

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.05.009

氧化石墨烯-锌抗菌剂改性PE-LD膜的制备及性能

梁佳丰

(中国航发北京航空材料研究院,北京 100095)

摘要: 低密度聚乙烯(PE-LD)是一种广泛应用于食品、医药、农业等领域的树脂材料,对PE-LD进行改性,提高其抗菌性能、拉伸性能、水氧阻隔性能,有利于进一步拓展其应用范围。采用二维结构的氧化石墨烯作为负载材料,通过一步水热法制备了氧化石墨烯-锌(GO-Zn)抗菌剂,设置湿法球磨时间可调控GO-Zn抗菌剂的尺寸。将质量分数0.1%的GO-Zn抗菌剂与PE-LD粒料高速混合,经挤出造粒、吹膜加工,制备了GO-Zn/PE-LD复合膜。分析了GO-Zn的形貌特征、元素组成和粒径分布,测试了GO-Zn/PE-LD膜的拉伸性能、抗菌性能、水氧阻隔性能。结果表明,GO-Zn抗菌剂中,锌离子较为均匀地负载于氧化石墨烯上。经球磨处理后,制备的GO-Zn抗菌剂在PE-LD中分散均匀,无明显团聚现象。GO-Zn抗菌剂可提升PE-LD膜的拉伸断裂强度,球磨时间为1 h的提升效果最佳,最高可提升9.2 MPa。GO-Zn抗菌剂的加入,使PE-LD膜具备了优异的抗菌性能,经球磨处理制备的GO-Zn抗菌剂,可使PE-LD膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌率达到99.9%以上。同时,GO-Zn抗菌剂有效提升了PE-LD膜对水蒸气和氧气的阻隔性能,对应透过率分别降低69.5%和51.3%。

关键词: 氧化石墨烯-锌抗菌剂;低密度聚乙烯膜;拉伸性能;抗菌性能;水氧阻隔性能

中图分类号: TQ322.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)05-0074-07

Preparation and properties of graphene oxide-zinc antibacterial agent modified PE-LD films

LIANG Jiafeng

(AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Low-density polyethylene (PE-LD) is a resin material widely used in fields such as food, medicine, and agriculture. Modifying PE-LD to enhance its antibacterial properties, tensile properties, and water vapor and oxygen barrier properties is beneficial for further expanding its application scope. In this study, graphene oxide with a two-dimensional structure was used as a supporting material to prepare a graphene oxide-zinc (GO-Zn) antibacterial agent via a one-step hydrothermal method. The particle size of the GO-Zn antibacterial agent was regulated by controlling the duration of wet ball milling. The high-speed mixture PE-LD material containing 0.1 wt% GO-Zn antibacterial agent was processed by extrusion granulation and blown film processing to prepare the GO-Zn/PE-LD composite film. The morphological characteristics, elemental composition, and particle size distribution of GO-Zn were analyzed, and the tensile properties, antibacterial properties, and water vapor and oxygen barrier properties of the GO-Zn/PE-LD film were tested. The results show that in the GO-Zn antibacterial agent, zinc ions are uniformly loaded onto the graphene oxide. After ball milling treatment, the prepared GO-Zn antibacterial agent is uniformly dispersed in PE-LD without obvious agglomeration. The GO-Zn antibacterial agent improves the tensile breaking strength of the PE-LD film, and the improvement effect is optimal when the ball milling time is 1 h with a maximum increase of 9.2 MPa. The incorporation of the GO-Zn antibacterial agent endows the PE-LD film with excellent antibacterial properties. The GO-Zn antibacterial agent prepared via ball milling treatment enables the PE-LD film to achieve an antibacterial rate of over 99.9% against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. Additionally, the GO-Zn antibacterial agent effectively enhances the barrier properties of the PE-LD film against water vapor and oxygen, and the corresponding transmission rate can be reduced by 69.5% and 51.3% respectively.

Keywords: graphene oxide-zinc antibacterial agent ; low-density polyethylene film ; tensile property ; antibacterial property ; water vapor/oxygen barrier performance

通信作者: 梁佳丰, 硕士, 工程师, 主要从事抗菌聚合物材料研究工作

收稿日期: 2026-03-04

引用格式: 梁佳丰. 氧化石墨烯-锌抗菌剂改性PE-LD膜的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(5): 74-80.

LIANG Jiafeng. Preparation and properties of graphene oxide-zinc antibacterial agent modified PE-LD films[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(5): 74-80.

