

超声压制粉体成形技术研究进展

周红生¹, 吕珂臻², 贺建华², 杨红穗¹, 刘春泽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: 超声粉体压制技术适合众多种类的粉体材料以及较难加工的高分子材料等, 不但制得的压坯密度和均匀度能有效提高, 而且压制过程环保、安全。国内外开展了金属粉末、无机物中的陶瓷粉末、高分子材料中的塑料粉末, 以及高分子含能材料的复合粉末等的超声压制成形研究, 取得了许多成果, 大大促进了超声压制粉体成形技术在国民经济和国防建设中的广泛应用。该文介绍了超声压制粉体成形技术的研究进展。

关键词: 粉体成形; 超声压制; 压坯密度; 均匀性

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-01-0035-08

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.01.007

Review on ultrasonic compacting powder fabrication technology

ZHOU Hong-sheng¹, LÜ Ke-zhen², HE Jian-hua², YANG Hong-sui¹, LIU Chun-ze¹

(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: Ultrasonic compaction technology can be used for many kinds of powder materials and especially for some difficultly processed polymer powder. The compact powder materials by this way can improve density and uniformity, moreover the compacting process is safe and less pollution. A lot of work on ultrasonic compaction of metals, ceramics, plastics, polymer of energetic materials and so on has been made by the researchers at home and abroad, which greatly promote the wide use of compacting powder fabrication technology in national economy and defense.

Key words: powder fabrication; ultrasonic compaction; compact density; uniformity

0 引言

粉体压制成形是将预先充分混合的复合粉体置于钢制压模内, 通过模冲对粉体进行加压, 以获得具有一定形状、尺寸、密度和强度的压坯。粉体压制成形技术在材料制备和零件制造中具有诸多优点^[1-2]: 适用多种材料的制备, 如难熔金属及其化合物、假合金、多孔材料等; 能压制成需要很少或不需后续机械加工的压坯, 工艺流程减少, 产品成本降低; 可保证材料分配比的正确性和均匀性; 可生产出形状相同的产品, 降低了制造成本。所以, 粉体成形制品在汽车制造、信息产业、机械制造、石油化工、能源动力、国防装备、航空航天产业等高科技领域得到了广泛的应用, 成为国民经济和国防建设的重要组成部分^[3-11]。粉体成形技术也因此成为国家重点发展的新技术, 研制出高性能、高强

度的粉体成形制品成为各国研究人员的目标。

粉体成形制品的密度和均匀性至关重要, 提高成品的密度和均匀性不但能够提高其硬度、抗拉强度、疲劳强度等综合力学性能, 还可以提高材料本身的电导率、热导率、磁导率、热膨胀系数等物理性能。高密度的粉体冶金材料还可以使零件有较好的加工性能和较好的加工表面^[12-14]。因此, 围绕如何提高粉体成形制品的密度和均匀性, 国内国际的研究人员开展了大量的工作^[14-18], 推出了温压、爆炸压制、快速全向压制、高速压制、动力磁性压制等粉体压制成型技术, 这些技术尽管具有各自的优势, 但仍存在着或工艺复杂或价格偏高或成品质量不佳或污染环境等不足(见表 1), 亟需探索更高效优质环保的方法。

超声波加工技术^[19]最早始于 1927 年, 随后研究人员开展了超声波应用于材料加工的多项研究和探索。研究证明: 在粉体压制过程中施加一定的超声振动, 不但可以有效提高压坯的密度和硬度, 而且可降低粉体颗粒间以及粉体颗粒与模壁之间的摩擦, 提高粉体压坯的均匀性, 从而提高粉体成形制品的性能和强度^[20-24]。由此, 国内外研究人员

