

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.04.004

共振声混合工艺用于火炸药实验室 制备的优越性评估^{*}

陈 松 马 宁 杨 斐 秦 能 陈春燕 张 哲 孙晓朋 谢中元
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 对 B 炸药及 PBX 炸药实验室级别制备的共振声混合(RAM)工艺进行研究,实验量级为 200 g,所用设备为 2 kg 级共振声混合实验样机。实验结果表明,共振声混合能够满足 B 炸药和 PBX 炸药的均匀混合,相比现有混合工艺,效率分别提升 36% 和 114%;所得 B 炸药和 PBX 炸药产品,在外观、内部结构、密度和感度方面与现有混合工艺所得产品一致。针对火炸药实验室制备大批次、小量级的特点,共振声混合工艺具有混合速度快、工艺环节少、易清理、安全性好的优势。

[关键词] 共振声混合;火炸药;B 炸药;PBX 炸药

[分类号] TJ06;TJ450

Superiority Assessment of Resonance Acoustic Mixing Used for Laboratory Preparation of Propellant and Explosive

CHEN Song, MA Ning, YANG Fei, QING Neng, CHEN Chunyan, ZHANG Zhe, SUN Xiaopeng, XIE Zhongyuan
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an,710065)

[ABSTRACT] An experimental study on the process superiority of resonance acoustic mixing (RAM) was used for laboratory preparation of propellant and explosive, and the sample scale was 200 gram by 2 kilogram scale RAM experimental proprototype. The experimental results show that RAM can realize uniform mixing of Composition B and PBX explosive, and the mixing efficiency increased by 36% and 114% respectively compared with the traditional mixing process. Product properties of Composition B and PBX explosive including appearance, internal structure, density and sensitivity are almost the same for RAM and traditional mixing process. In view of the characteristics of large quantities, small scale prepared in the laboratory preparation of propellant and explosive, the RAM has the advantages of faster mixing speed, less process links, easy cleaning, and safer process.

[KEYWORDS] resonance acoustic mixing (RAM); propellant and explosive; Composition B; PBX explosive

引言

共振声混合技术是近年来兴起的一种基于振动宏观混合和声场微观混合耦合作用的混合技术,依托于共振声混合设备的低频(30~100 Hz)、大加速度(100 g, g 为重力加速度, $g=9.8\text{ m/s}^2$)往复振动实现物料的无桨混合。在低频、大加速度振动条件下,被混物料发生流化,产生宏观振动混合涡;同时,大加速度振动在混合容器底部激励出声场(压力

波),声场在物料内部传播时形成力偶,产生尺度为 50 μm 的微混合^[1-3]。目前,共振声混合已经形成多种型号设备,如针对实验室应用和药学应用的 LabRAM、PharmaRAM 系列设备等。

共振声混合诞生以来,受到多行业的关注和应用研究。如应用于菌群培养以获得比摇瓶更好的氧气传输速率^[4]、应用于药物混合以使原药和辅助剂混合更加均匀^[5-6]、应用于火炸药以改善混合效果并提高混合效率^[7-8]等。基于共振声混合没有混合桨叶、可实现整场混合等优势,笔者项目团队开发了共

^{*} 收稿日期:2019-04-19
基金项目:基础产品创新计划火炸药科研专项(编号省略)
第一作者:陈松(1982-),男,硕士,副研究员,主要从事火炸药配方及工艺的研究。E-mail:13359219465@189.cn
通信作者:马宁(1987-),男,硕士,副研究员,主要从事火炸药特种工艺设备的研究。E-mail:marknumber1@sina.com

振声混合设备^[2],并对其应用于火炸药的可行性进行了探索研究,在 2016 年和 2017 年发表的相关研究成果中报道了共振声混合的热安全可控性、静电安全可控性以及应用于固体质量分数 86% 和 90% 的 PBX 炸药混合的可行性^[9-10]。

实验室级别的火炸药混合是火炸药研究最常见的工艺环节,目前常用的混合工艺为手工搅拌、2L 立式捏合机。实验室级别火炸药混合具有量级小、批次大的特点;同时,由于常常涉及到新材料和新配方,还具有未知风险高的特点。另外,现有混合方式存在称量、加料、混合、流转、浇注、固化、清理等多个环节,人员直接操作火炸药材料次数多;且清理环节耗时比较长,材料利用率低。

