

透明木材的性能及其应用研究进展

陆弘毅,丁春香,翟胜丞,潘明珠\*

(南京林业大学材料科学与工程学院,南京 210037)

**摘要:**透明木材作为一种新兴环境友好型材料,兼具天然木材的可持续可再生性和玻璃的优良光学性质,强度高于木材、韧性优于玻璃,且相对塑料更节能环保,短短几年内,透明木材的制备和应用取得了快速的发展,将功能性纳米粒子与透明木材复合亦可获得新的功能特性,如磁性、荧光性、抗紫外性等。本文以透明木材的性能出发,分析了木材性质、漂白方法、聚合物类型、界面因素及添加物质对其性能的影响,总结了透明木材在建筑、发光材料、光伏器件、磁性材料及储能材料等领域的应用,最后指出,系统化研究其耐腐蚀性、阻燃性、光稳定性,寻找工业化生产的方法是未来的研究重点,以期为透明木材的性能调控以及深入研究提供理论基础和实践方向。

**关键词:**透明木材;复合材料;木材漂白;聚合物填充

引言

透明木材是一种由木材和透明树脂复合而成的新型绿色材料,兼具高透明度(>70%)和雾度,抗拉强度达天然木材的5~6倍,导热系数仅为玻璃的20%左右,在建筑、发光材料、光伏器件、磁性材料、储能材料等领域展现出极大的应用前景。1992年,Fink等<sup>[1]</sup>首次提出了透明木材的概念并通过漂白、脱水、浸渍透明树脂的方法制备得到了内部结构清晰可见的透明木材,在木材形态学领域展现出很高的研究价值。此后的二十多年间关于透明木材的研究几乎停滞。同一时期,研究者们发现木材基纤维素可用于制备透明纸张,通过纤维素溶解和再生,聚合物浸渍多孔纸或降低纤维直径至纳米级别的方法即可制备透明纤维素纸张<sup>[2~7]</sup>。然而透明纸张在层次结构和力学性能等方面存在不足,其在实际工程中的应用将受到限制。2016年开始,研究者们再次聚焦于透明木材,围绕透明木材制备、性能、应用方面的研究不断涌现。瑞典皇家理工学院的Lars Berglund团队和美国马里兰大学的Hu团队对透明木材进行了系统化的研究,东北林业大学以及南京林业大学等高校的学者在透明木材的制备及应用等方面同样取得了一系列进展。

天然木材的吸光性和折射率失配使其呈现不透明性。一方面,木质素、叶绿素、单宁等有色物质的存在使木材具有吸光性。木质素中醌类结构(见图1a)和羰基等不饱和双键与苯环形成的共轭体系(见图1b)为主要发色基团,占木材吸光组分的80%~95%<sup>[8]</sup>;另一方面,纤维素和半纤维素、木质素、空气的折射率分别为1.53、1.61、1.00,三者之间存在较大差异,使得折射率失配,光线在内部发生大量折射和散射。因此,制备透明木材需要:(1)漂白处理,去除木材中的有色物质,使其对光线的吸收作用最小化;(2)脱水处理,去除水分使木材原有结构得到较好的保留;(3)填充聚合物,选择折射率接近1.53的高透明、无色聚合物充分填充木材孔隙,减少或消除内部光散射与折射。图1(c)显示了透明木材的制备流程,该过程及其制备所得透明木材性能受木材性质、漂白方式、聚合物类型、界面因素以及添加物质等因素的影响。

本文从透明木材性能入手,分析了各因素对透明木材制备过程及其性能的影响,基于透明木材所展

10.14028/j.cnki.1003-3726.2021.07.002  
**收稿:**2019-10-25;**修回:**2020-10-22;  
**基金项目:**国家自然科学基金(31670556),江苏省“青蓝工程”,南京林业大学杰出青年项目(NLJQ2015-02);  
**作者简介:**陆弘毅(1996-),男,南京林业大学硕士研究生,研究方向为生物质复合材料的制备及应用;  
**\* 通讯联系人:**潘明珠(1980-),女,博士,教授,研究方向为先进生物质复合材料。E-mail: mzpan@njfu.edu.cn.

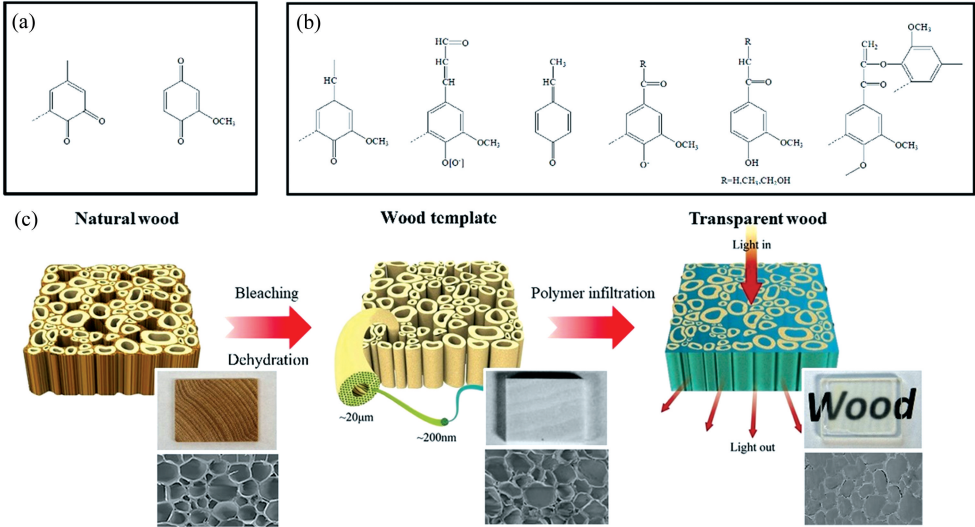


图 1 (a, b)木材代表性的发色基团结构<sup>[9]</sup>; (c)透明木材的制备流程示意图<sup>[10~12]</sup>

Figure 1 (a, b) Representative chromophore structures in wood<sup>[9]</sup>;

(c) schematic diagram of the preparation process of transparent wood<sup>[10~12]</sup>

现的高性能、概述了其在建筑材料、发光材料、光伏器件、磁性材料、储能材料等领域的应用,最后指出透明木材的研究尚处于起步阶段,其大尺寸材料的工业化生产、耐老化、耐腐蚀以及阻燃等性能尚未得到系统化的研究,以期为进一步研究及开发利用提供理论和实践参考。

## 1 影响因素

### 1.1 木材性质

1.1.1 树种 目前常用于制备透明木材的木材原料有巴沙木(*Ochroma pyramidale*)、杨木(*Populus*)、椴木(*Tilia*)、榉木(*Fagus*)等。Li 等<sup>[12]</sup>研究了不同木材制备的透明木材的性能(见图 2a),在厚度为 1.5mm 时,密度最高的白蜡木(*Fraxinus*)(0.68g/cm<sup>3</sup>)的透明度仅为 58%,而密度最低的巴沙木(0.16g/cm<sup>3</sup>)透明度高达 85%。Qin 等<sup>[13]</sup>也发现了相似的结果,1mm 的巴沙木(密度 0.21g/cm<sup>3</sup>)、泡桐木(*Paulownia*)(0.33g/cm<sup>3</sup>)和椴木(0.49g/cm<sup>3</sup>)透明木材分别具有 82%、80%和 70%的透明度。此外, Li 等<sup>[14]</sup>通过压缩脱木素的木模板制备得到了不同纤维素体积分含量的透明木材,当透明木材内纤维素体积分含量从 5%增加至 65%时,透明度从 85%减少至 34.5%,雾度由 66%增加至 79%。低密度木材能够获得高透明度的原因是(1)密度较低的木材内部具有更高的孔隙率,其在漂白处理时更容易与溶液进行反应;(2)聚合物更易渗透进入木材内部;(3)低密度木材制备的透明木材中木材成分占比较低,纤维素与聚合物之间的界面较少。

1.1.2 厚度 木材厚度的增加会使透明度降低、雾度提升。其原因是:(1)厚木材的漂白处理不充分,有色物质未能得到有效去除;(2)树脂的粘度较高,难以充分浸入芯部空隙;(3)光线在材料内部的传播路径增加,纤维素与聚合物之间产生了更多的光散射。Li 等<sup>[14]</sup>发现填充 PMMA 的巴沙木透明木材在厚度为 0.7mm 时,透明度高达 90%,雾度仅为 50%,当厚度增加至 3.7mm 时,透明度迅速降低至 40%左右,雾度增加至 80%。Yaddanapudi 等<sup>[15]</sup>制备的榉木透明木材在厚度为 0.1mm 时具有 70%的透明度,而 0.7mm 时仅为 15%。Katunský 等<sup>[16]</sup>模拟了较薄和较厚透明木材作为墙体时的情景,厚度增加时材料的雾度增加,使室内人物变得模糊(见图 2b)。

