

文章编号 1672-6634(2024)03-0062-07

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2023070003

两类农用棚膜防雾滴涂层表面张力

王秀珍,滕谋勇,杨铭霞,李梦瑶,贾清,战艳虎

(聊城大学 材料科学与工程学院,山东 聊城 252059)

摘要 近些年,为了提高大棚的透光性,提高作物的产量和质量,农用棚膜亲水涂层得到广泛关注,市场上出现了各种亲水涂层。但是对于表面张力的研究却很少。为此,在聚乙烯(PE)薄膜上制备不同配比 PVA/ Al_2O_3 亲水涂层及丙烯酸、丙烯酸六氟丁酯和 4-丙烯酰氧基二苯甲酮三元共聚物亲水涂层,测量了对于三种液体(水、二碘甲烷、甲酰胺)的接触角。利用几何平均(OW)法和 Lifshitz-van der Waals/酸碱(LW/AB)法间接计算亲水涂层的表面张力,并与未处理 PE 薄膜和电晕处理的 PE 薄膜进行对比,发现亲水涂层的表面张力大于电晕处理的 PE 薄膜和未处理的 PE 薄膜;且 OW 法计算得到 PVA/ Al_2O_3 亲水涂层比例为 5:3 时表面张力最大;LW/AB 法计算得到 PVA/ Al_2O_3 亲水涂层比例为 5:2 时表面张力最大。由原子力显微镜得到的 PVA/ Al_2O_3 亲水涂层比例为 5:3 时粗糙度最大。本研究可为农用棚膜防雾滴涂层的开发提供理论指导。

关键词 表面张力;接触角;润湿性;亲水涂层;防雾滴

中图分类号 TQ325

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Surface Tension of Two Types of Antifogging Coating for Farm Shed Film

WANG Xiuzhen, TENG Mouyong, YANG Mingxia,
LI Mengyao, JIA Qing, ZHAN Yanhu

(School of Materials Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract In recent years, in order to improve the light transmittance of greenhouses and improve the yield and quality of crops, the hydrophilic coating of agricultural shed film has received widespread attention, and a variety of hydrophilic coatings have appeared in market. However, the surface tension is rarely studied. Herein, polyvinyl alcohol/alumina oxide (PVA/ Al_2O_3) hydrophilic coatings with different ratios of two components and ternary copolymers hydrophilic coatings of acrylic acid, hexafluorobutyl acrylate, and 4-acryloyloxy benzophenone were prepared on polyethylene (PE) surface. The contact angles of hydrophilic coatings were measured. The surface tensions of the hydrophilic coating, untreated PE film and corona treated PE film were calculated indirectly by Owens-Wendt (OW) and Lifshitz-van der Waals/Acid-Base (LW/AB) methods. The results show that the surface tension of the hydrophilic coating is greater than

收稿日期:2023-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52103054)资助

通信作者:滕谋勇,男,汉族,博士,教授,研究方向:高分子加工,E-mail: tengmouyong@lccu.edu.cn.

those of corona-treated PE film and untreated PE film. Moreover, the surface tension is the largest when the mass ratio of PVA to Al_2O_3 is 5 : 3 calculated by OW method. In the case of LW/AB method, the calculated surface tension is the largest when the mass ratio of PVA to Al_2O_3 is 5 : 2. Atomic force microscopy shows that the PVA/ Al_2O_3 hydrophilic coating with ratio of 5 : 3 has the largest roughness. This study provides theoretical guidance for the development of antifogging coating for agricultural shed film.

Key words surface tension; contact angle; wettability; hydrophilic coating; antifogging

