DOI:10.12326/j.2096-9694.2021152

释香型无醛装饰纸饰面人造板性能评价

梁 敏[1]，徐建峰[1]，刘 如[1]，肖作兵[2]，吕 斌[1]，龙 玲[1]

（1. 中国林业科学研究院木材工业研究所，北京 100091；2. 上海香料研究所，上海 200232）

摘要：为降低人造板基材异味对饰面板产品气味的影响，在装饰纸浸渍用无醛胶黏剂中添加不同质量分数（0.25%、0.50%、0.75%、1.00%）的香料，赋予装饰纸香味，探究香料添加量对无醛装饰纸饰面人造板香料缓释性能及表面性能的影响。采用傅里叶变换红外光谱分析仪（FTIR）、电子扫描显微镜（SEM）分别对浸渍胶黏剂、装饰纸的化学成分和装饰纸表面形貌进行测试和表征。结果表明：无醛装饰纸饰面人造板香料缓释性能较好，室温条件下 90 d 以后仍能释放出香味；香料与胶黏剂的相容性较好，未影响浸渍胶黏剂自身的性能。无醛装饰纸胶膜对香料粒子有适度的封闭作用，这有利于实现香料的缓释；同时饰面人造板的表面结合强度、表面耐水蒸气、表面耐污染腐蚀性能（丙酮）均达到 GB/T 15102—2017《浸渍胶膜纸饰面纤维板和刨花板》的相关指标要求。

关键词：无醛胶黏剂；装饰纸；释香；饰面人造板

中图分类号：TS653；TS761.2　　文献标识码：A　　文章编号：2096-9694（2022）03-0052-06

Performance Evaluation of Impregnated Paper Decorated Wood-Based Panels with Fragrance-Release Formaldehyde-Free Resin

LIANG Min[1]，XU Jian-feng[1]，LIU Ru[1]，XIAO Zuo-bing[2]，LYU Bin[1]，LONG Ling[1]

（1. Research Institute of Wood Industry，Chinese Academy of Forestry，Beijing 100091，China；
2. Shanghai Research Institute of Fragrance & Flavor Industry， Shanghai 200232，China）

Abstract: In order to reduce the peculiar smell of the wood-based panels, various contents (with ratios of 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%) of aromatic compound were added into the formaldehyde-free adhesive to prepare the formaldehyde-free decorative paper, which endowed the decorative paper with fragrance. The effects of different aromatic contents on the slow-release performance and surface properties of the formaldehyde-free decorative paper surfaced wood-based panels were investigated. The chemical composition of impregnated resin and the surface morphologies of decorative paper were tested and characterized by the Fourier infrared spectroscopy (FTIR) and electron scanning microscope (SEM). The results showed that the aromatic sustained-release performance of formaldehyde-free decorative paper veneer wood-based panels was fairly good. The fragrance released from the testing panels has been detected after 90 days at the room temperature. The aromatic compound was compatible with the adhesive. It did not affect the properties of the impregnated adhesive. The formaldehyde-free decorative

收稿日期：2021-11-03；修改日期：2022-03-20
基金项目：中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“高性能无醛浸渍装饰胶膜纸开发研究”（CAFYBB2020SY037）。
作者简介：梁敏（1996—），女，硕士研究生。Email: elegancelm@126.com
通讯作者：徐建峰，男，副研究员。Email: xujianfeng198216@aliyun.com

paper adhesive film had a moderate sealing effect on aromatic particles, which contributed to the slow-release of fragrance. At the same time, the properties of the surface bonding strength, surface resistance to water vapor, and surface anti-pollution (acetone) of the decorative surfaced panels met the requirements of the standard GB/T 15102—2017 of "*Surface Decorated Fiberboard and Particleboard with Paper Impregnated Thermosetting Reins*".

