

LED 固化橘纹油墨的制备及其流变性能

张微微, 罗世永*, 王芳, 廖瑞娟, 张新林
(北京印刷学院 印刷与包装工程学院, 北京 102600)

摘要: **目的** 制备一种在纸包装表面产生橘纹的发光二极管 (Light-Emitting Diode, LED) 固化橘纹油墨。**方法** 在 LED 固化油墨的基础配方上加入气相 SiO_2 , 一方面降低纸张的吸墨性, 另一方面调控油墨的流动性, 使得丝网印刷后表面墨层在橘纹剂聚甲基硅氧烷的作用下易流动产生纹路, 且纹路在固化前不流平, 解决纸张表面橘纹效果差的问题; 采用 HR-10-TA 流变仪表征橘纹油墨的流变、黏弹性等流变学性能。**结果** 油墨配方如下: 光引发剂 819 为 1%, 热塑性聚烯烃弹性体 (Thermoplastic Polyolefin, TPO) 为 4%, 活性胺 008 为 10%, 活性单体 ACOMO 为 15%, 聚氨酯丙烯酸预聚物为 54.5%, 色浆为 10%, 聚甲基硅氧烷为 1.5%, 气相 SiO_2 为 3.5%, 蜡粉为 0.5%。流变测试表明油墨具有剪切变稀的特性, 其流动点为模量 $G'=G''=813.9$ Pa, 对应频率为 140.9 Hz。**结论** 加入气相 SiO_2 调控油墨的流动性, 聚甲基硅氧烷作为橘纹剂, 在纸张表面丝网印刷、LED 固化, 制备的橘纹视觉效果良好。

关键词: LED 固化; 橘纹; 气相 SiO_2 ; 流变性; 包装纸盒

中图分类号: TB48

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)05-0057-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.007

Preparation and Rheological Characterization of LED-cured Orange-peel Ink

ZHANG Weiwei, LUO Shiyong*, WANG Fang, LIAO Ruijuan, ZHANG Xinlin

(College of Printing and Packaging Engineering, Beijing Institute of Printing, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare a light-emitting diode (LED) curable orange-peel ink to generate an orange-peel effect on the surface of paper packaging. Gas-phase SiO_2 was added to the basic formula of the LED curable ink, to reduce the ink absorbency of the paper on the one hand, and regulate the fluidity of the ink on the other hand. After screen printing, the surface ink layer was prone to flow and form patterns under the action of the orange-peel agent, polydimethylsiloxane, and the patterns did not level out before curing, solving the problem of poor orange-peel effect on the paper surface. The rheological properties such as rheology and viscoelasticity of the orange-peel ink were characterized with an HR-10-TA rheometer. The ink formula was as follows: photoinitiator 819 was 1%, thermoplastic polyolefin elastomer (TPO) was 4%, active amine 008 was 10%, active monomer ACOMO was 15%, polyurethane acrylate prepolymer was 54.5%, color paste was 10%; polydimethylsiloxane was 1.5%, gas-phase SiO_2 was 3.5%, and wax powder was 0.5%. Rheological tests showed that the ink had shear-thinning characteristics, with a flow point of modulus $G'=G''=813.9$ Pa, corresponding to a frequency of 140.9 Hz. In conclusion, by adding gas-phase SiO_2 to regulate the fluidity of the ink and using polydimethylsiloxane as the orange peel agent, the orange peel effect on the paper surface is visually good after screen printing and LED curing.

KEY WORDS: LED curing; orange-peel; gas-phase SiO_2 ; rheology; packing carton

发光二极管（Light-Emitting Diode，LED）固化技术具有能量转换效率高、成本低、环境友好等优点，相较于传统的紫外线（Ultra Violet，UV）固化技术具有更低的能耗和臭氧排放，且固化过程中由于光源温度较低，对纸张、塑料等材料造成的温度损伤较小^[1-2]。这些优点使得 LED 固化油墨广泛应用于标签印刷、包装、电子产品、汽车装饰等领域^[3-5]。

橘纹是类似冰花、磨砂、肌理等呈现于包装印刷品表面的一种特殊效果，其形成主要为贝纳德涡效应和表面张力的作用^[6]。贝纳德涡效应是在油墨干燥过程中，由于混合溶剂挥发速率不同导致的温度和表面张力梯度，促使油墨内部产生流动和漩涡，使得油墨表面出现类似天然橘皮的纹路。通常认为表面橘纹是一种表面缺陷，但人为突出或者控制起皱现象产生的美观均匀的橘纹，可以看作从三维方向依靠表面凸起对光进行反射和散射来表达色彩的视觉效果。目前，针对橘纹的研究多为金属、木器表面整饰用的橘纹漆，起到装饰、保护、耐磨等作用^[7-8]。由于纸张吸墨性强，其表面的橘纹效果差，纸盒包装表面的橘纹装饰并不常见。

