

水性凹印油墨在纸张表面的润湿性研究

符迪¹, 周星^{1*}, 许露晴¹, 冯赛¹, 谢利¹, 于江¹, 闫佳²

(1. 西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 西安 710048; 2. 西安军代局第八军代室, 西安 710021)

摘要: **目的** 测试分析不同油墨在承印物表面的润湿性, 为印刷过程中油墨在承印物上的附着研究提供理论参考, 从而提高凹版印刷的精度和印刷效果。**方法** 以表界面润湿现象、经典润湿模型、挥发干燥和渗透干燥机理为理论基础, 探究油墨在纸张表面的润湿行为, 研究不同水性油墨在不同纸张表面上的静态、动态接触角的变化规律, 分析油墨墨滴在纸张上的墨痕形状以及油墨黏度与纸张平滑度对纸张润湿效果的影响。**结果** 纸张平滑度、油墨黏度的增加, 可促进油墨在纸张上静态接触角和承印物被完全润湿的时间的增加, 墨痕形态受润湿性影响。**结论** 纸张平滑度、油墨黏度与油墨在纸张上的润湿性呈负相关关系。

关键词: 润湿性; 接触角; 凹印油墨; 纸张表面结构

中图分类号: TQ628.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)03-0058-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.008

Wettability of Water-based Gravure Ink on Paper Surface

FU Di¹, ZHOU Xing^{1*}, XU Luqing¹, FENG Sai¹, XIE Li¹, YU Jiang¹, YAN Jia²

(1. Faculty of Printing Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. The 8th Military Representative Office of Military Representative Bureau in Xi'an, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to provide theoretical reference for the adhesion of ink on the substrate during the printing process by testing and analyzing the wettability of different inks on the substrate surface, thereby improving the accuracy and printing effect of gravure printing. Based on the surface wetting phenomenon, classical wetting model, volatilization drying, and permeation drying mechanism, the wetting behavior of ink on paper surfaces was explored, the changes in static and dynamic contact angles of different water-based inks on different paper surfaces were investigated and the shape of ink droplets on paper and the effect of ink viscosity and paper smoothness on the wetting effect of paper were analyzed. The increase in paper smoothness and ink viscosity promoted an increase in the static contact angle of ink on paper, as well as the time for the substrate to be completely wetted. The morphology of ink marks was affected by wettability. The smoothness of paper, the viscosity of ink, and the wettability of ink on paper are negatively correlated.

KEY WORDS: wettability; contact angle; gravure ink; surface structure of paper

传统凹版印刷使用的油墨含有大量的挥发性有机溶剂, 不仅污染环境, 且危害人体健康^[1]。水性油墨因其优越的印刷适性和环境友好特点受到广泛应

用。印品质量除与印刷速度、压力、环境温湿度等外部因素有关外, 还与油墨和承印物的结合性有更为密切的联系^[2], 油墨在承印物表面的润湿性是影响印刷

收稿日期: 2024-05-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52372093); 陕西省重点研发项目(2023GXLH-045); 陕西省重点研发计划社发领域一般项目(2022SF-168); 西安市科技计划(21XJZZ0045); 西安市碑林区应用技术研发类项目(GX2247, GX2232)

*通信作者

效果的关键因素^[3-4]。润湿性能由液-固界面的性质决定, 包括表面形态^[5-7]、液滴性质^[8]和碰撞速度^[9]等诸多因素。其中表面粗糙度对承印物表面润湿性的影响尤为关键, Hu 等^[10]和 Cassie 等^[11]报道了材料表面粗糙度对其润湿性的影响, 并用接触角衡量材料润湿性^[12-15]。

油墨润湿铺展对印刷质量的影响显著, 其与众多因素相关, 包括油墨的黏度、表面张力及分散性等性质^[16-17]。如前所述, 承印物的表面特性(如表面张力、粗糙度和吸墨性)会直接影响油墨在承印物表面的润湿与铺展能力, 决定了油墨能否均匀地附着。Mao 等^[19]考察了许多因素对撞击过程的作用, 研究表明液滴黏性和撞击速度对液滴铺展有很大影响, 而壁面润湿性则影响液滴起跳反弹过程^[18-21]。

以往的研究主要集中于材料表面结构对接触角的影响, 并未考虑润湿性与墨滴性质以及滴墨状态的关系。在印刷过程中, 根据纸张的表面性质合理调整油墨黏度可改善印刷质量^[22-24]。本研究探究了水性油墨在不同纸张上的润湿现象, 同时对油墨、纸张性能进行分析, 提出其在凹版印刷中应用的实际意义, 为印刷过程中油墨附着研究提供参考。

1 油墨润湿性测试实验

本研究测量了商业墨汁和 3 种不同种类的水性油墨在不同纸张基材上的接触角以及墨滴的墨痕形态, 对油墨在纸张上的润湿性进行表征, 测量了油墨黏度、纸张微观形貌、纸张平滑度, 探究了承印物表面结构、平滑度以及油墨黏度对其润湿性的影响。

1.1 实验

1.1.1 仪器

本次实验使用的仪器如表 1 所示。

表 1 主要的实验仪器与设备

Tab.1 Main experimental instruments and equipment

仪器名称	型号	厂家
接触角测量仪	XYM100H-50	上海轩准
SEM 扫描电镜	JSM-6700F	日本电子株式会社
数字旋转黏度计	BROOKFIELD LVDV-11+P	天津泰斯特
别克式平滑度测定仪	PN-BST	杭州品享
水蒸气透过率测试仪	W3/060	济南兰光
数字 pH 计	S210	上海梅特勒
自制润墨性能实验平台		

1.1.2 材料

根据生产工艺的不同, 选用具有不同定量的常用

铜版纸, 由于本文研究对象为水性油墨, 与墨汁有一定的相似之处, 不同的熟化程度有不同的润湿效果, 故选用 3 种不同熟化程度的宣纸进行研究, 实验所用纸张类型及定量如表 2 所示。选用 3 种水性油墨: 油墨 1 为速干型水性油墨, 油墨 2、3 为水性聚氨酯油墨), 实验所用油墨类型及生产厂家如表 3 所示。在实际印刷过程中, 通常对油墨进行稀释以达到更好的印刷效果。对油墨 1 进行稀释, 具体的稀释比例如表 4 所示。