Key words: formaldehyde-free adhesive; decorative paper; fragrance releasing; surface decorated wood-based panels

饰面人造板是室内装修、家具制造的主要材料，由人造板基材经浸渍装饰纸热压饰面制成。由于人造板基材制造用胶黏剂以醛类树脂（包括脲醛树脂、酚醛树脂和三聚氰胺甲醛树脂等）胶黏剂为主，人造板在加工和使用中会释放酸类、醛类、酮类和萜烯类化合物[1]。大部分挥发性有机化合物在常温下缓慢释放，并伴有一定的刺激性气味。

为降低人造板异味带来的不适感，研究人员对板材进行增香处理以覆盖或减弱基材异味。槐敏[2]等将香精微胶囊添加到胶合板中，通过GC-MS检测法分析胶合板的香味成分与薰衣草香精微胶囊的主要成分相同，证明采用薰衣草香精微胶囊作为增香剂制造香味胶合板是可行的。胡杨兵[3]使用香精微胶囊混悬液浸渍的饰面薄木，冷压贴覆在胶合板基材的表面，成功使用花香味掩盖了人造板本身的刺激性气味。人造板经过饰面后会不同程度地阻碍挥发物质和气味的释放[4]。装饰纸作为应用广泛的一种饰面材料，对装饰纸增香以掩盖人造板异味有较好前景，提高饰面人造板的香味释放效率尤为重要，越来越多的研究关注了香料缓释技术。苗红[5]制备出缓释香料微胶囊并比较了浆内添加法和浸渍法制备的释香型装饰纸的释香情况，浆内添加法由于香料分子较小导致香料流失严重等问题，相比之下，浸渍法的留香时间更长。龙玲等将香料与三聚氰胺树脂胶黏剂混合，制备的释香型装饰纸具有浓郁香气，但经热压贴覆于人造板表面后香味消失。笔者课题组新开发的无醛胶黏剂（聚丙烯酸酯/聚氨酯类）解决了装饰纸游离甲醛的释放问题[6-9]，且基本无挥发性有机物（VOC）释放，所成胶膜为有机小分子胶膜，这与传统三聚氰胺树脂胶黏剂所形成的致密、又硬又脆的胶膜性能迥异，因此可能导致两类胶膜的封闭性不同。在无醛胶黏剂中添加香料，既是解决饰面人造板基材异味的一种可行方法，又能赋予无醛装饰纸更高的附加值，进而拓展无醛装饰纸的应用场景。

鉴于此，本研究选取无醛胶黏剂，在其中添加香料缓释胶囊，研究添加工艺对浸渍装饰纸香味释放性能的影响，探究释香型无醛浸渍装饰纸饰面人造板的制备工艺，为解决饰面人造板异味问题提供科学数据和行之有效的方法。

1　材料与方法

1.1　试验材料

缓释香料：缤纷花香型，天然精油提取和人工合成的多种酯类混合物，环境友好，可与人体接触，适用于化妆品，为一种乳液型缓释香料，有效成分约 30%，粒径 150 nm 左右，黏度约 330 mPa•s（25 ℃），可以与水、无醛浸渍胶黏剂及三聚氰胺浸渍胶黏剂互溶。该香料可缓慢挥发释放香料成分，达到释香效果。由上海香精香料研究所提供。

装饰纸浸渍用胶：1）无醛胶，自制，分为两种，即一浸胶黏剂和二浸胶黏剂，主要化学成分均为聚氨酯，固体含量约 30%，黏度约 14 mPa•s（25 ℃），粒径约 500 nm。2）三聚氰胺浸渍胶黏剂，市购，可同时用作一浸胶黏剂和二浸胶黏剂，黏度约 14 mPa•s（25 ℃），固体含量约 50%。

人造板基材：脲醛胶中密度纤维板（medium density fiberboard，MDF），厚度约 18 mm，密度约 0.80 g/cm^3，气味等级为 2 级（气味明显，但气味不令人难受），市购。

装饰原纸，市购，定量 72 g/m^2。

1.2 试验设备

Carver热压机、微机控制人造板试验机、电热恒温鼓风干燥箱、傅里叶变换红外光谱仪、场发射电子扫描显微镜、多联磁力搅拌器等。

1.3 试验方法

1.3.1 浸渍装饰纸的制备

为对比香料在无醛装饰纸以及三聚氰胺装饰纸中释香的差异，制备了两种释香型装饰纸。

1）释香型无醛装饰纸制备：将香料直接添加在二浸无醛胶黏剂中，配制出香料添加量分别为0.25%、0.50%、0.75%、1.00%的四种二浸无醛胶黏剂。将裁剪好的装饰原纸（250 mm×250 mm）在不添加香料的一浸胶黏剂中浸渍约1 min，放入热风干燥箱中100 ℃干燥约2 min取出后，立即浸没至二浸胶黏剂中约1 min，放入热风干燥箱中100 ℃干燥约5 min，待其完全干燥后取出备用。

