http://pmse.scu.edu.cn

基于氧化石墨烯负载姜黄素的聚乙烯醇缩丁醛薄膜制备及抗菌性能

马友谊，杨建军，吴庆云，吴明元，张建安，刘久逸
（安徽大学 化学化工学院 安徽省水基高分子材料高性能化工程实验室，安徽 合肥 230601）

摘要：为进一步加强聚乙烯醇缩丁醛（PVB）薄膜在抗菌领域的应用，以姜黄素（Cur）和氧化石墨烯（GO）为原料，通过吸附法将 Cur 吸附于 GO 表面，制备了抗菌剂姜黄素-氧化石墨烯（Cur-GO）；以聚乙烯醇（PVA）和正丁醛为原料，通过缩醛反应合成了 PVB，并用共混法制备了 Cur-GO/PVB 抗菌薄膜（PCG 薄膜）。采用 X 射线光电子能谱、红外光谱、扫描电镜、紫外可见分光光度计、热重分子、水接触角、力学性能、溶出性测试和抑菌实验，对 PCG 薄膜进行结构表征和性能测试。结果表明，Cur 成功吸附于 GO 表面，制备的 PCG 薄膜在 200~400 nm 范围内的紫外透射率均在 29.9%以下；起始失重温度（341 ℃）和最大分解温度（502 ℃）比 PVB 薄膜均有所提高，耐热性能明显增强；水接触角稳定时为 65.8°，拉伸强度为 17.24 MPa，断裂伸长率为 380.7%；掺杂 Cur-GO 的 PVB 薄膜通过协同抗菌作用，对大肠杆菌（*E. coli*）和金黄色葡萄球菌（*S. aureus*）分别表现出 90.1%和 89.7%的抗菌活性。

关键词：聚乙烯醇缩丁醛；姜黄素；氧化石墨烯；抗紫外；抗菌

抗菌薄膜在许多领域都可以发挥关键作用，例如生物医学应用和食品包装，在这些领域中，用于此类应用的材料应具有生物相容性或避免对人类健康产生有害影响[1]。聚合物复合材料通常被认为制作薄膜或涂层的理想材料[2]。此外，无机抗菌剂，如金属纳米材料银、铜[3]，金属氧化物如氧化锌，天然有机抗菌剂如壳聚糖[4]、丁香酸[5]、姜黄素[6]等，在聚合物基质中均有着良好的分散性，可以通过物理或化学方式将抗菌剂加入聚合物材料中来实现。然而，抗菌研究领域更倾向于开发天然提取物，由于其丰富的来源和安全性，植物提取物中的天然有机抗菌剂则被认为是传统化学试剂的替代品。

姜黄素（Cur），即 1,7-双(4-羟基-3-甲氧基苯基)-1,6-庚二烯-3,5-二酮，是一种从姜黄中提取的生物活性化合物，因具有抗氧化、抗肿瘤、抗炎和抗菌作用等特性而闻名[7]。姜黄素分子中具有酚羟基和二酮基团以及其他碳配体的两个活性位点，二酮部分具有烯醇样结构互换[8]，因此具有良好的抗菌效果。Li 等[9]通过溶液浇筑法制备了负载有姜黄素和银纳米颗粒的果胶/明胶抗菌多功能食品包装薄膜，复合膜具有良好的抗氧化活性、机械性能、疏水性和抗菌能力。结果表明，当姜黄素含量为 0.3 wt%时，薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率分别为 99.57%和 100%，同时薄膜还表现出优异的水蒸气阻隔性。氧化石墨烯（GO）是一种含氧功能化的石墨形式，易于大量获得且易于官能团化，适合大量的工业应用，因此受到了很大的关注[10]。GO 的抗菌作用包括细胞膜破坏、细菌包裹和诱导氧化应激，同时 GO 对环境友好，对哺乳动物和植物细胞具有轻微的细胞毒性[11]。Nguyen 等[12]利用吸附法制备了姜黄素修饰的氧化石墨烯（GO-CU），将其掺入聚氨酯涂料中，制备出一种新型的聚氨酯抗菌涂层。结果表明含有 0.1 wt% GO-CU 的涂料的抗菌效率为 85.8%。聚乙烯醇缩丁醛（PVB）是由聚乙烯醇（PVA）和正丁醛经缩醛反应合成，PVB 被认为是一种无定形无规共聚物，具有很高的机械强度、耐化学腐蚀性、粘弹性、热塑性和光学透明度[13]，还具备优良的成膜性及与其他聚合物的相容性，是薄膜最理想的材料之一。Ilickas 等[14]利用一种新型紫外辐射光化学原位合成方法，制备了耐用且持久的抗病毒银聚合物（AgNP-PVB）纳米复合材料。结果表明随着 AgNP

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0103
收稿日期：2025-07-17
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51973001）；阜阳市校合作项目（SXHZ2022070）
通讯联系人：杨建军，主要从事水基高分子材料研究，E-mail：andayjj@163.com

