

文章编号: 1006-9941(2021)07-0680-07

声共振混合技术在含能材料领域的应用进展

张光全, 刘晓波

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 21世纪初, ResoDyn 声共振混合器公司首次开发出了声共振混合(RAM)技术。这项技术利用声波在一种材料中形成多个微混合区, 而不是传统的叶轮或转子搅拌或行星混合器产生的大混合区。这种技术可用于制药、化妆品和散装粉末混合的大规模生产, 与传统的高剪切含能材料加工方法(如行星混合)相比, RAM具有潜在的优势, 其优点包括更短的混合时间、改善混合均匀性、减少废物输出、没有运动部件(点火源)以及混合高粘度、难混合成分的可能性(与行星混合器相比)。RAM已成为研发和生产推进剂、炸药、烟火剂的首选加工技术。从RAM原理角度出发, 介绍了RAM技术在共晶炸药、纳米铝热剂制备中及其在固体推进剂和高聚物粘结炸药(PBX)加工中的应用。

关键词: 声共振混合; 含能材料; 炸药; 推进剂; 纳米铝热剂; 共晶

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2020285

1 引言

声共振混合(Resonant Acoustic Mixing, RAM)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新技术, 用机械振动系统共振产生高强度振动, 使之在多相流中激发低频(约 60 Hz)、高加速度($0\sim 100\text{ g}$, $g=9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)声波激励下达到物料均匀分散的目的^[1-2]。RAM是一种整场混合, 相比传统叶轮式混合, 整个混合场内形成均匀的微尺度混合单元, 不留混合死角, 特别是其在被混物料内部的微尺度分散效应能够有效地解决超细材料团聚的问题, 可用于固-固、固-液、液-液和液-气之间的混合^[3-5]。RAM无需使用叶轮, 避免了被混物料与叶轮、螺杆等元件的局部强烈剪切和摩擦, 大大降低了混合过程的力刺激和热刺激^[5]; 与超声混合相比, 不存在由于空化产生的局部高温高压问题, 易于实现工程化放大, 在医药、食品、生物、化妆品、含能材料等化工领域具有较好的应用前景。对于较为敏感和危险的含能材料混合来说, 具有

明显的安全性优势^[3-4], 国外对RAM技术给予了极高的评价, 美英国防部将其列为“可能改变弹药制造领域游戏规则颠覆性技术”^[6-7]。为推动国内在此领域的发展, 详细介绍了声共振混合技术在共晶炸药、纳米铝热剂、推进剂和高聚物粘结炸药(PBX)等领域的应用进展情况。

2 RAM的原理和设备

RAM技术是美国蒙大拿州的ResoDyn声共振混合器公司(简称ResoDyn公司)在加利福尼亚州中国湖海军空战中心武器部导弹防御局的创新研发部的资助下首先开发的一种混合新技术^[8-10], 具有混合效率高、均匀性好、危险刺激小等优点, 自其诞生以来, 全球各地各行业都在学习如何利用RAM技术来提高效率和效益, 到目前为止, 全球科技巨头、国际制造商、世界顶级制药公司等都在使用ResoDyn公司生产的声共振混合器, 该公司也在世界30多个国家开展了业务^[3]。

RAM技术含有一个能产生声能场的共振机械专有驱动器, 机械系统的共振会将低频共振声波能量引入到混合矩阵中(可以是固-固、固-液、液-液和液-气的混合, 图1中的红色圈流), 声波在整个混合矩阵中的

收稿日期: 2020-10-28; 修回日期: 2021-01-07

网络出版日期: 2021-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(2205260)

作者简介: 张光全(1970-), 男, 主要从事含能材料情报及其知识管理方面的工作。e-mail: zgq677@126.com

引用本文: 张光全, 刘晓波. 声共振混合技术在含能材料领域的应用进展[J]. 含能材料, 2021, 29(7): 680-686.

ZHANG Guang-quan, LIU Xiao-bo. Progress in the Application of Resonance Acoustic Mixing Technology in Energetic Materials Field[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2021, 29(7): 680-686.