2）释香型三聚氰胺装饰纸制备：分别配制不添加香料的纯三聚氰胺一浸胶黏剂，香料添加量为1.00%的三聚氰胺二浸胶黏剂；将香料直接添加在二浸胶黏剂中，用玻璃棒搅拌均匀。将裁剪好的装饰原纸在一浸胶黏剂中浸渍约1 min，放入热风干燥箱中120 ℃干燥约2 min后取出，取出后浸没至二浸胶黏剂中约1 min，放入热风干燥箱中120 ℃干燥约5 min，待其完全干燥后取出备用。

1.3.2 装饰纸饰面人造板的制备

将装饰纸通过热压的方式压贴在MDF表面，热压工艺参数：1）无醛装饰纸饰面人造板，热压温度140 ℃、时间90 s、压力2.5 MPa；2）三聚氰胺装饰纸饰面人造板，热压温度190 ℃、时间20 s、压力2.5 MPa。

1.4 性能测试与表征

通过人的嗅觉感官考察香料释放时间的长短来评价饰面人造板香料缓释性能的优劣，每天定时对饰面人造板进行人工嗅闻香气的有无和浓淡。根据饰面人造板实际应用场景，将饰面人造板用锡纸进行五面（正面除外）包覆后，在两种环境条件下来考察香料缓释性能：1）将饰面人造板放在室温干燥通风处静置；2）将饰面人造板置于50 ℃烘箱，以模拟夏季运输车厢内温度，评估其释香时间。每个条件重复试件数3个。

针对装饰纸的实际应用要求，参照GB/T 15102—2017《浸渍胶膜纸饰面纤维板和刨花板》，根据GB/T 17657—2013《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》中4.15规定测试饰面人造板的表面胶合强度，根据4.35和4.41的规定测试饰面人造板表面耐水蒸气和表面耐污染性能。每个测试试件重复数为4个。

使用傅里叶变换红外光谱分析仪（FTIR）对添加香料前后的胶黏剂及热压后释香装饰纸的化学成分进行分析测试，其中胶黏剂红外光谱测试采用KBr涂膜法，装饰纸化学成分测试通过衰减全反射红外光谱（ATR）法。

通过扫描电镜（SEM）对无醛装饰纸和三聚氰胺装饰纸的表面形态进行表征。

2 结果与讨论

2.1 装饰纸饰面人造板香料缓释性能

表1是装饰纸饰面人造板在室温和50 ℃环境下香料的缓释性能试验结果。

表1 释香型装饰纸饰面人造板香料缓释性能试验结果

Tab.1 Sustained-release performance of fragrance from wood-based panels with surface decorative paper

饰面人造板种类/热压条件	香料添加量/%	香气持续时间	
		室温下/d	50 ℃烘箱/h
无醛装饰纸饰面/140 ℃、90 s	0.25	<40	<30
	0.50	<90	<45
	0.75	>90	约60
	1.00	>90	约60
三聚氰胺装饰纸饰面/190 ℃、25 s	1.00	<3	<30

试验结果显示，无醛装饰纸饰面人造板的香气随着香料添加量的增大更加浓郁，释香时间相应延长。香气随着时间推移逐渐减淡，40 d后香料添加量0.25%的饰面人造板已经基本闻不到香气；在90 d后香料添加量0.75%、1.00%的无醛装饰纸饰面人造板仍然保持较浓的香气。而香料添加量1%的三聚氰胺装饰纸饰面人造板，经热压之后，香气在短时间内（3 d内）基本闻不到了。这可能是因为无醛胶黏剂固化温度较低，香料缓释微胶囊在较低的热压温度下，受到的破坏不如三聚氰胺胶中微胶囊的破坏大，更多的微胶囊留存，因此无醛装饰纸饰面人造板的香气持续时间更长。