0 引言

我国是个农业大国^[1],农用塑料薄膜现已普遍应用,有效提高了农业产量^[2]。其中,聚乙烯(PE)棚膜是由低密度聚乙烯(LDPE)、线型低密度聚乙烯(LLDPE)、高密度聚乙烯(HDPE)等通过添加助剂共混改性得到的^[3]。PE棚膜具有高透明性,易加工成型,耐化学腐蚀且价格低廉等优点,但PE棚膜表面张力小,水浸润性差,当大棚内外有温度差时,就会出现结雾现象,水蒸气就会在薄膜上凝结成小液滴,降低薄膜的透光率^[4-6],使作物产量下降。近些年来,防雾材料的研究受到广泛关注,传统的防雾方法是在生产PE农膜时添加防雾剂;例如李家政等^[7]将几种防雾剂以及PVA与PE粒料共混制备防雾膜。韦佳程等^[8]将单油酸甘油酯与聚乙烯共混挤出的方法制备了防雾薄膜。这种方法的缺点是防雾时间较短,且防雾剂分子与基材的结合不良。另一种有效的方法是在膜表面制备亲水性涂层。Bai等^[9]将阳离子共聚物POSS-P(QAC-co-AE-MA)和亲水共聚物P(HEAA-co-GMA)通过简便且绿色的共混方法,开发了新型防雾/抗菌涂料。Mansoor等^[10]通过添加Tris缓冲盐水增强防雾剂和PVA聚合物之间的相互作用,用二氧化硅纳米颗粒增强涂层的稳定性,棚膜的防雾滴寿命得到了明显延长,测得涂层接触角小于2°,在60℃热雾环境下的防雾性能可以持续1个月。

应用最多的是有机无机杂化材料和水溶性光固化高分子两类。付大鹏^[11]等制备了PVA/ Al_2O_3 亲水涂层,然后通过浸渍法涂覆在PE薄膜表面,测得接触角为21.1°,在60℃热雾环境下防雾寿命超过60天。膜在500 nm波长处的透光率比空白PE膜增加了3.5%。使用HB铅笔在涂层表面制造划痕,将其放在60℃热雾环境下,10 h后划痕完全修复。证明了PVA/ Al_2O_3 亲水涂层具有优异的防雾性能、透光性能和自修复性能,研究表明丙烯酸-甲基丙烯酸三氟乙酯-丙烯酰氧基二苯甲酮三元共聚物具有良好的防雾滴性能^[12]。虽然,上述两类防雾滴材料具有明显效果,但有关表面张力的研究较少。基于几何平均(OW)法和Lifshitz-van der Waals/酸碱(LW/AB)法两种方法,研究不同配比PVA/ Al_2O_3 亲水涂层和丙烯酸、丙烯酸六氟丁酯和4-丙烯酰氧基二苯甲酮(AHB)三元共聚物亲水涂层的表面张力。

1 计算方法

主要基于OW法和LW/AB法计算未处理的PE薄膜,电晕处理的PE薄膜,不同配比PVA/ Al_2O_3 亲水涂层和AHB三元共聚物亲水涂层的表面张力。

1.1 OW法

一般粘附力可分为三大类:化学键、氢键、范德华力,理论上,通过氢键和范德华力产生的吸引力有足够的粘附性,不需要化学键,但有时其润湿性是不够的,所以杨氏方程给出热力学润湿方程^[13]

$$\gamma_L \cos \theta = \gamma_S - \gamma_{SL} - \pi_e, \quad (1)$$

式中 γ_L 、 γ_{SL} 、 γ_S 、 θ 、 π_e 分别为液体的表面张力、固液界面张力、固体的表面张力、液体在固体材料表面上的接触角、液体吸附蒸汽在固体上的平衡压力。

使用如下OW方程计算固液界面之间的界面张力^[14]

$$\gamma_{SL} = \gamma_S + \gamma_L - 2(\sqrt{\gamma_S^p \gamma_L^p} + \sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d}), \quad (2)$$

式中 γ_S^p 、 γ_L^p 、 γ_S^d 、 γ_L^d 分别为固体极性力、液体极性力、固体色散力、液体色散力。

将式(1)与式(2)联立可得到

$$\gamma_L(1 + \cos\theta) = 2(\sqrt{\gamma_s^p \gamma_L^p} + \sqrt{\gamma_s^d \gamma_L^d}) \quad (3)$$

所用液体的表面张力及其组成的表面张力如表 1 所示。

表 1 所用液体的表面张力及其组成^[14]

Table 1 The surface tensions and its components for liquids used^[14]

Liquid	$\gamma_L^d / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_L^p / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_L / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$
Water	21.8	51	72.8
Diiodomethane	50.8	0	50.8
Formamide	39	19	58