一方面是火炸药实验室制备面临的效率和安全问题,一方面是共振声混合技术在火炸药及原料药等领域应用的成功报道。笔者认为,共振声混合技术应用于火炸药实验室制备,能够解决批次大、量级小、危险性高等问题,在提高实验效率、改善研究工作环境、强化工艺安全等方面具有重要优势。

本文中,以 B 炸药和高聚物黏结(PBX)炸药为对象,对共振声混合和现有混合工艺进行对比研究,分析共振声混合工艺应用于火炸药实验室制备的技术优势。

1 实验

1.1 实验装置及测试方法

1.1.1 材料及配方

三硝基甲苯(TNT)、黑索今(RDX)、奥克托今(HMX),国营 805 厂;铝粉,29 μm ,鞍钢实业微细铝粉有限公司;SR-3,西安近代化学研究所。

B 炸药:TNT 和 RDX 的混合物,TNT 和 RDX 质量分数分别为 $x\%$ 和 $(100-x)\%$;

PBX-X 炸药:SR-3、铝粉、HMX 的混合物,三者质量分数分别为 12%、 $y\%$ 和 $(88-y)\%$ 。

其中,X、 x 和 y 为因脱密需求的替代代号。

1.1.2 仪器设备

共振声混合实验样机,2 kg 级,西安近代化学研究所;加速度传感器,3097A1,美国 Dytran;电子计算机 X 线断层摄影仪(CT),BT-400 型,俄罗斯莫斯科探伤有限公司。

1.2 共振声混合工艺

在不锈钢容器(内径 70 mm,内高 140 mm,带有循环水夹套)中依次加入物料。B 炸药混合为依次加入 TNT 和 RDX,PBX-X 炸药混合为依次加入 SR-

3、铝粉、HMX。两种炸药总质量均为 200 g。加料完成后,将混合容器加载到共振声混合设备上,并连接循环水、真空、温度传感器、导静电地线。图 1 为实验现场设备照片。B 炸药和 PBX-X 炸药混合时循环水温度分别为 90 $^{\circ}\text{C}$ 和 94 $^{\circ}\text{C}$ 。待循环水温度达到设定温度时,开启循环水泵,人员撤离,关闭防爆门,开始混合实验。所有实验均在相同工艺条件下重复两次,所得实验结果一致。

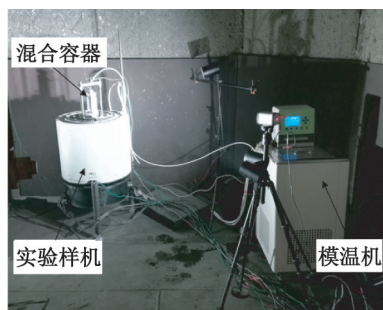


图 1 实验现场设备

Fig. 1 Equipments on experiment site

混合频率为 63 Hz,混合程序以加速度标定。

B 炸药混合程序:5 g(5 min)→10 g(3 min)→20 g(3 min)→40 g(3 min)→60 g(3 min)→30 g(5 min),表示在 5 g 加速度条件下混合 5 min,然后切换至 10 g 加速度混合 3 min,然后切换至 20 g 加速度混合 3 min,以此类推。在加速度为 30 g 的混合阶段抽真空,真空度为 -0.095 MPa 。

PBX-X 炸药混合程序:5 g(5 min)→10 g(7 min)→20 g(3 min)→30 g(2 min)→40 g(5 min)→20 g(2 min)→40 g(3 min)→60 g(3 min)→20 g(5 min)。在最后一个 20 g 的混合阶段抽真空,真空度为 -0.095 MPa 。

混合完成后,依次关停共振声混合设备、真空设备、模温机,等待 15 min 后进入爆炸塔取样。

1.3 现有混合工艺

B 炸药:保温待 TNT 融化后,使用搅拌桨在不超过 60 r/min 条件下搅拌约 30 min。

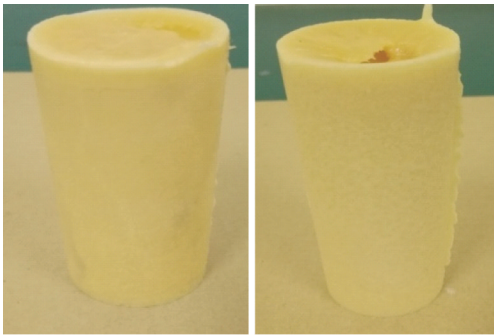
PBX-X 炸药:先将 SR-3 加入捏合锅,保温 30 min 至熔化,加入 HMX 混合 15 min,然后加入铝粉在抽真空条件下继续混合 1 h,混合完成后在真空条件下浇注。