1.1.3 各项异/同性 透明木材保留了天然木材原有的结构特征,其垂直和平行纤维方向的性能往往各异。Zhu 等<sup>[11]</sup>最先对透明木材的各项异性进行研究,发现光散射主要发生在纤维素与聚合物的界面处,

沿着纤维方向的光散射分布较为均匀,而垂直纤维方向的光散射具有各向异性的特点(见图 2c, d)。该团队发现填充环氧树脂的 2mm 椴木透明木材,在平行纤维方向的透明度和雾度分别高达 90%、95%,而垂直纤维方向透明度和雾度分别降低为 80%、85%。在力学性能方面同样表现出各项异性,在垂直纤维方向上抗拉强度和弹性模量达到 23.38MPa 和 1.22GPa,在平行纤维方向上进一步提高至 45.38MPa 和 2.37GPa。

透明木材的各项异性会带来一定的问题,例如对光的散射不均匀、垂直纤维方向的强度较低、厚度增加时漂白困难等。因此,降低各项异性将成为拓宽其应用的关键。参照胶合板的制备思路,Fu 等<sup>[17]</sup>将单层脱木素的木模板通过一定角度组合的方式浸渍 PMMA,制备得到了透明胶合板,上下垂直组合时,能够将透明木单板垂直纤维方向的抗拉强度从 15MPa 提升至 45MPa,同时相对于透明木单板,透明胶合板对光线具有更加均匀的分散能力(见图 2d, e)。Qin 等<sup>[13]</sup>也使用类似的方法,发现上下垂直组合的双层透明巴沙木比相同厚度(2mm)的单层透明巴沙木的透明度略低(4%),但将垂直纤维方向的抗拉强度从 181.24 N 提升至 1085.74 N,接近平行纤维方向的抗拉强度,说明透明胶合板能够大幅度减少单层透明木材的各向异性。此外,Wang 等<sup>[18]</sup>参照纤维板的制备思路,对分散的木材纤维进行脱木质素漂白处理,制备得到了各向同性的透明纤维木材。相对于整块木材,由于分散的纤维能够与脱木素溶液和聚合物接触更充分,该方法将漂白效率提升了三倍,同时将 1mm 和 5mm 厚的杨木透明木材的透明度分别从 85%和 40%提升至 92%和 83%。

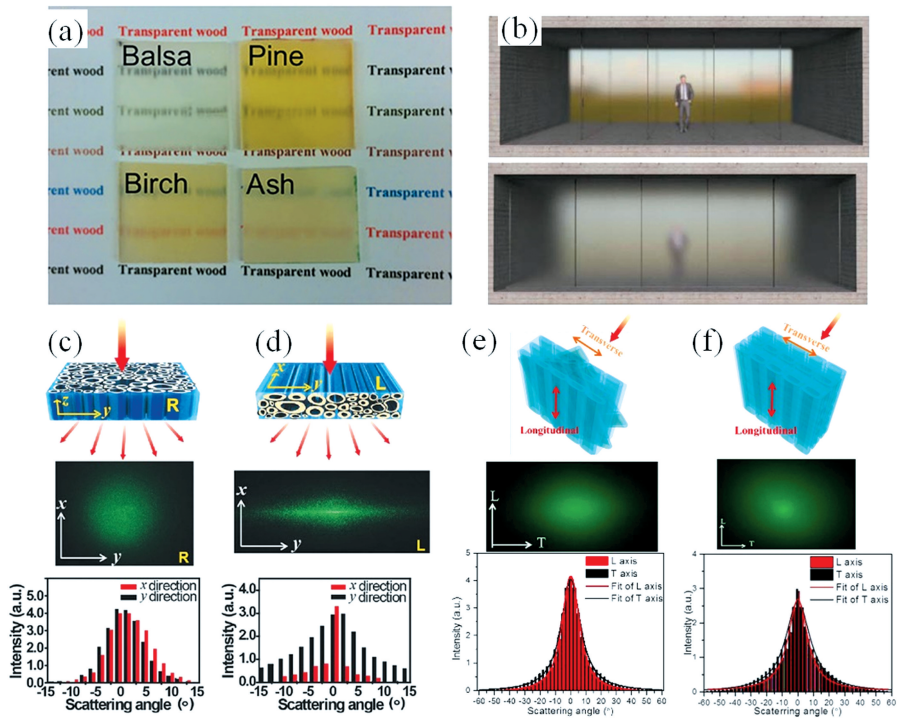


图 2 (a)不同树种制得的透明木材<sup>[12]</sup>; (b)薄(上)厚(下)透明木材的光学性质<sup>[16]</sup>;

(c)平行纤维方向的光散射<sup>[11]</sup>; (d)垂直纤维方向的光散射<sup>[11]</sup>; (e)上下 45°组合的透明胶合板的光散射<sup>[17]</sup>;

(f)上下垂直组合的透明胶合板的光散射<sup>[17]</sup>

Figure 2 (a) Transparent wood made from different wood species<sup>[12]</sup>; (b) thin (top) and thick (bottom) transparent wood<sup>[16]</sup>; (c) light scattering from parallel fiber direction<sup>[11]</sup>; (d) light scattering from vertical fiber direction<sup>[11]</sup>; (e) light scattering from transparent plywood with 45° vertical combination<sup>[17]</sup>; (f) light scattering from transparent plywood with vertical vertical combination<sup>[17]</sup>

1.2 漂白方式

漂白处理的目的是去除木材中的吸光物质,透明木材的漂白处理方法主要有次氯酸钠法、亚氯酸钠法、亚硫酸钠法、生物酶法以及过氧化氢法。

1.2.1 大量去除木质素 木材中木质素的存在是木材具有吸光性的主要原因,目前的漂白处理多数通过去除大量木质素进行。Zhu 等<sup>[11]</sup>用椴木作为原料,将其置于 2.5mol/L NaOH 和 0.4mol/L Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 溶液中煮沸 12h 以去除木质素,漂洗三次后放入 2.5mol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 中进行漂白处理。Li 等<sup>[14]</sup>用巴沙木为原料,置于 1%(wt) NaClO<sub>2</sub> 和 pH=4.6 的醋酸缓冲液中,在 80℃ 下脱木质素漂白 6h。Wu 等<sup>[19]</sup>以桦木 (*Betula*) 为原料,将其置于水、生物酶、冰乙酸和微量过氧化氢的混合溶液中,于 35~50℃ 下反应 1~2h,冲洗后用质量分数为 30% 的双氧水和 25% 的氨水提取,以去除木质素。随着木质素去除量的增加,透明木材对光线的吸收作用减小,有利于树脂的充分浸渍及光学性能的提升<sup>[11, 20, 21]</sup>。然而上述方法中,随着处理时间的增加,木质素含量趋于稳定并很难降至 1.5% 以下。Li 等<sup>[22]</sup>提出了一种蒸汽改性去除木质素的方法,将椴木片置于 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液上方,通过煮沸溶液产生的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 蒸汽穿透木材细胞壁,用以去除木质素,该方法可将残留木质素含量降低至 0.84%。与其相比,利用脱木素溶液处理的残留木质素含量为 1.9% 的透明木材,该方法可将 5mm 透明木材的透明度由 80% 提升至 87%,同时抗拉强度从 12.5MPa 提升至 20.6MPa。

多数研究制备得到的透明木材具有较高的雾度(>40%)特点,该特性对于光散射是有利的,但在采光性能要求较高的场合,高雾度会造成不利影响,在距离较远时高雾度会造成视觉模糊。Jia 等<sup>[23]</sup>利用 5%(wt)NaClO 溶液在室温下对木材进行 72h 脱木素漂白,制备得到的透明木材首次达到了低雾度(10%)(见图 3a)。通过与 NaClO<sub>2</sub> 脱木素漂白制备得到的高雾度木材(见图 3b)相比,该方法能够去除更多的半纤维素成分(见图 3c),处理后木材的质量得率由 76.09% 降低至 16.37%,填充环氧树脂后透明木材中纤维素体积含量仅为 2.54%,同时内部空隙体积分数从 4.44% 降低至 0.26%,进一步减少内部的光散射。