浓度的改变，该复合材料对病毒具有有效的杀伤效果。但该材料不具备防紫外的效果，其随着紫外线照射时间改变，AgNP 的大小及形态随之改变，从而影响了材料的机械性能。

为了更好地应用于抗紫外和抗菌双重领域，本文通过改进的 Hummer 法制备了 GO[15]，并通过吸附法将姜黄素吸附于 GO 表面，成功制备了抗菌剂 Cur-GO，将其加入自制的 PVB 和无水乙醇溶液中，经浇筑成膜制备出具有高效抗菌效果的 PCG 薄膜。基于有机抗菌剂 Cur 和无机抗菌剂 GO 的协同抗菌机制，采用接触杀伤的抗菌方式，考察 PCG 薄膜的抗菌效果。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

PVA（17-99L），工业级，安徽皖维高新材料股份有限公司；正丁醛（质量分数 99%），化学纯，阿达玛斯贝塔（上海）化学试剂有限公司；Cur，分析纯，上海麦克林生化科技有限公司；石墨粉（工业级）、浓盐酸、NaOH、无水乙醇、浓硫酸（H_2SO_4，质量分数 98%）、浓磷酸（H_3PO_4，质量分数 85%）、$NaNO_3$ 和 $KMnO_4$，均为分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；营养肉汤培养基（NB）、营养琼脂（NA），广东环凯微生物科技有限公司；大肠杆菌（E.coli，BGWW23210）、金黄色葡萄球菌（S.aureus，FS0041），南京便诊生物科技有限公司；磷酸盐缓冲液（PBS，pH＝7.4），常德比克曼生物科技有限公司；去离子水，实验室自制。

Escalab-250 型 X 射线光电子能谱仪（XPS），英国 KRATOS 公司；Vertex80+Hyperion2000 型傅里叶红外显微系统（FTIR），德国 Bruker 公司；Regulus-8230 型场发射扫描电子显微镜（SEM），日本 Hitachi 公司；UV-2600i 型紫外可见分光光度计（UV-Vis），日本岛津公司；UV-9600 型紫外可见分光光度计，北京瑞利分析仪器公司；DSA100 型光学接触角测量仪，德国 KRÜSS 公司；LABSYS evo 型热重分析仪（TGA），法国塞塔拉姆仪器公司；XLW(M)型智能电子拉力试验机，济南兰光机电技术有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 PVB 的制备：称取 100 g 的 PVA，加入 900 mL 的去离子水，于 2 L 双层玻璃反应釜中浸泡 24 h 后，搅拌升温至 60 °C，待 PVA 全部融化后，分步滴加定量（63.2 g）的正丁醛。首先滴加 16 g 正丁醛（30 min 内滴加完毕），并降温至 6 °C；继续滴加剩余量的正丁醛（1 h 内滴加完毕），稳定 30 min 后，恒定升温速率，3 h 左右升温至 38 °C 并稳定 2 h。然后加碱（NaOH 溶液）调 pH＝4，稳定 30 min 后，倒入 400 目超细尼龙过滤袋中滤去水分，再用去离子水洗涤 3~4 次，并浸泡在水中调 pH＝11，稳定 1 h，继续水洗 3~4 次。最后经过滤、固体烘干、过筛（30 目），制得白色粉末，即为 PVB。

1.2.2 GO 的制备：称取 3.0 g 石墨粉，将石墨粉、70 ml 混合酸液（$V_{浓硫酸}$：$V_{浓磷酸}$=9：1）、以及 1.5 g 硝酸钠分别加入三口烧瓶中，在 0~5 °C 的冰水浴中充分搅拌均匀。然后将 9.0 g 高锰酸钾缓慢加入，先在冰浴（-5~0 °C）中搅拌均匀，后升温至 25 °C 继续搅拌 1 h，再次升温至 35 °C 并保温反应 3 d。随后降温至 0~5 °C，并缓慢滴加 140 mL 去离子水。转移至 2 L 的烧杯中，加入 1 L 去离子水和 20 mL 双氧水搅拌均匀，再加入 200 mL 的稀盐酸，放置沉降 12 h，后经离心、水洗、真空干燥，制得 GO。如 Fig.1 所示。

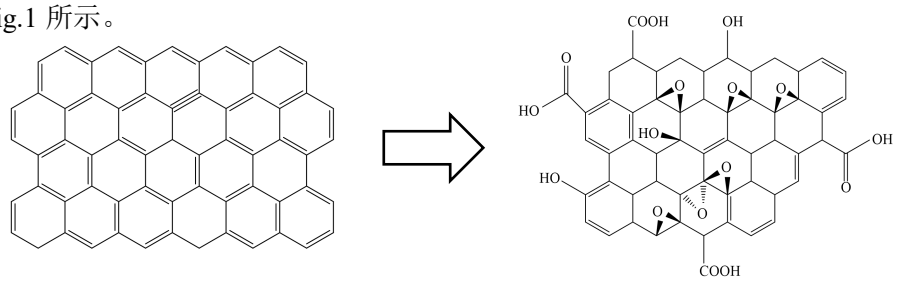


Fig. 1 Schematic structure of graphene and graphene oxide

1.2.3 Cur-GO 抗菌剂的制备：称取 0.1 g 的 GO，加入 100 mL 去离子水，再称取 0.04 g Cur 加入 40 mL

无水乙醇，分别磁力搅拌并超声 1 h 后混合，反应混合液在室温下持续搅拌 24 小时。之后，经离心、水洗，并在 80 ℃ 下真空干燥，制得抗菌剂 Cur-GO。

1.2.4 Cur-GO/PVB 薄膜的制备：首先，将 10 g 的 PVB 粉末加入 90 mL 无水乙醇中，磁力搅拌至充分溶解，制得透明均匀的 PVB 溶液。然后，称取 0.2 g 的 Cur-GO 加入上述 PVB 溶液中，经超声（500 W）处理 1 h，磁力搅拌 2 h。最后，将混合均匀的溶液浇铸到聚四氟乙烯板上，放置在通风橱内室温下干燥，制备得到 Cur-GO/PVB 薄膜，记为 PCG 薄膜。按照 PCG 薄膜的制备方法和步骤，不加入抗菌剂 Cur-GO，制备得到 PVB 薄膜。

