西北林学院学报 2019,34(6):166-171
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2019.06.26

CeO_2-ZnO 共混木蜡油对木质家具涂饰性能影响

郑孙翼,刘　玉,邵　宾,王欣宇,李岩民,朱晓冬*

(东北林业大学 生物质材料科学与技术教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘　要:为了改善木质家具表面对紫外光的耐久性,以樟子松基材为研究对象,采用 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体与市售木蜡油进行共混改性处理,探究 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体改性剂添加量对木材表面漆膜理化性能和表面耐老化性的影响。结果表明,与未处理木材相比,改性木材表面的水接触角随着 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体浓度增大而增加 1%～2%。改性之后的樟子松表面漆膜附着力略微提高,涂膜硬度可达 3 H、附着力为 0 级、耐水性优异。经过 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体共混的木蜡油涂饰处理的樟子松吸光性能优良,且吸光性能随着粉体比例的增大而变强。

关键词:木蜡油;涂饰;樟子松;CeO_2-ZnO;木材改性;紫外光耐久性

中图分类号:TS65　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2019)06-0166-06

Effect of CeO_2-ZnO Blended Wood Wax Oil on Finishing Performance of Wood Furniture

ZHENG Sun-yi, LIU Yu, SHAO Bin, WANG Xin-yu, LI Yan-min, ZHU Xiao-dong*

(*Key Laboratory of Bio-Based Material Science and Technology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin* 150040, *Heilongjiang, China*)

Abstract: In order to improve the durability of wood furniture surface to ultraviolet, the CeO_2-ZnO composite nano-powder was blended with commercially available wood wax oil that was used to treat the wood surface of *Pinus sylvestris* var *mongolica*. The effects of the amount of modifier added on the physical and chemical properties of the paint on the surface of the wood and the aging resistance of the surface were examined. The results demonstrated that compared with the untreated wood, the water contact angle of the modified wood surface augmented by 1% to 2% with the increase of the adding amount of CeO_2-ZnO composite nanopowder. After the modification, the adhesion strength of the wood surface increased slightly, the hardness of the coating film could reach 3 H, the adhesion was 0, and the water resistance was excellent. The light absorption performance of the wood surface treated by CeO_2-ZnO composite nano-powder blending was excellent, and the light absorption performance became stronger with the increase of powder proportion.

Key words: wood wax oil; lacquer; *Pinus sylvestris*; CeO_2-ZnO; wood modification; UV durability

木材在室内外使用过程中会因温度和湿度的影响而产生湿胀干缩,致使木制品翘曲干裂。同时,阳光直射和粉尘等颗粒物污染会使木材材色发生改变,这些缺点都可以通过涂饰涂料来克服[1]。木蜡油是现售涂料中使用较为广泛、环保的一种涂料,具有渗透性强、稳定性好、防潮、耐腐、耐老化性能强等特点[2-4]。然而在木质产品上涂饰也显现出其局限性:木蜡油涂膜的理化性能较低、木蜡油的阻湿性差、木蜡油极易流失等[5]。Evans, Philip D 的研究发现在乳液添加剂中加入油可以提高水性防腐剂处理木材的性能[6]。稀土氧化物二氧化铈(CeO_2)作为一种紫外吸收的光学涂层材料,在紫外屏蔽中得

收稿日期:2019-03-22　**修回日期**:2019-09-09
基金项目:东北林业大学 2018 年院级大学生创新创业训练计划项目(CL201821)。
作者简介:郑孙翼,男,研究方向:木材科学与技术。E-mail:792128428@qq.com
* **通信作者**:朱晓冬,男,博士,副教授,研究方向:木质复合材料。E-mail:pse4646@126.com

