

等静压技术在材料加工领域的应用现状

姜卓钰^{1,2} 张朋² 包建文² 王克俭¹

(1 北京化工大学机电工程学院,成型制造研究中心,北京 100029)

(2 中航工业复合材料技术中心,北京航空材料研究院,先进复合材料重点实验室,北京 100095)

文 摘 主要阐述了等静压技术在金属、金属基复合材料、无机非金属材料以及聚合物材料等领域的应用现状,分析了等静压技术与3D打印复合成型技术的发展趋势,介绍了国内外等静压仿真模拟技术的研究进展,并对等静压技术的发展趋势提出展望。

关键词 热等静压,冷等静压,粉末冶金,聚合物成型

中图分类号:TF124.3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.01.003

Current Applications of Isostatic Pressing Technology in Materials Processing Field

JIANG Zhuoyu^{1,2} ZHANG Peng² BAO Jianwen² WANG Kejian¹

(1 Molding Process Research Center, College of Mechanical and Electrical Engineering, College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

(2 AVIC Composite Center, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Science and Technology on Advanced Composites Laboratory, Beijing 100095)

Abstract The status of applications such as HIP technology in the fields of metals, metal matrix composites, inorganic non-metallic materials and polymer materials is discussed, and the simulation technology of the isostatic pressing is reviewed. At the same time, the development trend of composite molding process of the isostatic pressing technology and 3D printing technology is analyzed, and the future of isostatic pressing techniques is prospected.

Key words Hot isostatic pressing, Cold isostatic pressing, Power metallurgy, Polymer pressing

0 引言

等静压技术是一种能够为制品提供各向同性、超高成型压力的成型技术^[1-2],按成型温度的不同,可分为热等静压(HIP)、温等静压(WIP)及冷等静压(CIP)三类。HIP技术最先应用于金属成型及后处理等工艺中,随后逐渐地延伸到金属基复合材料的成型;近年来,3D打印技术与等静压技术相结合的复合成型工艺也成为了研究的热点,这为结构复杂的制品的等静压成型提供了便捷的实施方案^[3-5];同时,等静压成型的仿真模拟技术也日益成熟,也为产品近净成型的构想提供了可靠的理论依据^[6-7]。随着等静压技术日益广泛地应用,有研究将等静压技术用于石墨、陶瓷等无机非金属材料的成型,相关的理论分析也较为深入。截至目前,也有采用等静压技术成型聚四氟乙烯(PTFE)、超高分子量聚乙烯(UHMWPE)等

材料的报道,但此类报道相对较少。而对于聚酰亚胺(PI)等常温下较难成型的聚合物材料来说,采用等静压成型对其工业化生产及应用具有非常明显的优势,产品质量及生产效率将会得到显著的提高,因此将等静压技术应用于此类聚合物材料的成型将会成为该技术的发展趋势。本文主要就等静压技术在金属材料、无机非金属材料以及聚合物材料中的应用现状做一阐述,介绍了相关的复合成型技术及其模拟仿真技术的研究进展。

1 等静压技术在金属材料领域中的研究及应用

HIP用于金属及金属基复合材料的成型或后处理时,能够有效地去除铸件内部的缺陷,减少制件内部的裂纹,提高产品性能,因此该技术在金属材料成型方面的研究及应用较为广泛,同时等静压成型的仿真技术、复合成型技术的出现等使得HIP成型工艺

收稿日期:2016-10-08

第一作者简介:姜卓钰,1990年出生,硕士研究生,主要从事树脂基复合材料成型相关研究。E-mail: jzy180@163.com

通信作者:包建文,1969年出生,博士,研究员,主要从事树脂基复合材料相关研究。E-mail: baojianwen@liotmai.com

通信作者:王克俭,1971年出生,博士生导师,主要从事成型制造方面的研究。E-mail: wangkj@mail.buct.edu.cn

更趋于完善。

1.1 金属及金属基复合材料的热等静压成型

金属材料的 HIP 成型过程中, HIP 工艺参数及顺序的变化会对产品的性能和微观结构产生较大的影响,现阶段对于这部分内容已有较多的研究,研究对象涉及 ZTC4 钛合金、镍基合金、ZLSi7Cu2Mg 合金、DD3 单晶高温合金等多种金属材料,关于不同工艺条件对材料力学性能、微观结构等的影响机理的探究也较为深入。

