

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150453

阻燃处理木质壁纸的结构与性能表征

李为义 张求慧 赵广杰

(木质材料科学与应用教育部重点实验室,北京林业大学材料科学与技术学院)

摘要:为了开发新型阻燃木质壁纸,采用复合阻燃剂(组成包括聚磷酸铵、季戊四醇、磷酸胍和纳米有机蒙脱土)对壁纸的面层装饰薄木和底层无纺纸分别进行超声浸渍处理,制成阻燃木质壁纸(FRWW)。采用锥形量热仪、扫描电镜和电子能谱、傅里叶红外光谱分别表征FRWW的阻燃性、表面微观结构和元素种类及含量、化学反应官能团。采用CIE1976($L^* a^* b^*$)色空间表色系统对阻燃前后木质壁纸的色差进行表征。结果表明:1)与PVC壁纸相比,FRWW的点燃时间延迟了2倍,热释放速率和有效燃烧热分别减少了8.88%和30.79%,总烟释放量和比消光面积分别减少了28.02%和53.09%,但FRWW的总热释放量、质量损失率及CO释放量与PVC壁纸的相差不大;2)FRWW比PVC壁纸的燃烧增长速率指数降低81.93%、火灾性能指数提高2.17倍,显示出前者具有更好的消防安全;3)阻燃剂以不规则微米级粒状分布于FRWW表面,元素组成主要为C(31.15%)、O(42.07%)、N(19.77%)、P(5.67%)和其他微量元素;4)FRWW中的阻燃活性官能团(仲氨—NH和P—O—Ar)吸收峰位置在1042和1015 cm⁻¹处;5)FRWW的色差值 ΔE_{ab}^* 仅为1.734,表明阻燃处理对木质壁纸的装饰效果影响较小。

关键词:复合阻燃剂;木质壁纸;结构与性能;表征

中图分类号:S784; TU545 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)07-0091-07

LI Wei-yi; ZHANG Qiu-hui; ZHAO Guang-jie. **Structure and properties characterization of the flame retardant wood wallpaper.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016)38(7) 91-97 [Ch, 32 ref.] MOE Key Laboratory of Wooden Material Science and Application, College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

We treated the decorative veneer and the nonwoven paper by ultrasonic impregnation with the composite flame retardant, and developed a new type of flame retardant wood wallpaper (FRWW). The flame retardant properties of FRWW were characterized by a cone calorimeter test (CCT) and compared with those of the PVC wallpaper. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and electron energy dispersive spectroscopy (EDS) were used to analyze the surface microstructure and the surface elements and content of FRWW. The functional groups of FRWW were characterized by Fourier infrared spectroscopy (FTIR). CIE1976 ($L^* a^* b^*$) color space was used to characterize the color difference of the wood wallpaper before and after flame retardant treatment. Results showed that: 1) Compared with the PVC wallpaper, the ignition time of FRWW was delayed 2 times; the heat release rate and the effective combustion heat were decreased by 8.88% and 30.79%, respectively. The total smoke release rate and the specific extinction area were reduced by 28.02% and 53.09% respectively. However, the total heat release, mass loss rate and CO release amount of FRWW and PVC had no marked difference. 2) The combustion growth rate index of FRWW decreased by 81.93%, and the fire performance index increased to 2.17 times higher than that of the PVC wallpaper, suggesting that the former has better fire safety level. 3) The flame retardant was distributed on the fiber pores of FRWW surface with irregular micron size distribution, and the main elements were C(31.15%), O(42.07%), N(19.77%), P(5.67%)

收稿日期: 2015-12-02 修回日期: 2015-12-24

基金项目: 北京市教委共建项目“新型木质复合材料制备技术及应用”、北京林业大学横向开发课题(2015hxkfcly002)。

第一作者: 李为义,博士生。主要研究方向:装饰材料。Email:800001@docoworld.com 地址:100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学材料科学与技术学院。

责任作者: 张求慧,教授,博士生导师。主要研究方向:木质复合材料。Email:qzh66@163.com 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

and other trace elements. 4) The infrared absorption peak positions of the active functional groups ($-\text{NH}$ and $\text{P}-\text{O}-\text{Ar}$) of FRWW were in 1042 cm^{-1} and 1015 cm^{-1} , respectively. 5) The ΔE_{ab}^* of FRWW was only 1.734, showing that the flame retardant treatment has little effect on the decorative effect of the wood wallpaper.

