

复配型对羟基苯甲酸酯类抗菌防霉包装膜

Performance of antibacterial and mouldproof packaging film of compound *p*-hydroxybenzoate

李彦¹ 唐亚丽^{1,2} 卢立新^{1,2} 丘晓琳^{1,2} 王军^{1,2}

LI Yan¹ TANG Ya-li^{1,2} LU Li-xin^{1,2} QIU Xiao-lin^{1,2} WANG Jun^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)
(1. College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Key Laboratory of Food Advanced Manufacturing Equipment and Technology in Jiangsu Province, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:以对羟基苯甲酸甲酯和对羟基苯甲酸丙酯为抗菌防霉剂,将两者复配制成 LDPE 抗菌防霉母粒,采用挤出流延的方法制备出不同配方的抗菌防霉薄膜,研究薄膜的抗菌防霉性能、机械性能以及阻隔性能。结果表明:复配薄膜具有协同抗菌作用,当对羟基苯甲酸甲酯(MPHB)与对羟基苯甲酸丙酯(PPHB)质量比为 2:3 时,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌率分别达到了 99.67%,99.59%,具有较强的抗菌作用,防霉等级达到一级。抗菌防霉剂的加入对 PE 膜机械性能基本没有影响,在 MPHB 和 PPHB 质量比 2:3 时稍优于空白 PE 膜,此时水蒸气透过率降低了 34.73%,透氧系数降低了 5.32%,阻隔性能有所提高。综合考虑,当 MPHB 和 PPHB 复配质量比为 2:3 时,抗菌防霉薄膜具有最佳的应用效果,有望用于低水分活度食品的内层包装。

关键词:对羟基苯甲酸酯;复配;抗菌;防霉;包装膜;低水分活度

Abstract: The two compounds of methyl *p*-hydroxybenzoate and propyl *p*-hydroxybenzoate were added into LDPE to make antibacterial masterbatch. The masterbatch were prepared for different formula antimicrobial films using of extrusion casting methods, and then the antibacterial and mildew resistance properties, as well as the mechanical and barrier properties of the films were studied. Methyl *p*-hydroxybenzoate and propyl *p*-hydroxybenzoate were found showing synergistic antibacterial effect. When the ratio was 2:3, the antibacterial rate reached 99.67% (*E.coli*) and 99.59% (*Staphylococcus aureus*) respectively, and the mold mildew grade reached Level 1, with a strong anti-bacterial and anti-mildew effect. The addition of *p*-hydroxybenzoate had little effect on the mechanical prop-

erties, which was slightly better than that of LDPE at the ratio of 2:3, and the water permeability decreased by 34.73%, with the air permeability decreased by 5.32% and barrier performance improved. When the ratio of the two was 2:3, the antibacterial and mouldproof LDPE film had the best application effect, and it was expected to be used in the inner layer of low water activity food package.

Keywords: *p*-hydroxybenzoate; compound; antimicrobial; mould-proof; packaging film; low water activity

低水分活度食品,是指水分活度(a_w) <0.7 的食品,如坚果、奶粉、饼干、花生酱等^[1-2]。低 a_w 可以控制食品中病原菌的生长,因此,低 a_w 食品一般被认为微生物是安全的。但有研究^[3-4]表明,微生物虽然在低 a_w 环境中难以生长、繁殖,但可以在不同的贮藏条件下存活数月甚至数年,一旦条件适宜就会生长繁殖,比如在储存过程中受到外界条件(如温湿度的变化)的影响。低 a_w 食品采用的包装材料一般为防潮玻璃纸、PVDC 涂塑纸、K 涂 BOPP/PE、铝塑/PE 等复合薄膜等,这些包装材料缺乏主动抗菌性能,当外界条件改变时,无法对内装物进行防护从而延长货架期,所以采用抗菌薄膜^[5-7]对产品进行包装以免受到微生物的污染成为一种新的发展趋势。另外,抗菌包装可以降低甚至避免向食品中直接添加防腐剂,因此得到广泛的重视和研究^[8-10]。

