

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.06.008

低 VOC 含量 PET/ADH-AG 复合材料制备及性能

田桂桂^{1,2}, 王宏涛^{1,2}, 皇甫佳伟³, 王龙恩³, 张雅琪³, 于翔³

(1. 黄河水利职业技术学院, 河南开封 475004; 2. 开封市水生态修复工程技术研究中心, 河南开封 475004;

3. 河南工程学院材料工程学院, 郑州 450007)

摘要: 为降低汽车内饰材料中的挥发性有机物 (VOC) 含量, 采用吸附和机械共混法制备聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)/己二酸二酰肼-气凝胶 (ADH-AG) 复合材料, 并通过差示扫描量热仪、万能材料试验机和高效液相色谱仪等对复合材料的热性能、力学性能和 VOC 含量等进行测试与分析。研究发现, 随 ADH-AG 含量增加, PET/ADH-AG 复合材料的熔融温度和熔融焓值逐渐降低, 结晶温度呈现先提高后降低的趋势。ADH-AG 的加入能够提高复合材料的力学性能, 降低复合材料的 VOC 含量。当 ADH-AG 含量为 PET 的 0.75% 时, PET/ADH-AG 复合材料的拉伸强度达到最大值 81.13 MPa, VOC 含量最低, 其中甲醛、乙醛和丙酮去除率分别达 88.2%, 92.1% 和 85.9%。

关键词: 聚对苯二甲酸乙二醇酯; 气凝胶; 己二酸二酰肼; 复合材料; 挥发性有机物

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)06-0042-06

Preparation and Properties of PET/ADH-AG Composites with Low VOC Content

Tian Guigui^{1,2}, Wang Hongtao^{1,2}, Huangfu Jiawei³, Wang Longen³, Zhang Yaqi³, Yu Xiang³

(1. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China;

2. Kaifeng Water Ecological Restoration Engineering Technology Research Center, Kaifeng 475004, China;

3. College of Materials Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In order to reduce the content of volatile organic compounds (VOC) in automotive interior materials, polyethylene terephthalate (PET)/dionyl hydrazine adipate-aerogel (ADH-AG) composites were prepared by adsorption and mechanical blending methods. The thermal properties, mechanical properties and VOC content of composites were studied and analyzed by differential scanning calorimetry, universal material testing machine, high-performance liquid chromatography and so on. The results show that with the increase of ADH-AG content, the melting temperature and melting enthalpy of PET/ADH-AG composites gradually decrease, and crystallization temperature shows a trend of firstly increasing and then decreasing. The addition of ADH-AG can improve the mechanical properties and reduce the VOC content of composites. When 0.75% of ADH-AG is incorporated, the composites reach the maximum tensile strength value of 81.13 MPa and the minimum VOC content, the removal rates of formaldehyde, acetaldehyde and acetone are as high as 88.2%, 92.1% and 85.9%, respectively.

Keywords: polyethylene terephthalate; aerogel; dionyl hydrazine adipate; composite; volatile organic compounds

聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 是五大工程塑料之一^[1], 其具有良好的耐热性、绝缘性能、电学性能和力学性能, 被广泛应用于汽车内饰中^[2]。由于 PET 分子中带有酯键, 高温下特别容易发生多种降解反应^[3], 易生成醛酮类 (甲醛、乙醛和丙酮) 等挥发性有机物 (VOC) 气体, 严重威胁乘客的健康安全^[4]。

2017 年, 国家将《乘用车内空气质量评价指南》转化为强制标准, 因此对于低 VOC 含量的 PET 材料的研究显得至关重要。

目前, 物理吸附和化学反应是去除 VOC 气体的主要方法。物理吸附具有方便快捷, 适用范围广, 廉价且效率高等优势, 被广泛应用到气体净化领域。

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (18B570007)

通信作者: 于翔, 博士, 教授, 研究方向为功能高分子复合材料、3D 打印材料和光催化材料的开发、制备与表征

收稿日期: 2021-03-31

引用格式: 田桂桂, 王宏涛, 皇甫佳伟, 等. 低 VOC 含量 PET/ADH-AG 复合材料制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(6): 42-47.