到了广泛的应用。CeO_2 是一种 N 型半导体，对光吸收阈值约为 420 nm，而目前常用的半导体材料 TiO_2 的吸收阈仅为 387 nm。相较于 TiO_2，CeO_2 的吸收阈值更高，吸光能力更强，紫外区吸收范围为 250～300 nm[7]。纳米 ZnO 对长波黑斑效应紫外线(UVA)、中波红斑效应紫外线(UVB)和短波灭菌紫外线(UVC)均有屏蔽作用，化学稳定性与热稳定性较高[8]。然而 ZnO 强的光催化能力会降解基体材料，导致基体被严重破坏，极大地限制了其应用。Kaur 采用水热法合成复合纳米 CeO_2-ZnO，研究发现其具有良好的紫外吸收特性以及光催化特性，光催化降解染料亚甲基蓝(MB)的能力优于单组分的纳米 CeO_2 与 ZnO。但水热法处理法制造成本高、粉体粒径不均匀、粉体易被污染和氧化。采取非均相沉淀法除具有水热处理法的一般性优点外，产品粒度分布均匀、晶粒细小、团聚少。这便于与木蜡油进行共混，有利于后续涂饰[9-11]。单组份的抛光材料紫外光耐久性较纳米复合材料弱，因而制备纳米复合材料是得到强紫外光耐久性材料的有效途径之一[12-15]。

为了提高木蜡油涂膜的耐水性和紫外光耐久性及漆膜理化性能，改善木质产品的涂饰性能，以商业木蜡油为原料，樟子松为基材，采用 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体对木蜡油进行改性。利用共沉淀法制备 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体，研究其紫外线屏蔽性能，并分析纳米改性后试材的表征特性及抵抗自然老化的能力，以期为提高木制品的紫外光耐久性提供实验依据。

1　材料与方法

1.1　试材与仪器

试验木材：樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)径切单板：含水率为 10%；规格尺寸：100 mm(纵向)×100 mm(弦向)×10 mm(厚度)；产地：黑龙江省哈尔滨市。

汉思商用木蜡油：$Ce(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$(AR)；$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$(AR)；$(NH_4)_2CO_3$(AR)；无水乙醇(AR)；去离子水。

试验仪器：紫外老化仪(QUV/SPRAY 型)，通用色差计(NR10QC 型)，视频接触角光学测定仪(OCA20 型)，格刀附着力测试仪(刀齿间距 2 mm，漆膜厚度 120 μm)，扫描电子显微镜(FEI QUNGTA200)。

1.2　CeO_2-ZnO 复合纳米粉体改性木蜡油制备

使用精密分析天平称取 8.20 g 的 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$，加入等量去离子水配成 20 mL、浓度分别为 1.80 mol/L 的 $ZnSO_4$ 溶液。控制水浴温度为 50℃，采用转速为 300 r/min 的电动搅拌器进行均匀分散，同时缓慢加入 2.0 moL/L 浓度的 $(NH_4)_2CO_3$ 溶液，调节溶液 pH 值至 8～9，使用磁力搅拌反应 0.5 h，将制取得到的白色沉淀物陈化、过滤，并用蒸馏水洗涤至溶液中无 SO_4^{2-} 存在，取最后一次洗涤液用 $BaCl_2$ 溶液检验，将滤饼经超声处理后再重新分散在 5 mL 去离子水中，标记为Ⅰ。用精密分析天平称取 0.7 g $Ce(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 溶于 20 mL 去离子水中，配成浓度为 0.18 mol/L 的 $Ce(SO_4)_2 \cdot$ 溶液，标记为Ⅱ。将Ⅱ倾倒加入到Ⅰ中，用玻璃棒使两者分散均匀，缓慢加入 $(NH_4)_2CO_3$ 溶液，反应 3 h 后得到浅黄色前躯体滤饼，使用去无水乙醇和离子水分别多次洗涤滤饼，滤饼经过超声波分散处理后再放置于恒温干燥箱中干燥 12 h，得到前躯体粉末。研磨粉末并将其置于 600℃马弗炉内焙烧 4 h，获取 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体。将 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体填充至相同体积市售木蜡油中，使 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比分别占木蜡油组分的 0%、0.2%、0.4%、0.6%。利用超声波仪器处理 0.5 h，使 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体在木蜡油中均匀的分布。

