

# 木材 / 无机非金属复合材料的研究进展

陈志林<sup>1</sup>, 王群<sup>1</sup>, 张雪莲<sup>1</sup>, 左铁镛<sup>1</sup>, 傅峰<sup>2</sup>, 叶克林<sup>2</sup>

(1.北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100022; 2.中国林业科学研究院 木材工业研究所, 北京 100091)

**摘要:** 从木材的环境协调性出发, 概述了近年来以木材为原料, 开发的几种环境材料的国内外研究进展, 认为可以利用木材在组织结构、空隙结构上的特点, 从环境协调性的角度对材料和产品进行设计, 从而创造出既保持原来木材特性又附加了优异功能特性的复合材料。

**关键词:** 木材; 环境材料; 木材 / 无机非金属复合材料

**中图分类号:** TB 332

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2003)01-0116-06

材料是人类文明进步的重要标志, 是国民经济和社会发展的基础和先导, 是现代高科技发展的三大支柱之一, 它一方面推动着社会经济发展和人类文明进步, 另一方面又耗费着大量的资源和能源, 并排放出大量的废气、废水和废渣, 污染着人类生存的环境, 是资源过度消耗和环境污染的主要责任者之一<sup>[1]</sup>。木材是一种传统材料, 全世界每年木材的消耗量 34~35 亿 m<sup>3</sup>, 人均消耗 0.67 m<sup>3</sup>。由于现代科学技术的发展和应用, 对材料的性能要求越来越高, 木材的一些应用领域被后来兴起的材料所替代, 然而当人们认识到材料可持续发展的重要性, 提出环境材料的概念时, 关注到了木材是一种环境协调性材料, 认为它本质上就具有环境材料的特性<sup>[2]</sup>, 从而使人们重新审视了木材在材料学领域中的地位和作用, 为这种古老的材料注入了新的活力和新鲜内容。

## 1 木材具有良好的环境协调性, 属于生态环境材料

生态环境材料是指同时具有满意的使用性能和优良的环境协调性, 或者是能够改善环境的材料, 它的本质特征在于生命周期的整个过程中具有低的环境负荷值。木材是重要的生态环境材料, 在解决人类社会生存和发展的资源、能源、环境等问题方面, 具有不可替代的作用。首先, 木材是可以再生的材料, 它不仅可以从天然林中获得, 而且可以从人工培育的森林中获得, 速生人工林从培育到成熟利用只需 10~50 a 时间, 平均每公顷能年产 20 m<sup>3</sup> 木材, 相当于每天可产 15 kg 纤维素或 30 kg 木材。只要合理应用现代林业科学技术, 科学经营, 合理采伐, 完全可以实现森林资源的可持续发展, 使木材成为取之不尽、用之不绝的材料<sup>[3]</sup>; 第 2, 木材来源于树木, 而树木在生长的过程中, 利用太阳能通过光合作用, 每生长 1 t 木材可吸收 1.47 t 的二氧化碳, 产生 1.07 t 的氧气, 将碳元素固定在树木中形成纤维材料, 这是其他任何材料不能比拟的, 对地球的生态平衡起着重要作用; 第 3, 木材加工容易, 在加工过程中, 对能量的消耗相对较小, 例如: 加工 1 t 人工干燥木材产生的二氧化碳排放量及能源消耗量仅是制造钢材的 1/12.5, 加工 1 t 三合板碳排放量及能源消耗量分别是铝材的 1/40 和 1/36<sup>[2]</sup>; 第 4, 木材在使用过程中, 具有隔热保温、吸音隔声以及自然美观、质感舒爽等视觉效应的特点, 为人类创造了舒适、优雅的室内环境, 提高了人们的生活质量<sup>[4]</sup>。此外, 木材还具有可降解性、可循环利用性, 对环境的副作用小。

木材的突出特点是具有良好的环境协调性, 同时木材具有较高的强重比, 在应用上具有独特的优势, 据统计以木材为原料制造的产品多达 1 万余种, 在国民经济建设中起着重要作用。但是作为材料, 木材也

收稿日期: 2002-09-24.