LED 固化橘纹油墨结合 LED 固化油墨和橘纹漆的特点，可以通过调控组分参数、添加助剂解决干燥速率不匹配影响立体效果的问题。丝网印刷墨层厚、立体感强、印刷适性好，常用于烟酒包装纸盒上印刷冰花、磨砂等整饰，可以刺激消费者的购买欲望^[9-10]。本文以聚甲基硅氧烷为橘纹剂，加入气相 SiO₂ 调控油墨的流动性，制备可以在纸张表面产生良好橘纹效果的 LED 固化油墨，讨论油墨各组分的作用和用量，并测试分析油墨的流变特性。相关研究结果可以丰富纸盒包装表面的设计元素，创新包装视觉效果。

1 实验

1.1 设备和原料

表 1 和表 2 分别为橘纹油墨制备过程中使用的主要实验设备和原料。

表 1 主要实验设备
Tab.1 Main experimental equipment

编号	设备名称	型号	生产厂家
1	陶瓷三辊研磨机	C-43/4X 10	日本井上制作所
2	顶置式搅拌器	EUROSTAR 60	德国艾卡
3	真空排泡机	DZF-6050	上海一恒
4	LED 固化机	FG3526	广州邦沃
5	黏度计	DV2T	美国 Brookfield
6	刮板细度计	QXD 0-50	上海精科
7	视频接触角仪	DSA100	德国 Kruss
8	流变仪	HR-10-TA	上海沃特世

表 2 主要实验原料
Tab.2 Main experimental material

编号	原料名称	牌号	生产厂家
1	超支化丙烯酸树脂	6361-100	台湾长兴
2	聚氨酯丙烯酸酯	U-25-20D	德国科思创
3	环氧丙烯酸酯	L-6905C-10	广东蓝柯路
4	活性单体丙烯酸吗啉	ACMO	日本科巨希
5	活性胺	008	德国科思创
6	蜡粉 TF1780	聚四氟蜡粉	东莞德伦
7	市售橘纹剂 A		东莞易立安
8	市售橘纹剂 B		东莞摩能
9	聚甲基硅氧烷		美国道康宁
10	气相 SiO ₂	M5	美国 CABOT
11	光引发剂	TPO，819	德国 IGM
12	FLUV-2600 原黄		东莞蒂森

1.2 油墨制备

LED 固化橘纹油墨基础配方见表 3，制备的油墨在 LED 385 nm 光源下固化良好。光源功率为 2 kW，距离纸张表面为 50 mm，走纸速率为 50 m/min。在此配方基础上加入橘纹剂、蜡粉和气相 SiO₂ 后获得橘纹油墨，橘纹效果依据目视立体效果和橘纹纹路的均匀性判定。

表 3 橘纹油墨基础配方
Tab.3 Basic formula reference of orange-peel ink

原料名称	质量分数/%
预聚物	55
活性单体	15
活性胺	10
光引发剂	5
色浆	10
流变助剂	5

1) 将光引发剂溶解于活性单体 ACMO，加入预聚物、活性胺，使用顶置式搅拌器以 300 r/min 的速度搅拌均匀，再加入橘纹剂和原黄色浆继续匀速搅拌。然后加入适量气相 SiO₂，使用砂磨机和陶瓷三辊研磨机进行研磨分散，直至刮板细度计的细度<15 μm。最后，将油墨放置在真空排泡机中脱出油墨中的气泡，真空度为 0.1 Pa。

