

文章编号: 1000-324X(2003)04-0716-09

木材陶瓷研究进展

钱军民, 金志浩, 乔冠军

(西安交通大学材料学院金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 回顾了一类新型环境材料——木材陶瓷的研究进展。木材陶瓷具有电磁屏蔽、温度-湿度传感和耐磨擦性能等优异性能, 以及特殊的结构特征, 使其在功能陶瓷方面具有美好的应用前景。介绍了碳木材陶瓷和 SiC 木材陶瓷的制备方法、结构和各种性能, 以及制备机理。以制备 β -SiC 为例, 详细介绍了 Si 在碳模板中的渗入和反应机理, 并提供了相应的渗入-反应模型。对其他碳化物和氧化物木材陶瓷的研究进行了简要介绍。最后, 探讨了木材陶瓷目前存在的问题与相应对策, 并对其发展前景进行了展望。

关 键 词: 木材陶瓷; 组织遗传性; 环境材料; 渗入-反应机理

中图分类号: TB383 **文献标识码:** A

1 引言

结构仿生材料由于具有密度低、比强度大、抗破坏力强等特性而受到人们的重视^[1]。其中研究最多的是生物矿化作用。但生物矿化过程一般在低于 100°C 的情况下进行, 反应速度低, 难于批量生产。若用多孔生物材料在高温下以液相或气相渗入剂进行反应性渗入, 制备时间将会大大缩短, 如黄麻和棉线用 TiCl_4 和 Si_3N_4 浸渍后经高温处理可原位生成 TiO_2 纤维和 SiC 纤维^[2,3]。最近, 如何将具有多级孔结构的木材转变成相应结构的陶瓷材料, 即木材陶瓷, 引起了学者们高度的重视。木材陶瓷是指以木材为主要原料, 经过适当的物理、化学反应等过程后, 得到的最终产物为碳材料、碳化物或氧化物陶瓷或陶瓷基复合材料。

废弃木质材料, 如废弃木料、纸、农作物秸秆等, 若不经适当处理, 就会给环境带来负担。若将其制成陶瓷, 不仅对减少环境污染具有重要意义, 而且可以开发出新型环境友好型陶瓷材料^[4]。在日本的冈部敏弘和斋藤幸司于 1990 年成功开发出碳木材陶瓷以后, 木材陶瓷的研究就引起了学术界的普遍关注。经过十余年的不断努力, 已取得了很大进展。

2 碳木材陶瓷

2.1 碳木材陶瓷的制备

近年来, 模拟植物的天然结构设计新颖功能陶瓷引起了人们的重视, 如 Nienhuis^[5] 模拟具有抗粘性质的植物表面的微观结构, 制成了具有自清洁和疏水性质的表面结构。目前, 以木材为原料制备多孔陶瓷已成为结构仿生陶瓷的一个重要研究方向。

收稿日期: 2002-06-10, 收到修改稿日期: 2002-09-12

基金项目: 国家自然科学基金 (50272051)

作者简介: 钱军民 (1976-), 男, 博士研究生。E-mail: xianqjm@163.com

碳木材陶瓷是以木材或木质材料和浸渍剂为主要原料, 经过浸渍、干燥、固化和高温保护气氛下碳化得到的碳质多孔材料, 其浸渍剂有热固性树脂和液化木材^[6]. 其中, 应用较多的热固性树脂是酚醛树脂. 浸渍常采用低压超声波技术, 以提高浸渍量和均匀性. 其典型的工艺流程如图 1 所示.

根据应用环境和对物理性能要求的不同, 木材陶瓷可以制成块状、棒状和薄膜等形状^[7,8]. 影响木材陶瓷结构和物理性能的主要工艺因素有碳化温度和碳化速率等. 如在利用等离子体射频溅射技术制备碳木材陶瓷薄膜时, 当基质温度从 100°C 升高到 300°C 时, 其可由绝缘状态转变为半导体状态^[9]. 在制备块状碳木材陶瓷时, 当碳化温度从 400°C 升高到 650°C 时, 压缩强度可从 14MPa 升高到 22MPa, 而体积电阻率则从 $10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ 急剧降到 $10\Omega\cdot\text{cm}$ ^[10].