Tian Guigui, Wang Hongtao, Huangfu Jiawei, et al. Preparation and properties of PET/ADH-AG composites with low VOC content[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6): 42-47.

气凝胶 (AG) 是一种比表面积非常大的多孔吸附材料,与其它常规的多孔吸附材料相比, AG 对有机污染物的吸附能力更高,并拥有更好的选择性^[5]。王俊婷等^[6]制备了氨基化壳聚糖/AG,其对甲醛的饱和吸附量高达 0.398 mg/g,大于相同用量的活性炭材料。李传宝等^[7]在研究还原氧化石墨烯/MnO₂ AG 对甲醛去除能力时发现,其对低浓度的甲醛有较好的去除效果,去除率可达 62.5%。刘志明等^[8]采用酸处理和液滴悬浮凝胶法制得具有大比表面积的壳聚糖-纤维素 AG 球,在 1 h 内对甲醛的吸附去除率高达 75.4%。因此, AG 对 VOC 气体具有有效的选择吸附性。

化学反应是利用化学物质和醛酮类 VOC 气体发生反应,进而去除 VOC 气体。能和醛酮类 VOC 气体发生反应的物质主要包括酚类、酚肼类、酰胺类、有机胺类和一些天然产物^[9-13]。己二酸二酰肼 (ADH) 化学性质活泼,其分子链上有两个氨基,可以和醛酮类羰基中含有孤对电子的氮原子发生缩合反应,生成相对稳定的腙键^[14],达到去除醛酮类 VOC 气体的目的。侯兴爱等^[14]通过在胶粘剂中加入不同的甲醛去除剂,发现 ADH 具有最优异的除醛效果。

但上述方法均为去除空气中或胶粘剂的 VOC 气体,难以直接将汽车内饰 PET 纤维中的 VOC 气体去除,同时夏季汽车内温度升高使得 PET 易降解产生 VOC 气体。若仅对 VOC 气体进行物理吸附其稳定性差,在温度较高时容易导致 VOC 气体自动解析和再释放^[6]。因此,笔者采用物理吸附和化学反应相结合的方法来去除 PET 中的 VOC 气体,首先对 AG 进行 ADH 负载处理,而后与 PET 进行熔融共混制备 PET/AG-AGH 复合材料。研究方法对低 VOC 含量 PET 材料的制备具有一定的借鉴意义。

1 实验部分

1.1 主要原料

PET: FR530, 美国杜邦有限公司;

AG: 硅系, 粒度 ≤ 1000 目 (13 μm), 河北贺高保温材料有限公司;

ADH: 分析纯, 山东豪耀新材料有限公司;

无水乙醇: 分析纯, 山东茂军化工科技有限公司;

2,4-二硝基苯肼 (DNPH): 分析纯, 天津市大茂化学试剂厂;

乙腈: 色谱纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司;

磷酸: 分析纯, 洛阳市化学试剂厂。

1.2 主要设备与仪器

微型双锥双螺杆挤出机: SJZS-10BA-2 型, 武汉瑞鸣实验仪器制造有限公司;

微型注射机: SZS-20 型, 武汉瑞鸣塑料机械公司;

实验塑料拉丝机: SLS-160 型, 武汉瑞鸣塑料机械公司;

丝管卷取机: SZQS-280 型, 武汉瑞鸣实验仪器制造有限公司;

差示扫描量热 (DSC) 仪: Q20 型, 美国 TA 公司;

X 射线衍射 (XRD) 仪: D8 ADVANCE 型, 德国 Bruker 公司;

电子万能材料试验机: 5982 型, 美国英斯特朗公司;

真空管式高温炉: BTF-1200C 型, 安徽贝意克设备有限公司;

