

高性能陶瓷的研究进展

江 东 亮

(中国科学院上海硅酸盐研究所 高性能陶瓷和超微结构国家重点实验室, 上海 200050)



江 东 亮 院 士

摘 要: 随着材料科学的进步和新材料的开发, 器件和系统逐步向小型化、集成化、多功能化和轻量化方向发展, 推动了陶瓷材料向结构-功能一体化方向发展。这些发展和先进的制备技术、纳米材料和纳米技术的发展密不可分。介绍了几种重要的结构功能一体化材料的研究进展, 包括超高温陶瓷和陶瓷基复合材料, 新能源陶瓷, 透明陶瓷, 生物陶瓷和多孔陶瓷, 探讨了材料的先进制备技术, 并对材料在基础研究和制备科学上今后应予以关注的关键问题作了初步探讨。

关键词: 高性能陶瓷; 结构功能一体化; 复合材料; 透明陶瓷; 生物陶瓷; 制备科学

中图分类号: TQ174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2009)12-0026-15

Recent Research Progress of High Performance Ceramics

JIANG Dongliang

(State Key Laboratory of High Performance Ceramics and Superfine Microstructure,
Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: With the progress of material science and technology, the application of small, integral, multifunctional and light weight materials and systems has promoted the development of structure-and-function-integrated materials. The development of these materials highly depends on advanced processing technologies, nano materials and nanotechnology. Several kinds of structure-and-function-integrated materials, including ultra high-temperature ceramics and ceramic matrix composites, new energy ceramics, transparent ceramics, bioceramics and porous ceramics, were reviewed. Not only the advanced processing technologies were discussed, but also the key issues of the basic research and processing technologies for such materials in the future were preliminarily studied.

Key words: high performance ceramics; new energy ceramics; composite; transparent ceramics; processing science

1 前 言

先进陶瓷材料具有耐高温、耐腐蚀、高强度、高硬度等优点, 在某些苛刻的条件下能够发挥不可替代的作用, 是航空航天、能源、环境、交通、生物和医疗、信息技术领域发展的基础。随着高新技术发展, 要求器件和系统向小型化、集成化、多功能化和轻量化方向发展。也推动了陶瓷材料向结构-功能一体化方向发

展^[1]。目前, 结构功能一体化材料主要包括超高温陶瓷和陶瓷基复合材料, 新能源陶瓷, 透明陶瓷, 生物陶瓷和多孔陶瓷。这些材料的发展是和先进的制备技术、纳米材料和纳米技术的发展密不可分的。透明陶瓷就是陶瓷材料的结构-功能一体化的典型代表。在光电子时代, 实现陶瓷材料透明化和多功能化也是对科学家提出的巨大挑战性课题之一。以下主要从5个方面讨论结构功能一体化材料。

2 纤维增强陶瓷基复合材料

连续纤维增强陶瓷基复合材料(CMC)可以大幅度地改善陶瓷材料的脆性, 是陶瓷基复合材料发展的重要方向。连续纤维增强陶瓷基复合材料是近三十年发展起来的新兴研究领域之一。20世纪70年代初, Aveston首次提出了纤维增强陶瓷基复合材料的概念, 为高性能陶瓷基复合材料的研究和发展开辟了崭新的领域^[2]。与此

收稿日期: 2009-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50772128, 50472015);
上海市科委重大和重点基础研究项目(07DJ14001,
06JC14071)

通信作者: 江 东 亮, 男, 1937年生, 中国工程院院士, 国际陶瓷科学院院士, 中国科学院上海硅酸盐研究所研究员, 博士生导师

同时, Prewo 将纤维移植入玻璃基体中, 制备出强度高、韧性好的纤维增强玻璃基复合材料。70 年代中期, Fitzer 和 Lamicq 等将化学气相沉积工艺引入到纤维增强陶瓷基复合材料的制备中, 得到了 Nicalon/SiC 复合材料, 从而全面推动了纤维增强陶瓷基复合材料研究工作的开展^[3-4]。近二十多年来, 发达国家一直投入巨资开展陶瓷基复合材料的开发。

在纤维增强复合材料中, 连续纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料(CMC-SiC)结合了碳化硅陶瓷强度高、抗氧化、高温性能优异和纤维高强度、高比刚度和应力作用下的高应变等优点, 同时改善了碳化硅陶瓷的韧性, 表现出各种优良的性能, 在航空航天、国防军工、新能源及交通运输等领域具有广泛的应用前景(如火箭喷管、核反应堆壁以及轻量化支撑结构、核聚变反应直接接触的第一壁构件、超高马赫数飞行器耐热部位、高速刹车系统材料等)^[5-11], 是目前航空航天领域高温结构材料研究的重点。欧美等发达国家的研究工作已经进入试车阶段或实用阶段。国内纤维增强碳化硅基复合材料的研究起步较晚, 在西北工业大学、上海硅酸盐研究所以及国防科学技术大学等单位的共同努力下, 在纤维增强碳化硅基复合材料的制备技术等领域取得了长足的进步。图1示出复合材料在空间领域的一些主要应用。

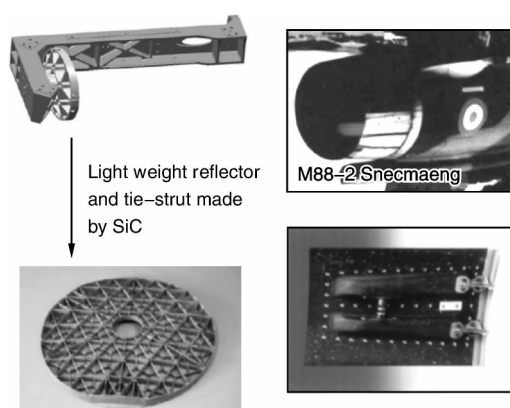


图1 陶瓷基复合材料(CMC)在空间领域的可能应用

Fig. 1 Possible applications of CMC in space

目前碳纤维增强碳化硅基复合材料的制备工艺主要有化学气相渗透(CVI)^[12-13], 有机先驱体浸渍与裂解(PIP)^[14], 热压烧结(HP)^[15-16], 反应烧结(RS)^[17]以及这些方法的复合形式。

化学气相渗透法(CVI)起源于20世纪60年代中期, 是在化学气相沉积基础上发展起来的一种制备陶瓷基复合材料的新方法。1962年由Bickerdike提出, 首先成功应用于Cf/C复合材料的制备。70年代, Fitzer^[18]和Naslain^[19]分别在德国Karsruhe大学和法国Bordeaux

大学利用CVI法成功制备了碳化硅基复合材料。1984年, Lackey在美国Oak Ridge国家实验室提出FCVI(Forced Flow Thermal Gradient Chemical Vapor Infiltration)法制备陶瓷基复合材料, 相关的基础理论和模型在20世纪80年代开展。在CVI过程中, 首先将气态先驱物送达到含孔隙的纤维编织预成型体内部纤维表面, 并在表面发生化学反应, 原位沉积形成陶瓷基体, 逐渐致密化并最终和纤维结合在一起形成复合材料。CVI工艺具有温度低、可设计性好、组成可控、净尺寸成型等优点, 可以制备出形状复杂、纤维体积分数高的陶瓷基复合材料。也可以用该工艺对陶瓷基复合材料或多孔陶瓷材料进行进一步致密化处理, 减少材料内部存在的开口气孔和微裂纹。但是, CVI工艺也存在许多不足, 如设备较复杂, 材料制备效率低、周期长、成本高, 残余空隙率高等。因此, 经过不断改进, 出现了一些新的CVI工艺, 如等温CVI, 等温强制流动CVI(IF-CVI), 热梯度CVI(TG-CVI), 强制流动热梯度CVI(F-CVI)以及脉冲CVI(P-CVI)。国内CVI工艺制备陶瓷基复合材料研究较晚, 西北工业大学和中南大学于20世纪90年代开始较系统深入的研究Cf/C复合材料。上海硅酸盐研究所采用温度脉冲制度, 以Cf/SiC复合材料为主开展研究, 目前已能够制备密度高、性能优越的纤维增强陶瓷基复合材料。

有机先驱体浸渍与裂解法(Polymer Impregnation and Pyrolysis, PIP)是在Cf/C复合材料工艺基础上发展起来的制备连续纤维增强陶瓷基复合材料的方法。比较成熟的化学气相渗透法由于受反应室尺寸的限制, 对大尺寸结构部件的制备比较困难。反应烧结法中残留的游离硅在高温下对碳纤维易造成化学损伤。自从1975年日本东北大学的矢岛圣使通过先驱体裂解法成功制备碳化硅纤维以来, 这一方法开始作为复合材料制备领域一种比较新颖的方法而受到了广泛关注。先驱体浸渍裂解法具有很多优点, 可以在低温下实现大尺寸、复杂形状部件的制备, 而且可以实现规模化生产。工艺过程是以纤维预制品作为骨架, 真空条件下排除预制品内部空气, 用溶液或者熔融的有机聚合物先驱体浸渍, 在惰性气氛下交联固化, 然后在惰性气氛下高温裂解。重复浸渍和裂解过程, 促进了复合材料的致密化^[20-21]。目前制备碳化硅的前驱体主要有聚碳硅烷、聚甲基硅烷以及聚烯丙基碳硅烷等。PIP法制备复合材料的优点主要有: ①有机先驱体聚合物具有可设计性; ②容易实现基体和纤维的复合和分散; ③制备温度低, 可以制备纯度高、结构均匀的基体材料。但是, PIP法制备陶瓷基复合材料也存在不足, 在裂解过程中放出大量气体小分子, 产生较

大的体积收缩, 容易在基体中产生气孔和裂纹。因此, 可以在浸渍前驱体中加入填料, 主要包括惰性填料和活性填料^[22-23]。其中, 活性填料不仅能和前驱体裂解产生的气体反应, 甚至能和保护气氛如氮气等反应, 减少裂解收缩, 提高复合材料的抗氧化性。

热压烧结又称料浆浸渍-热压烧结法, 是将基体材料配成浆料, 对纤维预制体浸渍、热处理, 最后进行热压烧结。或者将纤维通过盛有浆料的容器, 浸挂浆料后缠绕在卷筒上, 烘干, 沿卷筒母线切断, 取下后得到无纬布, 将无纬布剪裁成一定规格的条带, 在模具上叠排, 合模后加压, 经高温脱粘烧结后得到复合材料^[16,24-26]。

反应渗硅工艺是在反应结合 SiC 基础上发展起来的, 是通过气相或液相 Si 与基体材料相互反应的一种复合材料制备方法^[27-28]。可以分为气相渗硅和液相渗硅。

