

石墨烯/低密度聚乙烯复合膜的制备及性能

单利君¹, 林勤保¹, 张明¹, 陈朝方², 廖佳²

(1.暨南大学, 珠海 519070; 2.珠海出入境检验检疫局, 珠海 519070)

摘要:目的 以石墨烯/低密度聚乙烯(LDPE)复合包装材料为研究对象, 讨论石墨烯、石墨烯微片对低密度聚乙烯薄膜力学性能、颜色、透光率及透氧率的影响。方法 使用熔融共混方法制备不同石墨烯质量分数的石墨烯/LDPE 复合材料, 检测并比较其性能变化。结果 石墨烯以及石墨烯微片的加入, 使 LDPE 薄膜的弹性模量提高了 9%~50%, 横纵向拉伸强度提高了 2%~30%, 透光率降低了 10%~60%, 透氧率提高了 10%~15%。结论 由于石墨烯比表面积大、刚性高, 对 LDPE 材料的拉伸强度、弹性模量等力学性能有明显改善, 同时可提高薄膜透氧率, 加深 LDPE 材料的颜色, 降低薄膜透光率。

关键词: 石墨烯; 石墨烯微片; 低密度聚乙烯; 力学性能; 颜色

中图分类号: TB484.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)13-0060-06

Preparation and Performance of Graphene/Low Density Polyethylene Composite Film

SHAN Li-jun¹, LIN Qin-bao¹, ZHANG Ming¹, CHEN Chao-fang², LIAO Jia²

(1.Jinan University, Zhuhai 519070, China; 2.Zhuhai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Zhuhai 519070, China)

ABSTRACT: The work aims to discuss the effects of graphene (G) and graphene nanoplatelets (GN) on the mechanical property, color, light transmittance and oxygen permeability of low density polyethylene film, with graphene/low density polyethylene composite packaging materials as the research object. Melt-blending method was used to prepare graphene/LDPE composites with different mass fractions of graphene, and the change in their performances was tested and compared. The addition of G and GN could improve the elasticity modulus of LDPE film by 9%~50%, the transverse and longitudinal tensile strengths by 2%~30% and the oxygen permeability by 10%~15%; and reduce the light transmittance by 10%~60%. Because of the large surface area and high rigidity, graphene can significantly improve the mechanical properties of LDPE material, such as tensile strength and elastic modulus, as well as deepen its color and reduce the light transmittance of the film.

KEY WORDS: graphene; graphene nanoplatelets; LDPE; mechanical property; color

聚乙烯(PE)塑料在实际生活中应用广泛, 但材料本身存在力学强度低、容易变形、易燃等缺点, 已有研究表明, 添加纳米粒子有助于改善聚乙烯塑料的力学性能、导电能力以及热学性能^[1-2]。石墨烯因其具有独特的结构特点以及优异的性能迅速引起全世界的关注^[3-4]。研究表明, 以石墨烯作为填充物可以提高聚合物的力学性能、热学性能以及气体阻隔性能等^[4-6]。同时由于石墨烯的比表面积大、刚性高等特点, 是世界上极薄同时也是极坚硬的纳米材料^[7]。

石墨烯微片是石墨烯的层状堆积体, 碳层数多于 10 层, 厚度为 5~100 nm。相对于石墨烯, 石墨烯微片的制备简单环保, 可以满足大部分石墨烯工业的资源需求。

近年来国内外学者对于石墨烯/聚合物的制备以及改性进行了较多研究^[8-10]。常用的聚合物基主要有聚乙烯^[11-13]、聚乳酸(PLA)^[14]、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)^[15]、聚碳酸酯(PC)^[13]、聚丙烯(PP)^[16-18]、聚苯乙烯(PS)^[19]、聚乙烯醇(PVA)^[20-21]等聚合物。Pinto^[14]等制备了 PLA/氧化石墨烯/石墨烯微片纳米

收稿日期: 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(21277085); 广东省自然科学基金(2015A030313329); 国家质检总局科技计划(2015IK338)