高效液相色谱仪: 1200 Infinity 系列, 安捷伦科技有限公司。

1.3 试样制备

(1) ADH-AG 的制备。

首先将 ADH 溶解在无水乙醇溶液中, 然后将一定量的亲水性 AG 缓慢地加入到溶液中, 并用玻璃棒进行连续搅拌, 直至溶液完全被 AG 吸附, 然后将其放入真空干燥箱, 在 110℃ 干燥 12 h 即制得 ADH-AG。

(2) PET/ADH-AG 复合材料的制备。

以 PET 为基体、ADH-AG 为添加物, 利用双螺杆挤出机制备不同 ADH-AG 含量的 PET/ADH-AG 复合材料, 其中 ADH-AG 的用量分别占 PET 质量的 0.00%, 0.25%, 0.50%, 0.75% 和 1.00%。复合材料样品分为微型注射机制成的哑铃型样品与塑料拉丝机制成的细丝样品 (在后续测试中, 除 VOC 含量的测试外, 其余测试均为哑铃型样品), 双螺杆挤出机、微型注射机和塑料拉丝机的工艺参数见表 1、表 2 和表 3。

表 1 双螺杆挤出机工艺参数

项目	参数	项目	参数
主机转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	4.8	三区温度 / $^{\circ}\text{C}$	270
一区温度 / $^{\circ}\text{C}$	250	四区温度 / $^{\circ}\text{C}$	265
二区温度 / $^{\circ}\text{C}$	265	机头温度 / $^{\circ}\text{C}$	255

表2 微型注塑机工艺参数

项目	参数	项目	参数
注射区温度/℃	278	注塑时间/s	5
模板区温度/℃	85	保压时间/s	5

表3 塑料拉丝机工艺参数

项目	参数	项目	参数
一区温度/℃	80	1,2转辊转速/(r·min ⁻¹)	27.0
二区温度/℃	90	3转辊转速/(r·min ⁻¹)	27.5
三区温度/℃	95	4,5转辊转速/(r·min ⁻¹)	26.9
四区温度/℃	95		

1.4 性能测试与结构表征

热性能测试:称取2~5 mg样品放入坩埚中制样,在氮气条件下,以10℃/min升降温速率,在40~280℃进行两次升降温循环。

拉伸性能按GB/T 1040-1992测试,哑铃型样品,拉伸速率为20 mm/min。

晶体结构测试:采用XRD仪进行测试,扫描范围为7°~60°,电流40 mA,电压40 kV。

VOC含量测试:测试方法参考文献[15-16],将20 g细丝样品放置在管式炉中,在120℃下加热2 h,持续通入氮气并将排出的气体通入200 mL 10 mg/L的DNPH的乙腈溶液中。复合材料中的甲醛、乙醛和丙酮三种VOC气体会与DNPH反应生成相应的苯腙,如图1所示,然后通过高效液相色谱对DNPH的乙腈溶液中的甲醛苯腙、乙醛苯腙和丙酮苯腙进行定性和定量分析。其中液相色谱条件为:检测波长350 nm;流速0.5 mL/min;进样量20 μL;流动相中乙腈:二次蒸馏水=60:40;内标物为丁醛苯腙。

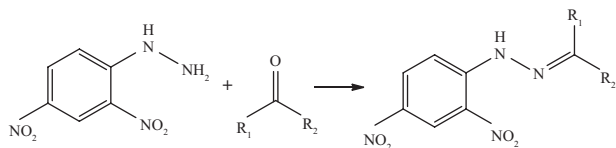


图1 醛酮类物质与DNPH反应通式

2 结果与讨论

2.1 PET/ADH-AG复合材料的热性能

采用DSC仪对材料进行热性能测试,图2和图3分别为PET/ADH-AG复合材料的DSC第一次升温 and 降温曲线。根据图2和图3可以得到PET/ADH-AG复合材料的熔融温度(T_m)和结晶温度(T_c),如图4所示。从图2和图4可以看出,随着ADH-AG含量增加,PET/ADH-AG复合材料的 T_m 逐渐降低,从256.83℃降至254.96℃。这可能是由于ADH-AG的加入对PET分子链的运动起到阻

