

疏水型植物纤维活性发泡缓冲包装材料的制备

李纪磊¹, 何忠², 宋万龙¹, 孙斌¹, 赵宇², 张蔷薇¹, 马晓军^{1*}

(1. 天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457;

2. 江苏航宇重型包装有限公司, 江苏 张家港 215600)

摘要: **目的** 提高植物纤维发泡材料的疏水性, 并探究疏水改性对其各项性能的影响。**方法** 以植物纤维和聚乙烯醇 (PVA) 为原料, 利用聚醚 (F127) 活性发泡剂制备植物纤维发泡材料, 并用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) / 正己烷混合溶液对其浸渍来进行疏水改性。通过扫描电镜、红外光谱、热重分析、接触角、力学性能、隔热性能、清洁 (吸油) 等测试研究疏水改性对植物纤维发泡材料性能的影响。**结果** 疏水改性后植物纤维发泡材料接触角高达 154.2°, 呈现超疏水性。与改性前相比, 其压缩强度 (80% 应变) 从 187.43 kPa 提高到 223.04 kPa, 且压缩回弹性 (50% 应变) 无明显差别, 高湿环境下疏水植物纤维发泡材料稳定性有所提升。其静态和动态缓冲系数分别为 0.05 和 18.2, 对其加热 60 min 后表面温度仅上升了 3.4 °C, 且对二甲苯的吸收性良好, 吸收量可达 24.69 g。**结论** 疏水改性后的植物纤维发泡材料具有良好的缓冲、隔热和清洁功能。

关键词: 植物纤维; 疏水改性; 活性发泡; 聚二甲基硅氧烷 (PDMS) / 正己烷

中图分类号: TB484

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)17-0012-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.17.002

Preparation of Hydrophobic Plant Fiber Active Foam Buffer Packaging Materials

LI Jilei¹, HE Zhong², SONG Wanlong¹, SUN Bin¹, ZHAO Yu², ZHANG Qiangwei¹, MA Xiaojun^{1*}

(1. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. Jiangsu Hangyu Heavy-duty Packaging Co., Ltd., Jiangsu Zhangjiagang 215600, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the hydrophobicity of plant fiber foam materials and explore the effect of hydrophobic modification on their various properties. With plant fiber and PVA as raw materials, F127 active foaming agent was used to prepare a mixed plant fiber foaming material. It was then impregnated with PDMS/n-hexane mixed solution for hydrophobic modification. The effect of hydrophobic modification on the properties of plant fiber foam materials was studied through scanning electron microscopy, infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis, contact angle, mechanical properties, thermal insulation performance, cleanliness (Oil absorption) and other tests. The angle of the hydrophobic modified plant fiber foam material reached 154.2°, exhibiting superhydrophobicity. Compared with that before modification, its compressive strength (80% strain) increased from 187.43 kPa to 223.04 kPa, and there was no significant difference in compressive resilience (50% strain). The stability of hydrophobic plant fiber foam materials was improved in high humidity environments. Its static and dynamic buffering coefficients were 0.05 and 18.2, respectively. After heating for 60 minutes, the surface temperature only increased by 3.4 °C, and its good absorption of xylene could

收稿日期: 2024-06-06

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目 (23JCZDJC00620); 海南省自然科学基金 (324MS086); 张家港市科技计划 (ZKYY2310); 天津市大学生创新创业训练项目 (202410057012)

*通信作者

reach 24.69 g. Hydrophobically modified plant fiber foam materials have good buffering, thermal insulation, and cleaning functions.

KEY WORDS: plant fibers; hydrophobic modification; active foam; polydimethylsiloxane (PDMS)/n-hexane

随着电商行业的快速发展,为保护产品在运输过程中不受损伤,缓冲泡沫材料如聚乙烯发泡棉(EPE)、发泡聚苯乙烯(EPS)、弹性聚氨酯(EPU)等在实际应用中受到了广泛关注。随着“双碳”目标的提出,以植物纤维为基础的可生物降解聚合物生产的泡沫材料在包装市场上逐渐取代了传统的石油基泡沫材料^[1]。目前,植物纤维泡沫材料主要是利用机械发泡方法使空气卷入植物纤维混合溶液中,并产生强大的气泡网络结构,再经过高温烘干将均匀的湿泡沫保留在植物纤维间隙内,从而使材料具有多孔、轻质、低密度等特点^[2],在植物纤维发泡材料具有可降解、可再生、可循环利用和环境友好等优点的同时兼具良好的力学、吸音、隔热等性能^[3]。如赵月圆等^[4]以竹纤维和淀粉为主要原料,制备了缓冲系数为 6.04,单位体积总吸收能量为 1.52 MJ/m³的竹纤维/淀粉发泡复合材料,其静态缓冲性能与 EPS 接近,可用于产品的物流防护。因此,植物纤维泡沫材料在作为大型电器、智能产品的包装缓冲衬垫等领域具有广阔的应用前景^[5]。