1.3　试件制备

涂饰基材选用平衡含水率为 10%的樟子松，要求所选木材无瑕疵，木质均匀，并将选材锯切成标准为 100 mm(长)×100 mm(宽)×10 mm(厚)的方材。

将樟子松基材用砂纸从 80 目打磨至 160 目再打磨到 240 目，确保打磨时用力均衡、板材平整，打磨完后除尘。最后，将改性木蜡油用木蜡油专用棉布分 2 次擦涂到基材上，控制涂布量在 0.30 g，最后置于空气中气干。

1.4　木材表面性能表征与检测

1.4.1　*耐水性*　参照 GB/T 4893.1-2005《家具表面耐冷液测定法》，试验采用漫射光源进行，并对试件耐水性分级。

1.4.2　*附着力*　参照 GB/T 4893.4-2013《家具表面漆膜理化性能试验第 4 部分附着力交叉切割测定法》，使用格刀附着力测试仪(刀齿间距 2 mm，漆膜厚度 120 μm)测试试件附着力等级。

1.4.3　*硬度*　参照 GB/T 6739-1996《涂膜硬度铅笔测定法》，使用手动法测试漆膜的铅笔硬度并确定等级。

1.4.4　*表面润湿性能测定*　将试件放置于载物台上，对焦距及试件位置进行调整，使图像清晰可见。在恒温恒湿(20℃，65%)环境中测量表面动态接触角，介质为蒸馏水，测量液滴体积为 5 μL，水滴在接

近试件表面时轻触并滴落，每 80 ms 读取 1 次液滴接触角平均值，随后在相片上用切线法测量试验木材单板的表面接触角。结合显微摄像图片及数据处理软件进行外形图像分析，拟合修正偏差并计算得到木材表面的动态接触角。对每种 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体浓度配比试件取 3 个试件，于每个试件抽取 3 个点，计算 36 个测试点的表面接触角平均值和标准偏差。使用 Origin 绘制 4 个处理条件下的四屏图。

1.4.5 色度学参数 采用色度学参数以木材经 120 h 紫外光照射后木材材色的变化来表征木材表面的紫外光耐久性。将 4 种试件放入紫外光照射箱中，控制照射箱辐照度为 1.6 W/m^2，每隔 12 h 取出试件检测色度学参数，合计进行 120 h 的紫外光照射[16-18]。

色度学参数：根据国际照明委员会与 1976 年颁布的 CIE－L′a′b′Diagram 表色系统进行颜色表征，使用通用色差计（NR10QC 型）在指定的被测表面检测并计算不同时间紫外照射后各试样表面材色指标参数 $\Delta L*$（明度差值）、$\Delta a*$（红绿指数差值）、$\Delta b*$（黄蓝指数差值）和 $\Delta E*$（色差值）的变化，分析其颜色变化的规律，每个试件被测表面取 9 个点计分别计算材色变化值：$\Delta L* = L* - L*_0$，$\Delta a* = a* - a*_0$，$\Delta b* = b* - b*_0$，$\Delta C* = C* - C*_0$，总色差 $\Delta E* = [(\Delta L*)^2 + (\Delta a*)^2 + (\Delta b*)^2]^{1/2}$，统计计算得出平均值。

1.5 显微结构的制片与观察

先将材料制成 15 mm×15 mm×15 mm 的小试块，尽可能将试块的 3 个切面都取正。将取好的试块投入水浴锅间断水煮 1～2 d，排除细胞内的空气，然后将其放入过氧化氢与冰醋酸（1∶1）的混合溶液中浸泡 12 h，软化至适于切片的程度。将软化好的试块安放在切片机上，切下完整清晰的切片，用毛笔蘸至培养皿中待用。使用 FEI QUNGTA200 型扫描电子显微镜拍照在加速电压为 12.5 kV 的条件下，观察樟子松横切面的微观形态[19]。