无醛装饰纸饰面人造板香料缓释性能的试验结果表明，饰面人造板在 50 ℃温度下释香性能规律与室温条件下的释香性能规律类似，即随着香料添加量提高，饰面人造板释香时间延长，香气更加浓郁。但与室温相比，在香料添加量相同的条件下，香味释放时长显著缩短，这是因为温度升高，微胶囊缓释速率加快，从而加速饰面人造板的香气释放，导致释香时间缩短。香料添加量为0.75%和1.00%时，香气释放时长接近。综合考虑原料成本和室温下香气留存时间，选择0.75%香料添加量为宜。

相比之下，在三聚氰胺胶黏剂中添加了1.00%的香料，其装饰纸饰面人造板香气保持时间比添加了0.50%香料无醛装饰纸饰面板香气保持时间还短，进一步说明由于三聚氰胺胶黏剂的固化温度相对较高，香料微胶囊在热压固化过程中可能破坏较大，导致香味在此过程中大部分均已释放。

因此，采用在无醛浸渍胶黏剂中添加香精缓释胶囊的方式，可以较好地实现装饰纸饰面人造板的释香，从而降低人造板本身异味带来的不适。综合考虑原料成本和室温下香味留存时间，选择0.75%香料添加量为宜。

2.2　无醛装饰纸饰面人造板的表面性能

对照未添加香料和添加香料（香料用量0.75%）的无醛装饰纸饰面人造板的表面性能测试结果，列于表2。从表2中可以看出，添加香料无醛装饰纸饰面板的表面胶合强度、耐水蒸气、耐丙酮污染腐蚀性能指标均符合GB/T 15102—2017的要求，与未添加香料饰面人造板性能差别不大。说明添加香料对无醛装饰纸饰面人造板的主要表面性能影响不大。

表2　无醛装饰纸饰面人造板表面性能

Tab.2　Surface properties of wood-based panels covered with formaldehyde-free decorative papers

表面性能	对照板	释香型	GB/T 15102—2017要求
表面胶合强度/MPa	1.19	1.11	≥0.6 MPa
表面耐水蒸气	5级	5级	达到4级以上
表面耐污染腐蚀（丙酮）	5级	5级	达到4级以上

2.3　原料化学成分分析

为了分析添加香料前后无醛胶黏剂及热固化前后装饰纸的化学成分变化，对胶黏剂和装饰纸进行了红外光谱的测试表征。图1是香料Ⓐ、未添加香料的无醛胶黏剂Ⓑ和添加0.75%香料的无醛胶黏剂Ⓒ的红外光谱图，3 415 cm^{-1}处的宽峰是—OH伸缩振动，1 655 cm^{-1}处归因于—C—C伸缩振动[10]，1 090 cm^{-1}处为—C—O—C基团[11]，说明香料主要成分为酯类；胶黏剂中2 107 cm^{-1}位置为聚氨酯类胶黏剂中—NCO基团[12]。制备含有香料的二浸胶是在常温环境下进行的，香料与胶黏剂没有发生反应生成新的物质，添加香料后胶黏剂的红外吸收峰基本没有变化，可能是由于香料添加量较少，或者由于香料被胶黏剂包裹较好。

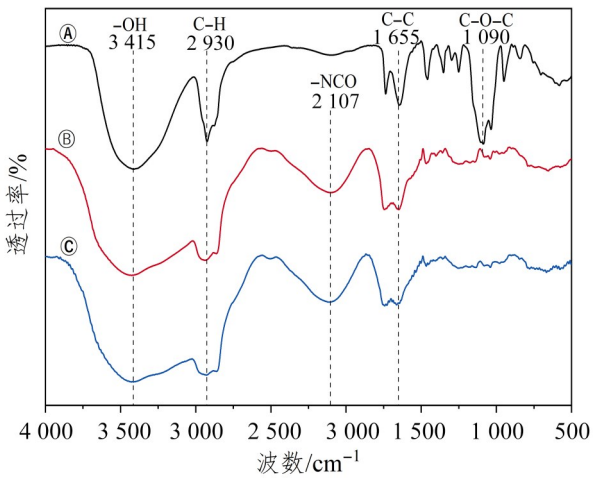


图1　香料Ⓐ、未添加香料的无醛胶黏剂Ⓑ和添加0.75%香料的无醛胶黏剂Ⓒ的FTIR图

Fig.1　FTIR spectrum of aromatic compound Ⓐ, formaldehyde-free adhesive without aromatic compound Ⓑ, and with 0.75% of aromatic compound Ⓒ