植物纤维间疏松多孔的三维结构与自身很强的吸湿性导致其所制的泡沫材料具有极强的吸水性,产品的力学性能大大降低^[6],所以疏水型植物纤维成为一种需求。目前疏水改性方法有很多,如化学气相沉积法(CVD)^[7],通常使用硅烷化合物在植物纤维表面发生水解反应,使得植物纤维表面呈现出疏水性质,但此方法对生产条件要求高,且成本高,并对环境有一定负面影响。酯化法是将含羧基(-COOH)的化合物与醇基(-OH)的植物纤维反应,产生疏水性酯键^[8]来提高材料的疏水性能,但此方法的疏水效果较差。浸渍法因反应时间短、改性效果好且适用于工业化批量生产,已被广泛应用。如 Cao 等^[9]采用吸附和浸渍的方法,将滤纸依次浸入 Cu(NO₃)₂ 和 NaOH 溶液中,然后再用硬脂酸修饰,成功制备了具有超疏水性和超亲油性的新型滤纸(FP)。

本文以阔叶木浆纤维为原料,采用 F127 活性发泡剂制备出植物纤维发泡材料后,再利用浸渍法将其浸泡在 PDMS/正己烷混合溶液中对其进行疏水改性,制备了疏水型植物纤维活性发泡缓冲包装材料。经研究证明疏水改性后的植物纤维发泡材料呈现出超疏水性,最大压缩强度得到提升,在高湿环境下具有更稳定的力学和缓冲性能,且表现出良好的隔热和清洁功能,在绿色包装材料领域具有一定的应用潜力。

1 实验

1.1 材料

主要材料:聚乙烯醇 PVA1788 型,罗恩试剂厂;聚酯 F127,山东科源生化有限公司;丙三醇,天津科威公司;阔叶木浆,大连扬润贸易有限公司;氢氧化钠,昆山金城试剂有限公司;Sylgard 184 A 与 Sylgard 184 B,进口道康宁 184;正己烷,天津市大茂化学试剂厂;石油醚,天津市凤船化学试剂有限公司;乙酸乙酯,天津科威公司;二甲苯,天津科威公司;丙酮,天津渤化化学试剂有限公司。

1.2 方法

称取聚乙烯醇 PVA (7.5 g),随后向里面加入 H₂O (120 g),将其进行溶解,温度为 90 °C,转速为 500 r/min,聚乙烯醇 PVA 溶解时间为 15 min。再称量聚酯 F127 (2.5 g),随后向里面加入 H₂O (50 g),温度为 40 °C、转速为 500 r/min,将其进行溶解,聚酯 F127 溶解时间为 15 min。称取 5%的阔叶木湿浆,再加入 1.5 mL 丙三醇,将制得的上述溶液全部倒入铁缸中,充分混合,进行机械搅拌发泡,10 min 后将发泡后的溶液倒入模具,滤水 12 h 后烘制 12 h 后取出,即制得植物纤维发泡材料。将聚二甲基硅氧烷弹性体 Sylgard 184 B 与 Sylgard 184 A 按照质量比 1:10 进行称取,称好的溶液放入同一试管,在常温下,转速为 300 r/min,机械搅拌 30 min;待溶液充分混合均匀后,按照质量分数为 2%向里加入正己烷溶液,密封后,将其机械搅拌 30 min,转速为 700 r/min;待溶液充分混合后,将制得的植物纤维发泡材料放入溶液中浸泡约 1 min,后烘干 4 h,即可完成疏水改性。

1.3 测试与表征

1.3.1 形貌分析

通过扫描电子显微镜(SEM)在 2 kV 的电压和 100、300 倍数下对疏水改性前后植物纤维发泡材料的纤维形貌进行分析。在开始测试前,对所有样品的外层进行喷金处理。

1.3.2 傅里叶红外光谱分析

采用 Nicolet is5 傅里叶变换红外光谱(FTIR)和 FW-4A 粉末压片机对疏水改性前后植物纤维发泡材料进行红外光谱测定。将材料压成溴化钾圆形小薄片,400~4 000 cm⁻¹。

1.3.3 热重分析

采用 TGA-Q50 热重 (TG) 对疏水改性前后植物纤维发泡材料热稳定性进行分析。将温度从 40 °C 升高到 600 °C, 加热速率为 20 °C/min。在测量过程中, 把干燥的氮气按照 50 mL/min 的恒定流量排入炉中。

