

古建筑木构件原位加固防腐研究

曹 静¹,汪娟丽¹,李玉虎^{1*},王 肃²,杜德新²,董 梅²

(1. 陕西师范大学 材料科学与工程学院 历史文化遗产保护教育部工程研究中心, 陕西 西安 710119;

2. 西安唐皇城墙含光门遗址博物馆, 陕西 西安 710002)

摘 要:古建筑是以木结构为主的建筑体系,木材是其主要承重构件,它具有极高的文物、历史和艺术价值,它不仅是中华民族的宝贵财产,也是世界建筑艺术的珍宝。木材作为一种天然生物质材料,主要由纤维素、半纤维素、木质素及少量的果胶和无机盐组成;由于木材本身耐久性差,易受物理、化学和生物损害如腐朽菌、虫的侵蚀,使其强度降低直至全部损坏。以含光门古建筑木构件修复保护工程为例,旨在通过借鉴二氧化硅/木材复合材料溶胶-凝胶制备思路,根据生物矿化原理,通过无机复合材料、防腐试剂原位对古建筑木构件材质的性能改善,从而起到原位加固防腐的作用。

关键词:古建筑;含光门;木构件;原位加固

中图分类号:S781.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)04-0257-06

In-situ Consolidation and Restoration of Wooden Components in Historic Buildings

CAO Jing¹, WANG Juan-li¹, LI Yu-hu^{1*}, WANG Su², DU De-xin², DONG Mei²

(1. Engineering Research Center of Historical and Cultural Heritage Protection, Ministry of Education, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China; 2. Hanguang Entrance Remains Museum of Xi'an Tang Imperial City, Xi'an, Shaanxi 710002, China)

Abstract: Historic buildings were mainly built with wooden structures. The wooden components of historic buildings have very high cultural, historical and artistic value as relics. They are not only the invaluable property of the China, but also a cherished art treasure for the international architecture. As a natural and biological material, wood is mainly composed of cellulose, hemicellulose, lignin and trace amounts of pectin and inorganic salts. Since wood is inherently non-durable, it is susceptible to physical, chemical and biological damages such as fungal decay and insect infestation, which can weaken its strength until completely deteriorates. In this paper, taking the project of in-situ consolidation and restoration of wooden components in a historic building, Hanguang Entrance of Imperial City as an example, some well-developed methods for the protection of ancient relics were introduced, such as using silicon dioxide/wood composite made by sol-gel for bio-mineralization, by which the properties of the wooden components were improved by inorganic compounded material and preservatives to conserve and consolidate the relics.

Key words: historic building; Hanguang Entrance Remains Museum; wood component; in-situ consolidation and restoration

西安唐皇城墙含光门遗址博物馆馆内收藏有一批 2004 年西安城墙安定门城楼大修时遗留下来的明清时期不同形式的建筑构件和古建文物,如金柱、翼角檐椽、飞椽、连檐木、瓦口木、大连檐、拱垫板、额枋、楼楞、下坎等古建筑木构件,这些文物是按我国古代建筑《营造法式》所规定的做法制作的,用材尺度、比例相当精确,有较高的科学艺术价值,是西安城墙的精髓所在^[1]。其中现存最少、保存最完整的

收稿日期:2014-06-17 修回日期:2014-12-01
作者简介:曹静,女,在读博士,研究方向:科技考古与文物保护材料。E-mail:josephinecj@126.com
* 通信作者:李玉虎,男,教授,研究方向:科技考古与文物保护材料。E-mail:liyuhu@snnu.edu.cn

用整根木料断刻的明代大连檐,是研究古建筑结构极为珍贵的实物资料。古建筑作为以木结构为主的建筑体系^[2-6],其主要承重构建柱、梁、枋、椽等使用的都是木材,而木材作为一种天然生物质材料,本身耐久性差,易受自然因素(物理、化学和生物损害如腐朽菌、虫)的侵蚀,使木材强度降低直至全部损坏^[7-8]。因此,对于古建筑木构件原位修复保护的研究迫在眉睫。

