

doi: 10.7690/bgzd.2023.10.014

## 提高浇注 PBX 炸药装药品质技术途径

黄开书, 江涛, 吴欣欣, 刘攀, 肖伟, 唐磊

(重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760)

**摘要:** 为提高浇注热固性高聚物粘结炸药 (polymer bonded explosive, PBX) 的品质, 对影响高固相含量浇注 PBX 装药质量的因素进行分析。根据相关理论, 运用振动、抽真空及分次装药的方法设计装药工艺参数, 通过试验分析不同装药方法排出装药气泡的影响。结果表明: 采用真空-振动-分次装药, 可有效排出浇注 PBX 装药气泡, 使装药密度提高到 98.5%TMD。

**关键词:** PBX; 浇注; 真空; 分次; 气孔

**中图分类号:** TJ410.3<sup>+</sup>4 **文献标志码:** A

## Technical Approach to Improve Charging Quality of Cast PBX Explosive

Huang Kaishu, Jiang Tao, Wu Xinxin, Liu Pan, Xiao Wei, Tang Lei

(Chongqing Hongyu Precision Industry Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

**Abstract:** In order to improve the quality of cast thermosetting polymer-bonded explosive (PBX), the factors affecting the charge quality of cast PBX explosive with high solid content were analyzed. According to the relevant theory, the charging process parameters are designed by using the methods of vibration, vacuumizing and charging by stages, and the influence of different charging methods on the discharge of charge bubbles is analyzed through experiments. The results show that the vacuum-vibration-grading charge can effectively remove the bubbles in the cast PBX charge and increase the charge density to 98.5% TMD.

**Keywords:** PBX; cast; vacuum; batch; air bubble

### 0 引言

聚物粘结炸药 (PBX) 是 20 世纪 40 年代发展起来的, 因其具有能量高、力学性能优良、安定性好及成型性好等优点, 被各国所重视。浇注热固性 PBX 是以主炸药为主体, 通过粘结剂体系中粘结剂和固化剂产生交联化学反应, 形成 3 维网络结构, 配以功能力学助剂实现粘结剂体系与主炸药之间良好的浸润及包覆, 从而最终完成其装药成型, AFX-757、PBXN-109、PBXN-110、PBXW-114 为典型代表<sup>[1-2]</sup>。

随着武器的不断发展, 战斗部对炸药能量和装药品质要求也越来越高; 因此, 炸药研制人员往往通过提高主体炸药固相含量以提高炸药的能量水平, 但随着固相含量提高, 往往会导致药液粘度变大, 带来装药工艺难题, 浇注 PBX 更是如此。为实现高固相含量浇注 PBX 的精密装药, 笔者以端羟基聚丁二烯 (hydroxyl terminated polybutadiene, HTPB) 为粘结剂, 以 HMX 为主体炸药设计了固相含量高达 90% 的炸药配方, 试验分析浇注 PBX 装药时的环境真空度、装药平台振动频率及装药过程总

时长等不同装药工艺参数对装药质量的影响, 获得一种高固相浇注 PBX 高品质装药工艺方法<sup>[3]</sup>。

### 1 浇注 PBX 炸药装药疵病形成原因分析

浇注热固性 PBX 的一般装药过程包括配置粘结剂体系 (不含固化剂)、加入主炸药、加入金属粉、加入固化剂和固化成型等步骤。经过恰当的颗粒级配, 在粘结剂体系固化形成 3 维网络结构时, 炸药及金属粉颗粒可以很好地紧密嵌入其中, 从而达到高固相含量的效果。粘结剂体系固化过程主要涉及的反应如式(1)所示。



由于浇注 PBX 固化成型的实质是, 固化剂 (如甲苯二异氰酸酯 (TDI)、IPDI 等) 上的异氰酸根与粘结剂 HTPB 的端羟基发生交联固化反应, 形成 3 维网状结构如图 1 所示; 因此, 其成型过程不同于熔铸炸药 (如 TNT 基炸药、DNAN 基炸药) 成型过程中存在的物质相变、体积变化及热应力等问题, 不会引起熔铸炸药装药中出现的诸如缩孔等装药疵病。

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-07-05

作者简介: 黄开书 (1983—), 男, 安徽人, 硕士。

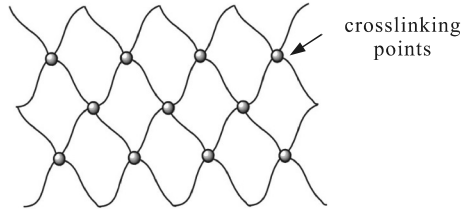


图 1 粘结剂体系中粘结剂和固化剂所产生 3 维网络结构

由于浇注 PBX 相对熔铸炸药而言，其粘度较大，特别是高固相含量炸药，往往会导致装药中容易出现气孔或炸药堆积形成的空隙；因此，提高高固相含量浇注 PBX 装药品质的关键是消除装药中的气孔或空隙，而浇注 PBX 装药中气孔或空隙的产生主要有 2 方面原因<sup>[4]</sup>：1) PBX 炸药浇注时卷入空气。药浆往弹体中注入过快，致使空气卷入炸药而被夹带进弹体，未被及时排出，形成空隙或气孔。2) 由于炸药在成型过程中，固化剂异氰酸根与弹体内部存在的少量水及其他物质中的活泼氢发生化学反应，产生少量气体而形成气孔，化学反应为：



