

文章编号:1006-9941(2021)06-0521-09

# 基于超声辅助等静压成型含能材料致密度的提升

王蔚<sup>1</sup>,肖俊<sup>2</sup>,冉振<sup>1</sup>,郑小涛<sup>1</sup>,傅波<sup>1</sup>

(1. 四川大学机械工程学院, 四川 成都 610065; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为了进一步提高含能材料等静压成型的致密度,提出了一种超声辅助的等静压成型方法,设计了试验样机。利用COMSOL对单个超声振子和整个超声辅助成型系统激发的声场进行了分析,研究了包套厚度、10 MPa预压力和超声电源电压幅值对声场分布的影响。仿真结果表明了超声辅助等静压成型的可行性。在有/无施加超声、有/无10 MPa预压力的条件下进行了高聚物粘结炸药代用材料的成型实验,利用计算机断层扫描和扫描电镜分别对实验样件进行了测试分析,结果表明:施加了超声和10 MPa预压力的材料内部的均匀性和致密度优于未加超声、未加预压力和仅施加超声的材料,并且其内部晶粒更细、分布更均匀。

**关键词:** 等静压成型;超声辅助;声场仿真;致密度

**中图分类号:** TJ55; O426

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2021023

## 1 引言

等静压成型技术是目前制备含能器件、高性能陶瓷等粉体材料的理想成型方法,该方法是将装有粉体材料的模套放入加载缸中,在一定温度和压力下通过液体介质挤压模套中的粉体材料来实现成型。等静压技术按照成型温度分为冷、温、热三类<sup>[1-4]</sup>。含能材料成型后的致密度均匀性对产品性能有着重要的影响,如何提高含能材料成型密度和均匀性,是等静压成型技术领域一个十分重要的研究课题。

目前,已有研究表明经传统的等静压成型技术处理后的粉体材料,其性能有明显改善。根据工程实际应用发现,在压力充分利用的条件下,等静压成型方法所制成压坯的密度相对常规模压方法一般高出10%~15%<sup>[5]</sup>,如在35~55℃范围内加工JOB-9003炸药,采用等静压成型工艺的炸药其力学性能比模压成型明显偏高<sup>[6]</sup>,有实验利用X射线微层析成像技术研究了经

温等静压成型的三氨基三硝基苯TATB试件,其典型形态呈多边形,压实颗粒间有高密度薄层、颗粒接触数最大可达12<sup>[7]</sup>。如经热等静压技术处理后的316 L不锈钢,其孔隙率降低且弹性性能提高到与锻压316 L钢相等的水平<sup>[8]</sup>;经热等静压技术进行致密化处理后的Ti2AlNb合金粉末,其致密化过程和力学性能(尤其是高温断裂寿命)受到影响<sup>[9]</sup>;经热等静压技术处理后的DD3合金,其疏松和缩孔等铸造缺陷有效减少或消除<sup>[10]</sup>;经热等静压处理后的第二代单晶高温合金DD6,其显微疏松显著减少,且低周疲劳性能提高<sup>[11]</sup>。等静压技术在金属、无机非金属的成型及后处理等领域具有较为成熟的应用<sup>[12]</sup>。

等静压成型技术在含能材料成型方面有着天然的优势,然而该技术对于一些结构复杂、致密度要求高的零部件其成型质量仍然不能满足要求。梁华琼等<sup>[13]</sup>在高聚物黏结粉末橡胶等静压净成型实验研究中发现,工艺条件对橡胶等静压成型件性能的影响非常明显,成型件的整体密度会随成型压力的增加而增加。刘春泽等<sup>[14]</sup>在超声粉末成型离散元模拟研究中发现超声可以显著降低所需外界压力,降低摩擦损耗;促进颗粒运动重排,提高密度均匀性。研究证明:在材料的压制过程中,在模具外周施加单向或多向的复杂超声外场,使得模具内的压坯受到单向或多向的高频振动,从而改善压坯质量<sup>[15-19]</sup>。目前超声辅助压制成型技术的研究主要集中在模压成型,

收稿日期:2021-01-22;修回日期:2021-03-22

网络出版日期:2021-03-30

基金项目:四川省科技计划资助项目(2020YFG0117)

作者简介:王蔚(1997-),女,硕士研究生,主要从事机械制造方向的研究。e-mail:1002543788@qq.com

通信联系人:傅波(1969-),男,教授,主要从事超声振动、机械制造方向的研究。e-mail:bofu@scu.edu.cn

引用本文:王蔚,肖俊,冉振,等.基于超声辅助等静压成型含能材料致密度的提升[J].含能材料,2021,29(6):521-529.

WANG Wei, XIAO Jun, RAN Zhen, et al. Improving Compactness of Energetic Materials by Ultrasonic-assisted Isostatic Pressing[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(6):521-529.