1.3 测试与表征

1.3.1 XPS 分析：通过 X 射线光电子能谱仪对 GO 表面元素种类及成键方式进行分析。

1.3.2 FT-IR 分析：KBr 压片法，衰减全反射模式，波数范围 4000~500 cm–1，分辨率 2 cm–1，扫描次数 32 次。

1.3.3 SEM 分析：利用液氮对薄膜样品进行脆断，将脆断后的样品黏附到导电胶带上，并喷涂 Au 层 10 s，观察脆断面微观形貌。低位二次电子（LEI）模式，工作电流 20 μA，电子加速电压 5.0 kV。

1.3.4 UV-Vis 分析：将薄膜样品放入分光光度计夹片中，一式三份。测量以空气为参照物，薄膜的透射率在 200~800 nm 波长范围内进行测量。

1.3.5 TGA 分析：测试样品质量为 4~10 mg，N_2 氛围下，标称气体流速为 60 mL/min，升温速率为 10 ℃/min，测温区间为 30~800 ℃。

1.3.6 水接触角测试：取表面平整的薄膜样品，通过液滴成像技术观察液滴并确定液滴与薄膜的接触角，通过无梗液滴法评估其润湿性。室温下取 3~5 个随机位点测量水接触角，结果取中间值。

1.3.7 拉伸性能测试：将薄膜样品用裁刀制成哑铃状样条，采用智能电子拉力试验机以 100 mm/min 的拉伸速度进行拉伸测试。

1.3.8 溶出性测试：以 PCG 薄膜为研究对象，探究 PCG 薄膜中的 Cur 在 PBS 缓冲液中的渗出性。剪取 10 mm×10 mm 方形 PCG 薄膜浸泡于 10 mLPBS 缓冲液中，并在 37 ℃的水浴振荡器中震荡，每隔 1.5 h 取样在 425 nm 处测量其吸光度。

1.3.9 抗菌性能分析：平板计数测试：参照 ISO22196—2011《塑料与其他无孔表面的抗菌性测定》[16]，并对实验方法进行了适当调整。实验前，所有样品在 254 nm 紫外线下照射 30 min 以上，以确保能达到彻底灭菌的效果。分别制备含量为 1×10^5~1×10^6 CFU/mL 的金黄色葡萄球菌（S.aureus）与大肠杆菌（E.coli）菌悬液。借助无菌聚丙烯薄膜，将 50 μL 菌悬液均匀分散在薄膜样品表面。接种后的薄膜放置于培养皿中，并静置于温度 37 ℃、相对湿度 70%的恒温恒湿培养箱中，孵育 2 h。孵育结束，将样品放入 10 mL 的 PBS 中，振荡 30 s，回收存活细菌并进行稀释。随后，取 50 μL 稀释后的菌悬液，均匀涂布于营养琼脂培养基表面，所有操作均在超净工作台中进行，经过紫外灯照射和质量分数 75%乙醇擦拭台面后操作），在 37 ℃环境下培养 8~12 h，最后对菌落进行计数。

抑菌圈测试：根据 GB/T20944.1—2007《纺织品抗菌性能评价第 1 部分：琼脂平皿扩散法》检测 PCG 薄膜的抗菌性及杀菌物质的渗出性[17]。

2 结果与分析

2.1 GO 和 Cur-GO 结构分析

2.1.1 XPS 分析：Fig.2 为 GO 的 XPS 光电子能谱。通过 XPS 对 GO 进行元素分析，从 GO 的 C1s 谱分析可以看出，GO 在 284.7、285.1、286.6、287.7 和 288.8 eV 处分别包含 C-C、C=C、C-O 键、羰基 C=O 和羧酸盐碳 C(O)O 等各种官能团，表明了 GO 的成功制备。