杨伟光^[8]、赵嘉琪^[9]等的研究表明 ZTC4 钛合金的热等静压压力存在极值点,超高的成型压力会抑制组织的生长,反而影响了制品的力学性能,而温度过高或者过低都会对成型产品的微观组织造成不利的影 响,保压时间不足会导致产品性能下降,保压时间过长又会降低生产效率,造成能源浪费,因此最终确定 ZTC4 钛合金的热等静压工艺为 920℃/125 MPa/2 h。M.T. Kim^[10]研究了热等静压压力对镍基合金固-液相转变和微观结构的影响规律,研究发现,初始加压 120 MPa 或者在升温至 1 340℃后再加压至 120 MPa 的工艺会使合金的定向固结结构遭到破坏,而加压至 120 MPa 的同时也将温度升至 1 330℃乃至 1 340℃,或者加热到 1 330℃后再加压至 120 MPa 时,可以保护其定向固结结构。陈浩泽^[11]研究了 ZLSi7Cu2Mg 合金热等静压工艺,分析了热等静压处理前后合金微观组织及性能的变化,确定了最佳的热等静压温度和压力分别为 450℃、120 MPa。韩梅等^[12]研究了热等静压对 DD3 单晶高温合金组

织和性能的影响,分析发现了热等静压工艺可以消除合金的铸造疏松或者缩孔,提高合金的致密性,从而使得其力学性能具有较大的提高。

除了金属材料外, HIP 在金属陶瓷复合材料的成型中也具有广泛的应用。顾嘉文^[13]对等静压技术应用于金属陶瓷复合材料的研究及应用案例做了较为详细的介绍,除此之外, J. Echeberria^[14], Chung-Hung Tam^[15], G. Dušan^[16] 等就 HIP 在金属陶瓷复合材料的成型及应用中的相关问题也进行了大量的研究。

J. Echeberria^[14]进行了热等静压烧结的多层碳纳米管增强氧化锆增韧的铝基纳米复合材料的研究,材料中填充了 2wt% 的纳米尺寸的 ZrO₂ 颗粒及多层碳纳米管(MWCNTs),在 1 520℃下烧结 1 h 后在氩气环境中进行热等静压处理(1 475℃/1 h/150 MPa),经过热等静压处理后,制件相对密度接近 98%,硬度和断裂韧度分别增长了 17% 和 37%。Chung-Hung Tam^[15]研究了采用热等静压工艺制备 Cr/Si 密实制件时,温度对其性能的影响,文中通过分析制件的孔隙率等来确定热等静压温度对制件的影响,实验结果表明 Cr/Si 制件最佳热等静压工艺为 1 373 K/1 750 MPa/4 h。G. Dušan^[16]研究了热等静压烧结对 Al₂O₃-SiC 纳米复合材料微观结构、维氏硬度以及压痕韧性的影响,研究表明热等静压烧结有效地消除了其内部的残余气孔,使氧化铝基晶粒增大, SiC 在晶粒间的含量增大,从而引起了烧结后材料硬度及韧性的变化(图 1)。

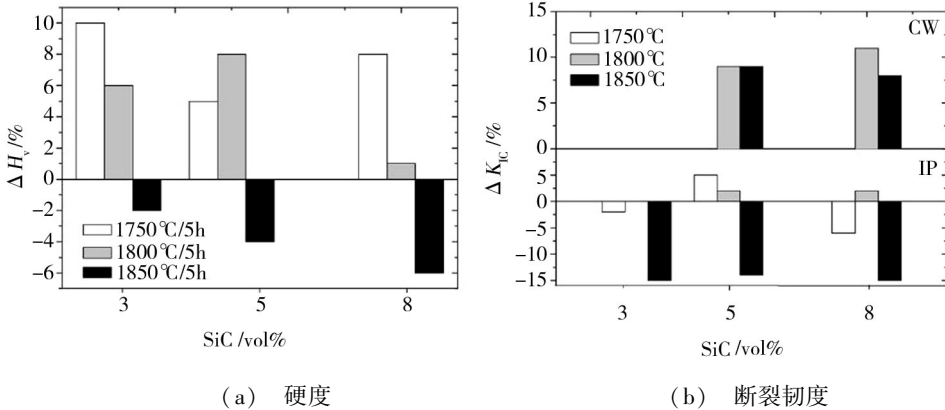


图 1 等静压烧结后复合材料相对于无压烧结复合材料硬度/断裂韧度的变化

Fig.1 Relative change of hardness/fracture toughness of HIP-ed specimens with respect to hardness/fracture toughness of PS composites

近年来,在金属及非金属材料的连接、复合以及多孔材料的氮化处理、悬浮熔炼、消除气孔等方面, HIP 技术也取得了重大突破^[17-18]。例如我国研制的铸造镍基高温合金 K4169 在成型过程中虽然采用了先进的铸造技术,但是成型制件内部不同程度的缺陷仍然使其不能满足于航空航天发动机、工业燃气轮机叶片等行业的使用要求。采用 HIP 技术对 K4169 铸件进行处理,对比 K4169 高温合金处理前后的性