作者简介: 单利君(1991—), 女, 暨南大学硕士生, 主攻食品与药品包装。

通讯作者: 林勤保(1968—), 男, 博士, 暨南大学教授, 主要研究方向为食品与药品包装。

复合薄膜,添加氧化石墨烯和纳米石墨烯微片提高了材料的力学性能。Zhang^[15]等利用熔融复合法制得 PET/石墨烯纳米复合材料,提高了 PET 材料的导电率。Kim 等^[16]的研究表明,PC/功能化石墨烯纳米复合材料的拉伸模量相比 PC 材料有明显提高。关于石墨烯对聚乙烯塑料的透氧性、透光性、颜色、力学性能等的影响,国内外尚无较全面的研究。为此,文中通过熔融共混方式制备得到石墨烯/LDPE 复合薄膜及石墨烯微片/LDPE 复合薄膜,重点研究石墨烯及石墨烯微片的添加对复合材料力学、透光率、颜色、透氧率的影响,并通过扫描电镜对复合薄膜表面进行微观表征。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料:石墨烯 SE1231,购于江苏常州第六元素材料科技股份有限公司,表观密度≤0.1 g/mL,宽度约为 7~10 μm,厚度约为 3~5 nm,比表面积≤10 m²/g,固定碳含量≥95%,pH 值为 7.0~8.0,灰分质量分数≤2%;石墨烯微片,购于施摩奇有限公司,宽度约为 15~30 μm,厚度为 6~10 nm,; 2426H 型低密度聚乙烯,购于中国石油化工有限公司。

主要仪器:双螺杆挤出造粒机(HTB8801),广州普同实验分析仪器有限公司;小型实验吹膜机(FYC-25),广州金中机械有限公司;微机控制环压电

子万能试验机(CMT2203),深圳新三思材料检测有限公司;薄膜测厚仪(I400461S),济南德瑞克仪器有限公司;SP64 型便携式积分球式分光光度计,XRITE 股份有限公司;气体透过率测试仪(BSG-11A),广州西唐机电科技有限公司;扫描电子显微镜(ultra55),卡尔蔡司公司有限公司;紫外可见分光光度计(UV9600),北京瑞丽仪器分析公司。

1.2 复合薄膜的制备

分别将质量分数为 0.05%,0.2%,1%的石墨烯、石墨烯微片同 LDPE 空白母粒混合均匀后,填入双螺杆挤出造粒机中,通过熔融共混的方法制得相应的塑料母粒。为了保证助剂与塑料母粒混合均匀,重复造粒 2 次,之后经小型吹膜机采用中空吹塑的方法制得相应的薄膜。双螺杆挤出造粒机中料筒 1—9 区的温度分别设定为 150,155,155,160,160,165,165,165,165 ℃;模头温度设定为 165 ℃;螺杆转速为 150 r/min。吹膜机 1—4 区温度分别设定为 155,160,165,165 ℃。膜的厚度、密度等信息见表 1。薄膜的厚度由电动厚度测定仪测定,薄膜的密度通过式(1)计算得到,每种薄膜平行测定 10 组样品。

ρ = m / (A · d) (1)

式中:ρ 为薄膜密度;m 为薄膜质量;A 为薄膜面积;d 为薄膜厚度。

表 1 7 种薄膜信息
Tab.1 The information of seven films

薄膜编号	名称	成分(质量分数)	厚度/mm	密度/(mg·mm ⁻³)
0 [#]	空白 LDPE 膜	LDPE(100%)	0.046±0.002	0.97
1 [#]	G/LDPE 复合膜	G(0.05%)	0.048±0.001	0.97
2 [#]	G/LDPE 复合膜	G(0.2%)	0.045±0.002	0.98
3 [#]	G/LDPE 复合膜	G(1%)	0.047±0.001	1
4 [#]	GN/LDPE 复合膜	GN(0.05%)	0.050±0.001	0.97
5 [#]	GN/LDPE 复合膜	GN(0.2%)	0.049±0.001	0.98
6 [#]	GN/LDPE 复合膜	GN(1%)	0.049±0.002	0.10

注:G 表示石墨烯;GN 表示石墨烯微片;厚度及密度数据采用平均值±标准偏差表示

1.3 性能测试

1.3.1 力学性能

参照 GB/T 1040.3—2006^[22],将薄膜裁成长 200 mm、宽 150 mm 的样条,置于温度 25 ℃、相对湿度为 50%的环境中平衡 48 h。在电子万能实验机上以 500 mm/min 的速度和 50 mm 夹具间距进行拉伸性能测试。由于薄膜是吹塑成形的,材料横纵向的伸展程度不同,不同的取样方向会影响材料的性能测试,故该实验选用 2 种取样方式,即横向取样(取样方向垂直于吹膜方向)、纵向取样(取样方向平行于吹膜