近年来,木材/复合材料的制备以及性能的研究成为木材科学领域研究的热点^[9-15]。溶胶-凝胶法制备木材/复合材料由于具有工艺简单,反应易达到分子水平上的均匀、反应温度低的特点受到广泛关注。它实现了分子水平上的原位复合,并且保留了木材原有的优良环境学特性,改善了木材的尺寸稳定性,表面硬度也得到了明显提高。日本的 Saka and Ogiso 等最先利用溶胶-凝胶法制备了二氧化硅/木材复合材料,并研究了其阻燃性、尺寸稳定性、生物保护等性质;我国学者^[10-13]用溶胶-凝胶法制备了二氧化硅/木材复合材料,并研究了其尺寸稳定性、热降解性、力学性质;研究报道了二氧化硅/木材复合材料的微观结构特点、二氧化硅凝胶在木材中的存在位置与改善木材尺寸稳定性的关系。通过借鉴二氧化硅/木材复合材料溶胶-凝胶制备思路,根据生物矿化原理,采用无机复合材料、防腐试剂原位对古建筑木构件材质的性能改善,从而起到原位加固防腐古建筑木构件的作用。

1 材料与方法

1.1 试剂和仪器

试验试剂:5%~15%水性氟溶液、0.01%~0.5%百菌清溶液、正硅酸乙酯溶液(TEOS),乙醇,水性氟溶液所述化学原料均为工业纯。

试验仪器:莱卡 SM2400 木材切片机、奥林巴斯 BX41 光学显微镜、美国宝丽莱超景深数码显微镜、荷兰 Philips-FEI 环境扫描电镜。

1.2 模拟样的选取及处理

选用的模拟样试材为杉木,用于测定增重率、固体膨胀率及吸湿处理的尺寸为:25 mm(R)×25 mm(T)×5 mm(L);XRD 测定试样为矩形薄片:30 mm(R)×120 mm(T)×50 mm(L);SEM 及 EDAX 分析采用 25 mm(R)×25 mm(T)×5 mm(L)的试样。

具体处理步骤如下:

第 1 步:采用干燥的柔软毛刷清扫模拟样表面,彻底去除粘落在木构件表面的浮尘及污物。

第 2 步:采用 5%~15%水性氟溶液逐滴滴渗

模拟样截面,以使溶液不在模拟样表面流动为宜;外面表采用喷洒的方法使 5%~15%水性氟溶液均匀喷洒在模拟样表面,反复操作直至溶液渗透深度达 3~5 cm;自然放置 0.5 h,使其充分渗透进入木构件内部;

第 3 步:采用乙醇稀释百菌清溶液,得到 0.01%~0.05%百菌清溶液,并均匀喷洒在模拟样的外表面,反复操作 3 次,自然放置 1 h,使其充分渗透;

第 4 步:采用正硅酸乙酯溶液逐滴滴渗模拟样截面,以使溶液不在模拟样表面流动为宜;外面表采用喷洒的方法使正硅酸乙酯溶液均匀喷洒在模拟样表面,反复操作使其充分渗透进入木构件内部,直至溶液渗透深度达 3~5 cm;再重复上述加固过程第 2~第 4 步骤 1 次;自然放置 7 d,使模拟样中原位生成的二氧化硅/木材复合材料自然陈化、干燥,即完成原位防腐和加固处理。

2 结果与分析

通过选取木材模拟样原位防腐加固处理,将 5%~15%水性氟溶液、0.01%~0.05%百菌清乙醇溶液、正硅酸乙酯溶液在原位渗透处理木材模拟样基体时,木材模拟样本身的细胞壁作为反应器,依靠木材细胞壁提供的反应框架作为二氧化硅/木材复合材料的反应空间,正硅酸乙酯在古建筑木构件基体渗透吸附 5%~15%水性氟溶液,以及 0.01%~0.5%百菌清乙醇溶液的催化作用下,发生水解、缩合反应,最后形成了二氧化硅/木材复合材料,经过自然放置、陈化、干燥,最终有效地对木材模拟样起到原位防腐加固。

为了验证木材模拟样原位防腐加固处理的效果,对模拟样的性能进行了分析测试。

2.1 固体膨胀率吸湿处理

将原位防腐处理过的模拟样试材放在干燥器中(底部放蒸馏水)进行吸湿处理,观察其尺寸在吸湿过程中的变化;在室温自然干燥状态下测量处理前后的模拟样试材的弦向、径向尺寸,其差值与处理前尺寸的比值百分比为固体膨胀率。

木材/二氧化硅复合材料的增重率与含水率成正相关,随含水率的增加而增加。这是因为本课题所述方法中,水在化学处理过程中起到引发剂的作用,水越多引发越多的正硅酸乙酯进行水解、缩聚反应,最终生成的凝胶越多。固体膨胀率随着增重率的增加而增加(如图 1 所示),经化学处理后产生的固体膨胀率是由于木材内部被充填了其他物质所致,即是由于二氧化硅凝胶进入木材细胞壁无定形