1.2 LW/AB 方法

许多液态或固态非金属凝聚材料,不仅有非极性范德华相互作用,还存在氢键型极性相互作用。所以需考虑电子受体-电子供体之间相互作用或路易斯酸碱(AB)相互作用。AB 相互作用称为极性相互作用^[15],即固体和液体的表面张力可以表示为

$$\gamma_i = \gamma_i^{\text{LW}} + \gamma_i^{\text{AB}} \quad (4)$$

式中 γ_i^{LW} 、 γ_i^{AB} 、 i 分别为非极性范德华力、极性力、液体或固体。

由于电子受体、电子供体和极性的相互作用本质上是不对称的,需要考虑到这种不对称性。极性的酸碱作用一部分来自电子受体 γ^+ , 另一个来自电子给体 γ^- , 可以通过电子受体和电子给体的几何平均值来表达^[14],公式如

$$\gamma_i^{\text{AB}} = 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-} \quad (5)$$

式中 γ^+ 和 γ^- 分别为电子受体表面张力和电子给体表面张力。

将等式(4)与式(5)与 OW 方程联立,具有非极性和酸碱成分的系统固液界面之间的界面张力可表示为

$$\gamma_{\text{SL}} = \gamma_s + \gamma_L - 2(\sqrt{\gamma_s^{\text{LW}} \gamma_L^{\text{LW}}} + \sqrt{\gamma_s^- \gamma_L^+} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_L^-}) \quad (6)$$

式中 γ_s^- 、 γ_L^+ 、 γ_s^+ 、 γ_L^- 分别为固体表面电子给体表面张力、液体表面电子受体表面张力、固体表面电子受体表面张力、液体表面电子给体表面张力。

将式(1)与式(6)进行联立可以得

$$\gamma_L(1 + \cos\theta) = 2(\sqrt{\gamma_s^{\text{LW}} \gamma_L^{\text{LW}}} + \sqrt{\gamma_s^- \gamma_L^+} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_L^-}) \quad (7)$$

测试所用液体的表面张力如表 2 所示。

表 2 测试液体的表面张力^[14]

Table 2 The surface tensions, acid-base components and polar fractions for the testing liquids^[14]

Liquid	$\gamma_L / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_L^{\text{LW}} / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_L^{\text{AB}} / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_L^+ / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_L^- / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$
Water	72.8	21.8	51	25.5	25.5
Diiodomethane	50.8	50.8	0	0.01	0
Formamide	58	39	19	2.3	39.6

2 实验部分

2.1 实验试剂及材料

PE 薄膜由 LLDPE 和 LDPE 以 3 : 1 挤出成型,由山东东大塑业有限公司提供;PVA-117 由日本可乐丽株式会社提供;纳米铝溶胶(VK-L10A)由杭州智钛净化科技有限公司提供;十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)由国药集团化学试剂有限公司提供;丙烯酸由上海麦克林生化科技股份有限公司提供;丙烯酸六氟丁酯由阿拉丁公司提供;4-丙烯酰氧基二苯甲酮由 Ark 公司提供。

2.2 样品制备

铝溶胶和 CTAB 溶液加入到 PVA 溶液中配制成 PVA/ Al_2O_3 亲水涂覆液;通过调整铝溶胶的加入量,

得到 PVA 和 Al_2O_3 的质量比为 5 : 2、5 : 3、5 : 4 的亲水涂覆液。将 AHB 和 AIBN(偶氮二异丁腈)加到乙醇中,抽真空充氮气 6 次,加热至 70 °C 反应 8 h,得到三元共聚物亲水涂覆液。然后,通过浸渍提拉法在 PE 薄膜表面,分别涂覆所得亲水涂覆液,再放入 80 °C 鼓风干燥箱中干燥 6 min,得到带有亲水防雾涂层的 PE 薄膜。

2.3 测试与表征

利用接触角测量仪(上海中晨数字技术设备有限公司,JC200C1)测量接触角。利用扫描电镜(德国蔡司公司,FE-SEM)表征样品的形貌。利用原子力显微镜(AFM,布鲁克公司,MultiMode-8)表征粗糙度(R_a)。