图2是香料添加量0.75%无醛装饰纸的红外光谱。3 340 cm^{-1}、1 728 cm^{-1}分别是—OH的伸缩振动、—C=O的伸缩振动[13]，2 934~2 867 cm^{-1}归因于甲基和亚甲基的—C—H伸缩振动，在1 300~1 000 cm^{-1}峰与—C—O和聚氨酯中—C—N基团有关[14]。可以看出热压前装饰纸红外图C—O—C基团出现在1 026 cm^{-1}附近，热压后此处峰减弱，而在1 241 cm^{-1}附近增强，说明了固化过程中胶黏剂大部分醚发生了酯化反应[13]。常温下，香料与胶黏剂成分没有发生化学反应，固化后装饰纸样品也没有出现新的特征峰，未生成新的物质，因此对饰面人造板的理化性能影响不大。

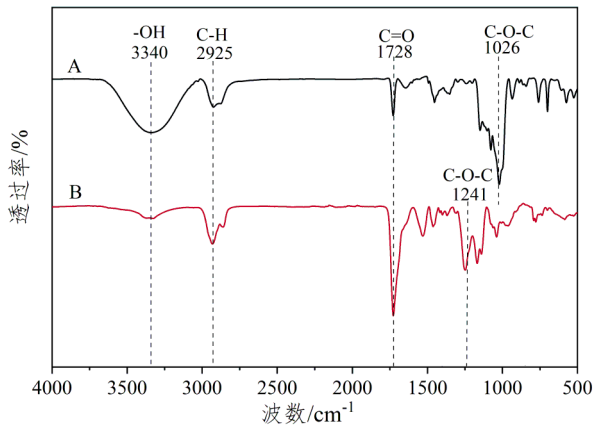


图2 香料添加量0.75%的无醛装饰纸未热压(A)和热压后(B)FTIR图

Fig.2 FT-IR spectrum of formaldehyde-free decorative paper with 0.75% aromatic compound without hot pressing (A) and after hot pressing(B)

2.4 无醛装饰纸和三聚氰胺装饰纸表面形态

装饰纸表面胶膜的致密程度直接影响香气的释放。表1的试验数据表明，三聚氰胺装饰纸和无醛装饰纸饰面人造板在香气的缓释上存在差别，无醛装饰纸的缓释作用更明显。为探明原因，采用扫描电镜对无醛装饰纸和三聚氰胺装饰纸热压后的表面形态进行了观察，如图3所示。

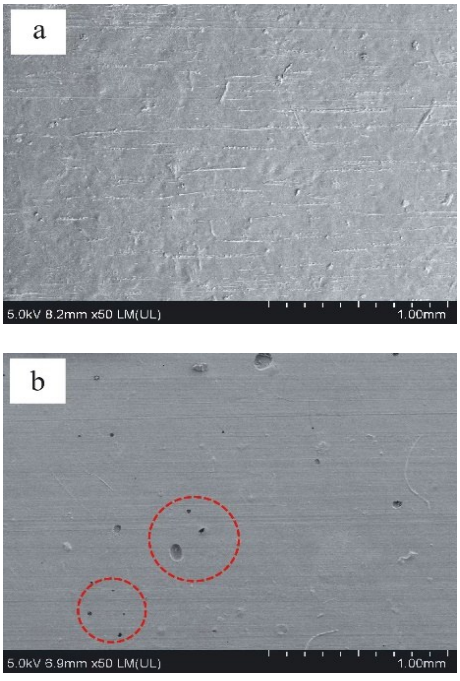


图3 无醛装饰纸(a)和三聚氰胺装饰纸(b)SEM图

Fig.3 The SEM images of formaldehyde-free decorative paper (a) and melamine decorative paper(b)