区中的间隙,导致细胞壁尺寸的增加,增重率越大,生成的二氧化硅凝胶越多,固体膨胀率也越大。其中,弦向固体膨胀率大于径向。

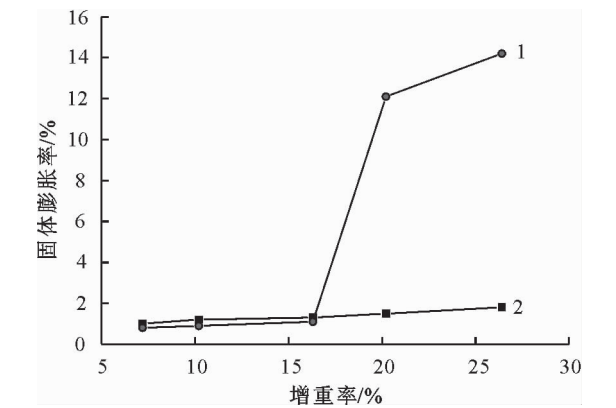


图 1 增重率与固体膨胀率的关系(1—弦向,2—径向)
Fig. 1 Relationships of weight and expansion
(1-tangential, 2-radial)

在吸湿过程中,木材/二氧化硅复合材料的增重率与尺寸变化率呈负相关,随着增重率增加,尺寸变化率减小。这是因为生成的二氧化硅凝胶充填在木材细胞壁无定形区中,使这些区域中的羟基被屏蔽,在吸湿处理时这些羟基不再吸附水分子而产生润胀。生成的凝胶越多,被屏蔽的羟基越多,其吸附水分子产生润胀的能力越弱。因此,随着增重率的增加,尺寸变化率逐渐变小。

2.2 扫描电镜(SEM)分析

将原位防腐处理前后的模拟样试材直接用于 SEM 检测分析。分别进行横、径向切片以及径向切片的 SEM 分析。

由 SEM 的观察结果(图 2)不难发现,处理后的各切面的形貌与未处理原始木材切片形貌无肉眼可见的显著变化,仍保持原木材切片的孔隙结构,只是孔隙大小明显变化,二氧化硅部分以物理填充方式存在于木材的微毛细管中;在严重腐朽的木质部分,二氧化硅部分以物理填充方式存在于木材的大孔隙及纤维孔道中,部分与木材组分成分中的纤维素紧

密结合在一起,使木材的细胞壁的骨架得到填充加固。结合木材的增重率测试结果,经化学处理后产生的固体膨胀是由于二氧化硅凝胶进入木材细胞壁无定形区中的间隙,导致细胞壁尺寸的增加,增重率越大。由此,可以推测 TEOS 等完全渗入了木材细胞壁,生成的二氧化硅凝胶越多,并原位转化成二氧化硅无机相,与木材中的纤维素等一起构成了细胞壁的骨架物质,导致固体膨胀率也越大;TEOS 部分与木材组分成分中的纤维素紧密结合在一起,构成了细胞壁的骨架物质。

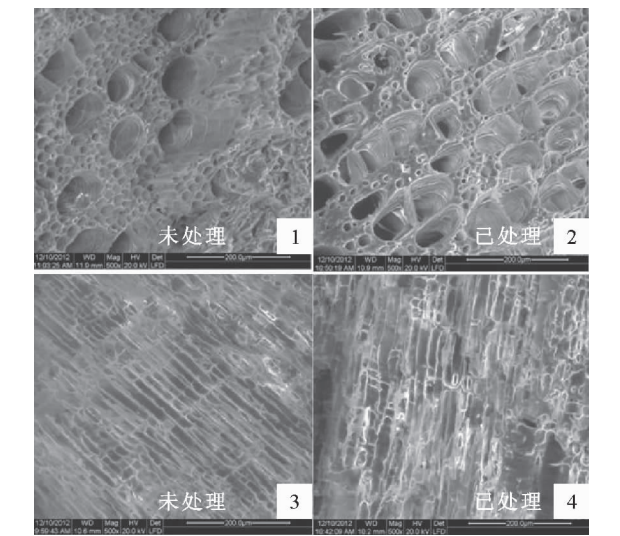
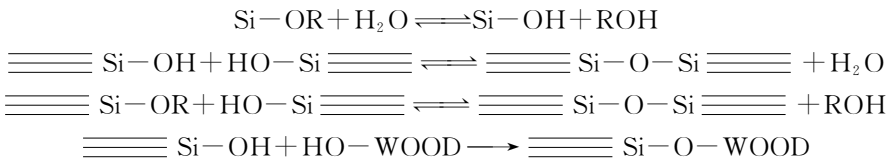