表 2 纸张类型

Tab.2 Paper types

编号	纸张类型	定量/(g·m ⁻²)
120st		120
140st	双面铜版纸	140
160st		160
120dt		120
160dt	单面铜版纸	160
sx	生宣	
bshx	半熟宣	
shx	熟宣	

表 3 油墨类型

Tab.3 Ink types

油墨编号	生产厂家	颜色
油墨 1	深圳深塞尔	黑色
油墨 2	上海盛威科	黑色
油墨 3	东京 DIC 株式会社	黑色
墨汁	安徽裕泰	黑色

表 4 油墨 1 稀释比例

Tab.4 Dilution ratio of ink 1

组别	稀释剂比例 (乙醇/水)	稀释比例 (原墨/稀释剂)
油墨 1a	1 : 1	1 : 1
油墨 1b	4 : 1	1 : 1

1.2 材料性能测试

1.2.1 油墨黏度

油墨黏度是影响印刷质量的直接因素, 采用黏度测试仪测试油墨的标准黏度 (cP)。测试时, 因水性油墨较稀薄, 选取 63 号转子或 64 号转子进行测定。

1.2.2 纸张表面结构

采用扫描电子显微镜对纸张样品表面的微观形貌特征进行观察和表征。

1.2.3 纸张平滑度

采用空气泄漏法测试纸张平滑度,即在一定的真空度下,测量一定体积的空气穿过试样与试样台之间的空间所需要的时间(s)^[25]。

1.3 油墨润湿性测试

1.3.1 油墨接触角

通过测量水、墨汁和3种原墨、2种稀释油墨在纸张表面的接触角来研究油墨在纸张上的润湿性能。测试时滴到纸张表面的液滴体积约为5 μL。实验对每个液滴样品的接触角测量3次,结果取平均值。同样地,采用接触角测量仪对动态接触角进行测试,通过计时动态保存图片,分析油墨滴落后的动态变化。

1.3.2 油墨墨痕形态

通过测量水、墨汁和3种原墨、2种稀释油墨墨滴在纸张表面的墨痕形态,研究油墨在纸张上的润湿性能。宣纸的墨痕形态测试按照 GB/T 18739—2008 标准进行;其他纸张的墨痕形态测试方法^[26]为:裁剪70 mm×70 mm的纸样若干,将油墨分别装在刻度均为0.2 mL的滴定管内,并把管口调至距离纸样40 mm处,通过试管架进行固定,使墨滴滴落到纸张上直至墨痕稳定,计算墨痕纵横比、圆形度。

理想情况下,由于液体(油墨)与固体(纸张表面)的相互作用,墨滴落至纸张上呈现圆形,其横向长度与纵向长度的比值即为纵横比。圆形度C的计算见式(1)。

$$C = 4\pi A / L^2 \quad (1)$$

式中:A为墨滴面积;L为墨滴周长。

2 实验结果分析

2.1 纸张表面结构

生宣、半熟宣、熟宣、120st、120dt、140st、140dt铜版纸的微观结构如图1所示。纸张由植物纤维交织而成的网状结构组成,纤维的交织构成了纸张的多孔隙结构。如图1a所示,生宣纤维宽度约为16~20 μm,表面孔隙率较大,结构粗糙;半熟宣、熟宣纤维宽度约为8~12 μm。熟宣在加工过程中添加了明矾等施胶剂,施胶剂浸入纸张结构内部与纤维相结合,降低了纸张的表面孔隙率。3种宣纸纤维表面均出现平行皱纹,这是青檀皮细胞壁变干的产物^[27]。

铜版纸的生产需在原纸基础上涂布浆料进行压光处理,利用涂层减小纤维之间的间隙。从图1e中可看出,双面铜版纸表面被涂布层覆盖,纤维无法清晰显示,纸面平滑,存在细小的裂缝,其为涂层干燥