而在等静压成型技术中的应用研究甚少涉及。

本研究以提高含能材料等静压成型构件均匀性和致密度为目标,提出一种超声辅助等静压成型的技术思路,设计出一种超声辅助等静压成型的装置,结合声场仿真软件 COMSOL 和具体实验来研究超声对含能材料成型致密度的影响。

## 2 超声辅助等静压成型的工作原理

超声辅助等静压成型的工作原理如图 1 所示,在工作腔内液体介质中沿圆周方向布置四个刀片型超声振动子,激发弯曲超声振动场,超声波在液体中传播,激发模套壁高频蠕动,以提高模套内含能材料的流动性,从而在等静压常规工作压力下,甚至更低压力下,进一步提升含能材料的成型密度和均匀性。

研究所使用的超声振动子结构如图 2a 所示,设计频率为 20 kHz,采用夹心式压电超声换能器结构,包

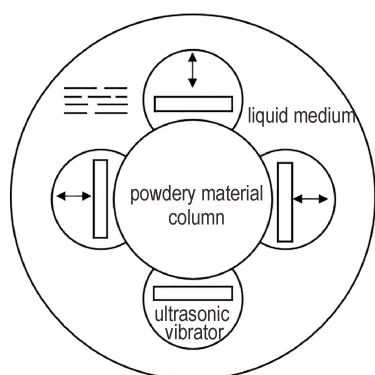
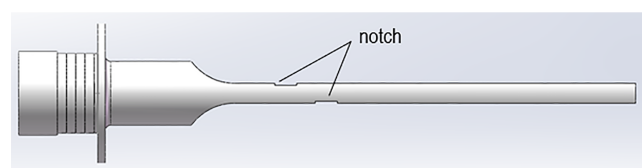
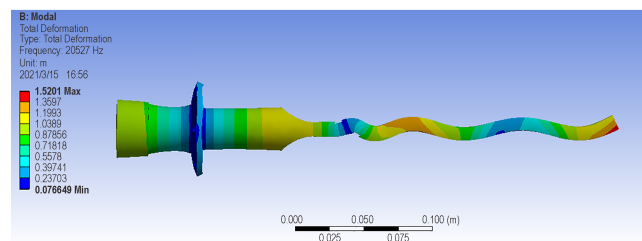


图 1 超声辅助等静压成型工作原理

Fig.1 Working principle of ultrasonic assisted isostatic pressing



a. ultrasonic vibrator structure



b. optimized mode shape cloud diagram

图 2 超声振动子结构及优化振型云图

Fig.2 Structure and optimized mode shape of the ultrasonic vibrator

括后端块、压电片和前端块三部分。前端块变幅部分设计成刀片状,通过开槽将换能器的纵向振动转换为刀片部分的弯曲振动,扩大了声场范围,尽可能地使超声场覆盖整个柱状工件。超声振子的结构尺寸采用传输矩阵法确定,并利用 ANSYS 进行振型优化,图 2b 为优化后的超声振子振型云图。ANSYS 优化后的超声振子谐振频率为 20.5 kHz,在超声电源的工作频率范围内,变幅杆振型也符合设计要求。

## 3 超声辅助等静压成型的声场分析

为了进一步明确超声辅助等静压成型的工作机理,对超声振动系统的声场进行仿真研究,分析单个和多个超声振子激励、环境压力、包套厚度和功率输出幅值等多组工艺参数下的声场分布情况,对每一组工艺参数下的声场分布情况进行评价,从理论上验证超声辅助等静压成型提升含能材料致密度的可行性。

评价声场强度的指标主要有两个:声场平均强度和声场均匀系数<sup>[20-22]</sup>,这两个指标的表达式分别如式(1)、式(2)所示。

$$P_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i| \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

$$P_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|p_i| - P_{ave}}{P_{ave}} \right)^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中, $P_{ave}$ 为声场强度均值,Pa; $P_i$ 为在声场区域内取的有限个点的声场强度值,Pa; $P_s$ 为声场均匀度系数,其本质就是求关于声场均值的相对标准差,该标准差值越小,则偏离平均强度更近,则说明均匀性更好,标准差越大,偏离平均强度值越远,均匀性也就相对较差。

### 3.1 单个超声振动子的声场分析

将等静压实验装置的容腔简化等效为一个圆柱体,阻抗界面设定在圆柱体表面,容腔内盛装液体介质,将液体介质与振子进行建模,将整体模型分为 PZT、Water、Solid 三部分域,指定三个域的材料,Water 域的温度设定为 353.15 K。利用 COMSOL 仿真计算得到的超声振子谐振频率为 19.4 kHz,这与 ANSYS 分析得出的结果存在误差,究其原因,一是不同的仿真软件的计算差异,二是在 COMSOL 仿真计算超声振子谐振频率的过程中,考虑了液体介质的负载效应。这个误差不影响后续的声场分析,因为 19.4 kHz 处在超声电源工作频率范围内,超声振子可以在谐振频率 19.4 kHz 处被激发,相应的振型也满足要求。设压电振子输入