图 2 扫描电镜图(1—横切面,未处理,2—横切面,已处理,3—径切面,未处理,4—径切面,已处理)
Fig. 2 SEM(1-transverse section of untreated, 2-transverse section of treated, 3-longitudinal section of untreated, 4-longitudinal section of treated)

2.3 红外谱图分析

木材细胞壁作为木材骨架,其最基本的结构物质是纤维素。纤维素分子式为(C₆H₁₀O₅)_n,在每个结构单元中都含有 3 个活性羟基。当 TEOS 进入木材细胞壁后,在一定条件下通过扩散达到浓度平衡,在细胞壁纳米空间内形成其过饱和溶液,TEOS 的羟基与木材纤维素等分子的羟基相互作用:



TEOS 进入木材细胞壁后,通过扩散达到浓度平衡,在细胞壁纳米空间内形成其过饱和溶液,纤维素等分子的羟基与 TEOS 的羟基相互作用连接后,以[SiO₄]为基本组成单元,通过不同键角的 Si-O-Si 键连接而成的网络结构,这种二氧化硅空间三维网

络与木材纤维素等一起构成了木材的硬化组织,从而起到加固作用。

由图 3 所示未处理木材以及木材/二氧化硅复合材料的红外光谱(IR)分析结果可以看出:1)处理后的木材/二氧化硅复合物的红外图谱在 3 600

cm^{-1} 处的强峰消失,说明羟基游离的特征峰消失;而在 $3\,300\,\text{cm}^{-1}$ 处有一个强峰,说明出现了的羟基缔合峰,说明发生了羟基的缩合。2)处理后的木材/二氧化硅复合物的红外图谱在 $1\,068$ 和 $847\,\text{cm}^{-1}$ 处出现明显的 Si-O-Si 峰,说明随着原位合成过程的完全,TEOS 水解产物会逐渐发生缩聚,形成二氧化硅复合物。3)处理后的木材/二氧化硅复合物的红外图谱在 $1\,200\,\text{cm}^{-1}$ 处出现明显吸收峰,说明有 C-O 伸缩或者 C-F 伸缩发生,说明木材与二氧化硅形成了 C-O-C 共价交联结构,水性氟也被修饰到交联网络之中,或二氧化硅凝胶通过游离羟基与木材的氢键和部分化学键结合,形成物理的填充。

