

不同家系马尾松木材经溶胶凝胶法 改良后耐光性比较研究

刘晓玲,陈松武,罗玉芬,陈桂丹,林家纯,栾 洁

(广西壮族自治区林业科学研究院/广西木材资源培育质量控制工程技术研究中心,广西 南宁 530002)

摘要:通过溶胶凝胶法,以正硅酸乙酯为反应前驱体,乙酸或者硝酸为催化剂,乙醇为溶剂,水为反应引发剂,采用3种不同改良工艺(试剂摩尔比不同)对马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)3个家系(N88-031,N88-171,N88-172)木材进行改良,在紫外光老化的作用下,通过测定试样表面色度学和光泽度参数,对其耐光性进行对比研究。结果表明:(1)试样表面的亮度随着光照时间的增加均呈下降趋势,处理3的亮度相对较高,N88-031家系素材的前后差异高达18.1%,而改良材仅为9.0%—9.4%,改良效果明显。3个家系的亮度区别不明显。黄色指数随着光照时间的增加呈上升趋势,光照时间越长,黄化现象越严重,处理3的黄色指数相对较低,说明处理3效果相对较好,黄化现象较不明显。N88-172的黄色指数变化较大,光照前后差异高达44.8%,改良后黄化现象有所缓解,但效果不明显,可能是浸渍时间不足导致的。总色差随着光照时间的增加呈下降趋势,处理1和处理3的总色差变化相对较小,说明乙酸比硝酸作为催化剂效果更好。素材光老化前后总色差变化较大且不稳定,数值高达9.6%,而改良材仅为1.5%—3.9%,改良材耐光性得到改善。(2)随着光照时间的增加,劣化程度越来越明显,光泽度均有小幅下降趋势,但变化均不明显,其中改良材与素材相比光泽度变化相对稳定,从不同处理工艺来看,处理1和处理3的变化趋势相对稳定,光泽度较好,3个家系木材之间改良效果区别不大。(3)通过对比研究分析,马尾松3个家系之间的耐光性差异不大。3种处理工艺均发生劣化变色,综合来看,耐光性效果顺序依次为处理3>处理1>处理2>素材。建议针对耐光性有要求的场合,应选用耐光性能改良过的木材加以使用,必要时可加入抗紫外光的吸收剂等提高木材的耐光性。

关键词:马尾松;木材;改良;耐光性;色度学;光泽度

中图分类号:S781.61;S781.82;S791.248

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2022.03.008

木材作为一种高分子材料,易发生光降解,用作室内外各种用材时,都会直接或间接地受到光线照射而发生劣化,为了延缓或抑制木质材料的光劣化或降解,最常用的办法是采用涂料进行涂饰处理^[1]。然而,木材表面的涂膜在光照、水分和氧气等作用下易发生分解,弱化其装饰和保护功能^[2]。近年来,功能性木材受到了越来越多的关注。通过木材改良技术,赋予了木材更多优异的性能,如磁性、光催化性、耐老化性等^[3-5]。然而,无机物改良木材在保证不破坏木材本身构造的前提下,以其价格低廉、不污染环境、物理力学及表面性能得到明显提高受到人们极大的青睐。常用的无机物改良木材的方法主要有溶胶

凝胶法、浸渍法、原位合成法、水热法等。Saka等^[6]率先采用sol-gel法制备木材/无机复合材料,制得的复合材料有良好的尺寸稳定性和阻燃性。Miyafuji等^[7]通过溶胶-凝胶法制备了SiO₂-P₂O₅-B₂O₃木材/无机复合材料,使得复合材料的抗流失性能增加。Ogiso等^[8]采用溶胶-凝胶法制备负载SiO₂凝胶的木材/无机复合材料,对改善木材耐热性和尺寸稳定性起到了关键性作用。孙立等^[9]将木材经过偶联剂预处理,制备得到的木材/二氧化硅纳米复合材料的性能得到很大改善。刘晓玲、符韵林等^[10-12]通过溶胶凝胶法制备了SiO₂-TiO₂溶胶,并将其利用到观光木和云南松木材上,制成负载SiO₂-TiO₂凝胶的木材/无机复