传播会形成大混合区(图1中的白色圈流),也称为体声流^[10-12];这样在整个混合介质中形成了微尺度涡流(微声流)和局部混合(体声流)。这种声共振混合的实现需要专有和独特的控制技术,通过有效载荷中的声压波传播,将系统的机械能高效地传递到混合容器的材料中。

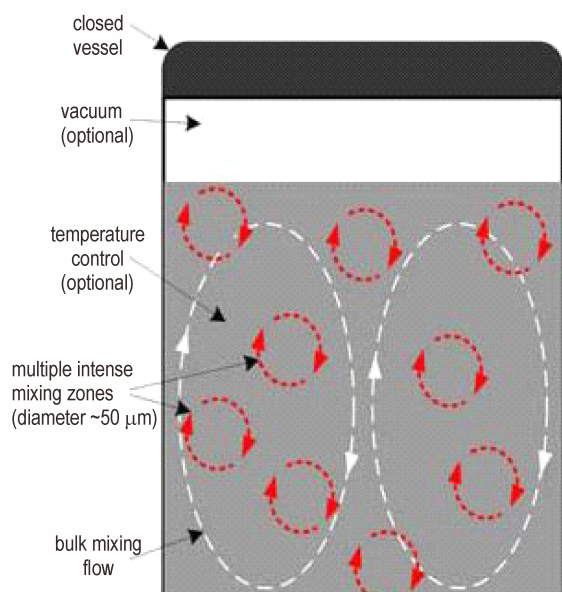


图1 声共振混合下混合材料的运动示意图^[11-12]

Fig.1 Mix material motion schematic under RAM

ResoDyn公司精心设计了一个拥有知识产权的专有系统,通过在受控共振操作条件下平衡动能和势能来存储振动能,势能存储在弹簧中,动能由连接到弹簧的板或集成块转变成垂直运动提供^[10-11]。共振频率定义为系统中的机械能在弹簧中储存的势能和运动集成块中的动能之间传递的频率,目前设计的频率在58~62 Hz之间,其与有效载荷、混合材料与容器的耦合程度以及吸收能量的难易程度有关,在静止时是恒定的,但在运行时是不断检测、调整或变化的^[3]。现在,ResoDyn公司已经开发出了500 g和1000 g载荷容量的LabRAM I和LabRAM II两种全功能、数字控制的通用实验室规模设备,为药物混合开发了300 g和1000 g载荷容量的专用实验室设备,也为含能材料混合开发了一种载荷容量1000 g LabRAM II H专用实验室设备(图2)^[3]。对于小规模和中试生产,ResoDyn公司开发出了5 kg、36 kg和420 kg载荷能力的OmniRAM、RAM 5和RAM55(图2)三种不同规模的全功能、数字控制的声共振混合器;对于连续规模化生产,ResoDyn公司可根据客户的需求为其量身定制可配置带OmniRAM、RAM 5或RAM55连续作业声共振

混合系统(CAM System)^[3]。

我国现在也掌握了声共振混合设备的原理和设计方法^[13-15],华中科技大学^[2]、西安交大^[4,16]、西安近代化学研究所^[17]、航天化学技术研究所^[18]等单位研发了一些RAM设备,最大规模可达100kg级^[2,4,16-18];由于RAM设备的开发涉及到人工智能的一些算法,所以对RAM加工含能材料进行数值模拟研究^[4,16-17,19]有利于开发出更智能、高效的含能材料RAM设备,但是国内相关机构和单位在这方面的重视和投入还远远不够,设备的开发还处于初级阶段。由于知识产权的原因,专业的声共振混合器开发和生产厂家只有ResoDyn公司一家独大。



LabRAM II H (1000 g)

RAM55 (420 kg)

图2 ResoDyn公司开发的可用于含能材料加工的实验室规模的和最大规格的设备

Fig.2 ResoDyn's laboratory-scale and maximum resonant acoustic mixer for energetic materials