2.4 X 线能谱(EDXA)分析

通过原位防腐加固处理过的模拟样试材纵向以及横向切面直接 EDXA 图可以看出(图 4),Si、F 以及 Cl 元素的含量较高,说明加固试剂中的 Si 元素

以及 F 元素都有效地被固定在木材基质中;防腐试剂有效的杀菌成分 Cl 元素也大量地被固定在木材结构中。从而实现了原位的加固防腐杀菌的目的。

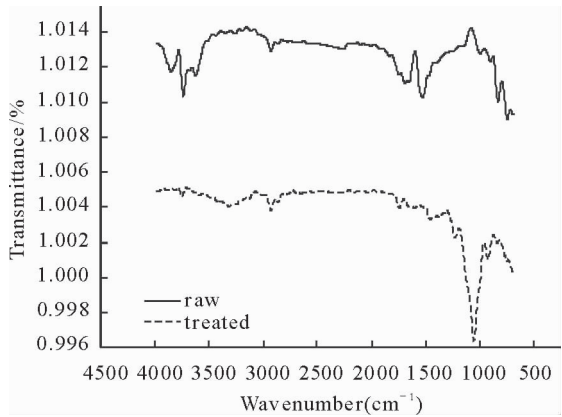


图 3 木材原位处理前后红外谱图

Fig. 3 IR spectra for raw and treated wood

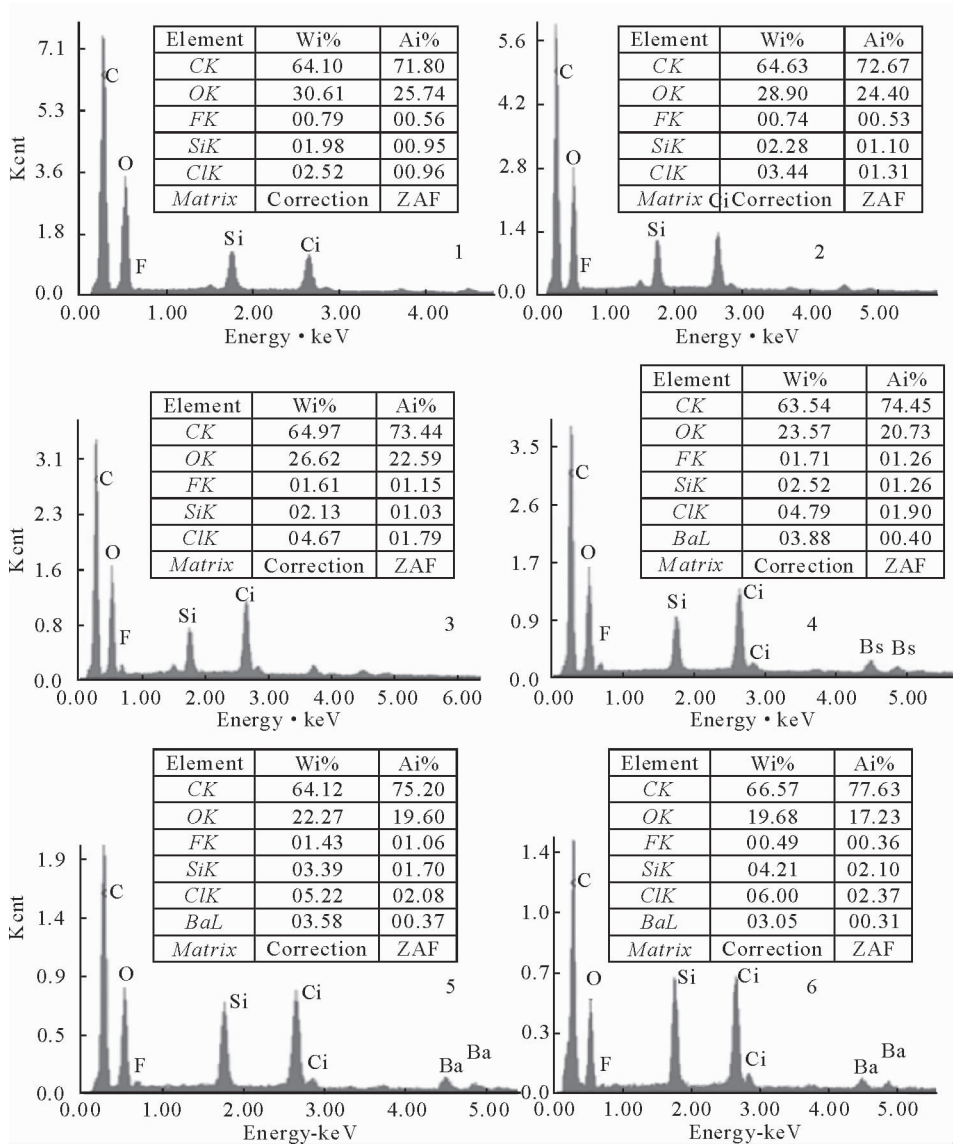


图 4 X 线能谱(1、2、3—径切面,4、5、6—横切面)

Fig. 4 EDXA of the woods(1, 2, 3-longitudinal section,4, 5, 6-transverse section)

2.5 水性氟溶液的浓度对木材试样色差的影响

选用 6 块杉木材试样,试样的规格是长×宽×高为 120 mm×50 mm×30 mm,分别用质量浓度为 5%、7%、10%、12%、15%、17% 的水性氟水溶液逐滴滴渗杉木材试样横截面,分别用喷雾器将质量浓度为 5%、7%、10%、12%、15%、17% 的水性氟溶液喷洒到杉木材试样表面。其他步骤与试验 1 相同。观察记录水性氟溶液的渗透时间以及渗透深度,采用 1976 年 CIE L*a*b* 色坐标体系来评价(DC-P3 型全自动色差计)杉木材试样处理前后色差值,色差值按下式计算:

$$\Delta E=[(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

式中,ΔE 为色差值、ΔL* 为明亮度差、Δa* 为红绿色度差、Δb* 为黄蓝色度差,ΔE 值越大说明颜色改变越大,反之则说明颜色改变越小。ΔE 评价标准见表 1,测试和计算结果见表 2。

表 1 ΔE 评价标准

Table 1 Evaluation standards of ΔE

等级	ΔE	变色程度
1	0.0~2.0	无变色
2	2.0~4.0	很轻微变色
3	4.0~6.0	微小到中等;在一些应用中可接受
4	6.0~8.0	中等;可接受
5	8.0~10.0	较大变色;勉强接受
6	10.0 以上	严重变色;不可接受

表 2 用水性氟处理杉木材试样后对色差的影响

Table 2 The influence of the color difference after treated by aqueous fluoride solution

质量浓度 /%	渗透时间 /s	渗透深度 /cm	ΔE
5	292	1.0	3.51
7	226	1.4	3.57
10	243	1.6	3.67
12	276	1.5	4.92
15	300	0.9	6.48
17	364	0.7	8.65