2 结果与分析

2.1 耐水性

通过耐水性试验，从不同角度观察试件皆无可视变化、无损坏，达到评定等级的 1 级。说明 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体在木蜡油中分散均匀，且均无吸水性，不会降低耐冷液性能，测试结果如表 1 所示。

2.2 漆膜附着力

在未加入任何试剂的木蜡油表面，切割线边缘完全光滑，且所有切割格无一脱落，说明涂膜的附着力在最佳状态 0 级。采用 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体改性后，木蜡油涂膜的附着力测试结果无变化，切割线边缘完全光滑，且所有切割格无一脱落，表明在超声条件下，CeO_2-ZnO 复合纳米粉体与木蜡油融合优异，且在多孔的木质基材中渗透性好，不会影响木蜡油本身的高附着力、高渗透性能，都具备一定的装饰保护性能以及抵御外界碰撞、摩擦的能力。

表 1 涂层耐冷液测试结果

Table 1 Test results of cold water resistance of the coating

组号	试样数	CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比/%	分级评定结果
1	3	0.0	1 级
2	3	0.2	1 级
3	3	0.4	1 级
4	3	0.6	1 级

2.3 硬度

硬度试验结果表明，随着 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比的增加，试件的涂膜硬度保持不变，均为 3H。漆膜硬度可表征漆膜抵抗碰撞、划擦等外界机械作用的能力，说明当 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体添加量不改变木蜡油涂膜硬度，测试结果如表 2 所示。

表 2 涂膜硬度测试结果

Table 2 Test results of the hardness of painted film

组号	试样数	CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比/%	分级评定结果
1	3	0.0	3 H
2	3	0.2	3 H
3	3	0.4	3 H
4	3	0.6	3 H

2.4 木材表面动态接触角测定

根据表面接触角实验可以发现未经过改性处理的试件和经过添加 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体处理的试件的接触角均低于 90°，皆为亲水性表面，木材表面动态接触角测试结果如表 3 所示。

添加 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体处理的试件与未处理的试件表面接触角差异不大，这反映出市售木蜡油与 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体有着较好的溶解性。随着 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体的比例不断增大，樟子松表面接触角也随之增大，但是其增大的幅度不明显，水接触角变化缓慢，仅增大 1%～2%，改性木材表面的极性稍微有所降低，疏水特性略微增加（图 1）。

未经处理的樟子松木材和经过 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体处理的木材表面的亲水性能差异不大。一方面由于 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体为无机颗粒，当液体浸润时，液体与样品表面的接触面积减小。随着 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体的比例的增大，其与木蜡油共混时存在分散不均、颗粒粒径不统一等问题，

表 3　木材表面动态接触角变化

Table 3　Dynamic contact angle change of the wood surface

时间/s	木材表面接触角/(°)			
	CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比 0%	CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比 0.2%	CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比 0.4%	CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比 0.6%
0	85.44±0.024	86.39±0.018	86.72±0.041	86.62±0.043
10	85.17±0.016	85.54±0.035	85.87±0.024	85.69±0.025
20	84.67±0.031	84.93±0.025	85.06±0.023	85.00±0.044
30	82.11±0.057	82.55±0.024	83.40±0.041	83.22±0.021
40	80.41±0.032	81.41±0.017	82.17±0.022	82.01±0.017
50	79.54±0.072	80.02±0.016	80.87±0.016	80.45±0.030
60	78.54±0.044	79.03±0.055	79.45±0.032	79.28±0.024
70	76.92±0.064	77.18±0.074	77.66±0.024	77.40±0.025
80	76.32±0.017	76.92±0.036	77.35±0.025	77.26±0.017
90	76.30±0.023	76.92±0.034	77.31±0.025	77.26±0.017
100	76.26±0.035	76.89±0.028	77.31±0.024	77.25±0.016