收稿日期:2022-04-05;修回日期:2022-04-27

基金项目:广西优良用材林资源培育重点实验室自主课题项目“溶胶-凝胶法对人工林马尾松木材改良工艺及机理研究”(2020-A-02-01);广西壮族自治区林业科学研究院基本科研业务费专项“广西主要用材树种木材品质综合评价体系构建”(林科202104号)

作者简介:刘晓玲(1989-),女,汉族,工程师,硕士,主要研究方向为木材材性及其功能改良。E-mail:liuxiaolinggy@163.com

合材料,改善了木材的疏水性、尺寸稳定性及耐光性。马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)适应性强、生长快,其木材广泛应用在建筑工业、制浆造纸等领域,但是因其材质软、强度低、易蓝变、耐光性和尺寸稳定性较差等缺陷,极大影响了马尾松木材的实木加工利用^[13]。因此,本文提出通过溶胶-凝胶法,采用3种不同处理工艺对马尾松3个家系木材进行SiO₂改良,在紫外光老化的作用下,通过测定试样表面色度学和光泽度参数,对耐光性进行对比研究。旨在探索适合马尾松耐光性改良的处理工艺,为马尾松的加工利用提供切实可行的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选取马尾松3个家系(N88-031, N88-171, N88-172)作为试验材料,试材均为34年生,该试验地位于广西武鸣县的南宁市林业科学研究所(108°00'E, 23°10'N),属亚热带南缘季风气候区。年平均气温21.5℃,无霜期358 d,年降水量为1 246 mm,年蒸发量为1 613.8 mm,夏湿冬干,干、湿季变化明显,全年平均相对湿度79%。试验地为石灰岩峰林峰丛间宽阔的缓丘台地,海拔约120 m,土壤为赤红壤,pH为5.5—6.5,土层深厚。选取样木1.3—3.3 m木段作为研究对象,将试样加工成95 mm(L)×65 mm(T)×5 mm(R)规格试样。挑选的试件要求无斜纹理、节子、裂纹、腐朽等缺陷,将试件在室温下调湿放置一段时间,直至试件达到气干状态,即含水率约为12%。

1.2 溶胶制备

采用溶胶-凝胶法,选择正硅酸乙酯作为反应前驱体,乙酸或者硝酸作为催化剂,乙醇为溶剂,水作为反应引发剂。将反应前驱体、催化剂、溶剂和引发剂按照表1所给比例混合(比例为摩尔比),利用搅拌器进行匀速搅拌,控制温度(室温约25℃)、浸渍时间(24 h)以及搅拌速度(200 r/min)等影响因素,获得所需溶胶。

表1 试剂比例

	正硅酸乙酯	乙醇	乙酸	硝酸	蒸馏水
处理1	1	1	0.01		0.1
处理2	1	1		0.01	0.1
处理3	1	1	0.01		0.2

1.3 形成凝胶

将气干的试样浸渍到混合溶液中进行处理,即将试件浸渍于溶胶中,达到浸渍24 h后拿出平放,完成陈化过程。

1.4 耐老化性能测试方法

采用Q-Lab实验室产品公司生产的QUV/SPRAY(喷淋型)紫外老化仪模拟室外光照及气候环境对试样进行老化试验。紫外灯光照模拟灯管类型为UVA-340(波长范围为315—400 nm),实验箱内温度和冷凝温度分别为60℃,光照强度为0.89 W/m²。

1.4.1 色度学参数测定 本文色度采用国际照明委员会推荐的CIE1976标准色度学表色系统进行表征。色度学参数采用CS-650分光测色仪(CHN Spec 彩谱,杭州)进行测定,D₆₅标准光源。对试样表面进行多点多次测定,取其平均值作为测定值。测定L*(亮度)、a*(红绿指数)和b*(黄蓝指数)值,并计算出C*, h*, E*, Δh*, Δa*, Δb*, ΔC*, Δh*, ΔE*。通过测定不同紫外光老化时间(0, 6, 12, 18, 24, 36, 48, 60, 72 h)各试样表面色度坐标值L*(亮度)、a*(红绿指数)和b*(黄蓝指数),每组试样为5个试样,在每个试样表面取3个点做好标记,每个点测2次,保证每次测量的位置是一致的,测量数据并取其平均值作为测定值。根据公式计算出紫外光老化前后色度学参数值。