碍作用,不利于分子链规整地排列到晶格中,从而造成PET晶体结构不完善,因此 T_m 呈现逐渐下降的趋势。从图3和图4可知,随着ADH-AG含量增加,PET/ADH-AG复合材料的 T_c 呈现先提高后降低的趋势,并在ADH-AG含量为0.75%时达到最大值,222.50℃,在复合材料的结晶过程中,ADH-AG充当成核剂的作用,因此ADH-AG的加入促使PET分子在更高的温度下进行结晶,但当ADH-AG含量过高(>0.75%)时,会导致团聚现象发生,则使得有效成核位点减少,即导致 T_c 进一步下降。

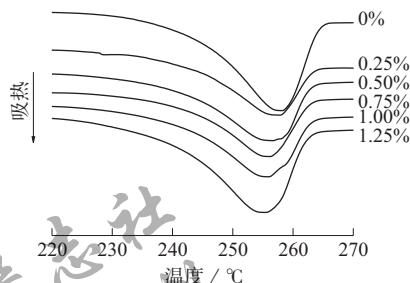


图2 不同ADH-AG含量复合材料的DSC第一次升温曲线

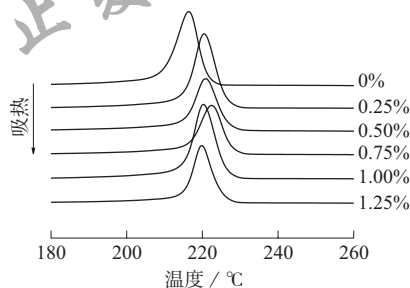


图3 不同ADH-AG含量复合材料的DSC第一次降温曲线

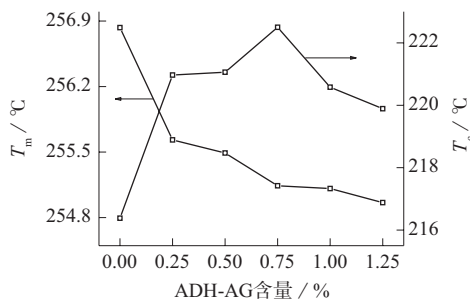
图4 不同ADH-AG含量复合材料的 T_m 和 T_c

图5为PET/ADH-AG复合材料的第二次DSC升温曲线,表4为第二次升温过程中的相关数据。由图5和表4可以发现,在PET/ADH-AG复合材料第二次升温过程中,随ADH-AG含量增加,复合材料的 T_m 、熔融焓值呈现出逐渐降低的趋势。 T_m 的变化规律与第一次升温过程的变化趋势一致,但与图2相比, T_m 整体下降了2~3℃,这是由于复

合材料两次加工的热历史不同导致的。同时熔融焓值的降低是由于在一定的结晶时间内 (从 280℃ 以 10℃ / min 的速率降温至 40℃), ADH-AG 阻碍 PET 分子链的运动, PET 不能充分结晶导致的。

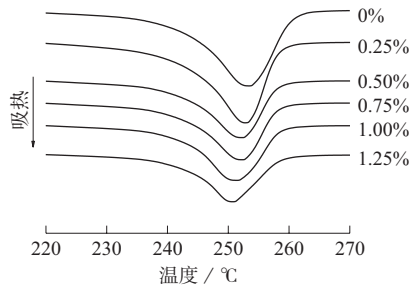


图 5 不同 ADH-AG 含量复合材料的 DSC 第二次升温曲线

表 4 PET/ADH-AG 复合材料 DSC 第二次升温过程中的相关数据

ADH-AG 添加量 / %	熔点 / °C	熔融焓 / (J · g ⁻¹)
0	253.24	49.04
0.25	252.28	48.95
0.50	252.19	48.92
0.75	252.17	48.89
1.00	252.15	48.72
1.25	252.13	48.57