2) 将所制备的原黄油墨丝网印刷在银卡纸上，用 LED 固化机固化得到橘纹效果。实验所使用的丝网目数为 150 目，绷网张力为 15 N，角度为 90°。

3) 采用 HR-10-TA 流变仪测试所制备的原黄橘

纹油墨的剪切流变和黏弹性, 剪切频率为 1~200 Hz, 测量温度为 25 ℃。

2 结果与讨论

2.1 油墨中各组分的作用和用量

预聚物为油墨的主要成分之一, 在油墨固化过程中和其他组分发生交联反应, 使固化后的油墨层具有较好的纸张附着力、柔韧性和耐磨性^[11]。根据表 3, 预聚物分别使用超支化聚酯丙烯酸酯、聚氨酯丙烯酸酯和环氧丙烯酸酯 3 类预聚物制备 3 种油墨。将油墨涂覆在载玻片上, 固化后用百格法测试附着力; 在载玻片上固化后的固化膜用手弯折, 评估其柔韧性; 用指压法测试不干程度, 得到固化完全程度。结果表明, 环氧丙烯酸酯墨层脆性大, 超支化聚酯丙烯酸酯墨层柔性较差, 交联均匀性差导致它们的纸张附着力不如聚氨酯丙烯酸酯^[12], 而且聚氨酯丙烯酸酯墨层柔韧性最好, 因此优选其作为 LED 固化油墨的预聚物。

单官能团的活性单体丙烯酰吗啉 ACMO 黏度低, 对光引发剂溶解度高, 固化速率快, 对皮肤刺激性小, 气味低, 相容性和分散性好, 耐热耐酸碱, 固化收缩率低, 柔韧性好^[13-14], 其分子结构中存在亲水的吗啉基团和疏水的碳链结构, 分子中含有氮原子, 能够降低氧阻聚, 因此选用 ACMO 作为单体。

油墨黏度影响流动性, 若黏度过低, 则油墨流动性太好, 橘纹在固化前易流平; 黏度过大时, 即使在橘纹助剂驱动下也无法短时间内形成橘纹。因此, 油墨黏度必须控制在合适范围, 主要通过预聚物和单体的相对质量分数来调节。参考橘纹漆的配方^[15-17], 各组分质量分数为预聚物 45%~60%、单体 25%~35%、光引发剂 5%~10%、色浆 6%~10%。本实验确定 55% 的聚氨酯丙烯酸酯、15% 的 ACMO、10% 的活性胺、10% 的色浆、5% 的光引发剂作为油墨基础配方, 在该配方下研究橘纹剂和其他助剂对橘纹效果的影响。使用 DV2T 触屏黏度计, 在室温 25 ℃ 下调整弹簧扭矩为 718.7 N·m, 转速为 200 r/min, 对最终得到的橘纹油墨进行黏度测试, 黏度为 2 Pa·s, 满足丝网印刷油墨黏度 2~3.5 Pa·s 的要求^[18]。

合适的光引发剂的种类和用量可以确保油墨在 LED 光照下良好固化。LED 固化耗能低, 光引发剂需要在波长 385~405 nm 的光源下具有较强的吸收能力以产生足够的自由基。经过文献调研后收集的常见光引发剂的吸收峰值见表 4^[19-21], 其中满足要求的光引发剂有 TPO 和 819。实验发现, 同样油墨配方丝网印刷后在光源功率为 2 kW 的 LED 固化机下固化, 单独使用 5% 的 819 油墨固化时间约为 1.5 s, 单独使用 5% 的 TPO 固化时间约为 1.0 s, 采用 4% 的 819 和 1% 的 TPO 复配的油墨固化时间缩短至 1.0 s, 采用 1% 的 819 和 4% 的 TPO 复配的油墨固化时间为 0.2 s。

表 4 常用光引发剂的吸收峰
Tab.4 Absorption peaks of common initiators

光引发剂种类	吸收峰/nm
TPO	350~400
819	360~370
184	240~250, 320~335
369	325~335
907	320~325
MBF	255, 335
1173	265~280
2959	275~285, 320~330

配方中加入活性胺来抑制 LED 固化过程中的表面氧阻聚, 进一步提高油墨的固化速度和固化程度, 解决油墨不干不良的问题。实验表明, 光引发剂 819 为 1%、TPO 为 4%、活性胺为 10% 时, 在 LED 光源功率为 2 kW、波长为 385 nm、出光口距离纸张为 50 mm、走纸速率为 50 m/min 的条件下, 油墨固化良好。过量的光引发剂对提高固化程度效果不大, 过量的活性胺会导致油墨固化后发黄变色和脆性增加^[22]。选用分散在 UV 活性单体中的原黄研磨色浆, 加入 10% 即可满足油墨着色力要求。