其中,L*——表示明度,色彩的明暗程度,完全白的物体视为100,完全黑的视为0。

a*——表示红绿轴色品指数,正值越大表示颜色越偏向红色,负值越大表示越偏向绿色。

b*——表示黄蓝轴色品指数,正值越大表示颜色越偏向黄色,负值越大表示越偏向蓝色。

C*——表示色饱和度,表示颜色的纯度。

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}。$$

h*——表示色彩的相貌。 $h^* = \arctan(b^*/a^*)$

E*——表示色差。 $E^* = \sqrt{L^{*2} + a^{*2} + b^{*2}}$

ΔL*——表示明度差;Δa*——表示红绿品差;Δb*——表示黄蓝品差;ΔC*——表示饱和度差;Δh*——表示色相差,数值越大,表示被测物和对照样色调的差异越大;E*——表示总体综合色差,数值越大,表示被测物和对照样颜色差异越大。老化前后差异/%=(前值—后值)/前值×100。

1.4.2 光泽度参数测定 采用WGG60型微机

光泽度仪进行测定,对试样表面进行多点多次测定,取其平均值作为测定值。测定方法参考 GB/T 4893. 6-2013《家具表面漆膜理化性能试验 第 6 部分:光泽测定法》^[14]进行测定,测定平行于纹理方向的光泽度 (GZL) 和垂直于纹理方向的光泽度 (GZT),并计算出 2 者的比值 (GZL/GZT),分析试样随光照时间增加的色度学、光泽度变化情况。

2 结果与分析

2.1 光老化前后色度学参数

对试样进行紫外光照射,光照辐射后的色度学参数变化结果见表 2。亮度、总色差的变化是表征色度学参数变化的重要指标,黄色指数是衡量木材黄化的质量指标,黄色指数增加越大,表明木材黄化程度越高。

表 2 光照辐射前后的色度学参数表

家系	处理 方式	光照时间/h												老化前后差异/%					
		0						72											
		<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>C</i> *	<i>h</i> *	<i>E</i> *	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>C</i> *	<i>h</i> *	<i>E</i> *	ΔL *	Δa *	Δb *	ΔC *	Δh *	ΔE *
N88-031	CK	79.89	6.17	30.33	30.95	78.50	85.68	65.43	12.06	39.58	41.38	73.05	77.42	18.1	-95.5	-30.5	-33.7	6.9	9.6
	处理 1	74.38	8.08	32.23	33.23	75.93	81.46	67.72	13.22	39.48	41.63	71.49	79.49	9.0	-63.6	-22.5	-25.3	5.8	2.4
	处理 2	76.15	8.08	31.31	32.34	75.53	82.73	68.97	13.01	38.88	41.00	71.50	80.24	9.4	-61.0	-24.2	-26.8	5.3	3.0
	处理 3	77.01	7.76	31.90	32.83	76.33	83.72	69.85	13.27	37.7	39.97	70.61	80.48	9.3	-71.0	-18.2	-21.7	7.5	3.9
N88-171	CK	73.96	8.82	31.73	32.93	74.47	80.96	67.57	13.6	39.69	41.96	71.09	79.54	8.6	-54.2	-25.1	-27.4	4.5	1.8
	处理 1	74.50	8.21	32.62	33.64	75.87	81.74	66.98	14.33	41.33	43.74	70.88	80.00	10.1	-74.5	-26.7	-30.0	6.6	2.1
	处理 2	74.69	8.83	31.60	32.81	74.39	81.58	66.87	14.48	42.08	44.50	71.01	80.32	10.5	-64.0	-33.2	-35.6	4.5	1.5
	处理 3	78.50	6.52	30.17	30.87	77.81	84.35	69.68	14.08	40.47	42.85	70.82	81.80	11.2	-116.0	-34.1	-38.8	9.0	3.0
N88-172	CK	78.01	7.17	30.68	31.51	76.85	84.13	69.08	13.75	40.8	43.05	71.38	81.40	11.4	-91.8	-33.0	-36.7	7.1	3.2
	处理 1	77.30	7.54	32.15	33.02	76.80	84.06	68.15	14.18	42.89	45.17	71.71	81.76	11.8	-88.1	-33.4	-36.8	6.6	2.7
	处理 2	77.62	7.70	29.61	30.59	75.42	83.43	68.95	13.4	39.73	41.93	71.36	80.70	11.2	-74.0	-34.2	-37.0	5.4	3.3
	处理 3	80.12	6.02	27.82	28.46	77.79	85.03	68.93	13.85	40.29	42.60	71.03	81.03	14.0	-130.1	-44.8	-49.7	8.7	4.7