2.2 碳木材陶瓷制备机理与结构

木材的主要成分是纤维素、半纤维素和木质素等, 其 C 元素含量约为 50wt%. 木材是由管胞结构组成的, 具有多层次的网络结构: 毫米量级的年轮、几十到一百微米量级的导管以及微米量级的细胞.

木炭的结构主要依赖于木材的原始结构. 半纤维素、纤维素和木质素的主要热解过程分别发生在 200~260°C、240~350°C 和 280~500°C^[11]. 其中, 纤维素的碳化机理^[12]如下: (1) 150°C 以下, 吸附水脱附; (2) 150~240°C 纤维素脱水; (3) 250~400°C 发生脱氢和解聚反应, 纤维素单元环内的 C-O、C-C 键断裂, 放出 H₂O、CO、CO₂ 等气体; (4) 400°C 以上, 分子内和分子间脱氢、脱甲烷, 芳构化形成并重排桥式结构^[13], 同时产生木醋酸; (5) 高于 800°C, 降解和重排反应基本完成, 留下碳模板, 剩余 H 脱去, 缺陷愈合, 碳的结晶度随温度升高而增大; (6) 1500°C 时无定形碳开始转化为石墨碳, 到 2000°C 时基本结束^[14]. 而酚类化合物在 300~400°C 发生解聚、脱氢而形成桥式结构, 在 400°C 以上发生缩聚作用, 500°C 以上发生脱甲烷化和脱氢作用而形成芳香多核结构^[15].

碳木材陶瓷制备过程中, 木材和酚醛树脂均生成碳, 但他们的形态却不一样. 木材形成无定形的软碳, 酚醛树脂玻璃态的硬碳. 其中玻璃碳是难于石墨化的. 因此, 碳木材陶瓷是由无定形碳和玻璃碳组成的多孔碳复合材料. Oberlin^[16] 认为木炭含有无定形 (B)、层堆积结构 (T, turbostratic) 和石墨 (G) 三种形态, 并且随着碳化温度的升高, T 和 G 组分含量升高, 而 B 组分含量下降. Cheng^[17] 对木材陶瓷研究的结果证实了这一观点.

2.3 碳木材陶瓷的主要性能

2.3.1 电磁屏蔽性能

碳木材陶瓷具有优异的电磁屏蔽效果, 这是因为碳木材陶瓷具有导电性, 可以防止电

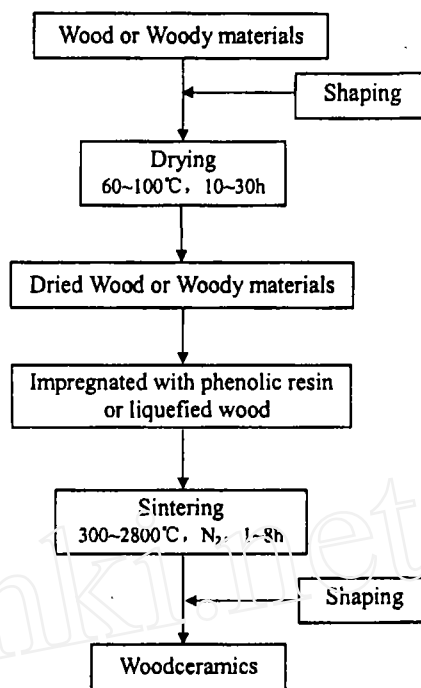


图 1 碳木材陶瓷的制备工艺流程

Fig. 1 Processing scheme of carbon woodceramics

电磁波的透过,且可通过多孔结构产生的散射和吸收作用使内部的反射波减弱,介电损耗很大. Shibata^[18]以废纸和酚醛树脂为原料制成的碳木材陶瓷具有优异的电磁屏蔽效应.其电屏蔽效率在 100MHz 时为 30dB, 300MHz 以上时为 40~43dB; 磁屏蔽效率在 100MHz 为 30dB, 40MHz 以上时是 37dB.