2 结果与讨论

2.1 B 炸药混合效果

将混合药浆浇注在模具中冷却固化,固化后所

得药柱与现有混合工艺所得药柱对比,外观如图 2 所示。由图 2 可见,共振声混合所得药柱与现有混合工艺所得药柱在外观上相同。

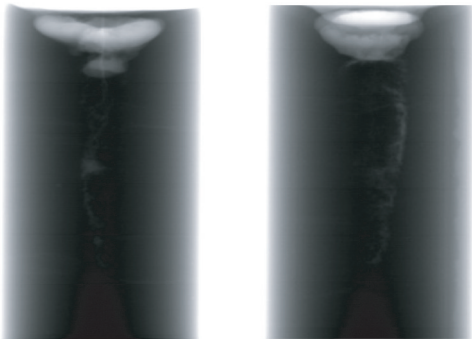


(a)共振声混合工艺 (b)现有混合工艺

图 2 B 炸药药柱照片

Fig. 2 Photographs of Composition B grains

对共振声混合所得药柱进行 CT 扫描,并与传统工艺所得药柱 CT 扫描图比较,如图 3 所示。从图 3 可见,两种工艺所得药柱致密性相同,气孔分布形式和大小上一致(气孔是由凝固过程中缩孔瑕疵引起的),间接证明了共振声混合工艺应用于 B 炸药的可行性。



(a)共振声混合工艺 (b)搅拌混合工艺

图 3 B 炸药不同混合工艺 CT 照片

Fig. 3 CT images of different mixing process of Composition B

将药柱车削加工,去掉上层缩孔部分,取上、中、下3层药片测定密度,所得数据如表1所示。从

表 1 不同混合工艺所得产品密度

Tab. 1 Average densities of Composition B under different mixing processes

取样位置	密度/(g·cm ⁻³)	
	共振声工艺	现有工艺
上部	1.698	1.698
中部	1.704	1.704
下部	1.715	1.714
平均	1.706	1.705

表 1 可以看出,共振声所得药柱密度比传统工艺所得药柱密度高约 0.1%,证明共振声混合和现有混合所得产品密度一致。

同时,从不同取样点可以看出,共振声混合所得的药柱上、中、下 3 部分密度接近,证明混合均匀性良好。

对两种混合工艺所得 B 炸药药粉进行感度测试,共振声混合工艺与现有混合工艺所得药粉撞击感度分别为 40% 和 52%,所得药粉摩擦感度分别为 8% 和 12%。两种工艺所得 B 炸药感度特性一致。

2.2 PBX-X 炸药混合效果

将共振声混合和现有混合工艺所得的 PBX-X 药浆进行对比,外观一致,如图 4 所示。从混合状态看,两种工艺所得产品状态相同。

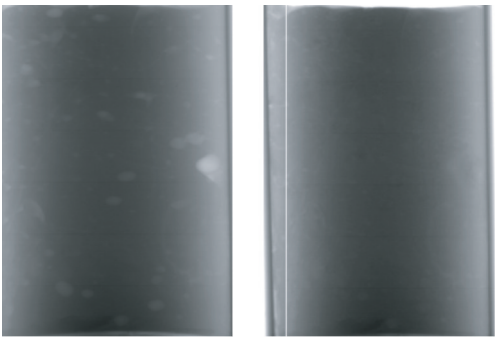
混合药浆常温冷却固化后,对药柱进行 CT 扫描,结果如图 5 所示。相比现有混合工艺,共振声混合所得药柱中有较为明显的气泡,这是因为浇注环节没有抽真空所致。除此之外,两种工艺所得药柱致密性一致。



(a)共振声混合工艺 (b)现有混合工艺

图 4 PBX-X 炸药药浆照片

Fig. 4 Photographs of slurry of PBX-X explosive



(a)共振声混合工艺 (b)现有混合工艺

图 5 PBX-X 炸药不同混合工艺 CT 照片

Fig. 5 CT images of different mixing process of PBX-X explosive

采用排水法测试药块密度,共振声混合工艺所得药柱密度为 1.812 g/cm³,传统工艺所得药柱的密度是 1.845 g/cm³。共振声混合与现有混合所得 PBX-X 炸药密度基本一致,相差的 3% 是由于共振