收稿日期: 2014-11-21; 修回日期: 2015-01-17

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

作者简介: 周红生(1973—), 男, 安徽东至人, 副研究员, 研究方向为超声应用。

通讯作者: 周红生, E-mail: zhs999@126.com

表 1 粉体制成成形技术的对比
Table 1 Powder compaction technology

压制技术	工艺原理	技术特点	不足
温压技术	加热经特殊润滑剂处理过的合金混合粉体到预设的温度(一般为 403~423K)后, 模压制生成生坯, 并在稳定温度下保持一定的时间, 再经预烧、烧结、整形等工艺。	只需一次压制、一次烧结就可, 成本较低; 压坯密度高、分布均匀; 可直接附加机加工; 压制压力和脱模力较低; 模具寿命高成本低。	加入润滑剂使烧结密度降低及制品的力学性能被削弱; 烧结过程中, 润滑剂会在制品内部残留, 从而阻碍烧结过程。
爆炸压制技术	将粉体材料置于一定结构的模具中施加爆炸压力, 爆炸物质的化学能在极短时间内转化为周围介质中的高压冲击波, 以脉冲波的形式作用在粉体上获得高密度坯体。	时间短, 作用力大; 不受零件形状和尺寸的限制; 高致密性, 且密度分布较均匀, 压坯强度较高; 快熔快冷性, 有利于保持非平衡态粉体的优异特性。	不够安全, 可控性差, 生产效率低。
快速全向压制技术	将装好的粉体与密封好的流体模预热到固结温度, 置于罐形模中, 通过一紧密配合的冲头承受单轴压头的力, 压头的力受到罐形模内表面的反作用, 从而使压力从各个方向作用于粉体进行压制。	压力高, 温度低; 固结速度快; 能精确控制制品尺寸; 制品力学性能至少与热等静压制品相同。	产量小, 成本高; 模具费用较高; 零件大小受压机大小控制。
高速压制技术	混合粉体通过送粉靴填充模腔, 在压制压力为 600~1000 MPa, 压制速度为 2~30 m/s 的条件下对粉体进行高能锤击, 然后将零件顶出并转入烧结工序。	压制速度较高, 能在极短时间内完成多次压制, 生产效率高, 成本低; 压坯密度高且均匀; 低径向弹性后效, 低脱模力。	适合大尺寸零件, 不适合较小尺寸的精细零件。
动力磁性压制技术	将粉体装入一个导电的容器(护套)内, 置于高场强的中心腔中。电容器放电在数微秒内对线圈通入高脉冲电流, 线圈腔中形成磁场, 护套内产生感应电流。感应电流与施加的磁场相互作用, 产生了由外向内压缩护套的磁力, 使粉体得到压制。	压制过程不足 1 ms, 时间短, 速度快; 适合所有粉体材料, 即使对于陶瓷粉体等难压制材料, 也可得到较高的生坯密度和力学性能; 压制力高, 维修与生产成本低; 利于环保。	技术仍停留于强调磁力压制作用, 未涉及磁场产生的感应电流对粉体的作用; 相关设备和理论不完善, 未在工业上有效推广和应用。
超声压制技术	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, 同时传递到粉体的超声能量可以促进粉体的运动重排, 利于粉体的压制成形。	压坯密度和均匀度有效提高; 适用粉体材料的种类多, 如金属粉体、合金粉体、陶瓷粉体、高分子粉体, 甚至压制难度较高的有机高分子含能材料的复合粉体等。 环保安全。	尚处在实验研究阶段, 相关设备、工艺和理论不完善, 需要进一步深入研究。

开展了一些针对不同材料的超声压制成形技术的研究工作。目前, 超声波压制成形技术研究对象以金属粉末为主, 高分子粉末和陶瓷粉末的超声压制成形技术的研究也取得了一定的进展。

1 金属粉末的超声压制技术

超声金属粉末压制技术是超声塑性加工技术的一个分支, 金属的超声塑性加工效应^[25]是 1955 年由奥地利科学家 Blaha 和 Langenecker 首先发现的, 因此也称为 Blaha 效应, 他们在进行棒锤拉伸实验时发现, 当对试件或工装模具施加超声波振动时, 材料的变形力明显下降。

超声振动在材料塑性变形中的作用机制主要

表现为体积效应和表面效应^[26,27]。“体积效应”是指超声振动外场引起材料内部微粒的振动, 使材料温度升高、活性增大, 出现与材料内部位错有关的热致软化, 从而降低材料本身的动态变形阻力; “表面效应”主要表现为超声振动对材料和工具(即材料塑性变形中的加工工具, 如挤压杆、挤压模具等)之间外摩擦的影响; 同时超声振动引起工具与工件瞬时分离, 局部热效应也有利于材料的塑性变形。在体积效应和表面效应的共同影响下, 根据李祺等^[24]对纯铁粉 700 MPa 压力下, 常规压制与超声压制的动态压制曲线结果表明(见图 1), 超声压制的上模冲的位移量明显增加, 即超声压制下粉体压坯密度高于常规压制的压坯密度, 且超声振动可提高粉体压坯的密度均匀性。

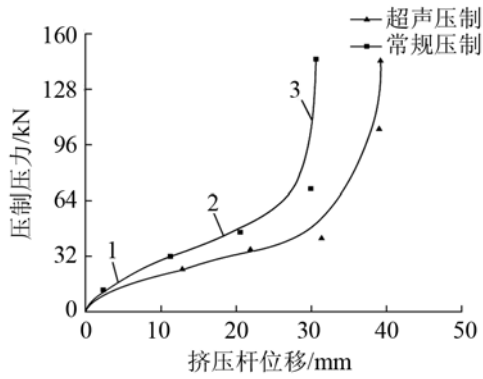


图 1 700 MPa 常规压制与超声压制的动态压制曲线^[24]
Fig.1 Dynamic pressing curves of ultrasonic compaction and conventional compaction under the pressure of 700 MPa^[24]

对于金属粉末，国外在超声压制成形技术的研究开展较早。1984 年，日本学者 Tsujino. J^[20]等将大功率超声外场应用于铜粉压制试验，压制坯料高径比<1。其超声的施加方式为：在上、下模冲施加频率为 20 kHz 的持续超声振动，阴模分别施加纵向(沿压制方向)、轴向(垂直于压制方向)和多向(与压制方向呈一定角度)的超声振动，如图 2 所示。实验结果表明，在 200 MPa 的压力下，多向超声外场可以将铜粉压坯密度提高 20%，且坯密度分布更加均匀。1991 年，Tsujino J 等^[21]在真空条件下，在铜粉(压坯高径比<0.5)压制过程中施加多向复杂大功率超声外场。实验结果表明，在超声振动作用下，金属粉体压坯的密度得到了有效提高，密度分布更均匀。2008 年，Tsujino 等^[22]再次应用多向复杂超声压制装置对铜粉和铁粉分别进行了成品直径为 15 mm 和 5 mm 的压制实验，无超声和有超声的压制成品外观对比见图 3，由图 3 明显可见，有超声加载的压坯表面更平整和光滑。2008 年，为提高超声马达磁芯的质量，KIKUCI 等^[23]设计了金属粉体磁芯的多向超声振动压制设备(见图 4)，并通过有限元仿真的方法研究了超声振动在压制模具中的传递方式，优化了超声压制设备的尺寸，使超声振动能够更有效地传递至粉体压坯，随后又在 300 MPa 条件下进行了粉体 SMC500(粒子大小 120 μm)和 SMC550(粒子大小 150 μm)的压制实验，压制时间 8 s。绘制的密度和超声振幅的实验数据表明(见图 5、6)，超声振动的振幅越大，粉体压坯的密度就越大。2009 年，Hyun Rok Cha 等^[28]进一步对使用 SMC 粉体进行超声压制高效磁芯马达的相关工艺参数进行了仿真分析和优化，得到压制密度为 7.4 g/cm³的参数设置为 830 MPa，12 个以上的振子，振子的输入功率为 6000 W。2011 年，H. R. Cha 对使用超声压制技术进行碳化钨纳米粉末压制的压坯密度和硬度进行了研究^[29]，实验结果表明，与常