Key words composite flame retardant; wood wallpaper; structure and properties; characterization

壁纸是常用的室内装饰材料,对室内环境的空气质量及安全性影响很大^[1-3]。目前广泛使用的PVC壁纸装饰效果丰富,价格适中,易保洁,占壁纸市场份额的80%左右;但该类壁纸在燃烧时会放出有毒气体,对人体健康及生态环境构成潜在危害。因此,研究开发新型的阻燃壁纸产品具有现实意义。

木材具有优良的综合使用性能,其环境特性已为世人公认。木质壁纸由装饰薄木作面层、无纺纸作底层基纸复合而成,集木材的天然纹理色泽以及无纺纸的透气吸音为一体,属于健康环保型的绿色室内装饰材料;但木质壁纸所用原料装饰薄木和无纺纸属于可燃材料和易燃材料,对其进行阻燃处理实有必要。前人曾对木材阻燃和纸张阻燃分别做过大量研究^[4-8],但所用阻燃剂大多为单一组分^[9-12],对阻燃剂复配的研究不够充分。另外,现有成果对材料阻燃处理时相应产生烟雾较大的问题研究滞后,仅有少量涉及^[13-14]。而在材料燃烧过程中,烟雾是评价阻燃材料性能的重要因素^[15-16],应予以更多的重视。

膨胀型阻燃剂(IFR)主要通过凝聚相阻燃发挥作用^[17-18]。典型的IFR组成为聚磷酸铵(APP)和季戊四醇(PER)体系。IFR被认为是实现阻燃材料无卤化和减少阻燃材料烟雾量的重要途径和主要措施^[19-20]。磷酸胍(GP)是木质纤维素基材(如木材、棉纤维、纸等)常用的阻燃剂^[21],有望与APP和PER复配而具有增强阻燃效果的作用。纳米有机蒙脱土(OMMT)曾被用于聚合物的阻燃,具一定协同阻燃效果和抑烟减毒性能^[22-23]。本课题采用超声浸渍方法,制备用复合阻燃剂处理的阻燃木质壁纸(FRWW),并研究其结构与性能。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

材料:装饰薄木沙比利(*Entandrophragma cylindricum*),厚度0.26 mm,购于北京东坝珍贵木材市场;无纺纸(定量120 g/m²)和PVC壁纸,沈阳领拓科技有限公司提供;壁纸复合用竹炭糯米胶,江苏嘉兴桐乡实业股份有限公司。

化学试剂:APP,深圳海成兴业有限公司,工业级;PER,国药集团,化学纯;GP,郑州冠达化工产品

有限公司,工业级;OMMT,北京怡蔚特化科技发展有限公司,化学纯。

设备:超声波浸渍设备,深圳洁盟清洗设备有限公司,JP-020S;锥形量热仪,英国Fire Testing Technology公司,FTT0242;红外光谱仪,PerkinElmer公司,SpectrumGX型;场发射电子扫描电镜FE-SEM及电子能谱EDS,日本设备,JSM-7001;Data-color 110测色仪,Data-color公司。

1.2 方法

1.2.1 复合阻燃剂的配制

在预试验的基础上,取 $m_{\text{APP}}:m_{\text{PER}}:m_{\text{GP}}=10:3:5$,将阻燃液中APP的质量分数设定为20%,OMMT加入量为5%(相对于APP的质量)。

1.2.2 FRWW的制备

将复合阻燃剂注入到超声设备的水槽中,放入装饰薄木和无纺纸并使其完全浸没在液体中,开始进行超声浸渍处理,时间2 min,温度30℃;将浸渍后的薄木和无纺纸在温度(105±3)℃的鼓风干燥机中干燥1 h,再按照GB/T10739—2002^[24]中的规定,在温度(23±1)℃、湿度50%的环境下平衡处理24 h。最后用胶黏剂将薄木与无纺纸贴合。在同样工艺条件下制备未经阻燃液浸渍处理的木质壁纸作对照样。

1.2.3 FRWW的燃烧性检测

用锥形量热试验方法(CCT),按照ISO5660-1:2002^[25]设定参数,试样尺寸100 mm×100 mm×0.5 mm,热辐射通量35 kW/m²。

1.2.4 FRWW的微观结构及元素分析

用扫描电镜(FE-SEM)进行FRWW的微观结构及元素分析,按照GB/T17359—2012^[26]设置参数。

1.2.5 FRWW的FTIR分析

用红外光谱仪对FRWW进行红外光谱(FTIR)分析,测定采用KBr压片法,光谱范围4 000~400 cm⁻¹,中红外DTGS检测器,光谱分辨率为4 cm⁻¹。扫描实时扣除H₂O的干扰。

