# 纸张表面的喷墨扩展分析

郑 亮,金张英,程鹏飞
(上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093)

**摘要:** 借助墨滴观测仪和工业显微镜,获取了墨滴在撞击纸张前后的状态及数据。在测量喷墨记录点亮度数据的基础上,分析了纸张表面的喷墨记录点扩展。定义了喷墨记录点内外边缘对应的反射系数,并验证了其可行性。讨论了影响喷墨记录点大小、形状、模糊度的因素,计算了不同承印材料的墨滴扩展比。

**关键词:** 喷墨印刷; 墨滴扩展; 模糊度; 扩展比; 圆度
**中图分类号:** TS802.2; TS801.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)23-0114-06

## Analysis on Spreading of Ink-jet on Paper

*ZHENG Liang, JIN Zhang-ying, CHENG Peng-fei*
(Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** With the droplet observation instrument and industrial microscopy, the states and data of the droplets before and after they impacted the paper were obtained. The spreading of inkjet recording dots on paper surface was analyzed based on luminance data. The reflection coefficients corresponding to the inner and outer edges of the inkjet recording dots were defined and the feasibility was verified. The factors influencing the radius, shape, and blurriness of recording dots were discussed and the spread-ratio of droplet on different paper was calculated.

**Key words:** ink-jet printing; ink drop spreading; blurriness; spread-ratio; roundness

喷墨记录点是喷墨印刷品的基本结构单元,通过撞击到纸张的墨滴扩展(扩散)程度决定记录点大小。墨滴喷射到纸张等承印材料表面后的墨滴扩展现象,由动态扩展和墨水渗透进纸张这 2 个连续的物理过程组成,仅当墨滴的剩余动能耗尽,墨水动态扩展和渗透过程结束时,才有可能从墨滴转换成记录点[1]。

设计喷墨打印头时,必须考虑到墨滴体积与经扩展和渗透过程转换所得记录点尺寸的关系。多位学者提出了预测墨滴撞击到纸张后行为特征的数值模拟方法,如 S. E. Bechtel 等人提出基于假设的流动图案方法、D. Takahashi 等人提出的预测墨滴扩展的半经验公式等,这些方法可以描述喷墨印刷设备与材料组合系统的墨滴扩展现象。Patrick Emmel 提出的记录点的高分辨率栅格模型[2],是基于透明薄膜(有墨水吸收层)上的喷墨打印结果的显微密度数据,是否适用于纸张喷墨印刷有待验证。国内也有研究人员提出使用分形理论对油墨铺展进行模拟[3-4]。

在借鉴以上研究结果的基础上,使用工业显微镜拍摄纸张上的孤立喷墨记录点,在利用软件测量、分析墨滴的亮度数据的基础上,分析纸张表面喷墨印刷记录点的扩展。

## 1 纸张表面的墨滴扩展

根据最小表面能原理,墨滴与纸张撞击前为球形。为了保证墨滴飞行轨迹的直线度和飞行的稳定性,墨滴脱离射流母体后具有较大的初始动能。墨滴在穿过空气飞行时会不断地消耗动能,用于克服空气阻力。由于墨滴飞行距离并不长,因而与纸张撞击时墨滴仍然保持一定数量的剩余动能。墨滴与纸张撞击后发生扩散和渗透,其实是剩余动能在起作用。

实验结果表明,只要驱动波形设计合理,喷墨打印头与墨水组成的墨滴喷射系统符合层流喷射条件,则墨滴在恒定条件下扩展现象的可重复性良好。墨

**收稿日期:** 2012-06-07
**基金项目:** 上海市教育委员会科研创新项目(12YZ198)
**作者简介:** 郑亮(1975-),男,辽宁阜新人,硕士,上海出版印刷高等专科学校工程师,主要研究方向为印前技术与数字印刷等。

滴撞击到纸张后仅几微秒的时间就开始扩展，先演变成局部球形，随着接触角变小，最终扩展为圆盘状。当墨滴与纸张表面接触后 10 ~ 20 μs 的时间内扩展达到最大值，墨滴撞击到纸张表面时的所有剩余动能全部耗散[5]。

纸张的多孔结构会造成墨水向下渗透，在此作用下，墨水以圆盘状整体下沉。由于墨水的表面张力作用，墨水圆盘顶部仍具有球形特点，所以墨水在纸张表面的部分会越来越小，最后形成的记录点边缘也会产生回缩现象。墨水向纸张渗透的路径并不完全是垂直向下的，也可以向四周扩散，这也使记录点边缘处产生模糊现象。

根据能量耗散理论，如果墨滴与纸张撞击后墨水沿各方向的能量损耗处处相等，即墨滴的能量损耗是各向同性的，则扩散和渗透的结果产生理想圆形记录点。由于不同纸张类型表面结构的均匀性差异，必然影响墨滴与纸张撞击后能量耗散的均匀性，导致最终的记录点圆度存在差异。