3 RAM在共晶炸药制备中的应用

美国陆军武器装备研发与工程中心(ARDEC)联合Nalas工程服务有限公司利用RAM技术制备六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)共晶炸药,将80 mg CL-20和27.03 mg奥克托今(HMX)加入瓶状容器混合之后,再加入2-丙醇/乙腈混合溶液33 μ L(体积比为70:30),应用RAM技术在60 Hz左右80 g混合加速度的作用下对混合物料处理大约1 h,制备出摩尔比2:1的CL-20/HMX共晶炸药^[20]。虽然该共晶炸药感度比纯CL-20高,但是却发现这种RAM技术制备共晶炸药过程的安全性较高,有利于规模放大。随后,ARDEC和Nalas工程服务有限公司又利用RAM技术制备了1-甲基-3,5-二硝基-1,2,4-三唑(MDNT)与CL-20摩尔比为1:1的共晶炸药,该共晶炸药感度性能与CL-20相当,同样未达到改善CL-20感度的目的^[21-22]。

英国爱丁堡大学化学学院的Hope等^[9]将10 mg

3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮(NTO)和6.5 mg 4-氨基三唑(4-ATZ)等当量混合在一起,加入一滴水后分别在50 g和100 g混合加速度作用下,用RAM技术混合1 h,得到摩尔比1:1的NTO:4-ATZ共晶产物。不加水用同样方法也能得到NTO:4-ATZ共晶产物,只是反应不够充分,产物上包覆有未反应的组分。Hope用同样的方法还得到了NTO与4,4-联吡啶(44BP)形成摩尔比1:1的共晶产物NTO:44BP^[9],同时,还将0.1 g硝基胍(NQ)和0.135 g 2-羟基-5-硝基吡啶(H5NP)等当量混合在一起,加入一滴水后在70 g混合加速度作用下,利用RAM技术混合1 h,得到了摩尔比为1:1的NQ:H5NP共晶。

共晶炸药是指两种及以上炸药组分通过分子间非共价键作用形成的,这种分子间弱作用力对炸药性能的影响有限,存在很大的不确定性,如美国ARDEC制备的2CL-20/HMX共晶炸药就没有达到改善感度的目的。共晶常见的制备方法有溶液共晶法(如溶剂蒸发法、化学沉淀法、冷却结晶法、喷雾干燥法等)、机械化学共晶法(如高能球磨法等)、熔融法、超声共晶法等^[23-25],这些制备方法过程中应用到的传统搅拌混合法都可改用无叶轮的RAM工艺来代替,既安全又高效。

4 RAM在纳米铝热剂制备中的应用

纳米铝热剂具有较高的能量密度和快速的反应速度,可用于点火或起爆系统。2016年,加拿大国防开发局利用Resodyn公司生产的LabRAM声共振混合器直接把棕榈酸钝化的纳米铝(L-Al)分别和CuO(<50 nm)、MoO₃(<100 nm)、Fe₂O₃(<50 nm)、或其中二者混合纳米金属氧化物在80 g混合加速度作用下进行1 min声共振混合,制得了可用于小口径火炮底火装药的纳米铝热剂,结果分析发现多数情况下两种氧化物混合形成的纳米铝热剂比单个氧化物形成的纳米铝热剂摩擦感度更高,静电感度介于两个单个氧化物形成的纳米铝热剂之间^[26]。对二元氧化物MoO₃/CuO与纳米铝构成的铝热剂进行热分析,发现形成了CuMoO₄,但是CuMoO₄在其中作用还不清楚。2018年,加拿大国防开发局继续报道了这方面的研究,他们通过声共振混合制备出CuMoO₄与氧化物钝化纳米铝(O-Al)、L-Al和Viton包覆纳米铝(V-Al)形成三种纳米铝热剂与其对应的CuO/MoO₃和三种纳米铝形成的铝热剂性能进行对比,结果显示CuMoO₄/Al这种纳米铝热剂

摩擦感度介于MoO₃/Al和CuO/Al的铝热剂之间,其中CuMoO₄/V-Al的摩擦感度为96 N,静电感度大于0.156 J,感度性能优于CuMoO₄/O-Al和CuMoO₄/L-Al^[27]。点火对比试验发现优化的Al/CuO/MoO₃配方在808nm低能激光下点火延迟时间可达1.4 ms(774 W·cm⁻²),CuMoO₄/Al点火延迟时间则是它的三倍,Al/CuO/MoO₃可用作激光点火材料,CuMoO₄/Al可用作火炮的底火装药。