2.1.1 光老化前后木材表面亮度变化及分析 马尾松家系 (N88-031, N88-171, N88-172) 经过改良处理后,进行紫外光照射,亮度随着光照时间增加的变化趋势见图 1。随着光照时间的增加,试样表面的亮度均呈下降趋势。根据亮度数值来看,处理 3 的亮度相对较高,乙酸作为催化剂相比硝酸来说较好,因为溶胶凝胶法在木材表面生成的二氧化硅薄膜受到硝酸强氧化性作用,亮度会偏低,而乙酸在一定程度上保持了木材的天然质感,而水作为引发剂,在改良过程中也起到关键性作用;N88-031 家系数据显示,未经改良材的前后差异高达 18.1%,而改良材仅为 9.0%—9.4%,改良效果明显。3 个家系的区分不明显,总体来看,N88-031 的亮度变化不大,该家系改良前后亮度变化相对稳定。

2.1.2 光老化前后木材表面黄色指数变化及分析 黄色指数随着光照时间增加的变化趋势见图 2。随着光照时间的增加,试样表面的黄色指数呈上升趋势,说明随着光照会使得木材表面发生黄化现

象,光照时间越长,黄化现象越严重。根据黄色指数的数值来看,处理 3 的黄色指数相对较低,说明 3 种处理中处理 3 效果相对较好,黄化现象较不明显,再次证明通过溶胶凝胶法进行改良,乙酸比硝酸更适合作为催化剂进行使用。而从不同家系来看,3 个家系的区分不明显,总体来看,N88-172 的黄色指数变化较大,改良前后差异高达 44.8%,改良后黄化现象有所缓解,但效果不明显,可能是浸渍时间不足导致的。

2.1.3 光老化前后木材表面总色差变化及分析 总色差随着光照时间增加的变化趋势见图 3。随着光照时间的增加,试样表面的总色差总体呈下降趋势,但变化不明显。根据总色差的变化趋势来看,处理 1 和处理 3 的总色差变化相对较小,这可能是因为乙酸和硝酸作为催化剂,硝酸本身的氧化性很强,使得溶胶反应较为剧烈,形成的凝胶附在试材表面,使得色差变化较大,相比之下,乙酸作为催化剂较佳。素材光老化前后总色差变化较大且不