电压为 220 V,工作频率为 19.4 kHz,利用 COMSOL 仿真计算得出的声场分布情况如图 3 所示。

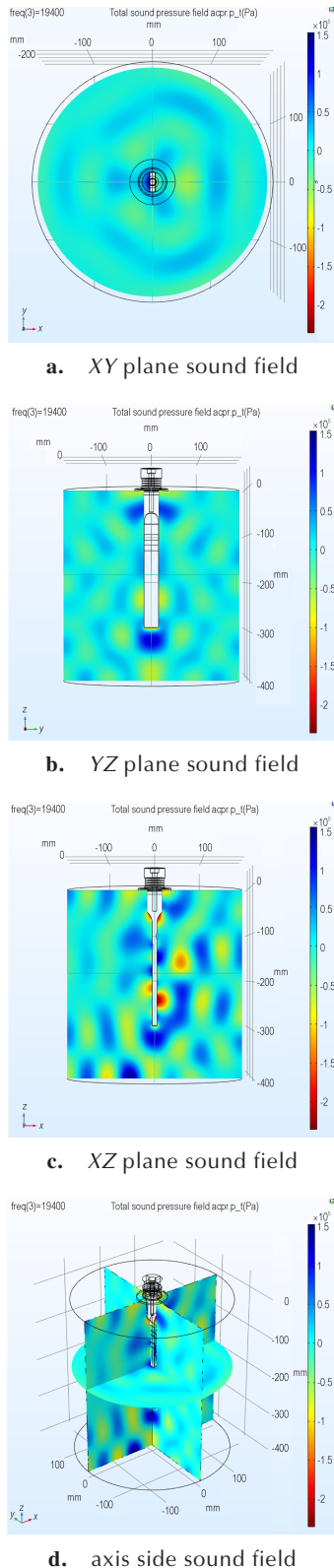


图 3 单个超声振动子声场切片图  
Fig.3 Sound field slice diagram of a single ultrasonic vibrator

由图 3 可知,在 XY 平面内的某一切片声场分布图上基本呈现中心对称状态,但由于超声振子变幅杆上槽口并不对称,所以呈现的并不是完全的中心对称状态(图 3a)。在 YZ 平面内,因为槽口方向垂直于 YZ 平面,所以对该平面的对称分布并没有显著影响,呈现轴对称状态(图 3b)。在 XZ 平面内,可以明显地发现声场分布云图既不呈现中心对称,也不呈现轴对称的状态(图 3c),而且声压极值集中在槽口附近,这是因为槽口让纵向振动转变为弯曲振动。

### 3.2 多振子超声振动系统的声场分析

进一步分析四个超声振子作用下,等静压加载腔内的声场分布。将天然橡胶包套与 Brick Powder 的域设定在压力声学中进行分析,以观察天然橡胶包套与 Brick Powder 的内部声场分布情况。在 Water 域四周及内部设定相应阻抗,终端电压初始值为 220 V,工作频率为 19.4 kHz,COMSOL 仿真计算结果如图 4 所示。

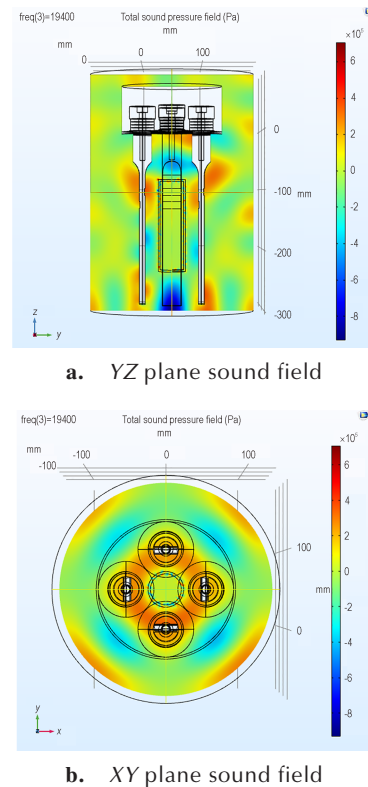


图 4 四个超声振子声场分布云图  
Fig.4 Sound field distribution diagram of the ultrasonic vibration system with four vibrators

由于四个超声振子在圆周方向上均布分列(图 4b),故声场分布上都呈轴对称状态(图 4a),且在超声振动子变幅杆的凹槽处都产生声场突变。XY 平

面内的声场分布则是一个呈现中心对称的情况,且在四个超声振动子的内侧形成了一个环形(图4b中间红色区域)较强的声场区域。在声场分布云图中,由橡胶包裹的粉体材料所形成的区域与周围声场分布对比明显,包套四周产生了强度较高的交变场,其声场分布如图5所示。

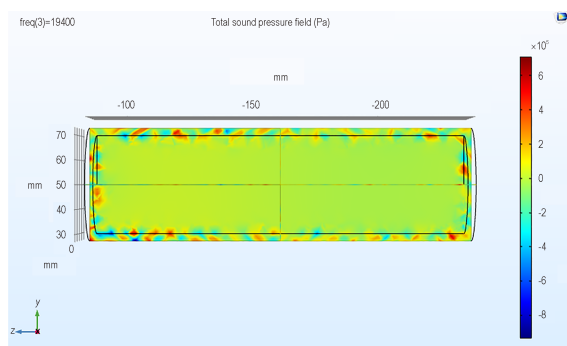


图5 包套与被加载对象的声场分布云图

Fig.5 Sound field distribution diagram of the cover and the loaded object

对比图3的单个超声振动子与图4的四个超声振动子的声场分布云图可以发现:在同样的超声频率激励条件下,四振动子超声振动系统的坐标显示值是单个超声振动子的4倍,其数值与振动子数目吻合,说明多振动子声场的产生是单个超声振动子声场的线性叠加。根据前述的