为了降低超级铝热剂的摩擦感度,2017年加拿大国防开发局把MoS₂、石墨烯和十六烷添加剂分散在纳米MoO₃中后再与L-Al在80 g混合加速度作用下进行1 min声共振混合干粉制备出改性的MoO₃/L-Al纳米铝热剂,结果分析发现摩擦感度明显降低,其中0.5%微米MoS₂和0.5%的十六烷制备的纳米铝热剂感度最低,达到了120 N的摩擦感度基线^[28]。

纳米铝热剂的制备方法很多,有固相反应法、抑制反应球磨法、喷雾热分解法、自组装法、溶胶-凝胶法等^[29],这些方法中凡是涉及到组份间的混合都可尝试采用RAM技术,可明显地缩短混合时间。

5 RAM在推进剂加工中的应用

2010年,Miller等^[30]报道了用RAM技术来加工推进剂,他们发现混合容器的尺寸影响混合效率,一定尺寸范围内,长径比越大,混合效率越低。2012年,美国在加利福尼亚州中国湖军事基地^[10,31]评估了RAM加工推进剂的可行性,通过RAM加工和Baker-Perkins(BP)立式混合加工端羟基己内酯改性聚醚(HTCE)粘结AP/Al基推进剂的性能对比试验,发现声共振混合的物料具有更高的均匀度,两种工艺得到的推进剂其安全性(撞击感度、摩擦感度和静电感度)基本相同,在低压下燃速也是相同的,在高压下,燃速都随压力增大而增加。同年,美国数字固态推进剂有限责任公司^[32]利用Resodyn公司的RAM5声共振混合器对HTPB粘结的推进剂进行了5加仑(约20 L)的放大试验研究,结果显示规模放大能够明显节省混合时间和成本。

2020年,荷兰国家应用科学研究院(TNO)报道了RAM技术与常规的机械混合加工的对比试验研究,结果显示两种加工方式得到的推进剂中氧化剂粒子及其均匀性、密度和燃速完全相同。该试验结果表明,RAM加工技术具有节省混合时间的优势,其应用前景较好^[33]。

目前,国内还没有利用RAM技术直接加工推进剂

的报道,只有利用RAM技术加工推进剂用衬层的试验报道^[18]。

上述有关RAM技术在推进剂中的加工应用研究只是涉及到各组份间的混合,体现出RAM技术具有混合时间短、便于放大、加工安全的优点,对于推进剂加工工艺本身没有带来实质性的改变,对于推进剂的固化加工工艺来说,结合RAM技术可带来了新的工艺变化。

6 RAM在PBX加工中的应用

6.1 在压制PBX造粒工艺中的应用

水淤浆法是压制PBX造粒普遍采用的方法,该工艺每批都要产生大量混杂炸药和有机溶剂的废水需要处理,而若采用无水造粒工艺既可免去污水处理的财政开支,也有利于有机溶剂的回收再利用,更利于环保。为了实现该目的,美国落基山科学实验室(RMSL)利用声共振混合技术,设计新颖装置,优化实验室PBX压制造型粉工艺流程,得到了平滑均匀的球形造型粉颗粒,成功地开发出了压制PBX的声共振无水造粒工艺^[34]。该工艺具有无接触远距离的自动化一锅混合造粒、溶剂的高效回收再利用、颗粒组份一致性好和混合容器自清洁的优点。

6.2 在浇注固化PBX加工中的应用

目前,国内在利用RAM技术加工浇注固化PBX方面研究的单位较少,只有西安近代化学研究所^[4,17,35-36]2015年开始针对端羟基聚丁二烯(HTPB)、铝粉和炸药的PBX混合工艺进行了RAM数值模拟,认为混合效果受容器尺寸、炸药粒径、混合量级、混合温升和混合加速度的影响,指出RAM具有混合均匀性好、混合安全和混合时间短的优点。

英国QinetiQ公司^[37-38]对于HTPB粘结的浇注固化PBX进行了声共振混合与常规行星搅拌混合的对比试验研究,结果显示声共振混合对分散没有影响,固化效果更好,只是在模量方面有微小差异,对性能的影响几乎可以忽略不计。