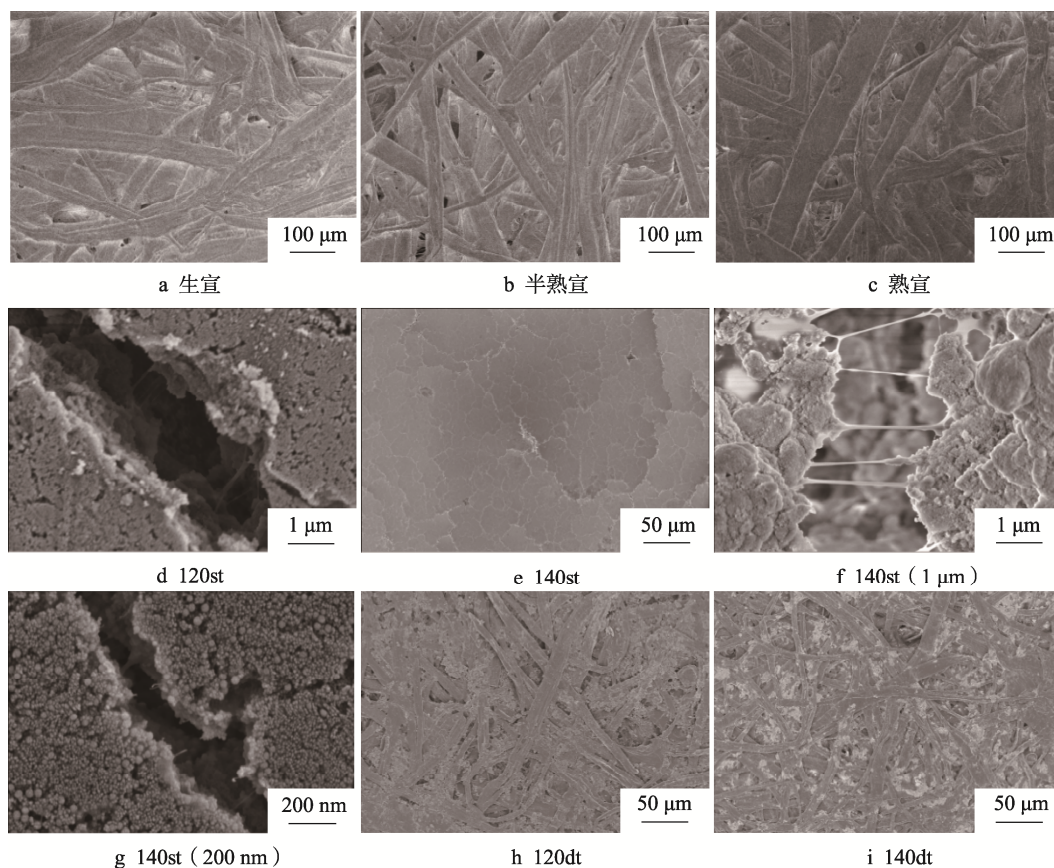


图1 承印物材料表面微观结构
Fig.1 Surface microstructure of substrate materials

压光处理的结果。裂缝放大之后如图 1f 所示, 连接的细丝为涂层中的胶黏剂, 防止纸张脱粉掉毛。从图 1h~i 中可看出, 单面铜版纸非压光面表面仍可看到纤维, 且纤维排列紧密, 可明显看出上胶痕迹, 纸张表面的粗糙度相对较大, 与铜版纸未压光面相比, 经涂布压光表面不存在由纤维组成的间隙, 表面平滑度更大。

2.2 静态接触角

静态接触角测试结果如图 2 所示。由图 2 可知, 油墨在不同纸张上的静态接触角呈现出较大的差异。从整体上看, 油墨 2、3、1a、1b 在宣纸上的接触角在 40°以下, 小于在铜板纸上的接触角, 这可能是因为宣纸与铜版纸的表面结构存在较大差异。纸张由植物纤维交织而成, 交织的网状结构形成许多空隙, 油墨在空隙较大的网状结构中更易渗透。此外, 含水量高的油墨在生宣表面的接触角约为 76°, 在熟宣表面的接触角约为 117°, 即油墨在不同熟度的宣纸上呈现出不同的润湿状态, 在铜版纸上的润湿表现相对单一。生宣纸张表面的微纳结构被油墨完全铺满, 呈现超亲水状态, 符合 Wenzel 接触角模型。

油墨墨滴从承印物表面向下运动时, 落在纸张表面纤维孔隙内, 因纤维孔隙组成的微细管道具有亲水性, 管壁内的水上升较高。当墨滴扩散到纳米结构表面时, 液体产生的表面张力与妨碍扩散发生的力相抗衡, 最终墨滴突破钉扎向上流动、向外扩散^[28]; 而熟宣

具有疏水性, 墨滴滴落后并未浸入入基底的缝隙中, 缝隙里仍有空气残留, 因此墨滴在熟宣上的润湿性较差, 符合 Cassie 接触角模型^[29]。由于宣纸表面平滑度差, 油墨的着墨性受到影响, 使用黏度稍低而流动性适度的油墨能弥补这类纸张的缺陷, 提高印刷效果; 铜版纸等中、高级用纸的纸张纤维排列紧密, 间隙少, 表面经过高质量的处理, 不宜使用黏度过大的油墨。

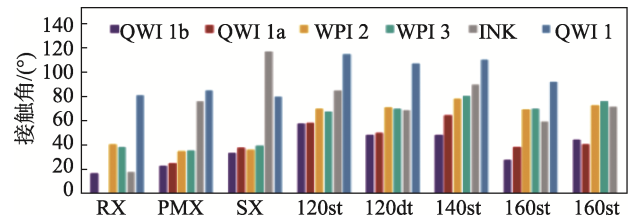


图 2 油墨在不同纸张上的接触角测试结果
Fig.2 Test results of ink contact angle on different papers

由图 3 可知, 不同油墨在纸张上的接触角数值呈分散性分布。油墨 1 在纸张上的接触角最大, 稀释后的油墨 1a、1b 接触角相对较小。不同黏度的油墨在纸张上的接触角呈阶梯状分布, 说明油墨黏度是影响其润湿性的重要因素。油墨 1 黏度约为 304.7 cP, 在铜版纸上的润湿性较差, 接触角均>90°, 无法直接用于印刷。油墨 1 在宣纸上的接触角小于在铜版纸上的接触角, 这是由于铜版纸表面经涂布后纸张纤维排列更加紧密, 阻碍了油墨渗透到纸张内部所致; 油墨 2、3 为来自不同厂家的水性聚氨酯油墨, 黏度分别约为

