化装药质量,这是由两种工艺的本质特性所决定的。

对于常规块铸工艺来说,由于其方法固有的特点,导致装药容易产生气孔、缩孔、空隙和疏松等疵病,从而进一步降低装药密度。产生上述疵病的原因主要有以下几点:

1) 由于常规块铸工艺次序是药浆和药块交替浇注入弹体内进行搅拌或捣实,在搅拌或捣实操作中容易带入空气而在装药中形成气孔;

2) 预制药块形状不规则,边缘尖锐,棱角突出,表面(特别是断面)凹凸不平,在加入药浆内时吸附带入空气从而产生气孔;

3) 预制药块形状不规则导致其堆积不密实,易产生搭桥,药块之间局部剩余空间较大,需要液态药浆进行填充,但药浆凝固时的体积收缩无法得到补充,便产生了缩孔;

4) 预制块一般具有两个平行面,当加入药浆中的两药块平面之间距离较近时,由于液态药浆无法充满两药块之间狭小的间隙,从而使装药内部产生片状空隙;

5) 药块与药浆之间具有一定的温差,且由于炸药是热的不良导体,会导致局部药浆冷却速度相差较大,从而出现疏松组织,严重者可呈针状或树枝状结构;

6) 药块与药浆之间存在的温差,使预制块在加入过程中其周边的药浆迅速冷却,凝固时间可显著缩短,但是在预制药块加入到一定量时,会导致药浆温度降低、黏度大幅度增加,更多预制块的加入会加剧上述疵病的产生。

综上所述,药块结构形状和工艺次序对于装药密度和内部质量起着关键性的作用。图 5 分别是常规预制块结构形状和整形后预制块结构形状。



(a) 常规药块 (b) 整形后药块

图 5 常规预制块与整形后预制块形貌对比

Fig. 5 Comparison of figuration between conventional and reshaping preforms

采用预整形同步块铸技术,可以从工艺本质上对上述导致装药疵病的因素进行改善。原因如下:

首先,由图 5 可以直观地看出,整形后的药块形状变得圆滑,这种形状堆积更加致密,同时外表光洁,不易携带空气,药块之间搭桥等现象得到杜绝。圆滑的外形也消除了平面结构易产生片状空隙的问题,从而减少装药缺陷,提高装药密度。

其次,常规块铸工艺的装药缺陷主要由于液态药浆在药块之间填充不充分及其凝固时无法补缩而产生。试验中,采用预整形同步块铸技术所用药块质量约占总药量的 65%,而采用常规块铸工艺则约为 36%。这是因为采用新技术,药块在药浆中预先得到预热和整形,使药浆更易充满药块之间的空腔,同时药块堆积更加致密,药块加入的比例也大幅度增加,在相同装药量下,液态药浆的比例则大幅度降低,这将在很大程度上减少由液态药浆凝固时产生的疵病。

最后,预整形同步块铸技术改变了常规块铸工艺的工艺次序,将药浆和药块同时浇注入弹体,大幅度减少甚至取消了搅拌或捣实的操作,从而基本上解决了由于操作导致空气带入药浆的问题。由于工艺次序的改变,对于药浆和药块的混合物,可以预先调节其温度、黏度和凝固状态,待其达到最适宜浇注的状态时一次性浇注入弹体,从而进一步优化其凝固进程,提高装药质量。

#### 4 工艺安全性措施

预整形同步块铸技术工艺过程为:原材料称量→弹体预热→炸药熔化混合→药块制备→药块预整形→同步块铸→后处理。针对工艺过程的典型特点,需要采取以下安全性措施:

1) 由于 DNAN 熔点较高(94.5℃),在平衡工艺性和安全性前提下,熔药温度不超过 110℃;

2) 药块粉碎制备过程中严禁使用黑色金属工具,动作要轻缓,禁止野蛮操作<sup>[8]</sup>;

3) 药块预整形操作时,药块加入量要适宜,以不结团为标准,避免一次加入量过大产生结团,从而

导致搅拌摩擦阻力过大而发生危险;