3 结果与分析

3.1 接触角数据

利用座滴法测试不同材料的 PE 膜表面对水、二碘甲烷、甲酰胺试剂的接触角(CA),重复三次测试取平均值。图(1~3)和表 3 为接触角测试结果。

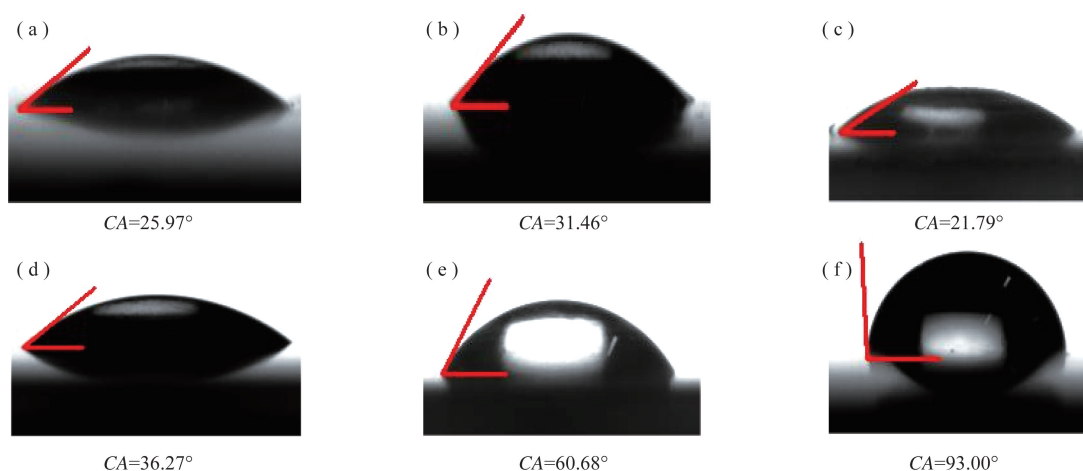


图 1 涂层对水的接触角 (a) 三元共聚物涂层; (b) PVA/ Al_2O_3 5 : 2 涂层; (c) PVA/ Al_2O_3 5 : 3 涂层; (d) PVA/ Al_2O_3 5 : 4 涂层; (e) 电晕处理 PE; (f) 未处理 PE

Fig. 1 Contact angles of water on (a) ternary copolymer coating; (b) PVA/ Al_2O_3 5 : 2 coating; (c) PVA/ Al_2O_3 5 : 3 coating; (d) PVA/ Al_2O_3 5 : 4 coating; (e) corona treated PE; (f) untreated PE

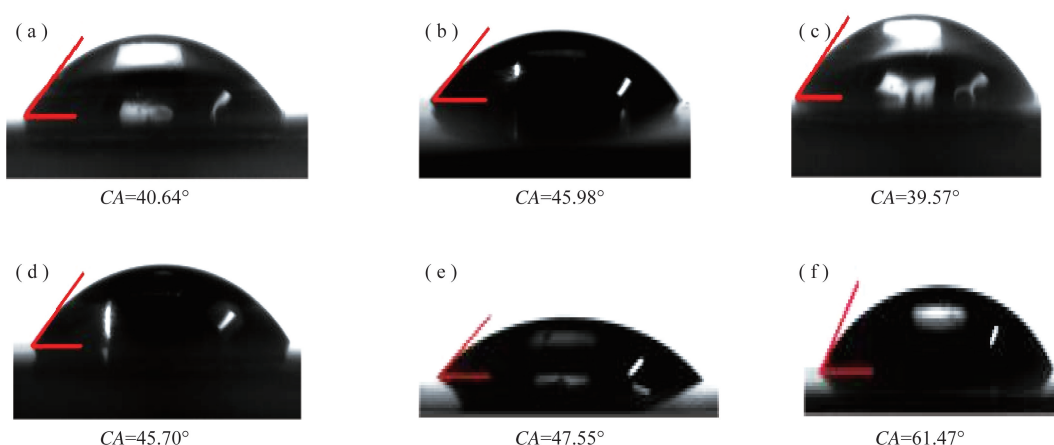


图 2 涂层对二碘甲烷的接触角 (a) 三元共聚物涂层; (b) PVA/ Al_2O_3 5 : 2 涂层; (c) PVA/ Al_2O_3 5 : 3 涂层; (d) PVA/ Al_2O_3 5 : 4 涂层; (e) 电晕处理 PE; (f) 未处理 PE

Fig. 2 Contact angles of diiodomethane on (a) ternary copolymer coating; (b) PVA/ Al_2O_3 5 : 2 coating; (c) PVA/ Al_2O_3 5 : 3 coating; (d) PVA/ Al_2O_3 5 : 4 coating; (e) corona treated PE; (f) untreated PE