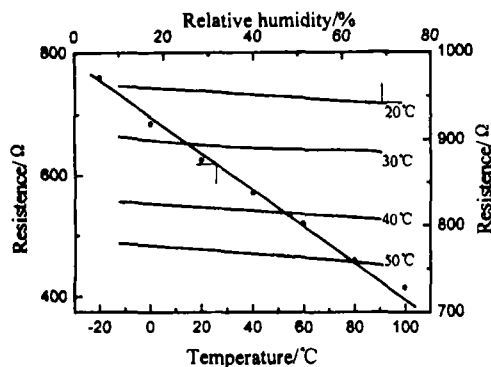


图 2 温度和相对湿度对 650°C 制备的碳木材陶瓷电阻的影响

Fig. 2 Effects of temperature and relative humidity on electrical resistance of the carbon woodceramics fabricated at 650°C

碳木材陶瓷的电磁屏蔽效率是受其电阻率、孔隙率及孔径大小与分布等因素制约的,而它们又取决于碳化温度的高低.因而可以通过改变碳化温度使屏蔽效果最好.吴文涛^[19]以甘蔗渣和酚醛树脂为原料,采用热压、碳化工工艺制成的碳木材陶瓷,其电阻率达到了 $10^{-2}\Omega\cdot\text{cm}$,优于用浸渍酚醛树脂法所得碳木材陶瓷的电阻率 $100\Omega\cdot\text{cm}$ ^[20].国外也有报道称,碳木材陶瓷的电阻率可以达到 $10^{-2}\Omega\cdot\text{cm}$ ^[10].

2.3.2 传感性能

Suda^[21]用中密度纤维板(MDF)和酚醛树脂在 650°C 下制成了碳木材陶瓷,其电阻与湿度和湿度的关系(图 2)表明,电阻随相对湿度和温度的升高而线性降低,利用这一关系可以制成温度-湿度传感器.

碳化温度和表面结构对碳木材陶瓷的传感性能具有重要影响.随碳化温度的升高,电阻迅速下降,在 650°C 时电阻下降近 10 个数量级,其对温度和湿度敏感度较高,可以作为温度和湿度传感材料.其表面结构,如孔的大小和深度等,对碳木材陶瓷的湿度敏感性影响很大^[22],但其具体原因尚不清楚.

2.3.3 摩擦学特性

碳木材陶瓷具有独特的摩擦学特性. Akagaki^[9]研究了碳木材陶瓷在滑移线速度和载荷分别为 1.0~19.0m/s 和 98~294N 的条件下油润滑时的摩擦性能.结果表明,摩擦系数和磨损率是很小的,分别为 0.12 和 $5\times 10^{-7} \sim 2\times 10^{-6}\text{mm}^3/\text{Nm}$,且摩擦系数不受滑移速度的影响.这一点与金属材料形成了鲜明的对比.金属材料是靠摩擦面间形成油膜来减小摩擦的.而碳木材陶瓷在如此苛刻的条件下很难靠形成油膜来减少摩擦,而是靠其含有的软石墨良好的自润滑作用来实现减小摩擦的.

此外,碳木材陶瓷具有多孔结构,可用作含油轴承,其孔隙率约是传统含油轴承的 2 倍,能容留大量的润滑油,在低滑移速度情况下将具有优异的摩擦学性能.

2.3.4 力学性能

影响碳木材陶瓷力学性能的主要因素是碳化温度和酚醛树脂的用量.一般情况下,碳木材陶瓷的扬氏模量、弯曲强度、压缩强度和断裂韧性在碳化温度为 500°C 左右时出现极小值^[23].因为此时木材和酚醛树脂的热解反应最为剧烈,缺陷较多.随酚醛树脂含量增高,扬氏模量、压缩强度和断裂韧性出现最优值,分别为 5GPa、80MPa 和 $0.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ^[24].

多孔材料的力学性能一般能用蜂窝结构模型或泡沫固体模型来描述.但其只适用于相

对密度 (体积密度 / 真实密度) < 0.3 , 孔壁薄的体系. 而碳木材陶瓷的相对密度一般为 $0.4 \sim 0.9$, 且孔壁很厚, 已不宜用上述模型解释. 因此, 就必须研究和建立适合于碳木材陶瓷的力学模型. Gibson^[25] 研究发现碳木材陶瓷的裂纹往往起源于垂直于应力作用方向的孔壁上, 据此提出了适合碳木材陶瓷的力学模型: 孔壁弯曲模型和应力集中模型. 前者认为孔壁的破坏是由于外加应力在孔壁上产生较大弯矩造成的, 由该模型预测的扬氏模量、压缩强度和最大弯曲应力与实验值十分吻合, 但它不能预测断裂韧性. 而当酚醛树脂浸渍量较大时, 就须用应力集中模型来解释了. 在这种情况下, 孔壁破裂主要不是由弯矩产生的, 而是由于孔径较小, 局部应力集中过大造成的, 该模型可以有效地预测碳木材陶瓷的断裂强度和扬氏模量.