方向)。每种薄膜平行测 10 组,分析石墨烯、石墨烯微片添加量对复合薄膜力学性能的影响。

1.3.2 颜色分析

利用 SP64 型便携式积分球式分光光度计分析薄膜的颜色,比较石墨烯、石墨烯微片对薄膜颜色的影响。采用 Lab 色空间原理,通过对比白色底板与薄膜之间的颜色差异,输出 L, a, b 等 3 组数据,并计算 ΔL, Δa, Δb, ΔE 等 4 组色差数据,ΔE 为总色差,由式(2)计算得出。每种薄膜平行测 10 组。

ΔE = (ΔL² + Δa² + Δb²)^{1/2} (2)

1.3.3 透光率

使用裁膜器将薄膜裁成长 30 mm、宽 10 mm 的样条, 每种薄膜取 6 组进行平行实验, 选取厚度均匀的样条, 厚度控制在 0.046~0.048 mm, 将紫外分光光度计进行 30 min 预热, 调零, 分别调整到自然光波长范围内的 400, 500, 600, 700, 800 nm 等 5 个不同波长进行透光率测试, 记录每组膜的透光率 $T(\%)$, 并计算出平均值。

1.3.4 透氧率

使用裁膜器将薄膜裁成直径为 960 mm 的圆形样材, 每种膜取 3 组进行平行实验, 选取厚度均匀的样材, 厚度控制在 0.046~0.048 mm, 放入气体透过率测试仪, 连接氧气罐, 抽真空 2 h, 预透气时间设置为 15 min, 上腔压力为 106 kPa, 采样间隔 10 s/次, 4 h 后透氧率达到平衡, 记录每组膜的透氧率 ($\text{mL}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot (0.1 \text{ MPa}))$), 计算出平均值。

1.3.5 扫描电镜观察

将 6 组薄膜表面清理干净后用导电胶贴在铜台上, 镀金后进行扫描电镜观察, 扫描电压为 5 kV。

2 结果与讨论

2.1 复合膜力学性能

石墨烯、石墨烯微片对 LDPE 的力学强度及模量都有较大的增强, 加入量很小时, 可使聚合物的强度和模量得到提高, 断裂伸长率降低。石墨烯及石墨烯微片添加量对石墨烯/LDPE 复合膜及石墨烯微片/LDPE 复合膜弹性模量、拉伸强度、断裂伸长率的影响曲线见图 1—3, 可以看出, 石墨烯或石墨烯微片质量分数为 0.05%~1% 时, 石墨烯和石墨烯微片可提高复合材料的弹性模量, 且当石墨烯或石墨烯微片添加量相同时, 石墨烯微片/LDPE 复合膜的弹性模量大于石墨烯/LDPE 复合膜。尽管复合膜横向和纵向的拉伸强度都会随石墨烯和石墨烯微片的加入而提高, 但添加量相同时, 石墨烯微片/LDPE 复合膜的拉伸强度大于石墨烯/LDPE 复合膜。同时可以发现, 复合膜横向和纵向断裂伸长率随石墨烯及石墨烯微片添加量的增加呈下降趋势。石墨烯的本征强度可达到 130 GPa, 弹性模量可达到 1100 GPa, 断裂强度为 125 GPa^[23], 因此, 石墨烯或石墨烯微片的加入可提高 LDPE 的刚性、硬度和弹性。加入同等量石墨烯微片的复合材料, 其拉伸强度、弹性模量均大于加入石墨烯的复合材料。由给出的石墨烯以及石墨烯微片尺寸可知, 该实验中石墨烯微片的宽度、厚度都约为石墨烯的 2 倍, 表面积约为石墨烯的 4 倍, 因此表面的吸附力约为石墨烯的 4 倍。根据弯曲刚度公式可知, 石墨烯微片的弯曲刚度是石墨烯的 16 倍, 因此就单个