## 2　喷墨记录点质量指标

墨滴喷射到纸张表面后发生的扩散和渗透效应决定记录点质量。评价记录点质量的指标有很多，其中最重要的是记录点尺寸和形状均匀性。

### 2.1　记录点尺寸

大量的实验结果表明，由墨滴转变的记录点应为圆形，那么记录点的尺寸就可以用直径表示。按前文对墨滴扩展的分析，记录点边缘处会产生模糊现象，对确定记录点边缘带来一定的影响。参照 ISO 13660[6]规定线条边缘内边界和外边界的方法，定义喷墨记录点外边缘对应为反射系数 $R_{10}$ 的边缘，喷墨记录点内边缘对应为反射系数为 $R_{90}$ 的边缘。相应的反射系数 $R_{90}$ 和 $R_{10}$ 可用下述公式计算，其中 $R_{max}$ 和 $R_{min}$ 分别为记录点外纸张的像素值平均值和记录点中间部分像素值平均值。墨滴一侧外边缘到另一侧外边缘的距离即为记录点直径。考虑到纸张不可能真正各向同性，可用不同方向上的直径平均值评价记录点尺寸。

$$R_{90}=R_{max}-(R_{max}-R_{min})90\%$$
$$R_{10}=R_{max}-(R_{max}-R_{min})10\% \quad (1)$$

### 2.2　记录点形状

就记录点形状均匀性指标而言，按圆度评价是比较合适的。圆度可用公式(2)计算，其中 $L$ 和 $A$ 分别代表测量圆的周长和面积。若圆度值为 1，则表示一个完全的圆形；当圆度值接近 0 时，表示一个逐渐拉长的多边形。

$$圆度=\frac{4\pi A}{L^2} \quad (2)$$

### 2.3　墨滴扩展比

讨论墨滴在纸面上的扩展和渗透的目的，是要研究墨滴转换成在纸面上的记录点的扩展情况。设记录点直径为 $D$，喷射到纸面前的墨滴直径为 $d$，则：

$$扩展比=\frac{D}{d} \quad (3)$$

此比值应由喷墨系统的韦伯数、雷诺数、墨滴与纸张接触角和纸张表面粗糙度等共同决定。参考文献[5]中的墨滴扩展比公式表明，墨滴扩展比仅与韦伯数和雷诺数有关，与纸张类型无关。

### 2.4　记录点边缘模糊度

参照 ISO 13660 规定线条模糊度的方法，定义喷墨记录点各个半径上的内、外边缘的距离为记录点边缘模糊度，用来评价喷墨记录点边缘的朦胧或模糊程度。

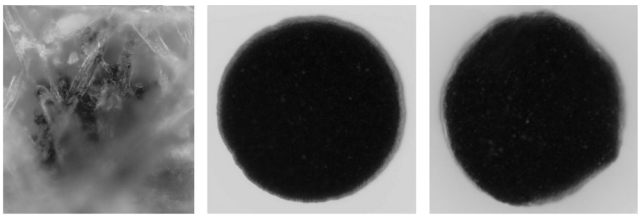
## 3　实验

### 3.1　设备及方法

使用墨滴观测仪 IIA-1501-B 作为喷墨设备，其上配备了一个 Spectra SE128 喷墨打印头，含 128 个喷嘴，分辨率为 50 dpi。波形的上升沿、下降沿均为 2 μs，电压持续时间为 6 μs。墨水为某款韩国油性墨水。设计适合喷墨打印头的测试图，将喷墨头驱动脉冲电压设置为 95 V，分别在喷墨相纸、数码打样纸和 80 g/m² 打印纸 3 种承印物上打印；并将电压设置为 85 V，再次在喷墨相纸上进行打印，分析不同喷墨条件的影响。通过墨滴观测仪软件对喷嘴控制，得到与喷嘴相对应的孤立喷墨记录点。

打印结果借助配备有 SC30 数码显微照相装置、MPLFLN 物镜的 Olympus MX61L 工业显微镜，以 100 倍的放大倍率拍摄纸张上的孤立记录点。

实验喷墨系统在 3 种承印材料的打印记录点见图 1。由图 1a 可以看出，墨水已完全渗透至打印纸内部，基本上不存在完整的记录点形态；由图 1b 和 c 可以看出，纸张上的记录点形状完整，边缘清晰。基于



a 80 g/m²打印纸　　b 喷墨相纸　　c 数码打样纸

图 1　不同承印物上的喷墨记录点

Fig. 1 Ink-jet recording dots on different kind of paper

这种情况，下面的喷墨记录点扩展分析讨论不包含 80 g/m² 打印纸承印材料这种情况。从图 1b 和 c 还可以看出，记录点中间部分的亮度变化不大，只有靠近边缘处的亮度变化比较明显，所以只从接近记录边缘处开始数据的测量。