近年来,在食品包装、医用材料和公共设施中,因细菌传播及滋生带来的危害日益显现,而采用抗菌材料是解决该问题的必然选择。低密度聚乙烯(PE-LD)是一种被广泛应用于食品、医疗、农业等领域的低成本热塑性树脂^[1-2],具有柔韧性强、防水性好、化学稳定性好的特点。PE-LD的主要应用形式为薄膜产品,包括食品包装、日用品包装、医用包装膜和农业膜等使用场景。PE-LD本身不具备抗菌性能,在日常使用过程中,容易因表面细菌繁殖传播造成食品发霉、果蔬变质、细菌交叉感染等问题,这对于PE-LD膜的抗菌性能提出了迫切需求^[3-4]。改进PE-LD材料的抗菌、阻隔等性能,对于扩展其应用范围十分必要。邱艳娜等^[5]以脱氢乙酸钠、苯甲酸钠、金属钠离子改性剂作为抗菌添加剂,通过流延法制备了抗菌聚乙烯膜,结果表明该薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均具有一定抑制效果。姜悦等^[6]首先对纳米TiO₂进行改性,然后经造粒、流延等工序,得到抗菌PE-LD薄膜,该薄膜有望应用于食品包装。Shiva等^[7]选用壳聚糖负载藏茴香精油作为抗菌剂,制备了具有抗菌活性的PE-LD复合膜。

当前PE-LD抗菌改性研究虽已赋予了PE-LD一定抗菌性能,但也存在工艺繁杂、阻隔性能较差、拉伸强度降低等问题。笔者选用了锌离子作为抗菌剂,对PE-LD进行抗菌改性。锌元素是人体必需的微量元素,相较于铜、银,其对人体的毒害作用更低^[8]。同时,锌离子具有较好抗菌性能、热稳定性和易加工型^[9]。选用了氧化石墨烯(GO)作为负载材料,GO是二维结构材料,能够搭载锌离子实现抗菌增强^[10-12],其本身具备一定抗菌性能和阻隔性能,与高分子材料间也展现了较好的相容性^[13-15]。本文采用一步水热法制备GO-锌(GO-Zn)抗菌剂,通过设定球磨时间调控抗菌剂的粒径。将抗菌剂与PE-LD粒料混合、造粒,通过吹膜法加工得到PE-LD复合膜。研究了抗菌剂在PE-LD基体中的分散情况,测试了PE-LD复合膜的拉伸性能、抗菌性能和阻隔性能。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE-LD:FD0474,卡塔尔石化公司;

乙酸锌、尿素:分析纯,上海麦克林生化科技公司;

GO:采用Hummers法制备^[16]。

1.2 主要设备及仪器

水热反应釜:MQ-500,长沙米琪仪器设备有限公司;

高能行星球磨机:TJGO-450,天津东方天净科技发展有限公司;

冷冻干燥机:VD-550R,日本TAITEC公司;

高速粉碎机: CW130A,扬州诺亚机械有限公司;

双螺杆造粒机:SJSH-30,石家庄星烁实业有限公司;

实验室吹膜机:BL6178A,东莞宝轮精密检测仪器有限公司;

场发射扫描电子显微镜(SEM): HITACHI SU8010,日本日立公司;

场发射透射电子显微镜(TEM);FEI Tecnai G2 F30,美国FEI公司;

激光粒度仪:Zeta sizer Nano ZS90,英国马尔文公司;

光学显微镜:LV100ND,日本尼康公司;

万能材料试验机: Instron 5567,美国英斯特朗公司;

氧气透过率测试仪:SYSTESTER GTR-701M,济南思克测试技术有限公司;

水蒸气透过率测试仪:SYSTESTER WVTR-9003,济南思克测试技术有限公司;

接触角测量仪:OCA50,德国Dataphysics公司。

1.3 试样制备

1.3.1 GO-Zn抗菌剂的制备

称取2.0 g的GO粉末至300 mL去离子水中,充分搅拌均匀后超声30 min,得到GO溶液。随后加入0.5 g乙酸锌作为锌源,并加入0.2 g尿素搅拌均匀,尿素受热分解生成氨气,为溶液提供弱碱性环境,加速乙酸锌的水解。对混合溶液进行湿法球磨,球料比为150:1,转速为200 r/min,设置一定的球磨时间。待球磨结束后,将混合液转移到聚四氟乙烯衬底的水热反应釜中,在120 °C下保温处理10 h。水热反应结束后,通过多次离心水洗,冷冻干燥得到GO-Zn抗菌剂。上述制备过程中,湿法球磨时间为0、1、2、3 h的样品分别标记为GO-Zn-0、GO-Zn-1、GO-Zn-2、GO-Zn-3。

1.3.2 GO-Zn/PE-LD复合膜的制备

在PE-LD粒料中加入质量分数0.1%的GO-Zn抗菌剂,在高速粉碎机中以4 200 r/min的转速处理3 min。随后,将处理后的粒料添加至双螺杆造粒机中进行挤出造粒,经挤出、冷却、切粒、烘干后,得到GO-Zn/PE-LD粒料,挤出温度参数为进料温度125℃、熔融温度145℃、均化温度160℃、机头温度145℃,螺杆转速为85 r/min。