1.2.6 FRWW表面的色差评价

按照GB/T7921—2008^[27],采用CIE1976(L^* a^* b^*)色空间表色系统进行样品的表色。样品含水率为10%。测试光源为D65标准光源,色温6 504 K,照明和观测几何条件为o/d(垂直入射/漫

反射), 10°大视野, 测孔直径 20 mm。FRWW 样品和对照样品各测定 3 个, 每个试样进行 6 点测定, 所得数据取平均值用于比较分析。CIELAB 色差计算方法如下:

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

式中: ΔE_{ab}^* 为 2 个样品的色差; ΔL^* 为明度差, $\Delta L^* = L_{\text{FRWW}}^* - L_{\text{对照}}^*$, L_{FRWW}^* 为 FRWW 的明度, $L_{\text{对照}}^*$ 为对照的明度; Δa^* 为红绿对立维度的色品指数差, $\Delta a^* = a_{\text{FRWW}}^* - a_{\text{对照}}^*$, a_{FRWW}^* 为 FRWW 的红绿对立维度色品指数, $a_{\text{对照}}^*$ 为对照的红绿对立维度色品指数; Δb^* 为黄蓝对立维度的色品指数差, $\Delta b^* = b_{\text{FRWW}}^* - b_{\text{对照}}^*$, b_{FRWW}^* 为 FRWW 的黄蓝对立维度色品指数, $b_{\text{对照}}^*$ 为对照的黄蓝对立维度色品指数。

2 结果与讨论

2.1 FRWW 的阻燃性

2.1.1 FRWW 的 CCT 测定结果及分析

表 1 是 CCT 测定出的试样的热释放参数及烟释放参数。热释放参数包括: 点燃时间(TTI)、热释放速率(HRR)、热释放速率峰值(PHRR)、总热释放量(THR)、有效燃烧热(EHC)、有效燃烧热峰值

表 1 不同试样的热释放参数和烟释放参数

Tab. 1 Heat release and smoke release parameters of different samples

指标 Index	FRWW	对照样 Control	PVC 壁纸 PVC wallpaper
TTI/s	15	9	5
HRR/(kW·m ⁻²)	98.89	206.99	108.53
PHRR/(kW·m ⁻²)	392.25	708.96	420.60
THR/(MJ·m ⁻²)	5.0	9.3	4.9
EHC/(MJ·kg ⁻¹)	21.08	31.79	30.46
PEHC/(MJ·kg ⁻¹)	39.73	73.74	49.9
MLR/(g·s ⁻¹)	0.040	0.053	0.039
TSR/(m ² ·m ⁻²)	66.8	63.1	92.8
SEA/(m ² ·kg ⁻¹)	258.64	212.97	551.35
PSEA/(m ² ·kg ⁻¹)	469.21	524.72	940.19
COY/(kg·kg ⁻¹)	0.0884	0.0584	0.0880

注: FRWW 为阻燃木质壁纸, TTI 为点燃时间, HRR 为热释放速率, PHRR 为热释放速率峰值, THR 为总热释放量, EHC 为有效燃烧热, PEHC 为有效燃烧热峰值, MLR 为质量损失率, TSR 为总烟释放量, SEA 为比消光面积, PSEA 为比消光面积峰值, COY 为一氧化碳生成量。下同。Notes: FRWW is flame retardant wood wallpaper, TTI is time to ignition, HRR is heat release rate, PHRR is the peak of heat release rate, THR is total heat release, EHC is effective heat of combustion, PEHC is the peak of effective heat of combustion, MLR is mass loss rate, TSR is total smoke release, SEA is specific extinction area, PSEA is the peak of specific extinction area, and COY is carbon monoxide yield. The same below.

(PEHC)、质量损失率(MLR); 烟释放参数包括: 总烟释放量(TSR)、比消光面积(SEA)、比消光面积峰值(PSEA)、一氧化碳生成量(COY)。

TTI 也称引燃系数、轰燃时间、耐点燃时间, 延长 TTI 可增加初期将火焰控制在小范围内扑灭的概率, 从而减少火灾险情。因此, 延长 TTI 是提高材料阻燃性的重要途径。从表 1 可以看出: 相比对照样, FRWW 的 TTI 值延长了 6 s(增大了 66.7%), 说明阻燃处理可以明显延长木质壁纸的点燃时间。相对于塑料的 PVC 壁纸, FRWW 的点燃时间优势更加明显, 即点燃时间延长了 2 倍。