能(图 2)可以发现, HIP 处理后其力学性能有所提高,这是由于 HIP 处理有效地消除了铸件内部的微观孔隙,从而使其能够满足高端领域的使用需求。

国内外关于金属 HIP 成型时,工艺参数、工艺顺序及其复合材料组分的变化等对材料微观组织结构和宏观性质影响规律的研究较为深入,掌握了系统的研究方法,获得了较为丰硕的研究成果。在生产过程中,将 HIP 成熟地应用于金属及金属基复合材料的成型及其

后处理中,制造出了能够满足高端领域使用要求的产品,图3为HIP成型或处理的制件实物图,表1为HIP

在金属材料成型及处理中较为常见的应用。

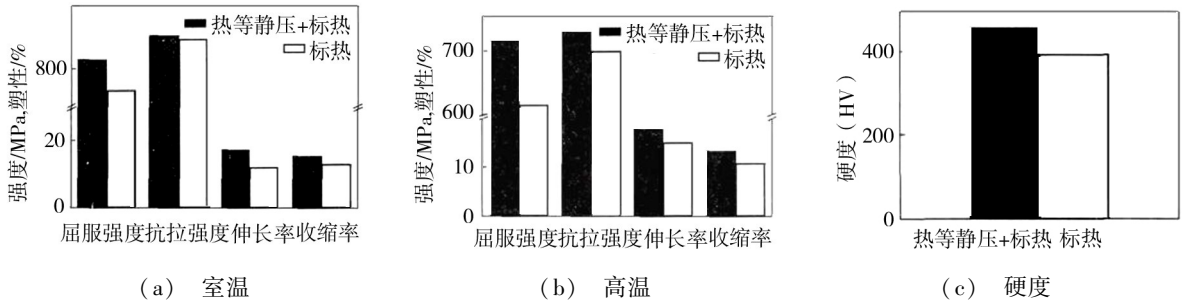


图2 有无HIP处理时K4169薄壁铸件的性能对比^[19]

Fig. 2 Performance comparison of thin walled K4169 castings with or without HIP-ed

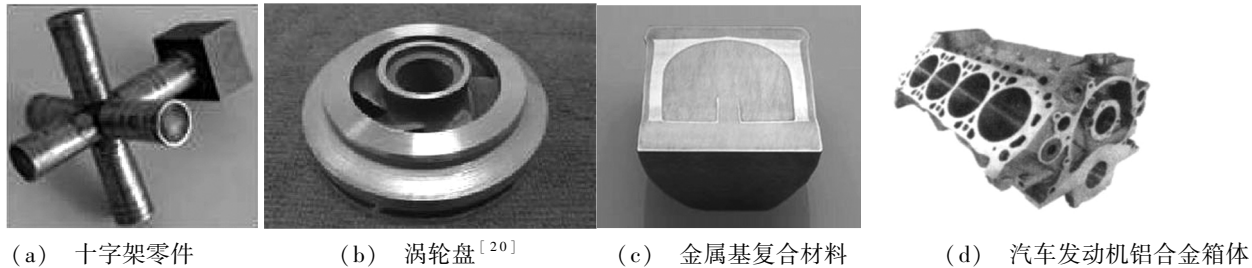


图3 HIP成型或处理制件

Fig. 3 HIP-ed molding and processing samples

表1 HIP技术在金属成型及后处理中的应用现状^[21]

Tab.1 Applications of HIP technology in metal forming and post-processing

应用领域	目的	涉及到的材料
铸件致密化	消除内部宏观和微观孔隙	镍基、钴基高温合金,钛合金,铝合金,钢,铜合金
HIP处理粉末冶金制品	获得全致密材料并避免晶粒的过度长大	WC-Co 硬质合金,钎合金
HIP制备粉末冶金制品	获得全致密材料并避免偏析和晶粒的过度长大	高速钢,陶瓷,金属-陶瓷复合材料
扩散连接	同种或异种材料的扩散连接	铜和钢扩散连接,镍基合金和钢的连接,陶瓷和金属的连接,钽、钛、铝、钨溅射靶材的扩散连接

表2 MSC. MARC, ABAQUS及ANSYS软件对比^[22]

Tab.2 Comparison of ABAQUS, MSC. MARC and ANSYS software

对比项	MARC	ABAQUS	ANSYS
非线性度	高	高	低
处理接触问题	较强	强	低
网格划分便利度	较强	强	较强
结构优化设计	较强	较强	强
耦合性	较强	较强	强
二次开发	较强	较强	强
压制分析能力	强	较强	弱
接触问题	较强	强	强
界面菜单	弱	强	强