PE(聚乙烯)是塑料中产量最大、用途极广的热塑性塑料。由于 PE 具有安全、耐腐蚀以及良好的热封性能,所以无论是独立包装薄膜还是作为复合薄膜的内层材料,都得到了广泛的应用^[11]。对羟基苯甲酸酯是安全、高效、广谱的食品防腐剂^[12]。由于具有酚羟基结构,其抗细菌活性优于苯甲酸、山梨酸^[13]。对羟基苯甲酸酯包括甲酯、乙酯、丙酯、丁酯等,其抑菌作用随着醇烃基碳原子数的增加而增加,且碳链愈长,毒性愈小,用量愈少^[14]。生产过程中,通常是将几种酯混合使用,以达到协同抗菌作用。其中以对羟基苯甲酸甲

基金项目:国家自然科学基金(编号:31671909)
作者简介:李彦,女,江南大学在读硕士研究生。
通信作者:唐亚丽(1982—),女,江南大学副教授,博士。
E-mail: tangyal35@126.com
收稿日期:2017-08-02

酯和对羟基苯甲酸丙酯使用最多。对羟基苯甲酸酯类具有较高的热稳定性,所以与 PE 树脂挤出流延成膜时能够承受高温而不致热分解失效,具有较好的加工性能。

本试验通过将不同比例的对羟基苯甲酸甲酯(MPHB)与对羟基苯甲酸丙酯(PPHB)复配制成抗菌防霉低密度聚乙烯(LDPE)薄膜,研究复配后薄膜的抗菌防霉效果、机械性能及阻隔性能等。以期为低水分活度食品的内层包装抗菌材料的开发和应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

对羟基苯甲酸甲酯(MPHB)、对羟基苯甲酸丙酯(PPHB):化学纯,国药集团化学试剂有限公司;

低密度聚乙烯(LDPE):LD100AC 型,埃克森美孚公司;NaCl、无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

乳糖胆盐发酵培养基、平板计数琼脂培养基、营养肉汤:国药集团化学试剂有限公司;

马铃薯葡萄糖琼脂培养基:青岛高科园海博生物技术有限公司;

大肠杆菌(ATCC25922)、金黄色葡萄球菌(ATCC 6538)、桔青霉(ATCC1109):上海鲁微科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

电子分析天平(200 g/0.1 mg):AB204-N 型,梅特勒-托利多仪器有限公司;

高速混合机:LMX5-VS 型,Labtech Engineering Company LTD;

双螺杆挤出机:LTE16-40 型,Labtech Engineering Company LTD;

多层冷辊挤出机设备:LMCR-300 型,Labtech Engineering Company LTD;

千分台式薄膜测仪(精度 0.001 mm):Q/ILBN2-2006CH-1-S 型,上海六菱仪器厂;

万能电子材料试验机:LRX Plus 型,英国 LLOYD 仪器公司;

水蒸气透过率测试系统:PERME W3/OGOWVTR 型,Labtech Engineer-ing Company LTD;

透气性测试仪:BTY-B1 型,Labtech Engineer-ing Company LTD;

立式压力蒸气灭菌器:LDZM 型,上海申安医疗器械厂;

垂直层流洁净工作台:HCB-1300V 型,青岛海尔特种电器有限公司;

生化培养箱:SHP-250 型,上海精宏实验设备有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 LDPE 抗菌防霉膜的制备 经前期试验证明抗菌防霉剂浓度越高效果越好,考虑到限量标准和经济成本,确定 0.1%为最终浓度。分别称取一定量的 MPH B、PPHB 和 LDPE 树脂,按一定比例配料,经高速混合机(400 r/min)混匀 30 min。将混合料添加到双螺杆挤出机的料斗中挤出,得到抗菌防霉剂含量为 4%的 MPH B 和 PPHB 2 种母粒。经