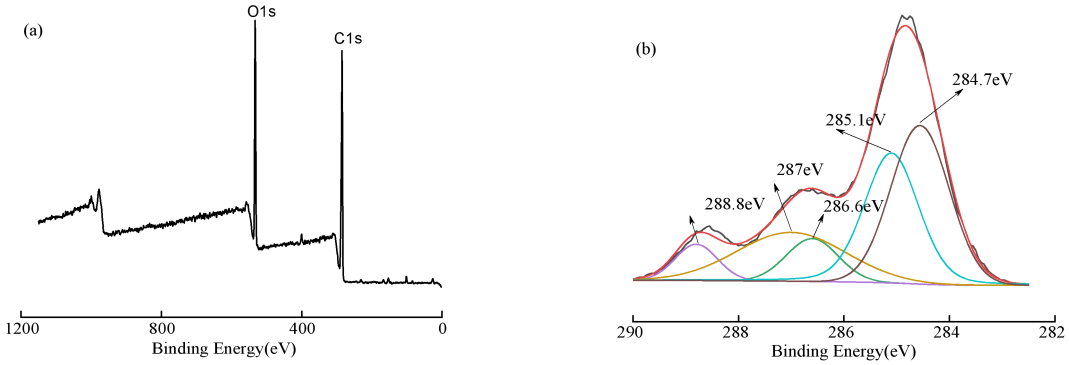


Fig. 2　(a) XPS spectra of GO; (b) C1s spectra of GO

2.1.2　FT-IR 分析：Fig.3 为 Cur、GO 和 Cur-GO 的 FTIR 谱图。从 Fig.3 可以看出，Cur 的 FTIR 谱图中，3504 cm^{-1} 处为酚类—OH 伸缩振动峰；1603 和 1509 cm^{-1} 处为苯环中的 C—C 伸缩振动峰；1281 cm^{-1} 处为烯醇的 C—O 伸缩振动峰；961~808 cm^{-1} 区域的条带属于 C—H 平面外弯曲和芳香族伸缩。GO 的 FTIR 谱图中，3385 cm^{-1} 处为—OH 伸缩振动峰；1730 cm^{-1} 处为 C═O 伸缩振动峰；1627 cm^{-1} 处为 C═C 伸缩振动峰；1225 cm^{-1} 处为 C—O—C 伸缩振动峰。因此，一方面表明了 GO 的成功合成，另一方面，Cur 和 GO 的特征峰在 Cur-GO 的光谱中均有所呈现，说明在 Cur 成功吸附在 GO 表面。

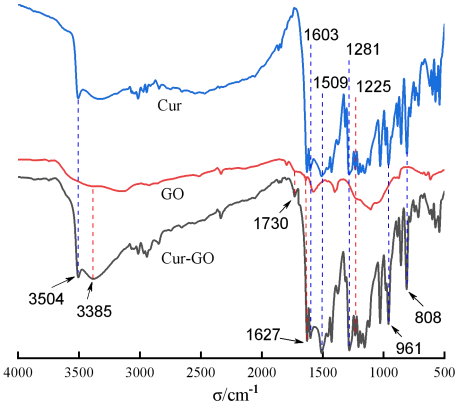


Fig. 3　FT-IR spectra of Cur, GO and Cur-GO

2.1.3　SEM 分析：Fig.4 为 GO 和 Cur-GO 的 SEM 图。从 Fig.4 可以看出，通过与 GO 的表面形态进行比较，GO(Fig.4(a))的表面光滑，而 Cur-GO(Fig.4(b))的表面粗糙。主要是由于在 GO 表面中沉积了大量的 Cur，进一步表明了 Cur-GO 的成功合成。

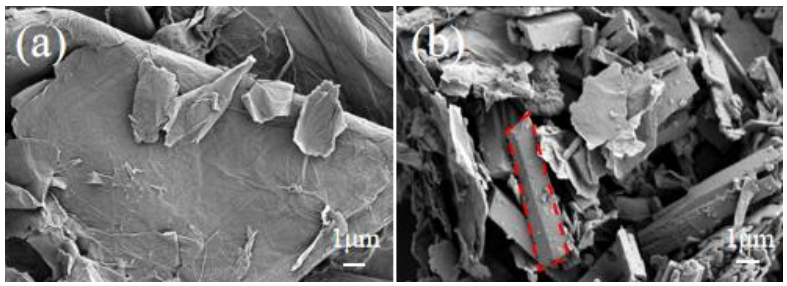


Fig. 4　SEM images of (a) GO and (b) Cur-GO

2.2　PCG 薄膜结构分析和性能测试

2.2.1　FT-IR 分析：Fig.5 为 Cur-GO、PVB 薄膜和 PCG 薄膜的 FTIR 谱图。从 Fig.5 可以看出，PVB 薄膜的 FTIR 谱图中，由于—OH 伸缩，3487 cm^{-1} 处显示出吸收带，对应于 PVB 中的亲水性羟基；2953 和 2870 cm^{-1} 处分别为不对称和对称的—CH_2—伸缩振动峰；1142 cm^{-1} 处为 C—O—C 伸缩振动峰；在 PCG 薄膜的谱图中，—OH 的伸缩振动吸收峰偏移至 3464 cm^{-1}，表明 PVB 与 Cur 之间产生了氢键作