1.2 金属材料等静压成型的模拟仿真技术

金属材料的等静压成型技术日益成熟,产品的近净成型成为等静压成型的趋势,有限元模拟理论的建立对于实验过程中包套及制品的设计具有重要的意义,为等静压近净成型技术提供了理论基础。目前常用于模拟分析的软件包括 ABAQUS、MSC. MARC 及 ANSYS 等。由表2三种软件的特点对比可以看出,在求解非线性问题时 ABAQUS 和 MSC. MARC 软件成为首选对象。相比于 MSC. MARC 软件,ABAQUS 在网格划分等方面较为便捷,但是在分析 HIP 的过程中,由于要考虑热力交互作用下制件随时间的蠕变问题, MSC. MARC 软件则具有明显的优势。

近几年来,对于金属等静压成型模拟仿真的研究也逐渐增多,华中科技大学史玉升团队在金属 CIP/HIP 成型的仿真模拟及近净成型方面进行了大量的研究^[23],实现了对金属的 HIP 和 CIP 成型过程的准确预测和分析。杜艳迎等^[24]应用 ABAQUS 有限元分析软件对不锈钢粉末的 CIP 过程进行了模拟,建立了相应的理论模型,准确预测实验结果。刘国承^[25]、曲兵兵等^[26]利用 MSC. MARC 有限元模拟软件对 HIP 过程中金属粉末的致密化过程进行了分析,通过对压坯不同时刻的相对密度、温度、应力等方面的研究,建立了塑性本构模型,分析了包套的变形情况及制品的密度分布。郭瑞鹏^[27]研究了钛合金粉末的 HIP 成型工艺,提出了通过二次 HIP 消除制

件孔隙的方法,并通过 MSC. MARC 有限元分析的方法确定了 HIP 过程中最佳的包套设计及焊接方案。S. C. Lee^[28]和 H. C. Yang^[29]应用 ABAQUS 分别对铝合金粉末 CIP 和 WIP 过程中橡胶模具对粉末致密化的影响进行了模拟,分析了等静压过程中橡胶模具对铝合金粉末致密化和变形的影响规律,结果表明橡胶包套厚度较大时会使得制品在泄压过程中局部应力过大,从而出现了断裂现象。

目前国内外关于等静压成型模拟技术的研究较为完善,通过 ABAQUS 和 MSC. MARC 软件能够对 CIP/HIP 成型过程中制件的体积收缩情况及密度、应力分布情况等问题进行有效的分析,为近净成型技术提供了理论基础。

1.3 金属材料的复合成型技术

选择性激光烧结技术(SLS)是一种常用的 3D 打印成型技术,其较多地应用于金属粉末的快速成型,但仅通过 SLS 技术制备的金属零件的致密性及力学性能较差,严重地限制了该技术的广泛应用。近些年逐渐地出现了将 SLS 技术与 HIP 结合的复合成型技术,何禹坤^[30]、鲁中良等人^[31]将这种复合成型技术应用于金属材料的成型中,得到了高致密度、高性能及结构复杂的不锈钢零件。这不但解决了 SLS 制件密度低、性能差等缺陷,同时也避免了等静压成型时包套制作及封装等问题,为制造形状复杂的等静压制件提供了便捷的实施方案,极大地提高了等静压工艺的生产效率,使等静压技术及选择性激光烧结技术更加广泛、高效地应用于产品的实际生产中。图 4 为选择性激光烧结的工艺流程示意图,图 5 为这种复合成型工艺制作的齿轮。

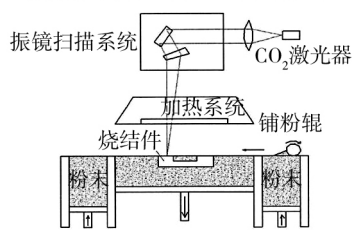


图 4 选择性激光烧结工艺流程示意图^[32]