将GO-Zn/PE-LD粒料加入吹膜机中,各区温度设定为:一区140℃、二区140℃、三区145℃、四区155℃、模头157℃,牵引速度为18.0 r/min。经吹膜加工后,得到GO-Zn/PE-LD复合膜。GO-Zn/PE-LD膜的吹膜制备、牵引收卷过程如图1所示。在上文中,4种不同抗菌剂吹膜加工制备的复合膜分别标记为GO-Zn-0/PE-LD、GO-Zn-1/PE-LD、GO-Zn-2/PE-LD、GO-Zn-3/PE-LD,无抗菌剂添加的空白对照组标记为PE-LD。

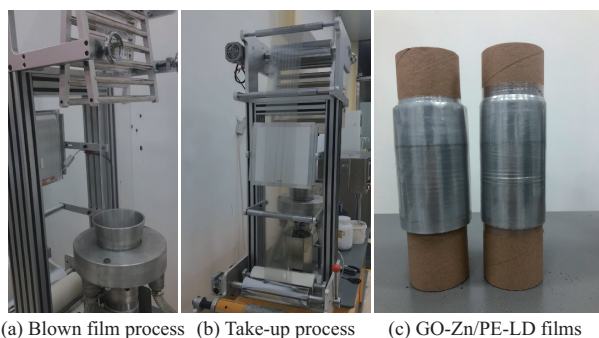


图1 吹膜法制备PE-LD膜

Fig. 1 Preparation of PE-LD film by blown film process

1.4 测试及表征

抗菌剂SEM表征:通过导电胶带将样品粘贴到样品台,真空喷金并观察形貌,测试电压为15 kV。

抗菌剂TEM表征:分散剂为无水乙醇,测试电压为200 kV。

抗菌剂粒径分布测试:按照ASTM E2651-10测试方法,通过激光衍射法测试粒径分布情况。

分散性测试:将PE-LD膜加工成厚度500 μm的切片,以光学显微镜的透光模式,观察GO-Zn抗菌剂在PE-LD基体中的分散情况。

拉伸性能测试:按照ASTM D882-12,将PE-LD膜加工成15 mm×100 mm的矩形试样,通过万能材料试验机测试薄膜的拉伸强度,夹距设定为50 mm,速度为300 mm/min,测试环境为温度25℃、相对湿度50%。每个样品测试10次取平均值。

抗菌性能测试:委托广东省微生物分析检测中心按照GB/T 31402-2015进行测试。测试菌种为大肠杆菌(ATCC 8739)和金黄色葡萄球菌(ATCC 6538P)。将测试细菌培养后,得到对应的接种液,随后接种到PE-LD膜试样表面,将其在35℃恒温、90%相对湿度条件下培养24 h。待完成培养后,将试样放入洗脱液中洗脱细菌并对其进行稀释,取稀释后的菌液涂布于培养基上。经培养后,对活菌进行计数,得到对照组接种后对应的活菌数(A)以及试验组接种后对应的活菌数(B),根据公式(1),计算抗菌率R。

$$R = [(A-B)/A] \times 100\% \quad (1)$$

氧气透过率测试:按照GB/T 1038-2000,通过压差法测试氧气透过率。

水蒸气透过率测试:按照GB/T 21529-2008,通过电解法测试水蒸气透过率。

2 结果及讨论

2.1 GO-Zn抗菌剂形貌及元素分析

图2为GO-Zn-0抗菌剂的SEM形貌图,可以观察到作为抗菌剂载体,GO片层表面上包裹有球状氧化锌颗粒,这些颗粒的粒径大致在100 nm以内,颗粒分布总体均匀,局部有轻微团聚现象。