用。PVB 的特征峰和 Cur-GO 的特征峰在 PCG 薄膜的光谱中均有所呈现，说明 PCG 薄膜的成功制备。

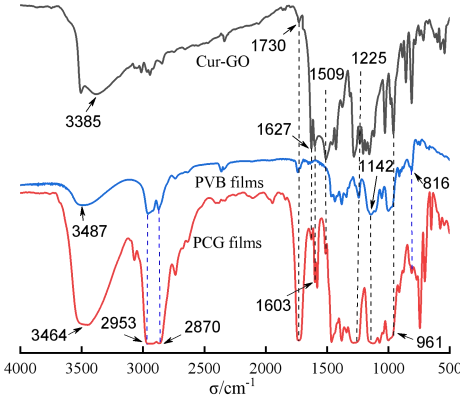


Fig. 5　FT-IR spectra of Cur-GO, PVB and PCG films

2.2.2　UV-Vis 分析：Fig.6 为 PVB 薄膜、PCG 薄膜的 UV-Vis 光谱。从 Fig.6 可以看出，PCG 薄膜在 200~400 nm 范围内的透射率均在 29.9%以下，而 PVB 薄膜在 200~400 nm 范围内的透射率最低为 52.3%，最高可达 90.9%。表明 PCG 薄膜能有效的阻止紫外线穿透，具有较高的抗紫外线性能。这是因为，一方面 Cur 分子结构中带有双苯环的二酮框架，该框架通过其共轭π电子和羰基促进了广谱紫外线的吸收[18]；另一方面，氧化石墨烯中存在大量的共轭结构，其中 C—O 和—OH 对波长为 400 nm 的紫外线有很强的吸收能力。此外，由于氧化石墨烯的加入，薄膜颜色加深，紫外线吸收增加[19]。因此，PCG 薄膜表现出良好的紫外线吸收能力。

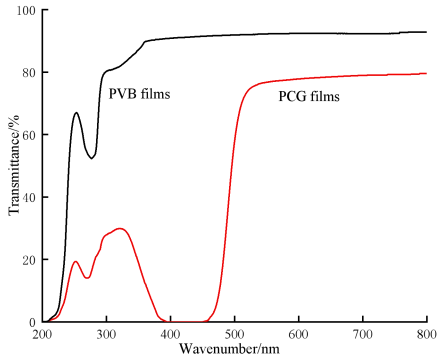


Fig. 6　UV transmittance curves of PVB and PCG films

2.2.3　TGA 分析：Fig.7 为 Cur-GO、PVB 薄膜和 PCG 薄膜的 TG 曲线。从 Fig.7 可以看出，PVB 薄膜在 634 ℃时完全降解，而 Cur-GO 和 PCG 薄膜在 750 ℃时的质量保留率分别为 15.8%和 5.7%。Cur-GO 的质量损失是由于 Cur 的部分热分解和 GO 中含氧基团的分解，其残余归因于 Cur 结构中苯环的存在以及剩余的 GO，PCG 薄膜残余则是由于少量 Cur-GO 的添加。Cur-GO、PVB 薄膜和 PCG 薄膜的起始失重温度（$T_{5\%}$）分别为 232、311 和 341 ℃。相比 PVB 薄膜，PCG 薄膜的 $T_{5\%}$和 750 ℃时的质量保留率均有所提高。这是因为，Cur-GO 均匀分散于 PVB 聚合物基质中，提高了 PCG 薄膜的热稳定性。

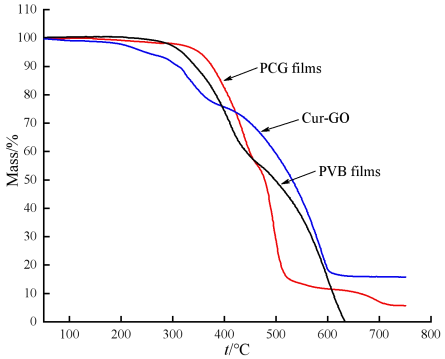


Fig. 7　TGA curves of Cur-GO, PVB and PCG films

2.2.4　水接触角分析：Fig.8 为 PVB 薄膜、PCG 薄膜的水接触角测定结果。从 Fig.8 可以看出，PVB 薄膜和 PCG 薄膜的起始水接触角分别为 82.8°和 69.5°，均低于 90°，表明 PVB 薄膜和 PCG 薄膜都具有亲水性。而 PCG 薄膜的起始水接触角明显低于 PVB 薄膜，这是因为，Cur-GO 的掺入提升了 PCG 薄膜的亲水性。此外，PVB 薄膜和 PCG 薄膜的水接触角随时间而有所改变，PCG 薄膜稳定（60 s）时的水接触角为 65.8°，比 PVB 薄膜（77.6°）降低了约 11.8°。

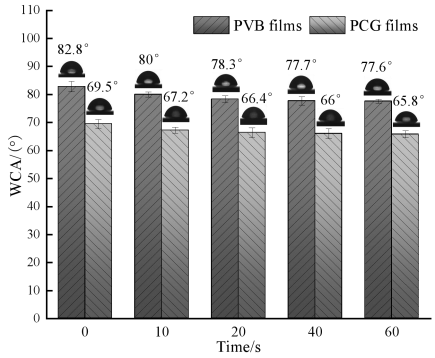


Fig. 8　Variation of water contact angle with time for PVB and PCG films

2.2.5　拉伸性能分析：Fig.9 为 PVB 薄膜和 PCG 薄膜的拉伸应力-应变曲线。从 Fig.9 可以看出，PCG 薄膜的拉伸强度（17.24 MPa）和断裂伸长率（380.7%），较 PVB 薄膜的拉伸强度（9.70 MPa）和断裂伸长率（341.3%）分别提高了 7.54 MPa 和 39.4%。表明抗菌剂 Cur-GO 的加入，提升了 PCG 薄膜的力学性能。一方面，由于 Cur 分子中的两个苯环属于刚性结构，且氧化石墨烯本身有着卓越的强度和柔韧性，以及相当大的比表面积，二者的少量加入在 PCG 薄膜中形成了海岛状的物理交联点，提高了薄膜的内聚能密度和力学性能。另一方面，Cur-GO 的均匀分散，在 PVB 基体中提供了大量应力缓冲位点，两者的界面成为外加应力的集中区域[20]。此外 Cur-GO 与 PVB 基体两者之间形成致密且分布均匀的动态氢键网络，增加链段的自由体积和活动能力[21]，进一步使得 PCG 薄膜更具柔韧性，能够在不破坏结构的前提下有效消散传递的应力，显著提升了薄膜的力学性能。