2.2 PET/ADH-AG 复合材料的力学性能

图 6 为不同 ADH-AG 含量 PET/ADH-AG 复合材料的应力 - 应变曲线。从图 6 可以发现, 复合材料均表现出应力大而应变小的特点。从图 6 可以得到不同 ADH-AG 含量 PET/ADH-AG 复合材料的断裂伸长率和拉伸强度, 见图 7。从图 7 可看出, 随着 ADH-AG 含量增加, PET/ADH-AG 复合材

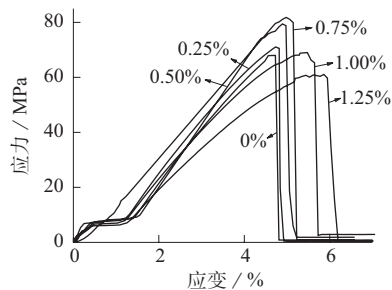


图 6 不同 ADH-AG 含量复合材料的应力 - 应变曲线

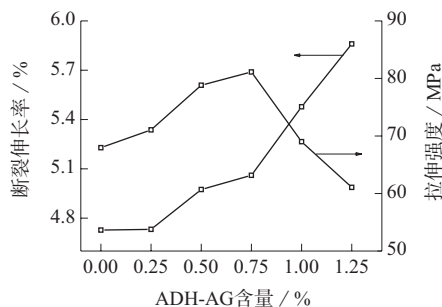


图 7 不同 ADH-AG 含量复合材料的断裂伸长率和拉伸强度

料的断裂伸长率呈现逐渐增加的趋势, 但整体变化趋势不大, 仅从 ADH-AG 含量为 0% 时的 4.73% 增加至 ADH-AG 含量为 1.25% 时的 5.86%; 拉伸强度呈现先增后减的趋势, 并在 ADH-AG 含量为 0.75% 时达到极大值 81.13 MPa。这主要是由于 ADH-AG 的加入能够促进 PET 分子链的相对滑移, 即 ADH-AG 在 PET 分子链链间充当“塑化剂”的作用, 在拉伸过程中 PET/ADH-AG 复合材料的断裂伸长率随 ADH-AG 含量的增加而逐渐增大。同时当 ADH-AG 含量较低 ($\leq 0.75\%$) 时, 其能均匀分散在 PET/ADH-AG 复合材料中, 在拉伸过程中, 复合材料受到的力能均匀传递到整个材料中从而提高复合材料的拉伸强度。当 ADH-AG 含量较高 ($> 0.75\%$) 时, ADH-AG 在复合材料中的分散性变差, 存在较大的团聚体, 使复合材料中存在部分缺陷, 在拉伸过程中会发生应力集中现象, 而使得复合材料断裂强度下降。

2.3 PET/ADH-AG 复合材料的晶体结构

图 8 为不同 ADH-AG 含量 PET/ADH-AG 复合材料的 XRD 曲线。图中①~⑤号峰的 2θ 角度分别为 16.4° , 17.84° , 21.78° , 22.74° 和 25.72° , 这些峰均属于 PET 晶体的特征衍射峰, 对应的晶面指数分别为 (011), (010), (111), (110) 和 (100)^[17]。与纯 PET 特征衍射峰的强度相比, ADH-AG 加入后, PET/ADH-AG 复合材料特征衍射峰的强度更高, 这说明 ADH-AG 的加入提高了 PET 的结晶度。