表1 单个与四个超声振动子系统声场强度评价

Table 1 Sound intensity evaluation of single and four ultrasonic vibrator systems

system	field	average sound intensity / Pa	maximum sound intensity / Pa	minimum sound intensity / Pa	uniformity coefficient
single vibrator	water	$1.7 \times 10^4$	$2.5 \times 10^5$	0.1	0.9548
	water	$1.0 \times 10^5$	$1.2 \times 10^6$	89.9	0.8677
four vibrators	brick	$4.9 \times 10^4$	$1.2 \times 10^6$	160.5	1.4506
	cover surface	$1.2 \times 10^5$	$1.3 \times 10^6$	1233.3	0.8734

超声强度评价指标,对单个超声振动子与四振动子超声振动系统的超声强度指标进行比较,在Water域、Brick域以及包套表面域内取数据样本点求解相应数值,结果如表1所示。

根据表1可知,在同样的Water域内,四个超声振动子的声场强度均值为 $1.0 \times 10^5$  Pa,均匀性系数达到0.8677,这两个超声强度指标均优于单个超声振动子。在四个超声振动子的声场范围内,在Water域和Brick域的最大声场强度为 $1.2 \times 10^6$  Pa,都比较接近包套表面的最大声场强度 $1.3 \times 10^6$  Pa;其中均匀性系数最好的是Water域,其次是非常接近Water域的包套表面,仅相差0.0057,均匀性最差的是Brick域。

### 3.3 10 MPa预压力对声场分布的影响

保持前述四个超声振动子声场分析条件不变,包套厚度设为3 mm,给Water域施加10 MPa的预压力,经COMSOL仿真分析,可以得到施加10 MPa预压力后的声场分布情况如图6所示,包膜内部的声场分布如图7所示。

比较图4和图6可以看出,有10 MPa预压力的情况下,声场分布的趋势也有所改变,声场强度的数量级也随之改变。如没有压力加载下的超声振动系统其材料柱部分为蓝色(图4a),四个超声振动子的内侧以及缸壁四周出现红色区域(图4b),声场分布不均。经过

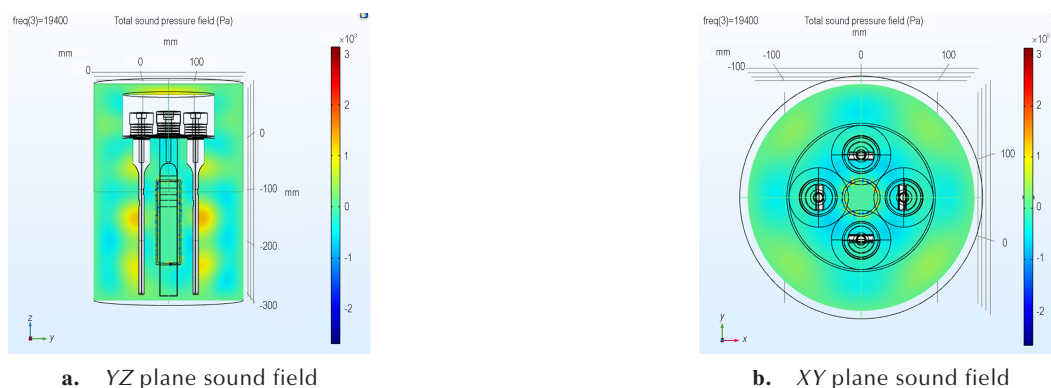


图6 10 MPa下的四振动子超声振动系统声场分布云图

Fig.6 Sound field distribution diagram of the ultrasonic vibration system with four vibrators under 10 MPa

10 MPa 压力加载后,材料柱蓝色部分(图 6a)和振子内侧、缸壁四周红色区域(图 6b)消失,声场分布更加均匀,包套四周仍然保持强度较高的正负压交替场(图 7),激发包套壁高频蠕动,提高了内部含能材料的流动性。表 2 为给 Water 域施加 10 MPa 预压力后的声场强度数值。

根据表 2 和表 1 可知,给 Water 域施加 10 MPa 的预压力后,超声振动系统的整体声场平均强度、最大声场强度以及最小声场强度都有了极大的提高。如超声预压加载下的超声振动系统,其声场强度均值为  $2.32 \times 10^7$  Pa,均匀性系数为 0.8318,这两个超声强度指标均优于仅超声加载下的超声振动系统。整体均匀性系数与表 1 中一致,无论是在超声加载还是超声预压加载条件下,Water 域中的均匀性表现较好,Brick

域均匀性较差。可见在有 10 MPa 预压力作用下,声场强度更强,整体性能更优于没有 10 MPa 预压力作用下的声场效果。

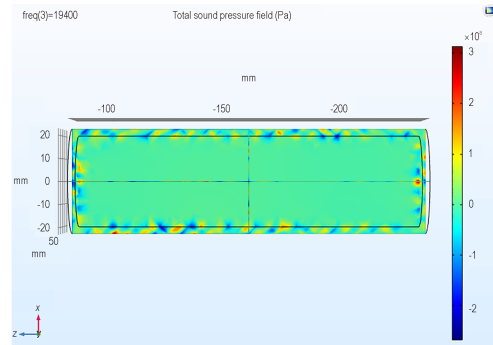


图 7 10 MPa 下的包套与被加载对象声场分布云图  
Fig.7 Sound field distribution diagram of the cover and the loaded object under 10 MPa

表 2 四振子超声振动系统在 10 MPa 预压力作用下的声场强度评价

Table 2 Evaluation of the sound field intensity of the ultrasonic vibration system with four vibrators under 10 MPa