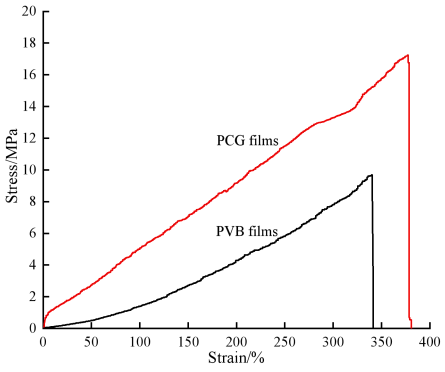


Fig. 9　Stretch stress-strain curves of PVB and PCG films

2.2.6　SEM 分析：Fig.10 为 PVB 薄膜和 PCG 薄膜的 SEM 图。从 Fig.10 可以看出，PVB 薄膜(Fig.10(a))表面平整、光滑，无任何凸起部分，而 PCG 薄膜(Fig.10(b))的表面较粗糙，有块状凸起。这主要是由于少量 Cur-GO 的加入在薄膜中均匀分散，所形成的海岛状物理交联点。

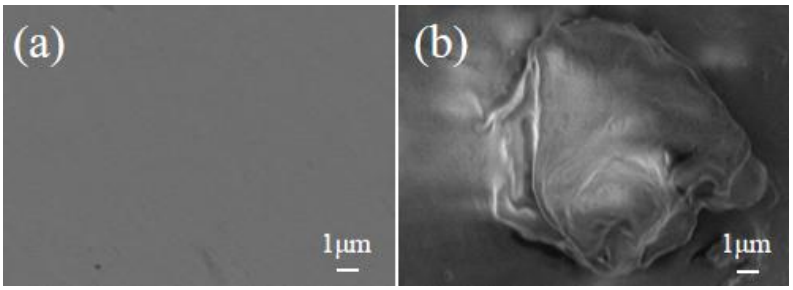


Fig. 10　SEM images of (a) PVB and (b) PCG films

2.2.7　溶出性分析：Fig.11 为 PCG 薄膜在 PBS 缓冲液中浸泡不同时长后，在 425nm 处测量 PBS 缓冲液的吸光度所得结果。从 Fig.11 可以看出，随着时间的变化，溶液吸光度几乎无任何变化，即使在浸泡 12h 后，吸光度也仅有 0.007。表明了 PCG 薄膜在 PBS 缓冲液中无物质（Cur）溶出。

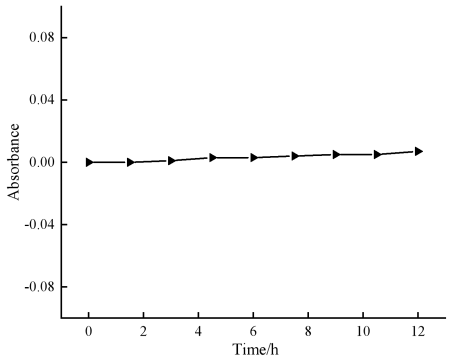


Fig. 11　Absorbance curve of PCG film in PBS buffer solution

2.2.8　PCG 薄膜的抗菌性能：Fig.12 为 PVB 薄膜、PCG 薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的平板计数测试结果。从 Fig.12 可以看出，PVB 薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均未表现出有效的抗菌活性，而 PCG 薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌分别表现出 90.1%和 89.7%的抗菌活性。表明 Cur-GO 抗菌剂的加入使薄膜具备了高效的抗菌性能。

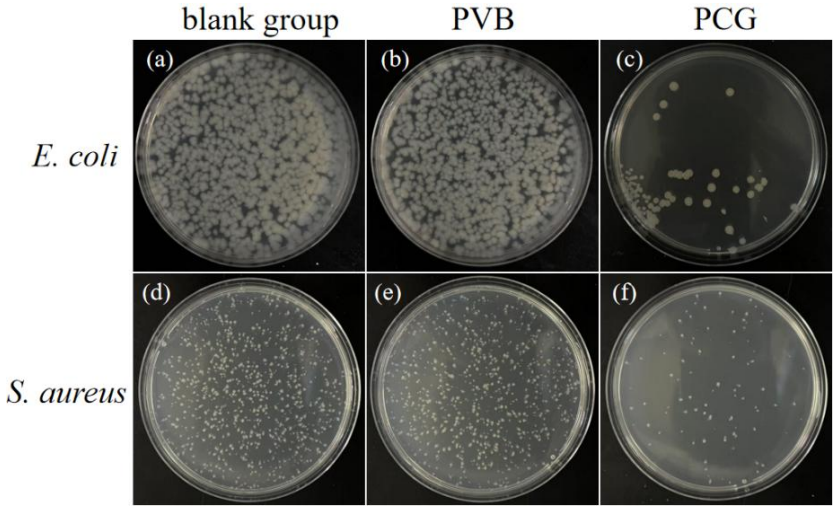


Fig. 12　Plate count test results for *E. coli* and *S aureus* on PVB and PCG films, along with blank controls