由表 2 可见,用质量浓度为 5%~15% 的水性氟水溶液的对杉木试样的渗透深度为 0.9~1.6,色差值 ΔE 为 3.51~6.48,最佳质量浓度为 10%,色差值 ΔE<6,符合古建筑修复色差要求。

2.6 百菌清乙醇溶液处理木材试样前后的耐腐蚀性测试

选用 6 块杉木材试样,试样的规格与试验 1 相同,分别用质量浓度为 10% 的水性氟水溶液进行处理,处理方法与试验 1 相同。分别用 0.01%、0.03%、0.05%、0.07%、0.10% 的百菌清乙醇溶液,用喷雾器将百菌清乙醇溶液喷洒在古建筑木构件的外表面,每平方米喷洒 2 000 mL 百菌清乙醇溶液,

反复操作 3 次,自然放置 1 h。将处理前后 6 块杉木材试样进行耐腐蚀性检测,计算重量损失率,记录检测结果见表 3。

表 3 杉木材试样原位防腐加固处理前后对耐腐蚀性的影响

Table 3 The influence of the resistance to corrosion after treated

百菌清乙醇溶液浓度/%	供养菌	试验	重量损失率 /%
0.01	白腐菌	未处理	76.0
		防腐加固处理	11.6
	褐腐菌	未处理	86.0
0.03	白腐菌	防腐加固处理	9.7
		未处理	76.0
	褐腐菌	防腐加固处理	9.4
0.05	白腐菌	未处理	86.0
		防腐加固处理	8.7
	褐腐菌	防腐加固处理	76.0
0.07	白腐菌	未处理	3.4
		防腐加固处理	86.0
	褐腐菌	防腐加固处理	2.6
0.10	白腐菌	未处理	76.0
		防腐加固处理	7.6
	褐腐菌	防腐加固处理	86.0
		防腐加固处理	6.4
		未处理	76.0
		防腐加固处理	7.8
		未处理	86.0
		防腐加固处理	6.3

对照国家标准 GB/T13942.1-92 天然耐腐蚀等级表(表 4),由表 3 可见,用质量浓度为 0.01%~0.10% 的百菌清乙醇溶液处理杉木材试样,白腐菌处理后的重量损失率、褐腐菌处理后的重量损失率符合文物修复的要求,其中百菌清乙醇溶液质量浓度最佳为 0.05%,白腐菌处理后的重量损失率为 3.4,褐腐菌处理后的重量损失率为 2.6,重量损失率最小。重量损失率越小,防腐性能越好。

表 4 木材耐腐蚀性质分级标准

Table 4 Classification standard wood decay resistance properties

腐朽等级	腐朽程度
0	材质完好,肉眼下无腐朽症状
1	表层有轻微腐朽
2	中度腐朽,深度 2~5 mm,面积达 1/3
3	严重腐朽,深度 5~10 mm,面积达 2/3
4	腐朽到损毁程度,能轻易折断

2.7 正硅酸乙酯乙醇溶液处理木材试样前后的色差变化

选用 5 块杉木材试样,试样的规格与试验 1 相同,分别用质量浓度为 10% 的水性氟水溶液进行处理,处理方法与试验 1 相同,分别用质量浓度为 0.05% 百菌清乙醇溶液处理杉木木材试样的方法与试验 2 相同。分别用质量浓度为 10%、30%、50%、70%、90% 的正硅酸乙酯乙醇溶液滴渗杉木材试样

横截面,用喷雾器分别将质量浓度为 10%、30%、50%、70%、90%的正硅酸乙酯乙醇溶液均匀喷洒在杉木材试样表面,观察记录处理前后色差变化以及渗透时间的改变,测试和计算结果见表 5。

表 5 正硅酸乙酯乙醇溶液对杉木材试样处理后
色差及渗透时间的影响

Table 5 The influence of color difference and infiltration time after treated by TEOS			
浓度 /%	渗透时间 /s	渗透深度 /cm	ΔE
10	408	1.6	0.04
30	398	1.8	0.21
50	243	2.5	0.11
70	252	2.9	1.11
90	276	2.7	1.23

由表 5 可见,用质量浓度为 10%~90%的正硅酸乙酯乙醇溶液对杉木试样的渗透深度为 1.6~2.9,色差值 ΔE 为 0.04~1.23,正硅酸乙酯乙醇溶液的最佳质量浓度为 70%,色差值 $\Delta E<6$,符合文物修复要求,质量浓度为 70%的正硅酸乙酯乙醇溶液处理杉木试样,渗透深度为 2.9 cm。本发明选择正硅酸乙酯乙醇溶液的质量浓度为 50%~90%,最佳质量浓度为 70%。