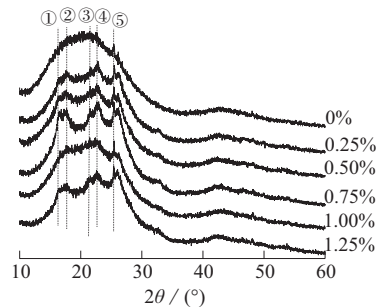


图 8 不同 ADH-AG 含量复合材料的 XRD 曲线

2.4 PET/ADH-AG 复合材料的 VOC 含量

图 9 为 PET 材料的液相色谱图, 通过与纯物质对比可知, 图中①至⑥号峰, 分别为磷酸、DNPH、甲醛苯胺、乙醛苯胺、丙酮苯胺和丁醛苯胺的峰。因此对样品③至⑥号峰面积积分, 并通过式 (1) 可计算得材料中的 VOC 含量。同样方法对 PET/ADH-AG 复合材料的谱图进行处理, 计算数据如表 5 所示。

$$C_x = 10^6 \times C_T V M_x X / m_{\text{样}} \quad (1)$$

式中: C_x —— x (甲醛、乙醛、丙酮)的含量, $\mu\text{g/g}$;

C_T ——内标物丁醛苯胺浓度, $3.17 \times 10^{-9} \text{ mol/mL}$;

V ——收集液的体积, 200 mL ;

M_x —— x 的相对分子质量;

X —— x 苯胺与丁醛苯胺的峰面积之比;

m ——待测样品质量, 20 g 。

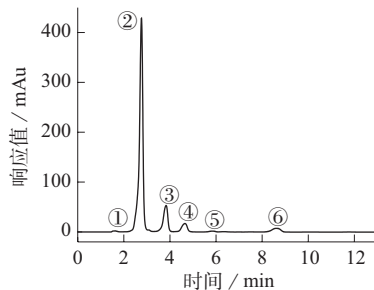


图9 PET的液相色谱图

表5 PET/ADH-AG复合材料的VOC含量

ADH-AG 添加 量/%	甲醛		乙醛		丙酮	
	峰面积 之比	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	峰面积 之比	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	峰面积 之比	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)
0	2.3245	2.211	1.0287	1.435	0.3361	0.618
0.25	1.4372	1.367	0.6428	0.897	0.1942	0.349
0.50	0.6379	0.607	0.2476	0.345	0.1035	0.190
0.75	0.2746	0.261	0.0813	0.113	0.0475	0.087
1.00	0.3864	0.367	0.1054	0.147	0.0697	0.128
1.25	0.4291	0.408	0.1293	0.180	0.0737	0.136

从表5可看出,随ADH-AG含量增加,PET/ADH-AG复合材料中甲醛、乙醛和丙酮的含量均呈现先减少后增加的趋势。且在ADH-AG含量为0.75%时,复合材料的VOC含量最低,其甲醛、乙醛和丙酮的去除率分别达到88.2%,92.1%和85.9%,这表明ADH-AG的加入能够有效去除PET材料中的VOC,在加热过程中,PET释放出的VOC气体能够快速被AG吸附,随后被ADH反应。当ADH-AG含量高于0.75%时,复合材料的VOC含量存在略微增加。这是因为ADH-AG添加量过大,在材料中存在团聚,导致其VOC的吸附位点下降。

3 结论

(1) 随着ADH-AG含量增加,PET/ADH-AG复合材料的 T_m 和熔融焓值呈现逐渐降低的趋势, T_c 呈现先提高后降低的趋势,并在ADH-AG含量为0.75%时, T_c 达到最大值222.50℃。

(2) 随着ADH-AG含量增加,PET/ADH-AG复合材料的断裂伸长率呈现逐渐增加的趋势,但

整体变化趋势不大;拉伸强度呈现先增后减的趋势,并在ADH-AG含量为0.75%时达到极大值81.13 MPa。

(3) ADH-AG的加入能够有效去除PET材料中的VOC,且在ADH-AG含量为0.75%时,复合材料中的甲醛、乙醛和丙酮的去除率最高,分别为88.2%,92.1%和85.9%。