注：表中数值为平均值±标准差。

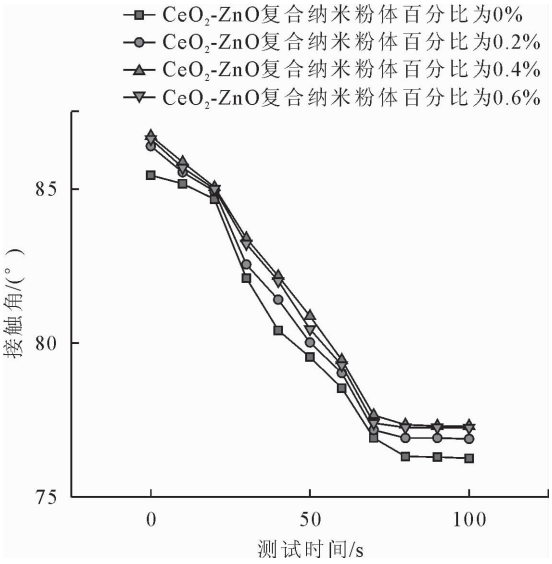


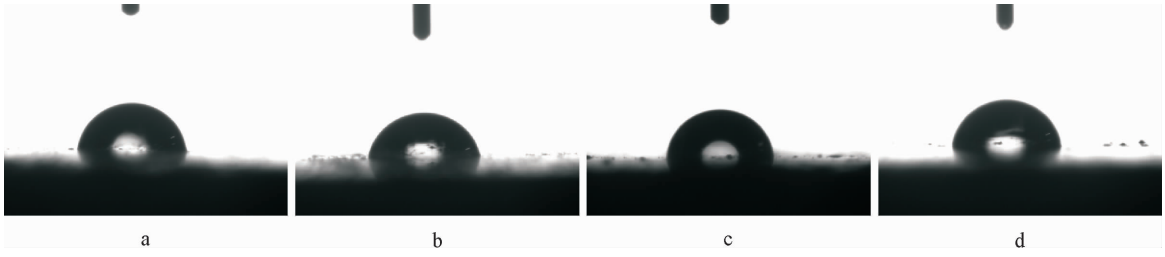
图 1　水在不同试件空白处的动态接触角

Fig. 1　Dynamic contact angle of water in different test piece blanks

导致接触角略有增大，静态接触角的图像采集如图 2 所示。另一方面试验选用的樟子松密度相对较小，纹理顺直，细胞壁结构稳定，其表面经木蜡油改性处理后的物理刻蚀和化学氧化反应小，木蜡油与木材的相容性好，因此表面接触角基本不变。试验选用的木材横切面显微结构如图 3 所示。

2.5　色度学参数测定

经过 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体共混的木蜡油涂饰的樟子松基材经历不同加速老化时间，木材表面材色的变化如表图 4 所示。由图 4 可知，加速老化对樟子松木材材色影响较明显，Δb^*（黄蓝指数差值）和 ΔE^*（色差值）的变化趋势基本相同，由此可见材料材色变化的主要原因是木材表面变黄。随着紫外老化处理时间的增加，尤其是前 50 h，ΔL^*（明度差值）、Δa^*（红绿指数差值）、Δb^*（黄蓝指数差值）和 ΔE^*（色差值）的变化明显，后 40 h 变化趋势逐渐放缓。在历时 48 h 的紫外老化处理之后，未经过 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体共混的木蜡油涂饰处理的木材明度差值 ΔL^*、红绿指数差值 Δa^*、黄蓝指数差值 Δb^* 和色差值 ΔE^* 分别为 −7.50、2.59、9.10、12.07。由于色差与视觉的关系：$\Delta E^* > 12.0$，人体的视觉感觉为非常大，肉眼可以分辨出两者的区别，而经过 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体共混的木蜡油涂饰处理的试件经过 84 h 的色差值 ΔE^* 才



注：a. CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比为 0%；b. CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比为 0.2%；c. CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比为 0.4%；d. CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比为 0.6%。

