

增塑剂对马铃薯淀粉基复合膜物理机械性能的影响

贾超¹, 王利强^{1,2}, 卢立新^{1,2}, 赵艺程¹

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 中国包装总公司食品包装技术与安全重点实验室, 无锡 214122)

摘要: 以马铃薯淀粉、普鲁兰多糖、明胶为成膜物质, 氯化钙为交联剂, 甘油、山梨醇、聚乙二醇为增塑剂, 采用流延法制备了马铃薯淀粉基复合膜, 研究了3种增塑剂对复合膜物理机械性能的影响。结果表明: 复合膜的抗拉强度和弹性模量均随增塑剂含量的增加而显著减小, 断裂伸长率随甘油和山梨醇含量的增加而显著增加, 聚乙二醇对其影响不显著; 复合膜的水蒸气透过率和水溶性均随增塑剂含量的增加而增加; 聚乙二醇能够显著降低复合膜的透光率。

关键词: 马铃薯淀粉; 普鲁兰多糖; 明胶; 增塑剂; 可食膜

中图分类号: TB484.6; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)13-0048-05

Effect of Plasticizers on Physical and Mechanical Properties of Potato Starch-based Composite Films

JIA Chao¹, WANG Li-qiang^{1,2}, LU Li-xin^{1,2}, ZHAO Yi-cheng¹

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Key Laboratory of Food Packaging Techniques and Safety of China National Packaging Corporation, Wuxi 214122, China)

Abstract: Potato starch-based composite films were prepared by casting using potato starch, pullulan, gelatin as film forming material, calcium chloride as cross-linking agent, and glycerol, sorbitol, and polyethylene glycol as plasticizer. The effects of three kinds of plasticizers on physical and mechanical properties of composite films were studied. The results showed that tensile strength and Young's modulus of the composite films decrease significantly with plasticizer contents; elongation increases significantly with glycerol and sorbitol contents; effect of polyethylene glycol on elongation is not obvious; water vapor permeability and water solubility of composite films increase with plasticizer contents; polyethylene glycol can reduce the light transmission rate of the composite films significantly.

Key words: potato starch; pullulan; gelatin; plasticizer; edible film

淀粉膜具有良好的拉伸性、透明度、耐折性、水不溶性和低透气率等特点。其中, 马铃薯淀粉膜在膜强度、柔韧性、透明度和溶解度等方面都优于谷物淀粉所成的膜^[1]。普鲁兰多糖制成的薄膜透明、有光泽、强度高, 具有良好的热封性, 透气性比其他高分子膜低, 氧气、氮气、二氧化碳、香气等气体几乎不能透过, 且具有抗油脂的特性^[2]。明胶可食性膜具有阻氧性、防止油脂迁移和抗微生物繁殖等作用, 可用于包裹水

分含量低、含脂量高的食品或药物囊衣。

当前, 增塑剂对淀粉单膜和复合膜性能的影响研究较多^[3-7], 而以马铃薯淀粉、普鲁兰多糖、明胶为成膜物质, 氯化钙为交联剂, 研究增塑剂对其性能的影响目前还没有报道。因此, 笔者以马铃薯淀粉、普鲁兰多糖、明胶为成膜物质, 氯化钙为交联剂, 研究甘油、山梨醇、聚乙二醇对其物理机械性能的影响。

收稿日期: 2012-05-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP21115); 江南大学青年基金(2007LQN18); 中国包装总公司科技计划项目[2008]114号; 江南大学校级创新团队发展计划(PIRTJiangnan)资助

作者简介: 贾超(1986—), 男, 河北保定人, 江南大学硕士生, 主攻食品包装技术。

通讯作者: 王利强(1977—), 男, 甘肃武都人, 博士, 江南大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为食品包装技术。

1 实验

1.1 材料与仪器

普鲁兰多糖,河南所以化学试剂有限公司生产;马铃薯淀粉、明胶、无水氯化钙、甘油、山梨醇、聚乙二醇,国药集团化学试剂有限公司;YJ501 超级恒温水浴锅,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司;JB-200-S 数字显示转速电动搅拌机,上海标本模型厂制造;876A-S2 数显真空干燥箱,上海浦东荣丰科学仪器有限公司;Q/ILBN2-2006CH-1-S 千分手式薄膜测厚仪,上海六菱仪器厂;LRX Plus 型万能电子材料试验机,英国 LLOYD 公司;UV-2802 型紫外可见光分光光度计,尤尼柯(上海)仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 复合膜的制备