参考文献

- [1] 邱明敏.回收聚对苯二甲酸乙二醇酯的改性研究[D].扬州:扬州大学,2010.
Qiu Mingmin. Study on modification of recycled polyethylene terephthalate[D]. Yangzhou:Yangzhou University, 2010.
- [2] 赵均,王娟. PET工程塑料及其在轿车上的应用[J]. 工程塑料应用,2001,29(9):24-27.
Zhao Jun, Wang Juan. PET engineering plastics and their application in the car industry[J]. Engineering Plastics Application, 2001, 29(9):24-27.
- [3] 王蒙,王明召. PET塑料的化学降解[J]. 中国教育技术装备,2011,11(9):32-33.
Wang Meng, Wang Mingzhao. Chemical degradation of PET plastic[J]. China Educational Technology & Equipment, 2011, 11(9):32-33.
- [4] 朴丽贞. 甲醛对大鼠胚胎心脏的毒性研究[D]. 延吉:延边大学,2014.
Piao Lizhen. Effects of formaldehyde on embryonic heart[D]. Yanji:Yanbian University, 2014.
- [5] 王汉道,邹训重,黎彧,等. 甲醛去除方法的研究进展[J]. 广东微量元素科学,2014,21(7):41-44.
Wang Handao, Zou Xunzhong, Li Yu, et al. The research progress of formaldehyde removal methods[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2014, 21(7):41-44.
- [6] 王俊婷,钟志梅. 氨基化壳聚糖/二氧化硅气凝胶对甲醛的吸附研究[J]. 化工管理,2018,3(16):40-44.
Wang Junting, Zhong Zhimei. Study on adsorption of formaldehyde by aminated chitosan / silica aerogels[J]. Chemical Enterprise Management, 2018, 3(16):40-44.
- [7] 李传宝,刘海辉,苗锦雷,等. 还原氧化石墨烯/MnO₂气凝胶对甲醛的去除[J]. 复合材料学报,2016,33(12):2831-2839.
Li Chuanbao, Liu Haihui, Miao Jinlei, et al. In removal of formaldehyde with reduced graphene oxide / MnO₂ aerogel[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(12):2831-2839.
- [8] 刘志明,吴鹏. 壳聚糖/纤维素气凝胶球的制备及其甲醛吸附性能[J]. 林产化学与工业,2017,37(1):27-35.
Liu Zhiming, Wu Peng. Preparation of chitosan / cellulose aerogel beads and its formaldehyde gas adsorption performance[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2017, 37(1):27-35.
- [9] 杨新革,王计嵘,付振林,等. 甲醛捕捉剂效率的研究[J]. 临沂大