Fig.4 Schematic diagram of selective laser sintering process

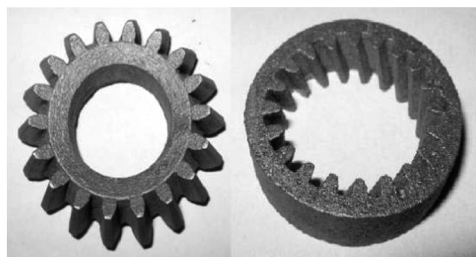


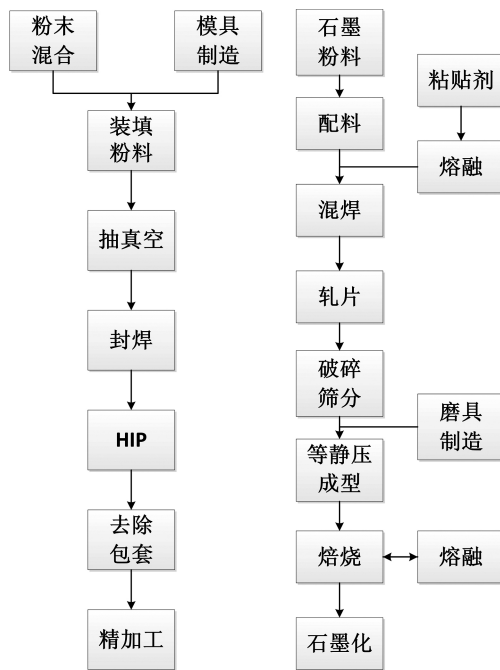
图 5 采用 SLS/CIP/HIP 技术成型的齿轮^[33]

Fig.5 Gear parts molded by SLS/CIP/HIP technology

成型的研究较为完善,相关的模拟仿真技术比较成熟,其研究成果有效地指导了产品成型工艺的制定及模具的设计,制备出了理想的产品。同时,激光烧结技术与 HIP 工艺的结合拓展了两者的应用范围,使得 HIP 能够广泛地应用于金属及其复合材料的成型中。

2 等静压技术在无机非金属材料中的研究及应用

金属 HIP 成型是通过高温高压的作用使金属熔融并形成致密产品的过程,而无机非金属材料的等静压成型机理有所不同,如石墨、陶瓷等。石墨等无机非金属材料的等静压成型较多的是采用 CIP 成型,烧结后处理的成型工艺。如图 6 所示,在石墨成型过程中不但需要添加黏结剂以保证良好的成型效果,而且在成型后还需要进行烧结处理以提高其性能。



(a) 金属 (b) 石墨

图 6 金属和石墨等静压工艺流程对比^[34]

Fig.6 Comparisons of HIP processes of metal and graphite

在陶瓷的等静压成型中,也有部分研究中采用 CIP 成型后烧结的方法制备陶瓷制品,其工艺流程和石墨成型基本相似。而在陶瓷复合材料制备时多采用的是 HIP 技术,这是由于陶瓷复合材料不但具有较高的硬度和强度,而且还具有一定的耐磨性,一般情况下,制品内部会有气孔的存在,因而对产品性能产生了影响^[35],HIP 技术可以为陶瓷烧结收缩提供足够的驱动力,减小产品中的孔隙从而使其性能有所提高^[36]。

在石墨、陶瓷 CIP 成型中,对于工艺的研究主要集中于成型压力的确定,坯料的致密化程度在一定范围内随着成型压力的增大而增加,但成型压力过大时,成型制件的弹性效应比较明显,因此 CIP 成型压力对于无机非金属材料的成型具有重要的影响。王金波^[37]研究了采用 CIP 技术成型熔融石墨陶瓷坯

体时,等静压成型工艺等对熔融石英成型的影响规律,研究表明当熔融石英陶瓷的成型压力为 160 MPa 时,成型制品具有良好的密实度和较小的弹性后效。施辉献^[38]研究了石墨的冷等静压成型工艺,结果表明,对于各向同性石墨来说,其最佳成型工艺为以 0.5 MPa/s 的速率加压至 349 MPa 后,保压 13 min 后泄压,其泄压速率为 0.6 MPa/s。除了对工艺的研究之外,关于成型模具的设计及装料工艺等也成为研究的热点。譬如范尚武^[39]进行了 CIP 烧结成型氮化硅的研究,讨论了装料工艺及成型工艺,并设计了能够近净成型的模具,最终制备了性能良好的产品。李双^[40]设计并加工出了能够成型多孔陶瓷管的外压法、内压法模具,最终采用 CIP 的方法制备了大孔径、高孔隙率的多孔陶瓷管等。

通过 CIP 成型后高温烧结的方法制备石墨、陶瓷、耐火材料等制品时,可以获得性能良好的产品,例如等静压石墨,其具有高强度、高密度、各向同性以及优异的抗震抗热性能等,可用于核反应堆堆芯材料,也是核能源的核心材料,因而在核电、国防等领域具有重要的地位。最近的研究中也出现了将橡胶等静压成型技术(RIP)用于炸药的成型和生产,梁华琼等^[41]采用橡胶等静压技术成型高聚物黏结粉末(D90031),并对其成型工艺进行了研究,通过 RIP 压制成型后得到的炸药制品可以达到免加工或近免加工的状态,减少原材料浪费,实现了炸药的近净成型。图 7 为冷等静压技术成型的陶瓷、石墨产品实物图。