HRR、PHRR 被认为是表征材料可燃性及火灾行为的最有效、最重要的参数^[28]。因为 HRR 是火灾发展的驱动力, 该值与材料的其他燃烧特性参数密切相关。HRR 值越大, 暗示火场温度和辐射热通量越高, 火灾威胁程度也就越大。降低 HRR 是防止火灾发生和降低火灾危害最重要的措施^[29]。PHRR 及其到达该值的时间代表火灾发展可能到达的最大程度及其速度, 同样具有重要意义。从图 1 可以看出: FRWW 不但热释放值降低了 8.88%, 而且到达峰值的时间也明显推后, 显示出较好的阻燃效果。

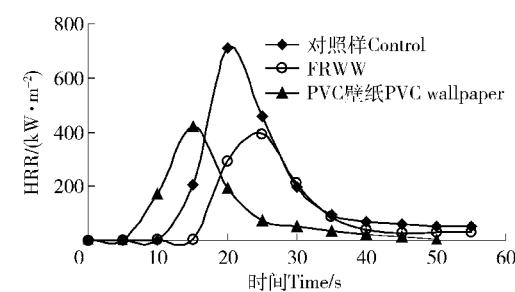


图 1 试样的热释放速率

Fig. 1 HRR of the test samples

EHC 是试样受热分解形成的可挥发性成分在燃烧时所释放的热量。EHC 曲线越平缓、峰值越低, 则材料的阻燃性能越好。从图 2 和表 1 可以看出: FRWW 的曲线变化趋势明显平缓, 而且峰值出现的时间后延。相比 PVC 壁纸, FRWW 的 EHC、PEHC 分别下降了 30.79% 和 20.38%, 燃烧过程更加缓。

TSR 和 SEA 均为表征阻燃材料烟雾系数的指标, TSR 代表燃烧时的单位面积物质产生的烟释放量, SEA 代表单位质量物质产生烟气体的消光面积(该值与大型实验中的发烟参数相关性较好)。火灾时发烟量越大, 造成的伤害越大。因为火灾释放的气体不但降低现场能见度, 增加人的心理恐惧感, 还会妨碍及时逃生以及消防人员的快速扑救。从表 1 可以看出: 与对照样相比, FRWW 的 TSR 值有所

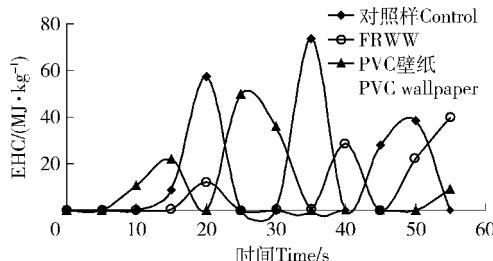


图2 试样的有效燃烧热

Fig. 2 EHC of the test samples

上升(增加了5.86%)。这主要是因为阻燃剂的成分为APP(酸源和气源)和PER(炭源),两者在受热时释放出不燃气体并同时形成炭层^[21]。但也因兼具凝聚相阻燃和气相阻燃的双重作用,使材料燃烧过程被抑制,导致烟释放量有所升高。但与PVC壁纸相比,FRWW的TSR值仅为前者的28.02%,烟雾生成量更小。从图3可以看出,FRWW具有相对更完整的炭层结构。



图3 燃烧后的阻燃木质壁纸、PVC壁纸残炭

Fig. 3 Carbon residues of FRWW and PVC wallpaper after burning

从图4和表1可以看出:PVC壁纸的产烟量明显大于FRWW,而且PSEA也明显提前于FRWW。结合HRR、EHC和TSR,可以判断出FRWW的阻燃性及烟雾参数均优于PVC壁纸。与对照样相比,FRWW的SEA增大了21.4%,但峰值略微减少,出现峰值的时间也稍微延迟。对照样只有1个释烟峰,而FRWW有3个释烟峰,说明FRWW的烟雾释放特征是持续而缓慢的。FRWW的SEA大于对照样的原因可归于:复合阻燃剂中的APP和GP在高温下释放出氨气等不燃气体,在稀释氧气相对浓度起到阻燃作用的同时,使烟雾释放量增加。

2.1.2 FRWW的火灾危险性指数

燃烧增长速率指数(FIGRA)和火灾性能指数(FPI)是由CCT测试结果推导出的2个火灾危险性指数。FIGRA也被称为火灾发展(或蔓延)指数,该值等于PHRR与到达PHRR的时间(t_{PHRR})之比。FIGRA越大表示火灾危险性越高。在我国现行强制标准GB8624—2012^[30]中,FIGRA被作为评定材