用 100 mL 去离子水溶解 3.5 g 马铃薯淀粉,80 °C 水浴糊化 20 min,加入 1 g 普鲁兰多糖和 0.5 g 明胶,水浴搅拌 20 min,分别加入不同质量的甘油、山梨醇、聚乙二醇作为增塑剂和 0.1 g 氯化钙作为交联剂,用去离子水定容到 200 mL,水浴搅拌 15 min,在有机玻璃板上流延成膜,在 50 °C 下烘干。冷却揭膜,保存备用。

1.2.2 性能测试

1) 膜厚度测定。用 Q/ILBN2-2006CH-1-S 千分手式薄膜测厚仪(测量精度为 0.001 mm)在被测膜上随机取 5 点测定,取平均值。

2) 机械性能测定。根据 GB 1040.3-2006^[8],将薄膜裁成 15 mm×150 mm 的长条,在电子材料试验机上以 50 mm/min 的速度测定薄膜的机械性能,每组做 6 个平行实验,取 3 个接近的数值的平均值。

3) 水蒸气透过率测定。参照文献[9],采用拟杯子法测定,称取 3 g 无水 CaCl₂ 置于 25 mm×25 mm 的称量瓶中,将试样紧密覆盖在称量瓶口上,并用石蜡密封,放入干燥器中。在干燥器底部加入饱和 NaCl 溶液,饱和 NaCl 溶液在 25 °C 可以维持 75% 的相对湿度。干燥器放置在 25 °C 的保温箱中,每 24 h 称一次称量瓶的质量,连续称量 7 d。

水蒸气透过率按下式计算:

$$WVP = \Delta m \times d / (A \times t \times \Delta P)$$

式中:WVP 为水蒸气透过系数(g·mm/(m²·d·kPa)); Δm 为水蒸气透过膜的量(g); d 为膜厚(mm);

A 为膜的透湿面积(m²); t 为间隔时间(d); ΔP 为膜两侧的水蒸汽压差(kPa)。

4) 水溶性测定^[10]。水溶性定义为薄膜在水中浸泡 24 h 后溶解的干物质的百分比。将薄膜裁剪成 50 mm×50 mm 大小,与烧杯一起干燥至恒重,称量薄膜的质量及薄膜与烧杯的总质量。在烧杯中加入 100 mL 水,在室温下浸泡 24 h,倒掉水后将薄膜和烧杯干燥至恒重,称量薄膜与烧杯的总质量,根据质量变化计算水溶性(以百分含量表示)。每组做 3 个平行实验,取平均值。

根据下式计算薄膜的溶解度:

$$S = (m_1 - m_2) / m_0$$

式中: S 为薄膜溶解度; m_1 为溶解前薄膜与烧杯的总质量; m_2 为溶解后薄膜与烧杯的总质量; m_0 为溶解前薄膜干物质的量。

5) 透光率测定。将薄膜裁切成长 100 mm、宽 12 mm 的矩形,紧贴于比色皿一侧,用紫外可见光分光光度计在 600 nm 处测定其透光率,以空比色皿作为对照。

1.2.3 统计分析

采用 SPSS Statistics 17.0 统计学软件进行单因素方差分析。

2 结果与讨论

制备的复合膜透明,表面光滑,无孔洞和裂纹,复合膜的平均厚度为(0.043±0.013)mm。

2.1 增塑剂对马铃薯淀粉基复合膜机械性能的影响

增塑剂对复合膜机械性能的影响见图 1。由图 1a 可知,随着增塑剂含量的增加,复合膜的抗拉强度显著减小($P \leq 0.05$)。当添加的甘油、山梨醇、聚乙二醇的(质量分数,下同)从 10% 增加到 30% 时,复合膜的抗拉强度分别从 23.93, 22.56, 24.69 MPa 减小到 4.73, 8.46, 8.24 MPa,分别减小了 80%, 63% 和 67%。