二次造粒,得到浓度为 0.1%的 5 种母粒。将不同比例的母粒挤出流延成膜,并设置空白对照组。

双螺杆挤出造粒机温度设定:进料口 165 ℃,中间段 180 ℃,挤出头 190 ℃。进料速度 14 r/min,螺杆转速 180 r/min,剪切速度 8 m/min。挤出流延机由进料端到模头的四段温度依次为 185,190,190,205 ℃,挤出模头两端温度 205 ℃,中间温度 200 ℃。螺杆转速 39 r/min,流延冷却辊转速 1.6 m/min,牵引辊转速 2.1 m/min,卷取辊转速 11 r/min。

1.2.2 抗菌防霉性能的测定

(1) 抗细菌性能的测定:参照 QB/T 2591—2003,采用贴膜法测试所制备薄膜的抗菌性能。空白对照和抗菌塑料样品标准尺寸为(50±2) mm×(50±2) mm,覆盖膜标准尺寸为(40±2) mm×(40±2) mm。分别取制备好的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌悬液 0.2 mL 滴加在空白对照和抗菌塑料样品上,覆膜后置于(37±1) ℃、相对湿度>90%培养 24 h,取出并用洗脱液分别洗涤样品膜和覆盖膜,充分摇匀后,取一定量接种于平板计数琼脂培养基中,在(37±1) ℃下培养 24~48 h 后,活菌计数,按 GB/T 4789.2—2016 的方法测定活菌数。每个样品做 5 个平行。抗细菌率按式(1)计算:

$$R = \frac{B - C}{B} \times 100\%, \tag{1}$$

式中:

R——抗细菌率,%;

B——空白对照样品平均回收菌数,CFU/片;

C——抗菌塑料样品平均回收菌数,CFU/片。

样品抗菌性能判断标准为:当抗细菌率≥99%时,说明有强抗细菌作用,当抗细菌率≥90%时,说明有抗细菌作用。

(2) 抗霉菌性能的测定:按 QB/T 2591—2003 执行。样品尺寸在标准规定的方法上略作修改。将薄膜裁成 30 mm×30 mm 的正方形^[15],经 75%的酒精消毒后,贴于接种桔青霉的马铃薯葡萄糖琼脂培养基的培养皿中,于 28 ℃,相对湿度>90%下培养 28 d,观察样品长霉面积。样品长霉等级见表 1。

表 1 样品长霉等级及抗霉菌性能		
Table 1 The mildew level and mouldproof performance of samples		
等级	判断标准	抗霉菌性能
零级	不长,即显微镜(×50)下观察未见生长	强
一级	痕迹生长,即肉眼可见生长,但生长覆盖面积<10%	弱
二级	生长覆盖面积≥10%	无

1.2.3 机械性能测定 按 GB/T 1040.3—2006 执行。将抗菌防霉膜裁成 15 mm×150 mm 的矩形试样,按照 GB/T 6672—2001 测量试样厚度,用千分台式测厚仪测量薄膜的厚度,每个试样随机选取 5 个点进行测量,取平均值。用万能材料试验机测试拉伸强度,断裂伸长率,每个试样测量 5 次,取平均值。定速度 300 mm/min,夹距 100 mm。

拉伸强度按式(2)计算:

$$\sigma_M = \frac{F}{A}, \tag{2}$$

式中:

σ_M ——拉伸强度,MPa;

F ——试样所能承受的最大压力,N;

A ——试样的截面面积,m²。

断裂伸长率按式(3)计算:

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%, \tag{3}$$

式中:

δ ——断裂伸长率,%;

L_1 ——试样断裂时试样夹之间的距离,mm;