3 SiC 木材陶瓷

3.1 SiC 木材陶瓷的制备

SiC 木材陶瓷的主要制备方法有两种. 一、向碳模板中熔融渗 Si 是制备 SiC 木材陶瓷的主要手段. 蔡宁^[26] 以木炭为模板, 采用液相 Si 渗入和反应工艺制成了具有木材结构的 SiC 陶瓷. 它的组织结构取决于渗 Si 温度, 较低温度下形成 SiC 多孔材料, 而较高温度下形成 Si/SiC 密实材料. 二、向木材或木炭中渗入 SiO_2 溶胶, 经碳热还原反应原位生成 SiC 陶瓷也是制备 SiC 陶瓷的重要方法. Ota^[27] 在常温下用 SiO_2 溶胶浸渍木炭, 然后在 1400°C 氩气气氛下发生碳热还原反应, 制成了多孔 β -SiC 陶瓷.

3.2 Si 在碳模板中的渗入 - 反应机理

液相 Si 能否自发渗入碳模板中, 取决于它在碳表面上的润湿角 Θ . 当 $\Theta < 90^\circ$ 时, Si 可以自发润湿, 渗入碳模板中. 自发润湿会将 Si 熔体压入碳模板中的管束内, 同时发生反应生成 β -SiC. Si 在碳模板上 Θ 的大小取决于碳的表面结构, 通常碳结晶度的增加有利于 Si 自发渗入. 在 1450°C 时, Si 在取向的多晶热解石墨 (0001) 面上的 Θ 小于 10° , 而在玻璃碳上的 Θ 为 50° ^[28].

Si 在碳模板中渗入和反应所需的时间, 也就是碳模板转变为多孔 SiC 陶瓷材料所需的时间, 是受渗入和反应动力学制约的, 渗入和反应动力学是温度的函数. 木材的轴向结构可以理解为由一束平行的毛细管组成的, 其有效流动半径为 r , 毛细作用保证了液相 Si 的快速渗入. 毛细管流动的 Poiseuille 方程如式 (1) 所示, Si 渗入深度为 x 时所需的时间 t 由式 (2) 决定^[29].

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi r^3 \gamma \cos \Theta}{4 \eta x} \quad (1)$$

$$t = x^2 \left[\frac{\gamma r (r^3 / r_0^2 R) \cos \Theta}{2 \eta} \right]^{-1} \quad (2)$$

式中 γ 、 Θ 、 η 分别是液相 Si 的表面张力、润湿角和粘度; R : 有效毛细管半径, r_0 : 毛细管平均几何半径.

可见, 渗 Si 量的多少是由扩散系数决定的, 扩散系数又是由毛细管的几何形状和渗入剂性质决定的. 由于孔的形状不规则, $r < R < r_0$, 所以 $(r^3 / R r_0^2) < 1$. 假定 x 为 0.1m , 由文献给出的液相 Si (1600°C) 的渗入性质: $\gamma = 0.82\text{Nm}^{-1}$ ^[30]、润湿角 $\Theta = 10^\circ$ ^[28] 和粘度 $\eta = 0.72\text{mPa}\cdot\text{s}$ ^[31],

就可以推算出 Si 渗入时间的下限. 若 $r = R = r_0 = 1 \sim 10 \mu\text{m}$ 时, 所需时间就在 0.1s 以内, 这就意味着液相 Si 能很容易地渗入碳模板.

在没有施加外部压力, 仅靠毛细作用的情况下, 毛细作用的最大半径 R_{\max} 制约着垂直于熔体流动方向的渗入程度, 如式 (3) 所示.

$$R_{\max} = \frac{2\gamma\cos\Theta}{\rho x} \quad (3)$$

$$d_{\text{SiC}} \approx \sqrt{D_{\text{eff}} t} \quad (4)$$

$$d_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (5)$$

若取 x 为 0.1m, 对应于 $\Theta=10^\circ$ 和 50° 的 R_{\max} 分别为 $60\mu\text{m}$ 和 $40\mu\text{m}$. 渗 Si 前后的孔径分析表明, $<30\mu\text{m}$ 的孔完全被 Si 充满, 而更大的孔仍然是空的. 理论预测与实验结果是一致的.