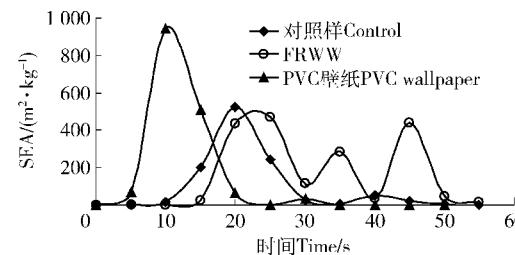


图4 试样的比消光面积

Fig. 4 SEA of the test samples

料燃烧性能等级的重要指标之一。FPI在数值上等于TTI与PHRR之比。因为TTI相关且呈正比关系,所以FPI值越高,表示材料点燃所需时间越长,潜在的火灾危险性越低。

从表2可以看出:木质壁纸阻燃前后的FIGRA或FPI数值均优于PVC壁纸,而FRWW的阻燃性能更为优异。与PVC壁纸相比,FRWW的FIGRA减少了81.93%,FPI增加了2.17倍,反映出FRWW具有更好的消防安全性。

表2 FRWW和PVC壁纸的火灾危险性推导指数

Tab. 2 Fire risk deduction index of FRWW and PVC wallpaper

指标 Index	对照样	FRWW	PVC壁纸
	Control	FRWW	PVC wallpaper
FIGRA/(W·s⁻¹)	35.45	15.20	84.12
FPI	0.013	0.038	0.012

注:FIGRA为燃烧增长速率指数, FPI为火灾性能指数。Note: FIGRA is fire growth rate index, and FPI is fire performance index.

2.2 FRWW的微观结构及元素分析

场发射电子扫描电镜(FE-SEM)具有超高分辨率,可进行各种固态样品表面形貌的观察分析及图像处理,该设备配置的X射线能谱仪(EDS)可同时进行样品表层微区的元素定性及定量分析,具有形貌、化学组分综合分析能力。FRWW的FE-SEM及EDS检测结果分别如图5和表3所示。

从图5可以看出:对照样细胞壁表面、细胞腔中及射线细胞空隙中并无异物,细胞壁光滑而平整。经过阻燃剂浸渍处理后,木材纤维组织的表面及空隙中分布有大小不一、形状各异的细小晶粒(阻燃物质),而且因阻燃处理过程采用了超声浸渍方法,超声波的“空化效应”使细胞壁组织出现某种程度的皱缩,阻燃剂成分分布于木材宏观空隙和微观空隙中,部分填充了射线细胞的孔隙。细胞壁皱缩及阻燃剂的充填均有益于减少木材孔隙率,导致燃烧过程中的氧气流通渠道变得窄小,燃烧速度受限,对阻燃具有积极作用。

从表3可以看出:对照样的主要元素组成为C和O,这与木材的主要元素构成相符(EDS无法测定

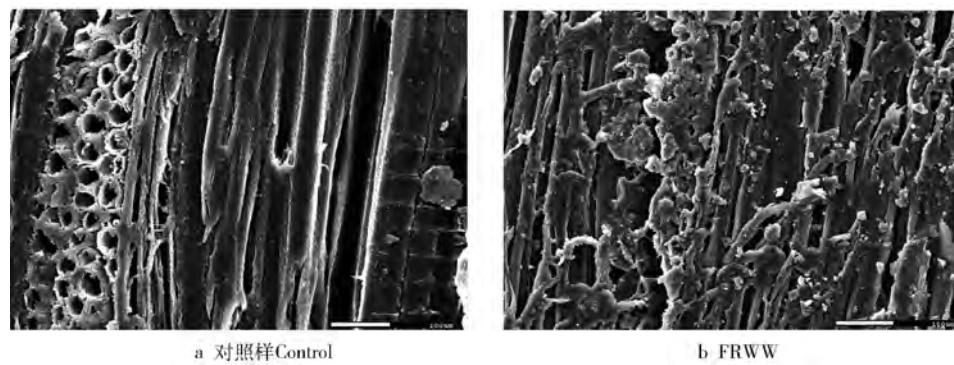


图5 试样的FE-SEM

Fig. 5 FE-SEM of test samples

出木材中的H)。而经阻燃处理后的FRWW表面元素种类明显增加,除C和O外,还出现了APP中的N和P,以及OMMT中的微量元素(如Si、Mg、Al、Ca、Rb等),这些微量元素均对FRWW的阻燃效果具有贡献。总体上,FRWW表面元素主要构成为C、O、N、P。