2.2 橘纹剂种类和用量

在表 3 基础上加入不同种类橘纹剂获得的表面效果见图 1, 橘纹剂质量分数均为 1%。实验中使用 2 种市售橘纹剂以及聚甲基硅氧烷, 这 2 种橘纹剂产生的橘皮纹路不清晰, 立体效果差。室温下 ACMO 的表面张力约为 44 mN/m, 聚甲基硅氧烷的表面张力约为 21 mN/m, 聚氨酯丙烯酸酯预聚物的表面张力为 40~50 mN/m^[23], 可见加入的聚甲基硅氧烷表面张力远小于油墨中预聚物和单体的表面张力。聚甲基硅氧烷以极小粒径的液珠均匀分散于油墨, 印刷后在墨层中产生梯度较大的表面张力, 驱使油墨中其余组分分离后又聚集, 从而快速形成清晰的橘皮纹路。

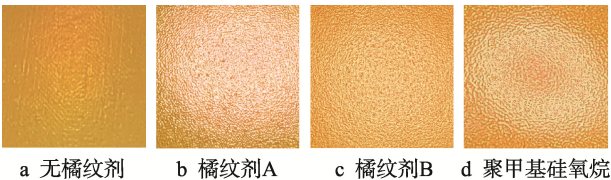


图 1 不同橘纹剂的表面效果
Fig.1 Photos of samples with different orange-peel agents

由图 1d 可知, 聚甲基硅氧烷作为橘纹剂时获得的橘纹效果最好, 且试印得到的样品放置 7 d 后橘纹效果基本不变。分别加入 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 的甲基硅氧烷制备 4 种油墨并进行试印, 图 2 为不同质

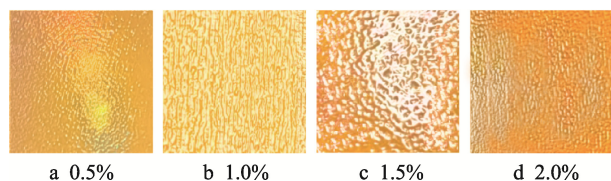


图2 不同质量分数聚甲基硅氧烷的表面效果
Fig.2 Surface effects of polymethicone with different mass fractions

量分数聚甲基硅氧烷橘纹油墨固化后的照片。由图2可知:聚甲基硅氧烷质量分数为0.5%时立体效果不明显,光泽度不佳;1.0%时橘纹视觉效果较差;1.5%时立体效果、橘纹效果以及光泽感合适;2.0%时橘纹立体效果减弱。可见不同橘纹剂质量分数对纹路的影响不同,随着橘纹剂质量分数的增大,表面张力梯度逐渐增大,纹路逐渐立体清晰,但是当橘纹剂质量分数达到一定程度后,立体效果开始减弱,因此橘纹剂质量分数在1.5%左右时橘纹效果好。

2.3 气相 SiO₂ 的作用和用量

气相 SiO₂ 表面含有大量孤立存在的硅羟基,赋予油墨良好的增稠触变性和分散稳定性^[24]。加入气相 SiO₂ 不仅可以降低纸张对油墨的渗吸,还能调控油墨的流动性。水接触角常用来表征固体的表面能和吸墨性,接触角越小,液滴越扁平,意味着纸张吸墨性越强。采用型号为 DSA100 的视频接触角仪测试样品的水接触角,测试步骤如下。视频接触角仪接通电源,将装满蒸馏水的注射器安装在固定架上,裁剪尺寸相同的印刷样品放置于工作台,旋转测微头流出一滴液体在样品表面静置 1 s 后,采集水滴在样品表面的图像。图 3a 为未添加气相 SiO₂ 的样品,接触角为 57.2°;图 3b 为加入 3.5% 气相 SiO₂ 的样品,接触角为 79.5°,说明气相 SiO₂ 的加入可以降低纸张的吸墨性。

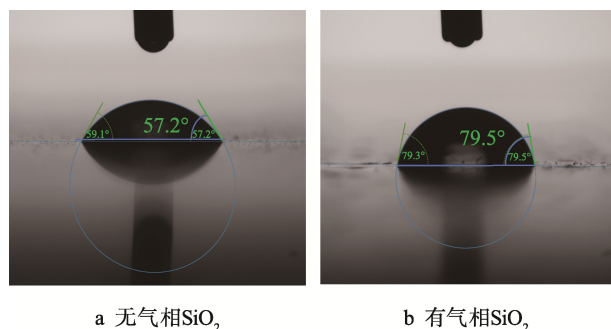


图3 水接触角测试对比照片
Fig.3 Test comparison photos of water contact angle

图4为基础配方中加入不同量气相 SiO₂ 产生的橘纹效果,均为相同条件下拍摄得到的照片,可见少量气相 SiO₂ 即可大幅改变橘纹油墨的黏度和流动性。气相 SiO₂ 质量分数较低时,油墨黏度低,橘纹易流平,对比图 4a 与图 4b 发现明显的橘纹流平现象,气相 SiO₂ 质量分数为 2.5% 时,印后静置 5 min 后橘纹