基金项目: 国家“863”高新技术研究发展计划基金资助项目(2002AA245161).

作者简介: 陈志林(1964-), 男, 副教授, 博士生.

有其缺点,主要表现在干缩、湿胀,易于变形,在受到水、热、光、微生物作用下易于腐朽,易于燃烧;由于各向异性结构和不可避免的天然缺陷,木材应用的可靠性大大降低。这些问题的来源与改进伴随着木材应用史,一直到今天都属于木材科学研究的重要内容<sup>[5]</sup>。

木材是利用土壤中的水分,空气中的二氧化碳以及太阳能通过光合作用而生长的有机体,具有复杂的细胞形态、孔隙结构和组织结构。木材的细胞有厚壁细胞和薄壁细胞两种,厚壁细胞约占木材体积的85%~95%,其余为薄壁细胞,细胞之间贯通或不贯通,但可以通过纹孔保持相互联系。木材内的孔隙具有3种类型,第1种是细胞的内腔,不同树种细胞大小不同,其宽度从50 μm到1 500 μm,长度从0.1 mm到10 mm不等;第2种是细胞间隙,这两种孔隙又称永久孔隙,当木材吸水膨胀、失水干缩时,其孔隙大小几乎不发生变化;第3种是存在于木材细胞壁内的微孔隙,也称瞬间空隙,它会因木材润湿时出现,干燥时而消失。上述3种孔隙随树种不同而变化,大约为47%~83%。细胞之间相互联系的主要途径是纹孔,纹孔的构造和特点与木材的透水性 and 透气性有很大的关系。纹孔的主要构成为纹孔口、纹孔膜和纹孔塞,纹孔膜是半渗透膜,在树木生长时,可以选择性吸收有利于树木生长的营养物质。纹孔膜中间生着纹孔塞,当细胞死亡、形成木材后,纹孔塞有可能紧贴纹孔口,而形成闭塞纹孔。闭塞纹孔多的木材,其渗透性差。

细胞壁由初生壁和次生壁构成,而次生壁又分为外层(S1层)、中层(S2层)和内层(S3层),各层皆由纤维素形成的直径为几nm到几十nm的纤丝以各种角度呈螺旋状排列,其周围由半纤维素和木素围绕着。纤维素和半纤维素是由单糖聚合而成的多糖类,每个单糖含有2~3个羟基,木素是由两种苯基丙烷为基本骨架,以各种方式结合成的巨大分子,具有醇和苯酚两种不同性质的羟基。当化学试剂与木材反应时,它即成为反应的活化点,也是木材进行化学反应及与其他材料复合时的物质基础,它的反应特性与化学成分及所在的位置有关。

利用木材在组织结构、空隙结构和化学组成多样性的特点,阐明木材各个层次中的界面现象和界面结构,搞清化学反应过程及机理,评价材料性能,在此基础上创造出既保持原来特性又附加了优异功能特性的复合材料是可行的<sup>[2]</sup>。