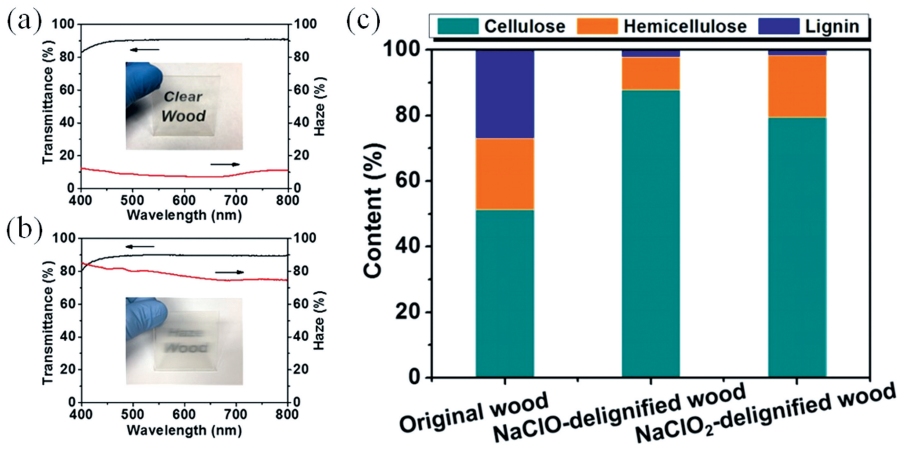


图 3 低雾度和高雾度的透明木材<sup>[23]</sup>

(a, b) 光学性质; (c) 纤维素、半纤维素和木质素含量

Figure 3 Transparent wood with low or high haze<sup>[23]</sup>

(a, b) optical properties; (c) relative content of cellulose, hemicellulose and lignin

1.2.2 少量去除木质素 大量去除木质素会导致木材结构的破坏,原因是木质素作为一种复杂的无定形物质,约占木材质量的 30%,在木材中以氢键和共价键的形式与纤维素、半纤维素连结,以提供一定的结构支撑<sup>[24]</sup>。Li 等<sup>[12]</sup>发现松木在去除木质素后,会破裂成碎片。基于以上原因,该团队配制了组分为去离子水、3%(wt)硅酸钠、3%(wt)氢氧化钠、0.1%(wt)硫酸镁、0.1%(wt)二乙基三胺五乙酸和 4%

(wt)过氧化氢的混合溶液,在 70℃下浸渍木材,去除了木材中发色基团,同时保留了约 80%木质素。Wu 等<sup>[21]</sup>利用类似的碱性过氧化氢法,使木材中的 60%以上木质素得到了保留。相对未处理的木材,少量去除木质素制备得到的透明木材微观结构无明显变化,同时细胞壁内未产生缝隙,更好地保留了木材原有的微观结构。但残留木质素的存在增加了透明木材体系中折射率的不匹配度,其透明度有所下降而雾度有所提升<sup>[12]</sup>。图 4 为木材各漂白过程中代表性的反应式。

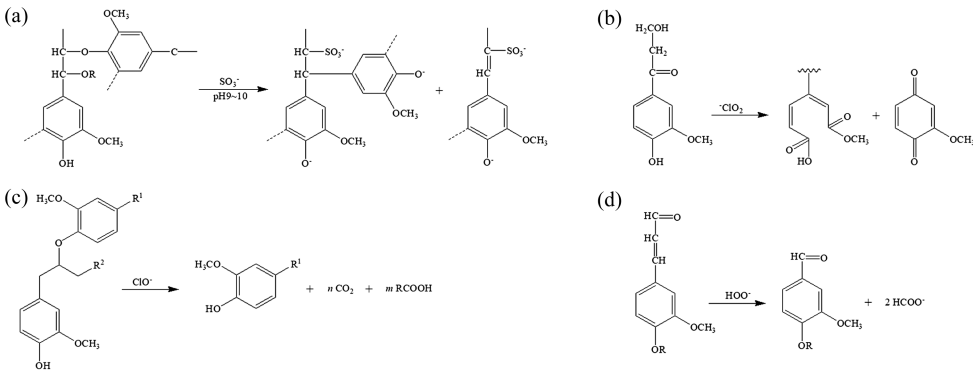


图 4 (a)木质素在碱性亚硫酸盐溶液中的反应<sup>[25]</sup>; (b)木质素在亚氯酸钠溶液中的反应<sup>[12]</sup>;  
(c)木质素在次氯酸盐溶液中的反应<sup>[26]</sup>; (d)木质素在碱性过氧化氢溶液中的反应<sup>[27]</sup>

Figure 4 (a) Reaction of lignin in alkali sulfite solution<sup>[25]</sup>; (b) reaction of lignin in sodium chlorite solution<sup>[12]</sup>;  
(c) reaction of lignin in hypochlorite solution<sup>[26]</sup>; (d) reaction of lignin in alkaline hydrogen peroxide solution<sup>[27]</sup>

1.3 聚合物类型

1.3.1 疏水性聚合物 PMMA 与环氧树脂是目前透明木材制备中使用最多的两种聚合物,具有疏水性<sup>[28, 29]</sup>,与疏水性的木质素相容性较好,与亲水性的纤维素的相容性差异较大,该差异性对透明木材力学性能有一定的影响。在聚合物与纤维素结合的过程中,一方面由于两者之间的协同作用,透明木材的抗拉强度增加<sup>[14]</sup>;另一方面当木质素含量降低时,木模板的亲水性增加,与聚合物之间相容性降低,导致两者界面结合效果变差,透明木材的抗拉强度随之下降<sup>[21]</sup>。因此,在选择疏水性聚合物填充时,透明木材的力学性能受到木质素去除程度的影响,可根据材料实际应用的强度需要,选择合适的去除木质素的程度,以获得期望的力学性能。此外,疏水性聚合物与纤维素之间的相容性差异还会导致界面间隙的形成<sup>[30]</sup>,界面间隙会对透明木材的光学性能产生影响,将增加体系中折射率的不匹配度和光散射度,使大尺寸的透明木材性能无法满足实际应用需要<sup>[15, 31]</sup>。

1.3.2 亲水性聚合物 PVP 对纤维素的润湿效果较好,且与去除木质素的木模板折射率几乎相当。Zhu 等<sup>[10]</sup>利用 PVP 填充,制备得到了 1mm 厚,透明度 90%、雾度 80%的透明木材。PVA 是一种低成本、无毒、水溶性和生物可降解的聚合物,其在水中粘度较低。Rao 等<sup>[32]</sup>利用丙二醇(propylene glycol, PG)作为 PVA 的增塑剂,PG 添加量为 PVA 的 100%时,制备得到的透明木材具有 80%的透明度、90%雾度以及较高的柔性。由于 PVA、PG、纤维素均具有亲水性,该方法无需脱水过程或真空脱气过程便能进行。Mi 等<sup>[33]</sup>也使用 PVA 作为填充聚合物,认为亲水性的 PVA 能够与纤维素之间形成良好的氢键结合作用,使两者紧密结合。

目前对亲水性聚合物的研究较少,相比之下,亲水性聚合物能够与纤维素进行更好的氢键结合,但关于聚合物亲水性对透明木材性能的影响尚未见报道。此外,聚合物与漂白后的木模板折射率匹配度也是影响透明木材光学性能的因素之一,未来可对其中相关机理进行系统化研究。

1.4 界面因素

透明木材内部的纤维素与聚合物之间往往存在界面间隙,该现象在使用疏水性聚合物填充时表现显著。界面间隙增加了光散射,使厚度高的透明木材光学性能大幅度下降。针对此类问题,Li 等<sup>[34]</sup>对脱木

素的木模板进行乙酰化处理,以增加纤维素的疏水性,处理后的木模板与疏水性的 PMMA 展现出了更好的相容性,界面间隙得到明显的减少(见图 5),该方法将 1.5mm 的巴沙木透明木材的透明度从 83%提升至 92%,雾度从 70%下降至 50%,还制备了具有 1cm 厚、68%透明度、76%雾度的透明木材。Foster 等<sup>[35]</sup>发现,乙酰化处理能使纤维素和半纤维素之间的氢键得到一定的破坏,使透明木材在平行纤维方向的抗拉强度有所下降,而乙酰化改善了纤维素与聚合物的界面相容性,提升了垂直纤维方向的抗拉强度。此外,由于木材具有干缩湿胀性,填充的树脂一般为定型材料,在湿度变化的条件下产生的应力会导致界面分离<sup>[36, 37]</sup>。Li 等<sup>[38]</sup>利用硅烷偶联剂(KH550)对环氧树脂改性,发现与未改性相比,环氧树脂与纤维素上的羟基结合增多,使透明木材的热稳定性和界面结合强度得到了提升。Wu 等<sup>[39]</sup>利用硅烷偶联剂(KH570)对椴木薄片进行改性处理,添加量从 1%至 8%时,透明木材的透明度和抗拉强度均先增加后减小,当偶联剂添加量为 5%时,透明度和抗拉强度分别比未改性时提升了 5.1%和 16.1MPa。