在复合材料领域, 为了满足新型航空航天器苛刻的服役环境, 材料的可靠性和抗氧化性成为需要解决的关键问题。对这类复合材料而言, 纤维-基体间的界面对复合材料的力学性能起着关键性的作用^[29]。纤维是承载单元, 界面是实现强韧化的关键单元。如果纤维-基体间具有过高的界面结合强度, 那么微裂纹就容易直接扩展进入纤维而导致复合材料表现为脆性的力学行为特征; 如果纤维/基体具有适当弱的界面结合强度, 则界面就可以通过对微裂纹的偏转来避免基体裂纹过早扩展进纤维而起到力学保护的作用^[30-31]。为了控制纤维与基体的结合强度, 常常使用热解碳层作为界面相。但是, 热解碳在高温氧化气氛中很不稳定, 因此在热解碳层上沉积碳化硅层被认为是实现抗氧化目的的有效途径, 这就产生了多层界面层的概念^[32]。在这方面, Droillard, Bertran 等都进行了一系列研究工作^[33-34]。上海硅酸盐研究所提出了温度脉冲 CVI 工艺^[35-37], 可以用来在纤维表面制备组成和厚度可控的涂层。利用循环的热脉冲可以实现快速升降温。人工智能控制仪一方面用于温度曲线的设定, 另一方面依据设定的温度曲线实现对感应电源的工作功率进行调制, 从而获得温度脉冲曲线。图 2 是设定的温度控制曲线。曲线中, 一次热循环可以分为 3 个区间, 线性上升区间 RI, 温度保持区间 HI, 线性下降区间 FI。

采用 TEM 对界面层结构进行表征, 如图 3 所示。可以明显看出纳米尺度交替排列的 PyC 和 SiC 的层状结构。通过对前驱体种类、温度和沉积时间的控制, 可以精确控制界面层的组成和厚度, 从而有效调控基体和界面层之间的结合强度。这对于后续材料的力学性能、断裂方式以及服役过程中的抗氧化性等都有非常重要的意义。对于复合材料的界面精细调控, 提高材料的综合性能也具有非常重要的意义。

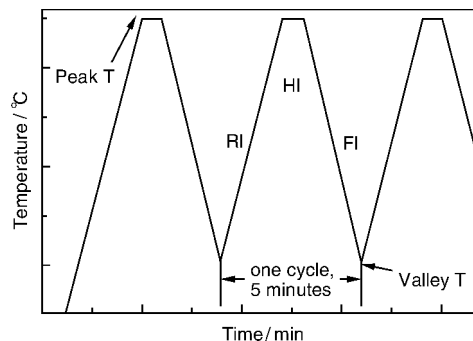


图 2 温度-脉冲速率曲线

Fig. 2 The temperature-pulse rate curve

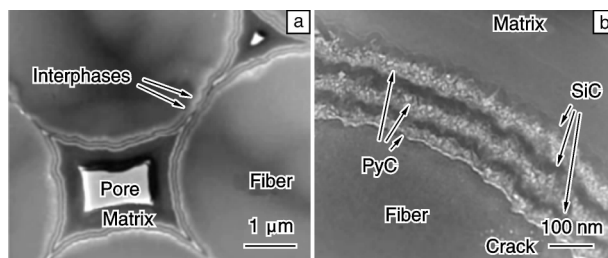


图 3 纤维之间的界面(a)和纤维表面界面层(b)的 TEM 图像

Fig. 3 TEM micrographs of inter-fiber configuration (a) and multilayered interfacial coatings (b)

在抗氧化性方面, 发展自愈复合材料是研究的热点。通常采用添加活性填料的方法。Peter Greil 等人通过在有机物中加入一定量的活性填料来控制有机物的热解过程, 比如 B, Ti, Al, MoSi₂ 以及 CrSi₂ 等。在热解过程中活性填料颗粒与裂解产生的含碳有机小分子以及反应性气氛(如氮气)发生碳化反应和氮化反应可以提高陶瓷产率, 如果在生成物体积大于反应物体积的情况下, 反应产生的体积膨胀效应可以在一定程度上抵消或抑制裂解产物的体积收缩, 而且可以提高裂解产物的致密度。董绍明等研究了 Al, B 等活性填料^[38-41]。利用 B 作为活性填料, 在氮气气氛中发现生成了 H-BN 相。最终得到了 Cf/SiC-BN 复合材料, 和 Cf/SiC 复合材料相比, 800 °C 氧化 10 h 后质量损失从 ~36% 降低到 ~16%。从微结构可以看出, 大部分的碳纤维仍然很好地保留下来(见图 4)。

在 CMC-SiC 复合材料的制备方面, 仍然有很多工作要做。进一步发挥 CMC 多尺度和可设计的特点, 在多尺度和多层次上, 对 CMC-SiC 进行难熔金属碳化物、硼化物、氮化物和氧化物等掺杂改性, 结合纤维预制体的计算机模拟设计与编织的计算机控制技术, 发展更长寿命、更高温度和结构功能一体化的 CMC 复合材料是研究的重点^[42]。

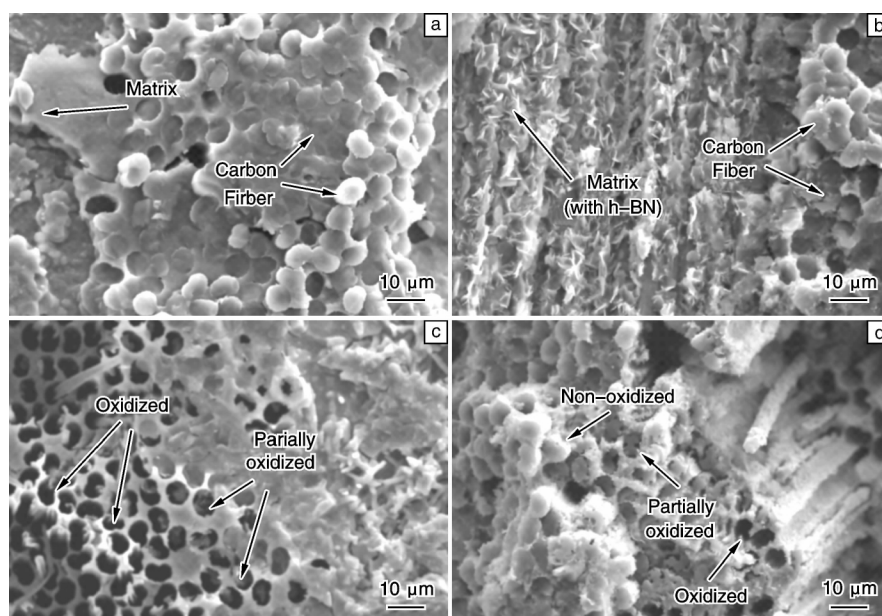


图 4 复合材料断口 SEM 照片：(a) 没有活性填料在氧化前，(b) 含 B 活性填料在氧化前，(c) 没有活性填料 800 °C 氧化 10 h 后，(d) 含 B 活性填料 800 °C 氧化 10 h 后

Fig. 4 SEM observation of the fracture surface of the composites: (a) without filler before oxidation, (b) with B filler before oxidation, (c) without filler after oxidation at 800 °C for 10 h, and (d) with B filler after oxidation at 800 °C for 10 h

3 能源用高性能陶瓷材料

3.1 核能用陶瓷材料

结构陶瓷材料是满足第四代核能技术、能长期在高温 ($\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$) 条件下工作的唯一候选材料，涉及碳基和 SiC 基复合材料、各种氧化物和非氧化物陶瓷材料。主要有核燃料包覆、核燃料承载、堆芯组件中用到的结构陶瓷材料，如石墨，TiN，TiC，ZrC，C/C，C/SiC，

SiC/SiC，SiC，ZrN 等^[46-47]。图 5 是核燃料包覆颗粒结构示意图，其中采用碳和碳化硅作为包覆层^[44]。虽然针对有关材料开展了相关的研究工作，但尚无法支撑第四代核反应堆技术。目前国外已启动相关的研究计划，而国内在这方面几乎还是空白。由于第四代核能材料同时处于高温 ($1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和高剂量 ($>30\text{ dpa}$) 中子辐照条件下，结构与性能的变化亦不清楚，因此留下诸多研究课题。

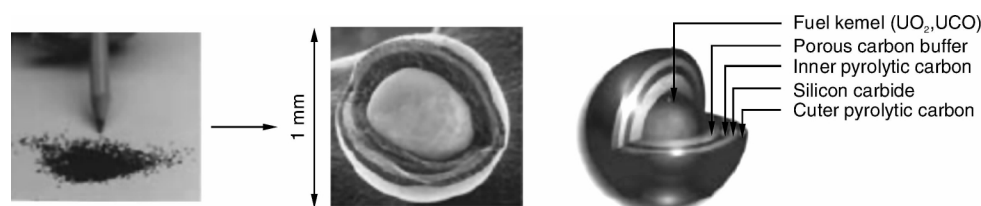


图 5 核燃料包覆颗粒结构示意图

Fig. 5 Basic configurations of particle fuel in the form of spheres coated with several layers

SiC 陶瓷基复合材料被认为是唯一可在高温条件下 ($\geq 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) 应用的聚变材料，对聚变发电和聚变制氢具有重要意义。主要应用有两方面：用做聚变堆中第一壁材料和适用于做高温冷却介质的材料 PbLi 的壁材料。这些应用涉及的研究内容主要包括：①第一壁 SiC/SiC 复合材料的研究与开发；②与 PbLi 相容性良好 SiC 插件的研究与开发；③满足 PbLi 与氦冷却介质的 SiC 热交换器材料的研究与开发；④SiC 陶瓷与 PbLi 的化学与物理

相容性研究；⑤满足不同用途的 SiC 陶瓷及其复合材料的制备与部件的设计；⑥应用环境下 SiC 陶瓷及其复合材料的评价技术及计算科学。

以上研究对于 ITER 装置的开发和应用具有重要的意义。

3.2 固体氧化物燃料电池 (SOFC)

电池、密封环、连接板是构成平板型电池堆的关键部件。电池堆的性能与寿命取决于这些关键部件的材料

是否过关,设计是否优化。为研发高性能的电池堆,非常有必要掌握这些部件/材料的规模化生产技术,建立规模化生产基地。目前,材料/技术的需求情况包括:①大面积平板型单电池的制备技术;②大尺寸管型单电池的制备技术;③平板型电池堆的设计、运行、控制技术;④大面积陶瓷与玻璃环的冷加工技术;⑤合金表面抗氧化涂层技术。面临的技术挑战包括:①单电池高功率密度与高稳定性之间的矛盾;②密封材料膨胀系数与软化点之间的矛盾;③合金连接板的高温抗氧化要求与表面保护膜的高电导率要求之间的矛盾;④连接板气流分布的优化;⑤各种材料间高温下的反应衰减。

计划在2020年实现1 MW级系统示范。为进一步设计SOFC-TG复合发电系统打下材料技术基础。需要突破的关键技术包括:①大面积单电池的低成本规模化制备;②密封材料与部件的冷/热加工技术;③合金连接板的高温抗氧化涂层技术;④连接板气流分布的优化模拟、加工与实验测试技术。

4 透明陶瓷

一般陶瓷不透明的原因是其内部存在杂质和气孔,前者能吸收光,后者令光产生散射,所以就不透明了。要使陶瓷透明,其前提是使光通过。入射到陶瓷的光,一部分被表面反射,一部分被内部吸收和散射,剩下的就成为透射光。陶瓷的相组成、晶体结构、晶界、气孔率和表面光洁度等是影响其透明性的主要因素。