L_0 ——试样夹之间的初始夹距,mm。

1.2.4 阻隔性能的测定 食品包装材料的阻隔性能是衡量其性能优劣的重要指标,阻隔性能主要指材料对水蒸气及氧气的透过性能。水蒸气透过率是指在规定的温度、相对湿度、水蒸气压差和厚度下,1 m²的试样在 24 h 透过的水蒸气量,单位为 g/(m² · d)。试验中使用 W3/060 型水蒸气透过率测试系统测试薄膜的水蒸气透过率,遵循 GB/T 1037—1988 的规定。

氧气透过系数指在恒定温度和单位压力差下,在稳定透过时,单位时间内透过塑料薄膜、铝箔、真空镀铝膜等材料单位厚度及面积的气体体积,单位为 cm³ · cm/(cm² · s · Pa)。薄膜的透氧系数按照 GB/T 1038—2000《塑料薄膜和薄片气体透过性试验方法》进行测量。应在 GB/T 2918—1998 中规定的(23±2)℃下,将试样放在干燥器中调节状态 48 h 以上。然后使用 BTY-B1 型透气性测试仪测量薄膜的透氧量及透氧系数,测试环境保持恒温(23℃)、恒湿(相对湿度 50%)。

2 结果与分析

2.1 抗菌防霉性能

2.1.1 抗细菌性能 图 1、2 分别为大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的平板活菌计数的菌落数直观图。由图 1、2 可知,与空白 LDPE 薄膜对比,添加 MPH B 和 PPH B 后菌落数明显减少,尤其当二者复配时,效果更佳。

表 2、3 分别为不同配方的 LDPE 抗菌防霉薄膜大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的菌落数和抗菌率。由表 2 可知,单独添加 MPH B 和 PPH B 的抗菌防霉膜对大肠杆菌的抗菌率分别为 86.84%,91.78%,依据抗菌性能的判断标准,单独添加 MPH B 达不到抗菌效果,单独添加 PPH B 有较低的抗菌效果。当二者复配时,抗菌效果有明显的提高,当 MPH B 和 PPH B 质量比为 2:3 时,抗菌效果达到了 99.67%,可以判断具有较强的抗菌效果。由表 3 可知,单独添加 MPH B 和 PPH B 时,对金黄色葡萄球菌的抗菌率都<90%,基本上达不到抗菌作用。当两者复配时,都>90%,并且当 MPH B 和 PPH B 质量比为 2:3 时,抗菌率达到 99.59%,具有较强的抗菌作用。综合以上结果,可以判断当 MPH B 和 PPH B 复配时,具有协同抗菌作用,且

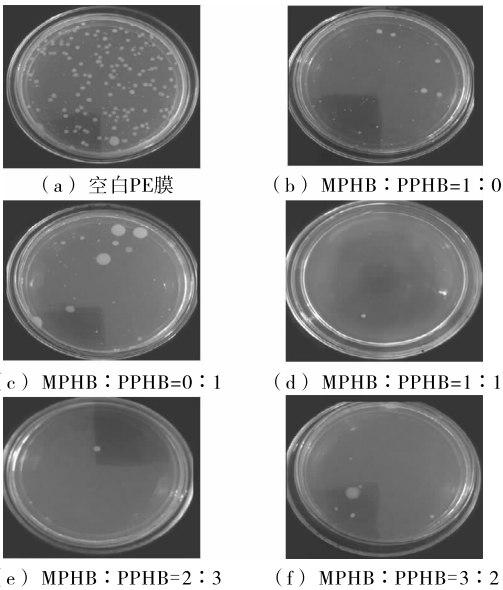


图 1 不同配方的 LDPE 抗菌防霉薄膜培养 24 h 后的大肠杆菌菌落数对比照片

Figure 1 Comparison of the number of colonies (*Escherichia coli*) after 24 hours of incubation with different antibacterial and mouldproof membrane