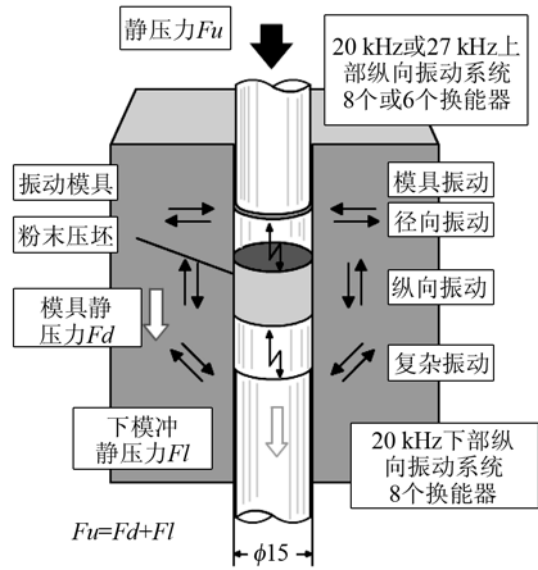


图 2 多向复杂超声振动外场原理示意图
(A) 径向振动; (B) 纵向振动; (C) 多向振动
Fig.2 Configuration of vibrations of the upper and lower longitudinal punches vibrating in in-phase and anti-phase vibration modes and the compacting dies which vibrate in radial (A), longitudinal (B) and complex (C) vibration modes



图 3 使用铜粉材料分别进行超声压制与常规压制的 5mm 直径样品
Fig.3 5mm-diameter compacts of copper powder using ultrasonic & conventional compactions

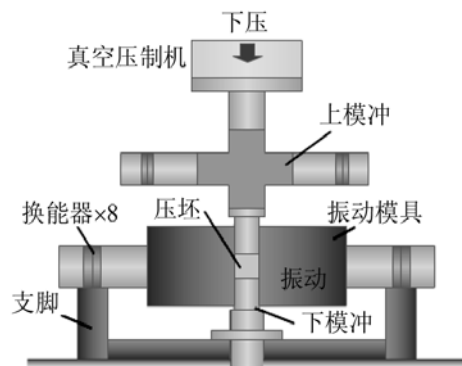


图 4 压制系统
(1) 装配在压制模具外周的 28kHz 振子产生径向振动
(2) 装配在上下模冲的 20kHz 产生纵向振动
Fig.4 Compacting system
(1) radial vibrations of compaction die at 28kHz
(2) longitudinal vibrations of upper and lower punches at 20kHz

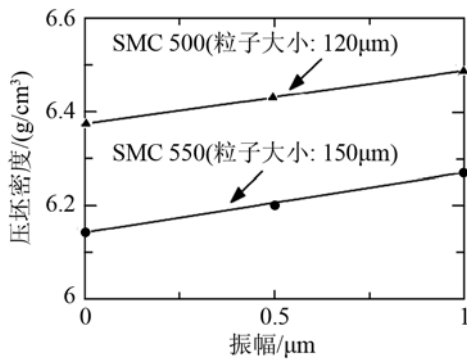


图 5 压坯密度与压制模具的振幅
Fig.5 Density vs. the vibration amplitude of compaction die

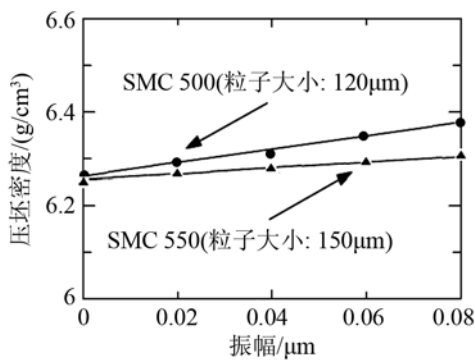


图 6 压坯密度与冲头的振幅
Fig.6 Density vs. the vibration amplitude compaction punch

规压制对比, 压制过程中, 对模具外周沿径向均匀施加频率 20 kHz 纵向半波振幅的 6 kW 功率超声, 压坯的密度最高可提高 1.0~ 0.18 g/cm³, 硬度可提高 20%; 超声压制压坯密度的提高在较低压制压力下更明显, 200 MPa 压制压力下压坯密度增加约 15%, 而 250 MPa 压力下压坯密度增加则只有 2%~3%。2014 年, Y. Daud 等^[30]设计了仅在下模冲施加 20 kHz 纵向振动超声的粉体简易型超声压制装置, 进行了不锈钢粉体的超声压制实验, 通过对模冲压压力位移数据的分析研究, 得出结论认为: 超声压制可以明显地以较低压制压力使得模冲位移提高 140%~170%, 从而说明超声压制方法对粉体压制是行之有效的。