颗粒而言, 石墨烯比石墨烯微片更容易发生弯曲变形, 可能会降低其与聚合物的相容性。一般来说, 颗粒越小分散性越好, 增强效果也越好。在纳米尺度下, 较大的比表面积和较强的表面活性会使纳米材料容易发生团聚。石墨烯比石墨烯微片的尺寸要小得多, 因此石墨烯比石墨烯微片更容易发生团聚, 这种团聚不利于增强。纵向拉伸时 (图 1b), 在加入质量分数为 1% 的石墨烯或石墨烯微片时, 复合材料的弹性模量不再增加, 这是因为纵向是 LDPE 分子链的长链方向, 横向是多个分子链的排列方向, 纵向长链方向的弹性优于横向; 纳米粒子嵌入 LDPE 内部, 有插嵌在分子链中的, 也有插嵌在分子链之间的, 插在分子链中的过多反而会削弱分子链方向的弹性, 这也是添加质量分数为 1% 的石墨烯及石墨烯微片的复合材料其纵向的弹性模量下降的原因; 插嵌在分子链间的石墨烯对分子链间的运动起到了阻碍作用, 增加了其横向的弹性模量。断裂伸长率的降低是因为随着复合材料强度和刚度的增加, 其抵抗形变的能力增大, 因而断裂伸长率呈现下降的趋势。

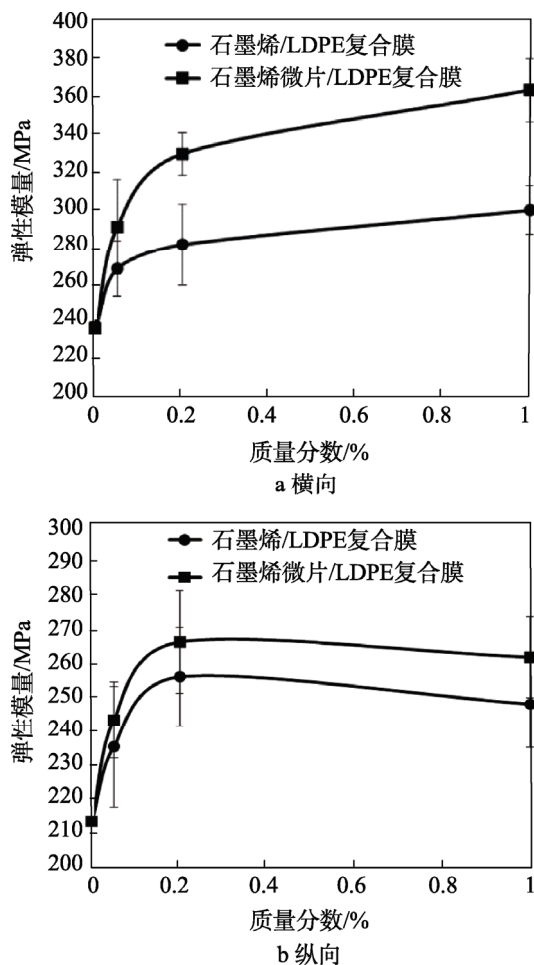


图1 石墨烯及石墨烯微片质量分数对复合膜弹性模量的影响

Fig.1 The effect of the G and GN content on the elastic modulus of composite films