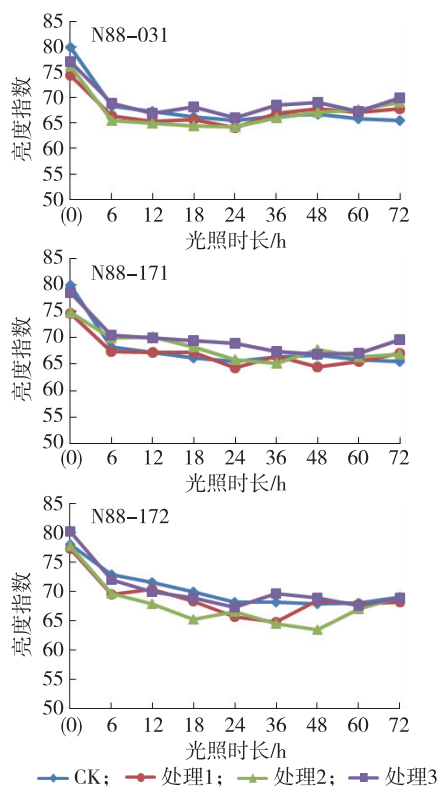


图1 3个马尾松家系光照辐射的亮度变化

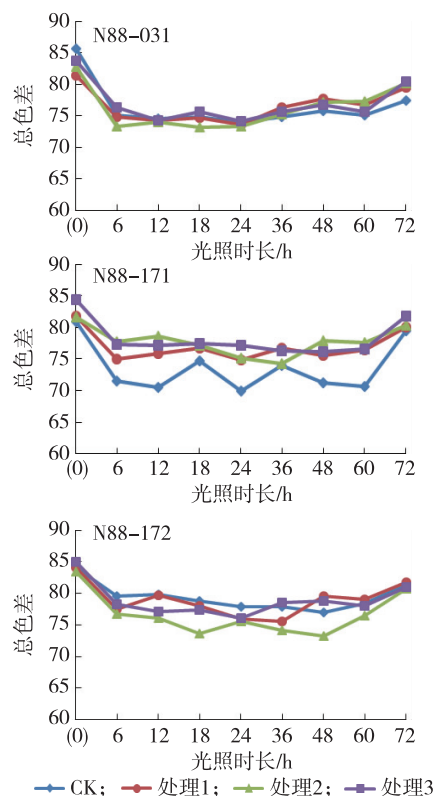


图3 3个马尾松家系光照辐射的总色差变化

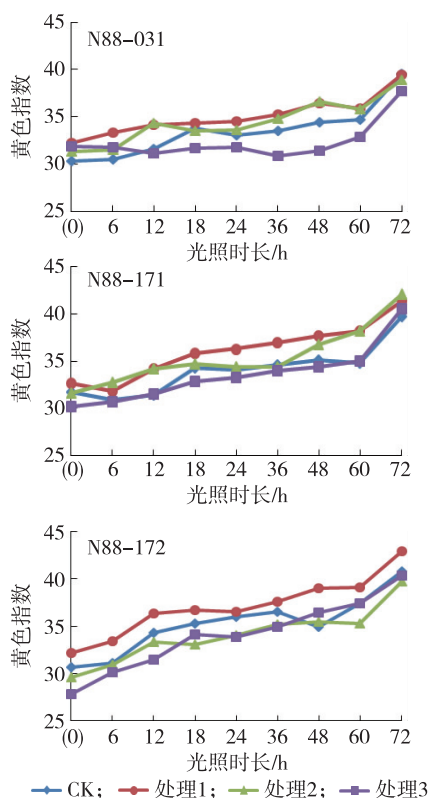


图2 3个马尾松家系光照辐射的黄色指数变化

稳定,数值高达9.6%,而改良材仅为1.5%—3.9%,改良效果明显。而从不同家系来看,N88-171改良材光老化前后总色差差异较小,改良效果明显,改良后色差变化稳定,不容易发生变色。这是由于二氧化硅具有很强的紫外吸收能力。改良材表面形成了能够吸收紫外线能力的二氧化硅薄膜,改良材耐光性得到改善。

2.2 光老化前后光泽度

试样经光照辐射前后光泽度参数测试结果见表3。随着光照时间的增加,表面劣化程度越来越明显,光泽度均有小幅下降趋势,但变化均不明显。其中改良材与素材相比变化相对稳定,平行于纹理方向光泽度(GZL)与垂直于纹理方向光泽度(GZT)的比值保持在1左右,光泽度稳定。从不同处理工艺来看,3种工艺差别不明显,处理1和处理3的变化趋势相对稳定,光泽度较好,说明乙酸作为催化剂能较好地保持木材的光泽度。从不同家系来看,N88-172改良材的GZL/GZT比值逐渐接近于1,说明平行于纹理方向光泽度(GZL)与垂直于纹理方向光泽度(GZT)的数值越来越接近,而素材的GZL/GZT比值则逐渐增加,表面劣化明显,改良效果好,3个家系则区别不大。

