

声共振混合技术及其在火炸药中的应用

蒋浩龙 王晓峰 陈松 马宁 商砚冰 陈春燕

(西安近代化学研究所,西安 710065)

摘要 对新型无桨混合声共振技术进行了简介,叙述了声共振混合技术的原理、目前该技术在火炸药中的应用和国际上相关研究进展与成果,并对声共振混合技术后续研究方向进行了分析探讨。

关键词 材料科学,火炸药,新型无桨混合,声共振混合

Resonance acoustic mixing technology and its application in explosive and propellant

Jiang Haolong Wang Xiaofeng Chen Song Ma Ning Shang Yanbing Chen Chunyan

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

Abstract The new non-blade mixing technology—resonance acoustic mixing technology was introduced. The technology principle and its application in explosive and propellant including related research progress and achievement in the world were reviewed. Also the subsequent research direction of resonance acoustic mixing technology was discussed.

Key words material science, explosive and propellant, new non-blade mixing, resonance acoustic mixing

先进的武器装备,需要高性能的产品支撑,高性能产品的质量需要先进的工艺技术来保障。火炸药产品性能提升的基础推动力来源于工艺技术的不断发展进步,产品的高性能也促进着工艺技术的革新^[1]。随着高效毁伤目标对火炸药的更高要求,传统火炸药配方需要引入少量助剂或微纳米材料^[2-3],以实现更好的工艺性能和更高的能量,利用传统机械搅拌混合已无法对这些微量助剂和纳米级的固相进行均匀分散^[4-7],面对传统混合技术的局限和高性能火炸药的需求促使了新型混合技术的研发^[8-10]。声共振混合技术正是这种背景下催生出可用于制造混合火炸药的一项可以影响整个行业工艺水平的关键技术。

声共振混合分散技术属于新型无桨混合技术,是传统主流混合技术的替代性新技术^[11]。本世纪初,由美国首先发明。声共振混合技术不直接接触而是依赖低频声场领域促进混合,其兼容多种材料体系,有着广泛的适用性,同时还有高度的安全性,快速而优秀的混合效果等优点,因而在火炸药中有着很大的应用空间。

1 声共振混合技术原理

共振混合工艺技术是指利用激振器输出与被混物料系统共振频率相近或相同的振动频率从而实现物料均匀分散的新型混合工艺。激振器的机械振动以机械波的方式在介质中传播,而机械波的主体是声波,因此“共振混合工艺”在很多场合被称为“声共振混合工艺”。

当混合容器遭受沿轴向的低频机械波的作用时,会在被混物料中发生二阶声学现象,即体声流和微声流,其中微声流是体声流引起的。体声流和微声流导致的混合类型主要是大

团混合和微混合,属于全场均匀混合。声流的强弱主要受激振器和混合容器的影响。

理论上,共振混合工艺应用领域非常广泛,可以实现固-固混合(如粉末混合、颗粒包覆、纳米颗粒混合)、液-液混合(如乳液、聚合物/液体体系)、液-固混合(高固含量聚合物淤浆、纳米悬浮体系、剪切敏感材料)和液-气混合(氢化、气体夹带、化学合成)。

2 声共振混合装置的研究

目前美国蒙大拿州的 Resodyn Acoustic Mixers, Inc. 开发了 3 种不同规格的相关设备,如表 1 所示。

表 1 3 种规格的声共振混合分散设备

规格	额定容量	
	体积/mL	质量/g
LabRAM	473	454
RAM5	19×10^3	36×10^3
RAM55	208×10^3	417×10^3

其中 LabRAM 型应用于实验室级别,混合容量为 473mL; RAM5 型应用于中试设备,混合容量约为 19L; RAM55 型应用于生产规模,混合容量约为 208L。通过代料实验,该共振混合工艺已经被证明在功能上能够满足固-固、固-液和液-液的高效混合,由于可以非常高效的将机械能转移到混合过程中,较传统混合技术相比其效率提高了 10 倍甚至是 100 倍。

Resodyn 公司的技术人员对声共振混合装置中使用不同

基金项目:北化集团青年基金(QKCZ-jp-2015-07)