透明陶瓷通常选用具有高对称性的立方晶系材料,如YAG, Y_2O_3 , Sc_2O_3 等。气孔是影响陶瓷材料透过率最重要的因素,由气孔引起的光散射远大于晶界区,甚至超过非主晶相和非晶相(玻璃相)等引起的散射损耗。杂质对陶瓷的透过率也有极大影响。杂质包括原料或工艺过程中由于污染而引入的杂质、有意

掺入的杂质和作为添加剂的杂质离子。当掺杂浓度高于溶解度上限时,则将出现第二相,第二相与主晶相形成界面,且折射率不同于主晶相,从而构成了新的光散射中心。因此如果选用高纯原料,并通过工艺手段排除气孔就可能获得透明陶瓷。早期就是采用这样的办法得到透明的氧化铝陶瓷,后来陆续研究出如烧结白刚玉、氧化镁、氧化铍、氧化钇、氧化钇-二氧化锆等多种氧化物系列透明陶瓷。近期又研制出非氧化物透明陶瓷,如氮化硅、砷化镓、硫化锌、硒化锌、氟化镁、氟化钙等。

透明陶瓷不仅具有优异的光学性能,而且作为陶瓷材料它同时具有高强度、高硬度、耐腐蚀、耐高温等优异性能。因此,在空间、计算机、激光、红外、新型光源、原子能、节能、医学、检测、勘探等方面均有广泛的应用前景。透明陶瓷的重要用途之一是制造照明所用高压钠灯灯管,高压钠灯的工作温度高达1200℃,钠蒸气压力大、腐蚀性强,它的发光效率比高压汞灯高一倍,使用寿命达2万小时,是使用寿命最长的高效电光源。氧化铝透明陶瓷作为灯管材料,是透明陶瓷的最早应用实例。随后,透明陶瓷的功能化应用开始受到了重视,近十几年来在固体激光器、X-射线荧光体和闪烁材料方面均有重要应用。在国防军事上,透明陶瓷又是一种很好的透明防弹材料,可做成飞机的风挡、坦克及装甲车的观察窗,还可以做成导弹等飞行器头部的雷达天线罩和红外线整流罩等等。此外,在光学应用方面,可以作为镜头材料。日本村田制作所研制出了透明陶瓷LURACERA,它具有和光学玻璃相同的透光率,但是其折射率($n_d=2.08$)大幅超过一般光学玻璃的折射率($n_d=1.5\sim 1.85$),并且具有高强度。目前已经用于卡西欧数码相机光学镜头,见图6^[54]。

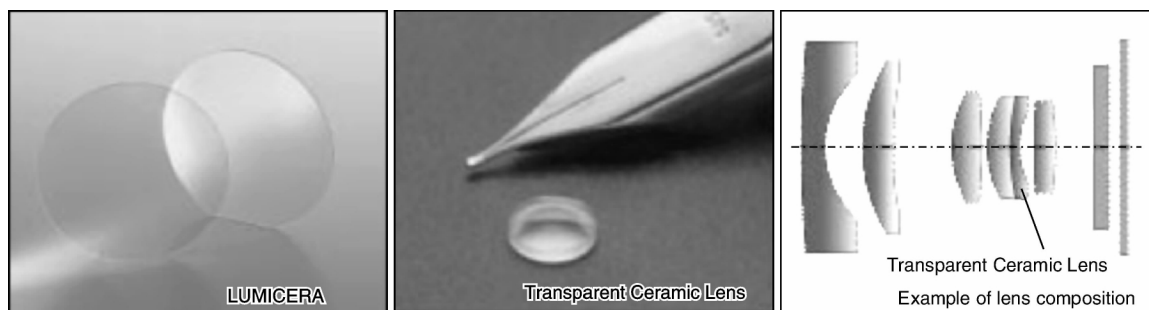


图6 用日本Murata Manufacturing Co., Ltd.研制的商品名LUMICERA材料制成的透镜及透镜光学系统

Fig.6 Lumicera material of Murata Manufacturing Co., Ltd. and transparent ceramic lens for CASIO camera

4.1 激光陶瓷

1966年,E. Camall等人制备了光学透明的 $Dy:CaF_2$ 陶瓷,并且在液氮温度下实现了激光振荡^[55]。

1973年,C. Greskovich等用传统的陶瓷烧结方法制备了NDY(Nddoped Yttralox)陶瓷激光器^[56]。并有毫瓦级输出,但没有得到实际应用。在相当长一段时间内激光

透明陶瓷发展缓慢。随着高纯纳米粉体的成功制备以及陶瓷制备科学与技术的不断突破,大部分具有立方晶系结构的体系都有可能制成透明多晶陶瓷。1995年,日本学者 A. Ikesue 等采用固相反应法制备出了高质量的 Nd:YAG 透明陶瓷,其折射率、热导率、硬度等物理性能与 Nd:YAG 单晶相似^[57]。同时他们研制出世界上第一台 Nd:YAG 陶瓷激光器,输出功率为 600 mW,斜率效率为 28%。1999 年,日本神岛化学公司 T. Yanagitani 领导的研究小组采用纳米技术和真空烧结方法制备了高质量的 Nd:YAG 透明陶瓷,其吸收、发射和荧光寿命等光学特性与单晶几乎一致。取得明显的进展是在 2000 年以后,由日本神岛公司和日本电气通信大学的 Ueda 小组^[58]共同开发出透明多晶 Nd:YAG 陶瓷,在波长 1 064 nm 输出功率达到 110 W,与单晶基本相当^[59]。随后研制成功 $\phi 100$ mm 单片,最高激光输出目前已达到 1.4 kW。光-光效率达 42%^[60]。2005 年底,美国达信公司的研究人员研制的 Nd:YAG 陶瓷激光器获得了 5 kW 的功率输出,持续工作时间为 10 s。2006 年美国 Livermore National Laboratory^[61]的固态热容激光器(见图 7)采用日本神岛化学公司提供的板条状 Nd:YAG 透明陶瓷(100 mm \times 100 mm \times 20 mm)实现了 67 kW 的功率输出,持续工作时间为 10 s,在 2~7 s 内可穿透 2.5 cm 厚的钢板(见图 7b)。从此,透明激光陶瓷正式成为大功率固体激光器的主要候选材料之一,同时在国际上掀起了透明陶瓷热。国内研究透明陶瓷的单位包括中国科学院上海硅酸盐研究所、东北大学、山东大学晶体材料研究所、清华大学、福建物质结构研究所、中非人工晶体研究院、四川大学、上海大学、武汉理工大学等。

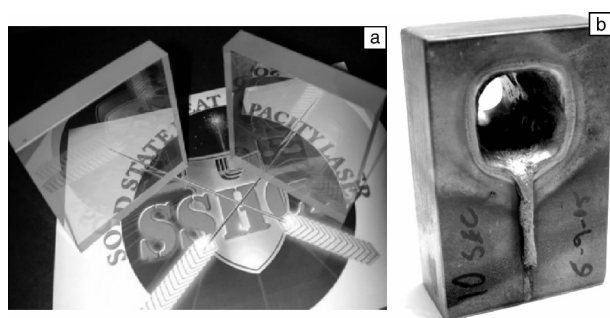


图7 Nd:YAG 透明激光陶瓷板条制成的固体热容激光器
(a) 及被穿透的钢板照片(b)

Fig. 7 Transparent Nd:YAG ceramic amplifier slab for Solid-State Heat Capacity Laser (SSHCL) (10 by 10 by 2 centimeters)
(a) and photo of the penetrated steel plate (b)

4.2 透明装甲陶瓷

透明装甲材料不仅需要光学透明,而且需要能够多次抵挡高速打击并且在打击点周围能够发生尽可能小的

变形。轻质、薄、具有耐击打能力的材料是透明装甲的首选材料。传统的透明装甲是厚的、粘接在一起的多层玻璃。普通平板玻璃、硼硅酸盐玻璃、熔融石英被用作透明装甲,用聚合物(如聚碳酸酯)作为界面层。界面层可以减轻由于热膨胀系数不匹配产生的应力,同时可以抑制裂纹扩展。The AREVA T&D Technology Centre (Stafford, UK)最近开发的玻璃陶瓷 TransArm 可以用做透明装甲。玻璃和玻璃陶瓷的优点是成本低、可制备成曲面、并且可以制作大尺寸的平板材料。

为了适应现代战场需求,既能保护人体又能随时观察敌情的新一代功能与结构一体化的透明装甲陶瓷迅速发展起来,以氮化铝 AlON、蓝宝石和镁铝尖晶石 $MgAl_2O_3$ 为代表的一类材料特别受到重视。相比传统材料,这种装甲材料具有强度高、重量轻的优点,对于防止子弹穿过武器装备窗户等透明件具有良好功效。

美国空军研究实验室材料与制造技术处正在从事 AlON 的试验工作,以代替目前在地面及空中交通工具上使用的传统多层玻璃透明件。AlON 是一种陶瓷材料,具有很高的压缩强度及良好的耐久性。抛光后,可作为武器装备的透明装甲使用。事实上,AlON 具有很强的抗划伤能力、抗冲击能力,并具有很强的耐久性、抗穿透性。质量及厚度大约为传统玻璃透明装甲的一半,从而使军队士兵在战场上具有更广、更清晰的视野,更利于看到外面的威胁并迅速做出决定,从而提高武器装备和人员的生存性和战斗力^[62]。

在射击试验中,透明装甲表现出优异的防弹性能。它能挡住 7.62 mm 口径的 M-44 狙击步枪和 12.7 mm 口径狙击步枪(相当于重型机枪)射出的穿甲子弹,普通防弹玻璃则做不到这一点。它甚至还能抵挡多发 7.62 mm 穿甲子弹的射击。7.62 mm 穿甲弹是典型的防空火力之一,因此新型透明装甲是制造战机挡风玻璃的理想材料。

据报道,目前研究表明透明装甲有可能在一年后装备部队。陆军准备把它用在“悍马”吉普等车辆上,空军则打算用它装备所有低空飞行、速度较慢的飞机,如 C-130“大力神”运输机、C-17“全球霸王”运输机、A-10“雷电”攻击机以及所有直升机^[63]。

4.3 透明闪烁陶瓷

透明闪烁陶瓷是能够有效吸收高能射线、 γ 射线或高能粒子并发出紫外光或可见光的一种功能材料。闪烁陶瓷可以把吸收到的能量转化成脉冲光,它们被光探测器光电倍增管或光电二极管接收后转化为相应的电信号,经过处理和分析后即可显示被测对象的结构或功能特征。由于闪烁陶瓷具有这种功能,所以被广泛用在医

疗诊断、工业检测、放射剂量测定、核医学、高能物理等辐射探测领域^[64-65]。

近年来,随着 X-CT(X-ray Computed Tomography), PET(Positron Emission Tomography)等辐射医疗设备的发展和普及,以及高能物理实验用的各种大型快速电磁量能器的规划和建立,对闪烁体提出了越来越高的性能要求,原有的闪烁材料已不能完全满足其要求。因此,近年来对光输出大、响应快、密度高、耐辐射的闪烁陶瓷的探索和研究十分活跃,并取得了长足的进展。