由图 1b 可知,添加甘油和山梨醇的复合膜,其断裂伸长率随增塑剂含量的增加而显著增加($P \leq 0.05$),分别从含量 10% 时的 10.51% 和 7.39%,增加到含量 30% 时的 34.83% 和 36.61%,分别增加了 231% 和 395%;而添加聚乙二醇的复合膜,其断裂伸长率先略微增加,含量 20% 时达到最大值,最大断裂伸长率为 15.38%,随着聚乙二醇含量的继续增加,

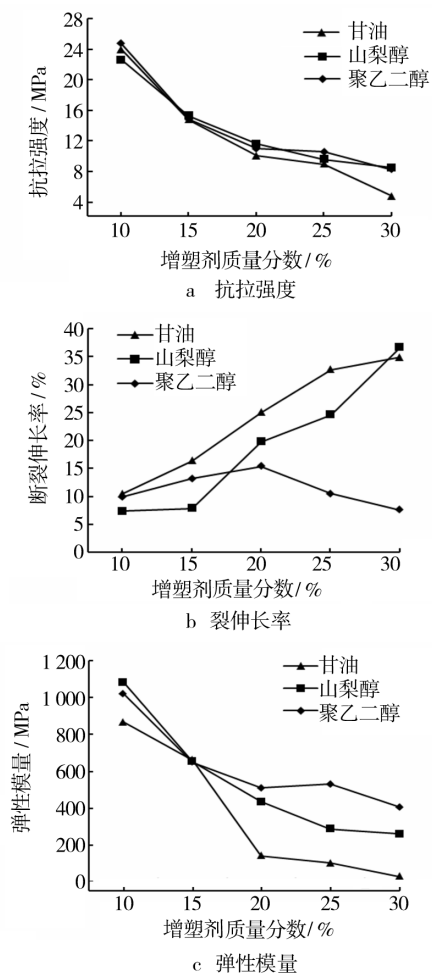


图1 增塑剂对马铃薯淀粉基复合膜机械性能的影响

Fig. 1 Effect of plasticizers on the Young's modulus of potato starch-based composite films

断裂伸长率开始减小,其增塑效果不显著($P \geq 0.05$)。宫志强等人用聚乙二醇增塑壳聚糖-明胶复合膜,也得出了断裂伸长率先增加后减小的结论^[11]。

由图1c可知,随着增塑剂含量的增加,复合膜的弹性模量均显著降低($P \leq 0.05$),薄膜变得更加柔软。增塑剂对复合膜弹性模量的影响与其对抗拉强度的影响基本一致。其中,除含量15%外,用山梨醇和聚乙二醇增塑的复合膜,其弹性模量都明显高于用甘油增塑的复合膜。S. Mali等人^[12]的研究结果也表明,甘油作为增塑剂会显著降低木薯淀粉膜的弹性模量,是一种更有效的增塑剂。随着增塑剂含量的增加,薄膜变得更加柔软,可能是由于添加增塑剂后,淀粉网状结构发生了改变,薄膜基质变得疏松,从而促进了聚合物分子链的运动。

马铃薯淀粉和普鲁兰多糖分子中都含有大量的

羟基,它们很容易与明胶中的羰基和氨基形成氢键,从而使制备的复合膜较脆。在复合膜中加入增塑剂后,增塑剂可以容易地插入到3种大分子物质之间,与它们含有的羟基、羰基、氨基形成氢键,从而部分取代复合膜中大分子物质之间的相互作用,软化复合膜的刚性结构,从而改善复合膜的机械性能。