由于 Si 在碳模板中渗入和反应是同步进行的, 它涉及到液相 Si 向固态 C 表面的传质, Si 和 C 在 $\beta\text{-SiC}$ 层的扩散和 Si 与 C 的反应三种过程. 当形成一层 $\beta\text{-SiC}$ 后, 反应速率就由 Si 和 C 在 $\beta\text{-SiC}$ 层中的扩散作用控制了. 由此可以得到生成的 SiC 层厚度 d_{SiC} 随时间 t 变化的函数关系如式 (4) 所示, Si 和 C 在 $\beta\text{-SiC}$ 层中的扩散系数可由式 (5) 得到.

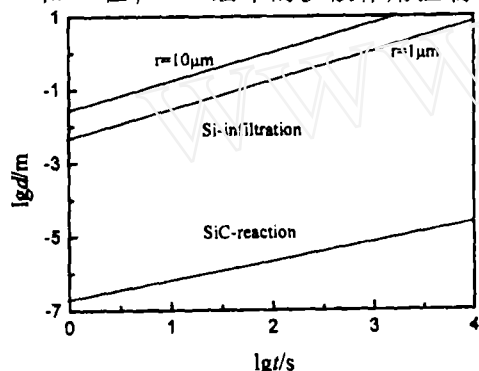


图 3 Si 在碳模板中渗入深度和生成 $\beta\text{-SiC}$ 层厚度与时间的关系

Fig. 3 Infiltration depth of liquid Si into the C preform and SiC-reaction layer thickness at 1600°C as a function of time

Einset^[33] 为 Si 反应性渗入木炭这一过程建立了连续模型. 用它可以有效预测 Si 的渗入速度和估算由 Si 与 C 生成 $\beta\text{-SiC}$ 时放出的热量引起体系温度上升的多少和函数表达式.

3.3 SiC木材陶瓷的力学性能

木材特有的多级孔结构和细胞壁中纤维素的取向程度, 不仅决定着木材的力学行为, 而且也影响着木材陶瓷的力学性能. Qiao^[34] 用松木、竹子和桦木制成了 $\beta\text{-SiC}/\text{Si}$ 复合材料. 由于它们本身的结构差异较大, 造成了木材陶瓷的力学性能差异显著, 由桦木制得的 $\beta\text{-SiC}/\text{Si}$ 复合材料的弯曲强度和断裂韧性最大, 分别为 300MPa 和 $4\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, 竹子的最小, 分别为 150MPa 和 $1.5\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$. 由松木得到的碳模板和 SiC 陶瓷材料的应力-应变曲线如图 4 所示^[35].

Fiter^[32] 测得了 Si 和 C 扩散的活化能 Q 和扩散系数 D_0 , 分别为 $132\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $2\times 10^{-6}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$. 这样就可以得到 1600°C 时的 $D_{\text{eff}} = 4.168 \times 10^{-10}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 将其带入式 (4) 就可以得到反应时间 t 与 d_{SiC} 之间的具体关系式, 例如反应 40min 就可得到厚度为 $10\mu\text{m}$ 的 $\beta\text{-SiC}$ 层.

根据这个模型, Si 渗入深度和生成 $\beta\text{-SiC}$ 层的厚度随时间变化的关系如图 3 所示. 从图 3 可以得到 Si 的渗入深度与 $\beta\text{-SiC}$ 层厚度之比是 1.5×10^5 , 因此 $\beta\text{-SiC}$ 的生成反应是碳模板转变为 SiC 陶瓷的控制步骤.

由图 4 可见, 碳模板的断裂应变为 0.1%~0.3%, 裂纹扩展不均匀是由木炭中年轮的不均匀造成的. 其断裂方式与层状复合材料相似, 这表明在相对密度发生较大变化的地方裂纹扩展发生了转向. 与碳模板相比, SiC 陶瓷的断裂应变相对较小, 但断裂应力提高很显著.