表3 阻燃前后木质壁纸表面的元素种类及含量

Tab. 3 Surface elements and contents of wood wallpaper before and after flame retardant

试样	元素种类	质量百分比	原子百分比
Sample	Element type	Mass percent/%	Atomic percent/%
对照样 Control	C	56.25	63.14
	O	43.75	36.86
FRWW	C	31.15	37.81
	O	42.07	38.33
	N	19.77	20.57
	P	5.67	2.67
	Si	0.55	0.28
FRWW	Mg	0.21	0.13
	Al	0.22	0.12
	Ca	0.16	0.06
	Rb	0.19	0.03

2.3 FRWW的FTIR分析

从图6可以看出:对照样FTIR谱图中2 921 cm⁻¹处有一吸收峰,此系有机化合物的C—H伸缩振动(CH₃,CH₂)^[31]。添加阻燃剂后,该吸收峰的强度有所减弱,而且位置分别向高波数段(2 938 cm⁻¹)及低波数段(2 887 cm⁻¹)有少量位移,出现1个肩峰,此现象是因CH₃或CH₂与氧原子相连时导致的吸收位置移动。与对照样相比,FRWW的FTIR谱图在波数1 655和1 624 cm⁻¹处“组成”的肩峰为C=O的伸缩振动(对位取代共轭芳酮的特征),此峰与对照样相比轻微提高;1 317 cm⁻¹处的弱峰为—OH面内弯曲振动,是体系中含有羧酸盐成分的佐证;在

1 042和1 015 cm⁻¹处出现新峰,这2个峰构成1个强吸收带(分叉峰),是仲氨—NH基团的典型红外吸收特征^[32](APP和GP分子结构中均含有此官能团),同时也是含磷化合物(P—O—Ar)存在的佐证。此外,FRWW表层和基层含有的纤维素、半纤维素、木质素中的C—O伸缩振动也对此峰的强度提高具有贡献。

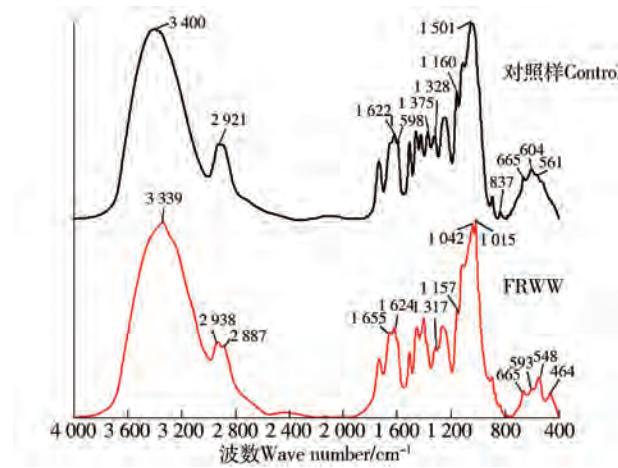


图6 阻燃前后木质壁纸的FTIR谱图

Fig. 6 FTIR spectra before and after flame retardant for FRWW

值得指出的是,本应出现在1 450 cm⁻¹处的P—O伸缩振动峰(APP和GP中含有的)并未出现,这可能是该峰与其他峰重叠所致。另外,几个纤维素的特征峰(分别位于2 920、1 370、1 430、840 cm⁻¹)在FRWW的FTIR谱图中消失,这在某种程度上也许意味着加入的阻燃剂及具有插层结构的纳米有机蒙脱土对纤维素的结构有所影响。

2.4 FRWW的表面颜色

色差值越小,表明阻燃剂的加入对木质壁纸表面原有的装饰效果影响越小。从表4可以看出:与对照样相比,FRWW的ΔL*为负值,说明其比对照样明度稍暗。在彩度差方面:Δa*为正值,说明FRWW比对照样红(或少绿);Δb*为负值,说明FRWW比对照样蓝(或少黄)。总体上,FRWW的

色差值 ΔE_{ab}^* 仅为 1.734, 表明阻燃处理对木质壁纸

的装饰效果影响较小。

表 4 试样的 CIE1976($L^* a^* b^*$)表色结果

Tab. 4 CIE1976($L^* a^* b^*$) results of FRWW

试样 Sample	L^*	ΔL^*	a^*	Δa^*	b^*	Δb^*	ΔE_{ab}^*
对照样 Control	65.632	-	12.346	-	23.065	-	
FRWW	64.025	-1.507	12.715	0.369	22.548	-0.517	1.734