作者简介:蒋浩龙(1989-),男,工学硕士,助理工程师,主要研究方向为含能材料工艺。

类型与不同物料的混合进行了实验。碳黑粉末与聚乙烯颗粒在干燥环境下利用声共振混合器进行混合。经过 8s 混合后,颗粒表面被碳黑完全包覆。最终混合物没有烟尘产生、没有团聚效应、容器中没有残余的碳黑。可见技术可有效地适用于颗粒的包覆,并且不需要额外添加包覆助剂。混合时,末尾容器可使用快冷槽循环并且不用清理混合设备。

该技术同样适用于混合推进剂代料。混合实验的初始物料为 50g Al, 78g 层状 KCl, 42g 细 KCl, 和 30g R45-HT。Al 和 R45-HT 先混合 1min, 然后加入层状 KCl 和细 KCl 搅拌 5min, 在真空环境下搅拌 1min, 用来除气。最终混合效果良好, 且测得不同温度下混合物的黏度分别为 1250Pa·s(29.4℃) 和 500Pa·s(48.9℃)。因而可以看到声共振技术能很好的将气体生成物、推进剂或者爆炸填充物进行混合。上面的例子显示出声共振混合具有传统有桨搅拌不具备的优点: 混合高效、快速, 易清理、远程控制、混合容器结构简单、打散团聚作用明显。

随着对声共振混合技术研究的深入, 有研究人员指出声共振材料混合所需要的能量满足的边界条件是取决于不同材料的组合和容器的几何形状。具体而言包括材料的压缩系数、粘性、密度等和容器形状、内压力、填充百分比等因素^[12-14]。

3 声共振混合的特点与应用效果

3.1 安全性的研究

美国某海军基地已把声共振混合工艺应用于高能推进剂和炸药配方的实验室混合, 发现与传统连续式混料机相比, 该混合工艺具有高效、快速、混合容器简单易清理等优点^[15]。在推进剂混合中, 该混合工艺在工艺安全性、产品弹道性能、力学性能、燃烧速率、弹性模量等方面与混料机混合具有相当或者更好的效果; 在炸药混合中, 混合物料的光学显微图片表明其混合效果不亚于连续混料机的混合效果。与此同时, 研究了该混合工艺的工艺安全性(混合过程中的热安全性、静电安全性等)^[16-17], 发现该混合工艺相比传统混合工艺在同样混合效果的前提下具有更高的安全性, 这也是因为声共振混合分散技术没有机械转动部件与物料接触, 遥控操作, 实现了人机隔离的原因。

Resodyn 公司开发的带有换热夹套的实验室级别声共振混合装置, 夹套用来控制混合过程中内部物料的温度。Martineau 等^[18]对该装置中夹套在工艺过程中的换热能力进行了验证, 结果表明, 声共振混合装置在常规工艺条件(频率 60Hz)下运行时, 夹套的换热能力依然存在。在夹套中充入一定量的空气能够大幅增加夹套的换热能力, 这主要是由于谐振状态下的夹套能够有足够的空间供内部介质的剧烈运动起到强化换热的效果, 并且在夹套中充入空气后, 换热系数会随着声共振装置运动剧烈程度而增加。

就静电安全性而言, 声共振混合装置在共振过程中, 由于待混物料与容器壁面的摩擦以及待混物料之间的摩擦, 会在容器及物料中产生静电积累。Lucon 等^[16]通过实验测试来研究声共振混合系统工作过程中静电的产生、测量、抑制。所用实验仪器主要为静电放电模拟测试仪, 静电电压测试仪等, 所用容器为 304 不锈钢和聚丙烯, 所用物料为高氯酸钾。研究表明, 对于 304 不锈钢加工的容器, 即使其有导电性能, 当

容器不接地, 依然会在容器和物料中积累静电荷; 容器接地时, 静电荷的积累会得到一定的抑制, 并且静电荷会在共振系统停止工作 60s 内导完。然而对于聚丙烯容器, 无论容器接不接地, 在容器和物料内部均会积累静电荷, 并且由于聚丙烯的电子亲和性, 其上聚集的静电荷为负电荷。作为一种新型高效混合工艺技术, 其安全性的验证是应用在火炸药领域的前提, 进一步的开展热安全与静电安全的研究有助于该技术的发展与完善。