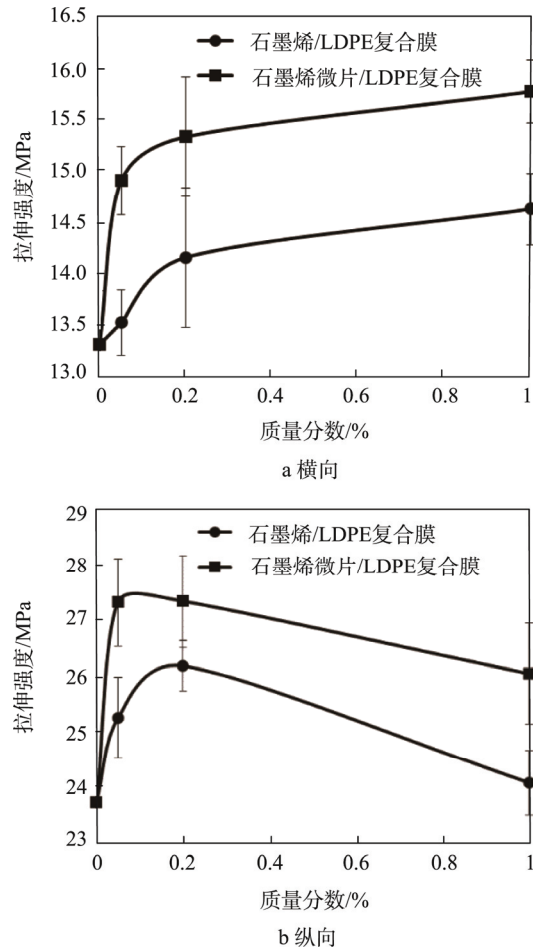


图 2 石墨烯及石墨烯微片质量分数对复合膜拉伸强度的影响
Fig.2 The effect of the G and GN content on the tensile strength of composite films

2.2 复合膜颜色

薄膜的颜色分析数据见表 2，可见，与空白膜相比，石墨烯、石墨烯微片的加入使得薄膜的颜色偏黑，且随着添加量的增加，黑色越明显。石墨烯和石墨烯微片本身是黑色的，由于其具有纳米尺寸以及较强的吸附能力，少量的添加量就可以使其在聚合物中对颜色产生较大影响。添加石墨烯和石墨烯微片的薄膜其 ΔE 值均大于 5，即人眼可直接观察到颜色差别。

表 2 7 种薄膜颜色分析
Tab.2 The color analysis of 7 films

薄膜编号	ΔL	Δa	Δb	ΔE
0 [#]	-1.61±0.21	0.04±0.03	0.10±0.05	1.62±0.22
1 [#]	-5.93±0.45	0.25±0.01	0.84±0.02	5.99±0.45
2 [#]	-16.55±0.88	0.52±0.04	1.73±0.08	16.64±0.89
3 [#]	-60.97±1.2	1.41±0.02	2.28±0.09	61.03±1.20
4 [#]	-6.43±0.58	0.28±0.03	0.76±0.06	6.48±0.58
5 [#]	-16.55±1.16	1.38±0.03	0.54±0.08	16.61±1.69
6 [#]	-48.84±1.04	1.57±0.04	1.94±0.10	48.90±1.04

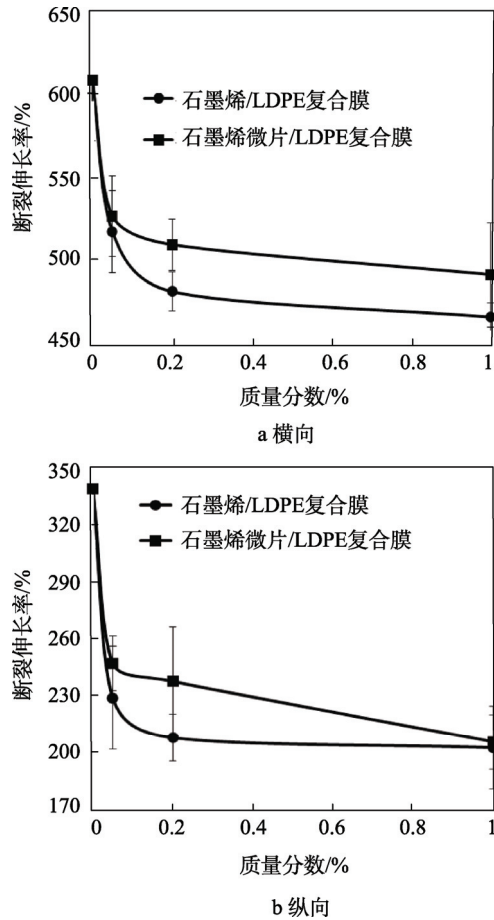


图 3 石墨烯及石墨烯微片质量分数对复合膜断裂伸长率的影响
Fig.3 The effect of the G and GN on the elongation at break of composite films