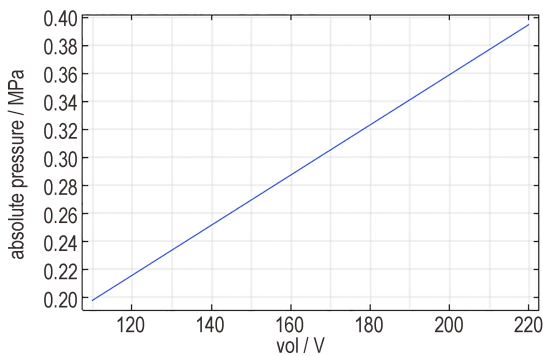
system	field	average sound intensity / Pa	maximum sound intensity / Pa	minimum sound intensity / Pa	uniformity coefficient
four vibrators 10 MPa	water	$2.32 \times 10^7$	$3.53 \times 10^8$	53.08	0.8318
	brick	$1.64 \times 10^7$	$3.60 \times 10^8$	1.17	1.6468
	cover surface	$4.26 \times 10^7$	$3.83 \times 10^8$	216.74	0.8768

### 3.4 电压幅值对声场强度的影响

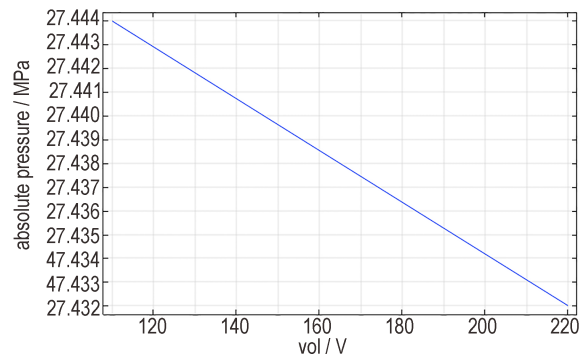
为了探究超声功率对声场的影响,改变压电超声振子的输入电压幅值,以 19.4 kHz 下的声场均值强度为参考量,在有无 10 MPa 预压力条件下得到的声场强度均值与电压幅值的关系如图 8 所示。

对比图 8a 与图 8b,发现两者分布规律不一样,在 10 MPa 预压力的情况下(图 8b),声场均值随着电压的升高而降低,但降低的幅值并不是很大,整体的声场均值都在 27 MPa 左右;在没有 10 MPa 的

预压力下(图 8a),总体的声场均值范围在 0.2 ~ 0.4 MPa 之间,其声场均值随着电压的升高而升高,且相对影响较大。因为超声振子所产生的声强相对于 Water 域预压力很小,所以施加 10 MPa 预压力时,改变换能器两端电压幅值对整体的声场均值影响不明显,在没有施加 10 MPa 预压力时,电压幅值会对声场均值产生较大影响。所以在超声加载时,在该特定环境下,驱动超声振子只需要达到指定功率即可。



a. change of the average sound intensity without 10 MPa



b. change of the average sound intensity with 10 MPa

图 8 声场域内声场均值随着电压幅值的变化曲线图

Fig.8 Curve of the average sound intensity with the voltage amplitude

### 3.5 包套厚度对声场分布的影响

本研究的含能材料包套厚度有 3 mm 和 5 mm 两种规格,前述仿真分析中包套厚度为 3 mm。在保持前述仿真前置条件不变的情况下,将包套厚度改为 5 mm,分析相应的声场分布情况,图 9 为采用 5 mm 包套的四振子超声振动系统在 10 MPa 预压加载下的 COMSOL 仿真计算结果。

表 3 为两种包套厚度下声场强度结果,由表 3 可以看出,采用薄型包套,不仅在声场平均强度、声场最大值、声场最小值方面都优于厚型包套,而且在声场强度分布均匀性更好。

表 3 10 MPa 预压力下的声场强度评价

Table 3 Evaluation on the sound field intensity under 10 MPa

cover thickness / mm	field	average sound intensity / Pa	maximum sound intensity / Pa	minimum sound intensity / Pa	uniformity coefficient
3	Water	$1.33 \times 10^8$	$2.68 \times 10^9$	41.91	1.0148
	Brick	$2.40 \times 10^8$	$3.69 \times 10^9$	133.22	1.2568
	Cover surface	$3.94 \times 10^8$	$3.55 \times 10^9$	1355.60	0.8333
5	Water	$4.18 \times 10^7$	$4.60 \times 10^8$	200.28	0.9505
	Brick	$2.54 \times 10^7$	$5.67 \times 10^8$	21.04	1.6248
	Cover surface	$5.48 \times 10^7$	$8.69 \times 10^8$	666.08	1.0140

## 4 PBX 代用材料的成型实验研究

前述仿真结果表明,在含能材料等静压成型的过程引入超声波,可以激发包套壁的高频蠕动,提高了包套内含能材料的流动性,为等静压成型致密度的提升提供了可能。为了进一步验证超声辅助等静压成型提升含能材料致密度的可行性,检验超声加载效果及验证工艺参数,根据前述的仿真分析结果,试制了一小型超声辅助等静压加载试验缸,如图 10 所示。将六个高聚物粘结炸药(Polymer bonded explosive, PBX)代用材料柱,每两个为一组,按表 4 参数在该加载缸中进行超声加载处理。超声加载处理完成后,再送入温等静压成型机中完成超高压成型。