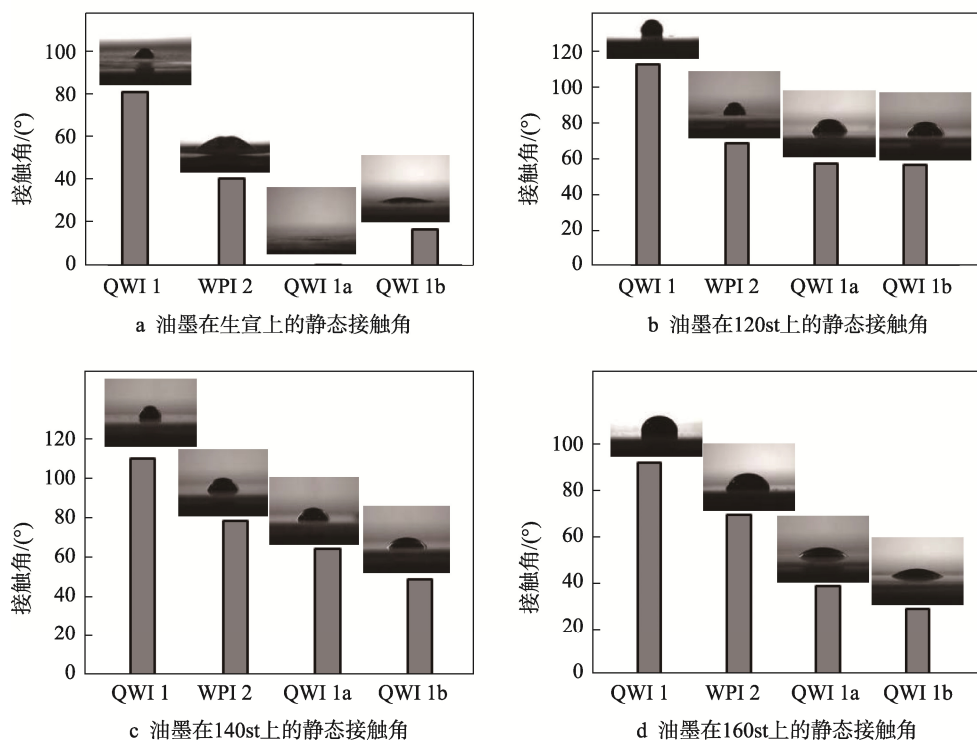


图 3 墨滴在不同粗糙度纸张上的接触角测试结果
Fig.3 Test results of contact angle of ink droplets on paper with different roughness

124.8、116.4 cP。根据静态接触角测试结果，二者在铜版纸上的润湿性稍好，接触角均在 65°左右。同样，油墨 2、3 在宣纸上的接触角小于在铜版纸上的接触角。经油墨 1 稀释后得到的油墨 1a、油墨 1b 黏度大大降低，分别约为 99.7、95.2 cP。油墨之间的相互作用力变小，流动性增加，使其在纸张上的接触角均较小，润湿性良好。为使油墨在纸张上呈现良好的润湿性，应将油墨黏度调至合适的黏度。由于油墨 1a、油墨 1b 所用的稀释剂比例不同，油墨性质存在差异。油墨 1a 所用稀释剂含水量较多、无水乙醇含量少，因此油墨 1a 的表面张力比油墨 1b 的表面张力大。当滴到相同的纸上时，油墨 1b 在纸张上的接触角比油墨 1a 的接触角小，润湿效果更好。

2.3 动态接触角

动态接触角反映油墨在纸张表面的吸收和扩散情况。

1) 140st 双面铜版纸。如图 4 所示，剂量为 5 μL 的稀释油墨 1a 滴落时 (0 s) 接触角为 72.44°，40 s 时接触角为 62.49°，80 s 时接触角为 61.52°，120 s 时接触角为 55.58°。在 0~120 s 内，接触角不断减小，出现三相接触线钉扎效应，接触线没有移动。240 s 时，墨滴的三相接触线明显向内移动，且外沿的油墨已干燥，而内圈的油墨接触角仍为 20.21°。420 s 时，油墨 1a 已完全干燥。由此可知，油墨 1a 在纸张上的润湿性稍差，扩散、干燥速度较慢。

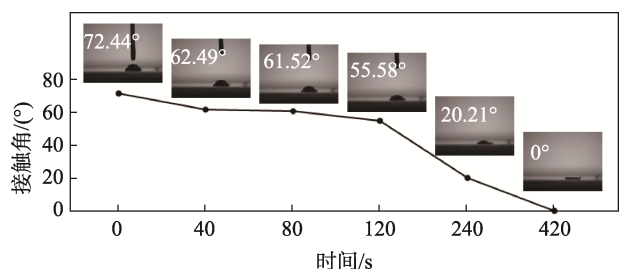


图 4 油墨 1a 在 140st 双面铜版纸上的动态接触角
Fig.4 Dynamic contact angle of ink 1a on 140 st double-sided coated paper

如图 5 所示，油墨 1b 滴落时 (0 s) 接触角为 49.55°，40 s 时接触角为 21.88°，80 s 时接触角为 15.39°，120 s 时墨滴向内微微凹陷，已呈现干燥趋势。在 0~40 s 内，油墨 1a 的接触角减小 9.95°，油墨 1b 的接触角减小 27.67°。与油墨 1a 相比，油墨 1b 的润湿性更好，干燥速度更快，具有良好的印刷性能。

如图 6 所示，墨滴滴落时 (0 s) 接触角为 86.63°，0~120 s 内接触角变化不明显，并在较长的时间内保持较大的接触角，墨滴未能较快地在纸张上扩散，润湿性较差。

2) 120st 双面铜版纸。如图 7 所示，墨滴滴落时 (0 s) 接触角为 85.09°，0~420 s 内接触角不断减小，以均匀的速度缓慢扩散。

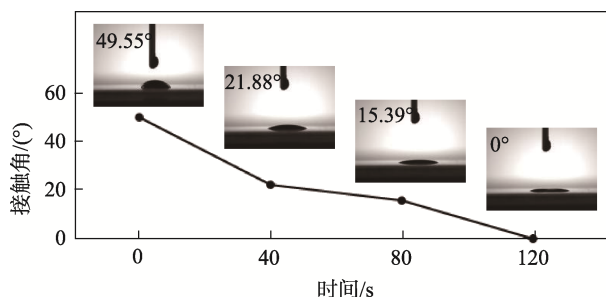


图 5 油墨 1b 在 140st 双面铜版纸上的动态接触角
Fig.5 Dynamic contact angle of ink 1b on 140 st double-sided coated paper

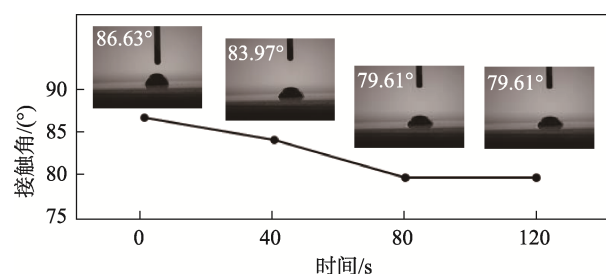


图 6 墨滴在 140st 双面铜版纸上的动态接触角
Fig.6 Dynamic contact angle of ink on 140 g double-sided coated paper