图 2　静态接触角的图像采集

Fig. 2　Image acquisition for the contact angle in static state

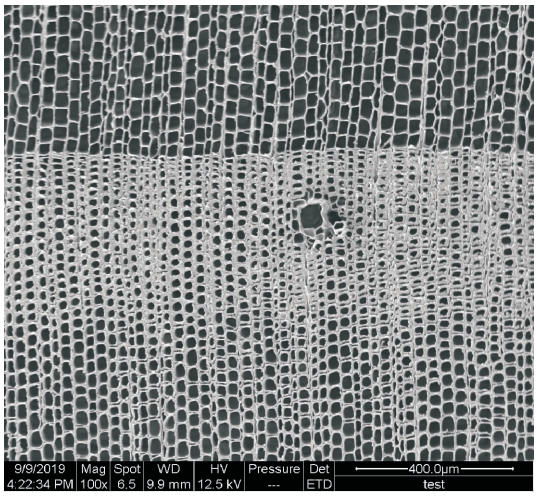


图 3 试样木材横切面的的微观形貌

Fig. 3 Microscopic morphology of the cross section of the sample wood

达到 12(表 4)。由此可知,加速老化导致材料表面明显褪色,CeO_2-ZnO 复合纳米粉体吸光性能优良,随着粉体浓度的不断增加,对光的吸收能力也越显著。

3 结论

CeO_2-ZnO 复合纳米粉体不会降低木蜡油涂膜的表面耐水性和附着力及硬度,漆膜表面耐水性和附着力两者在改性前后始终保持在最高等级 1 级。CeO_2-ZnO 复合纳米粉体对硬度无明显影响,始终保持在 3 H。

随着 CeO_2-ZnO 复合纳米粉体的比例不断增大,樟子松表面动态接触角也随之增大,但其增大的幅度不明显,水接触角变化缓慢,仅增大 1%～2%,改性木材表面极性稍微降低。

CeO_2-ZnO 复合纳米粉体对木质材料的抗老化性有明显的加强作用,随着粉体浓度的不断增加,对光的吸收能力也越显著。合理的复合纳米粉体添加量应占木蜡油的 0.4%～0.6%。