注: L^* 为明度, ΔL^* 为明度差; a^* 为红绿对立维度色品指数, Δa^* 为红绿对立维度的色品指数差; b^* 为黄蓝对立维度色品指数, Δb^* 为黄蓝对立维度的色品指数差; ΔE_{ab}^* 为 2 个试样的色差。Note: L^* is lightness, and ΔL^* is the lightness difference. a^* is the chromaticity index for red-green opposition dimension, and Δa^* is the chromaticity index difference for the red-green opposition dimension. b^* is the chromaticity index for yellow-blue opposition dimensions, and Δb^* is the chromaticity index difference for the yellow-blue opposition dimension. ΔE_{ab}^* is the color difference between the two samples.

3 结 论

1) 采用超声浸渍工艺, 用复合阻燃剂对木质壁纸进行阻燃处理, 得到了具有一定阻燃效果和抑烟性能的 FRWW。

2) 与常用的 PVC 壁纸相比, FRWW 的点燃时间可延迟 2 倍, 热释放速率和有效燃烧热分别减少 8.88% 和 30.79%, 总烟释放量和比消光面积分别减少 28.02% 和 53.09%。但是, FRWW 的总热释放量、质量损失率及 CO 释放量与 PVC 壁纸的相差不大。FRWW 比 PVC 壁纸的燃烧增长速率指数降低 81.93%、火灾性能指数提高 2.17 倍, 显示出更好的消防安全性。

3) 阻燃剂以不规则微米级粒状分布于 FRWW 表面, 元素组成主要为 C(31.15%)、O(42.07%)、N(19.77%)、P(5.67%) 和其他微量元素。FRWW 中的阻燃活性官能团(仲氨—NH 和 P—O—Ar)吸收峰位置在 1 042 和 1 015 cm^{-1} 处。

4) 与对照样相比, FRWW 的色差值 ΔE_{ab}^* 仅为 1.734, 表明阻燃处理对木质壁纸的装饰效果影响较小。

参 考 文 献

- [1] MORISKE H J, EBERT G, LOTHAR K, et al. Concentrations and decay rates of ozone in indoor air in dependence on building and surface materials [J]. Toxicology Letters, 1998, 96-97:319-323.
- [2] YU K P, GRACE W M, HSIEH C P, et al. Evaluation of ozone generation and indoor organic compounds removal by air cleaners based on chamber tests [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45:35-43.
- [3] 白鸽. 墙纸对室内苯系物的吸附影响因素研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- BAI G. Study on typical indoor BTEX sorption characteristics and impact factors of wallpaper [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [4] USMAN S, RICHARD E L, RICHARD G, et al. Material and fire threat [J]. Fire Technology, 1997, 33(3):260-275.
- [5] YOSHIHIKO A, SAKAE N, YUTA T, et al. Improvement on fire retardancy of wood flour/polypropylene composites using various fire retardants [J]. Polymer Degradation and Stability, 2014, 100: 79-85.
- [6] 陈星艳, 向士龙, 陶涛, 等. 木质材料阻燃处理方法的应用研究进展 [J]. 林产工业, 2012, 39(5):8-11.
- CHEN X Y, XIANG S L, TAO T, et al. Research progress in fire-retardant treatment methods of woody materials [J]. China Forest Products Industry, 2012, 39(5):8-11.
- [7] LI L M, ZHANG H P, XIE Q Y, et al. Experimental study on fire hazard of typical curtain materials in ISO 9705 fire test room [J]. Fire and Materials, 2012, 36(2):85-96.
- [8] 李梦媛, 朱国庆, 李俊毅, 等. 几种常见壁纸点燃与热解特性 [J]. 消防科学与技术, 2014, 33(5):487-490.
- LI M Y, ZHU G Q, LI J Y, et al. The igniting and pyrolytic characteristics of several kinds of common wallpaper [J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(5):487-490.
- [9] SAKA S, TANNO E. Wood-inorganic composites prepared by the sol-gel process [J]. Mokuzai Gakkaishi, 1996, 42(1):81-86.
- [10] 陈旬, 袁利平, 胡云楚, 等. 两种锰化合物对木材阻燃抑烟作用的比较研究 [J]. 功能材料, 2014, 45(11):11076-11080.
- CHEN X, YUAN L P, HU Y C, et al. Comparative study on the flame retarding and smoke suppressing properties of wood treated by manganese compounds [J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(11):11076-11080.
- [11] GU J W, ZHANG G C, DONG S L, et al. Study on preparation and fire-retardant mechanism analysis of intumescent flame retardant coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(18):7835-7841.
- [12] HUANG H H, TIAN M, LIU L, et al. Effects of silicon additive as synergists of Mg(OH)_2 on the flammability of ethylene vinyl acetate copolymer [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 99(6):3203-3209.
- [13] 王清文, 张志军, 陈琳, 等. 氧浓度对阻燃木材发烟性能的影响 [J]. 林业科学, 2006, 42(2):95-100.
- WANG Q W, ZHANG Z J, CHEN L, et al. Effects of oxygen concentration on the smoking property of fire-retardant treated wood [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(2):95-100.
- [14] 储德森, 母军, 张晓藤, 等. 5 种 N-P 阻燃剂阻燃抑烟性能的