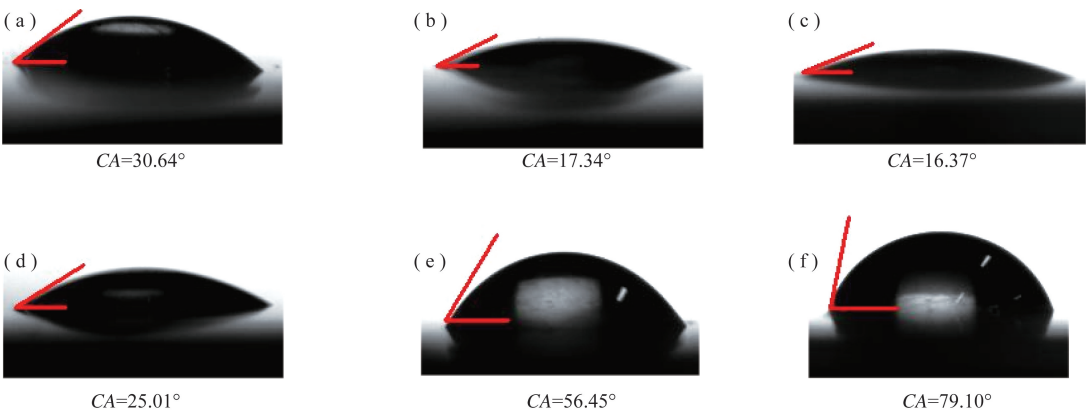


图3 涂层对甲酰胺的接触角 (a) 三元共聚物涂层; (b) PVA/Al₂O₃ 5 : 2 涂层; (c) PVA/Al₂O₃ 5 : 3 涂层; (d) PVA/Al₂O₃ 5 : 4 涂层; (e) 电晕处理 PE; (f) 未处理 PE

Fig. 3 Contact angles of formamide on (a) ternary copolymer coating; (b) PVA/Al₂O₃ 5 : 2 coating; (c) PVA/Al₂O₃ 5 : 3 coating; (d) PVA/Al₂O₃ 5 : 4 coating; (e) corona treated PE; (f) untreated PE

表3 不同试剂在不同材料上的接触角

Table 3 Contact angles of liquids on different materials (°)						
Liquid	Untreated PE	Corona treated PE	PVA/Al ₂ O ₃ 5 : 2 coating	PVA/Al ₂ O ₃ 5 : 3 coating	PVA/Al ₂ O ₃ 5 : 4 coating	Ternary copolymer coating
Water	95.12	59.15	29.33	20.58	28.63	26.86
Diiodomethane	60.06	47.44	49.09	38.41	44.65	38.32
Formamide	73.93	55.05	16.88	16.46	24.56	31.92

3.2 表面张力计算

3.2.1 OW 法。将式(3)变换可得

$$\frac{\gamma_L(1 + \cos\theta)}{2\sqrt{\gamma_L^d}} = \sqrt{\gamma_S^p} \sqrt{\frac{\gamma_L^p}{\gamma_L^d}} + \sqrt{\gamma_S^d}, \tag{8}$$

令 $A = \sqrt{\frac{\gamma_L^p}{\gamma_L^d}}$, $B = \frac{\gamma_L(1 + \cos\theta)}{2\sqrt{\gamma_L^d}}$ 将水和二碘甲烷试剂的 γ_L^p 、 γ_L^d 代入可求出 A 的值,将测得的接触角与试剂的 γ_L 、 γ_L^d 代可求算出 B 的值,即式(8)变成 $B = A\sqrt{\gamma_S^p} + \sqrt{\gamma_S^d}$,将 A、B 值算出后,进行线性拟合,得到拟合直线的斜率为 $\sqrt{\gamma_S^p}$,截距为 $\sqrt{\gamma_S^d}$ 。表4 为线性拟合所得的斜率和截距,图4 为不同材料的 A 与 B 值的拟合曲线。进一步,由公式 $\gamma_S = \gamma_S^p + \gamma_S^d$,可得到 γ_S ,结果如表5 所示。