1.3.4 水接触角测试

使用动态接触角测试仪对疏水改性前后植物纤维发泡材料的接触角进行分析。使用动态接触角测试仪在室温下用蒸馏水靠重力的作用下滴到植物纤维发泡材料表面。水接触角是按多次测量获得的有效值进行记录。

1.3.5 力学性能分析

采用微机控制电子万能试验机和材料缓冲测试仪对疏水改性前后的植物纤维发泡材料的压缩和回弹性及静态、动态材料缓冲系数进行多次测试, 并对冲击初速度和峰值加速度进行测量与记录。动态缓冲系数测试样品为 2 个 10 cm×10 cm 的正方形植物纤维缓冲发泡材料, 厚度约为 60 mm, 将其放在距离重锤 300 mm 的高度, 让重锤自由下落, 静态缓冲系数由式 (1) 可得, 动态缓冲系数由式 (2) 和式 (3) 可得。

$$C_{\text{静}} = \sigma / e = \sigma / \int_0^e \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

$$C_{\text{动}} = \sigma_m / e = \sigma_m / \int_0^{e_m} \sigma d\varepsilon = G_m d / H \quad (2)$$

$$\sigma_m = G_m A / w \quad (3)$$

式中: σ 为压缩应变; e 为最大压缩应变能; c 为缓冲系数; A 为样品的表面积; d 为样品厚度; w 为冲击重量; H 为跌落高度; G_m 为峰值加速度。

1.3.6 隔热测试

采用 JR 系列高精度数显恒温加热台和 TESTO 热成像仪对疏水改性前后的植物纤维发泡材料进行隔热测试。加热台恒温保持 80 °C, 并每隔 20 min 对其进行一次测试, 共计测量 60 min, 对其隔热性能进行分析。

1.3.7 清洁 (吸油) 测试

对疏水改性后的植物纤维发泡材料的吸油性进行测试。采用不同化学药品, 即石油醚、乙酸乙酯、二甲苯、正己烷、食用油、丙酮, 对样品吸油前后的质量进行测量, 并记录实验数值。

2 结果与讨论

2.1 形貌与结构

从图 1a 可以看出, 纤维不同程度地缠结, 这些纤维结合形成纤维网络, 并显示出松散的片状结构, 纤维结构明显的自然条纹交织形成了相对平坦的表面^[10], 这为植物纤维泡沫材料提供了良好的力学基础。在放

大图可以看到, 未疏水改性的发泡材料的表面光滑, 没有足够的粗糙度。使用 PDMS 改性后的植物纤维发泡材料的形貌未发生变化, 仍呈现互连的纤维网络结构, 并且相互之间搭接较为紧密, 这说明疏水改性可能不会影响植物纤维泡沫材料的力学性能。从放大图可以看出, 植物纤维表面上存在一些粗糙结构。这是由于 PDMS 均匀地分散在纤维的表面上^[11], 改善了较为光滑的纤维表面, 从而使植物纤维泡沫材料具备疏水性。

图 1b 为疏水改性前后的植物纤维发泡材料的红外光谱。可以看出改性前后植物纤维发泡材料样品都在 3 405 cm^{-1} 处出现宽的振动峰, 这归因于羟基的伸缩振动^[12]。与此同时, 在 2 916 cm^{-1} 处的峰是由于 C-H 的伸缩振动, 在 1 112 cm^{-1} 处的峰归因于 C-O-H 的振动。硅烷改性后的植物纤维泡沫出现了 2 个来自聚硅氧烷振动的特征峰。1 258 cm^{-1} 处的峰对应 Si-CH₃ 的结构单元, 而 828 cm^{-1} 处的峰对应 C-Si-O 和 O-Si-O 的结构单元^[13], 这些特征峰的出现说明植物纤维发泡材料样品已被 PDMS 成功改性。

图 1c 热重 (TGA) 曲线显示, 在初始阶段 20~300 °C 的整个温度范围内未明显变化, 初始时的质量损失一致, 整个过程中的质量损失约为 3%, 这归因于样品中水的减少^[14]。此外, 疏水改性前的植物纤维缓冲发泡材料质量在 300~400 °C 阶段迅速损失, 质量损失率达 80% 左右, 而疏水改性后的植物纤维缓冲发泡材料质量损失率为 70% 左右, 可能是由于 PDMS 的降解对试样热稳定性起到了积极的作用。在最后 400~600 °C 阶段, 主要是纤维的脱水碳化过程^[15]。从图 1 中可以整体看出疏水改性后的植物纤维发泡材料较改性前质量损失率减少约 10%, 而且经 PDMS 疏水改性后的植物纤维发泡材料具有较高的残碳率, 再次说明 PDMS 的成功负载提高了材料的热稳定性。