- CONE 分析 [J]. 西南林业大学学报, 2015, 35(3):83-89.
- CHU D M, MU J, ZHANG X T, et al. A comparative study on fire resistance of poplar treated with five kinds of nitrogen-phosphorus fire retardants by CONE calorimetry [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2015, 35(3):83-89.
- [15] BLASI C D. The combustion process [M] // TROITZCH J. Plastics flammability handbook. 3rd ed. Munich: Hanser Publishers, 2004:47-58.
- [16] 李建军, 欧育湘. 阻燃理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2013:81-84.
- LI J J, OU Y X. Flame retardant theory [M]. Beijing: Science Press, 2013:81-84.
- [17] BOURBIGOT S, DUQUESNE S. Intumescence based fire retardants [M] // WIKIE C A, MORGAN A B. Fire retardancy of polymeric material. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009:129-162.
- [18] DUQUESNE S, BOURBIGOT S. Char formation and characterization [M] // WILKIE C A, MORGAN A B. Fire retardancy of polymeric material. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009:239-260.
- [19] 彭治汉. 聚合物阻燃新技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015:254-266.
- PENG Z H. New technology of polymer flame retardant [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015:254-266.
- [20] WANG D L, LIU Y, WANG D Y, et al. Novel intumescent flame-retardant system containing metal cheats for polyvinyl alcohol [J]. Polymer Degradation and Stability, 2007, 92(8):1555-1564.
- [21] 钱立军. 新型阻燃剂与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013:298-310.
- QIAN L J. New flame retardant and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013:298-310.
- [22] WANG Z Y, HAN E H, KE W. Fire-resistant effect of nanoclay on intumescent nanocomposite coatings [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 103(3):1681-1689.
- [23] 赵广杰. 木材中的纳米尺度、纳米木材及木材-无机纳米复合材料 [J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5):6-9.
- ZHAO G J. Nano-dimensions in wood, nano-wood, wood and inorganic nano-composites [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5):6-9.
- [24] GB/T10739—2002 纸、纸板和纸浆试样处理的试验的标准大气环境 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- GB/T10739—2002 Paper, board and pulps: standard atmosphere for conditioning and testing [S]. Beijing: China Standard Press, 2002.
- [25] ISO 5660-1: 2002 Reaction-to-fire tests; heat release, smoke production and mass loss rate; Part 1: heat release rate (cone calorimeter method) [S]. Geneva: International standardization organization, 2002.
- [26] GB/T17359—2012 微束分析: 能谱法定量分析 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- GB/T17359—2012 Microbeam analysis: quantitative analysis using energy dispersive spectrometry [S]. Beijing: China Standard Press, 2012.
- [27] GB/T7921—2008 均匀色空间及色差公式 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- GB/T7921—2008 Uniform color space and color difference formula [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [28] BABRAUSKAS V, PEACOCK R D. Heat release rate: the single most important variable in fire hazard [J]. Fire Safety Journal, 1992, 18(3):255-272.
- [29] HANSEN A S. Prediction of heat release in the single burning item test [J]. Fire and Material, 2002, 26(2):87-97.
- [30] GB8624—2012 建筑材料及制品燃烧性能分级 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- GB8624—2012 Classification for burning behavior of building materials and products [S]. Beijing: China Standard Press, 2012.
- [31] 李坚. 木材波谱学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003:109-110.
- LI J. Wood spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2003:109-110.
- [32] 宁永成. 有机波谱学谱图解析 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 106-115.
- NING Y C. Interpretation of organic spectra [M]. Beijing: Science Press, 2010:106-115.

(责任编辑 李文军
责任编委 王正)