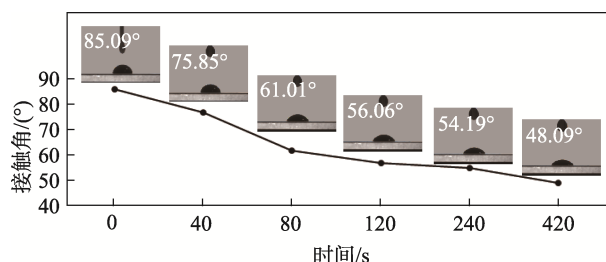


图 7 墨汁在 120st 上的动态接触角
Fig.7 Dynamic contact angle of ink at 120 st

如图 8 所示，油墨 1b 滴落时 (0 s) 接触角为 39.71°，40 s 时接触角为 12.82°，80 s 时接触角为 7.63°。同样地，油墨 1b 比油墨 1a 的润湿性更好，干燥速度更快，与油墨 1b 在 140st 双面铜版纸上的润湿行为表现出相同的规律。

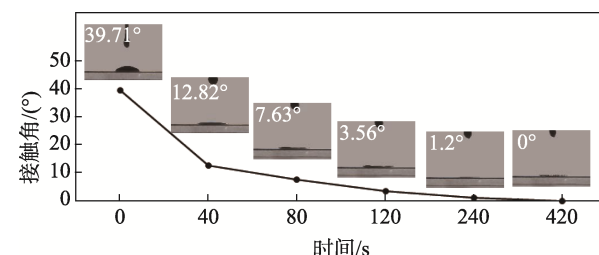


图 8 油墨 1b 在 120 st 上的动态接触角
Fig.8 Dynamic contact angle of ink 1b at 120 st

如图 9 所示，油墨 1a 滴落时 (0 s) 接触角为 34.41°，40 s 时接触角为 17.23°，80 s 时接触角为 15.66°，120 s 时接触角为 11.26°，240 s 时接触角为 9.06°，420 s 时，油墨 1a 已完全干燥。相比之下，油

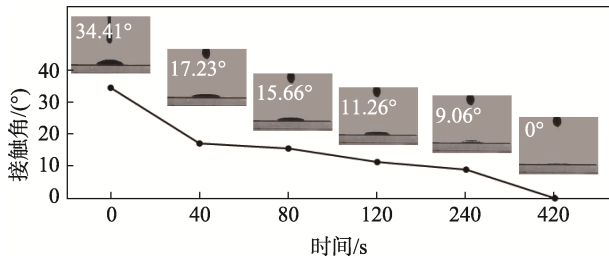


图 9 油墨 1a 在 120 st 上的动态接触角
Fig.9 Dynamic contact angle of ink 1a at 120 st

墨 1a 的干燥速度小于油墨 1b。由此可知, 油墨在 120st 铜板纸上的润湿性优于在 140st 铜版纸上的润湿性。

3) 熟宣纸。如图 10 所示, 剂量为 5 μL 的墨滴滴落时 (0 s) 接触角为 119.69°, 400 s 时接触角为 106.88°, 在较长时间内墨滴在熟宣表面仍有较大的接触角, 墨滴三相接触线钉扎现象十分明显。与铜版纸相比, 熟宣渗水的能力较差, 能保持更长时间的疏水性能。由动态接触角测试结果发现, 油墨 1b 的润湿性能最佳。

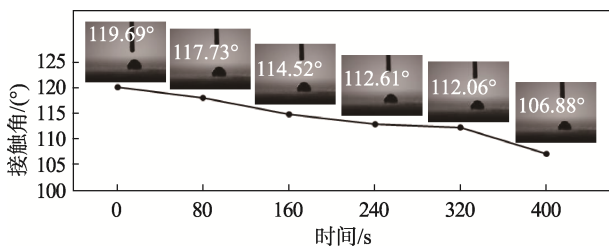


图 10 墨汁在熟宣上的动态接触角
Fig.10 Dynamic contact angle of ink on cooked rice paper

2.4 墨痕形态分析

油墨 1、油墨 1a、油墨 1b 在不同纸张上的墨滴纵横比及圆形度数据如表 5~7 所示。油墨 1 墨滴的纵横比、圆形度均接近于 1, 说明油墨 1 在各种纸张上的墨痕形状均较好, 滴落到纸张上时能保持稳定的状态, 间接反映了油墨 1 的润湿性较差。油墨 1a 墨滴纵横比、圆形度比油墨 1 整体略差。油墨 1b 墨滴纵横比、圆形度与油墨 1a 相似, 但逊色于油墨 1a。油墨在宣纸上的圆形度相对较差, 在生宣上的圆形度离 1 最远, 在铜版纸上的纵横比、圆形度相对较好, 接近于 1。

油墨平均圆形度与油墨在纸张上的静态接触角有一定的关系 (图 11)。随着墨滴墨痕在纸张上的圆形度增加, 其在纸张上的接触角增大, 润湿性变差, 即油墨在纸张上的润湿性与墨痕圆形度呈负相关关系。对数据进行拟合分析, 得到油墨平均圆形度与静态接触角的关系, 如图 12 所示。

2.5 纸张平滑度对润湿性的影响

纸张平滑度的数据如表 8 所示。纸张平滑度反映了纸张的粗糙程度, 这种粗糙程度的差异主要由纤维的排列分布不同引起。由表 8 可知, 生宣的平滑度最低, 这是因为生宣表面的结构疏松, 纸张纤维之间的空隙较大。120st 双面铜版纸平滑度最高, 远大于其他纸张, 这是因为其表面进行了双面涂布压光处理。从整体上看, 宣纸的表面粗糙度较大, 不同熟度的宣纸外观十分相近, 铜版纸表面更为光滑。