目前,世界上从事闪烁陶瓷研究的国家主要包括美国、中国、白俄罗斯、瑞士、波兰、巴西等,其中美国 GE 公司是最早从事闪烁陶瓷材料研究也是目前在该领域获得成果最多的机构。国内外目前研究的透明闪烁陶瓷主要包括 Ce:YAG , Ce:BaHfO_3 , $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$, $(\text{Y}, \text{Gd})_2\text{O}_3:\text{Eu}$, $\text{Pr}(\text{YGO})$, $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{S:Pr}$, Ce , $\text{F}(\text{GOS})$, 和 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Cr}$, $\text{Ce}(\text{GGG})$ 等。

2002 年,中国科学院上海硅酸盐研究所在国内率先开展了透明闪烁陶瓷的研究,相继涉及的材料体系包括 Eu^{3+} , $\text{Pr}^{3+}:\text{Lu}_2\text{WO}_6$ ^[66-67], $\text{Ce}:\text{YSAG}$ ^[68], $\text{Lu-Ba}_3\text{B}_5\text{O}_{18}$ ^[69], LuAG:Ce ^[70-71], BaBPO_3 ^[72-73], $\text{Eu:Gd}_2\text{O}_3-\text{HfO}_2$ ^[74], Ce:rHfO_3 ^[75] 和 $\text{La}_2\text{Hf}_2\text{O}_7:\text{Ti}$ ^[76] 等。图 8 是用钽掺杂氧化镧($\text{Eu:Lu}_2\text{O}_3$)透明陶瓷^[77-78]。

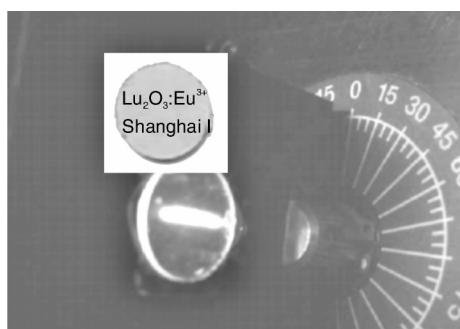


图 8 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ 透明闪烁陶瓷

Fig. 8 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ transparent scintillator ceramics

在透明陶瓷制备工艺研究方面,通过采用高纯、超细原料,掺入尽可能少的添加剂和工艺上的严格控制,将气孔和杂质充分排除并适当控制晶粒尺寸,使制品接近于理论密度,从而制备出透明陶瓷。因此,纳米粉体的制备引起很多学者的重视。为了制备出无气孔的陶瓷,通常需要细颗粒、尺寸分布窄、最佳的颗粒堆积(最小的气孔尺寸和最窄的气孔尺寸分布)等条件,确保所有气孔的尺寸小于初始粉体的平均颗粒尺寸^[79]。此外,为了提高透明陶瓷的致密度,压力已经被用来作为致密化的额外驱动力。热压、SPS 和热等静压烧结在商业上被用来制备完全致密的陶瓷。但是热等静压价格

昂贵并且容易引入污染,所以这种方法也只适用在少数几种陶瓷体系中。

到目前为止,在世界范围内,人们对需要精确控制的透明陶瓷制备科学与精细工艺尚缺乏深入系统的认知,对关键的基础的科学问题缺乏应有的把握,特别对于多晶材料的光物理特性的研究不够深入,因此阻碍了透明陶瓷学科的发展和相关材料的实际应用。这是下一步研究需要解决的关键问题。

5 生物陶瓷

生物材料通常可分为医用高分子材料、医用金属和合金材料、医用无机材料和复合材料。在生物材料中,生物陶瓷是材料科学与生命科学交叉的一个新领域,受到世界各国的重视。生物陶瓷是指与生命科学、生物技术、生物医学及生物老化等领域有关的陶瓷材料。随着全人类加速走向老龄化,以及交通事故、各种灾害造成伤残,对组织、器官的需求与日俱增。生物陶瓷主要作为生物硬组织的替代材料,用于骨科、整形外科、牙科、口腔外科、心血管外科、眼外科、耳鼻喉科及普通外科等方面,也可用于测量和诊断治疗等。作为硬组织的替代材料,主要分为生物惰性陶瓷和生物活性陶瓷。生物惰性陶瓷是指化学性能稳定,具有较高的机械强度和耐磨损性能,与机体组织生物相容性好的陶瓷材料。主要包括多晶氧化铝、单晶氧化铝、氧化锆、热结碳等材料。碳化硅、氮化硅等陶瓷在临床上也有一定的应用。此外,铈酸锂、锆钛酸铝和钛酸钡等也有应用,用作人体信息探测的压电传感器。生物活性陶瓷材料包括生物活性玻璃(磷酸钙系)、羟基磷灰石陶瓷、磷酸三钙陶瓷等几种^[80-81]。从组织工程发展的趋势来看,支架材料的研究方向是向拟生态技术发展,寻求一种结构和功能与人体骨相似,具有降解可调节性、合适的机械强度,且表面具有粘附、识别、引导、诱导成骨等作用,并能大量生产的组织工程化骨支架材料^[82]。

近年来随着介孔材料研究的发展,介孔材料在药物释放领域的应用成为一个新的热点。本文主要讨论介孔陶瓷在药物释放领域的应用。介孔材料为具有规则的孔道结构和化学均相性、较大的比表面积和孔容为纳米级的无机颗粒。众所周知,很多非常有疗效的抗癌药物(紫杉醇、喜树碱等)的水溶性都非常差,因而就阻碍了其通过静脉注射的方式被人体吸收。发展新型的、载药时不使用有机溶剂的药物载体引起了学者的广泛关注。由于大部分药物的分子是纳米级的,正好符合介孔材料的孔径,因此介孔材料可以应用于药物的吸附和释放^[83]。通过介孔材料分子的孔径调节以及表面修饰作

用,介孔材料可以对设定的目标分子进行选择性地吸附,如 Vallet-Regi 等人^[84-85]通过一系列介孔材料的修饰和调节作用,控制药物的释放特性,使介孔材料作为合适的药物载体。药物的直接包埋和控释也是有序介孔材料很好的应用领域。

最先开展这项工作的是 M. Vallet-Regi 教授,她于 2001 年首次使用 MCM-41 作为药物载体,运载水不溶性药物布洛芬(ibuprofen),并发现 MCM-41 能够延长药物的释放周期,压片法的释放周期比粉末法更长^[67-86]。2003 年 Fujiwara^[87]等研究人员采用在 MCM-41 孔道外接枝具有光致变效应的香豆素和 MCM-41 型硅合成了具有光响应性的体系,它可以在药物控制领域用作“光开关”控制药物的释放和储存。进一步,Zhu 等通过光控制合成了偶氮苯类化合物 N-(3-triethoxysilyl) propyl-4- phenylazobenzamide,并通过—Si—O—键将该分子的一端固定于介孔壁,介孔内的偶氮分子在紫外光—可见光的作用下,通过调节光源能够有效控制介孔内胆固醇分子的释放速率,并实现了胆固醇的快速释放。通过在介孔口部进一步组装具有光控开关分子,构筑了具有光控开关功能、光动力控释功能的纳米存储器件^[88]。

在改变外界温度、pH 值或者溶解盐的浓度的情况下,“智能型”刺激响应药物释放材料可使自身某些特性发生很大的变化,吸引了众多领域内科研工作者的注意。施剑林的研究课题发表“能在血管中通行的药物分子运输车”一文,获得了 2005 年中国十大科研进展。所谓“纳米运输车”,实际上是一种具有磁性,同时可以装载药物的纳米复合微球。复合微球的球径在 100 ~ 300 nm,尺寸分布单一,外层是多孔的氧化硅材料,孔道内可以装载药物分子,在磁场引导下可以定向传输。通过微球外层的聚电解质的层层包裹,可以实现药物的可控释放。装载的药物在沿途受控不会泄漏,直接引导到某一个特殊的疾病靶点,在人们需要的时候才释放出来,从而对疾病产生治疗作用。研究人员已在实验室成功完成用“运输车”装载消炎、止痛、抗癌等药物的装载控制释放和定向传输的实验,这项成果已发表在《美国化学学会会志》和德国《应用化学》等杂志上^[89-91]。纳米药物分子运输车的机理参考图 9 和图 10。图 9 是药物装载和可控释放机理的示意图。首先制备具立方贯穿孔道的介孔空心球,然后用聚电解质层层包裹(a)。在酸性条件下聚电解质层为开放状态,药物能够进入介孔空心球载体(b)。在碱性条件下(或低离子强度)聚电解质层闭合,药物不会释放(c)。应用时,在中性至酸性(或高离子强度)条件下,药物可以释放(即 pH 值控制

药物释放),且释放速率可控(e)。图 10 是药物靶向传输制备示意图。首先制备单一尺寸三氧化二铁微粒(红色颗粒),通过致密氧化硅和介孔氧化硅在微粒上的均匀复合,得到三氧化二铁微粒/氧化硅/纳米多孔氧化硅的复合微球。最后将复合微球中的三氧化二铁微粒还原成磁性四氧化三铁,最后得到尺寸均一的磁性多孔纳米复合微球。微球数量可根据用药量确定。在这种复合微球上再进行聚电解质的层层包裹,可得到具磁性靶向和可控释放于一体的纳米复合系统。

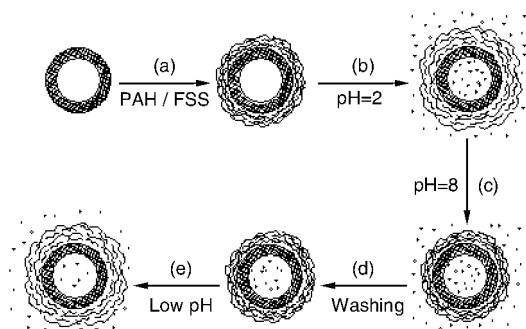


图 9 药物的高效装载与可控释放示意图

Fig. 9 Schematic illustration of the drug-delivery system which give the controlled release patterns

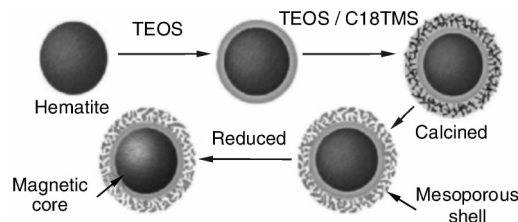


图 10 药物靶向传输制备示意图

Fig. 10 Scheme of the synthetic procedure of hollow magnetic mesoporous sphere (HMMS)

6 先进制备科学与技术

工艺制备过程和材料性能之间存在密切联系。陶瓷材料更是如此。陶瓷制造工艺过程主要包括 4 个阶段:原料制备、部件的坯体成型、陶瓷的致密化烧结、达到尺寸和表面光洁度要求的机加工。过去,陶瓷材料研究者多侧重通过改进粉体制备工艺或改进烧结工艺来改善制品的性能,而成型工艺一直是个薄弱环节,不被研究者所重视。现在,人们已经逐渐认识到在材料的制备过程中,成型是一个承上启下的关键技术。它不仅是材料设计和材料配方实现的前提,而且是降低陶瓷制造成本、提高可重复性和成品率的重要环节。但是,传统的陶瓷成型工艺可靠性低、成本高,难以制备复杂形状和