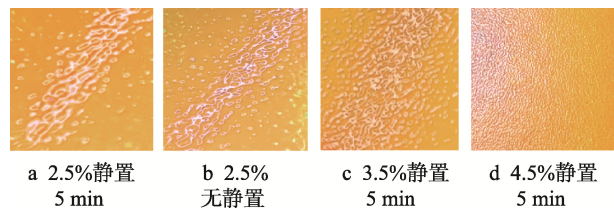


图4 不同质量分数气相 SiO₂ 对橘纹效果的影响
Fig.4 Effects of different mass fractions of gaseous phase SiO₂ on orange grain effect

的凹凸高度明显降低。图 4c 中,加入 3.5% 气相 SiO₂ 时,油墨具有合适的流动性,易于丝网印刷,印刷后表面出现均匀纹路,放置一段时间也不会导致流平消失,经过 LED 固化后橘纹效果好。图 4d 中,气相 SiO₂ 质量分数较高,黏度过大,油墨在橘纹剂表面张力作用下未产生明显的凹凸纹路。因此,LED 固化油墨中加入 3.5% 左右气相 SiO₂ 较为合适。

纳米尺寸的气相 SiO₂ 增强了橘纹墨层表面的耐磨性^[25],表面摩擦因数可以通过加入适量蜡粉来调节。蜡粉在油墨干燥后浮至油墨表面成为摩擦接触点,分散压力,进一步降低摩擦力,增强墨层表面的耐磨性^[26]。实验中加入 0.5% 的蜡粉即可得到耐磨性较好的样品,因此油墨配方调整为 54.5% 的聚氨酯丙烯酸酯、15% 的 ACOMO、10% 的色浆、5% 的光引发剂、3.5% 的气相 SiO₂、0.5% 的蜡粉。

2.4 橘纹油墨的流变性

使用 HR-10-TA 流变仪对改良后的 LED 固化油墨分别进行剪切黏度、屈服应力、黏弹性测试。图 5 为 LED 橘纹油墨在 1~200 s⁻¹ 剪切速率下剪切黏度的变化曲线。油墨的静态黏度为 5.8 Pa·s,剪切速率为 1~25 s⁻¹ 时,黏度迅速变稀;剪切速率>100 s⁻¹ 时,油墨黏度最大值为 2 Pa·s。油墨具有典型的剪切变稀特性,表现为非牛顿流体,它在丝网印刷刮刀的作用下变稀,有利于油墨通过网孔^[27],在静止状态下又恢复较大的黏度,不易流平,利于形成立体效果良好的橘纹。

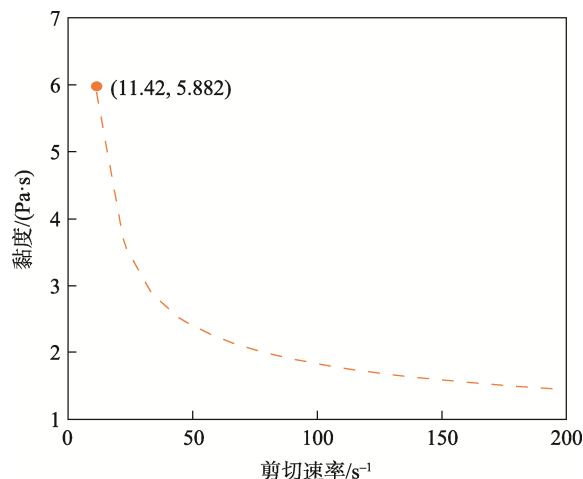


图5 剪切黏度与剪切速率的关系
Fig.5 Relationship curve between shear viscosity and shear rate

用剪切速率和对应的剪切应力做出流变曲线并进行宾汉姆流体模型线性拟合, 用拟合后得到的屈服应力来衡量流动速度。该模型适用于具有一定屈服应力的流体, 见式 (1)。

$$\tau = \tau_b + \eta_b \cdot \gamma \tag{1}$$

式中: τ 为剪切应力; τ_b 为屈服应力; η_b 为模型的流动系数; γ 为剪切速率。

图 6 中剪切应力与剪切速率的关系曲线不经过原点, 将曲线延长至 $\gamma=0$, 在 $\tau=60.55 \text{ Pa}$ 处得到屈服应力。当剪切应力小于屈服应力时, 橘纹油墨在剪切作用下不发生流动, 表现为弹性变形, 当剪切应力大于屈服应力时油墨开始流动, 丝网印刷刮刀施加给油墨的应力大于油墨的屈服应力 60.55 Pa 。剪切应力与剪切速率呈线性关系, 表明油墨印刷后湿膜中无过大的残留应力, 减少了油墨在残留应力作用下流动导致的银纹、花斑等缺陷, 有利于获得均匀的橘纹效果。