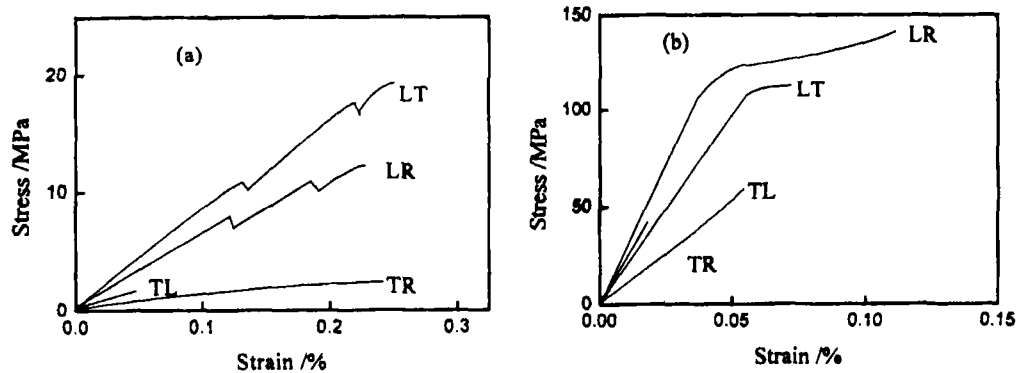


图 4 由松木制成的碳模板和 SiC 的应力 - 应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of (a) carbon preform and (b) SiC woodceramics derived from pine wood
L: Length; T: Tangential; R: Radial. LT and LR represent loading orientation parallel to the axial (length) direction of wood. TL and TR represent loading orientation perpendicular to the axial (length) direction of wood

4 其他木材陶瓷

木材特殊的多孔结构和性质为制备特殊结构与功能的新型陶瓷材料提供了广阔的空

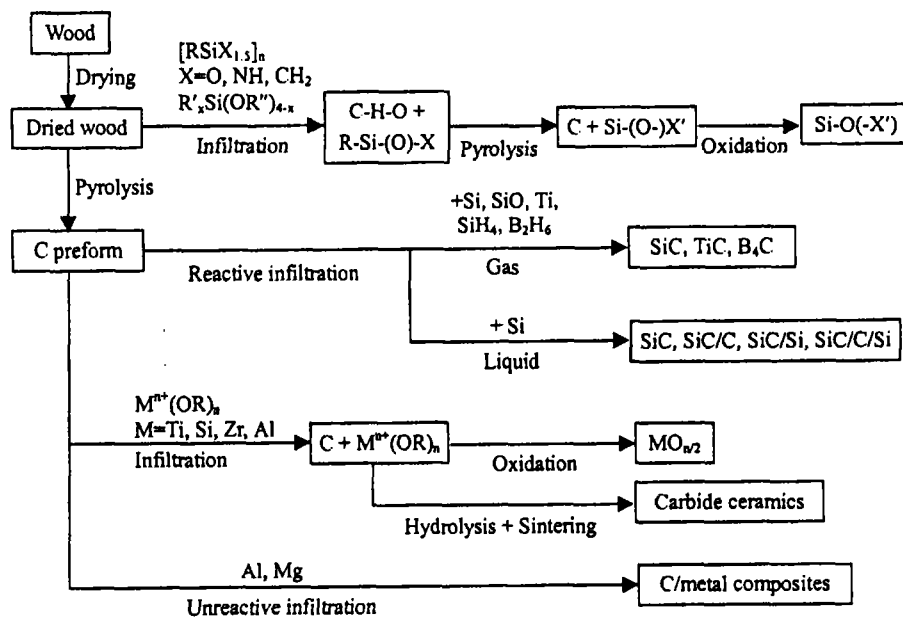


图 5 由木材制备各种陶瓷材料的技术路线

Fig. 5 Technology road map for manufacturing various woodceramics from wood

间. 向木炭中渗入非反应性金属 (如 Mg 或 Al)^[36]、低粘度聚合物或者渗入陶瓷前驱体聚

合物(如聚硅烷、聚硅氧烷和聚碳硅烷等),可以制成致密陶瓷材料.利用 Si 和 Ti 等反应性金属液相渗入可以制备碳化物/金属密实复合材料.用气相渗入剂与木炭反应可以制备出 20%~50% 孔隙率的单组分碳化物陶瓷.另外,也可以制备单组分或多组分氧化物多孔陶瓷.由木材制备各种陶瓷材料的主要技术路线如图 5 所示.

5 目前存在的问题与对策

(1) 木材碳化过程中存在开裂和翘曲现象:木材碳化过程中水分的蒸发和纤维素等的降解作用会引起各向异性收缩,造成裂纹和翘曲.解决此问题的主要方法是加入能与纤维素羟基发生交联作用的偶联剂以强化细胞壁,以及控制工艺参数.