2.2.9 PCG 薄膜的抗菌机理：Fig.13 为 PCG 薄膜的抑菌实验结果。从 Fig.13 可以看出，PCG 薄膜所接触琼脂部分未产生菌落(Fig.13(b)和(d))，而薄膜对周围的大肠杆菌(Fig.13(a))和金黄色葡萄球菌(Fig.13(c))的生长未产生任何影响。这是因为，一方面细菌与薄膜接触后，Cur 的亲脂性结构使其能够直接插入脂质体双分子层，进而增强双分子层的渗透性，达到破坏细菌膜的效果[22]。另一方面，GO 片作为电子受体，从细菌膜中窃取电子，对其造成损伤并破坏膜的完整性。这一过程同时产生活性氧（ROS），对细菌造成氧化应激，从而杀死细菌[12]。结果表明，抗菌剂 Cur-GO 的添加使得 PCG 薄膜具有高效的抗菌效果，其采用接触式杀伤，而非抗菌成分的释放。

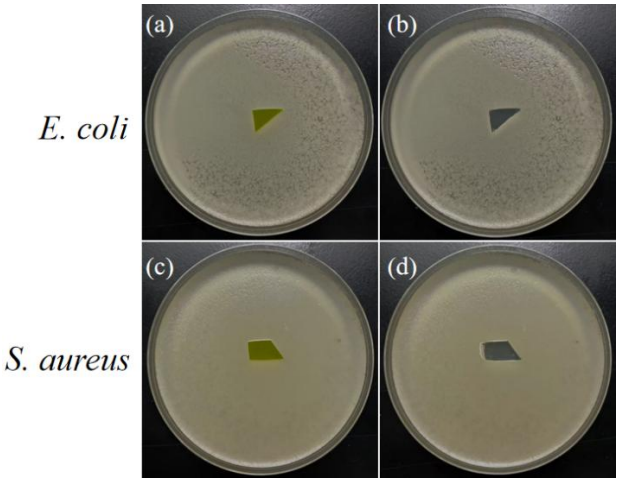


Fig. 13 Antibacterial experiment results of PCG film: (a, c) film cover; (b, d) remove the film

3 结论

以 Cur 和 GO 为原料，通过吸附法制备了抗菌剂 Cur-GO，再通过共混法将其加入到 PVB 中，制得 PCG 薄膜，并对其性能进行了测试与分析，结论如下：

（1）XPS、FTIR 和 SEM 分析结果表明，Cur 成功吸附于 GO 表面，抗菌剂 Cur-GO 在 PVB 薄膜中分散均匀。

（2）UV-Vis 测试结果表明，薄膜具备良好的抗紫外性能，在 200~400 nm 范围内紫外光透射率均在 29.9%以下。

（3）TGA 测试结果表明，PCG 薄膜的起始失重温度为 341 ℃，750 ℃质量保留率为 5.7%，耐热性能明显增强。

（4）水接触角和拉伸性能测试表明，PCG 薄膜的水接触角为 65.8°；拉伸强度为 17.24 Mpa，断裂伸长率为 380.7%，力学性能良好。

（5）溶出性和抗菌测试结果表明，PCG 薄膜具有高效的抑菌杀菌效果，采用接触杀伤的抗菌方式，对 *E. coli* 和 *S. aureus* 分别表现出 90.1%和 89.7%的抗菌活性，有望在医疗器械、食品包装等方面得到应用。

参考文献：

[1] Valerini D, Tammaro L, Villani F, et al. Antibacterial Al-doped ZnO coatings on PLA films[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55: 4830-4847.

[2] Khezri-Shooshtari F, Zerafat M M. Fabrication of antibacterial superhydrophobic nanocomposite coatings using flower-like Bi_2O_3 nanostructures in epoxy resin[J].Surfaces and Interfaces, 2025, 72: 107004.

[3] Yu J, Huang X, Ren F, et al. Application of antimicrobial properties of copper[J]. Applied Organometallic Chemistry, 2024, 38: e7506.

[4] Ardean C, Davidescu C M, Nemeş N S, et al. Factors influencing the antibacterial activity of chitosan and chitosan modified by functionalization[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22: 7449.

[5] Minich A, Levarski Z, Mikulášová M, et al. Complex analysis of vanillin and syringic acid as natural antimicrobial agents against Staphylococcus epidermidis biofilms[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23: 1816.

[6] Salehi B, Rodrigues C F, Peron G, et al. Curcumin nanoformulations for antimicrobial and wound healing purposes[J]. Phytotherapy Research, 2021, 35: 2487-2499.

[7] Hussain Y, Alam W, Ullah H, et al. Antimicrobial potential of curcumin: therapeutic potential and challenges to clinical applications[J]. Antibiotics, 2022, 11: 322.