增塑剂分子的大小、结构、羟基的数量及其与成膜物质之间的相容性,均能影响增塑剂与成膜物质之间的相互作用。甘油与山梨醇相比,具有更小的相对分子质量和更大的吸湿性。甘油相对分子质量小,其能够更好地分散于薄膜体系中,从而在形成的网状结构中创造更多的网眼,赋予薄膜一定的弹性和延伸率,从而使薄膜具有更高的断裂伸长率^[13]。甘油具有更大的吸湿性,则添加的甘油含量越高,薄膜的含水量就越高,水的增塑作用与甘油的增塑作用叠加,从而增强了甘油的增塑效果^[14]。由于山梨醇与葡萄糖单元的分子结构更相似,因此山梨醇与淀粉链相互作用的机会比甘油与淀粉链相互作用的机会高。用山梨醇增塑的薄膜表现出更高的分子间作用力,更低的与水相互作用的能力。与甘油相比,山梨醇具有更高的相对分子质量和更多的羟基,它们可能会与淀粉和明胶分子相互作用,从而提供更低的增塑效果,而更高的抗拉强度和更低的断裂伸长率导致更高的弹性模量^[7]。与聚乙二醇相比,甘油的增塑效果更好,这可能是由于甘油分子的尺寸较小,空间位阻小,更容易进入大分子物质之间,因此对复合膜的影响要大于聚乙二醇。

2.2 增塑剂对马铃薯淀粉基复合膜 WVP 的影响

随着增塑剂含量的增加复合膜的 WVP 均逐渐增加,见图2。其中,添加甘油和聚乙二醇的复合膜,

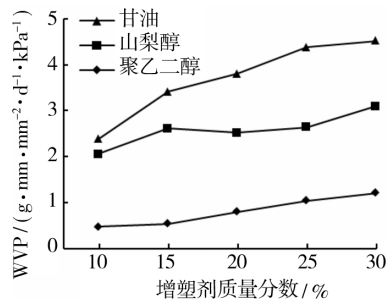


图2 增塑剂对马铃薯淀粉基复合膜 WVP 的影响

Fig. 2 Effect of plasticizers on WVP of potato starch-based composite films

其 WVP 增加显著($P \leq 0.05$),分别从含量 10% 时的 2.38 和 0.48 $\text{g} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa})$ 增加到含量 30% 时的 4.52 和 1.21 $\text{g} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa})$,分别增加了 90% 和 152%,而山梨醇含量对复合膜 WVP 的影响不显著($P \geq 0.05$)。从图 2 中还可以看出,添加甘油和山梨醇的复合膜,其 WVP 明显高于添加聚乙二醇的复合膜,且添加甘油的复合膜 WVP 最高。

在可食膜中添加吸湿性增塑剂,可能增加了薄膜基质的自由体积,导致薄膜对水的渗透性提高。另一方面,增塑剂分子的亲水特性增加了薄膜的含水量,也可能是薄膜渗透性随着增塑剂含量的增加而增加的原因^[7,15]。

不同增塑剂对复合膜 WVP 的影响不同,可能是由于增塑剂分子结构的不同所致。聚乙二醇的相对分子质量大、极性小,添加聚乙二醇后复合膜的阻湿性能比添加其他增塑剂的复合膜更好。甘油与山梨醇相比,虽然二者具有相同的碳羟基比,但甘油的相对分子质量比山梨醇小,相对较小的相对分子质量使得甘油分子比山梨醇分子能更充分地进入成膜分子之间,减弱薄膜基质间的相互作用,在形成的薄膜网状结构中创造更多的网眼,水分子更容易通过,使薄膜的阻湿性能更低,即 WVP 更高^[13]。

2.3 增塑剂对马铃薯淀粉基复合膜水溶性的影响

可食膜的水溶性表明它们在水相环境中的完整性,水溶性越高,表明抵抗水的能力越低。在某些应用中需要可食膜具有高的水溶性,例如作为包裹糖果的可食膜,它们必须在嘴里迅速软化溶解^[16]。增塑剂对马铃薯淀粉基复合膜水溶性的影响见图 3。由

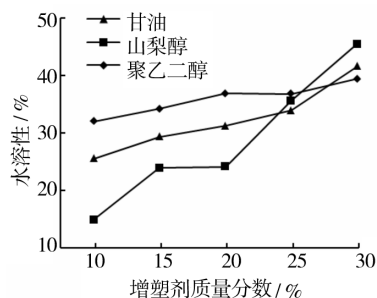


图 3 增塑剂对马铃薯淀粉基复合膜水溶性的影响
Fig. 3 Effect of plasticizers on water-solubility of potato starch-based composite films