国内, 李祺等^[24]在 2010 年前后开展了粉末材料的超声压制装置和技术的研究; 研制出超声粉末压制试验装置(见图 7); 根据超声粉末塑性成形机理和超声减摩效应, 利用有限元仿真了超声粉末的压制成型过程; 以还原纯铁粉为原料, 开展了超声粉末压制实验, 和常规压制的压坯密度进行了对比分析。研究结论认为: (1) 压制压力在 300~500 MPa 时, 超声压制和常规压制的压坯密度均随压力增加而上升, 变化趋势相同, 但在 500~700 MPa 压制压力时, 常规压制的压坯密度基本不再随压力增加而

上升(见图 8); (2) 与常规压制相比, 在压制压力 300~500 MPa 下, 超声压制的压坯密度高 0.1 g/cm³, 在 500~700 MPa 的压制压力下, 超声压制的压坯密度增幅达 0.3 g/cm³(见图 8); (3) 700 MPa 压制压力下, 超声压制压坯的最大密度差为 0.6 g/cm³, 常规压制压坯的最大密度差为 0.76 g/cm³, 超声振动压制的孔隙率降低了 4.3%(见图 9、10);

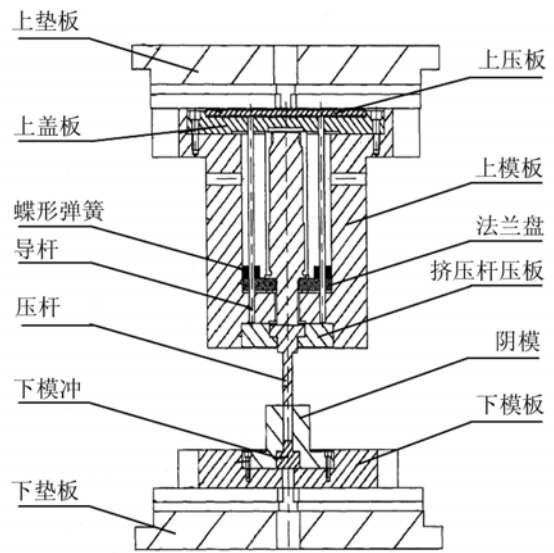


图 7 实验装置装配图
Fig.7 Assembly of ultrasonic compaction equipment

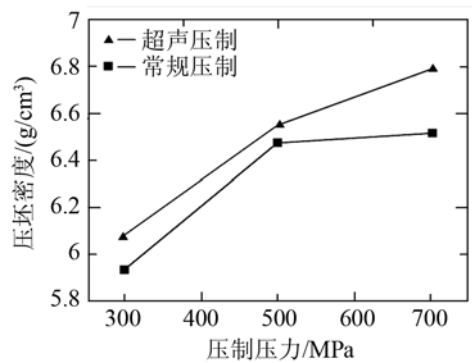


图 8 纯铁粉压坯密度与压制压力之间的关系
Fig.8 Relationships between green density and pressure

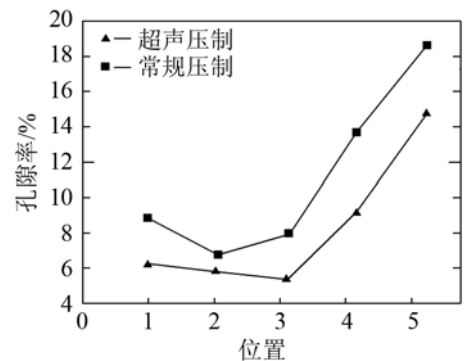


图 9 在 700 MPa 压力下铁粉压坯沿压制方向的孔隙率变化曲线
Fig.9 Changes of porosity along pressing direction of iron powder compact under the pressure of 700MPa

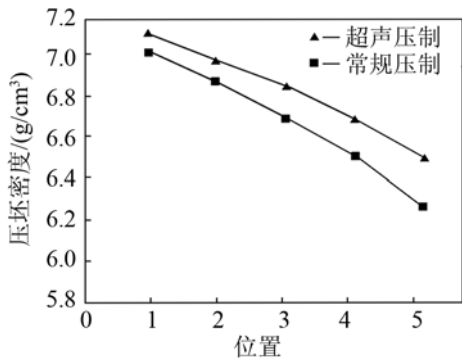


图 10 在 700 MPa 压力下铁粉压坯沿压制方向的密度变化
Fig.10 Changes of density along pressing direction of iron powder compact under the pressure of 700MPa

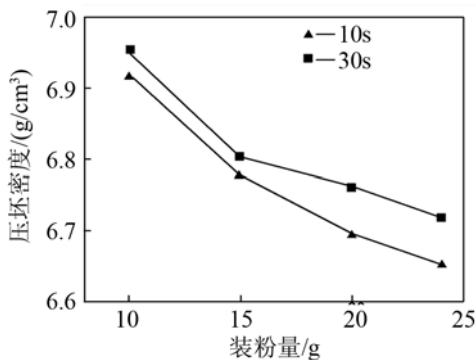


图 11 不同压制时间下超声振动压坯密度与装粉量之间的关系
Fig.11 Relationships between iron powder mass and density of compact experienced the pressure of 700MPa and different pressing times