(a) 氧化铝研磨球 (b) 钛酸铝升液管 (c) 石墨电极

图 7 冷等静压成型制品

Fig.7 CIP molding products

3 等静压技术在聚合物材料成型中的研究与应用

热压成型是聚合物材料成型中较为常用的方法之一。相比于热压成型技术,等静压成型时物料和模具没有相对运动从而使制品各部分密度变化极小,密实度较高且力学性能优异,故该技术可以取代热压成型技术用于成型具有特殊性能要求的聚合物制品^[42]。例如超高分子量聚乙烯(UHMWPE)、聚四氟

乙烯(PTFE)以及聚酰亚胺(PI)等室温下难以成型的聚合物材料,采用等静压技术成型则具有较为明显的优势。现阶段,在 UHMWPE, PTFE 等聚合物材料的等静压成型方面已有部分较为深入的研究。

3.1 HIP 技术在聚合物成型中的研究及应用

采用传统的模压、挤出等工艺成型聚合物材料时,材料内部有粒子边界的存在,不能成型出各向同性的均质制品;同时,成型时的剪切应力也会减小材料的平均分子量,严重地影响材料的性能。HIP 成型时,温度和压力的交互作用使材料内部出现微小的流动,消除材料内部的孔隙和裂纹,避免了取向性熔融流动,消除了残余应力因而得到了性能良好的产品。

Rizwanm. Gul^[43]采用 HIP 技术成型 UHMWPE 材料,并就 HIP 工艺参数对于 UHMWPE 材料的影响规律进行了研究。研究表明,当温度升高时,UHMWPE 分子链中交联点增加,引起材料内部交联结构的变化,同时内部熔融间隙逐渐消除,从而对材料的固化产生影响;而当成型温度不变时,烧结时间的延长对于 UHMWPE 的固化不会产生明显的影响。另外,在相同的温度下,成型压力过大会限制分子链的运动,因此成型压力为 69 MPa 时,材料中会有球晶的出现,而将成型压力升高至 138 MPa 时,则不会有球晶的出现。通过上述研究表明,对于 UHMWPE 材料来说,当工艺参数控制合理时, HIP 是一种非常可靠的成型方法。

3.2 CIP 技术在聚合物成型中的研究及应用

CIP 技术在 PTFE 制品的成型中具有较为成功的应用,能制造出泵阀衬里、薄壁中空制品等形状复杂的产品,相应的成型工艺的研究也较为深入。Otavio C. Gamboni^[44]进行了一步 CIP (OSCIP)和多步 CIP (MSCIP)成型 PTFE 制品的实验,分析了 CIP 过程中,坯料内部空气对制品性能影响的机理。OSCIP 过程中将实验压力一次加载至最大值,保压 1 min 后泄压;MSCIP 过程中,首先给坯料施加一定的初始压力,随后多步加压至最大值,每步加压之后都需要将坯料放置 24 h 以上并抽真空以去除坯料内部的空气。研究表明(表 3),由于坯料内部空气的存在,两种成型工艺材料中孔隙的分布及交联点的强度有所不同, MSCIP 成型的坯料具有较大失效力。

表 3 不同工艺成型 PTFE 制品的物性参数

Tab.3 Performance of PTFE products with different cold isostatic pressing routes

工艺编码	加压工艺 p/MPa	体积密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	熔融焓 $\Delta H/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	拉伸强度 σ/MPa	最大纵向 应变 ε
OSCIP	0→35	2.14 ± 0.01	28.3 ± 1.1	17 ± 1	0.04 ± 0.01
MSCIP-2-steps	0→2→35	2.14 ± 0.01		76 ± 8	0.77 ± 0.05
MSCIP-3-steps	0→2→10→35	2.14 ± 0.01		82 ± 3	0.81 ± 0.06
MSCIP-5-steps	0→2→5→10→20→35	2.16 ± 0.01	28.0 ± 2.7	72 ± 7	0.77 ± 0.03

同时由于 OSCIP 成型材料中粒子间孔隙的存在,泄压过程中空气压力超过了粒子间的凝聚力,故其表现为晶间断裂,而 MSCIP 成型的材料则以晶内断裂为主(图 8)。上述研究表明,当采用合理的 CIP 成型工艺制备 PTFE 时,能够得到性能优异的产品。