2.3 复合膜透光率

薄膜在可见光波段内的透光率见图 4，可见，7 种薄膜在可见光波长范围内对不同波长的透过率相差不大，因此选择了 400 nm 的波长对几种材料进行

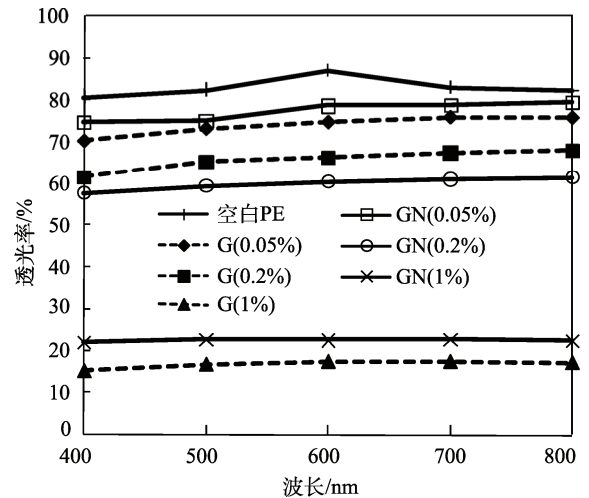


图 4 石墨烯及石墨烯微片质量分数对复合膜透光率的影响
Fig.4 The effect of the G and GN on the light transmittance of composite films

对比。与空白膜相比,石墨烯、石墨烯微片的加入使得薄膜的透光率明显下降,添加量越高,透光率越低。添加质量分数为0.05%的石墨烯或石墨烯微片使得透光率下降了10%,这是因为石墨烯和石墨烯微片本身是黑色的,它们具有纳米尺寸以及较强的吸附能力,同时可以吸收少量可见光,少量的添加量就可以使其在聚合物中对透光率产生较大影响。低透光率的薄膜对于包装需避光保存的物品无疑是一个好的选择。

2.4 复合膜透气性能

选取厚度均匀的薄膜,抽真空2 h后进行透气性能测试。薄膜的透气率变化情况见图5。空白LDPE薄膜的透气率很高,基本达到 $2000 \text{ mL}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot (0.1 \text{ MPa}))$,添加了石墨烯和石墨烯微片的薄膜其透气率有所提高,且含量越高,透气率相对越大。石墨烯及石墨烯微片增强了LDPE薄膜的透气性能,原因可能是纯的石墨烯表面缺少活性官能团,不利于其在聚合物中的分散和剥离,会出现一定的团聚现象^[24],因此石墨烯与LDPE之间界面作用力较差^[25],与提高阻隔性能的愿望相悖,反而降低了LDPE材料的阻隔性,

对透气性能有略微的提高。透气性能的提高更有利于LDPE用于保鲜膜等对透气性能要求较高的包装。

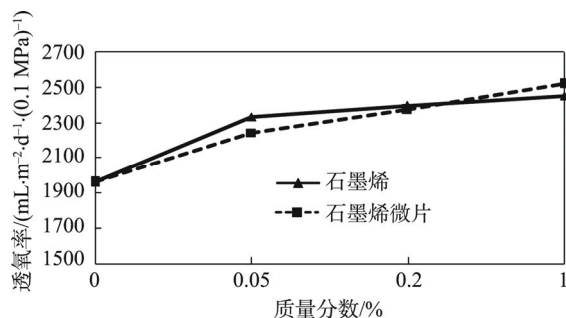


图5 石墨烯及石墨烯微片质量分数对复合膜透气率的影响
Fig.5 The effect of the G and GN on the oxygen permeable of composite films

2.5 复合薄膜表面微观特征

6种薄膜在5 kV电压,5000倍的扫描电镜下的观察结果见图6,可知,随着石墨烯或石墨烯微片含量的增加,石墨烯或石墨烯微片表面的析出物越来越多,团聚现象越来越明显。与石墨烯微片相比,石墨烯的团聚现象比石墨烯微片更加明显,这也为石墨烯与石墨烯微片薄膜的力学性能差异作出了合理的解释。