(4) 随着超声振动作用时间增加，压坯密度增加；增加装粉量，即与模壁接触面积增加，有利于提高超声振动压制密度(见图 11)。

2 陶瓷粉体的超声压制成型

现代陶瓷制品的成形属粉体或颗粒状材料成形，其成形过程与粉体制成的过程相同。因此，陶瓷粉体的压制成型一般采用金属粉体相同的技术。超声应用于陶瓷的压制成形，最早是在 1991 年，日本学者 Tsujino. J 等^[21]在真空条件下采用多向复杂大功率超声外场进行了压电陶瓷 PZT 粉体的压制实验，实验用材料为 PZT 陶瓷粉体 2~8 g，成形制品的高度-直径比为 0.12~0.49(该装置也用于铜粉的压制实验)。结果表明，在超声振动作用下，陶瓷粉体压坯的密度得到了有效提高，密度分布更均匀，且压电陶瓷压坯的电学性能和机械特性比常规的压制方法更好。2008 年，Tsujino 等^[22]再次应用多向复杂超声压制装置对混合有少量树脂粘结剂的二氧化锆粉体(陶瓷粉体)分别进行了成品直径为 15 mm 和 5 mm 的压制实验，结果有超声加载的压

坯表面更平整和光滑。

1997 年起，俄罗斯学者 Khasanov 等^[31,32]以静压 740 MPa 和超声电功率 1.5 kW，使用超细纳米陶瓷粉体进行了 PZT 压电陶瓷的超声压制成型实验，压制出直径 10.1 mm、厚 2.5 mm 的试样，通过与无超声方法压制出的试样密度和陶瓷粒子大小等进行对比分析，表明超声压制方法可以得到密度更高、粒子更小因而结构更均匀的压电陶瓷。此后，他们对不同压力和超声功率下^[33]，以模体轴向为基准，分别在横向与纵向施加超声压制出的压电陶瓷的密度、粒子、硬度、断裂刚度等进行了分析，认为与粉体模体轴向垂直的横向施加超声可以得到最优特性的压电陶瓷(密度达 5.78 g/cm³，粒度 300 nm)，如图 12 所示。图中(+)表示横向施加超声的压制；(-)表示纵向施加超声的压制。此后，又针对纳米陶瓷粉体干法压制压电陶瓷过程中，工艺参数如压力、超声功率等对压电陶瓷性能的影响进行了研究^[34]，对压力 99.2 MPa 下不同功率的陶瓷密度(见图 13)分析后认为，烧结后致密度较高的工艺参数为压力 P=99.2 MPa，超声功率 W=1 kW。

目前，在国内关于陶瓷粉体的超声压制技术的

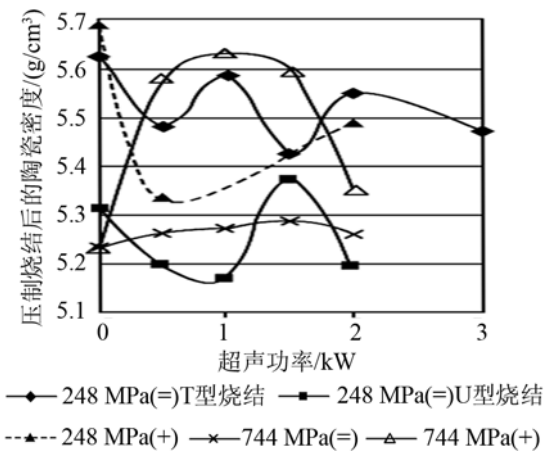


图 12 压制烧结得到的陶瓷密度
Fig.12 The sintered ceramics density

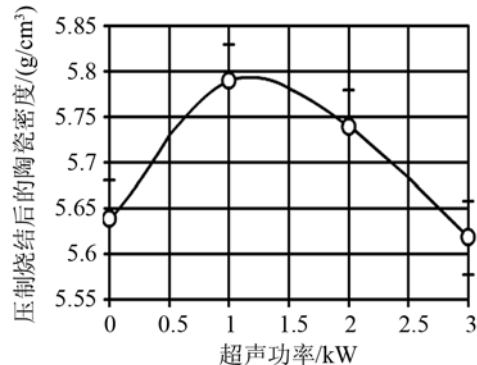


图 13 压力 99.2 MPa 下陶瓷密度与超声功率的关系
Fig.13 Density of thick BST ceramics depending on W(P=99.2 MPa)

研究还几乎没有报道。

3 高分子粉体的超声压制成形

当前，高分子材料特别是塑料的使用范围正日益扩展，被广泛用于制造火箭、导弹、超音速飞机、原子能设备、大规模集成电路以及军事装备等所需要的各种零部件，在许多领域开始逐步取代钢铁等传统材料，对于高分子塑料成形制品的技术研究在不断深入和拓展。

