

PBX 代用粉体超声加载成型的实验研究

刘春泽¹, 吕珂臻², 贺建华², 周红生¹

(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川绵阳, 621900)

摘要: 设计了 PBX 代用粉体超声成型装置。研究了超声波加载对含能有机复合粉末成型效果的作用, 对于直径为 200 mm、高为 60~65 mm 的压坯, 与相同条件下无超声压制相对比, 压坯密度提高了 1.79%; 声速测试表明, 压坯强度有一定增强; CT 成像表明压坯均匀性有一定提高; 压坯表面温度分布均匀, 未出现局部过热现象。研究表明超声波加载技术在较大尺寸含能材料成型过程中对提高成品品质具有促进作用。

关键词: 粉末成型; 压制系统; 超声粉体成型;

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-01-0047-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.01.009

Experimental study of ultrasonic vibration compacting technique for PBX substitute powder

LIU Chun-ze¹, LÜ Ke-zhen², HE Jian-hua², ZHOU Hong-sheng¹

(1. Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200032, China;

2. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, an ultrasonic vibration compacting system is designed in order to mold the PBX substitute materials. The investigation of the effect of ultrasonic vibration during the compressing procession is presented. The sizes of molded sample are 200mm diameter and 60-65mm height. The density of ultrasonic molded sample is increased about 1.79% compared that with normal loaded sample in the same condition. The longitudinal sound velocity of the ultrasonic molded sample is also increased and it shows that the strength of the ultrasonic molded sample is enhanced. Its CT images also show that its homogeneity is improved and there is no sign of hotspot on its surface. The results show the advantage of ultrasonic vibration compacting system in the fabrication of relatively large diameter and high quality energetic materials.

Key words: powder molding; compacting system; ultrasonic vibration

0 引言

塑料粘结炸药(Plastic bonded explosive, PBX)是一类由高能炸药晶体、粘结剂和降感剂等多种成分组成的混合物。由于其优异的爆轰性能和力学性能, PBX 已在军事及工业上获得了广泛的应用, 用于制造各种战斗部装药、火箭推进剂、爆炸成型、采矿、石油射孔弹等^[1]。在 PBX 炸药件的成型过程中, 压制成型是最常用的方法之一。由于 PBX 中存在多种材料, 且各种材料的含量、性能参数差异较大, 粘结剂含量较低, 无法完全包覆炸药晶粒以及填充晶粒间的孔隙。同时由于炸药粉末与压模之

间存在摩擦, 外压力沿压制方向被逐步损耗, 对于压坯的内部密度分布产生很大的影响, 导致炸药成型不均匀、密度不高等问题。尤其是对于大尺寸和特殊形状产品的制作, 其难度大大增加, 难以获得高品质的压坯成品, 限制了应用范围^[2-5]。

超声粉体成型技术是在粉末压制成型过程中, 通过引入超声振动作用, 使压坯在受外压力的同时发生高频振动, 促进粉末粒子的运动和重排。与传统压制技术相比, 超声粉体成型技术具有致密程度高、均匀性好的特点, 是一种新型的粉末成型方法。这一技术目前在国际上已获得一定应用, Tsujino.J 等^[6]将大功率超声波应用于铜粉压制试验, 结果表明在 200 MPa 压强下, 多向超声外场可以将铜粉压坯密度提高 20%, 且压坯密度分布更加均匀。Tsujino.J 等^[7]进一步在真空条件下, 在铜粉和压电陶瓷 PZT 粉末压制过程中施加超声外场, 使金属粉末和陶瓷粉末压坯的密度得到了有效提高, 密度分布更加均匀, 且压电陶瓷压坯的电学性能和机械特

收稿日期: 2014-10-14; 修回日期: 2015-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(11274342、11304353、11474042) 资助项目。

作者简介: 刘春泽(1982-), 男, 黑龙江明水人, 博士, 助理研究员, 研究方向为工业超声。

通讯作者: 周红生, E-mail: zhs999@126.com

性优于常规压制方法的制品。Shinichi Kikuchi 等^[8]通过有限元方法研究了超声振动在压制模具中的传递方式,优化设备尺寸,使超声振动能够更有效地传递至压坯。Oleg.Khasanov 等^[9-11]将 Ba-W-Ti-O 纳米粉末通过强超声加载压缩,结果显示提高了压坯的密度均匀性,且烧结后的陶瓷样品未发生变形和弯曲。Hyun Rok Cha 等^[12]研究了超声加载压制软磁材料,通过优化换能器配置和功率参数获得了低磁滞损失和涡流损失的软磁器件。Suk-Ryong Hahn^[14]等通过超声压制以溶胶凝胶法制备的超细 (Ba&Sr)TiO₃ 陶瓷粉末,与传统静压方法相比,超声压制可在提高密度的同时,增加尺寸低于 1 μm 的超细颗粒比例。