表 5 油墨 1 的面积、纵横比及圆形度
Tab.5 Area, aspect ratio, and circularity of ink 1

纸样种类	160st	160dt	120st	120dt	140st	sx	bshx	shx
面积/ mm^2	17.760	18.860	13.270	13.40	20.900	26.288	27.313	17.218
纵横比	1.070	0.992	1.005	1.005	1.048	1.083	1.193	0.891
圆形度	0.981	0.973	0.999	0.989	0.965	0.931	0.910	0.927

表 6 油墨 1a 的面积、纵横比及圆形度
Tab.6 Area, aspect ratio, and circularity of ink 1a

纸样种类	160st	160dt	120st	120dt	140st	sx	bshx	shx
面积/ mm^2	128.500	45.720	56.610	49.140	58.088	9.402	106.111	48.788
纵横比	1.114	1.008	1.002	0.992	1.000	1.051	1.069	0.872
圆形度	0.964	0.989	0.991	0.990	0.992	0.890	0.904	0.927

表 7 油墨 1b 的面积、纵横比及圆形度
Tab.7 Area, aspect ratio, and circularity of ink 1b

纸样种类	160st	160dt	120st	120dt	140st	sx	bshx	shx
面积/ mm^2	136.460	80.270	64.130	9.980	50.679	41.329	97.835	55.915
纵横比	1.051	0.982	0.944	0.975	1.088	0.764	0.721	0.954
圆形度	0.898	0.986	0.956	0.982	0.952	0.835	0.905	0.946

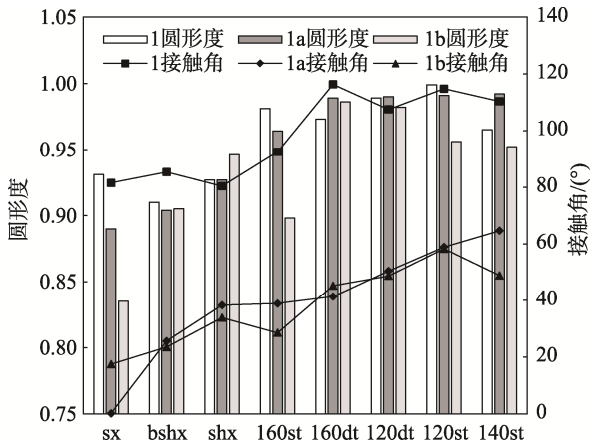


图 11 圆形成度对静态接触角的影响

Fig.11 Effect of circularity on static contact angle

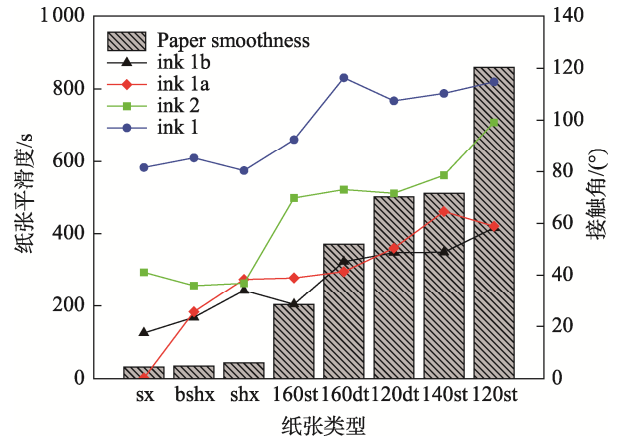


图 13 油墨在不同平滑度纸张上的接触角

Fig.13 Contact angle of ink on paper with different smoothness

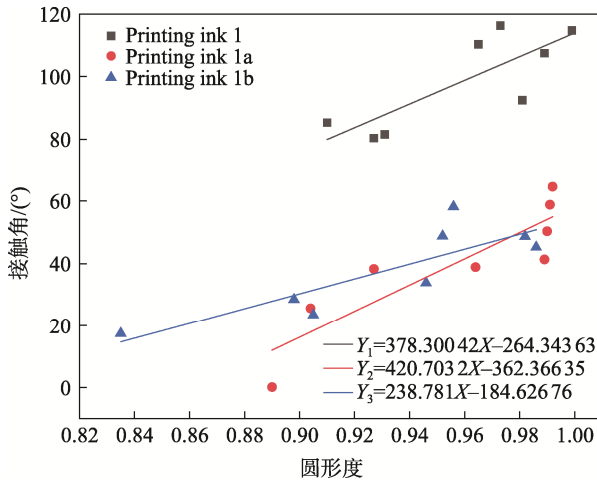


图 12 圆形成度与静态接触角的关系

Fig.12 Relationship between circularity and static contact angle

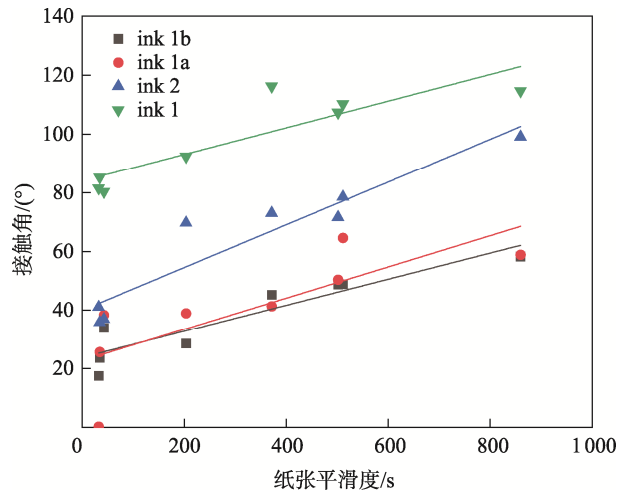


图 14 纸张平滑度与静态接触角的关系

Fig.14 Relationship between paper smoothness and static contact angle

表 8 纸张平滑度

Tab.8 Paper smoothness

纸样种类	sx	bshx	shx	160st	160dt	120dt	140st	120st
平滑度/s	32.07	34.30	42.70	20.47	371.50	501.93	511.20	859.73