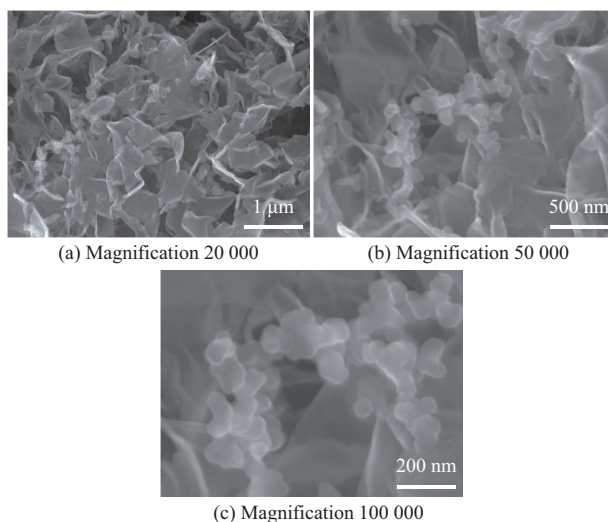


图2 GO-Zn-0样品的SEM照片

Fig. 2 SEM images of GO-Zn-0 sample

GO-Zn-0抗菌剂的TEM图像如图3所示,可以发现氧化锌颗粒分布于GO片层上,整体上看,氧化锌颗粒的粒径不超过100 nm,这与图2中的SEM结果一致。

通过TEM面扫模式对GO-Zn-0抗菌剂表面元素成分进行了分析,结果如图4所示。测试结果表

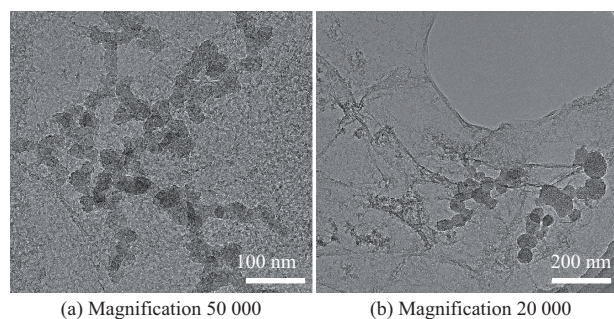


图3 GO-Zn-0样品的TEM照片

Fig. 3 TEM images of GO-Zn-0 sample

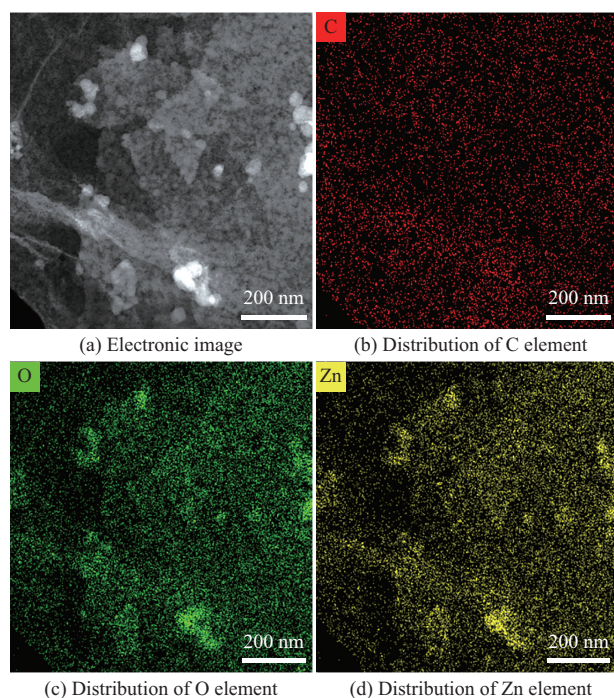


图4 GO-Zn-0样品TEM面扫图像

Fig. 4 TEM mapping images of GO-Zn-0 sample

明,抗菌剂表面的碳元素占比59.81%、氧元素占比31.59%、锌元素占比8.60%。这说明在制备的GO-Zn样品中,锌元素已成功负载于GO片层上,且分布较为均匀。

2.2 GO-Zn抗菌剂的粒径分析

对4组不同球磨时间处理条件下,对应的GO-Zn抗菌剂进行了粒径分布测试,结果见表1。其中,颗粒累计分布占比达到10%、50%、90%时所对应的粒径值,分别记作 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 。根据结果可知,当抗菌剂未经球磨处理时,粒径整体相对较大。当经过1 h球磨处理后, D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 相关测试结果均显著降低,当延长球磨时间至2 h和3 h时,抗菌剂的尺寸呈进一步减小的趋势。说明湿法球磨能够降低负载材料片径,使抗菌剂整体粒径减小。

表1 GO-Zn抗菌剂的粒径分布测试结果

Tab. 1 Testing results of particle size distribution of GO-Zn antibacterial agents

Antibacterial agents	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
GO-Zn-0	4.66	8.82	15.33
GO-Zn-1	2.64	4.52	6.95
GO-Zn-2	2.08	3.71	5.49
GO-Zn-3	1.89	3.53	5.17

Notes: D_{10} is the particle size value corresponding to cumulative distribution percentages of 10%; D_{50} is the particle size value corresponding to cumulative distribution percentages of 50%; D_{90} is the particle size value corresponding to cumulative distribution percentages of 90%.