超声加载成型技术目前国内已进行了一定探索,中南大学李祺等^[13]以纯铁为对象,分析了常规压制与超声压制压坯密度随压制力的变化规律,表明超声压制可以有效提高粉末压坯密度与均匀性,降低压制力沿轴向的损失,可较大程度提高压坯的质量和力学性能。目前该技术多用于实验室的技术验证、粉末冶金、高性能新型陶瓷和磁性材料领域,PBX 属于多孔粘弹性材料,无烧结处理过程,压制后应力释放,易发生回弹,且应力不利于后续的机械加工。因此,控制应力分布,提高压坯均匀性,是 PBX 压制成型技术中亟待解决的问题。

本文设计了超声加载成型装置,以 PBX 代用材料为原料,通过超声加载压制实验,以期改变应力分布,提高成型品质。研究超声振动对粉末压制成型的作用,对压坯的密度、均匀性、温度分布进行了测试和分析。

1 装置设计及实验

图 1 为实验装置示意图,装置由模具、压力机、超声换能器、超声发生器构成。模具由上模、阴模、下模组成,模具设计内径为 200 mm。在模具外侧沿径向对称安装 4 只超声换能器,单只换能器工作连续功率为 600 W,总驱动功率为 2.4 kW,振动频率为 15 kHz,振幅约为 40 μm。压制材料选用 PBX 代用粉体,由中国工程物理研究院化工材料研究所提供,不添加其他有机润滑成分,设计压制压力为 150 t。

系统工作方式为:通过外压力机提供压力,先施加一定压力,使粉体预压紧,有利于超声传导至粉体内部,然后启动超声换能器,同时继续缓慢加压至设计压力,直到压制过程完成。环境温度为

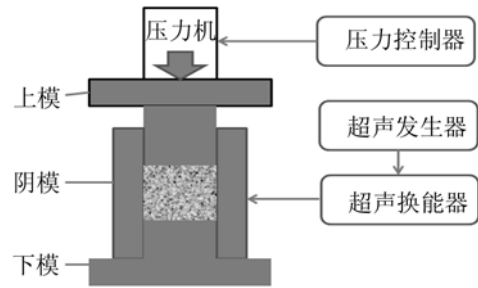


图 1 超声压制装置示意图

Fig.1 Scheme of ultrasonic compressing device

2~6 °C, 粉末质量选取 3 kg, 经过预热至 80 °C, 投入模具中, 保压和超声振动时间 1 h, 预计压坯高度为 60~65 mm。

2 结果与讨论

2.1 密度

PBX 代用材料经压制完成后,根据压坯的质量和体积计算密度。表 1 所示为压坯密度测量比较。经过超声加载压制的压坯,与相同其他条件下无超声压制的压坯相比,其平均密度增加 1.79%,说明超声作用可有效提高压坯的致密程度。超声对压坯的作用可体现在体积效应和表面效应两个方面,体积效应体现在沿材料施压方向施加超声振动可有效降低材料的屈服应力和流动应力。表面效应体现在加工工件与工具之间由于振动而产生的瞬间分离;摩擦矢量反向使得在振动周期的部分时间里摩擦力反而有利于变形加工。振动改善了加工过程中的润滑条件,降低压制力沿轴向的损失,可较大程度地提高压坯的质量和力学性能,尤其是在大尺寸及复杂结构的成品制造方面,更显示出明显的技术优势。此外,对于由多种成分组成的有机粉末材料,超声作用在降低颗粒损伤方面可能具有一定的意义。

表 1 压坯密度测试
Table 1 Density of compact

	样品 1	样品 2
压制条件	超声	无超声
直径/mm	200.00	200.00
高度/mm	63.12	64.24
质量/g	3042.2	3041.6
密度/(g·cm ⁻³)	1.534	1.507

2.2 均匀性

本实验采用 Philips Brillianc 64 排多层螺旋 CT 进行扫描重建,对压坯均匀性进行表征,分辨率为 0.67 mm。超声加载压制及无超声加载压制的压坯

CT 图像如图 2 所示，图中亮度较低的区域显示为高密度。从图 2 可见，两样品的密度分布基本相似，样品中心位置为密度最低区域，沿径向密度逐渐增加，经过超声加载压制的样品，其高密度分布区域较未经超声加载的样品有一定扩大，样品内部未出现裂隙，气泡等疵病。由于超声换能器沿径向分布，样品外缘超声振动较强，可促进粉末颗粒的重排，在一定程度上提高了样品密度的均匀性。样品内仍存在较大范围的低密度区，说明在中心位置处超声强度已较低，粒子运动程度较弱，重排作用不足。