结合以上测试数据分析发现,按照本文所述古建筑木构件原位防腐加固方法处理后的古建筑木构件表现出优良的防腐和加固效果:本文所述的古建筑木构件防腐加固复合材料原位防腐加固处理过程简单,反应条件容易实现、原位合成的二氧化硅/木材复合材料的稳定性能好,既能保持木材外观特性,木材处理前后色差变化不大,又有良好的尺寸稳定性,而且大大增强了古建筑木构件的表面硬度,有效地将防腐加固试剂固定在木材基质中,从而实现了古建筑木构件的原位防腐加固。

2.8 修复前后对比照

以西安唐皇城墙含光门博物馆馆藏古建筑木构件金柱为例,参照本文所述原位防腐加固方法处理后前后对比效果如图 5 所示。

3 结论

木材细胞壁作为木材骨架,它为 TEOS 的硅化提供了一个结构上的框架,使得木材/二氧化硅复合物在木材的微毛细管系统的纳米空间内形成。其次,木材细胞壁最基本的结构物质是纤维素,纤维素等具有活性基团的组分直接参与并控制二氧化硅成核和生长,原位复合。腐朽木材经过调湿和防腐试剂预处理后,再采用截面浇注、喷涂、孔注射的方式使 TEOS 进入木材细胞壁后,通过扩散达到浓度平



图 5 修复效果图

Fig. 5 Protective effect of restoration

衡,在细胞壁纳米空间内形成其过饱和溶液,纤维素等分子的羟基与 TEOS 的羟基相互作用连接后,以 $[\text{SiO}_4]$ 为基本组成单元,通过不同键角的 Si—O—Si 键连接而成的网络结构,这种二氧化硅空间三维网络与木材纤维素等一起构成了木材的硬化组织,从而起到加固作用,并有效地固定了防腐试剂,实现古建筑木构件原位加固防腐。此外,前期研究工作表明,在古建筑木构件加固之前,通过有效地复合防腐试剂进行预先防腐处理,以及木构件表面陈旧霉斑的去除,不但有利于下一步加固试剂的渗透处理,而且通过反复加固处理之后,对防腐试剂与木构件基质的相互作用也起到了加固稳定的作用,实现了木材与无机复合材料在分子水平上的原位复合,并且保留了古建筑木构件原有的优良环境学特性,改善了木构件的尺寸稳定性,使得木构件的硬度和防腐性能显著增强。

参考文献:

[1] 张永禄. 西安古城墙[M]. 西安:西安出版社,2007.
[2] 赵泾峰,段新芳,冯德君,等. 西藏古建筑房椽木构件树种鉴定研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(6):138-143.
ZHAO J F, DUAN X F, FENG D J, *et al.* Identification of wood species in Tibet Ancient buildings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007,22(6):138-143. (in Chinese)
[3] 冯德君,赵泾峰,王自力. 陕西三桥汉代木桥遗址出土木材研究[J]. 西北林学院学报,2008,23(6):175-178.
FENG D J, ZHAO J F, WANG Z L. Identification of unearthed woods from bridge ruins of Han Dynasty at Sanqiao, Shaanxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6):175-178. (in Chinese)

维方向的宏观纵向拉伸弹性模量表达式一致^[15],另外梁的弯曲模量和纵向拉伸弹性模量近似相等^[15]。因此,可推导出垂直加载和平行加载条件下的弹性模量相同。试验发现,马尾松单板层积材垂直加载和平行加载条件下的弹性模量基本相同。说明理论推导和试验结果相吻合。

马尾松单板层积材平行加载下的水平剪切强度大于垂直加载条件下的水平剪切强度。由于木材剪切强度大于胶层剪切强度,马尾松单板层积材平行加载下的水平剪切强度大于垂直加载条件下的水平剪切强度。

参考文献:

[1] 余光. 马尾松家具用材改性处理的几个问题[J]. 林业科技开发,2004,18(1): 41-42.

[2] 李素瑕,刘文金. 几种连接方式对脱脂马尾松家具结构强度的影响[J]. 西北林学院学报, 2014,29(1):169-173.

LI S X, LIU W J. Effects of joint methods on the structural strength of *Pinus massoniana* furniture [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(1):169-173. (in Chinese)

[3] 孙静,吴智慧,黄秋陆,等. 层积材家具造型设计初探[J]. 西北林学院学报,2012,27(1):251-254.