大尺寸的陶瓷部件,已经成为制约高性能陶瓷广泛应用的瓶颈,因此对陶瓷材料新成型方法的研究就十分迫切。

随着人们对陶瓷成型方法的重视,自20世纪80年代以来,一些新型的胶态成型技术(如直接凝固注模成型、凝胶浇注成型等)相继出现,并引起了人们的广泛重视。这些成型方法经过十几年的发展,在众多科研人员的努力下,已经取得了丰硕的成果。先进成型工艺包括直接凝固注模成型、凝胶注模成型,流延成型、冷冻干燥成型等以及目前开展的无模具快速成型技术等。本文将主要介绍凝胶注模成型和流延成型。

6.1 凝胶注模成型

凝胶注模成型是美国橡树岭国家重点实验室(Oak Ridge Laboratory)于20世纪90年代初发明的一种新型陶瓷成型技术^[92-93]。它是将高分子化学、胶体化学和陶瓷工艺学结合在一起的一种近净形状(near net-shape)成型方法。在凝胶注模成型中,陶瓷粉体分散于含有机单体和分散剂的溶液中,通过静电稳定或位阻稳定等胶态稳定机制,制成具有高固含量、低粘度的浆料。加入引发剂后注模成型,在一定条件下通过引发浆料中的单体发生自由基聚合反应,形成坚固的具有交联结构的聚合物,使浆料原位固化成型。再经脱模、干燥、去除有机物、烧结,即可制得所需的陶瓷部件。该技术的核心在于利用有机单体溶液形成具有一定强度和交联程度的凝胶。技术关键是制备高固相含量(体积分数不小于50%)、低粘度(约200~300 mPa·s)的陶瓷浆料,使得浆料填充模具过程与固化、成型过程分开进行,可近净成型各种形状复杂的陶瓷部件。这与传统的湿法成型工艺是不同的。凝胶注模成型的坯体形状仅取决于模具的形状,再加上素坯强度高,便于进行素坯机械加工,使得凝胶注模坯体可以具有复杂的形状和精确度^[94]。近年来,凝胶注模成型技术由于其成本低、工艺简单、成型坯体均匀性好、缺陷少、坯体强度高便于机械加工等诸多优点而受到各国陶瓷研究工作者的重视。凝胶注模成型已被用来成型从单组分体系到多组分复合体系,形状从块状到板状、管状、叶片、齿轮、涡轮转子、弹簧等多种具有复杂形状的陶瓷。其中单组分精密陶瓷有 Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC , ZrO_2 , ZTA等,多组分复合体系陶瓷有 Al_2O_3 - ZrO_2 , Al_2O_3 - MgO , Y-TZP, ZrB_2 - SiC , SiC - Si_3N_4 , Al_2O_3 / SiC 等。原料除了采用陶瓷粉末之外,还可以采用金属粉末如不锈钢、镍基高温合金、钨、铝合金(粉末冶金)等^[95]。从该法制备的陶瓷用途来看,除了用于结构陶瓷外,还有用作功能陶瓷,如 BaTiO_3 、钛酸铋钠、锆钛酸铅、 Al_2TiO_5 、电瓷、微波介质陶瓷

YSZ、透明陶瓷等的成型制备。此外,也用于多孔陶瓷、金属陶瓷、耐火材料、生物材料、纳米材料、复合材料等的成型^[96]等。

从国内外研究现状来看,主要研究工作包括以下3个方面。一是凝胶浇注浆料体系的基础研究工作。凝胶注模成型工艺的关键是制备高固含量、分散性和稳定性好的浆料。根据DLVO理论,可以通过调控浆料pH值、选择分散剂体系、粉体表面处理和改性等途径来进行调控^[97]。陶瓷浆料的流变性能与粉体的分散和坯体的成型质量密切相关。影响悬浮体流变性的因素很多,如分散剂,颗粒的表面、形状,悬浮介质的性质等,因此在凝胶注模过程中应充分考虑这些影响因素。二是陶瓷浆料的固化和后处理工艺研究。美国橡树岭国家实验室的Young AC等人研究了预混液温度随凝胶反应发生时间的变化,定义了反应的诱导期,并且指出了凝胶开始发生的时间和温度-凝胶点。影响聚合体系凝胶点的因素很多,温度、催化剂和引发剂的变化都会引起体系凝胶点的变化。国内外在这方面作了很多工作,提出了浆料的固化动力学和固化过程控制等。在此基础上,国内外学者进一步研究了凝胶注模成型样品的表面起皮现象^[98]、干燥^[99]、素坯性能^[100]、脱粘^[101]、烧结、微观结构和性能^[102]等。三是开发低毒或无毒的凝胶体系^[35]。尽管聚丙烯酰胺是安全的,但其单体丙烯酰胺和交联剂N,N-亚甲基双丙烯酰胺对动物神经系统存在一定的毒害性。随着全球环境保护意识和人类健康意识的日益增强,低毒或无毒体系的研究,成为陶瓷成型工艺的又一发展方向。目前,有毒的丙烯酰胺单体已逐渐被N-羟甲基丙烯酰胺^[103],丙烯酸羟乙酯^[104]或者甘油丙烯酸酯^[105]所取代。许多从动植物中提取的天然大分子都具有良好的凝胶特性,其中一类大分子,如琼脂糖、明胶^[106]、角朊素、纤维素^[107]等已被成功用于凝胶注模成型过程。此外,也有采用尿素-甲醛^[108]、环氧树脂^[109]、PVA^[110]等作为凝胶体系的报道。上海硅酸盐研究所详细研究了凝胶注模成型工艺,在浆料制备、流变性质控制和固化等方面取得了进展,成功制备了一系列氧化物和非氧化陶瓷,如 Al_2O_3 , ZrO_2 , HAp, SiC , TiC , B_4C 等^[111-114]。图11是具有复杂形状的各种凝胶注模素坯。

6.2 流延成型

流延成型(Tape Casting)^[115-116]是生产带状或片状材料的一种有效、经济的工艺手段。流延成型是将粉料与分散剂、粘结剂、塑化剂和溶剂混合,制备出可流动的粘稠浆料,然后将浆料均匀地流到或涂到基带上,浆

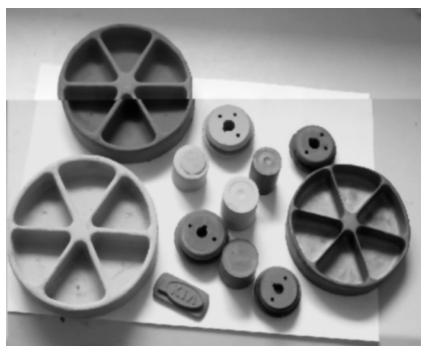


图 11 凝胶浇注成型素坯

Fig. 11 Green samples with complex shape by gelcasting

料流经可调间距的刀片后, 形成均匀膜层, 随后浆料被小心干燥, 得到薄且可挠曲的膜片。素坯膜的厚度一般为 $0.01 \sim 1 \text{ mm}$, 可在烧结前进行切割和叠层。这种成型方法在电子陶瓷工业中被广泛用来生产电容器、集成电路基板、铁电材料和催化剂载体等。流延成型按溶剂种类可分为水基和非水基两种, 非水基流延工艺相对成熟, 已经在生产中获得广泛应用。但随着环保意识的加强, 流延成型的重点已经逐渐转向水基流延。水基流延成型具有成本低、使用安全和便于大规模生产等优点, 但它也存在一些不足。如: 水对陶瓷粉料的润湿性能较差, 挥发慢, 干燥时间长, 对干燥工艺敏感, 容易出现裂纹缺陷; 浆料脱气困难, 影响坯体的质量等。

水基流延成型浆料是一个比较复杂的系统, 主要由陶瓷粉体、水、分散剂、粘结剂、塑性剂以及其它添加剂组成。研究关键包括粉体的分散和高浓、稳定浆料的制备, 粘结剂和塑性剂的选择, 浆料流变性质的调控以及干燥工艺的优化等。不同的陶瓷粉体, 表面性质和在水溶液中的带电状态也不同。因此, 针对不同性质和粒度的粉体, 可以选择不同性质、不同分子量的分散剂。常用乳液作为水基流延工艺用的粘结剂, 虽然添加乳液有利于保持浆料较高的固相含量, 但是, 乳液添加量往往比较高, 而且主要适用于氧化物体系。针对非氧化物如碳化硅、碳化钛等, 采用 PVA 作为粘结剂也可以得到高质量的薄膜^[117-118]。图 12 是采用水基流延制备的 SiC 素坯薄膜。

在国内外众多研究机构的研究下, 水基流延工艺取得了长足进展^[119-121]。解决了流延成型中的一系列关键问题, 包括陶瓷粉体的分散, 粘结剂和塑性剂的选择, 陶瓷浆料的优化等。经过一系列的研究, 许多陶瓷粉体, 如非氧化物 SiC^[122], Si₃N₄^[123], TiC^[118], TiN^[124], 和氧化物陶瓷 HAp^[125-126], Al₂O₃^[127], ZrO₂^[128], HAp/

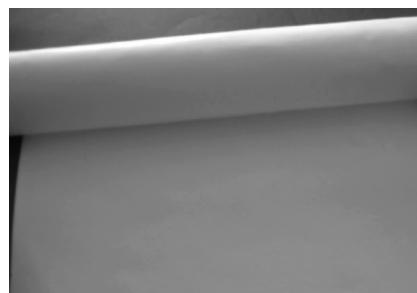


图 12 碳化硅水基流延薄膜照片

Fig. 12 Optical photograph of SiC green sheets by aqueous tape casting

ZrO₂^[129], AlN^[130]等都可以采用水基流延成型工艺进行成型。随着环境意识的增强, 低成本、环境相容性好的水基流延成型工艺必将获得进一步的发展和应用。

7 结 语

先进陶瓷材料因其优异的高温力学性能及特有的光、声、电、磁、热性能组合或多功能复合效应在高新技术产业、传统产业改造和国防军工等领域发挥着越来越大的作用。先进陶瓷今后的重点发展方向是加强工艺-结构-性能的设计与研究, 有效地控制工艺过程, 使其达到预定的结构(包括薄膜化、纤维化、气孔的含量、非晶态化、晶粒的微细化等)和性能。重视粉体标准化、系列化的研究与开发及精密加工技术, 降低制造成本, 提高制品的重复性、可靠性及使用寿命。探索绿色、环保的先进制备技术, 改善和优化材料的性能, 走出一条可持续发展的材料研发道路。

致谢: 董绍明博士、潘裕柏博士、施剑林博士、张景贤博士等为本文撰写提供了大量资料, 特此致谢。

参考文献 References

- [1] Jiang Dongliang(江东亮). 结构功能一体化的高性能陶瓷材料的研究与开发[J]. *Engineering Sciences*(中国工程科学), 2003, 5(2): 35-39.
- [2] Aveston J, Cooper G A, Kelly A. *The Properties of Fiber Composites* [M]. Bonn, Germany: IPC Science Technological Press, 1971: 63.
- [3] Fitzer E, Gadow R. Carbon Fiber Reinforced Silicon Carbide [J]. *Ceramic Components for Engines*, 1983: 505-518.
- [4] Lamicq P J, Bernhart G A, Dauchier M M, et al. SiC/SiC Composite Ceramics[J]. *Am Ceram Soc Bull*, 1986, 65(2): 336-38.
- [5] Naslain R. Design, Preparation and Properties of Non-Oxide CMCs for Application in Engines and Nuclear Reactors; an Overview[J]. *Comp Sci Tech*, 2004, 64(2): 155-170.