表4 不同材料 $\sqrt{\gamma_S^p}$ 和 $\sqrt{\gamma_S^d}$ 的值

Table 4 The values of $\sqrt{\gamma_S^p}$ and $\sqrt{\gamma_S^d}$ for different materials (mN · m) ^{1/2}						
Materials	Untreated PE	Corona treated PE	PVA/Al ₂ O ₃ 5 : 2 coating	PVA/Al ₂ O ₃ 5 : 3 coating	PVA/Al ₂ O ₃ 5 : 4 coating	Ternary copolymer coating
$\sqrt{\gamma_S^d}$	5.343	5.975	5.898	6.357	6.1	6.36
$\sqrt{\gamma_S^p}$	1.148 37	3.803 27	5.683 01	5.710 46	5.581 05	5.484 31

由表5 的实验结果看出,表面张力从大到小依次 PVA/Al₂O₃ 5 : 3 涂层、三元共聚物涂层、PVA/Al₂O₃ 5 : 4 涂层、PVA/Al₂O₃ 5 : 2 涂层、电晕处理 PE 薄膜、未处理的 PE。表面张力最大的是 PVA/Al₂O₃ 5 : 3 涂层数值是 73.02 mN/m 与电晕处理的薄膜相比大 22.854 mN/m,三元共聚物涂层的表面张力是

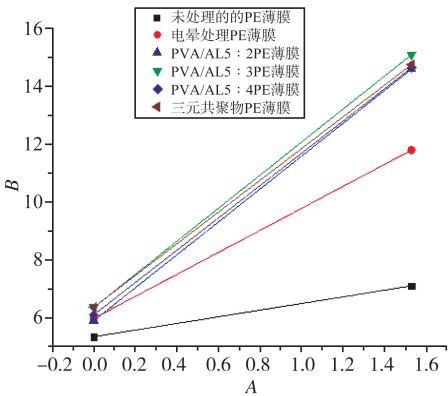


图4 不同材料的 A 与 B 值的线性拟合曲线

Fig. 4 Linear fitting curves of A and B values for different materials

70.528 mN/m,比电晕处理过的 PE 薄膜大 20.362 mN/m。且 PVA/Al₂O₃ 5:2 涂层和 PVA/Al₂O₃ 5:4 涂层都比电晕处理的 PE 薄膜大,说明 PVA/Al₂O₃ 亲水涂层和三元共聚物具有较好的亲水性。电晕处理的 PE 薄膜的表面张力大于未处理的 PE 薄膜,说明经过电晕处理可以提高表面张力,增大亲水性。

表 5 不同材料 γ_s^d 、 γ_s^p 、 γ_s 的值

Table 5 The values of γ_s^d , γ_s^p , γ_s for different materials							mN/m
Materials	Untreated PE	Corona treated PE	PVA/Al ₂ O ₃ 5:2 coating	PVA/Al ₂ O ₃ 5:3 coating	PVA/Al ₂ O ₃ 5:4 coating	Ternary copolymer coating	
γ_s^d	28.548	35.701	34.786	40.411	37.210	40.450	
γ_s^p	1.319	14.465	32.297	32.609	31.148	30.078	
γ_s	29.867	50.166	67.083	73.020	68.358	70.528	

3.2.2 LW/AB 法。将水、二碘甲烷、甲酰胺三种试剂的 γ_L^{LW} 、 γ_L^+ 、 γ_L^- 和测得的接触角代入到方程(7)中,可得到 3 个三元一次方程,将其联立可以算出 γ_s^{LW} 、 γ_s^- 、 γ_s^+ ,再由公式 $\gamma_s = \gamma_s^{LW} + 2\sqrt{\gamma_s^- \gamma_s^+}$ 可以得到 γ_s ,数据如表 6 所示。

表 6 不同材料 γ_s^{LW} 、 γ_s^- 、 γ_s^+ 、 γ_s 的值

Table 6 The values of γ_s^{LW} , γ_s^- , γ_s^+ , γ_s for different materials							mN/m
Materials	Untreated PE	Corona treated PE	PVA/Al ₂ O ₃ 5:2 coating	PVA/Al ₂ O ₃ 5:3 coating	PVA/Al ₂ O ₃ 5:4 coating	Ternary copolymer coating	
γ_s^{LW}	28.334	34.81	33.733	39.163	36.048	39.163	
γ_s^-	1.885	28.558	41.139	49.745	45.9	53.334	
γ_s^+	0.073	0.01	2.917	1.25	1.459	0.301	
γ_s	29.076	35.879	55.642	54.934	52.415	47.176	