同传统的熔体模塑成型方法相比，塑料粉体的固相压制成形有许多优点：成型是在室温下进行的，比传统的熔体加工技术节省能源，且不会像注塑成型那样对制品的厚度有限制；能较为容易地加工一些难加工的塑料，例如某些在温度高至其热分解温度时仍然是固态的塑料，某些在模塑温度下粘度太高的塑料，以及目前使用较多的质优价廉的高填充量塑料。由此，压制成形技术在高分子塑料零部件制造中的应用日益增多。然而，在实际的压制成形中也发现，对某些塑料粉体而言，即使采用高压(200~500 MPa)冷压缩成型方法也很难加工，但是，采用超声波则可以在低压力下(3.5 MPa)把这些塑料粉体加工成产品^[35]。

国外对塑料粉体的超声成形研究始于1974年，H. V. Fairbanks^[36]首先进行了热固性和热塑性粉体成形过程中仅施加 20 kHz 超声和一定压力而不额外加热的试验，表明塑料粉体的超声压制成形是可行的。

1981年，Paul 利用超声波焊接装备(900 W、20 kHz)模塑了聚丙烯粉体，并且优化了模塑件的强度^[37]。结果表明：影响模塑件强度的参数主要是超声波的作用时间以及随后的保压时间；塑料粉体的粒径越小，模型件的拉伸强度越高；压力对强度无显著影响。最佳条件下得到的试件，其拉伸强度是 20 MPa，约为注塑件拉伸强度的 80%。

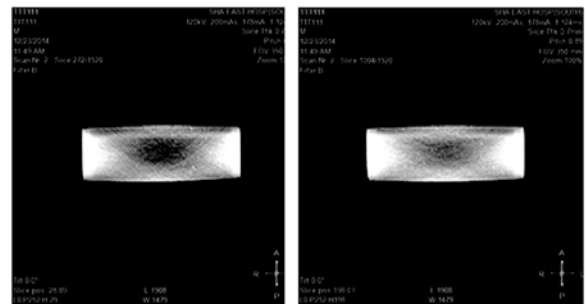
超声波塑料粉体压制成形不仅适合于那些热敏性的材料，而且也适合于高分子量的聚合物，如超高分子量聚乙烯粉体。1990，Benatar 等人^[38]研究了高密度聚乙烯和超高分子量聚乙烯的超声波粉体压制成形，用普通超声波塑料焊接机完成了这些粉体的压制成形。结果表明：超声波压制技术具有许多优点(如无需外部加热、成型周期短、易于加工其它方法难于成形的增强塑料等)。日本学者前田禎三^[39]及松冈信一^[40]也进行了类似的研究。

有机含能材料一般具有较高的能量密度、机械强度，压制成形技术中的安全性以及压制成品的最

终性能参数是研究关注的主要方向^[41,42]。中国科学院声学研究所东海研究站开展了超声波加载对含能有机复合粉体成形效果的作用研究，以高聚物黏结炸药(PBX)代用粉体为原料，进行了超声压制和常规压制的对比实验。在相同压力、环境条件下，与常规压制取得的压坯相比，超声压制的压坯密度可提高 1.79%左右，弹性模量提高 10%左右(见表 2)；利用 CT 成像技术对压坯进行扫描(见图 14)，显示均匀性也有一定程度的提高；利用声速法对压坯进行测试(见图 15)，超声压坯的超声纵波声速为 1017 m/s，而常规压制压坯的纵波声速是 962 m/s，这表明压坯强度明显提高，利用 FLUKE Ti25 热像仪对压制刚完成的压坯进行测量，其表面温度分布均匀，未出现局部过热现象。实验结果表明，超声波加载成型技术对提高含能材料的密度，降低内应力，提高成品品质具有显著的促进作用，此外，对于含能材料而言，压制过程中无局部过热现象，可以保证压制过程的安全性。

表 2 PBX 炸药代用粉体压坯的密度
Table 2 Density of PBX substitute powder

压制条件	尺寸/mm	质量/g	密度/(g/cm ³)
超声压制	Φ200*63.12	3042.2	1.534
常规压制	Φ200*64.24	3041.6	1.507



(a) 常规压制压坯 (b) 超声压制压坯

图 14 PBX 炸药仿体压坯的 CT 扫描成像
Fig.14 Compact CT image of PBX substitute materials

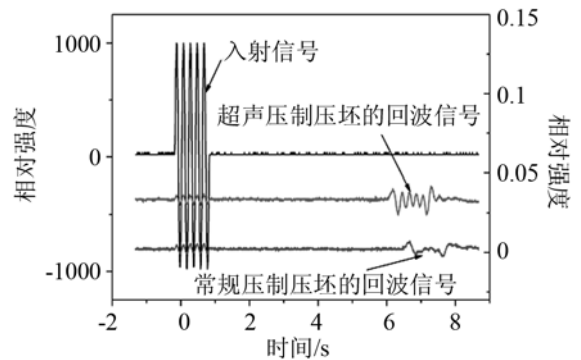


图 15 声速法测试 PBX 炸药仿体的强度

Fig.15 Compact strength of PBX substitute materials by measuring ultrasonic velocity

4 结语

综合粉体材料压制成形的超声加载技术研究,可以看出,超声压制成形技术与当前常用的技术相比,具有明显的优点:压坯密度和均匀性有效提高;适用于多种粉体材料,如金属粉末、陶瓷粉末、高分子粉末等;对于高能量密度的有机含能材料而言,压制成形过程中不出现局部过热现象,具有较高的安全性;超声压制技术可以与其他技术如温压、高速压制等相结合,以降低预先施加的压力,可以降低生产成本等。然而,目前国内外的的工作仍以实验为主,缺乏对成形过程中的细观力学特性、超声加载对成形过程和内部质量影响机制等的理论研究、工艺技术仍停留在实验室研究阶段,装置还不完备,要得到广泛工业化应用,还有很多工作要做。