油墨在不同平滑度的纸张上的接触角如图 13 所示,当纸张表面平滑度较低时,油墨在纸张上的接触角较小,拥有较好的润湿性。随着纸张平滑度增加,油墨在纸张上的接触角显著增大,润湿性变差。同一种油墨在不同铜版纸上的润湿性与纸张的平滑度呈负相关关系。通过对数据的线性拟合分析,得到纸张平滑度与油墨静态接触角的关系如图 14 所示。

表面自由能较高的涂布纸在印刷过程中易被润湿,有利于避免由于润版液在纸张表面未被充分吸收或均匀扩散等引起的印刷问题^[29]。涂布纸平滑度对纸张表面自由能及润湿性的影响十分显著,越粗糙的涂布纸,其表面自由能的极性分量越小,即纸张的亲水性较好,纸张表面易被润湿。由此可知,本研究中,

油墨在宣纸表面的接触角比在平滑度更高的铜版纸表面的接触角更小,这是由于宣纸表面的粗糙度相对较大,水性油墨在其表面的浸润性更好。另外,粗糙的宣纸表面纤维形成的空隙结构(图 1)更有利于水性油墨在其中的渗透,进而增强油墨在纸张表面的润湿性。

2.6 油墨黏度对润湿性的影响

油墨黏度测试结果如表 9 所示,油墨 1 黏度最大,油墨 2、3 黏度适中。向油墨 1 中加入酒精稀释后,油墨的表面张力减小,润湿性相应地提高。经稀释后得到油墨 1a、油墨 1b,其中油墨 1b 的黏度最小。

不同黏度的油墨在各种纸张上的接触角如图 15 所示,当油墨黏度较高时,油墨在纸张上的接触角较大,润湿性差。随着油墨黏度降低,油墨在纸张上的接触角显著减小,润湿性变好。不同油墨在同种纸张上的润湿性与油墨的黏度呈负相关关系。由此可见,为确保印刷过程中油墨在纸张表面完全润湿,需调整油墨黏度至适中以满足印刷需求。

表 9 油墨黏度
Tab.9 Ink viscosity

油墨编号	油墨 1	油墨 1a	油墨 1b	油墨 2	油墨 3
油墨黏度/cP	304.7	99.7	95.2	124.8	116.4

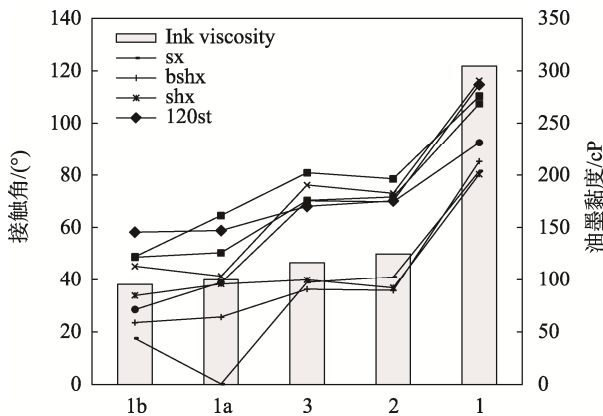


图 15 不同黏度的油墨在纸张上的接触角
Fig.15 Contact angle of ink with different viscosity on paper

3 结论

经多轮测试, 比较了不同油墨在常见纸张上的润湿性。用静态接触角反映纸张的润湿性能, 动态接触角反映液体在纸张表面的吸收和扩散情况。对纸张性能(纸张表面结构、纸张平滑度)、油墨性能、墨滴墨痕形态分别进行分析, 得到相关参数与润湿性的关联性, 最终得出如下结论。

1) 纸张平滑度对静态接触角的影响显著, 静态接触角随纸张平滑度的增大而增大, 使得油墨在纸张上的润湿性变差。不同油墨在同种纸张上的润湿性与油墨的黏度呈负相关关系, 且油墨在纸张上的润湿性与墨痕圆形态呈负相关关系。

2) 宣纸与铜版纸的表面结构存在较大差异, 油墨在宣纸上的接触角小于在铜版纸上的接触角。在凹版印刷的实际生产中, 为使油墨在纸张上呈现出良好的润湿性, 应根据纸张的表面性质将油墨黏度调至合适的黏度。对于宣纸等表面平滑度差、着墨性弱的纸张, 应使用黏度稍低而流动性适度的油墨, 以弥补这类纸张的缺陷, 提高印刷效果。铜版纸等平滑度较高的中、高级用纸的纸张纤维排列紧密, 间隙少, 表面经过高质量的处理, 不宜使用黏度过大的油墨。

3) 不同的油墨具有不同的润湿性, 经适宜的稀释剂稀释后油墨的润湿性有所提升。

参考文献:

[1] 徐嘉妮. 凹版胶印过程中油墨转移机理研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2022.

XU J N. Research on Ink Transfer Mechanism in Gravure Offset Printing Process[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2022.

[2] SHARMA B, SINGH S, PANDEY A, et al. Environment-Friendly and Cost-Effective Solution for Flexible Packaging Printing Process by Advancement in Engraving Proces[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2022, 25(3): 909-920.

[3] ZHANG J M, DING W, WANG Z K, et al. Microscopic Liquid-Gas Interface Effect on Liquid Wetting[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 630: 813-822.

[4] 邢瑞哲. 基于多层级结构设计的 3D 打印功能材料及应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.

XING R Z. Research on 3D Printing Functional Materials and Applications Based on Multilayer Structure Design[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

[5] WANG H, LIU C, ZHAN H, et al. Droplet Asymmetric Bouncing on Inclined Superhydrophobic Surfaces[J]. Acs Omega, 2019, 4(7): 12238-12243.

[6] ZHENG J, FANG R R, XU Z Y, et al. Impact Dynamics of Water Droplets on Oil-Covered Dielectrowetting Substrate: Effects of Oil Film Thickness and Surface Wettability[J]. Applied Surface Science, 2024, 659: 159886.