2.3 GO-Zn抗菌剂在PE-LD的分散性分析

通过光学显微镜的透光模式,对PE-LD膜的切片进行了观察,结果如图5所示。在GO-Zn-0/PE-LD中,GO-Zn抗菌剂颜色较深,颗粒尺寸较大,局部有明显团聚现象。作为对比,GO-Zn-1/PE-LD、GO-Zn-2/PE-LD、GO-Zn-3/PE-LD三组样品中,GO-Zn抗菌剂在基体中分布较为均匀,尺寸总体较小,未观测到明显的团聚现象。说明经过湿法球磨处理后,GO-Zn抗菌剂在PE-LD中的分散性得到增强。

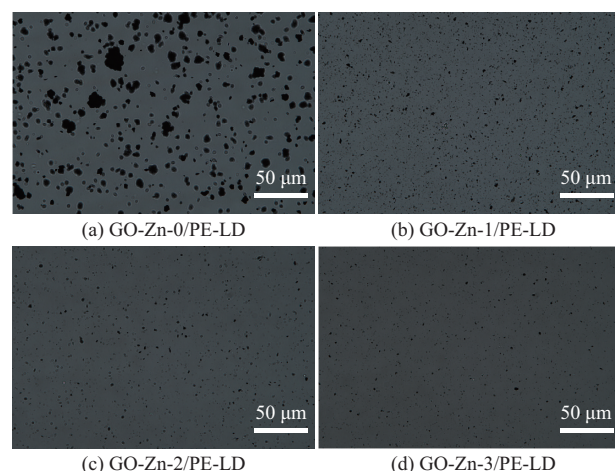


图5 GO-Zn/PE-LD膜光学显微镜图像(放大50倍)

Fig. 5 Optical microscope images of GO-Zn/PE-LD films (magnification 50)

2.4 拉伸性能分析

为了研究GO-Zn抗菌剂对PE-LD拉伸性能的影响,测试了5种PE-LD复合膜的拉伸断裂强度和断裂伸长率,测试结果见表2。GO-Zn-0/PE-LD的纵向拉伸断裂强度和横向拉伸断裂强度分别为34.1 MPa和30.5 MPa。随着球磨时间增加,GO-Zn-1/PE-LD的测试结果分别为36.8 MPa和32.3 MPa,GO-Zn-2/PE-LD的测试结果分别为35.9 MPa和

31.8 MPa, 相 较 空 白 组 PE-LD (27.6 MPa 和 25.4 MPa)均有明显提升,GO-Zn-1/PE-LD样品的拉伸性能整体更优异,相较空白组最高可提升 9.2 MPa。断裂伸长率方面,GO-Zn-1/PE-LD和 GO-Zn-2/PE-LD在纵向和横向的测试结果上,与空白组

PE-LD无显著差别,其余两组则明显低于PE-LD。以上结果表明,GO-Zn的加入可提升PE-LD膜的拉伸断裂强度,当球磨时间为 1 h时,提升效果最明显。GO-Zn对 PE-LD膜的断裂伸长率无明显改善效果。

表2 GO-Zn/PE-LD薄膜的拉伸性能测试结果
Tab. 2 Tensile property test results of GO-Zn/PE-LD films

Samples	Film thickness/ μm	Tensile breaking strength/MPa		Elongation at break/%	
		Longitudinal	Transverse	Longitudinal	Transverse
PE-LD	30.5	27.6	25.4	360	415
GO-Zn-0/PE-LD	31.3	34.1	30.5	325	286
GO-Zn-1/PE-LD	29.4	36.8	32.3	368	384
GO-Zn-2/PE-LD	30.8	35.9	31.8	388	392
GO-Zn-3/PE-LD	31.0	30.3	28.6	316	308

2.5 抗菌性能分析

对 PE-LD膜进行了抗菌性能测试,图 6 为将几种 PE-LD膜所对应的菌液在培养皿上培养后,形成的菌落情况图片,可以观察到,空白组 PE-LD对应的培养皿上明显分布有较多的菌落,且尺寸较大。而在 GO-Zn-1/PE-LD、GO-Zn-2/PE-LD、GO-Zn-3/

PE-LD 三组样品对应的培养皿上,未观察到明显的菌落分布。

通过计数和计算得到抗菌率结果,见表 3。空白组 PE-LD对两种测试细菌的抗菌率均为 0%,说明 PE-LD本身不具备任何抗菌性能。GO-Zn-0/PE-LD对于大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌率分别