英国BAE系统公司利用RAM技术对RDX/HTPB聚能装药加工进行了研究,结果显示RAM技术能够得到密实的PBX,其爆轰性能与传统混合法得到的聚能PBX相同^[39]。事实上,声共振加工只需很薄的防飞溅的盖子,这样相同体积加工的容器能装入更多的炸药,特别适合聚能装药的加工。

在传统的PBX浇注固化工艺中,固化开始点发生

在装弹前,这会造成装药中含有气泡和交联的不均匀。2016年,BAE系统公司开始着手改进现有的浇注固化PBX加工工艺,对常用交联固化剂二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)、甲苯二异氰酸酯(TDI)和异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)实行微囊包封技术,待端羟基丁二烯、炸药和包封过的交联剂混合均匀装弹后,再通过热、超声、UV辐照、催化剂或剪切力等外力因素破除微囊包封的聚合物壁(图3);为了防止交联固化剂在包封过程发生反应或降解,在MDI、TDI和IPDI分子上还需引入至少一个可去除的保护基^[40-41]。随着研究的深入,BAE系统公司通过对已合成的带两个保护基(两个保护基可以相同)的MDI、TDI和IPDI交联固化剂的性能分析,发现它们中大部分去保护基的反应温度都高于70℃,通过控制温度或外力,不用微囊包封也可以控制固化反应发生在装弹以后。三种交联固化剂中,IPDI是液体,容易分散,固化速度慢和相对低的毒性,因此最佳的选择是带两个保护基的IPDI交联固化剂,控制外力让其发生如Scheme 1所示的去保护基(用B表示)反应得到IPDI,进而开启固化交联的进程^[42],这种不用微囊包封工艺是BAE开发出的更为高效的第二种工艺。

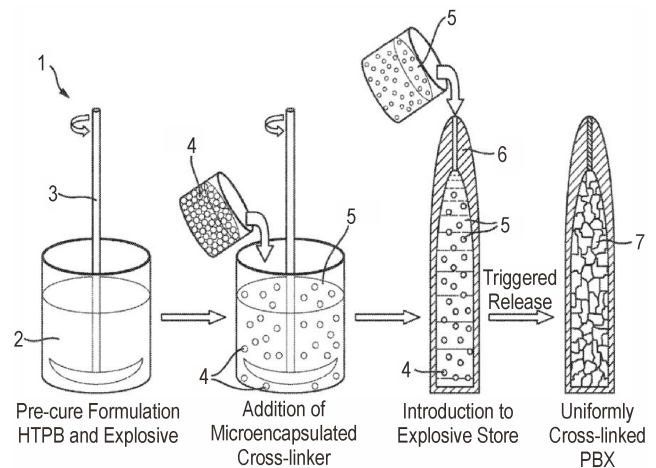
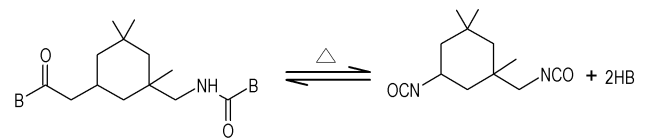


图3 浇注固化PBX的弹药装填图

Fig.3 Casting schematic of cross-linked PBX ammunition



Scheme 1

BAE系统公司将这种带保护基固化剂的浇注固化PBX新工艺与RAM技术相结合,开发出了两种声共振频率的新型声共振混合装置,第一个声共振频率只为

配方提供了一个均匀的混合,能量不足以破坏包封交联剂的微囊聚合物壁或去除第二种工艺中IPDI不稳定保护基,等到物料混合均匀后再启动第二个声共振频率,既能提供均匀的混合,又能破坏包封壁或第二种工艺的保护基^[43-44]。声共振频率一般在100 Hz以下,最优的频率在50~70 Hz,与几十千赫兹频率的超声混合技术相比,固化时间短,声共振频率低、能耗低,大规模应用更安全。为了去除挥发物或气泡,可在真空下操作,还能设计成连续作业流水线加工的装弹固化工艺^[43-44]。这种技术也适用于推进剂的浇注固化加工。