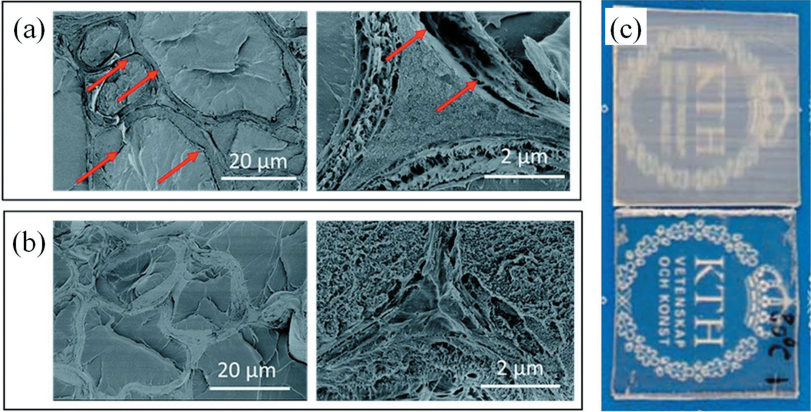


图 5 乙酰化处理前后的透明木材<sup>[34]</sup>

(a) 未乙酰化处理的透明木材界面; (b) 乙酰化处理的透明木材界面; (c) 乙酰化处理前(上)后(下)的透明木材图

Figure 5 Transparent wood before and after acetylation<sup>[34]</sup>

(a) interface of non-acetylated transparent wood; (b) interface of cetylated transparent wood;  
(c) pictures of transparent wood before (top) and after (bottom) acetylation

### 1.5 添加物的影响

通过在树脂溶液或木模板中添加功能性物质,可制备得到多功能化透明木材(见图 6)。在制备过程中,首先需要选择合适的添加方法,若引入物质为分子,则可以先用木模板浸渍其溶液,再填充聚合物。Vasileva 等<sup>[40]</sup>将漂白后的木模板置于浓度为  $1 \times 10^{-3}$  mol/L 的罗丹明 6G(Rhodamine 6G)丙酮溶液中,再将木模板完全浸渍到预聚合的 MMA 溶液中,在 75℃下固化 4h,得到了内部嵌入激光染料的透明木材。若引入的物质为功能化粒子,应先降低其直径至低于可见光波长级别,以减少其对材料透明度的影响,大部分研究者采用的制备方法为先将其添加至 MMA 的预聚合溶液中,再随着浸渍固化过程与透明木材复合。通过在 MMA 的预聚合溶液中添加  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ <sup>[41]</sup>、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ <sup>[42]</sup>、硅量子点(quantum dots, QDs)<sup>[43]</sup>、锑掺杂的氧化锡(antimony-doped tin oxide, ATO)<sup>[44]</sup> 纳米粒子,制备得到的透明木材分别具有隔热、磁性、荧光、红紫外屏蔽等特性。

对于功能化透明木材,引入的附加物质往往具有吸光性,会降低材料的透明度,对力学性能的影响则取决于附加物质的性质。例如, $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子的添加量从 0.1%(wt)增加至 0.5%(wt)时,透明木材的透明度从 63.8%下降至 19.5%,抗拉强度从 40.6MPa 下降至 28.7MPa,原因是  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  是无机粒子,与透明木材相容性较差;ATO 粒子的添加量从 0.3%(wt)增加至 0.7%(wt)时,透明度从 70%降低至 50%,抗拉强度则从 96.4MPa 提升至 113.06MPa,原因是 ATO 上的硅烷偶联物(KH570)改善了疏水聚合物与木模板之间的界面相容性。因此,对于功能化透明木材,尽管其附加性能随着功能化物质的增加而增

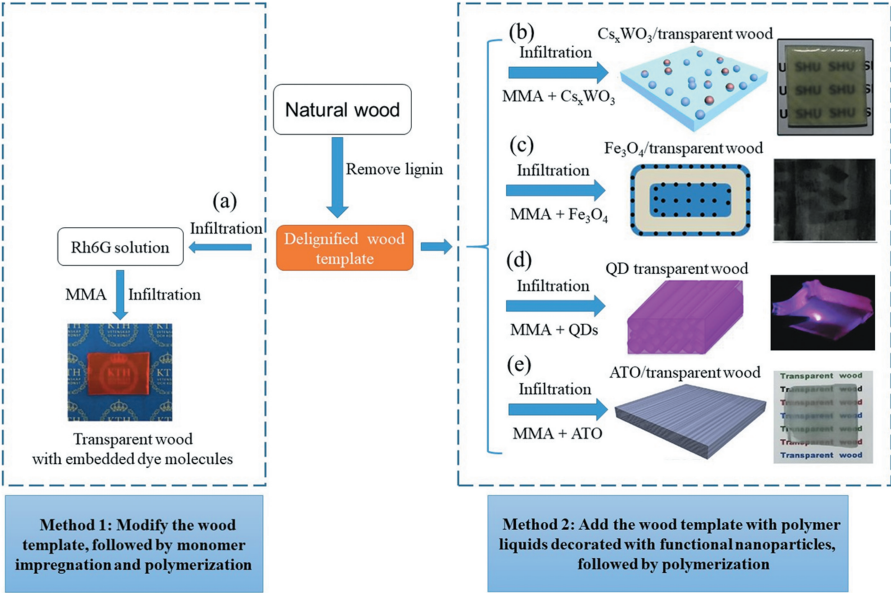


图 6 功能化透明木材的制备示意图

(a)染料激光透明木材<sup>[40]</sup>;(b) $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ /透明木材<sup>[41]</sup>;(c) $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /透明木材<sup>[42]</sup>;(d)QD透明木材<sup>[43]</sup>;(e)ATO/透明木材<sup>[44]</sup>  
Figure 6 Schematic diagram of preparation of functional transparent wood  
(a) transparent wood with embedded dye molecules<sup>[40]</sup>; (b)  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ /transparent wood<sup>[41]</sup>;  
(c)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /transparent wood<sup>[42]</sup>; (d) QD transparent wood<sup>[43]</sup>; (e) ATO/transparent wood<sup>[44]</sup>

强,但物质的吸光性和与透明木材的相容性各异,在综合其性能时,可通过选择合适的附加物质、控制其添加量以及表面改性等方式调控,此外还需控制附加物质在透明木材体系内部的分散均匀性。

2 透明木材的性能

光学性能方面,多数材料的透明度和雾度呈反比,如聚碳酸酯(polycarbonate, PC)、聚甲基丙烯酸甲酯以及玻璃的透明度大于 85%,但雾度均小于 1%<sup>[45]</sup>。表 1 归纳了透明木材的光学性能。透明木材的透明度可达 90%以上,雾度在 10%~95%之间。对木材性质、漂白方式、界面等因素进行调控,可获得期望的光学性能,以满足不同场合的应用需要。例如,高雾度能增加光线的传播路径,适用于太阳能电池的光管理层,提高光电转化效率;低雾度适用于窗户、透光板等对透明度要求较高的场合。

力学性能方面,透明木材同样表现优异,其高强度、高韧性的特点可作为结构材料,同时赋予材料美观、安全、透光的特性。填充聚合物后透明木材的力学性能得到有效提升,原因是聚合物能够填充木模板空隙,两者之间存在较强的氢键、范德华力等结合作用。Berglund 团队<sup>[12, 14]</sup>发现纤维素体积分数 5%的透明木材具有 2.05GPa 的弹性模量,高于 PMMA(1.80GPa)和漂白后的木模板(0.22GPa),纤维素体积分数 19%的透明木材的抗拉强度高达 90.1MPa,高于 PMMA 抗拉强度(44.1MPa)的两倍;透明木材在弯曲断裂时的应力(100.7MPa)与玻璃(116.3MPa)相近,但其应变可达 2.18%,显著高于玻璃的 0.19%,断裂功(1.2MJ·m<sup>-3</sup>)亦高于玻璃(0.1MJ·m<sup>-3</sup>)。Hu 团队<sup>[11, 46]</sup>发现透明木材在垂直纤维方向的抗拉强度(23.38MPa)和弹性模量(1.22GPa)分别为天然木材(4.46MPa, 0.19GPa)的 5 倍和 6 倍;在受到尖锐物体冲击时,具有高达 6%的冲击应变(比玻璃高出两个数量级)且不会破碎。

导热性能方面,透明木材的导热系数(0.15~0.23W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)与木材(0.1~0.2W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)相当,仅为玻璃(1W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)的 20%左右<sup>[12, 18, 31, 44, 46, 47]</sup>,各项异性的性质将有助于热量沿着平行纤维方向扩散,其优异的隔热性能将减少能量的损耗。Li 等<sup>[46]</sup>发现透明木材的导热系数(0.15W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)