实验对照组一共分为三组实验,在加载缸液体压力为大气压或 10 MPa 预压力与环境温度为 20 °C 的条件下,A 和 B 形成有无超声加载处理的加载效果对照组;B 和 C 形成在有无预压力处理的加载效果对照组;A 与 C 形成采用超声辅助等静压成型与没有采用该辅助成型技术下的加载对照组。超声加载处理的过程如下:利用手动增压泵将加载试验缸增压至 10 MPa,保压 10 min 后,开启超声电源,对 PBX 代用

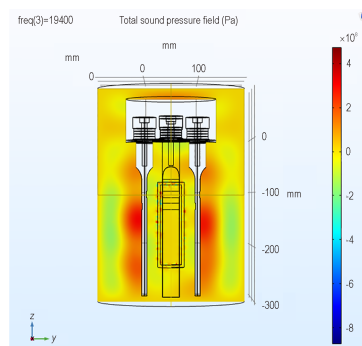


图 9 包套为 5 mm 的 YZ 平面声场分布云图

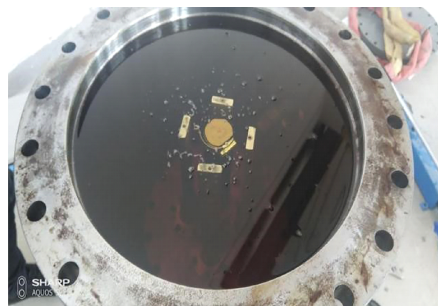
Fig. 9 Sound field distribution diagram in YZ plane with a 5 mm cover

Hydraulic oil Isostatic cylinder Ultrasonic power pack



manual booster pump

a. experiment platform



b. hydraulic cylinder

图 10 实验平台搭建以及加载实验

Fig. 10 Experimental platform construction and loading experiment

表4 不同加载条件下的PBX代用材料的成型实验

Table 4 Forming experiment of PBX substitute materials under different loading conditions

No.	ultrasound	cover thickness /mm	environmental pressure/MPa	sound power percentage/%	ambient temperature /°C
A	×	3	0.1	50	20
B	√	3	0.1	50	20
C	√	3	10	50	20

材料柱进行超声加载 3 min, 关闭超声电源 1 min(重复该步骤 5 次), 最后关闭超声电源, 将超声加载后的 PBX 代用材料柱取出, 送至温等静压成型机进行超高压成型。

4.1 成型样件 CT 扫描结果分析

对加工完成的 A、B、C 三组 PBX 代用材料成型样件进行 CT 扫描, 主要条件为管电压 65 kV, 管电流 10 mA, 检测时间 90 s, 射线源距样品 1.5 m, 得到扫描图如图 11 所示。

在扫描图 11 中, 每一个 PBX 代用材料柱上都有数量不等的高亮光斑(图中已用红色圆圈指出), 产生高亮光斑的原因是材料内部存在一些杂质, 密度均比原材料高, 所吸收的 X 光线比材料柱高。分析每一组的亮度, 发现 A 组(图 11a)第一个与 B 组(图 11b)第二个整体亮度相对较低, 亮度最高的是 C 组(图 11c)的两个材料柱, 从 CT 扫描效果而言, 密度排列顺序是 C>A>B。对比图 11a 和图 11c 可以看出, 超声结合 10MPa 预压处理的材料柱致密度高于无超声预压处理的材料柱致密度; 此外, 从图 11b 看出, 仅加载超声而没有同时加载预压力处理的 B 组材料柱的亮度较低, 致密度提高不明显, 其原因可能是超声促进材料的流动性消除了原有的孔隙, 但同时引起了材料柱其它部位产生了新的孔隙。

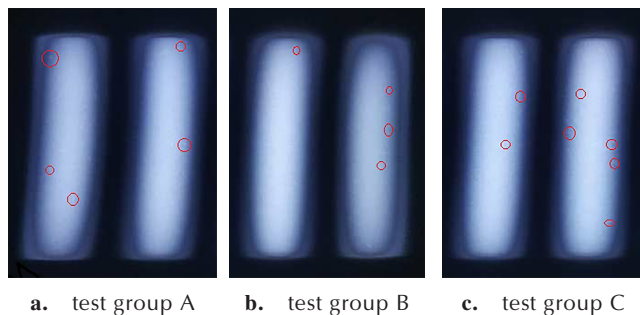


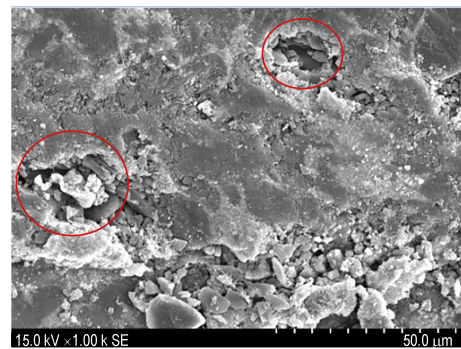
图 11 成型样件的 CT 扫描图

Fig.11 CT scan of the pressed samples

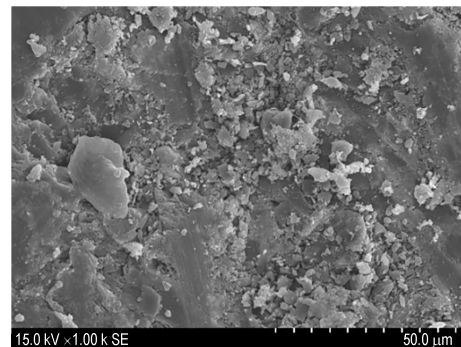
4.2 成型样件 SEM 扫描结果分析

为进一步分析 PBX 代用材料成型样件的致密性, 在 A、B、C 每一组中任取一个材料柱, 分别在其底端截下 5 mm 厚的试样, 使用扫描电镜(SEM)分析其断面上颗粒分布的均匀性, 如图 12 所示。