3.2 超细分散研究

声共振混合技术在超细材料火炸药混合中也有着良好的应用。超细材料制造的火炸药与大颗粒材料制造的火炸药相比, 具有爆速高、感度低、临界直径小、爆轰波传播接近理想状态等明显优势。但随着材料颗粒直径的不断减少, 其高表面能、大比表面积、摩擦静电等效效应导致颗粒之间极易团聚。

为了解决超细颗粒间的团聚问题, 颜恒维等^[19]尝试使用超声技术分散颗粒, 可以解决超细颗粒间的团聚长大问题。声共振混合技术通过使用低频率的声场创造同时的整体运动和微混合运动, 在整个过程中产生的均匀混合效果使所有混合介质受益。不需要叶轮或其他与混合材料颗粒直接接触的组件参与混合能有效的减少超细颗粒间的团聚, 实际上共振混合工艺相比于传统混合工艺最大的优点也正是克服了传统工艺在搅拌桨或拟合元器件附近物料受到的剪切、对流、扩散程度最大, 其他地方依靠桨叶附近剪切、对流、扩散的扰动进行混合的缺陷, 能够在整个被混物料内实现均一的混合作用。

3.3 混合效果的研究

声共振混合技术的一个独一无二的特点是无论大量还是少量的材料能在相同的混合持续时间内完成混合。声共振混合技术在粘性液-固系统、粘性液-液系统、涂料颗粒与粉末或液体、气液混合中都有很好的效果。例如: 颗粒尺寸范围在 45~150 μm 的镁粉, 和典型颗粒尺寸为 35nm 的纳米氧化镁粉混合。混合 15min, 2 种材料就彻底混合, 并且镁粉表面一致覆盖了纳米尺寸的氧化物。从外观上直接观察微米和纳米尺寸的镁和氧化镁颗粒在混合前后的变化, 看到其混合为外观相当均匀的粉体, 整体呈原镁粉的颜色。这就不难体现该工艺技术高效快速的优点。

4 总结与展望

与传统混合工艺相比, 共振混合工艺具有很多优势: 没有机械转动部件与物料接触, 具有混合均匀性好、高安全性、节约材料、清洁简单、能够最大程度保持被混物料形态的特点, 混合速度快, 可用物料填充壳体如弹药壳体作为混合容器进行一体成型。因此可以说声共振混合分散技术是影响整个行业工艺水平的关键技术, 掌握好了能有效提高工艺本质安全性和效率, 实现生产工艺关键技术的突破和混合分散技术的跨越式发展。

通过对声共振工艺技术的介绍和目前进展的了解, 可以看到声共振混合技术还有不少可以提高的地方也是今后工作所需要展开的研究内容:

首先是大规模与超大规模的声共振工艺技术涉及较少仍需要深入研究。

其次是声共振混合的精细化问题。一方面是细分声共振

混合工艺技术对不同类混合使用不同规格的工艺设备;另一方面是精确物料规格与实验条件达到最佳混合效果。

声共振混合的智能化也是一个研究内容。声共振混合工艺技术可添加在线检测与软件认知系统能实时反馈共振状况与混合程度,通过调整操作频率等参数来维持混合过程中的共振,由材料的混合状况改变引起的粘附和混合频率衰减也能及时进行调整,确保优异的混合效果。

参考文献

[1] 王晓峰. 军用混合炸药的发展趋势[J]. 火炸药学报, 2011, 34(4):1-4,9.

[2] 陈松, 方伟, 赵省向, 等. 铝粉的助燃剂及其在炸药中的作用[J]. 火炸药学报, 2012, 35(6):94-97.

[3] 杨毅, 刘宏英, 李凤生, 等. 纳米稀土掺杂过渡金属氧化物对 AP 热分解的催化作用[J]. 火炸药学报, 2005, 28(4):76-79.

[4] Jai Prakash Agrawal. 高能材料—火药、炸药和烟火药[M]. 北京:国防工业出版社, 2013, 195-221.

[5] 王泽山. 含能材料概论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2006, 149-158.

[6] 孙国祥. 高分子混合炸药[M]. 北京:国防工业出版社, 1985, 60-78.

[7] 贾瑞盘. 高分子混合炸药工艺研究及其发展[J]. 火炸药, 1989(3):27-32.

[8] 王相田, 胡黎明. 超细颗粒分散过程分析[J]. 化学通报, 1995(5):13-17.