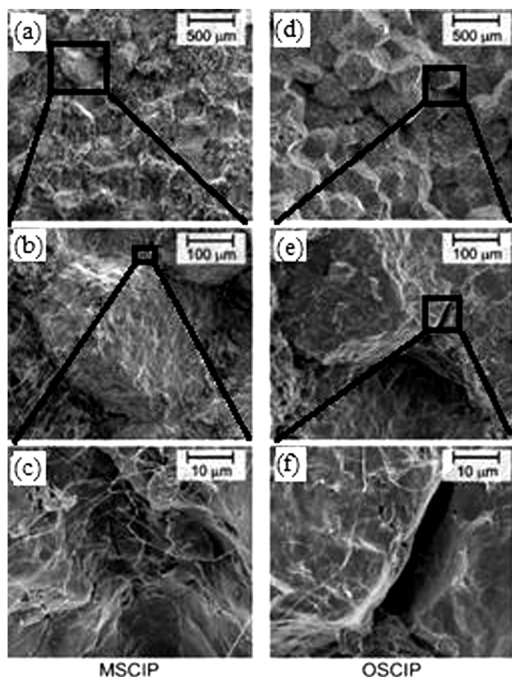


图 8 Brazilian 试验后试样中部区域 SEM 断口

Fig.8 SEM fractographs of central regions of specimens after Brazilian test

线性聚酰亚胺和 UHMWPE、PTFE 一样,也需要在热压结合的作用下成型。目前生产过程中,聚酰亚胺的成型多采用模压工艺,严重的影响了其生产效率,同时模压成型时,模具会对制品收缩过程产生摩擦作用,单向作用力也会使材料不同方向的力学性能有所差异,从而影响了产品的应用价值。而采用等静压成型时,不但可以实现聚酰亚胺产品的批量化生产,同时各向同性的成型压力对于提高产品的致密性及力学性能具有较大的帮助,因此将等静压技术引用到聚酰亚胺的成型中具有重大的意义,关于这方面的研究亟待深入。

4 结语

(1) 等静压技术在金属材料成型及后处理的研究及应用中已经得到了充分的发展,相关研究方法较为成熟,其产品也在诸多领域具有重要的应用。同时复合成型工艺为成型结构复杂的产品提供了实践方案,仿真模拟技术为产品的近净成型提供了理论基础,使得该技术在金属材料的成型中的应用更加广泛。

(2) 等静压技术在无机非金属材料方面的研究及应用已经相对成熟,理论研究较为深入,应用范围比较广泛。目前国内外的研究也有将复合成型工艺用于陶瓷等无机非金属材料的成型,可以更加便捷

的成型出结构较为复杂的产品。

(3) 现阶段,等静压技术在聚合成型中也具有一定范围的应用,如 HIP 成型 UHMWPE、采用 CIP 成型 PTFE 等,但应用范围较小,相关的研究报道较少。

(4) 通过上述分析表明,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地应用,随着聚合物材料在航空航天领域应用的逐渐增加,等静压技术在聚合物材料(如线性聚酰亚胺等)的成型及后处理中的广泛应用将成为该技术发展的必然趋势。

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(1): 17-24.
- [2] 刘文彬,熊宁,王铁军,等. 氮化硅陶瓷的热等静压处理与抗热震性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(1): 213-216.
- [3] DU Yanying, SHI Yusheng, WEI Qingsong. Plastic forming simulations of cold isostatic pressing of selective laser sintered components[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(5): 1118-1122.
- [4] HE Wenting, WEI Qingsong, LIU Kai, et al. Numerical simulation of cold isostatic pressed alumina parts produced by selective laser sintering and part shape optimization[J]. Ceramics International, 2013, 39(8): 9683-9690.
- [5] WANG Zijian, SHI Yusheng, HE Wenting, et al. Compound process of selective laser processed alumina parts densified by cold isostatic pressing and solid state sintering: experiments, full process simulation and parameter optimization[J]. Ceramics International, 2015, 41(2, Part B): 3245-3253.
- [6] 蔺广科. 钛合金热等静压近净成型过程数值模拟及制件性能研究[D]. 华中科技大学, 2012.
- [7] 任丽花. 选择性激光烧结/等静压复合工艺数值模拟与试验研究[D]. 华中科技大学, 2007.
- [8] 杨伟光,赵嘉琪,南海,等. 热等静压工艺参数对 ZTC4 钛合金组织的影响规律[J]. 材料工程, 2011(9): 25-28.
- [9] 赵嘉琪,杨伟光,南海,等. 热等静压工艺参数对 ZTC4 钛合金力学性能的影响[J]. 材料工程, 2011(10): 42-46.
- [10] KIM M T, Oh O Y. Effect of high pressure on the solid-liquid phase change of a nickel base superalloy during hot isostatic pressing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 477(1/2): 224-232.
- [11] 陈浩泽. ZLSi7Cu2Mg 合金热等静压工艺研究[D]. 中北大学, 2015.
- [12] 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.
- [13] 顾嘉文,刘慧渊,范帮勇,等. 热等静压技术在金属陶瓷复合材料制备中的应用[J]. 佛山陶瓷, 2015, 6(227): 1-3, 8.
- [14] ECHEBERRIA J, OLLO J, BOCANEGRA-BERNAL M H, et al. Sinter and hot isostatic pressing (HIP) of multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs) reinforced ZTA nanocomposite: microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 1-10.

microstructure and fracture toughness [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2010, 28(3):399-406.