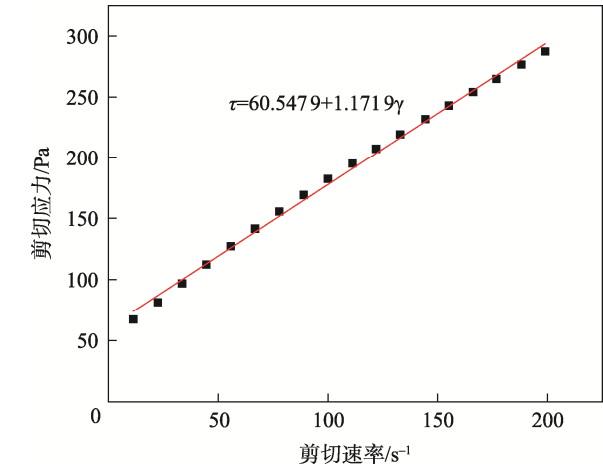


图 6 剪切应力和剪切速率的关系
Fig.6 Relationship between shear stress and shear rate

图 7 为角频率与储能模量 (G')、损耗模量 (G'') 的关系曲线, 参数设定如下: 应变恒定, 频率为变量 ($1\sim 200 \text{ Hz}$), 温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 G' 为油墨形变过程中由于弹性可逆形变而储存的能量, 表征油墨的弹性特征; G'' 为油墨形变过程中黏性形变不可逆而损耗的能量, 表征油墨的黏性特征。图 7 中, 两线交点 ($G'=G''=813.9 \text{ Pa}$) 为油墨的流动点; 在频率 $< 140.9 \text{ Hz}$ 的低频区, $G'>G''$, 即在较短受力时间内油墨不会产生流动, 表现为固体状态, 说明油墨稳定性好; 随着频率的逐渐增大, G' 、 G'' 出现交点, 当频率 $> 140.9 \text{ Hz}$ 时, $G'<G''$, 油墨产生流动且表现为流体。该交点的值越大, 油墨越不容易流动, 要获得好的橘纹效果, 需要油墨具有适宜的流动性, 因此 813.9 Pa 可以作为获得良好橘纹效果的油墨黏弹性的参考值。

2.5 橘纹油墨性能指标

橘纹油墨的性能由其在容器中的状态、细度、黏度、附着牢度和着色力来表征, 表 5 为制备的 LED 固化橘纹油墨按照相关国家标准检测的各项性能指标。

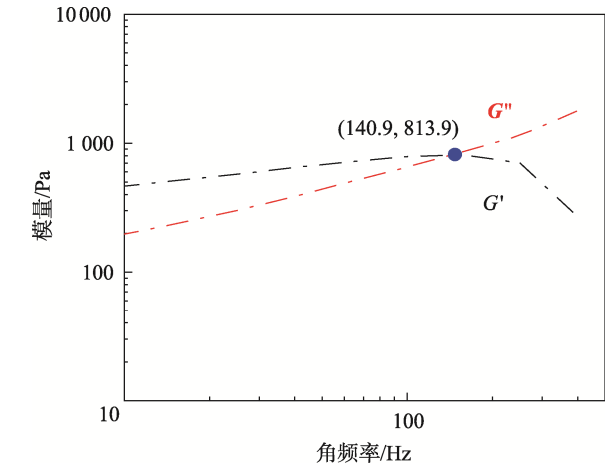


图 7 储能模量与角频率的关系
Fig.7 Relation between energy storage modulus and angular frequency

表 5 LED 固化橘纹油墨的性能指标
Tab.5 Specifications of LED cured orange-peel ink

项目	指标	检测结果	检测方法
在容器中的状态	搅拌后均匀	合格	GB/T 13217.2
	无硬块		
细度/ μm	≤ 15	1.5	GB/T 13217.3
25 $^{\circ}\text{C}$ 下黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	商定	2	GB/T 13217.4
附着牢度/%	≥ 85	≥ 90	GB/T 13217.7
着色力/%	90~110	90	GB/T 13217.6