参 考 文 献

- [1] 黄伯云, 易健宏. 现代粉体冶金材料和技术发展现状(一)[J]. 上海金属, 2007, **29**(3): 1-5.
HUANG Boyun, YI Jianhong. Current development of modern powder metallurgy materials and technologies(1)[J]. Shanghai Metals, 2007, **29**(3): 1-5.
- [2] 黄伯云, 易健宏. 现代粉体冶金材料和技术发展现状(二)[J]. 上海金属, 2007, **29**(4): 1-5.
HUANG Boyun, YI Jianhong. Current development of modern powder metallurgy materials and technologies(2)[J]. Shanghai Metals, 2007, **29**(4): 1-5.
- [3] Skoglund P. Material for Warm compacted heavy truck transmission part[J]. Metal Powder Report, 2001, **56**(6): 38.
- [4] 刘咏. 我国粉体冶金产业及技术发展的几点思考[J]. 稀有金属快报, 2004, **122**(1): 31-35.
LIU Yong. Some considerations on national powder metallurgy industry and technology[J]. Advanced Materials Industry, 2004, **122**(1): 31-35.
- [5] 欧阳鸿武, 刘咏, 贺跃辉, 等. 粉体冶金 TiAl 合金排气门的研制[J]. 中国有色金属学报, 2002, **12**(2): 334-337.
OUYANG Hongwu, LIU Yong, HE Yuehui, et al. Research on TiAl-based alloy valves of powder metallurgy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, **12**(2): 334-337.
- [6] 何平, 王志法, 姜国圣. 钨铜合金的致密化技术[J]. 矿冶工程, 2007, **27**(5): 81-83.
HE Ping, WANG Zhifa, JIANG Guosheng. Densification technology of W/15Cu alloy[J]. Mining and metallurgical engineering, 2007, **27**(5): 81-83.
- [7] Akhlaghi F, Zare-Bidabd A. Influence of graphite content on the dry sliding and oil impregnated sliding wear behavior of Al 2024-graphite composites produced by in situ powder metallurgy method[J]. Wear, 2009, **266**(1): 37-45.
- [8] 景青波, 景振禹, 石健. 粉体药型罩金属粒度级配及热处理对聚能射流性能的影响[J]. 火炸药学报, 2008, **31**(1): 42-44.
JING Qingbo, JING Zhenyu, SHI Jian. The influence of metal articles arrangement of powder shaped charge liner and its thermal treatment on performance of Jet[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, **31**(1): 42-44.
- [9] Hausner H H. Powder metallurgy in nuclear reactor construction[J]. Journal of Nuclear Materials, 1962, **5**(1): 161-163.
- [10] Naslain R. Design, Preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview[J]. Composites Science and Technology, 2004, **64**(2): 155-170.
- [11] 于澎, 熊翔, 刘根山, 等. 炭/炭复合材料航空刹车副的湿态摩擦性能[J]. 中国有色金属学报, 2006, **16**(5): 841-847.
YU Peng, XIONG Xiang, LIU Genshan, et al. Tribological properties of carbon/carbon composites under wet condition[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, **16**(5): 841-847.
- [12] 周洪强, 陈志强. 粉体冶金温压成形技术的研究现状[J]. 钛工业进展, 2007, **24**(5): 5-8.
ZHOU Hongqiang, CHEN Zhiqiang. The actuality of warm compaction technology of powder metallurgy parts[J]. Titanium Industry Progress, 2007, **24**(5): 5-8.
- [13] 邹志强, 黄伯云, 杨兵. 粉体冶金在国民经济和国防建设中的作用 II[J]. 粉体冶金材料科学与工程, 1997, **2**(3): 184-187.
ZOU Zhiqiang, HUANG Boyun, YANG Bin. The role of P/M in national economy and defence[J]. P/M MS & E. 1997, **2**(3): 184-187.
- [14] 李元元, 肖志瑜, 陈维平, 等. 粉体冶金高致密化成形技术的新进展[J]. 粉体冶金材料科学与工程, 2005, **10**(1): 1-9.
LI Yuanyuan, XIAO Zhiyu, CHEN Weiping, et al. Progress in high density powder metallurgy forming technology[J]. Materials science and engineering of powder metallurgy, 2005, **10**(1): 1-9.
- [15] 迟悦, 果世驹, 孟飞, 等. 粉体冶金高速压制成形技术[J]. 粉体冶金工业, 2005, **15**(6): 41-45.
CHI Yue, GUO Shiju, MENG Fei, et al. High velocity compaction in powder metallurgy[J]. Powder metallurgy industry, 2005, **15**(6): 41-45.
- [16] 王建忠, 汤慧萍, 曲选辉, 等. 高密度粉体冶金零件制备技术现状[J]. 粉末冶金工业, 2014, **24**(3): 56-60.
WANG Jianzhong, TANG Huiping, QU Xuanhui, et al. Status for preparing high density PM parts[J]. Powder metallurgy industry, 2014, **24**(3): 56-60.
- [17] 曹顺华, 林信平, 李炯义, 等. 铁基粉体温模压制技术的研究[J]. 粉体冶金材料科学与工程, 2006, **11**(4): 201-205.
CAO Shunhua, LIN Xiping, LI Jiongyi, et al. Compaction technology of iron based powder mixtures with heating die[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2006, **11**(4): 201-205.
- [18] 黄培云. 粉体冶金原理[M]. 第2版. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 218.
HUANG Peiyun. Theory of powder metallurgy[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997: 218.
- [19] Thoe T B, Aspinwall D K, Wise M L H. Review on ultrasonic machining[J]. International Journal of Mechanical Tools Manufacture, 1988, **38**(4): 239-255.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Kikuchi S, Koyama D, Nakamura K. A design of ultrasonic com-