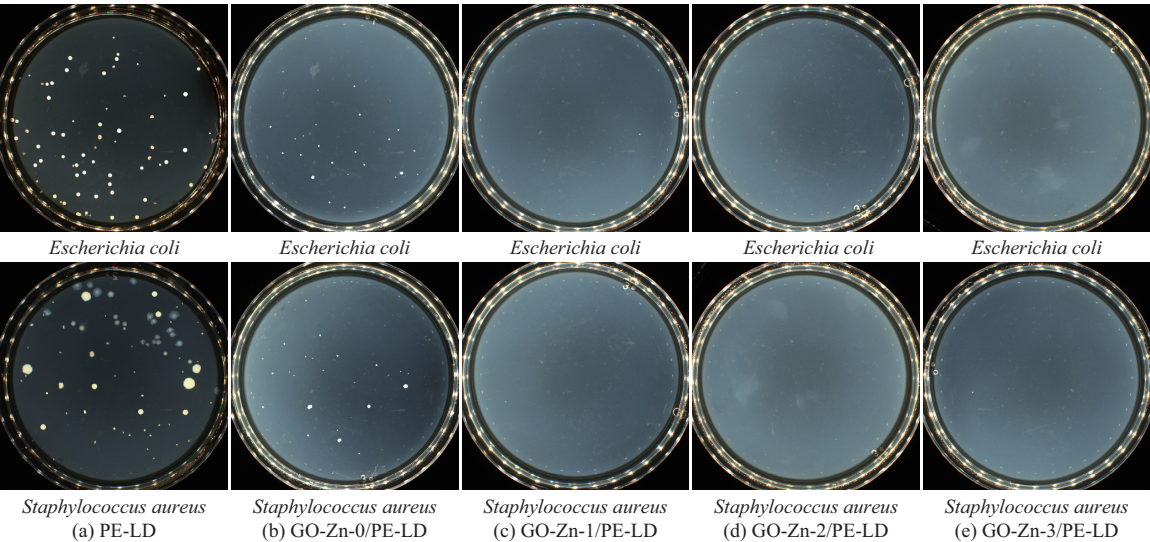


图6 PE-LD膜对应菌液经培养后的菌落图
Fig. 6 Colony images of bacterial suspension corresponding to PE-LD films after incubation

表3 GO-Zn/PE-LD膜的抗菌性能测试结果
Tab. 3 Antibacterial property test results of GO-Zn/PE-LD films

Samples	<i>Escherichia coli</i>			<i>Staphylococcus aureus</i>		
	Viable bacterial count in control group (24 h)	Viable bacterial count in experimental group (24 h)	Antibacterial rate/%	Viable bacterial count in control group (24 h)	Viable bacterial count in experimental group (24 h)	Antibacterial rate/%
PE-LD	3.7×10^5	5.5×10^5	0	4.1×10^5	4.7×10^5	0
GO-Zn-0/PE-LD	3.7×10^5	1.4×10^4	96.2	4.1×10^5	3.9×10^4	90.5
GO-Zn-1/PE-LD	3.7×10^5	21	>99.9	4.1×10^5	49	>99.9
GO-Zn-2/PE-LD	3.7×10^5	15	>99.9	4.1×10^5	62	>99.9
GO-Zn-3/PE-LD	3.7×10^5	11	>99.9	4.1×10^5	33	>99.9

为96.2%和90.5%,这表明加入GO-Zn后,PE-LD膜具备了一定的抗菌性能。GO-Zn-1/PE-LD、GO-Zn-2/PE-LD、GO-Zn-3/PE-LD三组样品对两种测试细菌的抗菌率均可达到99.9%以上,展现了优异的抗菌性能。这可能是由于样品经球磨处理后,GO-Zn抗菌剂在基体中的分散性提升,抗菌剂颗粒更易于与细菌表面充分接触,进而充分发挥抗菌作用。同时,由于分散性提升,GO片层的边缘也能够对细菌表面产生切割作用,破坏细菌的细胞结构^[17-18]。

表4 GO-Zn/PE-LD膜的水蒸气及氧气透过率测试结果

Tab. 4 Water vapor and oxygen transmission rate test results of GO-Zn/PE-LD films

Samples	Film thickness/ μm	Water vapor transmission rate/ [$\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot24\text{h})^{-1}$]	Oxygen transmission rate/ [$\text{cm}^3\cdot(\text{m}^2\cdot24\text{h}\cdot0.1\text{MPa})^{-1}$]
PE-LD	33.0	21.06	4 049.92
GO-Zn-0/PE-LD	32.5	6.42	1 973.58
GO-Zn-1/PE-LD	31.6	9.13	2 904.99
GO-Zn-2/PE-LD	30.2	11.97	3 081.64
GO-Zn-3/PE-LD	32.8	12.92	3 197.81

几种膜层的水接触角测试结果如图7所示,空白组PE-LD、GO-Zn-0/PE-LD、GO-Zn-1/PE-LD、GO-Zn-2/PE-LD、GO-Zn-3/PE-LD对应的水接触角分别为88.0°、97.9°、96.4°、93.3°、91.2°。这表明GO-Zn提升了PE-LD膜的疏水性,随着湿法球磨时间增加,疏水性提升效果逐渐减弱,但整体仍优于空白组。