- 学学报,2014,36(6):51-53.
- Yang Xinge, Wang Jirong, Fu Zhenlin, et al. Study on formaldehyde-eliminating efficiency of formaldehyde scavenger[J]. Journal of Linyi University,2014,36(6):51-53.
- [10] 于佳琼. 单宁类植物材料超细粉体的性能及应用研究[D]. 南京: 南京林业大学,2012.
- Yu Jiaqiong. A study on the performance and application of ultrafine powder of plants materials containing tannins[D]. Nanjing:Nanjing Forestry University,2012.
- [11] 郭如振,高振华,张荔,等. 生物质甲醛捕捉剂的应用与进展[J]. 粘接,2010,31(4):64-69.
- Guo Ruzhen, Gao Zhenhua, Zhang Li, et al. Application and progress of biomass formaldehyde scavengers[J]. Adhesion,2010,31(4):64-69.
- [12] 刘亚兰,吴蕴忱,张志军,等. 甲醛捕捉剂的制备与应用效果评价[J]. 林业科技,2017,42(2):54-55.
- Liu Yalan, Wu Yunchen, Zhang Zhijun, et al. Preparation and application effect evaluation of formaldehyde trapping agent[J]. Forestry Science & Technology,2017,42(2):54-55.
- [13] 宋飞,雷洪,杜官本,等. 树脂型甲醛捕捉剂对脲醛树脂性能的影响[J]. 林业科技开发,2012,26(3):87-89.
- Song Fei, Lei Hong, Du Guanben, et al. Effects of resin-based formaldehyde scavenger on performance of urea-formaldehyde[J]. Journal of Forestry Engineering,2012,26(3):87-89.
- [14] 侯兴爱,杨旭,孙丰文,等. 添加型甲醛捕捉剂的功效研究[J]. 中国胶黏剂,2018,27(6):1-5.
- Hou Xingai, Yang Xu, Sun Fengwen, et al. Study on efficacy of addition type formaldehyde scavenger[J]. China Adhesives,2018,27(6):1-5.
- [15] 杨秀琴,严亚如,张效琳,等. 低 VOCs 含量的 PET/TiO₂@Ag 共混体系的研究[J]. 中国塑料,2020,34(5):32-37.
- Yang Xiuqin, Yan Yaru, Zhang Xiaolin, et al. Study on PET/TiO₂@Ag blends with low VOCs content[J]. China Plastics,2020,34(5):32-37.
- [16] 于翔,李如洋,翟静雯,等. 低 VOC 含量的 PET/PAAS/ 活性炭复合材料的制备及性能研究[J]. 中国塑料,2020,34(6):80-86.
- Yu Xiang, Li Ruyang, Zhai Jingwen, et al. Preparation and properties of PET/PAAS/ activated carbon composites with low VOC content[J]. China Plastics,2020,34(6):80-86.
- [17] 冯凯. PET 结晶及其增强复合材料的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学,2011.
- Feng Kai. Studies on the crystallization behavior of PET and properties of PET/GF composites[D]. Wuhan:Hubei University of Technology,2011.
-
- (上接第 30 页)
- [8] 刘凌霄. PLA 基 3D 木塑复合材料的制备及性能研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学,2019.
- Liu Lingxiao. Preparation and properties of PLA based 3D printing wood plastic composites[D]. Jinan:Qilu University of Technology,2019.
- [9] 曹永建,王颂,张春花,等. 木粉/聚乳酸 3D 打印线材的制备及性能分析[J]. 林业与环境科学,2020,36(3):1-9.
- Cao Yongjian, Wang Song, Zhang Chunhua, et al. Manufacture and performance analysis of wood flour-filled polylactic acid composite filament for 3D printing[J]. Forestry and Environmental Science,2020,36(3):1-9.
- [10] 杨兆哲. 杨木粉/PLA 复合材料的研究及其在 3D 打印中的应用[D]. 哈尔滨: 东北林业大学,2018.
- Yang Zhaozhe. Study of poplar powder/PLA composites and its application in 3D printing[D]. Harbin:Northeast Forestry University,2018.
- [11] Taib R M, Ramarad S, Ishak Z A M, et al. Properties of kenaf fiber/poly(lactic acid) biocomposites plasticized with poly(ethylene glycol)[J]. Polymer Composites,2010,31(7):1 213-1 222.
- [12] 吴盾,李会丽,陆颖,等. 不同相对分子质量聚乙二醇增塑聚乳酸共混物的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程,2017,33(5):164-169,177.
- Wu Dun, Li Huili, Lu Ying, et al. Preparation and properties of poly(lactic acid) plasticized by poly(ethylene glycol) with different molecular weight[J]. Polymer Materials Science & Engineering,2017,33(5):164-169,177.
- [13] Zhang B, Bian X, Xiang S, et al. Synthesis of PLLA-based block copolymers for improving melt strength and toughness of PLLA by in situ reactive blending[J]. Polymer Degradation and Stability,2017,136:58-70.
- [14] 王莹,梁硕,孙百威,等. 聚乳酸/木粉 3D 打印复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技,2017,45(10):80-85.
- Wang Ying, Liang Shuo, Sun Baiwei, et al. Study on preparation and properties of 3D printed PLA/wood flour composite[J]. Plastic Science and Technology,2017,45(10):80-85.
- [15] Hassouna F, Raquez J M, Addiego F, et al. New approach on the development of plasticized polylactide(PLA):Grafting of poly(ethyleneglycol)(PEG) via reactive extrusion[J]. European Polymer Journal,2011,47(11):2 134-2 144.