从图3a中可以看出，无醛装饰纸表面基本没有孔洞裂纹，胶层对纤维的覆盖性较好，这与无醛胶黏剂的胶膜性能有关。无醛胶黏剂主成分为分子量较低的有机聚合物，形成的胶膜相对较柔韧，胶层微孔尺寸极小，这种结构能够在一定程度上“减缓”香料的释放，实现香料的缓释[15]。而三聚氰胺胶膜较硬较脆，其浸渍装饰纸表面有较多尺寸较大的孔洞（图3b中圆圈），这是因为三聚氰胺甲醛树脂主要是通过分子中的活性基团（羟基和亚氨基）相互交联而成的，由于亚甲基两端连着刚性较大的三嗪环[16]，所以固化后树脂的韧性差，容易出现裂纹，直接导致了香料香气在热压过程中大量释放，微胶囊的缓释作用大大减弱。

3 结论

1）本试验采用二次浸渍的方法，使用自制无醛胶黏剂，在装饰纸二道浸胶中添加缓释香料，制备的无醛装饰纸饰面人造板的香料缓释效果较优，室温下香气释放时间超过90 d。饰面人造板的表面结合强度、耐水蒸气、耐污染腐蚀等性能指标达到GB/T 15102—2017《浸渍胶膜纸饰面纤维板和刨花板》相关要求。综合考虑原料成本和室温下香气留存时间，香料添加量以0.75%为宜。

2）香料与无醛胶黏剂组分在混合胶黏剂体系和热压过程中均不发生化学反应，香料的添加对饰面人造板理化性能影响不大。添加香料的无醛装饰纸表面胶层基本没有或有极少孔洞以及裂纹，胶层封闭性较好，能够在一定程度上“减缓”香料的释放。

3）试验数据和测试表征结果均显示，在以小分子有机聚合物为主成分的无醛胶黏剂中添加香料缓释胶囊，能较好地实现饰面人造板香气缓释的效果，从而在一定程度上解决人造板本身异味的问题，提高人造板产品品质。

参考文献：

[1] 龙玲. 木材及其制品挥发性有机化合物释放及评价[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[2] 槐敏, 金春德, 张文标, 等. 微囊化薰衣草香型环保胶合板的研制[J]. 林业科技开发, 2013, 27(5): 108-111.

[3] 胡杨兵, 刘玉, 孙蕾, 等. 基于微胶囊技术的饰面胶合板释香特性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, 50(2): 283-288.
HU Y B, LIU Y, SUN L, et al. Aroma-releasing characteristics of

plywood based on microcapsule technology[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2021, 50(2): 283-288.
[4] 王启繁. 饰面刨花板气味释放特性及环境因素影响研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
[5] 苗红. 缓释香精微胶囊的制备及其在装饰纸中的应用[D]. 天津市: 天津科技大学, 2012.
[6] 刘如, 徐建峰, 龙玲. 一种装饰纸用无醛浸渍胶黏剂及其制备方法: CN111501416A[P]. 2020-08-07.
[7] 徐建峰, 龙玲, 刘如. 一种无醛浸渍胶膜纸用胶黏剂及其制备方法: CN111411543A[P]. 2020-07-14.
[8] 龙玲, 徐建峰, 刘如. 一种浸渍胶膜纸饰面无醛人造板及其制备方法: CN111496948B[P]. 2021-10-22.
[9] 徐建峰,龙玲,刘如. 人造板饰面装饰纸无醛化研究现状[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(2): 1-5.
XU J F, LONG L, LIU R. Research Status Review of Formaldehyde-Free Decorative Paper for Wood-Based Panels[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(2): 1-5.
[10] LI X Y, LU X B, LIANG M, et al. Conversion of waste lignocellulose to furfural using sulfonated carbon microspheres as catalyst[J]. Waste Management, 2020, 108: 119-126.
[11] LIU R, LIANG M, XU J F, et al. Dialdehyde starch reinforced polyacrylate-polyethylene glycol resin for impregnated decorative paper with improved toughness and ultra-low formaldehyde emission [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 176: 114390.
[12] QIANG T, HAN M, LI X. Synthesis, characterization and fluorescence performance of a novel SAF-based waterborne polyurethane[J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 122: 248-254.
[13] XU J F, LI X Y, LIU R, et al. Dialdehyde modified cellulose nanofibers enhanced the physical properties of decorative paper impregnated by aldehyde-free adhesive[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 250: 116941.
[14] Wołosiak-Hnat A, Zych K, Mężyńska M, et al. The influence of type and concentration of inorganic pigments on the polyurethane adhesive properties and adhesion of laminates[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019, 90: 1-8.
[15] 王耀西, 罗晓明. 聚氨酯工业的应用发展研究[J]. 化工管理, 2018 (29): 10-11.
[16] 冯云, 屈伟, 刘美宏, 等. 三聚氰胺甲醛树脂增韧改性研究进展[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(1): 17-21, 74.
FENG Y, QU W, LIU M H, et al. Research Review on Toughening Modification of Melamine Formaldehyde Resin [J]. Chinese Journal of Wood Science andTechnology, 2022, 36(1): 17-21, 74.