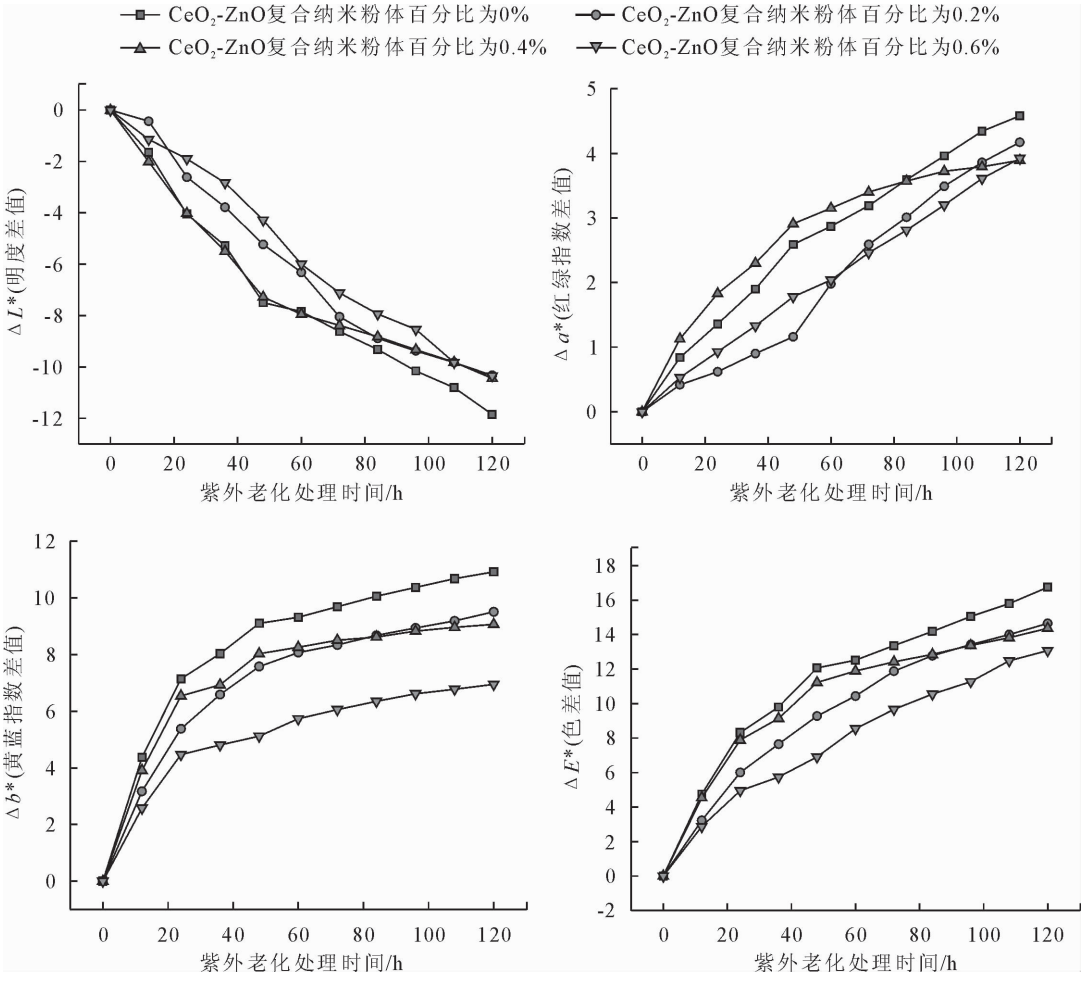


图 4 不同紫外光照射时间后试件的色度学参数变化

Fig. 4 Variations of colorimetric parameters of the wood samples after different UV exposure time

表 4　樟子松表面色度学参数统计结果

Table 4　Statistics of chroma parameters on the surface of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* wood

CeO_2-ZnO 复合纳米粉体百分比/%	项目	明度 $L*$	红绿轴色品指数 $a*$	黄绿轴色品指数 $b*$
0	最大值	78.17	15.13	32.54
	最小值	66.32	10.55	21.62
	平均值	73.55	12.74	26.89
0.2	最大值	76.19	15.57	32.39
	最小值	65.86	11.40	22.88
	平均值	71.54	13.47	27.57
0.4	最大值	75.95	15.19	32.15
	最小值	65.50	11.30	23.08
	平均值	70.84	13.17	27.88
0.6	最大值	75.28	15.02	33.01
	最小值	64.93	11.08	26.06
	平均值	70.18	13.45	29.76

参考文献：

[1] 黄艳辉，冯启明，董天悦，等. 浅析木蜡油的应用、研究现状及发展趋势[J]. 林产工业，2019，46(1)：7-11.

[2] 潘亚东，李春风. 三聚氰胺改性树脂涂饰薄木饰面板工艺研究[J]. 森林工程，2017，33(3)：44-47.

[3] 李永博，沈隽，王敬贤，等. 低分子量脲醛树脂浸渍杨木强化材的饰面性能研究[J]. 森林工程，2018，34(1)：36-40.

[4] 赵畅，黄艳辉，卿兰庭. 木蜡油及其在木质家具中的应用进展[J]. 林产工业，2016，43(10)：11-14.

[5] 易熙琼，陈浩淼，何凤梅. 木蜡油的性能特点及涂装工艺[J]. 木材工业，2013(5)：46-48.
YI X Q，CHEN H M，HE F M. Characteristics of wood wax oil and its coating application[J]. China Forest Products Industry，2013(5)：46-48. (in Chinese)

[6] EVANS，PHILIP D，WINGATE-HILL R，CUNNINGHAM R B. Forest products journal[J]. Madison，2009，59(1/2)：66-70.