SUN J, WU Z H, HUANG Q L, *et al.* Modeling design of laminated veneer lumber furniture [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(1):251-254. (in Chinese)

[4] 周政贤. 中国马尾松[M]. 北京:中国林业出版社,2001.

[5] 董会军,杜国兴. 马尾松板材的脱脂处理[J]. 林业科技开发, 2001, 15(6): 24-26.

[6] 杨哲,解林坤,彭万喜. 马尾松板材的强碱性脱脂技术[J]. 林业

科技开发,2004,18(2): 39-40.

[7] 卫佩行,黄思维,周定国. 马尾松单板脱脂处理前后性能的变化[J]. 西南林业大学学报, 2012,32(4): 86-89.

WEI P X, HUANG S W, ZHOU D G. Study on property of *Pinus massoniana* veneer before and after degreasing treatment [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2012, 32(4): 86-89. (in Chinese)

[8] 卫佩行. 马尾松实木复合地板的研究[D]. 南京:南京林业大学,2011.

[9] WEI P X, WANG B J, ZHOU D G, *et al.* Mechanical properties of poplar laminated veneer lumber modified by carbon fiber reinforced polymer [J]. BioResoures, 2013, 8 (4): 4883-4898.

[10] 饶鑫,卫佩行,周定国. 马尾松单板胶合工艺优化研究[J]. 木材加工机械,2014,12(6):30-32.

[11] 王正,王志强,罗鸿顺. 胶合板弹性模量与阻尼比的动态测量[J]. 木材加工机械,2007(6):8-10.

[12] 卫佩行,王泉中,周定国. 分离刚度法测试杨木单板层积材木梁剪切模量的试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012 (34):177-180.

[13] 沈观林,胡更开. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.

[14] THELANDERSSON S, LARSEN H J. Timber engineering [M]. New York: J. Wiley, 2003.

[15] 朱一辛,程丽美,关明杰. 竹木复合板水平剪切强度的研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(6): 180-182.

ZHU Y X, CHENG M L, GUAN J M. Study on horizontal shear of bamboo & wood composite board [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2006, 21(6): 180-182. (in Chinese)

(上接第 262 页)

[4] 赵泾峰,冯德君,吕智荣. 韩城梁带村芮国 M502 墓葬出土木材研究[J]. 西北林学院学报,2012,27(1):238-259.

ZHAO J F, FENG D J, LYV Z R. Identification of unearthed woods from Rui State Burial at Liangdai Village[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27 (1): 238-259. (in Chinese)

[5] 冯德君,王望生,尹申平,等. 陕西旬邑县东汉壁画墓出土木材的研究[J]. 西北林学院学报,2002,17(1):29-32.

FENG D J, WANG W S, YIN S P, *et al.* Identification of unearthed woods from fresco grave of East Han at Xunyi, Shaanxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2002, 17(1):29-32. (in Chinese)

[6] 冯德君,杨军凯,赵泾峰,等. 灞桥段家村汉代水上大型建筑遗址出土木材的研究[J]. 西北林学院学报,2004,19(1):136-141.

FENG D J, YANG J K, ZHAO J F, *et al.* Identification of unearthed woods from big building Ruins on the water of Han Dynasty at Duanjiacun, Baqiao[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004,19(1):136-141. (in Chinese)

[7] 汪秉全. 陕西木材[M]. 西安:陕西人民出版社,1979:65-67, 73-80,84-88,101-103.

[8] 成俊卿. 木材学[M]. 北京:中国林业出版社,1985:986-987, 1017-1019,1106-1107,1070-1073,1088-1089,1076-1077.

[9] 王西成,田杰. 陶瓷化木材的复合机理[J]. 材料研究学报, 1996(4):435-440.

[10] 王西成,程之强,莫小洪,等. 木材/二氧化硅原位复合材料的界面研究[J]. 材料工程,1998(5):16-18.

[11] 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.

[12] 廖秋霞,卢灿辉,许晨. 原位溶胶—凝胶制备木材—PMMA—SiO₂ 复合材料及其显微结构[J]. 福建化工,2001(1):21-23.

[13] 李坚,邱坚. 纳米技术及其在木材科学中的应用前景(Ⅱ)——纳米复合材料的结构、性能和应用[J]. 东北林业大学学报,2003,31(2):1-3.

[14] 李坚,邱坚. 生物矿化原理与木材纳米结构复合材料[J]. 林业科学,2005,41(1):189-193.

[15] 李坚,邱坚,刘一星. Sol-Gel 法制备木材功能性改良用 SiO₂ 凝胶[J]. 林业科学,2007,43(12):106-111.