4) 同步块铸过程中尽量使药浆和药块沿着弹体内壁缓慢注入, 避免因大型战斗部内腔深度过大, 药块铸入跌落时冲击内腔底部而产生危险;

5) 若采用新工艺装填 DNTF 基熔铸炸药, 因 DNTF 熔点高 (110 ℃), 自发火温度低于 TNT 和 DNAN<sup>[9-10]</sup>, 因此药温应不高于 115 ℃, 并尽量缩短操作过程, 避免因炸药长时间加热而产生危险。

## 5 结论

1) 预整形同步块铸技术与常规的块铸工艺相比, 大幅度减少或者消除了熔铸混合炸药典型的装药缺陷, 使装药内、外部的质量得到优化, 提高了装药密实程度及密度均匀性;

2) 利用预整形同步块铸技术装填的 DNAN 基熔铸炸药的药柱, 其装药的密度达到了 1.726 g/cm<sup>3</sup>, 相对密度达到了 95.8%, 与常规块铸工艺相比分别提高了 0.041 g/cm<sup>3</sup> 和 2.2%;

3) 预整形同步块铸技术可利用现有的块铸工艺设备操作, 简单易行, 对于改进中、大型战斗部铸装装药技术具有一定的参考作用。

## 参 考 文 献

- [1] 王儒策. 弹药工程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [2] 陈熙荣. 炸药性能与装药工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [3] 张恒志. 火炸药应用技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- [4] 金大勇, 王亲会, 牛国涛, 等. 一种高固相含量熔铸炸药精密铸装技术[J]. 火工品, 2013(2): 40-43.  
Jin Dayong, Wang Qinhui, Niu Guotao, et al. A technology of precise melt-casting charge with highly solid contents [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(2): 40-43.

- [5] 董素荣, 陈国光. 弹药制造工艺学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.  
Dong Surong, Chen Guoguang. Projectiles and rockets producing technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.
- [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] 牛国涛, 金大勇, 罗一鸣, 等. DNAN 基熔铸炸药工艺特性[J]. 兵工自动化, 2014, 33(7): 86-88.  
Niu Guotao, Jin Dayong, Luo Yiming, et al. Technical characteristics of DNAN-based melt-casting explosives [J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(7): 86-88.
- [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] 任晓宁, 王江宁, 阴翠梅, 等. 新型高能量密度材料 DNTF 的热分解特性[J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 33-36.  
Ren Xiaoning, Wang Jiangning, Yin Cuimei, et al. Thermal decomposition characteristics of a novel high energy density material DNTF [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2006, 29(2): 33-36.
- [10] 王红星, 王浩, 蒋芳芳, 等. DNAN 炸药熔铸工艺安全性分析[J]. 兵工自动化, 2014, 33(7): 72-74.  
Wang Hongxing, Wang Hao, Jiang Fangfang, et al. Safety analysis of melt-cast technology for DNAN explosive [J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(7): 72-74.

## Study on the Preshaping and Synchronous Block-molded Casting Technique of a Melt-cast Explosive Based DNAN

JIN Dayong, WANG Qinhui, NIU Guotao, HUANG Wenbin, NIU Lei, CAO Shaoting  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] To improve the block-molded charge quality of melt-cast explosives, the comparable experiments of charge were carried out by two kinds of processes based on the formulation of DNAN/RDX/Al = 55/20/25 (mass ratio) as a research object. Moreover, the inner and outer quality, charge density and homogeneity of the samples were analyzed to validate the advantage of the new method. The outcomes show that, compared with conventional block-molded casting, the density of charge due to preshaping and synchronous block-molded casting reaches up to 1.726 g/cm<sup>3</sup>, and the relative density is 95.8%, which increase by 0.041 g/cm<sup>3</sup> and 2.2%. Furthermore, the drawbacks of charge declined, the inner and outer charge quality was advanced, and the uniformity of charge density was improved.

[KEY WORDS] preshaping; synchronous block-molded casting; charge process; melt-cast explosive; density of charge; charge quality; charge defect