## 2 以木材为原料开发研究的环境材料

木材在建筑上应用广泛,特别是作为室内装饰与装修用材更是为人们所青睐,然而人们除了讲究装修风格、色调和材质外,更关注所用装修材料对人体健康有无危害。大量研究表明,影响空气质量的主要因素之一是建筑材料散发的有害物质,例如:从人造板中散发出的甲醛,从建筑材料中散发的挥发性有机物(VOC)。长期处于含有VOC气体的环境中,在感官方面会造成人体视觉、听觉受损,在感情方面造成神经质、应激性、忧郁症和冷淡症,在认识功能方面会造成长期和短期的记忆混淆、迷向;在运动功能方面造成握力变弱、不协调和震颤<sup>[6]</sup>。20世纪70年代末,一些工业发达国家就着手研究建筑材料对室内空气质量的影响及对人体健康的危害性,并进行了全面系统的基础研究,到了90年代对绿色建材的发展、研究和应用更加重视,鼓励开发绿色建材产品和建造健康住宅,推行绿色标志认证。例如德国的环境标志计划、加拿大的Écologo标志计划、美国的健康材料计划、丹麦的DICL系统认证计划等。我国国家环保局也正在制定和推行环境标志产品及认证工作。在这种情况下,利用无机物质来改善木材的性能,在近年来的研究中得到了较大的发展,其原因是原料来源广泛、价格便宜,如控制措施适当,具有良好的环境协调性,而且通过材料的科学设计,具有优异的功能特性,可以获得集功能材料、结构材料、环境材料的优点于一身的优良材料。由此形成的高新技术,对木材工业的发展作用不可低估。

事实上,树木在生长过程中需要矿物质养分,因而木材本身就含有少量或微量的无机元素,例如木材燃烧后灰分中含有K、Na、Ca、Mg、Fe以及Cu、Zn等元素。它是细胞死之后,沉积在木材内,含量极少。硅是地球表面含量最丰富的元素之一,树木在生长过程中通过根系吸收进入木材内,木材内的硅多以晶体形式沉积在细胞内,某些硬木是由于向木材细胞输送了较多的二氧化硅或其他物质<sup>[7]</sup>。

石膏纤维板、水泥刨花板等木材与水泥、石膏、粉煤灰的复合材料在过去的文献里介绍较多,这里不论述。有关木材与无机非金属的复合材料最新研究与开发的环境材料产品包括以下几个方面:

## 2.1 木材陶瓷 (woodceramics)

1990年,由日本青森工业试验场的冈部敏弘和高藤幸司研究开发而制得,它是采用木材(或其他木质材料,如中密度纤维板、废纸)在热固性树脂中(如酚醛树脂)浸渍后真空炭化而成。烧结温度在 $800\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在这个过程中,木材形成了软质无定型碳,树脂形成硬质玻璃碳,由此而得到的一种新型多孔碳素材料,称之为木材陶瓷(woodceramics)。尽管木材陶瓷的原料采用了有机物质浸渍,但经高温炭化后变为无机碳,从广义上讲,凡具有金属离子键的无机物质均可称为陶瓷,所以这种碳素材料也是一种陶瓷,其结构特性介于传统的炭和碳纤维或石墨之间<sup>[8]</sup>。这种材料发明以后,得到了日本材料学界和木材学界的广泛关注,许多学者研究了它的电磁、物理、机械和屏蔽特性,并且利用磁控管溅射技术,以木材陶瓷为靶材,以玻璃或铝板为衬底,制备了木材陶瓷薄膜<sup>[9]</sup>。在适当的工艺条件下所制得的木材陶瓷,其导电率随环境温度和湿度的变化而大致呈直线关系,所以,这种材料可作为温敏、湿敏器件材料<sup>[10]</sup>;木材陶瓷具有稳定的摩擦系数,一般为 $0.1\sim 0.15$ ,是一种良好的摩擦材料;木材陶瓷具有多孔结构,可散射、吸收电磁波而减弱反射波,在一定的频率范围内,具有较好的电磁屏蔽性能,可以作为屏蔽材料;木材陶瓷的断裂韧性很低,与冰相似,但断裂应变却高于冰、水泥和碳化硅等脆性材料,在适当的工艺条件下,甚至高于铝材;工程可靠性介于传统陶瓷( $m \leq 5$ )和工程陶瓷之间( $m = 10\sim 20$ )<sup>[11]</sup>。

木材陶瓷的副产品为木醋酸,它是农业土壤改良剂和防虫杀菌剂。木材陶瓷使用完毕废弃后可作土壤改良剂,没有环境负担<sup>[12]</sup>。在用作功能材料和结构材料的同时,木材陶瓷必将有利于人类生存环境的改善<sup>[13]</sup>。