对于第 2 种状况，通过原材料纯度控制，可以消除其他活泼氢的影响。在混药前通过对粘结剂、炸药等原料烘干除水处理，可消除水分带来的影响；因此，导致浇注 PBX 装药中出现气孔或空隙的主要原因是装药过程中夹带的空气无法排出。而装药中存在气孔或空隙会降低装药密度，影响装药品质，同时也给产品的安定性带来不利隐患。

综上分析，排出浇注 PBX 装药中的气泡，是消除装药中气孔或空隙、提高装药品质的关键。由于气泡的生成主要是与外界压力有关，即析出气泡的总压力大于外界压力总和时气泡才能排除，数学表达式为：

$$P_e > P_d + 98h\rho_i + 2 \times 10^3(\sigma/r)。 (3)$$

式中： $P_e$ 为气泡逸出总压力，Pa； $P_d$ 为空气或其他介质的压力，Pa； $h$ 为浇注 PBX 药浆的高度，cm； $\rho_i$ 为浇注 PBX 药浆的密度， $g/cm^3$ ； $\sigma$ 为浇注 PBX 药浆的表面张力，N/m； $r$ 为气泡半径，mm。

由上式可知，析出气泡的总压力要克服作用于药浆表面的大气压力，药浆的静压力以及因药浆表面张力对气泡形成时产生的阻力，二者压力差越大，气体析出的越剧烈；因此，真空浇铸可消除气孔或空隙。同时，由上述公式可以得出，药浆的高度  $h$  越大，气泡析出所需的压力越大即抽真空时的真空度越大，故在抽真空设备一定的情况下，分次浇注可以减小药浆高度，有利于药浆中气泡的排除。

## 2 试验

### 2.1 试验材料

主炸药：奥克托今(HMX)，100~500  $\mu m$ 。

金属粉：铝粉，FLQT3。

粘结剂体系：HTPB，IV 型；己二酸二辛酯(DOA)；甲苯二异氰酸酯(TDI)。

功能助剂：力学助剂。

### 2.2 炸药配方及工艺试验方案

炸药配方如表 1 所示，根据炸药理论密度计算方法<sup>[5]</sup>得到本炸药的理论密度为 1.897  $g/cm^3$ 。为研究不同条件下装药质量，共设计了 6 种装药工艺方案，具体如表 2 所示，装药工艺试验工装如图 2 所示。试验用装药壳体尺寸为  $\Phi 203 mm \times 315 mm$ 。

表 1 P1 炸药配方 %

HMX 含量	Al 粉含量	粘结剂	力学助剂
60	30	9	1

表 2 装药工艺方案

试验弹序号	振动频率/Hz	真空度范围/MPa	(振动+抽真空)时间/min	装药次数
1#	15	/	60	1
2#	/	0.04~0.01	60	1
3#	20	0.04~0.01	60	1
4#	20	0.04~0.01	80	1
5#	20	0.04~0.01	80	3
6#	20	0.04~0.01	80	4

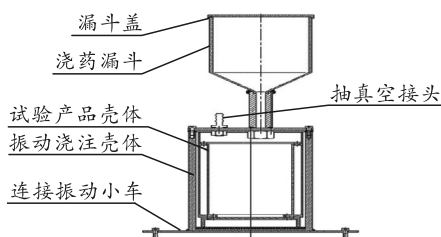


图 2 装药试验装配

## 3 结果与讨论

### 3.1 装药密度及 CT 探伤结果

利用水测量弹体容积，并称量装药前后弹种，对 6 种不同装药工艺条件下试验弹的装药密度进行测试，测试结果如表 3 所示，每种装药产品 CT 探伤结果如图 3 所示。