表 3 光照辐射前后的光泽度参数

光照 时间/h	处理方式	马尾松家系								
		N88-031			N88-171			N88-172		
		GZL/%	GZT/%	GZL/GZT	GZL/%	GZT/%	GZL/GZT	GZL/%	GZT/%	GZL/GZT
0	CK	4.00	3.40	1.18	3.40	2.90	1.17	2.60	2.60	1.00
	处理 1	3.70	3.60	1.03	2.80	2.70	1.03	2.80	2.50	1.12
	处理 2	4.00	3.40	1.18	3.10	3.00	1.03	4.60	4.70	0.98
	处理 3	3.20	2.60	1.23	2.50	2.30	1.09	2.60	2.40	1.08
6	CK	3.40	3.10	1.10	2.70	2.70	1.00	2.00	1.90	1.05
	处理 1	3.30	3.50	0.94	2.40	2.10	1.13	2.90	2.5	1.16
	处理 2	3.40	3.00	1.13	3.00	2.75	1.09	4.00	3.40	1.19
	处理 3	3.00	2.50	1.21	2.20	1.90	1.16	2.30	1.90	1.21
12	CK	2.90	2.80	1.04	2.70	2.70	1.00	2.50	1.90	1.32
	处理 1	2.75	2.70	1.02	2.10	1.90	1.11	2.20	1.90	1.16
	处理 2	3.20	2.80	1.14	3.00	2.80	1.07	4.30	3.40	1.26
	处理 3	2.50	2.20	1.13	2.10	1.80	1.17	2.30	1.90	1.21
18	CK	3.10	2.80	1.11	2.80	3.00	0.93	2.40	1.90	1.26
	处理 1	3.90	3.80	1.03	2.00	1.80	1.11	2.20	2.00	1.09
	处理 2	3.20	2.90	1.10	2.60	2.40	1.08	3.90	3.20	1.22
	处理 3	3.10	2.70	1.16	2.20	1.95	1.12	2.10	1.90	1.11
24	CK	2.90	3.00	0.97	2.80	2.90	0.97	2.40	1.70	1.41
	处理 1	2.90	2.60	1.13	1.90	1.70	1.12	2.10	2.00	1.05
	处理 2	3.50	3.00	1.17	2.40	2.40	1.00	3.80	3.10	1.23
	处理 3	2.60	2.20	1.18	2.00	1.90	1.05	2.00	1.70	1.18
36	CK	2.90	3.00	0.96	2.80	2.60	1.08	2.50	1.80	1.39
	处理 1	3.00	2.60	1.15	1.90	1.70	1.12	2.10	2.00	1.05
	处理 2	3.80	3.20	1.19	2.80	2.70	1.04	3.70	3.10	1.19
	处理 3	2.50	2.00	1.25	2.00	1.80	1.11	2.10	1.80	1.17
48	CK	3.20	3.30	0.97	2.60	2.60	1.00	2.30	1.70	1.35
	处理 1	3.80	3.40	1.11	1.90	1.70	1.12	2.00	1.90	1.05
	处理 2	3.75	3.10	1.21	2.20	2.15	1.02	3.50	3.20	1.09
	处理 3	2.60	2.30	1.13	2.10	1.80	1.17	1.90	1.60	1.19
60	CK	3.20	3.40	0.94	2.70	2.60	1.04	2.20	1.70	1.29
	处理 1	3.40	2.90	1.16	1.80	1.50	1.20	2.00	1.90	1.05
	处理 2	3.90	3.20	1.22	2.50	2.40	1.03	3.60	3.30	1.10
	处理 3	2.40	2.10	1.14	2.00	1.70	1.18	1.90	1.70	1.12
72	CK	3.20	2.80	1.14	2.90	2.50	1.16	2.60	1.80	1.44
	处理 1	3.10	2.80	1.11	2.00	1.70	1.18	2.00	2.30	0.87
	处理 2	2.70	2.40	1.13	2.30	2.40	0.95	3.60	3.40	1.06
	处理 3	2.60	2.20	1.17	2.00	1.90	1.05	1.90	1.80	1.06

3 结 论

(1) 马尾松家系 (N88-031, N88-171, N88-172) 经过不同改良处理后,进行紫外光照射,随着试样表面光照时间的增加亮度呈下降趋势。根据亮度的数值来看,处理 3 的亮度相对较高,3 种家系的区

别不明显,总体来看,N88-031 家系改良前后亮度变化相对稳定。黄色指数随着光照时间的增加呈上升趋势,光照时间越长,黄化现象越严重。处理 3 的黄色指数相对较低,说明 3 种处理中处理 3 效果相对较好,黄化现象较不明显。而从不同家系来看,N88-172 的黄色指数变化较大,改良前后差异高达