## 2.2 木材碳化硅陶瓷

生物系统能构成与外界环境最佳匹配的化学结构。天然形成类似陶瓷结构的无机化合物需要相当长的时间。如果利用阔叶树环孔材孔隙结构作为陶瓷渗入和反应工艺的“模具”,合成速度可大大提高,籍此可形成一种木质结构陶瓷,这种以生物系统作为设计方案和材料合成的思想可概括为生物拟态<sup>[14,15]</sup>。

德国研究者把木材先烘干,去掉水分,然后将木材在 $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下真空炭化,得到网状多孔结构的碳化物材料,接着将其转入到 $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下盛有熔融的无机硅炉子里,生成碳化硅陶瓷,这种材料有望用作人工骨关节以及航空、航天作为耐高温、防热结构材料<sup>[16]</sup>。

利用松木、桦木、竹子和中密度纤维板(MDF)为木材原料,以颗粒直径为 $1\sim 5\text{ mm}$ 的工业硅粉为原料,先将木材在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下烘干,然后像制造木材陶瓷那样在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下炭化得到木材陶瓷碳素材料,将其置于装有硅粉的石墨坩埚内,在 $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的真空炉内加热,最后形成碳化硅复合材料。用XRD分析表明,这种复合材料里包含有 $\beta\text{-SiC}$ 和自由硅两种物相,弯曲强度达到 $100\sim 300\text{ MPa}$ ,是木材陶瓷的10倍。由于良好的机械性能及碳化硅陶瓷的耐高温、耐腐蚀,具有木质细胞结构的陶瓷复合材料有可能在生物过滤工艺、医学移植体、催化剂载体以及高温轻型结构材料等领域获得广泛应用<sup>[17]</sup>。

## 2.3 陶瓷化木材

采用类似溶胶-凝胶工业合成陶瓷的方法,选取均匀的木材试样,按测试要求切成一定形状尺寸,经清洗、干燥和吸湿处理,以正硅酸乙酯(TEOS)作为陶瓷前驱体浸渍剂的主要成分,在专用设备中将陶瓷前驱体浸渍液加压 $0.2\sim 1.0\text{ MPa}$ ,注入木材中,在不同的温度下养护不同时间,注入木材细胞壁中的陶瓷前驱体经水解、缩合反应形成 $\text{SiO}_2$ 凝胶,其中部分与纤维素发生键合,部分以物理填充方式存在于微毛细管中,最后得到陶瓷化木材。研究表明:陶瓷化处理后的木材较之未处理材,木材端面硬度提高了20%以上,吸湿率降低了40%,木材密度有所增加。热重分析(TGA)曲线表明,处理材热分解速度降低,热分解温度提高,未处理木材在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时已分解完毕,而处理木材可持续到 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[18]</sup>。

陶瓷化木材未能解决的问题是:注入木材的陶瓷前驱体溶胶在形成凝胶中水解、缩聚过程缓慢,不完全,导致耗能耗时,原料挥发损失严重;反应不完全或形成的 $\text{SiO}_2$ 凝胶抗流失性差,使陶瓷化木材的重量随时间延长而降低,致使材料性能随时间延长而劣化<sup>[19]</sup>。所以采用高盐基度碱式氯化铝,参与陶瓷前驱

体溶胶的水解缩聚反应,引入  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,但是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{SiO}_2$  只能起到机械混合作用,不能从根本上解决抗流失性问题。

用甲基丙烯酸甲酯(MMA)与陶瓷前驱体混合,使有机高分子和无机粒子相互贯穿,从而部分改善了陶瓷化木材的性质<sup>[20]</sup>。但是无机粒子会使甲基丙烯酸甲酯阻聚。