低于用于填充的环氧树脂( $0.53\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),是由于木材细胞壁的高声子阻抗以及多重界面声子的散射作用。Jia 等<sup>[23]</sup>利用导热系统对比了透明木材和玻璃的升温情况,发现透明木材和玻璃的顶表面与底表面之间温差( $\Delta T$ )分别为  $11.5^{\circ}\text{C}$  和  $5.1^{\circ}\text{C}$ ,表明透明木材具有优异隔热性能。

表 1 透明木材的光学性能  
Table 1 Optical properties of transparent wood

| 处理方式                                           | 木模板           | 树脂    | 木材方向 | 光学性能                    |        |       |
|------------------------------------------------|---------------|-------|------|-------------------------|--------|-------|
|                                                |               |       |      | 长×宽×厚( $\text{mm}^3$ )  | 透明度(%) | 雾度(%) |
| $\text{Na}_2\text{SO}_3$ <sup>[10]</sup>       | Bass          | PVP   | T    | $15\times15\times1$     | 90     | 80    |
| $\text{Na}_2\text{SO}_3$ <sup>[11]</sup>       | Bass          | Epoxy | L    | $50\times50\times2$     | 80     | 85    |
|                                                |               |       | T    | $50\times50\times2$     | 90     | 95    |
| $\text{Na}_2\text{SO}_3$ <sup>[46]</sup>       | Bass          | Epoxy | T    | $35\times30\times5$     | 90     | 95    |
| $\text{Na}_2\text{SO}_3$ <sup>[18]</sup>       | Poplar fibers | PMMA  | —    | $300\times300\times10$  | 68     | 82    |
|                                                | Ploar         | PMMA  | L    | $80\times25\times1$     | 85     | 61    |
| $\text{Na}_2\text{SO}_3$ <sup>[41]</sup>       | Beech         | PMMA  | L    | $60\times30\times5$     | 86     | 90    |
| $\text{H}_2\text{O}_2$ <sup>[12]</sup>         | Balsa         | PMMA  | L    | $100\times100\times1.5$ | 83     | 75    |
| $\text{H}_2\text{O}_2$ <sup>[21]</sup>         | Bass          | PMMA  | L    | $20\times20\times0.4$   | 44%    | —     |
| $\text{H}_2\text{O}_2$ (steam) <sup>[22]</sup> | Bass          | Epoxy | T    | $50\times50\times5$     | 87%    | 90%   |
| $\text{NaClO}_2$ <sup>[14]</sup>               | Balsa         | PMMA  | L    | $20\times20\times0.7$   | 90     | 50    |
|                                                |               |       |      | $20\times20\times1.2$   | 85     | 71    |
|                                                |               |       |      | $20\times20\times3.7$   | 40     | 80    |
| $\text{NaClO}_2$ <sup>[42]</sup>               | Cathay poplar | PMMA  | —    | $20\times10\times0.5$   | 86     | —     |
| $\text{NaClO}_2$ <sup>[48]</sup>               | Balsa         | PMMA  | L    | $15\times25\times1$     | 86     | 70    |
| $\text{NaClO}_2$ <sup>[31]</sup>               | Cathay poplar | PMMA  | L    | $20\times10\times0.5$   | 90     | —     |
| $\text{NaClO}_2$ <sup>[15]</sup>               | Beech         | PMMA  | —    | $50\times3\times0.1$    | 70     | —     |
|                                                |               |       |      | $50\times3\times0.3$    | 30     | 18    |
|                                                |               |       |      | $50\times3\times0.6$    | 15     | 40    |
|                                                |               |       |      | $50\times3\times0.7$    | 10     | 49    |
| $\text{NaClO}_2$ <sup>[34]</sup>               | Balsa         | PMMA  | L    | $25\times15\times1.5$   | 92     | 50    |
|                                                |               |       |      | $25\times15\times3$     | 89     | 53    |
|                                                |               |       |      | $25\times15\times7$     | 71     | 74    |
|                                                |               |       |      | $25\times15\times10$    | 60     | 76    |
|                                                | Birch         | PMMA  | L    | $25\times15\times0.7$   | 94     | 31    |
|                                                |               |       |      | $25\times15\times1.5$   | 90     | 52    |
| $\text{NaClO}$ <sup>[23]</sup>                 | Bass          | Epoxy | L    | $—\times—\times0.7$     | 92     | 10    |
| $\text{NaClO}$ <sup>[33]</sup>                 | Balsa         | PVA   | L    | $20\times40\times0.8$   | 91     | 15    |

注:T,横向; L,纵向。

### 3 透明木材的应用

#### 3.1 建筑材料

透明木材特殊光学性能、优异保温性能和力学性能使其有望成为新型节能建筑材料,赋予建筑物美观、安全、环保、保温等特性<sup>[16, 49]</sup>(见图 7)。高透明度、高雾度的透明木材能够有效减少光污染并保护室

内隐私,同时引导阳光沿着垂直排列的导管进入室内,形成均匀、舒适的自然光照环境。高透明度、低雾度的透明木材能够有效减少室内照明用电的损耗,有望在未来代替玻璃。在力学性能方面,透明木材作为窗户或结构用材时,更安全、稳定,能够替代易碎、韧性差的玻璃窗户,并能够赋予建筑物独特的外观。在隔热性能方面,透明木材能够减少室内热量流失,有效减少空调等电器的使用。Wang 等<sup>[18]</sup>发现透明木材具有较好的保温性能,在外界温度为 4℃ 的条件下,使用透明木材的模拟房屋室内温度由 35℃ 下降至 20.1℃,而在相同时间内,使用玻璃的模拟房屋的室内温度则由 35.1℃ 下降至 9.1℃。铈钨青铜( $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ )纳米粒子具有近红外屏蔽性能,已被用于玻璃涂层<sup>[50~53]</sup>,Yu 等<sup>[41]</sup>在 MMA 预聚合溶液中添加 0.05% (wt)  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ ,制备得到的透明木材具有 62% 的透明度,通过 10min 连续模拟太阳辐射试验,当初始温度 21℃ 时,使用普通玻璃的室内温度上升了 20.5℃。 $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ /透明木材仅上升 5.2℃。此外,锑掺杂的氧化锡(antimony-doped tin oxide, ATO)粒子具有优良的紫外和近红外屏蔽性能,通常应用于屏蔽玻璃<sup>[54~56]</sup>,Qiu 等<sup>[44]</sup>采用改性的锑掺杂氧化锡(ATO)制备 ATO/透明木材,当 ATO 添加量为 0.7% (wt) 时,ATO/透明木材对紫外线的屏蔽效果高达 80%,应用于窗户时能够减少紫外线对人体皮肤的损害。

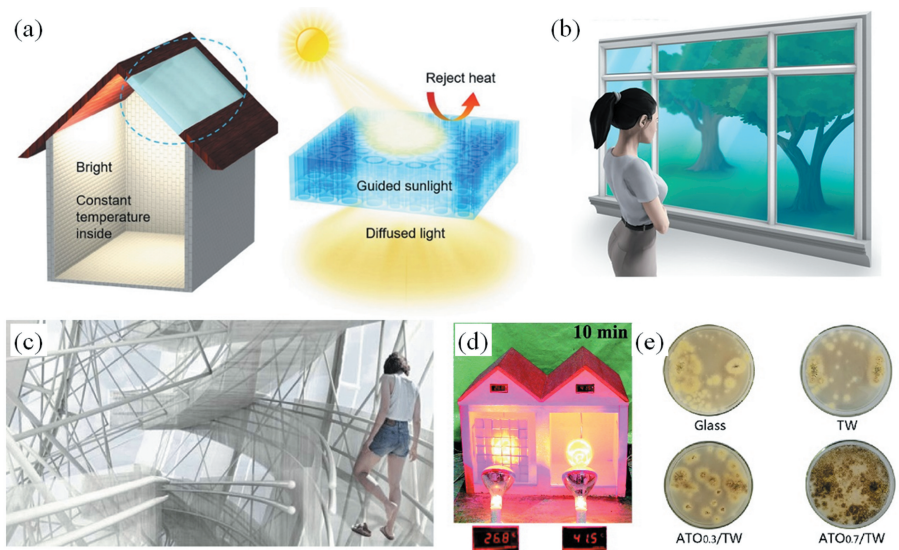


图 7 透明木材的特性及在建筑领域的应用示意图

- (a)透明木材屋顶对光线的分散机理图<sup>[46]</sup>; (b)低雾度透明木材应用于窗户的示意图<sup>[23]</sup>;  
(c)模拟的木结构建筑<sup>[16]</sup>; (d)连续模拟太阳辐射试验下使用  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ /透明木材和普通玻璃的室内温度<sup>[41]</sup>;  
(e)分别用玻璃、透明木材、0.3%ATO/透明木材和 0.7%ATO/透明木材作为覆盖层的 1h 紫外线直射后培养两天的黑曲霉菌生长趋势<sup>[44]</sup>;

Figure 7 Schematic diagram of the characteristics of transparent wood and its application in the field of architecture  
(a) schematic diagram of the dispersion of light through transparent wood<sup>[46]</sup>; (b) schematic diagram of low haze transparent wood applied to windows<sup>[23]</sup>; (c) simulated wooden structure<sup>[16]</sup>; (d) images of the temperature change after continuous simulate solar radiation in  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$ /transparent wood and glass house<sup>[41]</sup>; (e) the growth state of the *A. niger* with shield by glass, transparent wood,  $\text{ATO}_{0.3}$ /transparent wood, and  $\text{ATO}_{0.7}$ /transparent wood after UV light irradiation for 1h and cultivation for 2 days<sup>[44]</sup>.