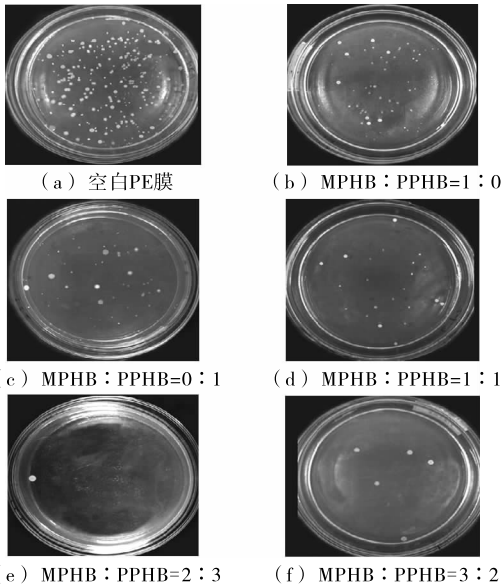


图 2 不同配方的 LDPE 抗菌防霉薄膜培养 24 h 后的金黄色葡萄球菌菌落数对比照片

Figure 2 Comparison of the number of colonies (*Staphylococcus aureus*) after 24 hours of incubation with different antibacterial and mouldproof LDPE membrane

MPH B 和 PPH B 质量比 2:3 时,具有较强的抗菌作用。可能是对羟基苯甲酸酯类的抗菌机理是通过破坏微生物的细胞膜,使细胞内的蛋白质变性,从而抑制菌落的生长,并且随着烷基碳链的增长,抗菌作用增强^[16]。当把 2 种碳链长短不同的酯类复配时,可以同时作用于微生物细胞的几个靶点,抑制一些酶的功能,干扰膜功能,破坏膜电位,包括营养物质运输,同时也干扰蛋白质、RNA、DNA 的合成,从而起到了协同抗菌作用。

表 2 不同配方的 LDPE 抗菌防霉膜抗大肠杆菌的抗菌率

Table 2 Antibacterial rate of different antibacterial and mouldproof LDPE membrane(*E.coli*) (*n*=5)

配方	每皿平均回收菌落数/CFU	抗菌率/%
空白 LDPE 膜	304(±11.7)	0.00
1 : 0	40(±5.4)	86.84
0 : 1	25(±3.6)	91.78
1 : 1	10(±1.2)	96.71
2 : 3	1(±0.0)	99.67
3 : 2	9(±0.8)	97.04

表 3 不同配方的 LDPE 抗菌防霉膜抗金黄色葡萄球菌的抗菌率

Table 3 Antibacterial rate of different antibacterial and mouldproof LDPE membrane (*Staphylococcus aureus*) (*n*=5)

配方	每皿平均回收菌落数/CFU	抗菌率/%
空白 LDPE 膜	245(±7.2)	0.00
1 : 0	41(±4.8)	83.27
0 : 1	29(±3.9)	88.16
1 : 1	22(±2.6)	91.02
2 : 3	1(±0.0)	99.59
3 : 2	5(±0.6)	97.96

2.1.2 抗霉菌性能 复配型对羟基苯甲酸酯 LDPE 薄膜的防霉效果见图 3,长霉等级见表 4。依据表 1,图 3(a)两黑色方框内为空白 LDPE 薄膜样品的大致霉菌蔓延面积,很明显长霉面积超过了样品的 10%,长霉等级二级,无防霉作用,加入 MPH B 和 PPH B 后,仅薄膜边缘有霉菌痕迹生长,面积明显小于样品的 10%,长霉等级达到一级,有防霉作用。对羟基苯甲酸酯能够抑制桔青霉的生长可能是其分子首先在塑料内部扩散,然后溶解于塑料表面,分散到与薄膜表面接触的微生物细胞表面^[17],与细胞外膜进行接触并被吸附,通过细胞膜进入到原生质内,干扰霉菌细胞膜的通透性,阻碍细胞膜对氨基酸的吸收,抑制呼吸酶系的活性,从而起到防霉作用^[18-19]。