- [6] Kaya H. The Application of Ceramic-Matrix Composites to the Automotive Ceramic Gas Turbine[J]. *Comp Sci Tech*, 1999, 59(6): 861–872.
- [7] Cheng L F, Xu Y D, Zhang L T, *et al.* Effect of Glass Sealing on the Oxidation Behavior of Three Dimensional C/SiC Composites in Air[J]. *Carbon*, 2001, 9: 1 127–1 133.
- [8] He X B, Yang H. Preparation of SiC Fiber-Reinforced SiC Composites[J]. *J Mater Process Technol*, 2005, 159: 135–138.
- [9] 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.
- [10] Golczewski J A, Aldinger F. Phase Separation in Si-(B)-C-N Polymer Derived Ceramics[J]. *Materials Research and Advanced Techniques*, 2006, 97(2): 114–118.
- [11] Haug J, Lamparter P, Weinmann M, *et al.* Diffraction Study on the Atomic Structure and Phase Separation of Amorphous Ceramics in the Si-(B)-C-N System: 2Si-B-C-N Ceramics [J]. *Chemistry of Materials*, 2004, 16(1): 83–92.
- [12] Besmann T M, Sheldon B W, Lowden R A, *et al.* Vapor-Phase Fabrication and Properties of Continuous-Filament Ceramic Composites[J]. *Science*, 1991, 253: 1 104–1 109.
- [13] Naslain R, Lamon J, Pailler R, *et al.* Micro/Minicomposites: A Useful Approach to the Design and Development of Nonoxide CMCs[J]. *Composites: Part A*, 1999, 30: 537–547.
- [14] Dong S M, Katoh Y, Kohyama A, *et al.* Microstructural Evolution and Mechanical Performances of SiC/SiC Composites by Polymer Impregnation/Microwave Pyrolysis (PIMP) Process[J]. *Ceram Int*, 2002, 28: 899–905.
- [15] Dong S M, Katoh Y, Kohyama A. Processing, Optimization and Mechanical Evaluation of Hot Press 2D Tyranno-SA/SiC Composites[J]. *J Euro Ceram Soc*, 2003, 23: 1 223–1 231.
- [16] Dong S M, Katoh Y, Kohyama A. Preparation of SiC/SiC Composites by Hot Press, Using Tyranno-SA Fiber as Reinforcement[J]. *J Am Ceram Soc*, 2003, 86(1): 26–32.
- [17] Taguchi T, Igawa N, Yamada R, *et al.* Effect of Thick SiC Interphase Layers on Microstructure, Mechanical and Thermal Properties of Reaction-Bonded SiC/SiC Composites[J]. *J Phys Chem Solids*, 2005, 66: 576–580.
- [18] Fitzer E, Hegen D. Chemical Vapor Deposition of Silicon Carbide and Silicon Nitride—Chemistry's Contribution to Modern Silicon Ceramics[J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 1979, 18: 295–304.
- [19] Lamouroux F, Bourrat X, Sevely J, *et al.* Structural/Oxidation Behavior Relations in the Carboneous Constituents of 2D-C (T300)/PyC/SiC (CVI) Composites [J]. *Carbon*, 1993, 31(8): 1 273–1 288.
- [20] Zhou C, Zhang C, Hu H, *et al.* Preparation of 3D-Cf/SiC Composites at Low Temperatures[J]. *Mater Sci Eng A*, 2008, 488: 569–572.
- [21] Kohyama A, Singh M, Lin H T, *et al.* Advanced SiC/SiC Ceramic Composites: Developments and Applications in Energy Systems[J]. *Ceram Trans*, 2002, 144: 97–103.
- [22] Masaki Kotani, Takahiro Inoue, Akira Kohyama, *et al.* Effect of SiC Particle Dispersion on Microstructure and Mechanical Properties of Polymer-Derived SiC/SiC Composite[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 357(1–2): 376–385.
- [23] Zhu Y Z, Huang Z R, Dong S M, *et al.* Polymer-Filler Driven Ceramics with Low Shrinkage Using PCS/SiC/Al Mixture [J]. *Phys Status Solidi-R*, 2007, 1(2): 59–61.
- [24] Ding Yusheng(丁玉生), Dong Shaoming(董绍明), Gao Le(高乐), *et al.* 烧结温度对 Cf/SiC 复合材料结构及性能的影响[J]. *Journal of Inorganic Materials(无机材料学报)*, 2008, 23(6): 1 151–1 154.
- [25] Qin X H, Xiao B L, Dong S M, *et al.* SiCf/SiC Composites Reinforced by Randomly Oriented Chopped Fibers Prepared by Semi-Solid Mechanical Stirring Method and Hot Pressing[J]. *J Mater Sci*, 2007, 42(10): 3 488–3 494.
- [26] Dong Shaoming(董绍明), DingYusheng(丁玉生), Jiang Dongliang(江东亮), *et al.* 制备工艺对热压烧结 SiC/SiC 复合材料结构与性能的影响[J]. *Journal of Inorganic Materials(无机材料学报)*, 2005, 20(4): 883–888.
- [27] Ogbuji L U, Mitchell T W, Heuer A H, *et al.* Discussion of Microstructural Characterization of REFFL(Reaction-Bonded) Silicon Carbides[J]. *J Mat Sci*, 1979, 14: 2 267–2 274.
- [28] Zhou Q, Dong S M, Zhang X Y, *et al.* Fabrication of C-f/SiC Composites by Vapor Silicon Infiltration[J]. *J Am Ceram Soc*, 2006, 89(7): 2 338–2 340.
- [29] Yang W, Kohyama A, Noda T, *et al.* Interfacial Characterization of CVI-SiC/SiC Composites[J]. *J Nucl Mater*, 2002, 307–311: 1 088–1 092.
- [30] Suemitsu T, Motojima S. Formation of C/SiC Multilayer Coating on Si-Ti-C-O Fiber[J]. *Mater Sci and Eng B*, 2000, 78(2–3): 119–124.
- [31] Rebillat F, Lamon J, Naslain R J. Interfacial Bond Strength in SiC/C/SiC Composite Materials, As Studied by Single-Fiber Push-Out Tests[J]. *Am Ceram Soc*, 1998, 81(4): 965–978.
- [32] Rebillat F, Lamon J, Naslain R. Hi-Nicalon/SiC Minicomposites with (Pyrocarbon/SiC)_n Nanoscale Multilayered Interphases [J]. *J Am Ceram Soc*, 1999, 81(9): 2 315–2 316.
- [33] Droillard C, Lamon J. Fracture Toughness of 2D Woven SiC/SiC Composites with Multilayered Interphases [J]. *J Am Ceram Soc*, 1996, 79(4): 849–858.
- [34] Bertrand S, Forio P, Lamon J. Hi-Nicalon/SiC Minicomposites with (Pyrocarbon/SiC)_n Nanoscale Multilayered Interphases[J]. *J Am Ceram Soc*, 1999, 82(9): 2 465–2 473.
- [35] Yuan Ming(袁明), Huang Zhengren(黄政仁), Dong Sha-