3.2 发光材料

透明木材的光散射并非只发生在材料的表面,而是由材料内部的界面间隙共同作用引起的,因此通过加入发光材料,利用内部的光散射作用,透明木材即具备在特定条件下成为光源或发光建筑材料的可能。Li 等<sup>[43]</sup>以氢倍半硅氧烷(hydrogen silsesquioxane, HSQ)为原料,采用热退火法制备硅量子点

(quantum dots, QDs), 将其添加至 MMA 预聚合溶液中, 制备得到了内部嵌有 Si 量子点的荧光透明木材, 与内部嵌有量子点的玻璃相比, 透明木材能够发出更整体、均匀的散射光线, 通过光的吸收和光致发光曲线表明量子点产率为 36% (见图 8)。为了减少单层透明木材的各项异性, 该团队还制得荧光透明胶合板<sup>[17]</sup>, 与单层荧光透明木材相比, 多层透明荧光胶合板的强度更高且能够散发出更加均匀的光线, 该研究使透明木材有望应用于下一代承重型发光材料。Vasileva 等<sup>[40]</sup>将木模板浸渍于罗丹明 6G 染料溶液中, 制得了染料激光透明木材, 由于材料中纤维素作为小型光学谐振器, 染料透明木材在泵浦条件下具有一定的激光作用, 发光光谱小于 10nm。此研究有助于开发透明木材在环境友好和可持续照明领域的应用。

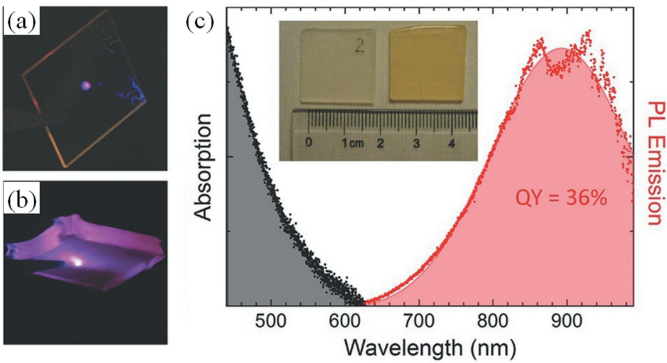


图 8 (a) 嵌入 QD 的玻璃在 405nm 激光泵浦下的发光性质; (b) 嵌入 QD 的透明木材在 405nm 激光泵浦下的发光性质; (c) QD 透明木材的吸收和光致发光曲线 (实物左: 透明木材, 实物右: QD 透明木材)<sup>[43]</sup>

Figure 8 (a) The photograph of QDs embedded in glass under 405nm laser pumping; (b) the photograph of QDs transparent wood under 405nm laser pumping; (c) absorption and photoluminescence (PL) emission curves of QDs transparent wood ((left) transparent wood and (right) Si QD wood)<sup>[43]</sup>.

### 3.3 光伏器件

有效的光管理能够提高太阳能电池整体转换效率<sup>[57~60]</sup>。透明木材的高透明和高雾度特性, 能够在透过大量光线的同时增加光线的传播路径, 在光管理方面是有利的。利用此特性, Zhu 等<sup>[10]</sup>将透明木材作为 GaAs 太阳能电池的光管理层 (见图 9a), 由于光子在太阳能电池中的传播路径增加, 光转换效率成功提升了 18%。基底是太阳能电池的重要部分, 它决定了产品的最终用途并影响太阳能电池的可持续性, 常用基底为玻璃和塑料。Li 等<sup>[48]</sup>采用低温 (<150℃) 工艺将钙钛矿太阳能电池组装到透明木材上 (见图 9b), 首次实现了直接使用透明木材作为太阳能电池的基底, 其转换效率高达 16.8%, 并且具有优良的长期稳定性。此项技术有望在未来将太阳能电池与透明木材建筑结构相结合, 以达到节能的目的。

此外, 透明木材在不同条件下的各异光学性质能够在智能变色器件领域得到应用。Lang 等<sup>[61]</sup>构建了以透明木材为衬底的共轭聚合物基电致变色器件 (见图 9c), 该器件能够在不同的电压下表现出鲜明的品红色至透明无色变化。Li 等<sup>[34]</sup>通过在透明木材上附着聚合物分散液晶薄膜得到按需开关的透明智能窗 (见图 9d)。在电源关闭的情况下, 该材料高雾度的特性能够保护室内隐私, 在通电状态下, 其表面呈现出优良的光学透明性和低雾度性, 此种材料可通过调节其光学特质以满足不同场合的需要。

### 3.4 其它应用

3.4.1 透明磁性材料 随着无线通信技术的飞速发展, 人们需要电磁波吸收材料来减少电磁波辐射对生活产生的影响<sup>[62]</sup>。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 具有较强的微波吸收性能, 作为一种较低成本的磁性材料, 其在电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI) 屏蔽领域具有潜在的应用价值<sup>[63]</sup>。Gan 等<sup>[42]</sup>将两者复合制备得到的磁性透明木材, 具有较好的磁特性。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 含量为 0.1% (wt) 的透明木材, 具有 63.8% 的透明度, 0.35emu/g 的饱和磁化强度, 40.6MPa 的拉伸强度<sup>[42]</sup> (见图 10a, b)。该团队<sup>[31]</sup>又通过溶胶热法制备了

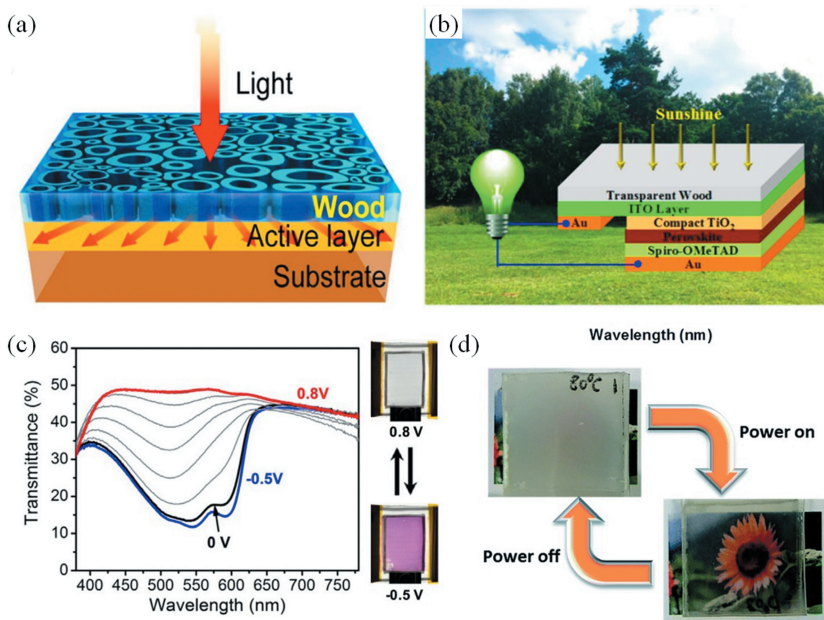


图 9 透明木材在光电材料领域的应用

- (a)透明木材作为砷化镓太阳能电池的光管理层<sup>[10]</sup>；(b)透明木材作为钙钛矿太阳能电池的基底<sup>[48]</sup>；  
(c)透明木材作为共轭聚合物基电致变色器件的基底在不同电压下的颜色变化<sup>[61]</sup>；  
(d)在透明木基板上附着 PDLC 薄膜作为可调光智能木窗<sup>[34]</sup>

Figure 9 Applications of transparent wood in photoelectric materials.