6 结束语

(1)声共振混合无需使用叶轮,是一种整场混合,混合不留死角,能明显降低混合过程的力刺激和热刺激,特别适合较为敏感和危险的高固含量含能材料的高效混合,有利于其加工工艺的放大,相关的科研工作者应该推动声共振混合技术在含能材料方面的应用和发展。

(2)RAM技术高效节能,节省混合时间,在共晶炸药、纳米铝热剂和推进剂的混合过程中都已应用。在共晶炸药和压制PBX造粒工艺中,利用RAM混合可减少溶剂或不需溶剂,减少了废物输出,这也是RAM技术一个重要的优点。

(3)在推进剂固化和PBX浇注固化加工方面可以通过第二个声共振频率控制固化开始点,实现含能材料固化加工工艺的根本性改变。

总之,相比传统混合方式,声共振混合技术具有全场混合、无混合元件介入、无局部强剪切、混合效率高、混合尺度小、免清理、易于放大等优点,特别适合于含能材料领域方面的混合加工。我国的声共振加工设备研发还处于初级阶段,与ResoDyn公司差距巨大,还需投入一定的人力和物力进行研发。

参考文献:

- [1] Harold W, Jeremiah J, Scott L, et al. Apparatus and method for resonant vibratory mixing: US7188993[P]. 2007-03-13.
- [2] 詹小斌, 汤滢, 兰昌义, 等. 三质体声共振混合机的动力学特性及其性能分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(2): 204-208.
ZHAN Xiao-bin, TANG Ying, LAN Chang-yi, et al. Analysis on the dynamic characteristics and performances of a three-mass resonant acoustic mixer[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(2): 204-208.
- [3] <https://resodynmixers.com>. 2020-10-01.
- [4] 张毅铭, 马宁, 王小鹏, 等. 固液两相声共振混合数值模拟[J]. 化工进展, 2018, 37(3): 913-919.
- [5] Osorio J, Muzzio F. Evaluation of resonant acoustic mixing performance[J]. *Powder Technology*, 2015, 278: 46-56.
- [6] Peter L. Resonant acoustic mixing principals and analysis[C]// Resonant Acoustic Mixer Energetic Conference, Resodyn head office in Butte, Montana, 14 July 2011.
- [7] Davey R J, Wilgeroth J M, Burn A O. New Age of PBX Manufacturing: Optimisation of RAM[C]//49th International Annual Conference of the Fraunhofer ICT, Karlsruhe, Germany, June 25 - June 28, 2018: 123
- [8] 蒋浩龙, 王晓峰, 陈松, 等. 声共振混合技术及其在火炸药中的应用[J]. 化工新型材料, 2017, 45(2): 236-238.
JIANG Hao-long, WANG Xiao-feng, CHEN Song, et al. Resonance acoustic mixing technology and its application in explosive and propellant[J]. *New Chemical Materials*, 2017, 45(2): 236-238.
- [9] Karl S Hope, Hayleigh J Lloyd, Daniel Ward, 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.
- [10] Cross T A, Nelson A P, Ferguson B P. Processing Benefits of Resonance Acoustic Mixing on High Performance Propellants and Explosives[C]//38th International Pyrotechnics Seminar, Denver, CO, USA, 10-15 June 2012: 190-206.
- [11] Vessel Geometry and Fluid Properties Influencing Mix Behavior for Resonant Acoustic® Mixing Processes[C]//38th International Pyrotechnics Seminar, Denver, CO, USA, 10-15 June 2012: 116-119.
- [12] 曲悦, 易文俊, 管军. 火炸药声共振混合优化制作效率研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 58-62.
QU Yue, YI Wen-jun, GUAN Jun. Study on optimization of production efficiency of acoustic resonance mixing for explosives[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(8): 58-62.
- [13] 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: CN106000198[P], 2016.
LU Zhi-meng, SUN Tao, WANG Qing-song, et al. Sound wave mixing device based on three-freedom-degree resonance system: CN106000198[P], 2016.
- [14] 张哲, 陈松, 马宁, 等. 三自由度共振混合装置: CN106582402 [P], 2017.
ZHANG Zhe, CHEN Song, MA Ning, et al. Three-freedom-degree resonance mixing device: CN106582402 [P], 2017.
- [15] 易文俊, 曲悦. 一种火炸药声共振混合装置: CN111085134 [P], 2020.
YI Wen-jun; QU Yue. Explosive acoustic resonance mixing device: CN111085134[P], 2020.
- [16] 朱士富, 王小鹏, 陈松, 等. 低固含率下共振声分散特性数值模拟[J]. 化工进展, 2018, 37(10): 4414-4422.
ZHU Shi-fu, WANG Xiao-peng, CHEN Song, et al. Simulation of dispersion characteristics of resonant acoustic mixing with low solid content of powder[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, 37(10): 4414-4422.