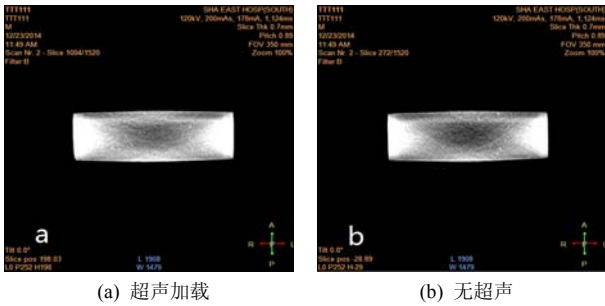


图 2 超声加载样品的 CT 图像
Fig.2 CT image of compact

2.3 声速测试

本实验采用超声声速测定以表征压坯的力学特性，测试位置为压坯的中心区域，使用 Olympus V301 超声波纵波探头，频率为 500 kHz，脉冲宽度为 5 个周期，发射与接收探头位于压坯上下平面相对位置，耦合剂为水。测试装置如图 3 所示。实测经过超声加载后的压坯，其声速为 1017 m/s，未经超声加载的压坯中声速为 962 m/s。测试发现接收端信号强度较低，仅能探测到纵波信号，接收到的横波信号信噪比很低，这是由于压坯内仍存在一定量孔隙，使超声振动迅速衰减所致，可通过在上下模加装换能器，加大外压力，使压坯密度进一步提高。

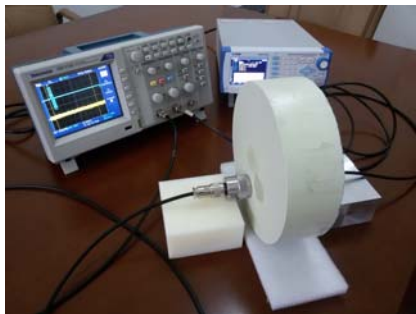


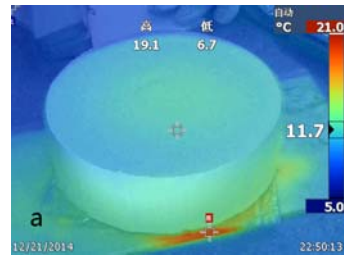
图 3 声速测试装置
Fig.3 Measurement of sound velocity

由以上测量表明，经过超声加载的压坯，其声速提高约 5%，说明经过超声加载后压坯强度得到增强，使粉末粒子之间更加紧密结合，力学性能得

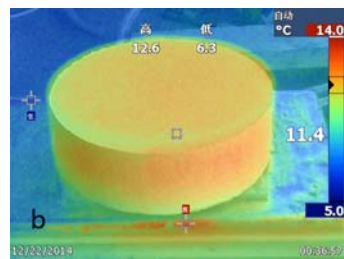
到改善，提高粉末成型性和压坯的可加工性，有利于后续处理及进一步机械加工。

2.4 温度场分布

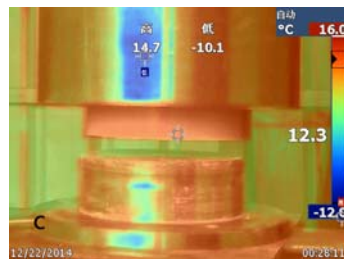
超声加载压制成型过程伴随有能量传递，超声波激发粉末粒子振动，可能会导致压坯温度上升。由于含能材料的特殊敏感性质，在粉末成型过程中，必须严格控制局部过热情况的出现。本实验采用 FLUKE Ti25 热像仪对压制后的压坯表面温度场分布进行表征。图 4(a)和 4(b)分别为无超声压制及超声加载压制的压坯成型后表面温度分布，两者表面温度均为 10~13 °C 之间，经过超声加载后温度未见明显上升，压坯上下表面中心处温度略高，边缘处偏低，但整个样品表面温度分布仍比较均匀，未出现明显的热点。而图中所示温度最高点为台面反射拍摄者的红外图像，并不是样品的温度值。



(a) 无超声



(b) 超声加载



(c) 退模过程

图 4 压坯温度场测试
Fig.4 Infrared image of compact

3 结论与展望

本文通过实验研究了超声压制成型技术在有机复合含能材料成型中的作用，与现有压制技术相

比, 超声粉末成型技术在压坯密度、均匀性方面有较大提高, 压坯温度分布均匀, 无明显热点, 安全性高, 适用于含能材料成型。本技术可推广用于粉末冶金, 塑料粉末成型, 高质量陶瓷材料制造等领域的大尺寸, 不规则, 复杂形状, 规模化制造, 具有很好的工程应用前景。