## 2.4 无机质复合木材(WIC)

通过阳离子和阴离子交替扩散渗透到木材孔隙中发生无机反应,生成非水溶性盐而制得的复合木材。

日本京都大学木材研究所将原木在水中浸泡后,放进含硫酸钡溶液中,再放进含硼酸的磷酸二氢氨水溶液中浸泡,最后经洗涤、干燥而制得无机质复合木材,由于生成的不溶于水的无机盐填充在木材孔隙内,可阻止木材的热分解,腐朽真菌丝体的成长和白蚁的侵食等,可获得良好的阻燃性,抗腐蚀及抗蚁性,同时保持了木材原有的自然质感,提高了硬度<sup>[21]</sup>。用类似的工艺方法申请了称之为陶瓷木材制备方法的中国专利<sup>[21]</sup>。

用一定浓度的工业级氯化稀土溶液处理木材。当载药量为  $3.8 \text{ mg/cm}^3$  时,木材的断面硬度提高约 30%,经防腐实验,10 周后检查未有任何腐烂迹象<sup>[22]</sup>。

以松木为原料,利用水玻璃溶液和硫酸两种溶液交替处理经干燥后获得被称之为陶瓷木材的复合材料<sup>[23]</sup>。为改善三倍体毛白杨木材的性质,先后用水玻璃和硫酸铝溶液处理毛白杨木材,浸入木材的硫酸根离子和铝离子结合,在细胞间隙和导管的胞腔中生成硅酸铝沉淀,得到毛白杨无机复合木材,其阻燃性和硬度有较大的改善<sup>[24]</sup>。

美国报道了一种石化木材(instant petrified wood)的方法,将木材浸入含有硅、铝化合物的溶液中,让其填充在木材的孔隙内,然后在  $140^\circ\text{C}$  下窑干固化,在常压下浸入深度为 5 mm,若在一定的压力下或在高温下固化会得到像岩石一样坚硬的木质陶瓷化合物,比一般木材硬度提高 20%~120%,但结构外观仍像木材<sup>[25,26]</sup>。木材是多孔体,具有流体可渗透性,但是其渗透性大小表现出的差异非常大,这是木材构造特点所致,木材的孔隙包括细胞腔、细胞间隙、纹孔以及微毛细管,这些孔隙尺度大小从纳米级到微米级、毫米级均有分布;溶胶流体渗透木材的难易程度与纹孔构造有关系,不同木材或同种木材的不同部位常因为抽出物的堵塞、结壳物的镶嵌和纹孔膜的偏移,从而使木材具有不同的渗透性<sup>[27]</sup>。

将无机粘土与木材废料用高温烧结的方法制成了被称之为木陶瓷复合材料的复合材料。开展了粘土与木材的比例对材料孔隙率及噪音衰减系数和透水率影响的相关研究<sup>[28]</sup>。

## 2.5 有机/无机复合材料

自然界生物在长期进化过程中,获得了稳定的材料结构,根据天然生物材料形成机理来设计和制备新材料是仿生学在材料学中的应用<sup>[29]</sup>。

硅化木(silicified wood)为木材化石的一种,在我国古生代、中生代地层中发现较多,它是树木经石化而形成的,化学成分主要为  $\text{SiO}_2$ 。木材内部构造,如年轮大多清晰可见,能保持树木原有的形貌,说明  $\text{SiO}_2$  先进入木材内部,然后木材组织成分才消失,由此证明  $\text{SiO}_2$  的确可以以某种形式进入木材内部,不过这个过程十分漫长。

将陶瓷粒子(无机物)分散在树脂或单体中,将单体聚合所得的材料称为聚合物-陶瓷复合材料。将多孔的溶胶-凝胶氧化硅浸渍在甲基丙烯酸甲酯(MMA)中,然后将其聚合得到类似的复合材料<sup>[30]</sup>;将蒙脱土分离开,加入丙酰胺单体,使纳米级的粘土层分散在单体中,然后聚合, $w(\text{粘土}) = 5\%$  的聚合物模量从 1 GPa 增加到 110 GPa,而冲击强度没有下降,这种聚合物也称有机/无机纳米复合材料<sup>[31]</sup>。