[7] 江映其，雷亚芳，孟祥彬. 基于生命周期评价的 3 种木质类家具环境影响比较研究[J]. 西北林学院学报，2014，29(4)：232-236.
JIANG Y Q，LEI Y F，MENG X B. Life cycle assessment based study of the influences of three wooden furniture on environment[J]. Journal of Northwest Forestry University，2014，29(4)：232-236. (in Chinese)

[8] 闫小星，吴燕，毛卫国，等. SiO_2 改性对紫外光固化木器涂料性能的影响[J]. 南京林业大学学报：自然科学版，2014，38(4)：173-176.
YAN X X，WU Y，MAO W G，*et al*. Influence of modification ofUV-curing wood coatings with SiO_2 on its mechanical properties and gloss[J]. Journal of Nanjing Forestry University：Natural Sci-ences Edition，2014，38(4)：173-176. (in Chinese)

[9] TANG Z G，ZHOU C C，CHEN C. Studies on flue gas desulfurization by chemical absorption using an ethylenediamine phosphoric acid solution[J]. Ind. Eng. Chem. Res.，2004，43：6714-6722.

[10] 吕印美，李丽华，张金生，等. 复合纳米 ZnO-CeO_2 的制备与吸光性能研究[J]. 材料工程，2011，12(1)：34-37.
LÜ Y M，LI L H，ZHANG J S，*et al*. Preparation of nanometer ZnO-CeO_2 composites and its absorbtion properties[J]. Journal of Materials Engineering，2011，12(1)：34-37. (in Chinese)

[11] KAUR J，BHUKAL S，GUPTA K，*et al*. Nanocomposite of CeO_2 and ZnO：an active material for the treatmen of contaminated water[J]. Materials Chemistry&Physics，2016，177(1)：512-520.

[12] FAKHRI A，BEHROUZ S. Comparison studies of adsorption properties of MgO nanoparticles and ZnO-MgO nanocomposites for linezolid antibiotic removal from aqueous solution using response surface methodology[J]. Process Safety & Environmental Protection，2015，94(1)：37-43.

[13] 李能，陈玉和，包永洁，等. 竹木材料耐紫外光老化性能研究进展[J]. 浙江林业科技，2011，31(6)：70-73.

[14] LIU I T，HON M H，TEOH L G. The preparation，characterization and photocatalytic activity of radical-shaped CeO_2/Zn Omicrostructures[J]. Ceramics International，2014，40(3)：4019-4024.

[15] 玄路宁，刘志高，符韵林. 木材表面 Fe^{3+} 掺杂 TiO_2/SiO_2 复合膜构建及其光催化性能[J]. 林业工程学报，2018，3(4).
XUAN L N，LIU Z G，FU Y L. Construction of Fe^{3+} doped TiO_2/SiO_2 composite film on wood surface and its photocatalytic activity[J]. Journal of Forestry Engineering，2018，3(4)：45-50. (in Chinese)

[16] 张其，肖泽芳，龚宸，等. 磷酸脒基脲和季戊四醇磷酸酯复合改性 MUF 木材涂料的阻燃性能研究[J]. 林业工程学报，2018，3(6)：48-55.
ZHANG Q，XIAO Z F，GONG C，*et al*. Wood resin coatings using synergistic fire-retardant modification of pentaerythritol phosphate and guanylurea phosphate[J]. Journal of Forestry Engineering，2018，3(6)：48-55. (in Chinese)

[17] 肖泽芳，袁沛沛，王清文，等. 蔗糖/DMDHEU 改性对木材涂饰和老化性能的影响[J]. 林业工程学报，2016，1(4)：18-24.
XIAO Z F，YUAN P P，WANG Q W，*et al*. Coating and weathering performance of wood modified with a mixing solution of sucrose and DMDHEU[J]. Journal of Forestry Engineering，2016，1(4)：18-24. (in Chinese)

[18] 孙枭雄，多化琼，王振柱. 基于红外光谱的木材自身耐久性分析[J]. 西北林学院学报，2016，31(2)：255-258.
SUN X Y，DUO H Q，WANG Z Z. Wood durability analysis based on FTIR spectra[J]. Journal of Northwest Forestry University，2016，31(2)：255-258. (in Chinese)

[19] 李正理. 植物组织制片学[M]. 北京：北京大学出版社，1996.