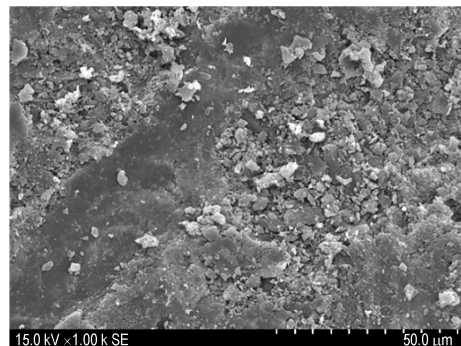
从三组样件的 SEM 图可以看出, 未施加超声和 10 MPa 预压力的 A 材料柱有比较明显的孔洞存在, 右上角和左下角有较大的晶粒凹坑(图 12a); 仅施加超声的 B 材料柱断面四周较为平整, 但可见大块的晶粒(图 12b); 施加了超声和 10 MPa 预压力的 C 材料柱整个断面平整, 没有明显的孔洞, 晶粒形状也比较规整(图 12c)。



a. under 0.1 MPa without ultrasound



b. under ultrasound and 0.1 MPa



c. under ultrasound and 10 MPa

图 12 三组材料柱在不同加载条件下 SEM 分析结果

Fig.12 SEM analysis results of three groups of material columns under different loading conditions

## 5 结论

(1) COMSOL 声场仿真分析表明,在等静压加载缸液体介质中,围绕被加工的粉体材料柱四周布置超声振子引入超声波,会激励包套产生高频的微蠕动,促进包套内材料的流动性,消除粉体材料柱内部原有的孔隙,提高含能材料成型的致密度;在超声频率为 19.4 kHz 及 10 MPa 压力加载下,厚度为 3 mm 的包套表面声场均匀性系数可提高至 0.83。

(2) 实验结果表明,如果仅对材料柱加载超声,而不同时加载预压力,有可能材料柱原有的孔隙被消除的同时,会在材料柱其它部分引起新的孔隙。

(3) 实验结果表明,在对材料柱加载超声时,同时也对其加载预压力,可以抵消因超声加载引起的新的孔隙,提高粉状材料成型的致密度。超声预压组 C 的致密度好于 B 和 A,说明在有预压的情况下,原有的孔隙被消除的同时,尽管产生了新的坍塌,但是预压能够及时地通过预压力将材料进一步压紧,对材料孔隙进行了补填,减少甚至避免新缺陷的形成。