接触角是判定材料疏水性能最直观的方法, 由图 1d 可知未改性植物纤维发泡材料表面的水滴被立即吸收, 表明未改性材料表面存在大量亲水性羟基^[16], 表现出亲水性, 水滴落在材料表面快速被吸收, 接触角为 0°, 但经过 PDMS 疏水改性后, PDMS 均匀分布在植物纤维表面, 降低了植物纤维的表面能, 表面能降低则会提高其疏水性。从图 1d 可以看到, 水滴在纤维表面呈球形, 材料的接触角可以达到 154.2°, 呈现超疏水性, 这是纤维表面的高粗糙度和 PDMS 的低表面能双重作用的结果^[17]。再次证明 PDMS 成功改性了植物纤维泡沫, 使其具备了疏水能力。

2.2 力学性能

根据图 2a、b 可知, 未疏水改性前植物纤维发泡材料压缩 80% 时的最大应力为 187.43 kPa, 而疏水改

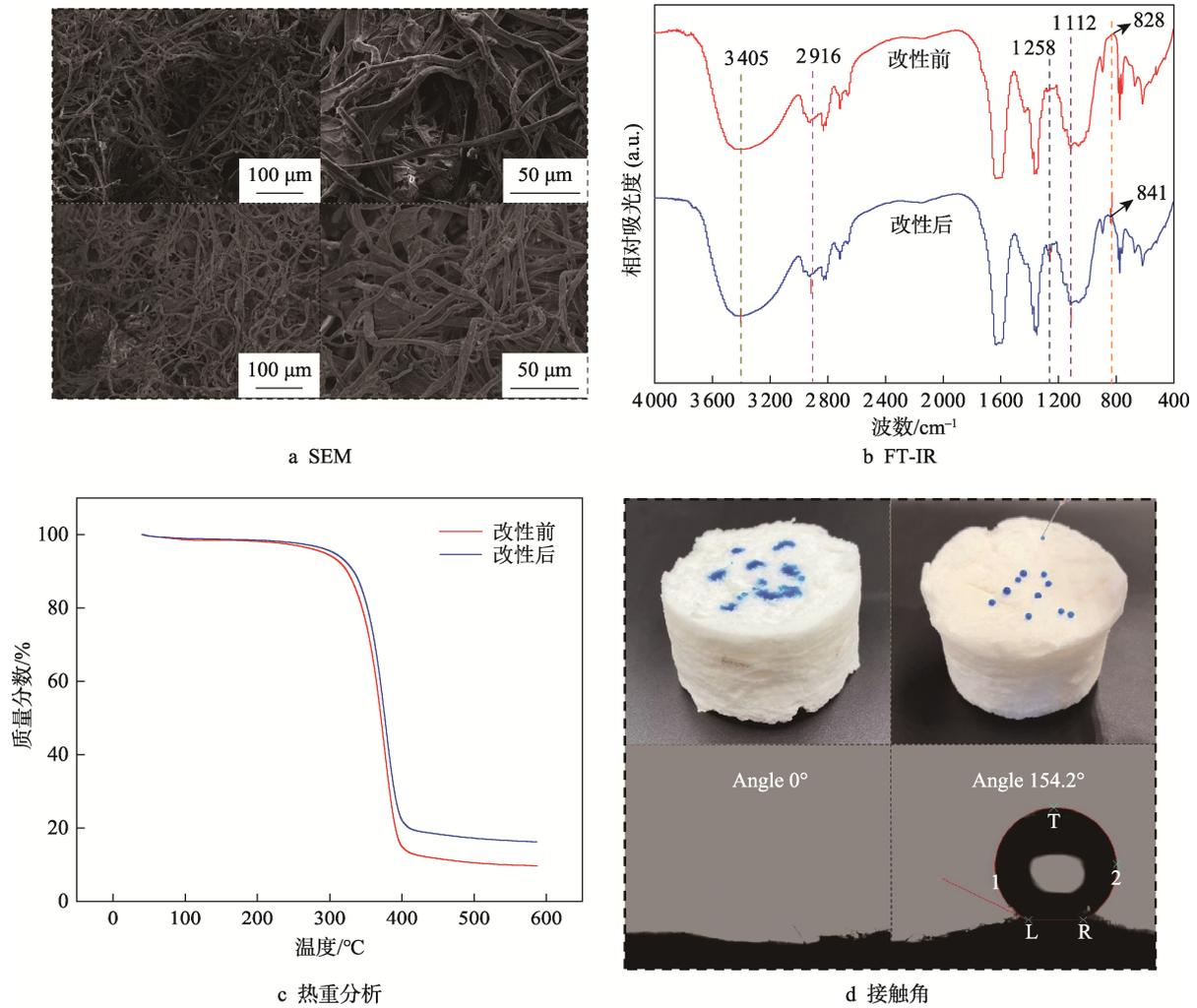


图 1 植物纤维发泡材料形貌与结构表征
Fig.1 Morphology and structure characterization of plant fiber foam material