本文对超声加载粉末成型技术进行初步探索, 在超声与粉体材料作用机理、实验技术和评价等方面, 还有很多研究工作需要进一步完成。机理方面, 希望通过数值计算, 分析超声加载作用下, 压坯内部应力场和温度场分布, 分析有机粉体成型的细观力学特性, 研究加载条件对粉末成型过程和质量的规律。实验方面, 拟进一步提高压制压力和超声能量, 改进实验参数, 优化超声加载模式和相位控制策略, 实现压坯的高密度和高均匀性, 提高 PBX 压制过程的安全性和可靠性。

参 考 文 献

- [1] 吴凯, 刘玉存, 刘仕端. PBX 炸药概述及其发展与前景[J]. 山西化工, 2012, 32(2), 36-39.
WU Kai, LIU Yucun, LIU Huirui. Overview and trends of PBX explosives[J]. Shanxi Chemical Industry, 2012, 32(2), 36-39.
- [2] 王淑萍, 王晓峰, 金大勇. 压制密度及密度均匀性对装药撞击安全性的影响[J]. 含能材料, 2011, 16(6): 705-708.
WANG Shuping, WANG Xiaofeng, JIN Dayong. Influence of pressed explosive charges density and its distribution on impact safety[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 16(6), 705-708.
- [3] 兰琼, 韩超, 雍炼, 等. 低压热处理对 PBX 炸药件密度及内部质量的影响[J]. 含能材料, 2008, 16(2), 185-187.
LAN Qiong, HAN Chao, YONG Lian, et al. Effect of low-pressure heat treatment on charge density and inner quality of PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(2): 185-187.
- [4] 庞海燕, 李明, 温茂萍, 等. 温度对 PBX 炸药压制的作用[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(1): 21-23.
PANG Haiyan, LI Ming, WEN Maoping, et al. Effect of compaction temperature on pressing of PBX[J]. Ordnance Material Science And Engineering, 2011, 34(1): 21-23.
- [5] 刘佳辉, 刘世俊, 黄明, 等. 压制 PBX 中炸药晶体损伤的研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(3), 372-378.
LIU Jiahui, LIU Shijun, HUANG Ming, et al. Progress on crystal damage in pressed polymer bonded explosives[J]. Chinese Journal Of Energetic Materials, 2013, 21(3), 372-378.
- [6] Jiromaru Tsujino, Kanagawa Univ. Yokohama, UeoKa T, et al. Plunging of metal pins using a 20 kHz ultrasonic vibration system[C]// IEEE, Ultrasonics Symposium, 2008, 916-919.
- [7] Jiromaru Tsujino, Noboru Shimada, Yasunori Saotome, et al. Compacting of various metal, alloy and ceramic powder using 20 kHz ultrasonic vibration compacting equipment with upper and lower vibration punches[C]// IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2009, 1985-1988.
- [8] Shinichi Kikuchi, Daisuke Koyama, Kentaro Nakamura, A design of ultrasonic compaction tools for metal powder magnetic core of motors[C]// IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2008, 2142-2145.
- [9] Oleg. Khasanov, The control of shape and compaction characteristic of dry Ba-W-Ti-O nanopowders by the powerful ultrasonic action[C]// IEEE, The 1st International Forum on Strategic Technology, 2006, 178-181.
- [10] Khasanov O L, Lee J S, Pokholkov Yu P. The use of the ultrasonic compaction method for the PZT piezoelectric ceramics fabrication[C]// IEEE, The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, 1999, 2: 557-560.
- [11] Khasanov O L, Lee J S, Pokholkov Yu P. Influence of applied oscillation made at nanopowder ultrasonic compaction on Y-TZP nanoceramics properties[C]// IEEE, The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, 1999, 2: 561-564.
- [12] Hyun Rok Cha, Seung Kyu Jeon, Kyung Su Kim, et al. A factors affecting compressibility of ultrasonic compacting for high efficiency electrical motor core fabricated soft magnetic composite[C]// IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009, 1-4.
- [13] 李祺, 易幼平, 刘咏. 超声振动对纯铁粉压坯密度的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(1), 55-59.
LI Qi, YI Youping, LIU Yong. Effect of ultrasonic vibration on densification of iron powder compact[J]. materials science and engineering of powder metallurgy, 2011, 16(1), 55-59.
- [14] Hahn Suk-Ryong, Khasanov O L, Pokholkov Yu P. Dry ultrasonic compaction of (Ba,Sr)TiO₃ nanopowder for ceramics production[C]// IEEE, The 4th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, 2000, 3: 263-267.