由表 6 的实验结果看出,表面张力从大到小依次是 PVA/Al₂O₃ 5:2 涂层、PVA/Al₂O₃ 5:3 涂层、PVA/Al₂O₃ 5:4 涂层、三元共聚物涂层、电晕处理 PE 薄膜、未处理的 PE 薄膜。表面张力最大的是 PVA/Al₂O₃ 5:2 涂层,数值是 55.642 mN/m,与电晕处理的薄膜相比大 19.055 mN/m,三元共聚物涂层的表面张力是 47.176 mN/m,比电晕处理 PE 薄膜大 11.297 mN/m。且 PVA/Al₂O₃ 5:3 涂层和 PVA/Al₂O₃ 5:4 涂层都比电晕处理的 PE 薄膜大,说明 PVA/Al₂O₃ 亲水涂层和三元共聚物涂层具有较好的亲水性。电晕处理的 PE 薄膜的表面张力大于未处理的 PE 薄膜,说明经过电晕处理可以提高表面张力,增大亲水性。

3.2.3 两种计算固体表面张力方法的比较。表 5 和表 6 中可以看出用 OW 法计算的表面张力值普遍比 LW/AB 法计算得到的大。OW 法只需测两种液体对于不同材料的接触角,进行线性拟合,即可得到表面张力。LW/AB 法需测三种液体对不同材料的接触角,联立三元一次方程,可以得到表面张力,因此 OW 法较为简便。

3.3 表面形貌分析

图 5 显示了薄膜的 FE-SEM 和 AFM 图像。电晕 PE 薄膜的表面形貌如图 5(a,a*)所示,可以看到表面分布有大量毛状纤维,并且凹凸不平。涂有 PVA/Al₂O₃ 的表面显得较为粗糙,Al₂O₃ 颗粒均匀地分散在 PVA 中,并且使原本光滑平坦的表面变得粗糙[图 5(b,b*)和(c,c*)]。三元共聚物涂层表面凹凸不平,Al₂O₃ 在 PVA 中分布均匀性较差,粗糙度较大。原子力显微镜得到的 Ra 由大到小依次是 PVA/Al₂O₃ 5:3 涂层、PVA/Al₂O₃ 5:2 涂层、三元共聚物涂层、电晕处理 PE 薄膜。

4 结论

在聚乙烯(PE)薄膜上制备了不同配比 PVA/Al₂O₃ 亲水涂层及丙烯酸、丙烯酸六氟丁酯和 4-丙烯酰氧基二苯甲酮三元共聚物亲水涂层,测量了对于三种液体(水、二碘甲烷、甲酰胺)的接触角。进一步利用 OW 法和 LW/AB 法间接计算亲水涂层的表面张力。OW 计算的表面张力值高于 LW/AB 计算值,且 OW 计算较为简单便捷。OW 计算和 LW/AB 计算得到比例为 5:2、5:3、5:4 的 PVA/Al₂O₃ 亲水涂层和三元共

聚物涂层的表面张力值高于 PE 薄膜和电晕处理的 PE 薄膜。使用 OW 法计算 PVA/Al₂O₃ 5 : 3 涂层的表面张力最大,且从原子力显微镜中得到的 Ra 也是最大的,但表面张力与粗糙度间的关联较小。