声混合未在真空条件下浇注,内部裹挟部分气泡所致,这与 CT 电镜扫描结果一致。

对两种混合工艺所得 PBX-X 炸药药粉进行感度测试,共振声混合工艺与现有混合工艺所得药粉撞击感度均为 4%,所得药粉摩擦感度分别为 6% 和 8%。两种工艺所得 PBX-X 炸药感度特性一致。

2.3 共振声混合工艺的优越性

1) 混合速度快。对于 B 炸药和 PBX-X 炸药,共振声混合时间分别为 22 min 和 35 min,而传统工艺混合时间分别为 30 min 和 75 min。在达到相同混合效果情况下,效率分别提升了 36% 和 114%。

文献[11]中,混合 200 g PBX 炸药模拟物所耗时间为 12 min,为本文中 22 min 的近一半。因此,本文中混合时间还有很大的优化空间,经工艺优化后,混合效率提高高度有望达到 200%。

2) 容器易清理。相对于 B 炸药的搅拌桨混合和 PBX 炸药的立式捏合机混合,共振声混合不存在搅拌锅和搅拌桨叶(捏合元件)清理的过程,清理时间降低为原工艺的 40% 左右。

3) 得料率高。共振声混合得料率接近 98%,比现有工艺得料率高。

4) 可原位混合。通过设计开合模具混合筒,混合完成后,药浆可直接在混合筒中固化,免去了转运环节。

5) 工艺环节少。共振声混合工艺可集加料、混合、浇注、固化于一体,减少工艺环节。

6) 工艺安全性高。混合工艺环节缩减,减少人员直接面对火炸药产品操作的频次,提高工艺安全。

3 结论

采用共振声混合工艺分别对 B 炸药和 PBX 炸药进行混合制备实验,并与现有混合工艺进行对比,得到以下结论:

1) 共振声混合能够实现 200 g 量级 B 炸药和 PBX 炸药均匀混合。所得产品外观、密度、内部结构、感度与现有混合工艺一致。

2) B 炸药和 PBX 炸药共振声混合效率相比现有工艺分别提升 36% 和 114%。

3) 对于火炸药实验室制备小量级、大批次的特征,共振声混合具有效率高、得率高、易清理、工艺环节少、安全性好等优越性。

参 考 文 献

- [1] HOWE H W, WARRINER J J, COOK A M, et al. Apparatus and method for resonant-vibratory mixing: US 7188993[P]. 2007-03-17.
- [2] 张哲,陈松,马宁,等. 三自由度共振混合装置: CN106582402A[P]. 2017-01-23.
- [3] 陆志猛,孙涛,王青松,等. 基于三自由度共振系统的声波混合装置: CN106000198A[P]. 2016-10-12.
- [4] REYNOSO-CERECEDA G I, CORDOVA-AGUILAR M S, VALDEZ-Cruz N A, et al. Shaken flasks by resonant acoustic mixing in the biosynthesis of alginate by *Azotobacter vinelandii* with non-Newtonian rheological characteristics[J]. *Journal of Chemical Technology Biotechnology*, 2018, 93(4): 1159-1168.
- [5] OSORIO J G, SOWRIRAJAN K, MUZZIO F. Effect of resonant acoustic mixing on pharmaceutical powder blends and tablet [J]. *Advanced Powder Technology*, 2016 (27): 1141-1148.
- [6] WANG Y F, OSORIO J G, LI T Y, et al. Controlled shear system and resonant acoustic mixing: effects on lubrication and flow properties of pharmaceutical blends [J]. *Powder Technology*, 2017, 322: 332-339.
- [7] ANDERSON S R, AM ENDE D J, SALAN J S, et al. Preparation of an energetic-energetic cocrystal using resonant acoustic mixing [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(5): 637-640.
- [8] HOPE K S, LLOYD H J, MICHALCHUK A L, et al. Resonant acoustic mixing: its applications to energetic materials [C]//*Proceedings of New Trends in Research of Energetic Materials*. Czech Republic, 2015: 134-143.
- [9] 马宁,秦能,蒋浩龙,等. PBX 炸药声共振混合试验研究 I [J]. *爆破器材*, 2016, 45(4): 26-29.
- [10] 马宁,陈松,张哲,等. PBX 炸药共振声混合实验研究 II [J]. *爆破器材*, 2017, 46(6): 1-5.
- [11] COGUILL S, FARRAR L. Resonant Acoustic Mixing of PBX [C]//*International Pyrotechnics Society. Proceedings of the 40th International Pyrotechnics Seminar*. Tours, France, 2014.