[8] Zheng D, Huang C, Huang H, et al. Antibacterial mechanism of curcumin: a review[J]. Chemistry & Biodiversity, 2020, 17: e2000171.

[9] Li S, Wei N, Wei J, et al. Curcumin and silver nanoparticles loaded antibacterial multifunctional pectin/gelatin films for food packaging applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 266: 131248.

[10] Costa M C F, Marangoni V S, Ng P R, et al. Accelerated synthesis of graphene oxide from graphene [J]. Nanomaterials, 2021, 11: 551.

[11] Sethumadhavan S C, Pottail L, Sharma S C, et al. Structural and morphological characterization of bio-templated reduced graphene oxide and their antibacterial efficacy[J]. Journal of Cluster Science, 2022, 33: 1997-2008.

[12] Nguyen T D, Bui V C, Tran B A, et al. Influence of curcumin-modified graphene oxide on antibacterial properties of polyurethane coating[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2021, 18: 1379-1387.

[13] Almutlaq N, Ibrahim A, Abdelhamied M M, et al. Structural and optical properties of PVB/ZnS nanocomposite films[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2025, 36: 542.

[14] Ilickas M, Guobienė A, Gedvilas K, et al. UV-mediated photochemical synthesis and investigation of the antiviral properties of silver nanoparticle-polyvinyl butyral nanocomposite coatings as a novel antiviral material with high stability and activity [J]. Applied Materials Today, 2024, 38: 102203.

[15] Riahi K Z, Sdiri N, Ennigrou D J, et al. Investigations on electrical conductivity and dielectric properties of graphene oxide nanosheets synthetized from modified Hummer's method[J]. Journal of Molecular Structure, 2020, 1216: 128304.

[16] 王延蕾, 杨盼盼, 杨建军, 等. 基于丁香酸改性的阳离子水性聚氨酯制备及抗菌性能[J]. 精细化工, 2025, 42(6): 1265-1271.

Wang Y L, Yang P P, Yang J J, et al. Preparation and antibacterial properties of syringic acid-modified cationic waterborne polyurethane.[J]. Fine Chemicals, 2025, 42(6): 1265-1271.

[17] 许雨芩, 杨建军, 吴庆云, 等. 壳聚糖-马来酸/丙烯酰胺双网络型超分子水凝胶制备及应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(10): 124-132.

Xu Y Q, Yang J J, Wu Q Y, et al. Preparation and application of chitosan-maleic acid/acrylamide double network supramolecular hydrogel[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(10): 124-132.

[18] Qiao Y C, Duan L J. Curcumin-loaded polyvinyl butyral film with antibacterial activity[J]. e-Polymers, 2020, 20: 673-681.

[19] Shi F, Xu J, Zhang Z. Study on UV-protection and hydrophobic properties of cotton fabric functionalized by graphene oxide and silane coupling agent [J]. Pigment & Resin Technology, 2019, 48: 237-242.

[20] Haghdadeh P, Ghaffari M, Ramezanzadeh B, et al. The role of functionalized graphene oxide on the mechanical and anti-corrosion properties of polyurethane coating[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2018, 86: 199-212.

[21] Hu Y, Zhang R, Wang X, et al. One-step preparation of PVB-SA green water-and oil-proof coatings for food packaging[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025, 13: 18832-18844.

[22] Dai C S, Lin J H, Li H, et al. The natural product curcumin as an antibacterial agent: current achievements and problems[J]. Antioxidants, 2022, 11: 459.

Preparation and Antimicrobial Properties of Polyvinyl Butyral Films Based on Graphene Oxide Loaded Curcumin

Youyi Ma, Jianjun Yang, Qingyun Wu, Mingyuan Wu, Jianan Zhang, Jiuyi Liu

(Anhui High Performance Engineering Laboratory of Water-Based Polymer Materials, College of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

ABSTRACT: To further enhance the application of polyvinyl butyral (PVB) film in the field of antimicrobial technology, the antimicrobial agent curcumin-graphene oxide (Cur-GO) was prepared by adsorption of Cur on the surface of GO using curcumin (Cur) and graphene oxide (GO) as raw materials, and the antimicrobial film Cur-GO/PVB was synthesized by acetalization of PVB using polyvinyl alcohol (PVA) and n-butyl aldehyde as raw materials and the antimicrobial film Cur-GO/PVB (PCG film) was prepared by blending method. XPS, FT-IR, SEM, UV-Vis, TGA, water contact angle, mechanical property, dissolubility tests and bacteriostatic experiments were used to characterize the structure and test the performance of PCG films. The results show that Cur was successfully adsorbed on the surface of GO, and the UV transmittance of the prepared PCG films in the range of 200~400 nm is all below 29.9%; the onset mass loss temperature (341 ℃) and the maximum decomposition temperature (502 ℃) are both increased than thoee of the PVB film, and the heat-resistant property is significantly enhanced; the water contact angle is 65.8° at the stable time, and the tensile strength is 17.24 MPa. The elongation at break is 380.7%; the Cur-GO doped PVB films exhibit antibacterial activity of 90.1% and 89.7% against Escherichia coli (*E. coli*) and Staphylococcus aureus (*S. aureus*), respectively, through synergistic antimicrobial effects.

Keywords: polyvinyl butyral; curcumin; graphene oxide; UV resistance; antibacterial