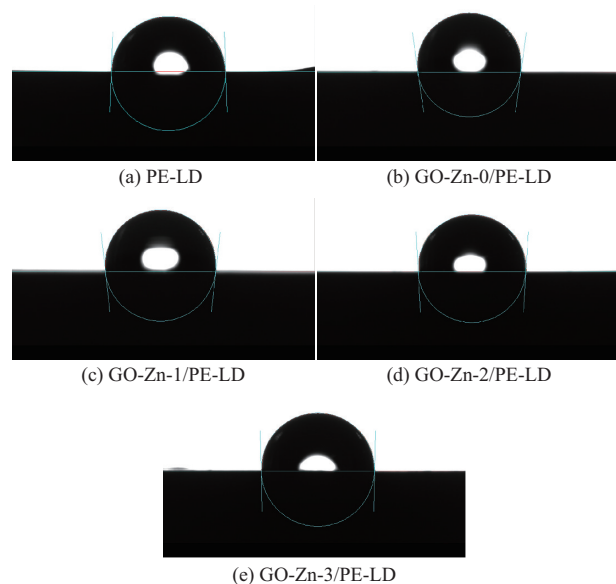


图7 PE-LD膜的水接触角测试结果

Fig. 7 Water contact angle test results of PE-LD films

根据文献报道,这可能是由于GO-Zn抗菌剂为片状结构,GO片层主要通过延长水蒸气和氧气的渗透路径,提升膜层的阻隔性能^[19-20]。当GO-Zn抗

2.6 水蒸气/氧气阻隔性能分析

水蒸气和氧气阻隔性能测试结果见表4,GO-Zn-0/PE-LD的水蒸气和氧气透过率分别为6.42 g/($\text{m}^2\cdot24\text{h}$)和1 973.58 $\text{cm}^3/(\text{m}^2\cdot24\text{h}\cdot0.1\text{MPa})$,较空白组PE-LD分别降低了69.5%和51.3%。说明GO-Zn能够显著提升PE-LD膜的水氧阻隔性能,这主要是由于GO二维结构的特性。随着湿法球磨时间增加,对应的PE-LD膜的阻隔性能逐渐减弱,但仍明显优于空白组。

菌剂经过球磨后,GO的片径减小,对水蒸气和氧气的渗透路径延长效果减弱,从而对PE-LD膜的阻隔效果衰减。另一方面,GO表面分布有羟基、羧基、环氧基等基团,当GO-Zn抗菌剂分散性提升时,会为PE-LD膜表面提供更多吸附位点,使其表面易于吸附水蒸气,导致膜层阻隔效果降低^[21]。

3 结论

(1)通过调控湿法球磨时间,采用一步水热法制备了GO-Zn抗菌剂。经过SEM和TEM观察抗菌剂形貌,发现氧化锌颗粒呈球形,较为均匀地负载于GO表面。

(2)将GO-Zn抗菌剂与PE-LD粒料进行高速混合,经过造粒和吹膜加工后,制备了GO-Zn/PE-LD复合膜。通过光学显微镜观察发现,经湿法球磨后的GO-Zn在PE-LD基体中分散均匀,无明显团聚现象。