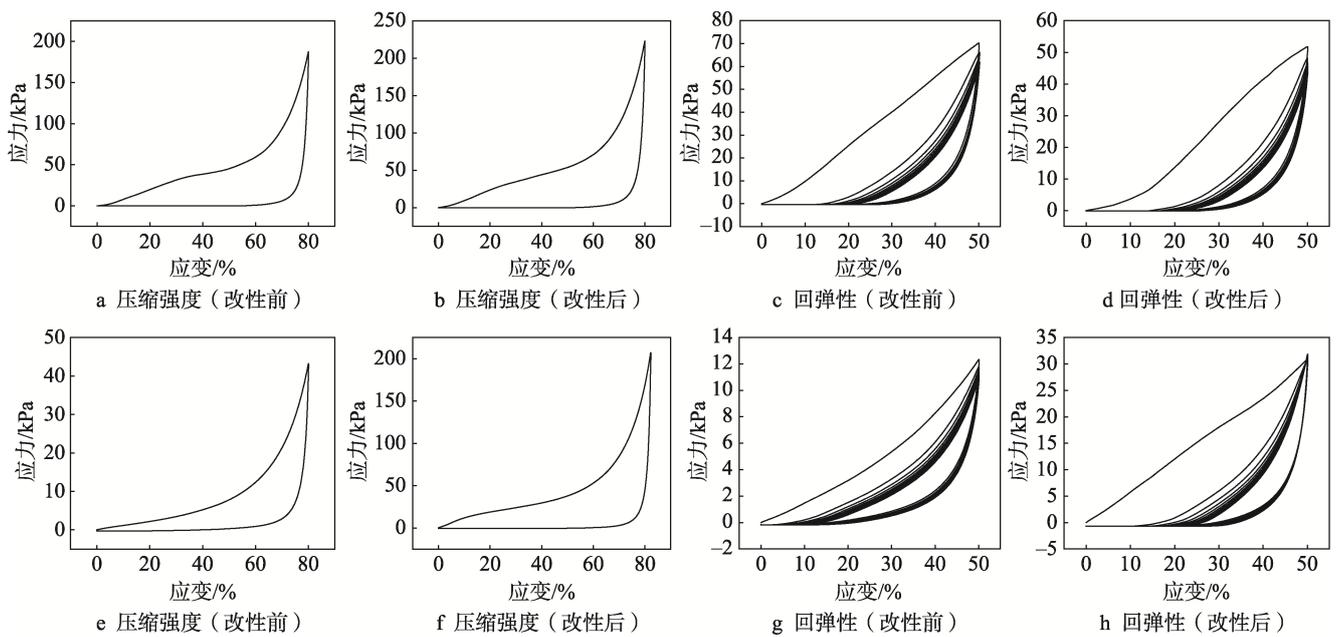


图 2 植物纤维发泡材料的力学性能
Fig.2 Mechanical properties of plant fiber foam material

性后的植物纤维发泡材料压缩 80%时的最大应力为 223.04 kPa。疏水改性后植物纤维发泡材料压缩 80%时的最大应力增加了,并且疏水改性后的植物纤维发泡材料相较于改性前更快地进入弹性阶段,平台阶段变宽,样品的塑性变好,变形能力变强,样品的密实阶段的斜率增大,样品抗压强度提高,表明疏水改性后植物纤维泡沫材料的力学性能有所提高。同时由图 2c、d 也可以看出,未疏水改性前植物纤维发泡材料进行循环往复 10 次的回弹回复性和进行疏水改性后的植物纤维发泡材料的回弹回复性没有太大差别,结果表明疏水改性不会对纤维发泡材料的回弹耐久性造成负面影响。

由图 2e、f 可以看出,未疏水改性前植物纤维发泡材料在高湿环境下压缩 80%时的最大应力为 43.25 kPa,而疏水改性后的植物纤维发泡材料在高湿环境下压缩 80%时的最大应力为 207.24 kPa。疏水改性前的植物纤维发泡材料压缩 80%时的应力峰值明显减小,表明吸水严重破坏了其抗压能力。经疏水改性后的植物纤维发泡材料的应力在潮湿环境下与空气中无太大区别,表明其疏水性可以使其在潮湿环境下保持原有的抗压能力,因此疏水改性后的植物纤维发泡材料具备在高湿环境下应用的潜力。如图 2g、h 所示,对未疏水改性且放在高湿环境下的植物纤维发泡材料进行循环往复 10 次回弹实验。结果表明,未疏水改性植物纤维发泡材料进行循环往复 10 次的回弹回复性比放置于空气中的有所提升。这是因为内部 PVA 吸湿与纤维自身之间产生了更多的动态氢键,从而使回弹性增加,表明未疏水植物纤维发泡材料吸入了很多水分。进行疏水改性且放在高湿环境下的植物纤维发泡材料的回弹回复性和放置于空气中的无太大差别,表明其疏水改性的成功,不会使植物纤维泡