[7] SONG H, CHANG S, WU K. Experimental Investigation of Airflow-Assisted Water Droplet Impact on Horizontal Solid Surface[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: 120789.

[8] 高玉瑞. 微纳结构表面水的浸润动力学[J]. 中国科学(化学), 2024, 54(1): 73-84.

GAO Y R. Wetting Behavior of Water on Micro-/Nanostructured Surfaces[J]. Science China: Chemistry, 2024, 54(1): 73-84.

[9] 秦佳航. 材料表面浸润性的改性及其对萃取塔水力性能的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.

QIN J H. Modification of Surface Wettability of Materials and Its Effect on the Hydraulic Properties of Extraction Towers[J]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.

[10] HU T, WANG X, SHENG H, et al. Interfacial Charge Transfer Modulated Static Friction Resistance of Water Drops[J]. Langmuir, 2023, 39(26): 9246-9252.

[11] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of Porous Surfaces[J]. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40: 546-551.

[12] ZOU L X, CHANG H, QIN S, et al. Effects of Surface Roughness on CMAS Wetting and Corrosion Behaviour of Rare Earth Modified Zirconia Coatings[J]. Ceramics International, 2024, 50(2): 3064-3073.

[13] DRELICH J. The Effect of Drop (Bubble) Size on Con-

- tact Angle at Solid Surfaces[J]. *Journal of Adhesion*, 1997, 63: 31-51.
- [14] DU Q J, ZHOU P, PAN Y P, et al. Influence of Hydrophobicity and Roughness on the Wetting and Flow Resistance of Water Droplets on Solid Surface: A Many-Body Dissipative Particle Dynamics Study[J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 249: 117327.
- [15] 周蕊, 金海云, 高乃奎, 等. 表面粗糙度对硅橡胶材料表面超疏水性的影响[J]. *中国表面工程*, 2009, 22(6): 30-35.
ZHOU R, JIN H Y, GAO N K, et al. Influence of Surface Roughness on Superhydrophobicity of Silicone Rubber Surface[J]. *China Surface Engineering*, 2009, 22(6): 30-35.
- [16] 林湧财. 凹版印刷工艺的常见问题及解决措施分析[J]. *上海轻工业*, 2023(5): 159-161.
LIN Y C. Analysis of Common Problems and Solutions in Gravure Printing Process[J]. *Shanghai Light Industry*, 2023(5): 159-161.
- [17] TOSHIKJ, E, PRANGOSKI, B. Textile Sublimation Printing: GLCM Print Mottle Assessment of Black Printed Fabric[J]. *Materials Science*, 2023, 33(4): 366-374.
- [18] 王鑫, 袁英才, 李恒, 等. 基材表面粗糙度对油墨润湿性的影响[J]. *北京印刷学院学报*, 2023, 31(12): 35-38.
WANG X, YUAN Y C, LI H, et al. The Effect of Substrate Surface Roughness on Ink Wettability[J]. *Journal of Beijing Institute of Printing*, 2023, 31(12): 35-38.
- [19] MAO T, KUHN D C S, TRAN H. Spread and Rebound of Liquid Droplets Upon Impact on Flat Surfaces[J]. *AIChE Journal*, 1997, 43(9): 2169-2179.
- [20] LEE K S, IVANOVA N, STAROV V M, et al. Kinetics of Wetting and Spreading by Aqueous Surfactant Solutions[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2008, 144(1-2): 54-65.
- [21] Girard F, Attané P, Morin V. A New Analytical Model for Impact and Spreading of One Drop: Application to Inkjet Printing[J]. *Tappi Journal*, 2006, 5(12): 24-32.
- [22] HE S F, ZHU Z P, ZHANG B, et al. Wetting Thresholds for Long-Lasting Superwettability: From Intrinsic Wetting Boundary to Critical Roughness Value[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 454: 140058.
- [23] WANG Y, WANG Y, CHEN J J, et al. A Facile Process Combined with Inkjet Printing, Surface Modification and Electroless Deposition to Fabricate Adhesion-Enhanced Copper Patterns on Flexible Polymer Substrates for Functional Flexible Electronics[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 218: 24-31.
- [24] EMAMIAN S, NARAKATHU B, CHLAIHAWI A A, et al. Fabrication and Characterization of Piezoelectric Paper Based Device for Touch and Force Sensing Applications[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 168: 688-691.
- [25] 袁小平. 纸张物理特性对印刷质量的影响研究[J]. *造纸装备及材料*, 2023, 52(9): 8-10.
YUAN X P. Research on the Influence of Physical Properties of Paper on Printing Quality[J]. *Paper Equipment and Materials*, 2023, 52(9): 8-10.
- [26] 陈梦如. 不同熟化程度宣纸润墨性能研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2022.
CHEN M R. A Study on the Moisturizing Performance of Rice Paper with Different Maturation Degrees [D]. Beijing: Beijing Institute of Printing, 2022.
- [27] 潘芊芊, 刘铮峰, 周文华, 等. 豆浆水浓度对宣纸润墨性能影响初探[J]. *北京印刷学院学报*, 2023, 31(6): 12-16.
PAN Q Q, LIU Z F, ZHOU W H, et al. A Preliminary Study on the Effect of Soybean Milk Water Concentration on The Ink Moistening Performance of Rice Paper[J]. *Journal of Beijing Institute of Printing*, 2023, 31(6): 12-16.
- [28] CHEN W P, XIANG Y, KONG X Y, et al. Polymer-Based Membranes for Promoting Osmotic Energy Conversion[J]. *Giant*, 2022, 10: 100094.
- [29] 苗成. 润版液及纸张表面性能对涂布纸润湿性能的影响[J]. *国际造纸*, 2015, 34(5): 37-44.
MIAO C. Effect of Paper Surface Properties on Coated Paper Wettability with Different Fountain Solutions[J]. *World Pulp and Paper*, 2015, 34(5): 37-44.