图 3 可知,随着增塑剂含量的增加,复合膜的水溶性逐渐增加。其中,添加甘油和聚乙二醇的复合膜,其水溶性增加不显著($P \geq 0.05$),分别从含量 10% 时的

25.55% 和 32.02%,增加到含量 30% 时的 41.53% 和 39.36%,分别增加了 63% 和 23%。而添加山梨醇的复合膜,其水溶性显著增加($P \leq 0.05$),从含量 10% 时的 14.97%,增加到含量 30% 时的 45.43%,增加幅度达到了 203%。而 KIM 等人^[16]对高羧甲基淀粉基可食膜的研究结果则表明,随着增塑剂含量的增加,薄膜的溶解度减小,且添加山梨醇的可食膜的溶解度比添加甘油的复合膜的溶解度高。增塑的马铃薯淀粉基复合膜溶解可能是由于加入的成膜物质普鲁兰多糖和增塑剂都易溶于水,且随着增塑剂浓度的增加,溶于水中的增塑剂的量也会随之增加,因此,复合膜的水溶性增加。

2.4 增塑剂对马铃薯淀粉基复合膜透光率的影响

淀粉基复合膜最终要应用于食品包装上,因此,复合膜的透光率对于它们的应用来说是很重要的^[3]。同时,复合膜的透光率也可以作为判断各成膜物质之间相容性好坏的辅助手段,如果复合膜中 3 种成膜物质的相容性差,那么在它们的界面处会由于光的散射而使透光率降低^[11]。马铃薯淀粉基复合膜在 600 nm 波长处的透光率见图 4,600 nm 的波长常被用于薄膜

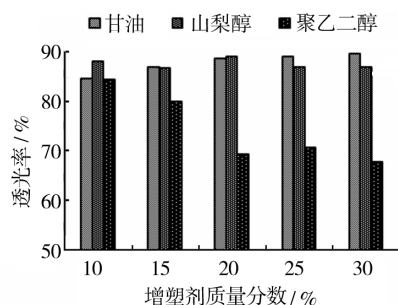


图 4 增塑剂对马铃薯淀粉基复合膜透光率的影响
Fig. 4 Effect of plasticizers on light transmission rate of the potato starch-based composite films

透光率的测定^[3]。由图 4 可知,添加甘油和山梨醇的复合膜,其在 600 nm 处的透光率均大于 80%,说明这 2 种增塑剂与成膜物质之间相容性较好,且甘油与山梨醇对复合膜透光率的影响不显著($P \geq 0.05$)。其中添加甘油的复合膜,其透光率随甘油含量的增加而略微增加,可能是由于甘油作为小分子增塑剂,降低了复合膜的结晶度,从而增加了光线透过的几率^[17];而聚乙二醇对复合膜的透光率有显著影响($P \leq 0.05$),随着聚乙二醇含量的增加,复合膜的透光率逐渐降低,这说明聚乙二醇与成膜物质之间相容性较差。

3 结论

复合膜的抗拉强度和弹性模量均随着 3 种增塑剂含量的增加而显著减小,断裂伸长率随着甘油和山梨醇含量的增加而显著增加,聚乙二醇对复合膜的断裂伸长率影响不显著,增塑效果较差,甘油的增塑效果最好;复合膜的 WVP 和水溶性随着增塑剂含量的增加而增加,其中,甘油和聚乙二醇对其 WVP 的影响显著,而山梨醇对水溶性影响显著;以甘油和山梨醇增塑的复合膜,其透光率都在 80% 以上,而以聚乙二醇增塑的复合膜的透光率随着聚乙二醇含量的增加而减小。

对于马铃薯淀粉基复合膜,从成本和膜性能两方面来考虑,选择甘油作为其增塑剂更加适合,特别是选择含量为 15% 的甘油作为增塑剂,复合膜的综合性能较佳。当然,对于不同的产品,其对包装膜的性能要求也会有所不同,因此,实际应用时应根据产品的具体情况对增塑剂的含量进行适当调节,从而满足所包装产品对包装膜性能的要求。

参考文献:

- [1] 徐忠,缪铭. 功能性变性淀粉[M]. 北京:中国轻工业出版社,2010.
XU Zhong, MIAO Ming. Functionality of Modified Starch [M]. Beijing: China Light Industry Publishing House, 2010.
- [2] 杨西江,徐田华,徐玲,等. 普鲁兰多糖的应用及研究生产现状[J]. 发酵科技通讯,2010, 39(4): 25—28.
YANG Xi-jiang, XU Tian-hua, XU Ling, et al. Status of Application, Research and Production of Pullulan [J]. Science and Technology Communication of Fermentation, 2010, 39(4): 25—28.
- [3] ZHANG Y, HAN J H. Plasticization of Pea Starch Films with Monosaccharides and Polyols[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(6): 253—261.
- [4] TALJA R A, HELÉN H, ROOS Y H, et al. Effect of Various Polyols and Polyol Contents on Physical and Mechanical Properties of Potato Starch-based Films[J]. Carbohydrate Polymers, 2007(67): 288—295.
- [5] 湛小立,赵国华. 增塑剂对甘薯淀粉膜机械及渗透性能的影响[J]. 食品工业科技, 2009, 30(6): 255—258.
CHEN Xiao-li, ZHAO Guo-hua. Effect of Plasticizers on Mechanical Properties and Permeabilities the Sweet Potato Starch Films[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 30(6): 255—258.
- [6] ZHANG Y, HAN J H. Crystallization of High-Amylose Starch by the Addition of Plasticizers at Low and Intermediate Concentrations [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(1): N8—N16.
- [7] AL-HASSAN A A, NORZIAH M H. Starch-gelatin Edible Films: Water Vapor Permeability and Mechanical Properties as Affected by Plasticizers [J]. Food Hydrocolloids, 2012 (26): 108—117.
- [8] GB/T 1040. 3—2006 塑料拉伸性能的测定第 3 部分:薄膜和薄片的试验条件[S].
GB/T 1040. 3—2006, Determination of Tensile Properties of Plastics, Part 3: Test Conditions for Films and Sheets[S].
- [9] 王静平. 添加海藻酸钠的可食性淀粉膜的研究[D]. 天津:天津大学,2007.
WANG Jing-ping. Study on Edible Starch Films Added Sodium Alginate[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [10] GHANBARZADEH B, ALMASI H, ENTEZAMI A A. Improving the Barrier and Mechanical Properties of Corn Starch-based Edible Films: Effect of Citric Acid and Carboxymethyl Cellulose [J]. Industrial Crops and Products, 2011(33): 229—235.
- [11] 宫志强,李彦春,祝德义. 增塑剂对壳聚糖-明胶复合膜物理性能的影响[J]. 食品工业科技, 2008, 29(3): 231—233.
GONG Zhi-qiang, LI Yan-chun, ZHU De-yi. Effects of Plasticizers on Physical Properties of Chitosan/glutin Composite Films[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(3): 231—233.
- [12] MALI S, SAKANAKA L S, YAMASHITA F, et al. Water Sorption and Mechanical Properties of Cassava Starch Films and Their Relation to Plasticizing Effect [J]. Carbohydrate Polymers, 2005(60): 283—289.
- [13] 方育. 可食性魔芋葡甘聚糖-壳聚糖-大豆分离蛋白复合膜的研究[D]. 成都:四川大学,2006.
FANG Yu. Development and Property Characterization of Konjac Glucomannan-Chitosan-Soy Protein Isolate Edible Compound Film [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [14] OSÉS J, NIZA S, ZIANI K, et al. Potato Starch Edible Films to Control Oxidative Rancidity of Polyunsaturated Lipids: Effects of Film Composition, Thickness and Water Activity [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2009(44): 1360—1366.