[15] TAM C H, LEE S C, CHANG S H, et al. Effects of the temperature of hot isostatic pressing treatment on Cr-Si targets [J]. Ceramics International, 2009, 35(2):565-570.

[16] DUŠAN Galusek, JAROSLAV Sedláček, PETER Švančárek, et al. The influence of post-sintering HIP on the microstructure, hardness, and indentation fracture toughness of polymer-derived Al₂O₃-SiC nanocomposites [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27(2/3):1237-1245.

[17] 尚文静.热等静压(HIP)技术和设备的发展及应用[J].有色冶金设计与研究,2010,31(1):18-21.

[18] 张义文.热等静压技术新进展[J].粉末冶金工业,2009(4):32-40.

[19] 何树先,王俊,孙宝德.热等静压对高温合金薄壁铸件疏松缺陷及性能的影响[J].热加工工艺,2014,43(21):88-90.

[20] 王基维.难加工材料热等静压近净成型工艺基础及零件性能研究[D].华中科技大学,2012.

[21] 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.

[22] 杜艳迎.粉末激光快速成型与等静压复合过程工艺与数值模拟研究[D].华中科技大学,2011.

[23] 史玉升,薛鹏举,王基维,等.难加工材料复杂金属零件热等静压近净成型技术研究[C].中国机械工程学会特种加工分会,第14届全国特种加工学术会议论文集,中国机械工程学会特种加工分会,2011:7.

[24] 杜艳迎,史玉升,魏青松,等.不锈钢粉末冷等静压数值模拟与实验验证[J].材料工程,2010(3):89-92.

[25] 刘国承.金属粉末热等静压致密化数值模拟与试验研究[D].华中科技大学,2011.

[26] 曲兵兵.不锈钢粉末热等静压成型模拟与包套制造工艺研究[D].华中科技大学,2009.

[27] 郭瑞鹏.粉末冶金钛合金力学性能与热等静压致密化研究[D].东北大学,2014.

[28] LEE S C, KIM K T. A densification model for powder materials under cold isostatic pressing—Effect of adhesion and friction of rubber molds [J]. Materials Science and Engineering;

A, 2008, 498(1/2):359-368.

[29] YANG H C, LEE J W, KIM K T. Rubber isostatic pressing of metal powder under warm temperatures [J]. Powder Technology, 2004, 139(3):240-251.

[30] 何禹坤.基于激光熔化成型同质包套的热等静压近净成型试验研究[D].华中科技大学,2012.

[31] 鲁中良.不锈钢粉末选择性激光烧结/等静压复合成型技术研究[D].华中科技大学,2008.

[32] 刘凯.陶瓷粉末激光烧结/冷等静压复合成型技术研究[D].华中科技大学,2014.

[33] 陈英.铁基金属粉末激光烧结与等静压复合成型技术研究[D].华中科技大学,2008.

[34] 谢文蛟.原料及制备工艺对等静压石墨材料结构与性能的影响[D].湖南大学,2013.

[35] 王勇兵,刘慧渊,范帮勇.热等静压技术在材料致密化中的应用[J].装备机械,2015(3):17-20.

[36] 刘文彬,熊宁,王铁军,等.氮化硅陶瓷的热等静压处理与抗热震性能研究[J].硅酸盐通报,2015,34(1):213-216.

[37] 王金波.熔融石英陶瓷的等静压成型及烧结工艺研究[D].华中科技大学,2009.

[38] 施辉献.等静压石墨的成型工艺研究[D].昆明理工大学,2013.

[39] 范尚武.反应烧结氮化硅冷等静压成型工艺优化[D].西北工业大学,2005.

[40] 李双.冷等静压法制备大孔径多孔陶瓷管研究[D].山东理工大学,2009.

[41] 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.

[42] 何云伟,陈军.聚合物的高压成型加工[J].塑料工业,2007,35(12):65-66.

[43] GUL R M, MCGARRY F J. Processing of ultra-high molecular weight polyethylene by hot isostatic pressing, and the effect of processing parameters on its microstructure. [J]. Polymer Engineering & Science, 2004, 44(10):1848-1857.

[44] GAMBONI O C, RIUL C, BILLARDON R, et al. On the formation of defects induced by air trapping during cold pressing of PTFE powder [J]. Polymer, 2016, 82:75-86.