(3)GO-Zn抗菌剂对PE-LD膜的拉伸性能具有较好提升效果,当球磨时间为1 h时,拉伸断裂强度最高可提高9.2 MPa。

(4)GO-Zn抗菌剂使PE-LD膜具备优异的抗菌性能,当球磨时间为1、2、3 h时,制备的PE-LD膜对大肠杆菌和金黄葡萄球菌的抗菌率均可超过99.9%。

(5)GO-Zn抗菌剂能够明显提升PE-LD膜的阻隔性能,在24 h测试周期内,对于水蒸气/氧气的透过率分别降低了69.5%和51.3%,水接触角由88.0°

提升至97.9°。随着球磨时间增加,阻隔性能和疏水性有所下降,但仍优于空白组PE-LD。

参考文献

- [1] 宋美丽,谷宇,田广华,等.聚乙烯薄膜的性能及应用综述[J].合成材料老化与应用,2018,47(3):115-118,124.
SONG Meili, GU Yu, TIAN Guanghua, et al. Brief introduction of properties and applications of polyethylene film[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2018, 47(3):115-118, 124.
- [2] 张炯炯,杨福馨,范飞,等.聚乙烯改性防霉包装薄膜的制备与性能研究[J].塑料工业,2017,45(10):108-112.
ZHANG Jiongiong, YANG Fuxin, FAN Fei, et al. Study on the preparation and properties of modified anti mildew polyethylene packaging film[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(10):108-112.
- [3] 胡界博,郭俊杰,张宏元.抗菌阻隔PE膜的结构设计与性能研究[J].塑料工业,2023,51(6):177-181,190.
HU Jiebo, GUO Junjie, ZHANG Hongyuan. Study on structure design and properties of antibacterial barrier PE film[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(6):177-181, 190.
- [4] 姜悦,杨福馨,程龙.新型活性抗菌复合包装材料的制备及性能研究[J].塑料工业,2019,47(11):141-148.
JIANG Yue, YANG Fuxin, CHENG Long. Preparation and properties of new active antibacterial composite packaging for extending shelf life of silver carp fillet[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(11):141-148.
- [5] 邱艳娜,杨福馨,丁晓彤,等.抗菌聚乙烯薄膜的制备及性能研究[J].塑料工业,2017,45(12):125-128,132.
QIU Yanna, YANG Fuxin, DING Xiaotong, et al. Preparation and properties of antibacterial polyethylene films[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(12):125-128, 132.
- [6] 姜悦,杨福馨. Nano-TiO₂改性PE-LD复合抗菌薄膜制备与性能研究[J].中国塑料,2019,33(7):26-31.
JIANG Yue, YANG Fuxin. Preparation and properties of antibacterial film based on nano-TiO₂-modified low-density polyethylene composites[J]. China Plastics, 2019, 33(7):26-31.
- [7] SHIVA K, SOLEIMANI A, MORSHEDIAN J, et al. Improving the antibacterial properties of polyethylene food packaging films with Ajwain essential oil adsorbed on chitosan particles[J]. Scientific Reports, 2024, 14. DOI:10.1038/s41598-024-80349-7.
- [8] PHAN D N, REBIA R A, SAITO Y, et al. Zinc oxide nanoparticles attached to polyacrylonitrile nanofibers with hinokitiol as gluing agent for synergistic antibacterial activities and effective dye removal[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2020, 85:258-268.
- [9] 张文帅,陈延明,郭又晟,等. PBT/PETG/纳米氧化锌复合材料的制备与抗菌性能[J].工程塑料应用,2023,51(7):51-57.
ZHANG Wenshuai, CHEN Yanming, GUO Yousheng, et al. Preparation and antibacterial properties of PBT/PETG/ZnO nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7):51-57.
- [10] ZHANG J, PANDIT S, RAHIMI S, et al. Vertical graphene nano-array decorated with Ag nanoparticles exhibits enhanced antibacterial effects[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 676: 808-816.
- [11] ALP E, OLIVIERI F, AULITTO M, et al. The effect of ZnO nanoparticles morphology on the barrier and antibacterial properties of hybrid ZnO/graphene oxide/montmorillonite coatings for flexible packaging[J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 55. DOI: 10.1016/j.surfin.2024.105307.
- [12] KIM J, PARK J, PARK S, et al. Fabrication of antibacterial graphene oxide/copper nanocomposites[J]. Journal of Visualized Experiments, 2024(212). DOI:10.3791/66762.
- [13] 梁佳丰,郭建强,李岳,等. PC/铜负载氧化石墨烯复合材料的力学及抗菌性能[J].工程塑料应用,2021,49(10):1-5.
LIANG Jiafeng, GUO Jianqiang, LI Yue, et al. Mechanical and antibacterial properties of PC/copper-loaded graphene oxide composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10): 1-5.
- [14] 梁佳丰,李岳. PC/铜负载氧化石墨烯复合材料的抗菌性能[J].工程塑料应用,2024,52(3):1-6.
LIANG Jiafeng, LI Yue. Antibacterial properties of PC/copper-loaded graphene oxide composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3):1-6.
- [15] DOMISZEWSKI Z, MIERZEJEWSKA S, MICHALSKA-POŻOGA I, et al. Effect of graphene and graphene oxide addition to polyethylene film on lipid quality of African catfish (*Clarias gariepinus*) fillets during refrigerated storage[J]. Coatings, 2024, 14(12). DOI:10.3390/coatings14121506.
- [16] HUMMERS Jr W S, OFFEMAN R E. Preparation of graphitic oxide[J]. Journal of the American Chemical Society, 1958, 80(6): 1339.
- [17] HUANG C C, YANG T H, LIN M H, et al. Role of graphene in bactericidal activity and bioactivity of a Zn/graphene/chitosan coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 196. DOI:10.1016/j.porgcoat.2024.108761.
- [18] SHEN S L, WANG J, LI Y R, et al. Enhanced antibacterial activity of sodium titanate/graphene quantum dot self-supporting membranes via synergistic photocatalysis and physical cutting[J]. Materials, 2025, 18(8). DOI:10.3390/ma18081844.
- [19] KIM S J, KIM T Y, KANG B H, et al. Fabrication of graphene oxide/montmorillonite nanocomposite flexible thin films with improved gas-barrier properties[J]. RSC Advances, 2018, 8(68): 39 083-39 089.
- [20] LU S Y, SU J, ZHAN H R, et al. Enhanced selective gas barrier properties of polystyrene via optimal reduced graphene oxide loading: Balancing water vapor, oxygen resistance, and hydrogen permeability[J]. Materials Research Express, 2025, 12(5). DOI: 10.1088/2053-1591/add653.
- [21] GE X S, LI H, WU L, et al. Improved mechanical and barrier properties of starch film with reduced graphene oxide modified by SDBS[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(22). DOI:10.1002/app.44910.