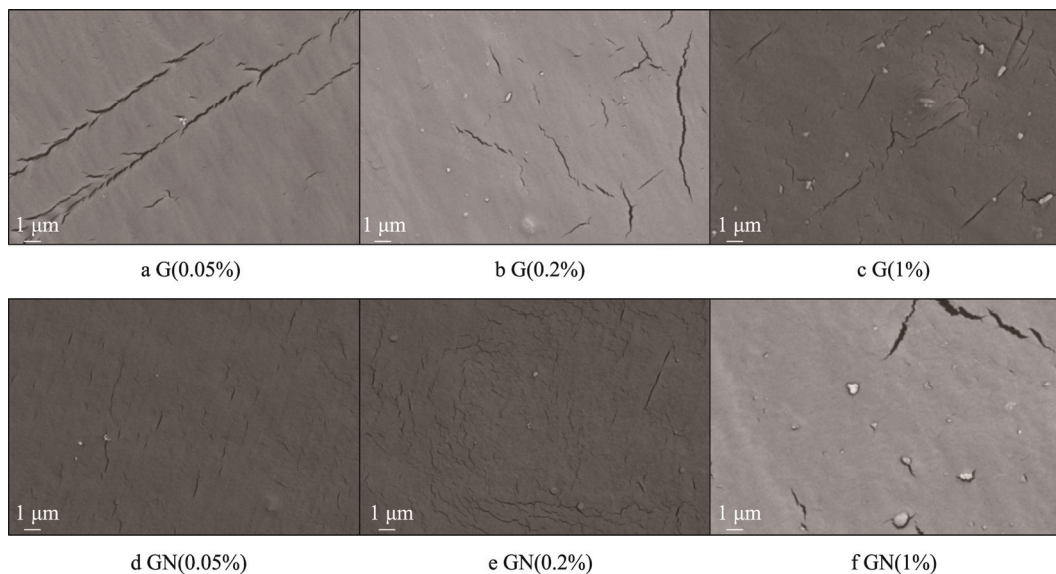


图6 石墨烯及石墨烯微片质量分数对薄膜扫描电镜表面观察结果的影响

Fig.6 Six different film membrane surface of scanning electron microscopy (sem) observations

3 结语

以石墨烯、石墨烯微片、低密度聚乙烯为原料,通过熔融共混的方式制得石墨烯/LDPE复合材料以及石墨烯微片/LDPE复合材料,研究了石墨烯及石墨烯微片对复合材料力学、颜色等性能的影响。结果表明,石墨烯或石墨烯微片的加入,可以提高复合材料的拉伸强度、弹性模量,降低断裂伸长率。石墨烯或石墨烯微片的加入,对塑料薄膜的颜色影响较大,加入少量的石墨烯或者石墨烯微片便可以使得复合材

料颜色变暗,并降低薄膜的透光率,同时可增加薄膜的透气率。文中的研究可以为低密度聚乙烯材料的优化提供参考。

参考文献:

- [1] STANKOVICH S, DIKIN D A, DOMMETT G H, et al. Graphene-based Composite Materials[J]. Nature, 2006(2): 282—286.
- [2] 王利娜,刘庆广,龚方红. 聚乙烯纳米复合材料制备