[9] 焦海亮, 包雨云, 黄雄斌, 等. 高黏度流体混合研究进展[J]. 化工进展, 2007, 26(11):1574-1582.

[10] 何飞, 黄振亚, 刘靖, 等. 复合材料内高含量固体的分散性评价方法[J]. 火炸药学报, 2013, 36(6):74-77.

[11] Brad C, Paul B. A safe and effective method to remotely mix

small quantities of energetic compositions[C]. Las Vegas, Nevada; NDIA Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, 2012.

[12] Coguil S L, Martineau Z R. Vessel geometry and fluid properties influencing mix behavior for resonant acoustic® mixing processes[C]. Denver, Colorado; 38th IPSUSA Seminar Proceedings, 2012.

[13] Lucon P. Low frequency acoustic mixing of complex and multi-phase systems[C]. Victoria, British Columbia; NAMF Mixing XXII Conference, 2010.

[14] Miller J T, Bode D A, Coguil S. Resonant acoustic® mixing; design and process considerations concerning vessel/case geometry and mix versus cure time when preparing composite solid propellant[C]. Orlando, Florida; 36th JANNAF PEDCS Meeting, 2010.

[15] 廖凯峰, 廖丽珍, 唐学军, 等. 膨化硝酸铵炸药轮碾混合工艺探讨[J]. 火工品, 2002(4):23-24.

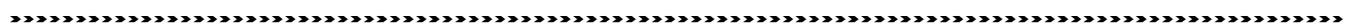
[16] Lucon P A, Coguil S L, Martineau Z R. Electrostatic generation and methods to mitigate electrostatic discharge while using the resonant acoustic mixer [C]. Denver, Colorado; 38th International Pyrotechnics Seminar(IPS), 2012.

[17] Reddi. Static electricity [G/OL]. Wikipedia. (Posted online 2010)[accessed 2015]. https://en.wikipedia.org/wiki/Static_electricity.

[18] Martineau Z R, Coguil S L. Temperature control for resonant acoustic mixing processes[C]. Denver, Colorado; 38th International Pyrotechnics Seminar(IPS), 2012.

[19] 颜恒维, 秦毅红, 赵春芳, 等. 超细粉末的团聚及其控制[C]. 北京:2004 年材料科学与工程新进展论文集, 2004.

收稿日期:2015-11-01



(上接第 235 页)

[6] TPI, Composites, Inc. Cost study for large wind turbine blades: wind PACT blade system design studies[J/OL]. <http://www.sandia.gov/wind/other/031428.pdf>.

[7] Preeti, Verma. Multi rotor wind turbine design and cost scaling [D]. US; University of Massachusetts Amherst, 2014.

[8] Fingersh L J, Hand M M, Laxson A S. Wind turbine design cost and scaling model[J]. 2006, 12:12-14.

[9] Oliveira W S, Fernandes A J. Cost analysis of the material composition of the wind turbine blades for Wobben Windpower/ENERCON GmbH model E-82[M]. 2012, 120-136.

[10] Ashwill T D. Cost study for large wind turbine blades[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2003, 5:3-5.

[11] 张定金. 国内风电叶片产业发展对化工产业的需求分析[J]. 化工新材料, 2010, 38(9):3-5.

[12] 张定金. 风电叶片产业发展对化工新材料提出更高要求[J]. 粘接, 2010, 31(8):18-20.

[13] 徐新峰, 徐宇. 风电叶片用材料国产化替代中复合材料性能检测之一:玻璃钢[C]. 全国风能应用技术年会暨青海省等高原地区风能开发利用论文集. 西宁:中国空气动力学学会风能空气动力学专业委员会、中国可再生能源学会风能专业委员会, 2010, 76-78.

[14] Leon, Mishnaevsky, Jr. Composite materials in wind energy technology[J/OL]. Basalt. Today, 2011-05-15. http://basalt.today/images/composite_materials_wind_energy.pdf. 13-15.

[15] Gurit. Comparative cost study of a 35m wind turbine blade using infusion and prepreg materials technology[EB/OL]. Gurit Composite Engineering, 2009-08-07. http://www.gurit.com/files/documents/6_Cost_Study_Infusion_vs_Prepreg.pdf.

收稿日期:2015-11-03

修稿日期:2015-12-28