- [17] 马宁,张哲,孙晓朋,等.塑料粘结炸药模拟物共振声混合工艺过程变化规律研究[J].兵工学报,2019,40(12):2440-2446.
MA Ning, ZHANG Zhe, SUN Xiao-peng, et al. Research on changing law of resonance acoustic mixing process of plastic bonded explosive simulant[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(12): 2440-2446.
- [18] 李亚,易清丰,蒋建红,等.衬层料浆无浆混合工艺[J].固体火箭技术,2019,42(2):235-238.
LI Ya, YI Qing-feng, JIANG Jian-hong, et al. No-propeller mixing process of liner material paste[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42(2): 235-238.
- [19] Rouffet J B, Ruscassie R, Zissis G. Acoustic resonance prediction using a multiphysics model[C]//The 33rd IEEE International Conference on Plasma Science, 2006. ICOPS 2006.
- [20] Stephen R Anderson, David J am Ende, Jerry S Salan, et al. Preparation of an Energetic-Energetic Cocystal using Resonant Acoustic Mixing [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(5): 637-640.
- [21] Stephen R Anderson, Pascal Dubé, Mariusz Krawiec, et al. Promising CL-20-based energetic material by cocrystallization [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41: 783-788.
- [22] Stephen R Anderson, Pascal Dubé, Mariusz Krawiec, et al. CL-20: DNMT cocrystal crystal structure [P]. US Patent: US2015/0361056.
- [23] Levinthal M L. Propellant made with cocrystals of cyclotetramethylenetetranitramine and ammonium perchlorate: US, US4086110[P]. 1978.
- [24] 张坤,王晓峰,陶俊,等.共晶炸药的设计及制备研究进展[J].飞航导弹,2019(7):90-93.
- [25] 马宁,陈松,蒋浩龙,等.共振声混合技术在含能材料领域应用研究进展及展望[J].兵工自动化,2017,36(7):20-24.
MA Ning, CHEN Song, JIANG Hao-long, et al. Research progress and prospect on application of resonance acoustic mixing technology in energetic materials field[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2017, 36(7): 20-24.
- [26] David G Kelly, Pascal Beland, Patrick Brousseau, et al. The performance modification of aluminum nanothermites prepared using resonant acoustic mixing [C]//42nd International Pyrotechnics Society Seminar, Grand Junction, Colorado, USA, July 10-15, 2016: 4-11.
- [27] Catalin F Petre, David G Kelly, Daniel Chamber, et al. Thermochemical properties and laser-ignition performance of Al/CuMoO₄, Al/CuO/MoO₃, Al/CuO and Al/MoO₃ nanothermites [J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2018, 17(4): 303-319.
- [28] David G Kelly, Pascal Beland, Patrick Brousseau, et al. Formation of additive-containing nanothermites and modifications to their friction sensitivity [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2017, 35(3): 331-345.
- [29] 周超,李国平,罗运军.纳米铝热剂的研究进展[J].化工新型材料,2010,38(4):4-10.
ZHOU Chao, LI Guo-ping, LUO Yun-jun. Research progress on nano-thermite[J]. *New Chemical Material*, 2010, 38(4): 4-10.
- [30] Miller J T, Bode D A, Coguill S. Resonant Acoustic Mixing, Design and process considerations concerning vessel/case geometry and mix versus cure time when preparing composite solid propellant[C]//Proceedings of the 36th Meeting: Propellant and Explosives Development and Characterization, JAN-NAF, 2010.
- [31] Andrew Nelson, Tara Cross. Processing benefits of resonance acoustic mixing on high performance propellants and explosives[R]. ADA597433, 2012.
- [32] McPherson M D. Process and formulation development of castable energetic formulations using the LabRAM and RAM5 Mixer[C]//38th International Pyrotechnics Seminar, Denver, CO, USA, 10-15 June 2012: 1-16.
- [33] Martijn Zebregs, Alfons E H J. Mayer, and Antoine E. D. M. van der Heijden. Comparison of propellant processing by cast-cure and resonant acoustic mixing[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45: 87-91.