沫材料吸附太多的水,从而提高了其在潮湿环境下的稳定性。

如图 3a 所示,由式(1)计算得到的疏水改性前后植物纤维发泡材料的静态缓冲系数分别为 0.049 6 和 0.050,与常用的木质纤维缓冲材料的静态缓冲系数(缓冲系数为 5~13)相比有所提升^[18]。如图 3b 所示,将疏水改性前后的植物纤维缓冲发泡材料进行多次冲击测试,经测量未疏水改性的植物纤维缓冲发泡材料的原始冲击初速度为 2.73 m/s,峰值加速度为 102.03g。疏水改性后的植物纤维缓冲发泡材料的原始冲击初速度为 2.73 m/s,峰值加速度为 91.46g。经式(2)和式(3)计算得到疏水改性前后植物纤维发泡材料的动态缓冲系数分别为 20.4 和 18.2,可见疏水改性后的植物纤维发泡材料和未改性的静态缓冲系数无太大差别,而动态缓冲性能有所改善。最终结果表明疏水改性提高了植物纤维缓冲发泡材料在潮湿环境下的稳定性的同时未降低其缓冲性能,表明在缓冲应用方面具有很大的潜力。

2.3 隔热与清洁(吸油)性

由图 4a 隔热测试结果可知,将改性后的植物纤维发泡材料放在 80 °C 的加热台上,在 0 min 时植物纤维发泡材料顶部温度为 25.8 °C,经过 60 min 的加热植物纤维发泡材料顶部温度为 29.2 °C,仅上升了 3.4 °C。表明材料具有良好的隔热性能,这是由于疏水改性没有破坏经过发泡在材料内部形成的许多微小气孔。这些气孔有效地减少了热传导路径^[19],导致材料表面温度上升缓慢,提高了隔热效果。经疏水改性后植物纤维发泡材料在保持疏水性的同时又具有隔热稳定性良好,在高温隔热领域具有广阔的应用前景。

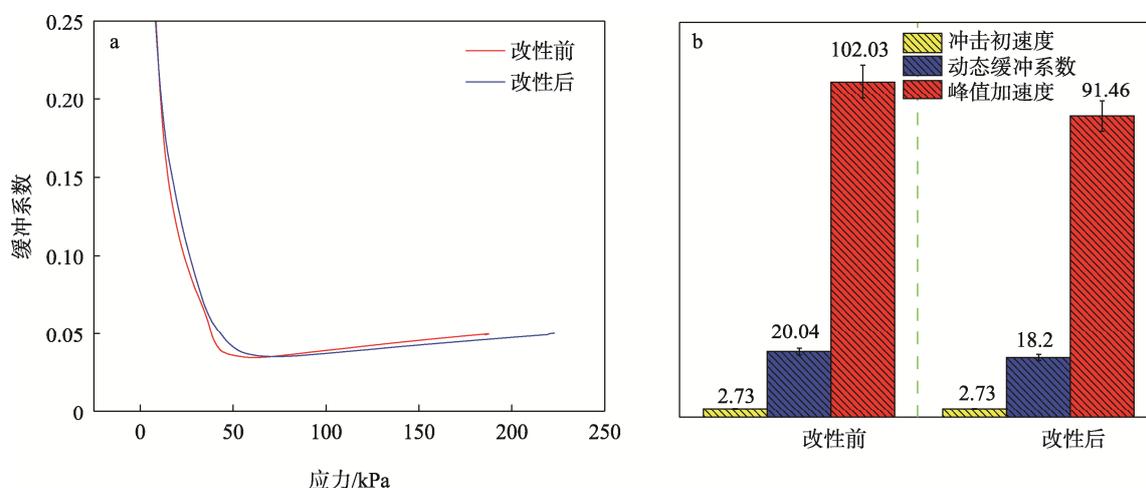


图 3 静态缓冲系数(a)及动态缓冲系数(b)
 Fig.3 Static (a) and dynamic buffering coefficients (b)