表 3 装药密度测试结果  $\text{g}/\text{cm}^2$ 

1#	2#	3#	4#	5#	6#
1.802	1.781	1.833	1.852	1.875	1.877

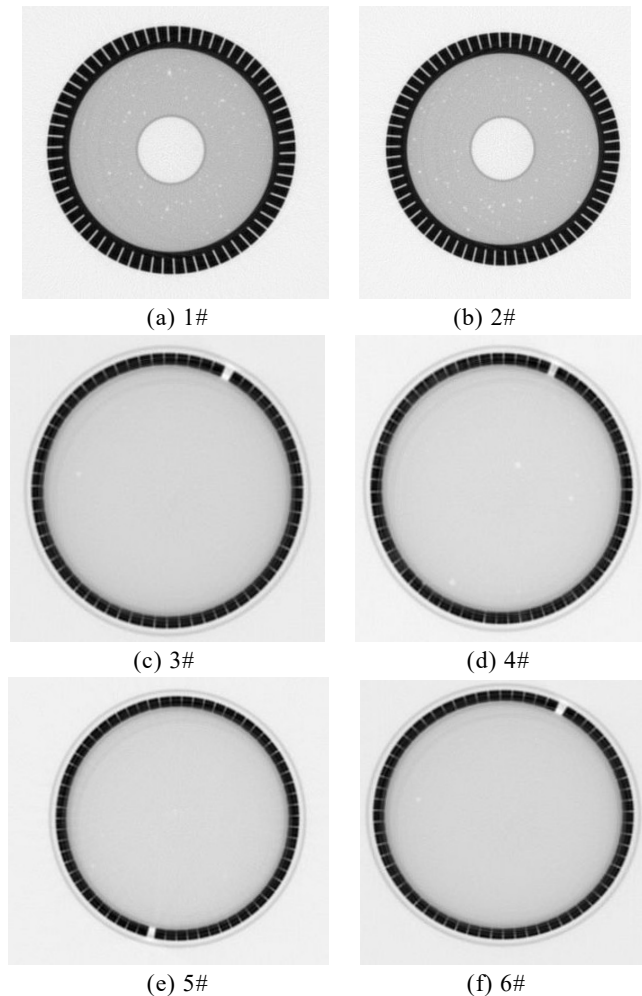


图 3 装药试验弹 CT 探伤图片

从表 3 中密度测试数据可知, 2# 试验弹装药密度最低, 仅为理论密度的 93.8%, 其次是 1#, 装药密度最高的为 6# 方案, 达到理论密度的 98.9%, 5# 方案达到了理论密度的 98.8%。从 CT 探伤结果来看, 得益于浇注装药本身的优势, 6 种方案装药内部均未出现裂纹、缩孔, 但 1#、2# 出现了大量气孔, 3#、4# 则出现少量气孔, 而 5#、6# 几乎没有发现气孔。CT 探伤结果印证了前文分析: 即影响浇注 PBX 装药质量的关键是气孔, 同时也与装药密度测试结果相吻合, 装药内部气孔多是导致装药密度不高的根本原因。

### 3.2 讨论

试验结果显示, 抽真空、振动及分次装药均对浇注 PBX 装药质量有重要影响。对高固相浇注 PBX 而言, 装药内部会有大量气孔, 这主要是由于炸药

固相含量高, 粘度较大, 导致炸药制备中及装药过程中夹带在炸药内部的空气无法有效排出而产生的, 因为仅抽真空不振动, 导致弹体下部的气体刚被抽到药液面上, 就被新加入的药液覆盖, 致使其无法排出; 而仅振动不抽真空, 药液内部的空气上浮到液面变得困难, 同样无法排出。由于大量空气的存在, 试验弹装药密度也随之下降。对比方案 1# 和 2# 试验弹装药密度可知, 在其他装药条件相同, 单一通过抽真空比单纯采用振动的方式有利于提高装药密度。

对比方案 3# 和 4# 可知, 振动抽真空时间对装药质量有重要意义, 振动抽真空时间越长, 越有利于提高装药密度和装药质量。对比方案 4#—6# 可以发现, 分次装药对排出气孔、提高装药密度具有好处, 这主要是由于分次装药, 更有利于装药内部的空气排出, 特别是分 3 次及 4 次装药可使装药密度达到理论密度的 98.5% 以上, 实现了高品质装药。

对比 5# 和 6# 可以发现, 分 3 次装药与分 4 次装药, 2 种方案的装药密度几乎相当, 对此分析认为: 相较于方案 5, 虽然分 4 次装药更有利于空气排出, 但由于分次数过多, 将导致炸药装药整体周期变长(虽然振动、抽真空时间不变), 使得药液粘度变大, 反而不利于药液中空气的排出; 因此, 宏观表现为 5# 与 6# 装药密度相当, 同时考虑到装药周期及经济性, 认为 5# 方案为浇注 PBX 装药工艺最佳方案。

### 4 结论

1) 气孔是影响高固相含量浇注 PBX 装药质量的关键。

2) 振动-抽真空-分次装药是提高浇注 PBX 装药品质的有效途径, 使装药密度达到理论密度的 98.5% 以上。

### 参考文献:

- [1] 孙华, 郭志军. PBX 炸药技术特性及在水中兵器上的应用[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(3): 109-111.
- [2] 罗运军, 吴晓青, 葛震, 等. 含能聚合物[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 2.
- [3] 黄辉. 颗粒级配技术及其在含能材料中的应用[J]. 含能材料, 2001, 9(4): 161-164.
- [4] 温士武, 姚兰英. 装药工程[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2012: 12.
- [5] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 1.