- [34] Nellums R R, Kosak J W, Hartman L M. Waterless granulation of plastic bonded explosive (PBX) pressing powders via resonant acoustic mixing (RAM)[C]//43rd International Pyrotechnics Society Seminar, Fort Collins, Colorado, USA, July 8-13, 2018: 603.
- [35] 马宁,陈松,蒋浩龙,等.高粘态火炸药模拟物声共振混合实验研究[J].广州化工,2015,43(19):46-48.
MA Ning, CHEN Song, JIANG Hao-long, et al. Experimental study on resonance acoustic mixing of highly viscous explosives and propellants simulant[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2015, 43(19): 46-48.
- [36] 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.
MA Ni, QING Neng, JIANG Hao-long, et al. Experimental study on resonance acoustic mixing of PBX explosive I [J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(4): 26-29.
- [37] Jordan Homan, Simon Torry, Peter Gould, et al. Using resonant acoustic™ mixer for mixing inert material[C]//47th International Annual Conference of the Fraunhofer ICT, Karlsruhe, Germany, June 28-July 1, 2016: 52.
- [38] Homan J, Sory D, Tod D, et al. A comparison of the dynamic mechanical properties of explosive simulants prepared using traditional and resonant acoustic mixing [C]//New Trends in Research of Energetic Materials, Czech Republic, 2018: 147-157.
- [39] James M Wilgeroth, Rosie J Davey, Andrew O Burn. Resonant, in-case mixing of a polymer-bonded explosive shaped charge[C]//49th International Annual Conference of the Fraunhofer ICT, Karlsruhe, Germany, June 25-June 28, 2018: 28
- [40] Stevens Rebecca Elizabeth, Arthur Richard Stephen, Hayes Wayne Cord. Cast explosive composition: European Parent EP3319929B1[P].
- [41] Stevens Rebecca Elizabeth, Arthur Richard Stephen, Hayes Wayne Cord. Cast explosive composition: World Parent WO2017/006110A1[P].
- [42] Stevens Rebecca Elizabeth, Arthur Richard Stephen, Hayes Wayne Cord. PBX composition: World Parent WO2017/006109A1[P].
- [43] Burn Andy Oden, Stephens Rebecca Elizabeth. Resonant acoustic mixing (RAM) of an explosive composition: US Patent US2020/0062669A1[P].
- [44] Burn Andy Oden, Stephens Rebecca Elizabeth. Process for making and filling a PBX composition: US Patent US2020/0062670A1[P].

Progress in the Application of Resonance Acoustic Mixing Technology in Energetic Materials Field

ZHANG Guang-quan, LIU Xiao-bo

(*Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China*)

Abstract: ResoDyn Acoustic Mixers Incorporation developed a mixing technique known as Resonant Acoustic® Mixing (RAM) in the early 21st century. This technology uses acoustic waves to create multiple micro-mixing zones within a material rather than the bulk mixing generated by traditional impeller or rotor agitation or planetary mixer. RAM technology can be used for the large-scale production of pharmaceuticals, cosmetics, and bulk powder mixing. For energetic materials, RAM is considered to have potential advantages over traditional high-shear processing methods (e.g. planetary mixing), including shorter time scales, improved mix homogeneity, reduced waste output, absence of moving parts (an ignition source), and the potential to mix higher viscosity, 'unmixable' compositions (compared to planetary mixers). RAM has become the processing technology of choice in the development and production of propellants, explosives, and pyrotechnics. A summary of applications of RAM in the field of energetic materials, including the formation of co-crystal explosives and nano thermites and the processing of propellants and PBXs, is detailly overviewed in this text.

Key words: resonant acoustic mixing (RAM); energetic materials; explosives; propellants; nano thermites; co-crystallisation

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020285

(责编: 王艳秀)