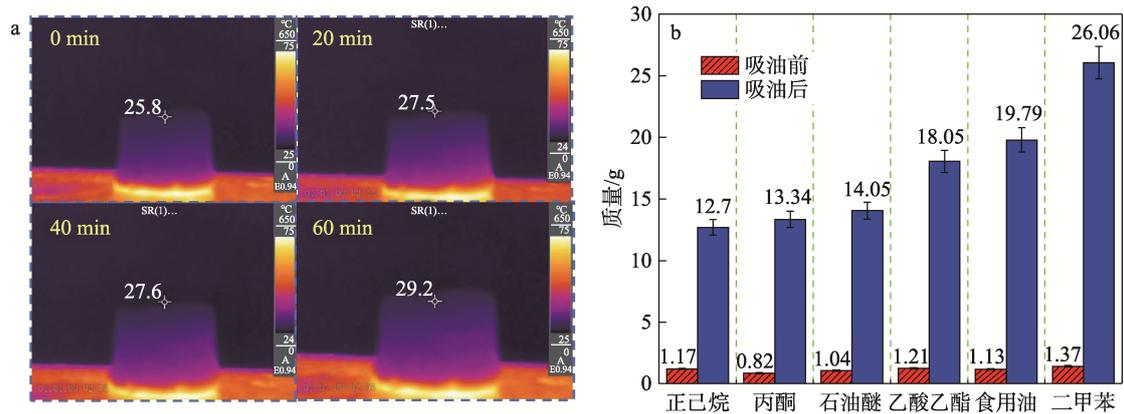


图 4 植物纤维发泡材料隔热性能 (a) 与吸油性 (b)

Fig.4 Thermal insulation performance (a) and oil absorption (b) of plant fiber foam material

如图 4b 所示, 将疏水后的植物纤维泡沫放在不同的溶剂进行吸附测试, 以检测泡沫的清洁能力。可以发现植物纤维发泡材料对丙酮、石油醚、正己烷、乙酸乙酯、二甲苯和食用油都有一定的吸附能力。这是由于吸油的吸收本质上是油进入并占据气凝胶孔隙的过程。改性后的植物纤维具有更好的稳定性, 维持植物纤维的孔隙结构, 不会因受潮等因素使孔隙结构塌陷, 从而保持一定的吸附性能。吸附效果最为显著的药品是二甲苯, 质量为 24.69 g, 这是因为通过疏水改性, 植物纤维表面的极性官能团被替换或包覆, 使得纤维具有更高的亲油性, 从而更容易吸附并固定住非极性的二甲苯分子^[20]。因此, 疏水改性植物纤维材料还具有一定的油清洁能力, 特别是对二甲苯。结合上面的接触角测试也可以得出, 经过 PDMS 改性后的植物纤维发泡材料呈现出疏水亲油性, 表明它在环境治理方面也具有广阔的前景。

3 结语

以植物纤维和 PVA 为原料, 利用 F127 活性发泡制备出混合植物纤维发泡材料, 并用 PDMS/正己烷混合溶液浸渍来得到疏水改性植物纤维发泡材料。测试结果表明, 疏水改性后植物纤维发泡材料与改性前相比, 其压缩强度、压缩回弹性无差别, 且在高湿环境下疏水植物纤维发泡材料具有稳定性。缓冲试验表明疏水植物纤维发泡材料具有良好的缓冲性能。隔热和吸油测试表明疏水植物纤维发泡材料还具有良好的隔热和清洁功能。综上可知, 经疏水改性后植物纤维发泡材料在绿色包装材料领域中的缓冲、隔热、清洁应用方面具有一定的潜力。

参考文献:

[1] KINNUNEN K, LEHMONEN J, BELETSKI N, et al. Benefits of Foam Forming Technology and its Applica-

bility in High MFC Addition Structure[J]. Cambridge: Proceedings of the 15th Pulp and Paper Fundamental Research Symposium, Cambridge, P Jetsu, 2013, 34(23): 837-850.

[2] QIAO J, WEN Y B. Preparation and Characterization of Magnesium Aluminate ($MgAl_2O_4$) Spinel Ceramic Foams via Direct Foam-Gelcasting[J]. Ceramics International, 2020, 46(1): 678-684.

[3] 吴其叶. 植物纤维发泡材料制品缓冲特性的探讨[J]. 包装工程, 2006, 27(3): 47-48.

WU Q Y. Discuss for Cushioning Property of Plant Fiber Foaming Material[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(3): 47-48.

[4] 赵月圆, 鄂玉萍, 蒋玥彤. 竹纤维/淀粉发泡复合材料制备及性能研究[J]. 包装工程, 2016, 37(9): 1-6.

ZHAO Y Y, E Y P, JIANG Y T. Preparation and Properties of Bamboo Fiber/Starch Foam Composites[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(9): 1-6.