（本文编校　张 鹏、向 琴）

（上接第 51 页）

性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
[7] Rehman M A U, Munawar M A, Schubert D W, et al. Electrophoretic deposition of chitosan/gelatin/bioactive glass composite coatings on 316L stainless steel: a design of experiment study[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 358: 976-986.
[8] Ghadimi A, Metselaar I H. The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 51: 1-9.
[9] Kumar P, Bohidar H B. Aqueous dispersion stability of multi-carbon nanoparticles in anionic, cationic, neutral, bile salt and pulmonary surfactant solutions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 361(1/2/3): 13-24.
[10] ZHANG S W, ZHANG D D, LI Z, et al. Polydopamine functional reduced graphene oxide for enhanced mechanical and electrical properties of waterborne polyurethane nanocomposites[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2018, 15(6): 1333-1341.
[11] XIA Y Q, HE Y, CHEN C L, et al. Co-modification of polydopamine and KH560 on g-C3N4 nanosheets for enhancing the corrosion protection property of waterborne epoxy coating[J]. Reactive and Functional Polymers, 2020, DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.
[12] YUAN Z, TAO B L, HE Y, et al. Biocompatible MoS_2/PDA-RGD coating on titanium implant with antibacterial property via intrinsic ROS-independent oxidative stress and NIR irradiation[J]. Biomaterials, 2019, DOI：10.1016/j.biomaterials.
[13] 朱建康, 王树立, 饶永超, 等. 多巴胺改性氧化石墨烯-TiO_2纳米复合材料在水性环树脂中物理性能和腐蚀动力学研究[J]. 涂料工业, 2019, 49(8): 1-9, 16.
ZHU J K, WANG S L, RAO Y C, et al. Study on physical properties and corrosion kinetics of dopamine modified GO-TiO_2 nanocomposites in waterborne epoxy resin[J]. Paint & Coatings Industry, 2019, 49(8): 1-9, 16.
[14] 蔡世逸, 林海鹏, 吴崇福, 等. 光聚合多巴胺仿生耐腐蚀抗老化涂层材料[J]. 广东化工, 2016, 43(16): 8-9, 18.
CAI S Y, LIN H P, WU C F, et al. The photo-initiation bionic corrosion-resistant anti-aging coating-material[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(16): 8-9, 18.
[15] 付川. 负载金纳米粒子聚多巴胺涂层修饰的氧化石墨烯复合材料在骨缺损修复中的应用[D]. 吉林：吉林大学, 2021.
[16] 廖木荣. 聚多巴胺粘附木材超疏水表面仿生构建及性能表征[D]. 南宁：广西大学, 2019.
[17] 易泽德, 廖木荣, 康帆, 等. 甲基硅酸钠刻蚀聚多巴胺涂层构建超疏水木材及表征[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 3027-3035.
YI Z D, LIAO M R, KANG F, et al. Fabrication and characterization of superhydrophobic wood by etching polydopamine coating with sodium methylsilicate. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 3027-3035.

（本文编校　孟凡丹）