3 结语

橘纹油墨应用于纸包装表面可以带来独特的视觉效果和触感。本研究合理使用光引发剂 TPO 和 819、活性单体、活性胺以及气相 SiO_2 调控油墨的流变性能, 获得附着牢度好、干燥速度快、固化程度高的 LED 固化橘纹油墨。其优选配方如下: 光引发剂 819 为 1%, TPO 为 4%, 活性胺 008 为 10%, 活性单体 ACMO 为 15%, 聚氨酯丙烯酸预聚物为 54.5%, 色浆为 10%, 聚甲基硅氧烷为 1.5%, 气相 SiO_2 为 3.5%, 蜡粉为 0.5%。油墨流变测试表明, 油墨黏度为 $2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 具有剪切变稀特性; 油墨的流动点为模量 $G'=G''=813.9 \text{ Pa}$, 对应频率为 140.9 Hz 。LED 固化橘纹油墨环保节能, 制备工艺简单, 为创新纸盒包装新增橘纹视觉元素。

参考文献:

[1] KIM J S, HWANG J U, BACK D Y, et al. Characterization and Flexibility Properties of UV LED Cured Acrylic Pressure-Sensitive Adhesives for Flexible Displays[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10(6): 1176-1183.

- [2] XIE R, LI D. Research on the Curing Performance of UV-LED Light Based Stereolithography[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 1163-1171.
- [3] REN X Z, LIU W K, YAO Q C, et al. A UV-LED Excited Photoinitiator with Low Toxicity and Low Migration for Photocurable Inks[J]. Dyes and Pigments, 2022, 200: 110133-110141.
- [4] MENDOZA K L, ORTEGA A, KIM N S. Optimization of UV LED-Curable Ink for Reverse-Offset Roll-to-Plate (RO-R2P) Printing[J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(3): 784-791.
- [5] SINA S, YU J C, PERIYASAMY A P, et al. Inkjet Printing and UV-LED Curing of Photochromic Dyes for Functional and Smart Textile Applications[J]. RSC Advances, 2018, 8(50): 28395-28404.
- [6] BHARADIYA P S, GWALWANSHI U U, RAJAGOPALAN N, et al. Surface Defects-Causes, Prevention, and Remedies[M]. Functional Coatings: Innovations and Challenges, 2024: 426-449.
- [7] 李凤芹, 孙兆祥. 高耐候聚氨酯橘纹漆的制备及施工工艺探讨[J]. 中国涂料, 2007(11): 32-33.
LI F Q, SUN Z X. Discussion on the Preparation and Application of Highweatherability PU Orange-Peel Coatings[J]. China Coatings, 2007(11): 32-33.
- [8] 张福云, 许玉霞, 王承伟, 等. 高固体自成型桔纹漆的研制[J]. 上海涂料, 2007, 45(7): 7-9.
ZHANG F Y, XU Y X, WANG C W, et al. Study on High Solid Self-Forming Orange Peel Finish[J]. Shanghai Coatings, 2007, 45(7): 7-9.
- [9] 赵红梅, 周晓红, 王天祥. 双组分丙烯酸聚氨酯自成型橘纹漆花型改进[J]. 中国涂料, 2013, 28(10): 50-54.
ZHAO H M, ZHOU X H, WANG T X. Modification of Two-Component Self-Forming Orange Peel Acrylic Polyurethane Coatings[J]. China Coatings, 2013, 28(10): 50-54.
- [10] 董亮, 王玮, 许利莎, 等. 水性聚氨酯橘纹漆性能影响因素研究[J]. 中国涂料, 2020, 35(2): 39-43.
DONG L, WANG W, XU L S, et al. Factors Influencing the Properties of Waterborne Polyurethane Ripple Peel Coatings[J]. China Coatings, 2020, 35(2): 39-43.
- [11] 岳少哲, 赵德. 水性双组分聚氨酯桔纹漆的制备与施工工艺探究[J]. 涂料技术与文摘, 2016, 37(12): 7-9.
YUE S Z, ZHAO D. Study on Preparation and Construction Technology of Waterborne Two-Component Polyurethane Orange Grain Paint[J]. Coatings Technology & Abstracts, 2016, 37(12): 7-9.
- [12] AGNOL L D, DIAS F T G, ORNAGHI H L, et al. UV-Curable Waterborne Polyurethane Coatings: A State-of-the-Art and Recent Advances Review[J]. Progress in Organic Coatings: An International Review Journal, 2021, 154: 106156.
- [13] 李晓丽, 罗世永, 许文才, 等. 单体对 UV-LED 固化光油性能的影响[J]. 包装工程, 2017, 38(1): 72-75.
LI X L, LUO S Y, XU W C, et al. Effect of Monomer on Properties of UV-LED Curing Varnish [J]. Packaging Engineering, 2017, 38(1): 72-75.
- [14] YANG J J, LIANG X X, LIU F, et al. Comparing Properties of Urethane Dimethacrylate (UDMA) Based 3D Printing Resin Using N-Acryloylmorpholine (ACMO) and Triethylene Glycol Dimethacrylate (TEGDMA) Separately as Diluents[J]. Journal of Macromolecular Science Part B-Physics, 2024: 1-17.
- [15] 付文亨. UV 皱纹油墨的丝网印刷[J]. 网印工业, 2010(8): 27-29.
FU W T. Screen Printing of UV Wrinkle Ink[J]. Screen Printing Industry, 2010(8): 27-29.
- [16] 高媛. 网印特殊效果油墨在烟包印刷中的应用[J]. 丝网印刷, 2017, 35(10): 22-25.
GAO Y. Application of Screen Printing Special Effect Ink in Cigarette Packet Printing[J]. Screen Printing, 2017, 35(10): 22-25.
- [17] 范基升, 陈萍, 刘江涛, 等. 新型橘纹漆的制备与研究[J]. 现代涂料与涂装, 2012, 15(2): 7-8.
FAN J S, CHEN P, LIU J T, et al. Preparation and Research of New Orange Grain Paint[J]. Modern Coatings and Coating, 2012, 15(2): 7-8.
- [18] SOMALU M R, MUCHTAR A, BRANDON N P. Understanding the Rheology of Screen-Printing Inks for the Fabrication of SOFC Thick Films[J]. ECS Transactions, 2015, 68(1): 1323-1331.
- [19] SARAHJANE P, CHRIS P, TIM C, et al. The Effect of Carbon Ink Rheology on Ink Separation Mechanisms in Screen-Printing[J]. Coatings, 2020, 10(10): 1008.
- [20] KRÁŠKIEWICZ A, KOWALCZYK A. Radiation Curing of Phosphorus Telomer-Based Coatings Using UV LEDs or Medium-Pressure Mercury Lamp[J]. Materials, 2023, 16(23): 7493.
- [21] HASA E, LEE T Y, GUYMON C A. Controlling Phase Separated Domains in UV-Curable Formulations with OH-Functionalized Prepolymers[J]. Polymer Chemistry, 2022, 13 (21): 3102-3115.