- oming(董绍明), *et al.* 温度脉冲方法制备碳化硅复合材料界面的微观结构与性能研究[J]. *Journal of Inorganic Materials*(无机材料学报), 2007, 22(2): 305–310.
- [36] Zhou Q, Dong S M, Zhang X Y, *et al.* Carbon Fiber Surface Coating by Forced Pressure-Pulsed CVI[J]. *J Inorg Mater*, 2006, 21(6): 1 378–1 384.
- [37] Yuan M, Huang Z R, Dong S M, *et al.* Microstructure of Multi-Layered Interphases Processed by Temperature-Pulsing Chemical Vapor Infiltration[J]. *Phys Status Solidi A*, 2006, 203(8): 58–60.
- [38] Wang Z, Dong S M, Zhang X Y, *et al.* Fabrication and Properties of C-f/SiC-ZrC Composites[J]. *J Am Ceram Soc*, 2008, 91(10): 3 434–3 436.
- [39] Zhu Y Z, Huang Z R, Dong S M, *et al.* Manufacturing 2D Carbon-Fiber-Reinforced SiC Matrix Composites by Slurry Infiltration and PIP Process[J]. *Ceram Inter*, 2008, 34(5): 1 201–1 205.
- [40] Zhu Y Z, Huang Z R, Dong S M, *et al.* Pressureless Preparation and Properties of C/SiC Composites[J]. *J Inorg Mater*, 2007, 22(4): 685–689.
- [41] Zhu Y Z, Huang Z R, Dong S M, *et al.* Fabricating 2.5D SiCf/SiC Composite Using Polycarbosilane/SiC/Al Mixture for Matrix Derivation[J]. *J Am Ceram Soc*, 2007, 90(3): 969–972.
- [42] Zhang Litong(张立同), Cheng Laifei(成来飞). 连续纤维增韧陶瓷基复合材料可持续发展战略探讨[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报), 2007, 24(2): 1–6.
- [43] Ye Xiaoxie(叶晓霞译). 六种第四代反应堆概念[J]. *Nuclear Power Plant*(核电站), 2003(1): 16–18.
- [44] Guérin Y, Was G S, Zinkle S J, *et al.* Materials Challenges for Advanced Nuclear Energy Systems[J]. *Mrs Bulletin*, 2009, 34(1): 10–19.
- [45] Frank Carre, Trevor Cook, Tetsuaki Takeda. *Very High Temperature Reactor(VHTR) Research Plan*[EB/OL]. (2006–04–16)[2009–06–16]. <http://www.raphael-project.org/events/conf/FISA-2006/VHTR-Post-FISA-VF-160306.ppt>
- [46] Yvonand P, Carré F. Structural Materials Challenges for Advanced Reactor Systems[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 385(2): 217–222.
- [47] Bonal Jean Pierre, Kohyama Akira, Laan Jaap van der, *et al.* Graphite, Ceramics, and Ceramic Composites for High-Temperature Nuclear Power Systems[J]. *Mrs Bulletin*, 2009, 34(1): 28–34.
- [48] Boccaccini L V. Design Description Document for the Rebut P H. ITER: the First Experimental Fusion Reactor[J]. *Fusion Engineering and Design*, 1995, 27: 3–6.
- [49] Feng Kaiming(冯开明). ITER 实验包层计划综述[J]. *Physics of Nuclear Fusion and Plasma*(核聚变与等离子体物理), 2006, 26(3): 161–169.
- [50] Lu Suyan(卢苏燕). *ITER of Developing the New Energy to Start*(开发新能源的国际热核计划开始启动)[EB/OL]. (2006–05–25)[2009–04–15]. http://news.xinhuanet.com/newscenter/2006–05/25/content_4596055.htm.
- [51] Fusion for Energy. *Schematic Illustration of the Structure of ITER International Thermonuclear Experimental Reactor*[EB/OL]. [2009–06–15]. http://fusionforenergy.europa.eu/4_3_picture_gallery_en.htm.
- [52] Dr. Robert Steinberger-Wilckens. *Development Status of SOFC in Europe Progress Made and Prospects for Further Development*[EB/OL]. (2004–10–07)[2009–06–16]. http://www.6pr.pl/images/prezentacje/info/energy-conf/prezentacje/Robert_Steinberger_Wilckens.pdf.
- [53] Bernadette Geyer. *Solid Oxide Fuel Cell Technology in the United States*[EB/OL]. (2005–04–11)[2009–06–15]. http://www.iphe.net/docs/Meetings/Brazil_3–05/SOFC_Development%20_in_US.pdf.
- [54] Casio's Ceramic lens, Casio Co. *News*[EB/OL]. [2009–04–15]. <http://www.engadget.com/2004/08/02/casios-transparent-ceramic-lens/>.
- [55] Camell E, Hatch S E, Parson W F, *et al.* *Materials Science Research*[M]. New York: Plenum, 1966: 165.
- [56] Greskovich C, Chemoch J P. Polycrystalline Ceramic Lasers[J]. *J Appl Phys*, 44(1973): 4 599.
- [57] Ikesue A, Kinoshita T, Kamata K, *et al.* Fabrication of Polycrystalline, Transparent YAG Ceramics by A Solid-State Reaction Method[J]. *J Am Ceram Soc*, 1995, 78(4): 1 033–1 040.
- [58] Lu J, Yagi H, Takaichi K, *et al.* *High Power Ceramic Nd³⁺: Y₃Al₅O₁₂ Laser. Lasers and Electro-Optics*[EB/OL]. [2009–04–15]. <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=CLEO-2004-CTuT1>.
- [59] Lu J, Yagi H, Takaichi K, *et al.* 110 W Ceramic Nd³⁺: Y₃Al₅O₁₂ Laser[J]. *Appl Phys B*, 2004, 79(1): 25–28.
- [60] Jianren Lu, Ken-ichi Ueda, Hideki Yagi, *et al.* Neodymium Doped Yttrium Aluminum Garnet(Y₃Al₅O₁₂) Nanocrystalline Ceramics-a New Generation of Solid State Laser and Optical Materials[J]. *J Alloys Comp*, 2002, 341(1/2): 220–225.
- [61] Lawrence Liver. Transparent Ceramics Spark Laser Advances[J]. *S&TR*, 2006: 10–17.
- [62] China BMI(中国建材网). *The Experiment on USAF Developing the New Transparent Ceramics Armor Materials*(美国空军开展新型透明陶瓷装甲材料的试验)[EB/OL]. (2005–11–18)[2009–06–15] <http://www.bmlink.com/news/message/22708.html>.
- [63] Yu Fu(于夫). *USAF: The Transparent Armor Materials does not fear the Heavy Machine Gun*(美国空军:透明装甲不怕重机枪)[EB/OL]. (2005–11–05)[2009–06–15]. http://news.xinhuanet.com/mil/2005–11/05/content_3734149.htm.
- [64] Greskovich C, Duclos S. Ceramic Scintillators[J]. *Annual Review of Materials Science*, 1997, 27: 69–88.

- [65] Chen Qiwei(陈启伟), Shi Ying(施 鹰), Shi Jianlin(施剑林). 陶瓷闪烁材料最新研究进展[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*(材料科学与工程学报), 2005, 23(1): 128–132.
- [66] Li H L, Liu X J, Huang L P. Fabrication of Transparent Cerium-Doped Lutetium Aluminum Garnet (LuAG: Ce) Ceramics by a Solid-State Reaction Method[J]. *J Am Ceram Soc*, 2005, 88(11): 3 226–3 228.
- [67] Chen Q W, Shi Y, An L Q, *et al.* Fabrication and Photoluminescence Characteristics of Eu^{3+} -Doped Lu_2O_3 Transparent Ceramics[J]. *J Am Ceram Soc*, 2006, 89(6): 2 038–2 042.
- [68] Feng T, Shi J L, Jin X G, *et al.* Effect of Sc Substitution for Al on the Optical Properties of Transparent Ce: YSAG Ceramics[J]. *J Am Ceram Soc*, 2008, 91(7): 2 394–2 397.
- [69] Duan C J, Li W F, Yuan J L, *et al.* Synthesis, Crystal Structure and X-Ray Excited Luminescent Properties of $\text{LuBa}_3\text{B}_9\text{O}_{18}$ [J]. *J Alloy Compd*, 2008, 458(1–2): 536–541.
- [70] Li H L, Liu X J, Xie R J, *et al.* Cerium-Doped Lutetium Aluminum Garnet Phosphors and Optically Transparent Ceramics Prepared from Powder Precursors by A Urea Homogeneous precipitation Method[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2008, 47(3): 1 657–1 661.
- [71] Li H L, Liu X J, Xie R J, *et al.* Fabrication of Transparent cCerium-Doped Lutetium Aluminum Garnet Ceramics by Co-Precipitation Routes[J]. *J Am Ceram Soc*, 2006, 89(7): 2 356–2 358.
- [72] Duan C J, Wu X Y, Li W F, *et al.* $\text{Ba}_3\text{BP}_3\text{O}_{12}$: Eu^{2+} -A Potential Scintillation Material [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(20): 201 917.
- [73] Duan C J, Yuan J L, Zhao J T. Luminescence Properties of Efficient X-ray Phosphors of $\text{YBa}_3\text{B}_9\text{O}_{18}$, $\text{LuBa}_3(\text{BO}_3)_3$, $\alpha\text{-YBa}_3(\text{BO}_3)_3$ and LuBO_3 [J]. *J Solid State Chem*, 2005, 178(12): 3 698–3 702.
- [74] Chen J Y, Shi Y, Feng T, *et al.* Synthesis of Eu^{3+} Doped $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$ Nanopowder for Radiation Detection [J]. *J Alloy Compd*, 2005, 391(1–2): 181–184.
- [75] Ji Y M, Jiang D Y, Qin L S, *et al.* Preparation and Luminescent Properties of Nanocrystals of Ce^{3+} -Activated SrHfO_3 [J]. *J Cryst Growth*, 2005, 280: (1–2)93–98.
- [76] Ji Y M, Jiang D Y, Shi J L. $\text{La}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$: Ti^{4+} Ceramic Scintillator for X-Ray Imaging[J]. *J Mater Res*, 2005, 20(3): 567–570.
- [77] Chen Qiwei, Shi Ying, An Liqiong, *et al.* Fabrication and Photoluminescence Characteristics of Eu^{3+} -Doped Lu_2O_3 Transparent Ceramics[J]. *J Am Ceram Soc*, 2006, 89(6): 2 038–2 042.
- [78] Chen Qiwei(陈启伟). *Preparation and Optical Spectroscopy of Rare Earth Ions Doped Lutetium-Based Phosphors and Sintered Transparent Ceramics*(稀土离子掺杂镧基荧光粉和透明陶瓷的制备与光谱性能研究)[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Ceramics Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [79] Messing Gary L, Stevenson Adam J. Toward Pore-Free Ceramics [J]. *Science*, 2008, 322: 383–384.
- [80] Zhang Yuan(张 媛). *Fabrication and Properties of Porous and Grading Porous Hydroxyapatite Bioceramics*(多孔及梯度多孔羟基磷灰石生物陶瓷的制备和性能研究)[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Ceramics Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [81] Li Shipu(李世普), Chen Xiaoming(陈晓明). *Introduction of Biomedical Materials*(生物医用材料导论)[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press. 2000: 92.
- [82] Ding Jinyong(丁金勇), Ji Anmin(靳安民). 生物支架材料在骨组织工程中的研究进展[J]. *Orthopedic Journal of China*(中国矫形外科杂志), 2006, 14: 56–58.
- [83] Martin C R, Kohli P. The Emerging Field of Nanotube Biotechnology[J]. *Nat Rev Drug Discov*, 2003, 2: 29–37.
- [84] V Regi M, Ramila A, Real R P, *et al.* A New Property of MCM-41: Drug Delivery System[J]. *Chem Mater*, 2001, 13: 308–311.
- [85] Horcajada P, Ramila A, Pariente J P, *et al.* Influence of Pore Size of MCM-41 Matrices on Drug Rate[J]. *Microporous Mesoporous Mater*, 2004, 68: 105–109.
- [86] Zhao Anxinhg(赵安幸). Study on Drug Absorb and Release Character for Mesoporous Nanomaterials(介孔材料的药物吸附、释放特性研究)[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [87] Mal N K, Fujiwara M, Tanaka Y. Photocontrolled Reversible Release of Guest Molecules from Coumarin-Modified Mesoporous Silica[J]. *Nature*, 2003, 421(6 921): 350–353.
- [88] Zhu Yingchun, Fujiwara Masahiro. Installing Dynamic Molecular Photomechanics in Mesopores: A Multifunctional Controlled-Release Nanosystem [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2007, 46(13): 2 241–2 244.
- [89] Zhu Y F, Shi J L, Shen W H, *et al.* Stimuli-Responsive Controlled Drug Release from A Hollow Mesoporous Silica Sphere/Polyelectrolyte Multilayer Core-Shell Structure[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2005, 44: 5 083–5 087.
- [90] Zhao W R, Gu J L, Zhang L X, *et al.* Fabrication of Uniform Magnetic Nanocomposite Spheres with a Magnetic Core/Mesoporous Silica Shell Structure[J]. *J Am Chem Soc*, 2005, 127: 8 916–8 917.
- [91] Zhao W R, Gu J L, Zhang L X, *et al.* Fabrication of Uniform Magnetic Nanocomposite Spheres with A Magnetic Core/Mesoporous Silica Shell Structure[J]. *J Am Chem Soc*, 2005, 127(25): 8 916–8 917.
- [92] Omatete O O, Janney M A, Walls C A. Gelcasting A New Ceramic forming Process [J]. *Am Ceram Soc Bull*, 1991, 70(10): 1 641–1 649.
- [93] Omatete O O, Janney M A, Nunn S D. Gelcasting from Laboratory Development Toward Industrial Production[J]. *J Euro Ceram Soc*, 1997, 17: 407–413.