(2) 木材陶瓷品种单一:目前,木材陶瓷研究的重点是碳木材陶瓷和 SiC 木材陶瓷^[27].存在技术路线单一,研究范围小且深度不够,产品组分和形态、结构单一等不足.因此,今后的研究重点是 TiC、B₄C 等碳化物系列陶瓷, C/ 金属复合材料,以及单组分或多组分氧化物陶瓷材料.

(3) 木材陶瓷的性能开发不足:这方面的研究主要集中在传感性能、电磁屏蔽性能、摩擦性能等方面,且对性能与结构的认识有待深入.随着分析手段的不断提高和木材结构与物理性能之间关系研究的逐步深入,这些问题会很快得到解决.

(4) 木材陶瓷制备机理研究不足:木材陶瓷研究刚刚起步,主要集中在木材陶瓷的制备工艺和基本性能表征方面,对木材陶瓷制备机理研究较少,再加上木材组成十分复杂,对于其热解过程及其分子结构变化的研究具有很大的难度.因此,对于木材陶瓷制备机理的研究是今后一段时间内要完成的相当艰巨的任务.为克服这一难点,可先对木材单一组分进行研究,然后再综合研究.

(5) 力学性能不佳:木材陶瓷的断裂韧性较低,一般为 0.15~0.3MPa·m^{0.5},其他力学性质也不够理想.目前,改善力学性能的主要方法是强化孔壁和控制工艺参数.另外,通过压缩木材或对木材陶瓷实施碳沉积来提高密度,也可以有效改善力学性能.

6 应用前景

综上所述,用木材或其他木质材料制备木材陶瓷,为设计新型多孔陶瓷提供了一条极具潜力的途径.作为新兴的环境材料,木材陶瓷的研究在国际上方兴未艾.

木材陶瓷具有密度低、比强度高、抗热冲击强、膨胀系数小和导电导热等优异性能,以及较大的振荡衰减因子、优良的远红外发射功能、优异的生物相容性和良好的中子减速能力等性能.此外,还具有原料来源广且可再生,副产物木醋酸可用于土壤改良,制造成本低且可实现复杂形状的原位成形.这些使木材陶瓷具有广阔的用途,既可以用作功能材料又可以用作结构材料,前者如湿度-温度传感材料、电磁屏蔽材料、电子封装材料、房暖材料、高温过滤器材料、催化剂和固定化载体、吸声和隔热材料等,后者如轴承轴瓦、高速列车刹车材料、轮胎防滑链、可加工陶瓷以及医学植入构件等.

与其他多孔陶瓷相比,木材陶瓷在生物催化剂和化工分离方面具有更大的优越性.木材陶瓷典型的孔径分布有单峰式和多峰式两种.单峰式的孔径分布适宜用作过滤器,以保证过滤器的选择性.多峰式的孔径分布对多功能细胞载体和生物催化剂支撑件的设计具有

重要意义, 如小孔用于固定化催化剂或微生物, 大孔用于介质的传输与分离, 可以同时实现催化和分离双重功效, 且效率远高于管状膜; 也为大小不同的多种细胞或酶固定在同一载体上并实现各自功能提供了可能性。