- 方法的研究进展[J]. 塑料科技, 2007, 35(2): 84—87.
- WANG Li-na, LIU Qing-guang, GONG Fang-hong. Research Progress on Preparation of Polyethylene Nanocomposites[J]. Plastics Science and Technology, 2007, 35(2): 84—87.
- [3] GEIM A K. Graphene: Status and Prospects[J]. Science, 2009(4): 1530—1534.
- [4] DHAND V, RHEE K Y, KIM H J, et al. A Comprehensive Review of Graphene Nanocomposites: Research Status and Trends[J]. Journal of Nanomaterials, 2013(3): 1—14.
- [5] KIM H, ABDALA A A, MACOSKO C W. Graphene/Polymer Nanocomposites[J]. Macromolecules, 2010, 43(16): 15—30.
- [6] TERRONES M, MARTIN O, GONZALEZ M, et al. Interphases in Graphene Polymer-based Nanocomposites: Achievements and Challenges[J]. Advanced Materials, 2011, 23(23): 5302—5310.
- [7] LEE W, LEE J U, JUNG B M, et al. Simultaneous Enhancement of Mechanical, Electrical and Thermal Properties of Graphene Oxide Paper by Embedding Dopamine[J]. Carbon, 2013(5): 296—304.
- [8] 任鹏刚. 石墨烯及石墨烯基复合材料研究进展[J]. 中国印刷与包装研究, 2012, 4(3): 1—9.
- REN Peng-gang. Research Progress of Graphene and Graphene-Based Nanocomposites[J]. China Printing and Packaging Study, 2012, 4(3): 1—9.
- [9] 任芳, 朱光明, 任鹏刚. 纳米石墨烯复合材料的制备及应用研究进展[J]. 复合材料学报, 2014, 31(2): 263—272.
- REN Fang, ZHU Guang-ming, REN Peng-gang. The Latest Advances in Preparation and Application of Nano Graphene Composites[J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2014, 31(2): 263—272.
- [10] 王登武. 石墨烯复合材料的改性研究进展[J]. 中国胶粘剂, 2013, 22(9): 46—54.
- WANG Deng-wu. The Modification Research Progress of Graphene Composites[J]. China Adhesives, 2013, 22(9): 46—54.
- [11] RISSANOU A N, POWER A J, HARMANDARIS V. Structural and Dynamical Properties of Polyethylene/Graphene Nanocomposites through Molecular Dynamics Simulations[J]. Polymers, 2015, 7(3): 390—417.
- [12] KUILA T, BOSE S, HONG C E, et al. Preparation of Functionalized Graphene/Linear Low Density Polyethylene Composites by a Solution Mixing Method[J]. Carbon, 2011, 49(3): 1033—1037.
- [13] ZHENG W, LU X H, WONG S C. Electrical and Mechanical Properties of Expanded Graphite-reinforced High-density Polyethylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 91(5): 2781—2788.
- [14] PINTO A M, CABRAL J, TANAKA D A P, et al. Effect of Incorporation of Graphene Oxide and Graphene Nanoplatelets on Mechanical and Gas Permeability Properties of Poly(Lactic Acid) Films[J]. Polymer International, 2013, 62(1): 33—40.
- [15] ZHANG H B, ZHENG W G, YAN Q, et al. Electrically Conductive Polyethylene Terephthalate/Graphene Nanocomposites Prepared by Melt Compounding[J]. Polymer, 2010, 51(5): 1191—1196.
- [16] KIM H, MACOSKO C W. Processing-property Relationships of Polycarbonate/Graphene Composites[J]. Polymer, 2009, 50(15): 3797—3809.
- [17] ACHABY M, ARRAKHIZ F E, VAUDREUIL S, et al. Mechanical, Thermal, and Rheological Properties of Graphene-based Polypropylene Nanocomposites Prepared by Melt Mixing[J]. Polymer Composites, 2012, 33(5): 733—744.
- [18] YUAN B, BAO C, SONG L, et al. Preparation of Functionalized Graphene Oxide/Polypropylene Nanocomposite with Significantly Improved Thermal Stability and Studies on the Crystallization Behavior and Mechanical Properties[J]. Chemical Engineering Journal, 2014(7): 411—420.
- [19] WANG W P, PAN C Y. Preparation and Characterization of Polystyrene/Graphite Composite Prepared by Cationic Grafting Polymerization[J]. Polymer, 2004, 45(12): 3987—3995.
- [20] HUANG H D, REN P G, CHEN J, et al. High Barrier Graphene Oxide Nanosheet/Poly(Vinyl Alcohol) Nanocomposite Films[J]. Journal of Membrane Science, 2012(9): 156—163.
- [21] MUDILA H, RANA S, ZAIDI M G H, et al. Polyindole/Graphene Oxide Nanocomposites: The Novel Material for Electrochemical Energy Storage[J]. Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2015, 23(1): 20—26.
- [22] GB/T 1040.3—2006[S], 塑料拉伸性能的测定. GB/T 1040.3—2006[S], The Determination of the Tensile Properties of Plastics.
- [23] 韩同伟. 石墨烯力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(3): 279—292.
- HAN Tong-wei. The Mechanical Properties of the Graphene Research Progress[J]. Mechanical Progress, 2011, 41(3): 279—292.
- [24] 左康华. 改性石墨烯及其复合材料的制备[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- ZUO Kang-hua. The Preparation of Modified Graphene and Its Composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [25] REN Peng-gang, WANG Hao, HUANG Hua-dong, et al. Characterization and Performance of Dodecyl-amine Functionalized Graphene Oxide and Dodecyl-amine Functionalized Graphene/high-density Polyethylene Nanocomposites: A Comparative Study[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(2): 803—812.