2.2 机械性能

MPHB 和 PPHB 的加入对 LDPE 抗菌防霉膜拉伸强度和断裂伸长率的影响见图 4。由图 4 可知,LDPE 抗菌防霉膜的拉伸强度和断裂伸长率没有大的波动,拉伸强度在 (22.50±2.5) MPa,断裂伸长率在 (575.0±5)% ,复配对 LDPE 抗菌防霉膜没有太大的影响。空白 PE 膜的拉伸强度和断裂伸长率分别为 24.13 MPa 和 579.75%,单纯加入 MPH B 和 PPH B 后,拉伸强度和断裂伸长率稍微有所下降。当加入二者的复配物时,拉伸强度和断裂伸长率都有所提升,当 MPH B 和 PPH B 质量比为 2 : 3 时,抗菌防霉膜的拉伸强度和断裂伸长率分别达到了 24.69 MPa 和 575.20%,优于空白 PE 膜的机械性能,可能是 MPH B 和 PPH B 分子含有主链芳环^[20],有助于增加材料的强度。当单纯加入 MPH B

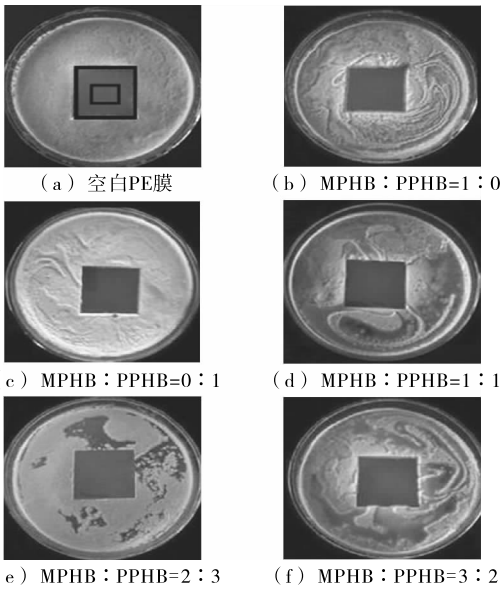


图 3 不同配方的 LDPE 抗菌防霉薄膜防霉效果对比照片

Figure 3 Comparison of anti-mildew effect of different LDPE membrane

表 4 不同配方的 LDPE 抗菌防霉膜的防霉性能

Table 4 Mouldproof performance of different antibacterial and mouldproof LDPE membrane

MPHB 与 PPHB 配比	空白 LDPE 膜	1 : 0	0 : 1	1 : 1	2 : 3	3 : 2
长霉等级	二级	一级	一级	一级	一级	一级

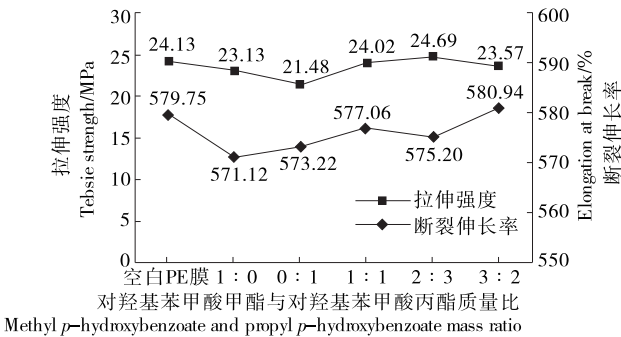


图 4 不同配方的 LDPE 抗菌防霉薄膜的拉伸强度和断裂伸长率

Figure 4 Tensile strength and elongation at break of anti-bacterial and mouldproof LDPE membrane in different formulations

和 PPHB 时,在加工过程中分子并不能在树脂中均匀分散,反而导致机械性能有所下降。而当加入两者的复配物时,由于引入的分子中同时含有芳环和长度不同的碳链,分子链段之间互相作用,使 MPH B 和 PPH B 在树脂中分散的更加均匀,芳环和碳链的作用得到了平衡,同时提高了薄膜的拉伸强度和断裂伸长率。且各配方薄膜的机械性能都符合 QB/T 1125—2000 未拉伸聚乙烯、聚丙烯薄膜的使用要求。