(4) 实验结果表明,超声辅助具有提升含能材料等静压成型致密度的能力,超声辅助等静压成型技术是一种潜在的可提升现有等静压产品成型质量的技术,值得进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] 朱志斌,田雪冬.等静压技术的应用与发展[J].现代技术陶瓷,2010,31(1):17-24.  
ZHU Zhi-bin, TIAN Xue-dong. Development of isostatic pressing technology [J]. *Modern Technical Ceramics*, 2010, 31(1): 17-24.
- [2] 邢文涛.热等静压机均匀快冷系统设计和仿真分析[D].成都:电子科技大学,2017.  
XING Wen-tao. Design and simulation analysis of uniform fast cooling system of hot isostatic press[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [3] 詹志洪.热等静压技术和设备的应用与发展[J].中国钨业,2005,20(1):44-47.  
ZHAN Zhi-hong. Application and development of hot isostatic pressing technology and equipment[J]. *China Tungsten Industry*, 2005, 20(1): 44-47.
- [4] 刘慧渊,何如松,周武平,等.热等静压技术的发展与应用[J].新材料产业,2010(11):12-17.  
LIU Hui-yuan, HE Ru-song, ZHOU Wu-ping, et al. Development and application of hot isostatic pressing technology [J]. *New Materials Industry*, 2010(11): 12-17.
- [5] 杨勋烈.粉末冶金新技术,热等静压[M].北京:冶金工业出版社,1983.  
YANG Xun-lie. New technology of powder metallurgy, hot isostatic pressing [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1983.
- [6] 温茂萍,庞海燕,敬仕明,等.等静压与模压 JOB-9003 炸药力学性能比较研究[J].含能材料,2004,12(6):338-341+4.  
WEN Mao-ping, PANG Hai-yan, JING Shi-ming, et al. Comparative study on mechanical properties of isostatic and molded JOB-9003 explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(6): 338-341+4.
- [7] 张伟斌,田勇,雍炼,等.TATB 造型颗粒温等静压成型 X 射线微层析成像[J].含能材料,2018,26(9):779-785.  
ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, YONG Lian, et al. X-ray micro-tomography of TATB shaped particles by warm isostatic pressing [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(9): 779-785.
- [8] Lavery N P, Cherry J, Mehmood S, et al. Effects of hot isostatic pressing on the elastic modulus and tensile properties of 316L parts made by powder bed laser fusion[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 693: 186-213.
- [9] Wu J, Guo R, Xu L, et al. Effect of hot isostatic pressing loading route on microstructure and mechanical properties of powder metallurgy Ti2AlNb alloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33(2): 172-178.
- [10] 郭会明,赵云松,郑帅,等.热等静压对第二代单晶高温合金 DD6 显微组织和力学性能的影响[J].材料工程,2016,44(10):60-67.  
GUO Hui-ming, ZHAO Yun-song, ZHENG Shuai, et al. The effect of hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of the second generation single crystal superalloy DD6[J]. *Materials Engineering*, 2016, 44(10): 60-67.
- [11] 韩梅,骆宇时.热等静压对 DD3 单晶高温合金组织与性能的影响[J].材料工程,2008(8):40-43.  
HAN Mei, LUO Yu-shi. The effect of hot isostatic pressing on the microstructure and properties of DD3 single crystal superalloy[J]. *Materials Engineering*, 2008(8): 40-43.
- [12] 姜卓钰,张朋,包建文,等.等静压技术在材料加工领域的应用现状[J].宇航材料工艺,2017,47(1):13-19.  
JIANG Zhuo-yu, ZHANG Peng, BAO Jian-wen, et al. Application status of isostatic pressing technology in the field of material processing [J]. *Aerospace Material Technology*, 2017, 47(1): 13-19.
- [13] 梁华琼,韩超,雍炼,等.高聚物黏结粉末橡胶等静压净成型技术[J].含能材料,2011,19(3):325-329.  
LIANG Hua-qiong, HAN Chao, YONG Lian, et al. Isostatic pressing technology of polymer bonded powder rubber [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(3): 325-329.
- [14] 刘春泽,高琦,许小芳,等.基于 Hertz-Mindlin 模型的超声粉末成型离散元模拟研究[J].声学技术,2017,36(6):38-40.  
LIU Chun-ze, GAO Qi, XU Xiao-fang, et al. Discrete element simulation of ultrasonic powder molding based on the Hertz-Mindlin model [J]. *Technical Acoustic*, 2017, 36(6): 38-40.
- [15] Tsujino J, Yajbuzaki M, Ueoka T. Studies on ultrasonic vibration press of powder by longitudinal vibration punches and various vibration mode dies [C]// IEEE on Ultrasonics Symposium, 1984, 497-500.
- [16] Tsujino J, Ueoka L, Suzuki H. Ultrasonic vibration press of metal and ceramics powder using complex vibration and vacuum condition [J]. *IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*,



- 1991, 2:973-978.
- [17] Tsujino J, Saotome Y, Shimada N, et al. CoMPacting of various metal, alloy and ceramic powder using 20kHz ultrasonic vibration coMPacting equipments with upper and lower vibration punches [C]// IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2009: 1985-1988.
- [18] Kikuchi S, Koyama D, Nakamura K. A design of ultrasonic coMPaction tools for metal powder magnetic core of motors [C]// Kendall R. Waters, IEEE IUS Processings, Beijing, China, IUS2008:2142-2145.
- [19] 周红生, 吕珂臻, 贺建华, 等. 超声压制粉体成形技术研究进展 [J]. 声学技术, 2015, 34(1): 35-42.
- ZHOU Hong-sheng, LU Ke-zhen, HE Jian-hua, et al. Research progress of ultrasonic compaction powder forming technology [J]. *Acoustic Technology*, 2015, 34(1): 35-42.
- [20] Doctor S R. Austenitic steel piping testing exercises in PISC [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1995, 157: 231-234.
- [21] Visser W. POD/POS curves for non-destructive examination [R]. Health and Safety Executive, 2000.
- [22] Carvalho A A. Reliability of the manual and automatic ultrasonic technique in the detection of the pipe weld defects [J]. *Insight NDT*, 2006, 48(11): 1-6.

## Improving Compactness of Energetic Materials by Ultrasonic-assisted Isostatic Pressing

WANG Wei<sup>1</sup>, XIAO Jun<sup>2</sup>, RAN Zhen<sup>1</sup>, Zheng Xiao-tao<sup>1</sup>, FU Bo<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** In order to further improve the compactness of energetic powder materials, an ultrasonic-assisted isostatic pressing method is proposed, and an experimental prototype is designed and produced. The simulation software COMSOL is used to analyze the sound field of a single ultrasonic vibrator and the whole isostatic ultrasonic assisted molding system, and the influence of the cover thickness, 10 MPa pre-pressure and ultrasonic power voltage amplitude on the sound field distribution is studied. The simulation results show the rationality and feasibility of the ultrasonic-assisted isostatic pressing. The press molding experiments of polymer-bonded explosive (PBX) simulants are carried out whether to consider ultrasonic-assisted and 10 MPa pre-pressure conditions. The computed tomography (CT) and scanning electron microscope (SEM) are used to test and analyze the samples. The results show that the internal uniformity and compactness of the materials with ultrasonic-assisted and 10 MPa pre-pressure are better than those materials without, and their internal grains are finer and the grain distribution is more uniform.

**Key words:** isostatic pressing; ultrasonic-assisted; acoustic field simulation; compactness

**CLC number:** TJ55; O426

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2021023

(责编: 姜梅)