因此, 木材陶瓷的研究对减缓生态环境日益恶化和废旧木质材料的重新利用, 无疑会获得显著的社会效益和经济效益。

参考文献

- [1] Mark J E, Calvert P D. *Mater. Sci. Eng.*, 1994, **c1**: 159-163.
- [2] Patel M, Padhi B K. *J. Mater. Sci. Lett.*, 1993, **12** (7): 1234-1240.
- [3] Krishnaro R V, Mahajan Y R. *J. Mater. Sci. Lett.*, 1996, **15** (2): 232-241.
- [4] Okabe T, Saito K. *J. Porous Mater.*, 1996, **2** (3): 207-213.
- [5] Nienhuis C, Barthlott W. *Ann Bot-London*, 1997, **79** (3): 667-670.
- [6] Hirose T, Fan T X, Okabe T, et al. *Mater. Lett.*, 2002, **52**: 229-233.
- [7] 马 荣, 乔冠军, 金志浩. 西安交通大学学报, 1998, **32** (8): 57-61.
- [8] Kasai K, Endo H, Shibata K. *J. Ceram. Soc. Jpn*, 1999, **107** (8): 748-751.
- [9] Akagaki T, Hokkirigawa K, Okabe T, et al. *J. Porous Mater.*, 1999, **6** (3): 197-204.
- [10] Hirose T, Fan T X, Okabe T, et al. *J. Mater. Sci.*, 2001, **36** (17): 4145-4149.
- [11] Byrne C E, Nagle D C. *Carbon*, 1987, **35**: 259-265.
- [12] Chand S. *J. Mater. Sci.*, 2000, **35** (6): 1303-1313.
- [13] Parfit R L, Newman R H. *Plant Soil*, 2000, **219** (1-2): 273-282.
- [14] 谢贤清, 张 荻, 蔡建国, 等. 功能材料, 2001, **32** (2): 121-123.
- [15] Yamashita Y, Oachi K. *Carbon*, 1981, **19** (1): 89-94.
- [16] Oberlin A. *J. Appl. Cryst.*, 1968, **1** (1): 218-226.
- [17] Cheng H M, Endo H, Okabe T, et al. *J. Porous Mater.*, 1999, **6** (3): 233-237.
- [18] Shibata K, Okabe T, Saito K, et al. *J. Porous Mater.*, 1997, **4** (4): 269-275.
- [19] 吴文涛, 孙世群. 合肥工业大学学报, 2001, **24** (6): 1133-1136.
- [20] Okabe T, Saito K, Yamamoto R. *Proceedings of the 3rd UMRS international conference of materials*. Amsterdam: Elsevier Science B V, 1994. 681-684.
- [21] Suda T, Kondo N, Okabe T, et al. *J. Porous Mater.*, 1999, **6** (3): 255-258.
- [22] Kasai K, Shibata K, Saito K, et al. *J. Porous Mater.*, 1997, **4** (4): 277-280.
- [23] Hirose I, Fushitani M, Okabe T, et al. *J. Porous Mater.*, 1999, **6** (3): 175-184.
- [24] The Soc Carbon Mater, Japan. Introduction to carbon materials. Tokyo: Realize Inc, 1996. 59-115.
- [25] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular solids*. Oxford: Pergamon Press, 1988. 69.
- [26] 蔡 宁, 马 荣, 乔冠军, 等 (CAI Ning, et al). 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2001, **16** (4): 763-768.
- [27] Ota T, Takahashi M, Hibi T, et al. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1995, **78** (14): 3409-3413.
- [28] Whalen T J, Anderson A T. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1975, **58** (2): 396-402.
- [29] Hillig W B. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1988, **71**: c96-c99.
- [30] Hardy S G. *J. Cryst. Growth*, 1984, **69**: 456-466.
- [31] Battezaati L, Greer A L. *Acta Metal.*, 1989, **37**: 1791-1796.
- [32] Fiter E, Gadow R. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 1986, **65**: 326-330.
- [33] Einset Erik O. *Chem. Eng. Sci.*, 1998, **53** (5): 1027-1039.

- [34] Qiao Q J, Ma R, Cai N, *et al. Mater. Sci. Eng.*, 2002, **A323**: 301–305.
[35] Greil P, Lifka T, Kaindl A. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 1998, **18**: 1975–1982.
[36] Xie X Q, Fan T X, Zhang D, *et al. Comp. Sci. Technol.*, 2002, **62**: 1341–1346.

Recent Progress in Research on Woodceramics

QIAN Jun-Min, JIN Zhi-Hao, QIAO Guan-Jun

(State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Recent progress in research on a new kind of eco-material, woodceramics, is reviewed. Because of its unusual abrasive, sensitive and electromagnetic shielding properties, as well as unique structure, woodceramics will probably be widely applied as functional ceramics. The preparation methods, structure, performances, and preparing mechanisms of carbon woodceramics and SiC woodceramics are summarized. For an example of preparing β -SiC, the infiltration mechanism of Si into C preform and the corresponding infiltration-reaction models are presented. Besides the above-mentioned two kinds of woodceramics, other carbide woodceramics and oxide woodceramics are also introduced in brief. Finally, the existing problems and countermeasures of woodceramics are discussed and suggested, and their application prospects are proposed.

Key words woodceramics; hereditary tissue; eco-material; infiltration-reaction mechanism