2.3 阻隔性能

由图 5、6 可知,加入对羟基苯甲酸酯类后,水蒸气透过率和透氧系数均有降低,即薄膜的阻隔性有一定的提高。空白 PE 薄膜的水蒸气透过率为 3.57 g/(m²·d),当加入 MPH B 和

PPHB后,均有不同程度的降低,当 MPH B和 PPHB复配质量比为 2:3 时,水蒸气透过率最低,为 2.33 g/(m²·d),相比空白 PE 薄膜阻湿性提高了 34.73%。空白 PE 薄膜的透氧系数为 25.94 ×10⁻¹⁵ cm³·cm/(cm²·s·Pa),加入 MPH B和 PPHB后,有明显的降低,当单独加入 MPH B时最低 [23.54×10⁻¹⁵ cm³·cm/(cm²·s·Pa)],相比空白膜阻氧性提高了 9.25%。所以对羟基苯甲酸酯的加入在一定程度上提高了薄膜的阻隔性。可能是薄膜中引入了大分子链和基团,这些链在薄膜中相互缠绕、排列,阻碍了水和气体的扩散和渗透。

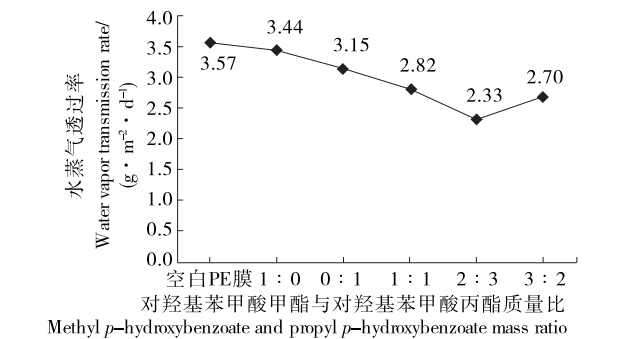


图 5 不同配方的低密度聚乙烯抗菌防霉薄膜的水蒸气透过率
Figure 5 Water vapor transmission rate of antibacterial and mouldproof Low density polyethylenemembrane in different formulations

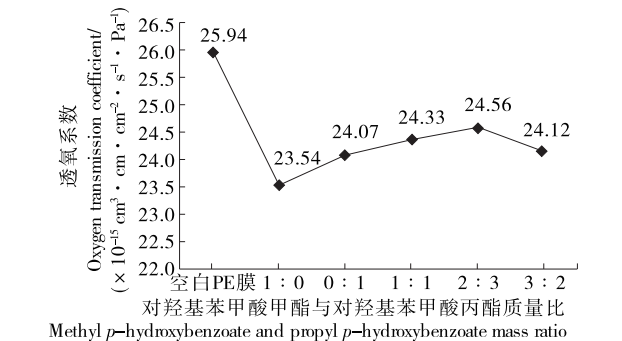


图 6 不同配方的低密度聚乙烯抗菌防霉薄膜的透氧系数
Figure 6 Oxygen transmission coefficient of antibacterial and mouldproof Low density polyethylenemembrane in different formulations

3 结论

对制备的复配型对羟基苯甲酸酯 LDPE 薄膜的抗菌防霉性能、机械性能及阻隔性能表征,发现单独加入 MPH B和 PPHB 薄膜的抗菌效果并不理想,当两者复配后具有协同抗菌作用,并且质量比为 2:3 时具有较强的抗菌效果,防霉等级达到一级。单独加入 MPH B和 PPHB 时,薄膜的拉伸强度和断裂伸长率稍有降低,复配后拉伸强度有提高。相比于空白 LDPE 薄膜,复配型抗菌防霉薄膜阻隔性有了一定的提高。所以复配型 LDPE 薄膜在具有较强的抗菌防霉作用的同时,其他基本性能也有所提高,具有应用于低水分活度食品内层包装的潜力。目前还没有学者对 MPH B和 PPHB 复配制成抗菌防霉薄膜进行相关研究,此项研究重点在于开发