(下转第 127 页)

优化脉冲可使得残余波动绝大部分被消除,从而产生一条平整的 DOD 曲线。但在实际操作过程中使用优化脉冲时,产生的曲线也不是完全的平整,见图 7,这可能是由于在分析过程中忽略了该过程中的动态特性造成的。

4 结论

喷墨印刷技术之所以能受到新兴技术领域的青睐,关键在于喷墨精度高,特别是在一些对元件尺寸等物理结构精度要求较高的产业中,该技术的应用十分普遍。为了获得期望的喷射墨滴,对不同流体特性的油墨进行了分析,并给出了可适用于新技术领域的油墨特性范围,同时针对在喷墨驱动脉冲方面存在的问题,提出了一种基于系统化基础上的优化脉冲,使得喷射出的墨滴更符合实际的需求。然而,在现有的技术条件下,优化脉冲的应用仍有些许的不足,如提出的窄隙模型 $H(\omega)$ 与打印头的几何结构以及油墨材料的特性相关,导致其不具有普遍适用性。尽管如此,仍可以通过重复以上步骤来获取与条件相匹配的离散时间转移函数 $H(q)$ 。除此之外,优化脉冲在添加了额外的猝熄脉冲之后,导致脉冲持续时间较长,在高频率的情况下,将使得各个脉冲之间产生部分重叠,不利于喷墨印刷,下一步的研究可以从这些方面着手。

参考文献:

- [1] 王灿才. 喷墨印刷质量的分析与研究[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 55—57.
WANG Can-cai. Analysis and Investigate the Quality of Inkjet Printing[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 55—57.
- [2] 郭润兰, 龚俊, 辛舟, 等. 数字喷墨印刷技术在瓦楞纸板上的应用[J]. 包装工程, 2004, 25(1): 62—64.
GUO Run-lan, GONG Jun, XIN Zhou, et al. Application of the Digital Inkjet Printing Technology in Corrugated Board[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(1): 62—64
- [3] 颜进华, JOYCE M. 用于聚碳酸酯基材的喷墨打印油墨特性研究[J]. 包装工程, 2008, 29(6): 52—54.
YAN Jin-hua, JOYCE M. Research of Inkjet Printing Ink Properties on Polycarbonate Substrate[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 52—54.
- [4] Xi WANG, W W CARR, D G BUCKNALL, et al. Drop-on-demand Drop Formation of Colloidal Suspensions[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 38: 17—26.
- [5] N RAMAKRISHNAN, P K RAJESH, P PONNAM-BALAM, et al. Studies on Preparation of Ceramic Inks and Simulation of Drop Formation and Spread in Direct Ceramic Inkjet Printing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169: 372—381
- [6] JANG D, KIM D, MOON J. Influence of Fluid Physical Properties on Ink-jet Printability[J]. Langmuir, 2009, 25: 2629—35
- [7] STOW C D, HADFIELD M G. An Experimental Investigation of Fluid-flow Resulting from the Impact of a Water Drop With an Unyielding Dry Surface[C]. Proc R Soc Lond Ser A, 1981, 373: 419—41.
- [8] DERBY B, REIS N. Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions[J]. MRS Bull 2003; 28: 815—8.
- [9] WIJSHOFF H. Structure and Fluid-Dynamics in Piezo Inkjet Printheads[D]. University of Twente, 2008.
- [10] WASSINK M G. Inkjet Printhead Performance Enhancement by Feedforward input Design Based on Two-Port Modeling[D]. Delft University of Technology, 2007.
- [11] KWON K. Waveform Design Methods for Piezo Inkjet Dispensers Based on Measured Meniscus Motion[J]. Journal of Microelectromechanical System, 2009, 18(5): 1118—1125.
- [12] SOBRAL P J A, MENEGALLI F C, HUBINGER M D, et al. Mechanical, Water Vapor Barrier and Thermal Properties of Gelatin-based Edible Films [J]. Food Hydrocolloid, 2001(15): 423—432.
- [13] KIM K W, KO C J, PARK H J. Mechanical Properties, Water Vapor Permeabilities and Solubilities of Highly Carboxymethylated Starch-based Edible Films[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(1): 218—222.
- [14] 段林娟, 卢立新. 甘油含量对 MC/WG 可食性复合膜性能的影响[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 43—45.
DUAN Lin-juan, LU Li-xin. Effects of Glycerol Content on Properties of MC/WG Edible Film[J]. Package Engineering, 2011, 32(1): 43—45.

(上接第 52 页)