- [22] WU L, ZHANG Y Q. Study on the Effect of Reactive Diluents on Exothermic UV Curable and Coating Films Properties[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2680(1): 012043-012048.
- [23] AYAS M, SKOČILAS J, ŠTÍPEK J, et al. A Method for Determining the Rheological Properties of Viscoplastic Fluids Using a Rectangular Die[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 357: 111608.
- [24] 王小荣. 水性聚氨酯丙烯酸酯水性漆制备及性能研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2014.
WANG X R. Preparation and Properties of Waterborne Polyurethane Acrylate Waterborne Paint[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2014.
- [25] 王杰, 张勇, 秦天, 等. 气相二氧化硅在紫外光固化涂层中的应用[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(8): 79-83.
- WANG J, ZHANG Y, QIN T, et al. Application of Fumed Silica in Ultraviolet-Curable Coatings[J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42(8): 79-83.
- [26] 张瑞涛, 刘英凯, 刘家豪. PEG80F 蜡粉对粉末冶金摩擦块工艺及产品性能的影响研究[J]. 金属材料与冶金工程, 2024, 52(4): 17-20.
ZHANG R T, LIU Y K, LIU J H. Effect of PEG80F Wax Powder on Process and Product Properties of Powder Metallurgy Friction Block[J]. Metal Materials and Metallurgical Engineering, 2024, 52(4): 17-20.
- [27] BERNAGOZZI G, BATTEGAZZORE D, ARRIGO R, et al. Optimizing the Rheological and Thermal Behavior of Polypropylene-Based Composites for Material Extrusion Additive Manufacturing Processes[J]. Polymers, 2023, 15(10): 2263.