一种新型抗菌防霉薄膜并探究其应用,接下来将对其实际应用作进一步的研究。

参考文献

[1] BLESSINGTON Tyann, THEOFEL Christopher G, HARRIS Linda J. A dry-inoculation method for nut kernels[J]. Food Microbiology, 2012, 33(2): 292-297.

[2] NUMMER B A, SHRESTHA S, SMITH J V. Survival of *Salmonella* in a high sugar, low water-activity, peanut butter flavored candy fondant[J]. Food Control, 2012, 27(1): 184-187.

[3] 连风, 赵伟, 杨瑞金. 低水分活度食品的微生物安全研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(19): 333-337.

[4] 莱斯特, 朱雪卿. 水分活性与食品保藏[J]. 肉类研究, 1996(3): 44-48.

[5] 姜楠楠, 陈小亮. 抗菌膜在食品包装中的应用及发展趋势[J]. 塑料包装, 2016, 26(04): 21-23.

[6] BHANU Malhotra, ANU Keshwani, HARSHA Kharkwal. Antimicrobial food packaging: potential and pitfalls[J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6(11): 1-9.

[7] PAOLA Appendinia, JOSEPH Hotchkissb. Review of antimicrobial food packaging[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2002(3): 113-126.

[8] ROBERT C. Discovering new antimicrobial agents[J]. International Journal of Antimicrobial Agents, 2010, 37(1): 2-9.

[9] ANASTASIA E K, PANAGIOTIS N S. Applications of active packaging for increasing microbial stability in foods: natural volatile antimicrobial compounds[J]. Current Opinion in Food Science, 2016, 12: 1-12.

[10] 陈基玉, 杨福馨, 魏丽娟, 等. 聚乙烯醇改性无纺布抗菌复合膜的制备及其性能研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 124-127.

[11] 宋慕波, 方方, 罗自生, 等. 纳米二氧化硅改性 LDPE 膜对贡柑贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 114-118.

[12] JAMES M. Food preservation with chemicals[J]. Modern Food Microbiology, 1998, 36: 273-303.

[13] MATOS T J S, JENSEN B B, BERNARDO F M A, et al. Mycoflora of two types of Portuguese dry-smoked sausages and inhibitory effect of sodium benzoate, potassium sorbate, and methyl *p*-hydroxybenzoate on mold growth rate[J]. Journal of Food Protection, 2007, 70(6): 1 468-1 474.

[14] 陈建文, 厉华明, 周荣荣. 食品中对羟基苯甲酸酯类的应用现状与检测方法[J]. 中国酿造, 2008(8): 4-5.

[15] 陆书来, 杜林雪, 王彪, 等. MIT 防霉聚乙烯保鲜膜研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(3): 312-315.

[16] 郑萍, 丁培, 武利平, 等. 对羟基苯甲酸酯类防腐剂的抑菌效果评价[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25(10): 1 540-1 541.

[17] 朱文亮. 食品塑料包装材料中有机污染物的高通量检测与迁移研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 51-54.

[18] 杜林雪. 防霉防雾聚乙烯保鲜膜研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2013: 34-35.

[19] 黄小兰, 盖智星, 王日葵, 等. 对羟基苯甲酸处理对采后柑橘炭疽病的抑制及机理研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 121-125.

[20] LI Xi-hong, XIAO Yao, WANG Biao. Effects of poly(1,2-propylene glycol adipate) and nano-CaCO₃ on DOP migration and mechanical properties of flexible PVC[J]. Applied Polymer Science, 2011, 124(2): 1 737-1 743.