- (a) transparent wood as a light management layer for GaAs solar cells<sup>[10]</sup>；(b) transparent wood substrate for perovskite solar cells<sup>[48]</sup>；(c) conjugated polymer-based electrochromic devices (ECD) with transparent wood as the substrate<sup>[61]</sup>；(d) optical tunable smart wood window demonstration by lamination of polymer dispersed liquid crystal (PDLC) film on transparent wood substrate<sup>[34]</sup>

兼具磁性和荧光性能的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3@\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$  NP 纳米粒子,通过在 MMA 预聚合溶液中添加 0.1% (wt)的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3@\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$  NP,得到具有 80.6%的透明度和 0.26emu/g 的饱和磁化强度的荧光磁性透明木材。透明磁性木材可应用于智能屏蔽窗户,透明屏蔽板等电磁屏蔽领域,荧光磁性透明木材在绿色发光二极管照明设备,发光磁性开关和防伪设施等应用中具有巨大应用潜力。

3.4.2 热能存储材料 基于相变材料(phase-change materials PCMs)的热能存储系统在较小的温度范围内具有较大的热能容量,在降低能耗方面具有出色表现<sup>[64~66]</sup>。而有机相变材料能够在熔化温度下发生可逆固-液相变从而存储潜热能<sup>[67, 68]</sup>。Montanari 等<sup>[69]</sup>将熔融状态的相变材料聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG)与 MMA 预聚体以 7 : 3 的质量比混合,浸渍脱木素的木模板后聚合,得到了基于 PEG 相变材料的储能透明木材。由于 PEG 的熔点  $T_m$  较低,当温度高于体系的  $T_m$  时,透明木材的透明度上升、雾度下降(见图 10c)。通过对比 60℃加热板上玻璃和储能透明木材的升温情况,发现玻璃和储能透明木材分别需要 20s 和 210s 达到设定的温度(见图 10d),说明该透明木材具有优异的热存储容量和热调节性能。此外,经过 20 次冷热循环后,储能透明木材能够保持良好的热可靠性。该研究有望将透明木材应用于热能存储和温度传感器领域。

4 结语

透明木材原料来源广泛,制备步骤简便,在建筑材料、光电材料等领域有极大的应用价值。提升大尺寸材料的透明度,寻找工业化生产方法是当前透明木材研究的热点和难点。近年来在大尺寸透明木材的

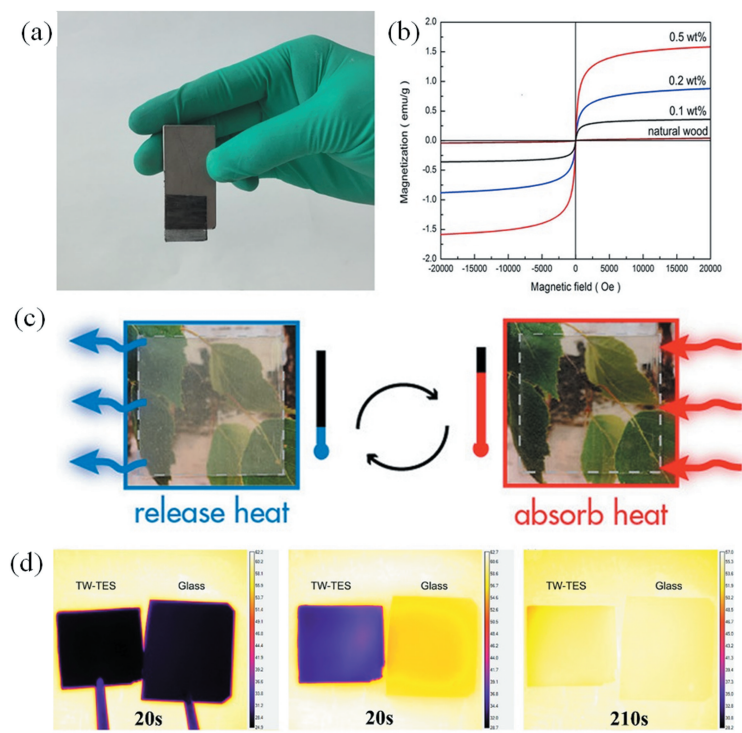


图 10 透明木材的磁性及热储能应用

(a)磁性透明木材<sup>[42]</sup>;(b) $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 添加量对透明木材磁性的影响曲线<sup>[42]</sup>;(c)热储能透明木材在加热和冷却时光学性质的变化<sup>[69]</sup>;(d)红外热像仪记录的热储能透明木材和玻璃在 60℃热演化图像<sup>[69]</sup>

Figure 10 Magnetic and thermal energy storage applications for transparent wood

(a) magnetic transparent wood<sup>[42]</sup>; (b) effect of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  addition on magnetic properties of transparent wood<sup>[42]</sup>; (c) changes in optical properties of transparent wood for thermal energy storage during heating and cooling<sup>[69]</sup>; (d) thermal evolution image of thermal energy storage transparent wood and glass recorded by infrared camera at 60℃<sup>[69]</sup>.

研究上已取得重要进展,例如乙酰化处理木模板,制备透明纤维木材以及利用蒸汽改性法脱去更多的木质素等,但由于工艺、时间、成本及安全等问题,透明木材距离实际大规模应用还有一定差距。从目前的研究来看,需要解决两方面的问题(1)提升材料界面相容性,寻找高效的方法来减少或消除纤维与聚合物之间的空隙;(2)寻找制备新思路,目前有团队计划参照刨花板的制备方法以实现大规模制备透明木材,其中相关工艺需要得到深入研究。此外,透明木材的耐久性、耐腐蚀性、光稳定性以及阻燃性能尚未见报道,大量系统化的研究有待推进。

参考文献:

[ 1 ] Fink S. *Holzforschung*, 1992, 46(5): 403~408.  
[ 2 ] Zhu H, Fang Z, Preston C, Li Y, Hu L. *Energy Environ Sci*, 2014, 7(1): 269~287.  
[ 3 ] Wang S, Lu A, Zhang L. *Prog Polym Sci*, 2016, 53: 169~206.  
[ 4 ] Iwamoto S, Nakagaito A N, Yano H, Nogi M. *Appl Phys A*, 2005, 81(6): 1109~1112.  
[ 5 ] Yano H, Sasaki S, Shams M I, Abe K, Date T. *Adv Opt Mater*, 2014, 2(3): 231~234.  
[ 6 ] Nogi M, Iwamoto S, Nakagaito A N, Yano H. *Adv Mater*, 2009, 21(16): 1595~1598.  
[ 7 ] Taniguchi T, Okamura K. *Polym Int*, 1998, 47(3): 291~294.  
[ 8 ] Müller U, Rätzsch M, Schwanninger M, Steiner M, Zöbl H. *J Photochem Photobiol B-Biol*, 2003, 69(2): 97~105.  
[ 9 ] 杨淑惠. *植物纤维化学*. 北京: 中国轻工业出版社, 2006.  
[10] Zhu M, Li T, Davis C S, Yao Y, Dai J, Wang Y, Alqatari F, Gilman J W, Hu L. *Nano Energy*, 2016, 26: 332~339.