- paction tools for metal powder magnetic core of motors[C]// Kendall R. Waters, IEEE IUS Processings, Beijing, China, IUS2008: 2142-2145.
- [24] 李祺. 粉体材料超声压制成形新工艺装置研制与试验研究[D]. 武汉: 硕士学位论文, 中南大学. 2010.
- LI Qi. Research on new powder forming equipment and experiment using ultrasonic compaction[D]. Wuhan: Master Degree Diploma, Central South University. 2010.
- [25] 张士宏. 金属材料的超声塑性加工[J]. 金属成形工艺. 1993, 12(3): 102-106, 146.
- ZHANG Shihong. The ultrasonic metal plastic working[J]. Metal forming technology[J]. 1993, 12(3): 102-106, 146.
- [26] Blaha F, Langenecker B. Elongation of zinc mono-crystals under ultrasonic action[J]. Die Naturwissenschaften (The Science of Nature), 1955, 42(20): 556.
- [27] Daud Lucas M, HUANG Zhihung. Modeling the effects of superimposed ultrasonic vibration on tension and compression tests of aluminum[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186(1/3): 179-190.
- [28] Hyun Rok Cha, Seoung Kyu Jeon, Kyung Su Kim and Kentaro Nakamura. A factors affecting compressibility of ultrasonic compaction for high efficiency electrical motor core fabricated soft magnetic composite[C]// Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. DOI: 10.1109/ICEMS.2009.5382896
- [29] Cha. H. R. Densification of the nanopowder by using ultrasonic vibration compaction[J]. Rev. Adv. Mater. Sci, 2011, 28: 90-93.
- [30] Daud Y, Raman N A, Aziz S A, et al. Design of ultrasonic compaction tool for powder metallurgy[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 465/466: 1016-1020.
- [31] Khasanov' O L, Lee J S, Pokholkov Yu P, et al. The use of the ultrasonic compaction method for the PZT piezoelectric ceramics fabrication[J]. Science and Technology, 1999. KORUS '99. Proceedings. The Third Russian-Korean International Symposium on Vol.2. Publication Year: 1999. Page(s): 557-560. DOI: 10.1109/KORUS.1999.876227.
- [32] Khasanov O L, Pokholkov Yu P, Sokolov V M, et al. Particularities of Powerful Ultrasound Action on Nanostructured Powders. In: Nanostructured Powders and Their Industrial Applications. Materials Research Society Symposium Proceedings, V.520, 1998, 77-82.
- [33] Khasanov O L, Lee J S, Pokholkov Yu P, et al. Influence of applied oscillation mode at nanopowder ultrasonic compaction on Y-TZP nanoceramics properties[C]// Science and Technology, 1999. KORUS '99. Proceedings. The Third Russian-Korean International Symposium on Volume: 2. Publication Year: 1999, Page(s): 561-564. DOI: 10.1109/KORUS.1999.876227.
- [34] Suk-Ryong Hahn, Khasanov O L, Pokholkov Yu P, et al. Dry ultrasonic compaction of (Ba,Sr)TiO₃ nanopowder for ceramics production[J]. The 4th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, 2000. KORUS 2000. Proceedings. Volume: 3. DOI: 10.1109/KORUS.2000.866096 263-267.
- [35] 李晓颖. 超高分子量聚乙烯的超声熔融挤出成型研究[D]. 太原: 中北大学, 博士学位论文, 2005.
- LI Xiaoying. Study on the extrusion moulding of ultrahigh molecular weight polyethylene under ultrasonic irradiance[D]. Taiyuan: Central North University, PH. D Diploma, 2005.
- [36] Fairbanks H. V. Applying ultrasonics to the moulding of plastic powders[J]. Ultrasonics, 1974, 12(1): 22-24.
- [37] Paul D W. Ultrasonics application to PP moulding powder compression[J]. J. Ultrasonics. 1981(1): 23-28.
- [38] Benatar A. HDPE and UHMPE moulding powder compression with ultrasonics plastics welder[J]. J. Appl. Polym. Sci., 1992, 46: 581-590.
- [39] 前田禎三, 松岡信一. 超音波を应用したブラスチック粉体の成型加工[J]. ブラスチックヌ. 1979, 30(12): 46-52.
- [40] 松岡信一. 超声波援用ポリマ粉体成形に关する一实验[J]. 塑性与加工, 1994, 35(12): 1438-1441.
- [41] 吴凯, 刘玉存, 刘仕瑞. 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 shirui. Overview and trends of PBX explosives[J]. Shanxi Chemical Industry, 2012, 32(2): 36-39.
- [42] 梁华琼, 韩超, 雍炼, 等. 高聚物黏结炸药的压制成型性[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 44-48.
- LIANG Huaqiong, HAN Chao, YONG Lian, et al. Pressing mechanism of polymer-bonded explosive[J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2010, 33(4): 44-48.