无机聚合物的固态热解最适合于合成非氧化物非金属材料。聚硅氧烷是近年来开发的无机聚合物之一,热分解生成 Si/C/O 系陶瓷材料,其最大的优点是反应温度低,是低温制备陶瓷的重要方法之一,由聚合物制备陶瓷材料的性能取决于前驱体聚合物的结构和键性。利用纳米技术将无机材料与木材的复合技术研究也有相关报道。

### 3 思考与建议

加入世贸组织后,对我国的政治、经济将产生深刻的社会影响.我国木材工业的原料、市场、技术、会进一步全球化,竞争将是全方位的.在这种情况下,木材工业不能固守在传统行业的狭小领域内,而必须跨出去,渗透到其他行业领域,作为木材科学与技术研究,要具有超前性、前瞻性,注重边缘学科、交叉学科的培养和发展,发挥木材的优势,为木材工业争取更大的发展和生存空间.

木材是一种传统材料,由于现代科学技术的发展和运用,对材料的性能要求越来越高,木材的一些应用领域也被后来兴起的材料所替代,然而当人们认识到材料可持续发展的重要性,提出环境材料的概念时,关注到了木材是一种环境协调性材料,这对于木材工业而言是一个发展机遇,是将木材切入到大材料框架中的一个结合点.

利用木材所具有环境协调性的优势,可以将木材从建筑材料、结构材料、复合材料研究领域向功能材料领域跨越.木材陶瓷在材料的热学、光学、电磁学方面已经显示出诱人的前景;木材碳化硅陶瓷有望在生物材料方面得到应用;依据环境材料的概念和理论指导,将LCA(life cycle assessment)方法应用于产品设计和生产中,指导开发陶瓷化复合木材,可以预见陶瓷化复合木材将作为具体的环境材料,代表环境材料具体研究与开发的典型.由此形成的高新技术,对木材工业的发展作用不可低估.

#### 参考文献:

- [1] 左铁镛. 材料产业可持续发展与环境保护[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 环境材料专辑, 1996(32): 1-8.
- [2] 山本良一. 环境材料[M]. 王天民,译. 北京: 化学工业出版社, 1997. 124-126.
- [3] 吕健雄. 紧紧围绕国家目标,加强开展人工林木材的研究[J]. 人造板通讯, 2002(10): 3-5.
- [4] 孙启祥. 从生命周期角度评估木材的环境友好性[J]. 安徽农业大学学报, 2001, 28(2): 170-175.
- [5] 王恺, 傅峰. 当代木材加工技术发展态势[J]. 木材工业, 1997, 5(11): 12-15.
- [6] 王新友. 环境材料与绿色建材[J]. 建筑材料学报, 1998, 1(1): 88-93.
- [7] ASAY A, ILHAN A, MEHMET Sarikaya. Bioinspired processing of composite material[A]. Towards the 21st. Centennial International Symposium[C]. London: Peter Peregrinus, 1991. 136.
- [8] TOSHIHIRO Okabe, KOJI Saito. Development of woodceramics[A]. Advanced Materials'93, V/A: Ecomaterials[C]. Amsterdam: Elsevier Science B V, 681-684.
- [9] NOBUKAZU Kondo, TOSHIKAZU Suda, TOSHIHIRO Okabe. Woodceramics thin films[A]. The Third International Conference on Ecomaterials[C]. Tsukuba: Ecomaterials Forum, 1997. 218-223.
- [10] KAKISHITA Kazuhiko, TOSHIKAZU Suda. Woodceramics as humidity sensor[A]. The Fourth International Conference on Ecomaterials[C]. Gifu: Ecomaterials Forum, 1999. 297-300.
- [11] SHIN Itakura, TOSHIHIRO Okabe, KOUJI Saito. Properties of phenolic resin treated wood manufactured by ultrasonic wave resin impregnation method[A]. The Third International Conference on Ecomaterials[C]. Tsukuba: Ecomaterials Forum, 1997. 178-181.
- [12] 马荣, 乔冠军, 金志浩. 木材陶瓷[J]. 兵器材料科学与工程, 1998, 21(6): 45-48.
- [13] 谢贤清, 张获, 蔡建国, 等. 结构功能一体化材料——木质陶瓷的发展及其应用[J]. 功能材料, 2001, 32(2): 121-123.
- [14] SIEBER H, HOFFMANN C, KAINDL A, et al. Biomorphic cellular ceramics[J]. Advanced Engineering Materials, 2000, 2(3): 105-109.
- [15] 谢绍安, 晓晨. 生物拟态可将木材转化为陶瓷[J]. 激光与光电子学进展, 1998(3): 40.
- [16] 顾钢. 德国用木材制造碳化硅陶瓷 [N]. 科技日报, 1997-5-23(3).
- [17] 马荣, 乔冠军, 金志浩. 木材陶瓷的制备与性能研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(8): 57-61.
- [18] 王西成, 田杰. 陶瓷化木材的复合机理[J]. 材料研究学报, 1996, 10(4): 435-440.