- [11] Zhu M, Song J, Li T, Gong A, Wang Y, Dai J, Yao Y, Luo W, Henderson D, Hu L. *Adv Mater*, 2016, 28(26): 5181~5187.
- [12] Li Y, Fu Q, Rojas R, Yan M, Lawoko M, Berglund L. *Chem Sus Chem*, 2017, 10(17): 3445~3451.
- [13] 秦建鲲, 白天, 邵亚丽, 赵鑫, 李帅, 胡英成. *北京林业大学学报*, 2018, 40(7): 113~120.
- [14] Li Y, Fu Q, Yu S, Yan M, Berglund L. *Biomacromolecules*, 2016, 17(4): 1358~1364.
- [15] Yaddanapudi H S, Hickerson N, Saini S, Tiwari A. *Vacuum*, 2017, 146: 649~654.
- [16] Katunský D, Kanócz J, Karl'a V. *Int Rev Appl Sci Eng*, 2018, 9(2): 101~106.
- [17] Fu Q, Yan M, Jungstedt E, Yang X, Li Y, Berglund L A. *Compos Sci Technol*, 2018, 164: 296~303.
- [18] Wang X, Zhan T, Liu Y, Shi J, Pan B, Zhang Y, Cai L, Shi S Q. *ChemSusChem*, 2018, 11(23): 4086~4093.
- [19] 吴燕, 吴佳敏, 唐彩云, 曹坤丽, 陈红, 吴智慧. *中国*, CN106243391A. 2016-12-21.
- [20] Wu J, Wu Y, Yang F, Tang C, Huang Q, Zhang J. *Compos Pt A-Appl Sci Manuf*, 2019, 117: 324~331.
- [21] Wu Y, Wu J, Yang F, Tang C, Huang Q. *Polymers*, 2019, 11(5): 776.
- [22] Li H, Guo X, He Y, Zheng R. *J Mater Res*, 2019, 34(6): 932~940.
- [23] Jia C, Chen C, Mi R, Li T, Dai J, Yang Z, Pei Y, He S, Bian H, Jang S H. *ACS Nano*, 2019, 13(9): 9993~10001.
- [24] 文甲龙, 陈天影, 孙润仓. *林业工程学报*, 2017, 2(5): 76~84.
- [25] 张琳. 麦草碱性亚硫酸盐深度脱木素蒸煮及其漂白特性. *南京:南京林业大学*, 2011.
- [26] 钱学仁, 安显慧. *纸浆绿色漂白技术*. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [27] Gellerstedt G, Agnemo R. *Acta Chem Scand B*, 1980, 34(0): 4.
- [28] Gindl-Altmutter W, Obersriebnig M, Veigel S, Liebner F. *ChemSusChem*, 2015, 8(1): 87~91.
- [29] Qin X, Xia W, Sinko R, Ketten S. *Nano Lett*, 2015, 15(10): 6738~6744.
- [30] Awaja F, Zhang S, Tripathi M, Nikiforov A, Pugno N. *Prog Mater Sci*, 2016, 83: 536~573.
- [31] Gan W, Xiao S, Gao L, Gao R, Li J, Zhan X. *ACS Sustain Chem Eng*, 2017, 5(5): 3855~3862.
- [32] Rao A S, Nagarajappa G, Nair S, Chathoth A, Pandey K K. *Compos Sci Technol*, 2019, 182: 107719.
- [33] Mi R, Li T, Dalgo D, Chen C, Kuang Y, He S, Zhao X, Xie W, Gan W, Zhu J. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(1): 1907511.
- [34] Li Y, Yang X, Fu Q, Rojas R, Yan M, Berglund L. *J Mater Chem A*, 2018, 6(3): 1094~1101.
- [35] Foster K E, Hess K M, Miyake G M, Srubar W V. *Materials*, 2019, 12(14): 2256.
- [36] Liu Y, Gao J, Guo H, Pan Y, Zhou C, Cheng Q, Via B K. *BioResources*, 2015, 10(1): 638~646.
- [37] Liu Y, Via B, Pan Y, Cheng Q, Guo H, Auad M, Taylor S. *Polymers*, 2017, 9(3): 106.
- [38] 李美玲, 庞瑶, 李南, 单家成, 刘毅. *中国人造板*, 2018, 25(8): 22~25, 38.
- [39] 吴佳敏, 吴燕, 黄琼涛, 周季纯, 韩岩. *林产工业*, 2019, 46(8): 22~25, 29.
- [40] Vasileva E, Li Y, Sychugov I, Mensi M, Berglund L, Popov S. *Adv Opt Mater*, 2017, 5(10): 1700057.
- [41] Yu Z, Yao Y, Yao J, Zhang L, Chen Z, Gao Y, Luo H. *J Mater Chem A*, 2017, 5(13): 6019~6024.
- [42] Gan W, Gao L, Xiao S, Zhang W, Zhan X, Li J. *J Mater Sci*, 2017, 52(6): 3321~3329.
- [43] Li Y, Yu S, Veinot J G C, Linnros J, Berglund L, Sychugov I. *Adv Opt Mater*, 2017, 5(1): 1600834.
- [44] Qiu Z, Xiao Z, Gao L, Li J, Wang H, Wang Y, Xie Y. *Compos Sci Technol*, 2019, 172: 43~48.
- [45] Macdonald W A, Looney M K, Mackerron D, Eveson R, Adam R, Hashimoto K, Rakos K. *J Soc Inf Disp*, 2007, 15(12): 1075~1083.
- [46] Li T, Zhu M, Yang Z, Song J, Dai J, Yao Y, Luo W, Pastel G, Yang B, Hu L. *Adv Energy Mater*, 2016, 6(22): 1601122.
- [47] Burgert I, Cabane E, Zollfrank C, Berglund L. *Int Mater Rev*, 2015, 60(8): 431~450.
- [48] Li Y, Cheng M, Jungstedt E, Xu B, Sun L, Berglund L. *ACS Sustain Chem Eng*, 2019, 7(6): 6061~6067.
- [49] Sieberath U, Lieb K, Benitz-Wildenburg J. *Adhes Adhes Sealants*, 2017, 14(2): 10~13.
- [50] Takeda H, Adachi K. *J Am Ceram Soc*, 2007, 90(12): 4059~4061.
- [51] Liu J, Xu Q, Shi F, Liu S, Luo J, Bao L, Feng X. *Appl Surf Sci*, 2014, 309: 175~180.
- [52] Guo C, Yin S, Huang L, Yang L, Sato T. *Chem Commun*, 2011, 47(31): 8853~8855.
- [53] Guo C, Yin S, Yan M, Kobayashi M, Kakihana M, Sato T. *Inorg Chem*, 2012, 51(8): 4763~4771.
- [54] Hu Y, Zhong H, Wang Y, Lu L, Yang H. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2018, 174: 499~508.
- [55] Gao Y, Wang S, Kang L, Chen Z, Du J, Liu X, Luo H, Kanehira M. *Energy Environ Sci*, 2012, 5(8): 8234~8237.
- [56] Cho K S, Kim H K. *RSC Adv*, 2018, 8(5): 2599~2609.
- [57] Yao Y, Yao J, Narasimhan V K, Ruan Z, Xie C, Fan S, Cui Y. *Nat Commun*, 2012, 3: 664.
- [58] Yu Z, Raman A, Fan S. *Proc Natl Acad Sci*, 2010, 107(41): 17491~17496.
- [59] Fang Z, Zhu H, Yuan Y, Ha D, Zhu S, Preston C, Chen Q, Li Y, Han X, Lee S, Chen G, Li T, Munday J, Huang J, Hu L.

Nano Lett, 2014, 14(2): 765~773.

[60] Ha D, Fang Z, Hu L, Munday J N. Adv Energy Mater, 2014, 4(9): 1301804.

[61] Lang A W, Li Y, De Keersmaecker M, Shen D E, Österholm A M, Berglund L, Reynolds J R. ChemSusChem, 2018, 11(5): 854~863.

[62] Che R C, Peng L M, Duan X F, Chen Q, Liang X L. Adv Mater, 2004, 16(5): 401~405.

[63] Sun D, Zou Q, Wang Y, Wang Y, Jiang W, Li F. Nanoscale, 2014, 6(12): 6557~6562.

[64] Sharma A, Tyagi V V, Chen C, Buddhi D. Renew Sust Energ Rev, 2009, 13(2): 318~345.

[65] Akeiber H, Nejat P, Majid M Z A, Wahid M A, Jomehzadeh F, Famileh I Z, Calautit J K, Hughes B R, Zaki S A. Renew Sust Energ Rev, 2016, 60: 1470~1497.

[66] Soares N, Costa J J, Gaspar A R, Santos P. Energy Build, 2013, 59: 82~103.

[67] Pielichowska K, Pielichowski K. Prog Mater Sci, 2014, 65: 67~123.

[68] Sarier N, Onder E. Thermochim Acta, 2012, 540: 7~60.

[69] Montanari C, Li Y, Chen H, Yan M, Berglund L A. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(22): 20465~20472.

## Research Progress of Properties and Applications of Transparent Wood

LU Hong-yi, DING Chun-xiang, ZHAI Sheng-cheng, PAN Ming-zhu\*

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** As an emerging environment-friendly material, Transparent wood has both the sustainable renewable properties of natural wood and the excellent optical properties of glass. The strength of transparent wood is higher than that of wood, its toughness is better than glass, and is more energy-saving and environmentally friendly than plastic. The preparation and application of wood has achieved rapid development in just a few years. New functional properties such as magnetic properties, fluorescence, and UV resistance can also be obtained by combining functional nanoparticles with transparent wood. Based on the properties of transparent wood, this paper analyzes the effects of wood properties, bleaching methods, polymer types, interface factors and added substances on transparent wood, and summarizes the applications of transparent wood in construction, luminescent materials, photovoltaic materials, magnetic materials and energy storage materials. Finally, it is pointed out that systematic research on its corrosion resistance, flame retardancy, and light stability, and finding industrial production methods are the focus of future research, in order to provide theoretical basis and practical direction for the control of properties and further research of transparent wood.

**Key words:** Transparent wood; Composite material; Wood bleaching; Polymer infiltration