[5] 钟鑫, 薛平, 丁筠. 木塑复合材料性能研究的关键问题[J]. 工程塑料应用, 2003, 31(1): 67-70.

ZHONG X, XUE P, DING Y. Key Problems in the Performance Research of Wood Fiber/Thermoplastic Composite[J]. Engineering Plastics Application, 2003, 31(1): 67-70.

[6] 熊丽珍, 张效林, 杨紫怡, 等. 混合废纸纤维对发泡缓冲包装材料性能的影响[J]. 包装工程, 2022, 43(23): 71-79.

XIONG L Z, ZHANG X L, YANG Z Y, et al. Effects of Mixing Waste Paper Fibers on Properties of Foaming and Buffering Packing Material[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(23): 71-79.

[7] 刘景雯, 赵海谦, 赵雨新, 等. 沉积温度对气凝胶表面制备氮化硼薄膜微观结构及其疏水性能的影响[J]. 当代化工, 2021, 50(3): 522-525.

LIU J W, ZHAO H Q, ZHAO Y X, et al. Effect of De-

- position Temperature on the Microstructure and Hydrophobic Properties of Boron Nitride Films Prepared on Aerogel Surface[J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, 50(3): 522-525.
- [8] CHHAJED M, YADAV C, AGRAWAL A K, et al. Esterified Superhydrophobic Nanofibrillated Cellulose Based Aerogel for Oil Spill Treatment[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 226: 115286.
- [9] CAO C Y, CHENG J. A Novel Cu(OH)₂ Coated Filter Paper with Superhydrophobicity for the Efficient Separation of Water-in-Oil Emulsions[J]. Materials Letters, 2018, 217: 5-8.
- [10] DU B, CHEN F, LUO R B, et al. Superhydrophobic Surfaces with PH-Induced Switchable Wettability for Oil-Water Separation[J]. ACS Omega, 2019, 4(15): 16508-16516.
- [11] MUSIKAVANHU B, HU Z J, DZAPATA R L, et al. Facile Method for the Preparation of Superhydrophobic Cellulosic Paper[J]. Applied Surface Science, 2019, 496: 143648.
- [12] GUO X J, XUE C H, SATHASIVAM S, et al. Fabrication of Robust Superhydrophobic Surfaces *via* Aerosol-Assisted CVD and Thermo-Triggered Healing of Superhydrophobicity by Recovery of Roughness Structures[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(29): 17604-17612.
- [13] DING G M, JIAO W C, WANG R G, et al. Superhydrophobic Heterogeneous Graphene Networks with Controllable Adhesion Behavior for Detecting Multiple Underwater Motions[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(30): 17766-17774.
- [14] WANG Y F, LIU Y, ZHANG L, et al. Facile Fabrication of a Low Adhesion, Stable and Superhydrophobic Filter Paper Modified with ZnO Microclusters[J]. Applied Surface Science, 2019, 496: 143743.
- [15] PRASAD V, JOSEPH M A, SEKAR K. Investigation of Mechanical, Thermal and Water Absorption Properties of Flax Fibre Reinforced Epoxy Composite with Nano TiO₂ Addition[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 115: 360-370.
- [16] WANG Z, SHEN X P, YAN Y T, et al. Facile Fabrication of a PDMS@Stearic Acid-Al(OH)₃ Coating on Lignocellulose Composite with Superhydrophobicity and Flame Retardancy[J]. Applied Surface Science, 2018, 450: 387-395.
- [17] NAKAJIMA A, HASHIMOTO K, WATANABE T. Recent Studies on Super-Hydrophobic Films[J]. Monatshefte Für Chemie / Chemical Monthly, 2001, 132(1): 31-41.
- [18] 唐朝发, 杨庚, 刘彦龙. 木质纤维缓冲材料的缓冲性能[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(7): 130-131.
- TANG C F, YANG G, LIU Y L. Buffering Capacity of Wood Fiber Buffering Materials[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(7): 130-131.
- [19] 宋顺喜, 赵俊帆, 魏盘, 等. 针叶木化学浆/玄武岩鳞片复合纸基材料的制备及其吸音隔热性能[J]. 中国造纸, 2022, 41(2): 30-37.
- SONG S X, ZHAO J F, WEI P, et al. Preparation of Softwood Chemical Pulp/Basalt Scales Composite Paper-Based Materials and Their Sound Absorption and Thermal Insulation Properties[J]. China Pulp & Paper, 2022, 41(2): 30-37.
- [20] WANG F J, LEI S, OU J F, et al. Effect of PDMS on the Waterproofing Performance and Corrosion Resistance of Cement Mortar[J]. Applied Surface Science, 2020, 507: 145016.