- [19] 王西成, 史淑兰, 程之强, 等. (Si-, Al-)陶瓷化木材的化学方法[J]. 材料研究学报, 2000(1): 51-55.
- [20] 廖秋霞, 卢灿辉, 许晨. 原位溶胶-凝胶制备木材-PMMA-SiO<sub>2</sub>复合材料及其显微结构[J]. 福建化工, 2001, 1: 21-23.
- [21] 安立超, 纽红. 陶瓷木材的制备方法[P]. 中国专利: 93115148.1, 1993-06-28.
- [22] 邱玉玲, 董岩, 姜日顺. 稀土改性杨木材质初探[J]. 东北林业大学学报, 1993, 21(1): 85-88
- [23] 周卫平, 樊芷芸, 庄萍. 陶瓷复合木材的处理过程研究(陶瓷复合木材研究之二)[J]. 硅酸盐通报, 1997, 增刊: 11-13.
- [24] 周平, 张志毅, 梁树平. 毛白杨无机复合木材研究[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(6): 39-42.
- [25] MCCAFFERTY P. Instant petrified wood[J]. Popular Science. 1992(10): 56-57.
- [26] HICKS H. Sodium silicate composition[P]. United States Patent: 4612050, 1986-09-16.
- [27] SINGH A, DAWSON B, FRANICH R, et al. The relationship between pit membrane ultrastructure and chemical impregnability of wood[J]. Holzforschung, 1999, 53: 341-346.
- [28] 范振德, 陈载永. 杉木粒片形质对木陶瓷复合吸音性之影响[J]. 林产工业(台湾), 1999, 18(2): 167-176.
- [29] BOND G M, RICHMAN R H, MCNAUGHTON W P. Mimicry of natural material designs and processes[J]. JMEPEG, 1995, 4(3): 334-345.
- [30] 张剑峰, 郑强, 高长有, 等. 溶胶-凝胶法制备高分子/无机复合材料[J]. 功能材料, 2000, 31(4): 357-360
- [31] 杨勇, 朱子康, 漆宗能. 有机-无机纳米复合材料的研究进展[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(9): 130-133.

## Recent Development of Research on Wood / Inorganic Nonmetallic Composites

CHEN Zhi-lin<sup>1</sup>, WANG Qun<sup>1</sup>, ZHANG Xue-lian<sup>1</sup>, ZUO Tie-yong<sup>1</sup>, FU Feng<sup>2</sup>, YE Ke-lin<sup>2</sup>

( 1.College of Material Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China )

**Abstract:** The authors outline the recent progress in the world of some Ecomaterials with wood as raw materials. Based on the characteristics in wood tissue structure and void structure, starting from the purpose of harmonization with environment, the wood/inorganic composites are designed and produced with either the wood characteristics or the added excellent functional characteristics.

**Key words:** wood; ecomaterials; wood/inorganic nonmetallic composites