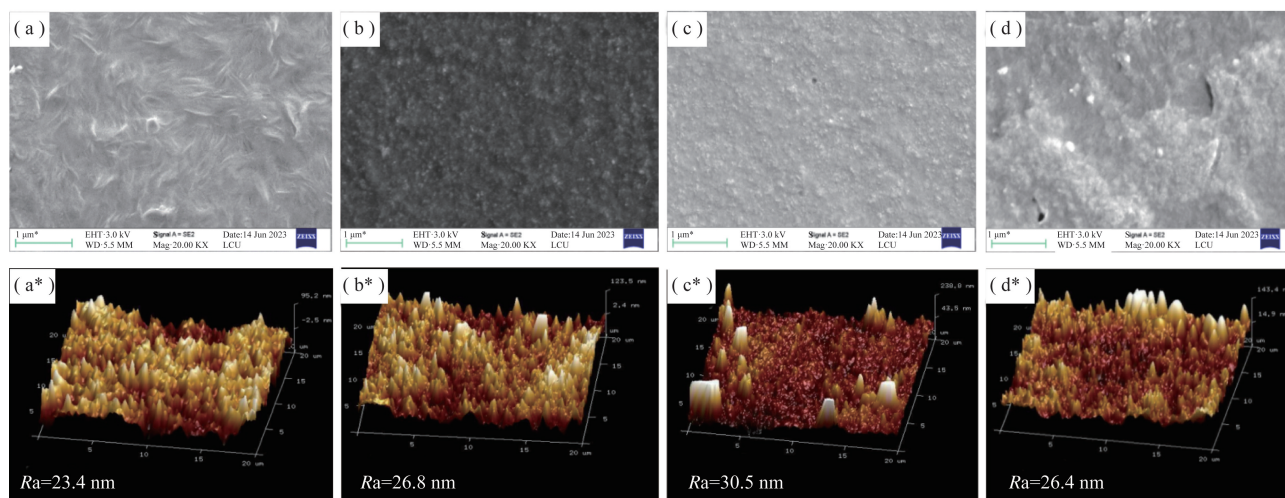


图 5 (a,a*) 电晕处理 PE 薄膜,(b,b*) PVA/Al₂O₃ 5 : 2 涂层,(c,c*) PVA/Al₂O₃ 5 : 3 涂层,
(d,d*) 三元共聚物涂层的 FE-SEM 和 AFM 图像

Fig. 5 FE-SEM and AFM images of (a,a*) Corona treated PE, (b,b*) PVA/Al₂O₃ 5 : 2 coating,
(c,c*) PVA/Al₂O₃ 5 : 3 coating, (d,d*) Ternary copolymer coating

参 考 文 献

- [1] 魏茂强. 农用塑料薄膜的发展与探讨[J]. 中国塑料, 2022, 36(6): 92-99.
- [2] 郑雅婷. 农用塑料薄膜对陕西省农业产值的影响——基于 VAR 模型的实证分析[J]. 农村经济与科技, 2022, 33(3): 45-48.
- [3] 王欣,王克俭. 农用大棚塑料薄膜材料发展综述[J]. 塑料包装, 2019, 29(3):11-15.
- [4] 韩莉萍. 高效持久 LLDPE 流滴棚膜的制备与性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [5] 黄余港. 有机-无机复合防雾涂层的制备及其性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [6] DURÁN I R, LAROCHE G. Current trends, challenges, and perspectives of anti-fogging technology: surface and material design, fabrication strategies, and beyond[J]. Progress in Materials Science, 2019, 99: 106-186.
- [7] 李家政, 王强. PVA 对防雾 PE 膜的防雾性能的影响[J]. 塑料工业, 1999, 27(1): 41-42+37.
- [8] 韦佳程, 罗学刚, 林晓艳, 等. 单油酸甘油酯对聚乙烯棚膜的防雾性影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(5): 71-73.
- [9] BAI S, LI X, ZHAO Y, et al. Antifogging/antibacterial coatings constructed by N-hydroxyethylacrylamide and quaternary ammonium-containing copolymers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(10): 12305-12316.
- [10] MANSOOR B, IQBAL O, HABUMUGISHA J C, et al. Polyvinyl alcohol (PVA) based super-hydrophilic anti-fogging layer assisted by plasma spraying for low density polyethylene (LDPE) greenhouse films[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 159: 106412.
- [11] 付大鹏. 棚膜用防雾滴涂覆液的制备及性能研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2022.
- [12] GONG X, YU H, WANG L, et al. Tailoring amphiphilic polymeric coating with durable antifogging performance[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 179: 107523.
- [13] DURÁN I R, LAROCHE G. Water drop-surface interactions as the basis for the design of anti-fogging surfaces: theory, practice, and applications trends[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2019, 263: 68-94.
- [14] ZOLEK-TRYZNOWSKA Z, PRICA M, PAVLOVIĆ Ž, et al. The influence of aging on surface free energy of corona treated packaging films[J]. Polymer Testing, 2020, 89: 106629.
- [15] ESKHAN A, ALQASAS N, JOHNSON D. Interaction mechanisms and predictions of the biofouling of polymer films: a combined atomic force microscopy and quartz crystal microbalance with dissipation monitoring study[J]. Langmuir, 2023, 39(18): 6592-6612.

(责任编辑:蒲锡鹏)