44.8%,改良后黄化现象有所缓解,但效果不明显,可能是浸渍时间不足导致的。总色差随着光照时间的增加呈下降趋势,处理1和处理3的总色差变化相对较小,说明乙酸比硝酸作为催化剂效果更好。素材光老化前后总色差变化较大且不稳定,数值高达9.6%,而改良材仅为1.5%—3.9%,改良效果明显。而从不同家系来看,N88-171改良材光老化前后总色差差异较小,改良效果明显,改良后色差变化稳定,不容易发生变色。改良材表面形成的二氧化硅凝胶,通过其紫外吸收能力使得改良材耐光性得到改善。

(2)随着光照时间的增加,表面劣化程度越来越明显,光泽度均有小幅下降趋势,其中改良材与素材相比光泽度变化相对稳定。从不同处理工艺来看,处理1和处理3的变化趋势相对稳定,光泽度较好。从不同家系来看,N88-172改良材的GZL/GZT比值逐渐接近于1,而素材的GZL/GZT比值则逐渐增加,素材表面劣化明显,改良效果好。3个家系之间区别不大。

(3)通过对比研究分析,马尾松3个家系之间的耐光性差异不大,说明通过溶胶凝胶法对木材进行改良,仅在树种间产生差异^[12],同树种不同家系则区别不大。经过改良处理后,3种处理均发生劣化变色,综合来看,处理3耐光性最好,顺序依次为:处理3>处理1>处理2>素材,说明乙酸比硝酸更适合作为催化剂来使用。建议针对耐光性有要求的场合,应选用耐光性能改良过的木材加以使用,必要时可加入抗紫外光吸收剂等提高木材的耐光性。

参考文献:

- [1] 段新芳,李 坚,刘一星,等.PU漆阔叶树材透明涂饰过程中色度学特征的变化[J].四川农业大学学报,1998,16(1): 79-84.
- [2] 侯新毅,姜笑梅,殷亚方.从色度学参数研究3种桉树木材的透明涂饰性能[J].林业科学,2006,42(8):57-62.
- [3] 娄志超,孙晋强,陆弘毅,等.浸渍法制备磁性木材的磁性和电磁波吸收性能[J].林业工程学报,2017,2(4):24-29.
- [4] 董 悦,袁炳楠,姬晓迪,等.木质基 $g-C_3N_4/TiO_2$ 复合涂层的制备及光催化性能表征[J].北京林业大学学报,2017,39(12):112-117.
- [5] 莫引优,陈 奎,何其飞,等.用二氧化硅聚氨酯涂料改良木材表面性质的研究[J].北京林业大学学报,2012,34(4):154-159.
- [6] SAKA S, MEGUMI S, MITSUHIKO T. Wood-inorganic composite prepared by sol-gel processing I. Wood-inorganic composite with porous structure [J]. Mokuzai Gakkaishi, 1992, 38 (11): 1043-1049.
- [7] MIYAFUJI H, SAKA S, YAMAMOTO A. $SiO_2-P_2O_5-B_2O_3$ wood-inorganic composite prepared by metal alkoxide oligomers and their fire-resisting properties[J]. Holzforschung, 1998, 52:410-416.
- [8] OGISO K, SAKA S. Wood-inorganic composite prepared by sol-gel processing IV. Effects of chemical bonds between wood and inorganic substances on property enhancement[J]. Mokuzai Gakkaishi, 1994, 40(10): 1100-1106.
- [9] 孙 立,莫小洪,程之强,等.用化学法制备木材/二氧化硅纳米复合材料[J].中国建材科技,1998,7(3):23-28.
- [10] FU Y L, LIU X L, CHENG F C, et al. Modification of the wood surface properties of *Tsoongiodendron odorum* chun with silicon dioxide by a sol-gel method [J]. BioResources, 2016, 11 (4), 10273-10285.
- [11] LIU X L, CHEN S W, FU Y L. Properties of *Pinus yunnanensis* modified with silicon-titanium binary oxides [J]. BioResources, 2021, 16(1), 747-763.
- [12] 刘晓玲.二氧化硅与硅钛双元氧化膜改良木材表面性质的研究[D].南宁:广西大学,2015.
- [13] 刘晓玲,杨章旗,陈松武,等.马尾松木材改性研究现状[J].广西林业科学,2022,51(2):285-289.
- [14] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 4893.6-2013 家具表面漆膜理化性能试验 第6部分:光泽测定法[S].北京:中国标准出版社,2014.