- [94] Tari G. Gelcasting Ceramics: A Review[J]. *Am Ceram Soc Bull*, 2003, 82(4): 43–47.
- [95] Erk KA, Dunand D C, Shull K R. Titanium with Controllable Pore Fractions by Thermo Reversible Gelcasting of TiH_2 [J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(18): 5 147–5 157.
- [96] Saadat S, Maleksaeedi S, Paydar MH, *et al.* Fabrication of Alumina/Zirconia (YSZ) Nanocomposites by Gelcasting Process [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2008, 22(18–19): 3 237–3 246.
- [97] Omatete O O, Colic M. Gelcast Slurry Enhancement[J]. *Ceram Eng Sci Proc*, 1999, 20(3): 233–240.
- [98] Shen L Y, Liu M J, Liu X Z, *et al.* Investigation of the Influencing Factors on Surface Exfoliation on $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ Green Bodies Prepared by Gelcasting[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 464(1–2): 63–67.
- [99] Kochanowski A, Dziembaj R, Molenda M, *et al.* Dehydration of Polymeric Hydrogels Designed for Gelcasting Method in Ceramics[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2007, 88(2): 499–502.
- [100] Vljajic MD, Kistic VD. Strength and Machining of Gelcast SiC Ceramics[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(14): 2 943–2 947.
- [101] Ma L G, Huang Y, Yang J L, *et al.* Control of the Inner Stresses in Ceramic Green Bodies Formed by Gelcasting[J]. *Ceramics International*, 2006, 32(2): 93–98.
- [102] Chen B Q, Zhang Z Q, Zhang J X, *et al.* Aqueous Gel-Casting of Hydroxyapatite [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 435: 198–203.
- [103] Li Xin(李鑫), He Zhen(何真), Liu Guishan(刘贵山), *et al.* N-羟甲基丙烯酰胺体系凝胶注模成型氧化铝陶瓷[J]. *Journal of Dalian Institute of Light Industry(大连轻工业学院学报)*, 2005, 24(2): 79–83.
- [104] Cai K, Huang Y, Yang J L. A Synergistic Low-Toxicity Gelcasting System by Using HEMA and PVP[J]. *J Am Ceram Soc*, 2005, 88(12): 3 332–3 337.
- [105] Tallon C, Moreno R, Nieto MI, *et al.* Gelcasting Performance of Alumina Aqueous Suspensions with Glycerol Monoacrylate: A New Low-Toxicity Acrylic Monomer[J]. *J Am Ceram Soc*, 2007, 90(5): 1 386–1 393.
- [106] Xie Zhipeng(谢志鹏), Huang Yong(黄勇), Chen Yali(陈亚丽), *et al.* 酶催化明胶原位凝固成型陶瓷坯体的研究[J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society(硅酸盐学报)*, 1999, 27(5): 527–532.
- [107] Li Y, Guo Z M, Hao J J, *et al.* Gelcasting of Metal Powders in Nontoxic Cellulose Ethers System[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 208(1–3): 457–462.
- [108] Prabhakaran K, Pavithran C. Gelcasting of Alumina Using Urea-Formaldehyde II. Gelation and Ceramic Forming[J]. *Ceramics International*, 2000, 26: 67–71.
- [109] Mao X J, Shimai S Z, Dong M J, *et al.* Gelcasting of Alumina Using Epoxy Resin as A Gelling Agent[J]. *J Am Ceram Soc*, 2007, 90(3): 986–988.
- [110] Chabert F, Dunstan D E, Franks G V. Cross-Linked Polyvinyl Alcohol as A Binder for Gelcasting and Green Machining [J]. *Journal of The American Ceramic Society*, 2008, 91(10): 3 138–3 146.
- [111] Chen Biqin, Zhang Zhaoquan, Zhang Jingxian, *et al.* Aqueous Gel-Casting of Hydroxyapatite [J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, 435: 198–203.
- [112] Zhang Tao, Zhang Zhaoquan, Zhang Jingxian, *et al.* Preparation of SiC Ceramics by Aqueous Gelcasting and Pressureless Sintering[J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, 443(1–2): 257–261.
- [113] Zhang J X, Jiang D L, Tan S H, *et al.* Aqueous Processing of SiC Green Sheets: I, Dispersant[J]. *Journal of Materials Research*, 2002, 17(8): 2 012–2 018.
- [114] Zhang Tao, Zhang Zhaoquan, Dong Manjiang, *et al.* The Influence of Polyethylene Imine on the Gelcasting of SiC with Two Different Initiators[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90(12): 3 748–3 752.
- [115] Jiang Dongliang(江东亮主编). *Advanced Ceramic Material(精细陶瓷材料)*[M]. Beijing: China Logitics Publishing House, 2000.
- [116] Onoda G Y, Hench L L, eds. *Ceramics Processing Before Firing* [C]. New York: Wiley-Interscience, 1978.
- [117] Zhang J X, Jiang D L, Tan S H, *et al.* Aqueous Processing of TiC Green Sheets[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, 84(11): 2 537–2 541.
- [118] Zhang J X, Jiang D L, Tan S H, *et al.* Aqueous Processing of SiC Green Sheets: II, Binder, Plasticizer[J]. *Journal of Materials Research*, 2002, 17(8): 2 019–2 025.
- [119] Moreno R. The Role of Slip Additives in Tape-Casting Technology: Part I-Solvents and Dispersants[J]. *Am Ceram Soc Bull*, 1992, 71(10): 1 521–1 531.
- [120] Moreno R. The Role of Slip Additives in Tape Casting Technology [J]. *Am Ceram Soc Bull*, 1992, 71(11): 1 647–1 657.
- [121] Hotza D, Greil P. Review: Aqueous Tape Casting of Ceramic Powders[J]. *Mater Sci Eng*, 1995: 206.
- [122] Zhang Jingxian, Jiang Dongliang, Iwasa Mikio. Dispersion of SiC in Aqueous Media with Al_2O_3 and Y_2O_3 as Sintering Additives[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 88(4): 1 013–1 016.
- [123] Bitterlich B, Heinrich J G. Aqueous Tape Casting of Silicon Nitride[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2002, (22): 2 427.
- [124] Zhang J X, Duan Liping, Jiang D L, *et al.* Dispersion of TiN in Aqueous Media [J]. *Journal of Colloid and Interface Sci-*

- ence, 2005, 286(1): 209-215.
- [125] Zhang Jingxian, Maeda Masahiko, Kotobuki Noriko i, et al. Aqueous Processing of Hydroxyapatite[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2006, 99(2-3): 398-404.
- [126] Tian Ting, Jiang Dongliang, Zhang Jingxian, et al. Aqueous Tape Casting Process of Hydroxyapatite[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, 27(7): 2 671-2 677.
- [127] Doreau F, Tari G, Pagnoux C, et al. Processing of Aqueous Tape Casting of Alumina with Acrylic Emulsion Binders[J]. *J Eur Ceram Soc*, 1998(18): 311.
- [128] Snijders F, Wilde A, Mullens S, et al. Aqueous Tape Casting of Yttria Stabilised Zirconia Using Natural Product Binder[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2004, 24: 1 107.
- [129] Zhang Jingxian, Kotobuki Noriko, Tanaka Toshi, et al. Fabrication of Hydroxyapatite-Zirconia Composites for Orthopedic Applications[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(11): 3 348-3 355.
- [130] Luo Xiaojun, Zhang Baolin, Li Wenlan, et al. Preparation of Aluminum Nitride Green Sheets by Aqueous Tape Casting[J]. *Ceram Int*, 2004, 30: 2 099.

中国材料研究学会五届二次理事会在北京召开

2009年12月19日中国材料研究学会五届二次理事会在北京科技大学会议中心召开。本次大会主要议题是“2009年工作总结及2010年工作设想”。大会由上午报告和下午讨论两部分构成。五届理事会理事长黄伯云和副理事长徐坚分别主持了上、下午的会议，五届理事会秘书长韩雅芳教授代表理事会做了工作报告，出席本次会议理事和代表达到100余人。

黄伯云理事长首先肯定了学会的理事们对本学会工作的大力支持。他说，本次会议有这么多理事在百忙中来参会，有的理事由于工作实在脱不开身而不能参会还专门向理事长和秘书处请了假，这说明我们的大多数理事对学会的工作是认真负责的，他期望要把这一好的传统保持下去。韩雅芳秘书长代表学会做了“2009年工作总结及2010年工作初步设想”的报告。她在报告中说：2009年是中国材料研究学会各项工作取得较大成绩的一年，学会在中国科协的领导下，充分发挥学会是国家创新体系的重要组成部分的积极作用，在学会领导和广大材料工作者的积极参与下，开创了学会工作的新局面；在国内外学术交流方面，成功举办了“第二届世界材料峰会”、“2009年中国材料研讨会暨大型展览会”和“2009新材料发展趋势研讨会”，其中的“第二届世界材料峰会”是由国际材联委托中国材料研究学会主办，美国、欧洲材料学会协办的全球性高层会议，主题是“新能源材料与社会可持续发展”，有140多位中、外的世界顶级科学家、产业经营和政府官员参加，就太阳能与光伏材料、核能材料、储氢材料与燃料电池、环境友好电池材料、生物智能材料和其他替代新能源材料等6个方面展开了讨论，形成了“苏州宣言”；在政府咨询服务方面，参与了国家“培育新兴产业”战略咨询服务，使新材料成为国家重点培养新兴产业之一，参与了国家发改委高新司关于“十二五新材料产业发展规划”的预研咨询，编写了“2009年中国新材料产业发展报告”；在新材料产业工作方面，2009年是学会成立产业工作委员会的第一年，产业工作取得很大成绩，以上海张堰新材料深加工产业园为试点单位，开展了面向产业集群的全方位的服务工作并筹划共建联合研发中心和企业培训中心，建立了与苏州、邢台、固安、天津等开发区的长期合作关系，举办了大型新材料展览会3次，并着手筹办明年上海新材料博览会；在会员服务方面，评出材料学会科学技术奖4项，举办了论文写作培训班，加强了学会网络建设；在国际交流方面，学会积极参与国际材联工作，有两位学会领导成为国际材料执委，并多次参与了国外材料学会和国际材联的学术活动。韩雅芳秘书长对学会明年工作的初步设想是：在做好学术、产业、咨询、会员服务、国际交流等各方面工作的同时，还要加大会组织工作、会员服务和科普方面的工作。副理事长分别作了年度总结发言。欧阳世翥代表奖励、咨询工作委员会，徐坚代表学术工作委员会，高瑞平代表财务工作委员会，屠海令代表产业工作委员会，李光宪代表教育工作委员会，范守善代表出版工作委员会分别做了工作情况的报告，青工委、环境、磁材、计算、疲劳、超导、非晶等二级分会的代表们也做了工作情况报告。接下来大会还表决通过了增补3位理事和同意向科协申报热电、粉末冶金两个二级分会的提案。下午的会议，由学会正、副理事长，正、副秘书长，常务理事及理事代表对2009年工作总结及2010年的工作计划进行了审议讨论。大家畅所欲言，对学会工作提出了许多宝贵意见。黄伯云理事长、徐坚副理事长要求对这些意见进行认真整理，逐项落实，并强调学会的工作要上下联动，人人参与，努力使中国材料研究学会2010年的各项工作上一个新台阶。

(本刊通讯员)