### 3.2　数据测量

通过墨滴观测仪上的 LED 灯和摄像头可以拍摄喷墨墨水在空中形成球形墨滴的画面，再利用墨滴观测仪软件测量墨滴的体积。考虑到墨滴在飞行过程中要取表面能最小的形状，可以假想墨滴为球形，则墨滴直径可由球状墨滴的体积转换而来。

使用软件读取工业显微镜拍摄的喷墨记录点图片的像素值。以记录点视觉中心为坐标原点建立坐标系，由内向外每 5 个像素宽度建立一个环形选区，在每个环形上以 15°为角度差均匀选取测量区域，周向上每个测量区域范围为 2°，分别测量每个测量区域的像素平均值，每个环形选区共可测得 24 个测量数据。测量区域见图 2，每个白色框为一个测量区域，

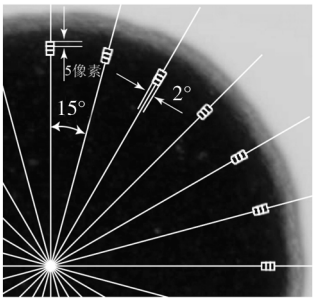



图 2　测量区域

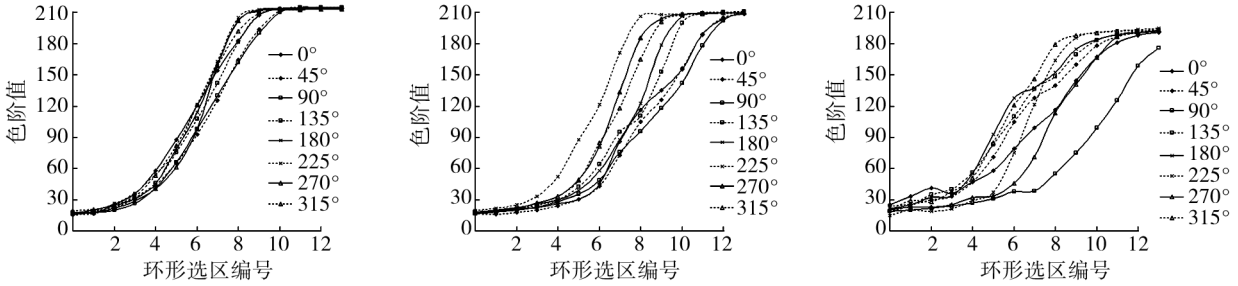
Fig. 2 Measurement area diagram

每个测量区域中心的坐标初始值为像素位置。在放大 100 倍时，工业显微镜的校准图像参数为 0.128 μm/pixel，故可将像素位置转换为长度单位。为验证数据的准确性，每个实验条件得到的结果各测量 5 个孤立喷墨记录点数据，取它们的平均值进行数据分析。

## 4　结果和分析

### 4.1　喷墨记录点边缘的确定

根据测量数据，可以绘制记录点从坐标原点到边缘的亮度变化。3 个实验条件下喷墨记录点在不同径向方向上的亮度变化见图 3。选取的径向方向角度




a 喷墨驱动电压85 V，相纸　　b 喷墨驱动电压95 V，相纸　　c 喷墨驱动电压95 V，数码打样纸

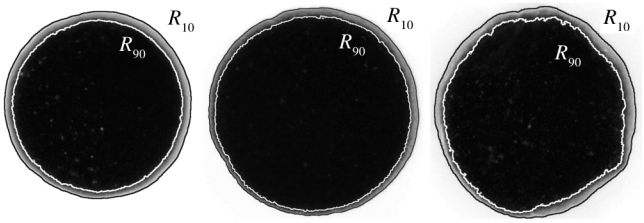
图 3　记录点不同径向方向上的亮度

Fig. 3 Brightness of recording dots in several radial directions

差为 45°。横轴为环形选区编号，纵轴为像素值平均值。从图 3 可以看出，在不同承印材料上的记录点中间部分亮度基本相同，像素值平均值在 20 左右，这说明喷墨设备在承印物上所能形成的最大密度与承印材料无关，只与喷墨墨水的光学特性相关。记录点边缘的不同径向方向上亮度过渡有所差别，但都符合离坐标原点越远，亮度越大的规律。当测量位置超出记录点范围后，亮度不再发生变化，这实际上是指纸张的亮度。不同承印材料的像素值平均值有较大差异，其中喷墨相纸像素值平均值为 210 左右，而数码打样纸的像素值平均值在 190 左右。

将不同纸张的像素值平均值和记录点中间部分

像素值平均值分别代入式(1),可算得不同实验条件下 $R_{90}$ 和 $R_{10}$ 所对应的像素值。喷墨设备与相纸组合系统的 $R_{90}$ 和 $R_{10}$ 分别为 39 和 191,喷墨设备与打样纸组合系统的 $R_{90}$ 和 $R_{10}$ 分别为 37 和 173。图 4 中白线




a 85 V,相纸　　b 95 V,相纸　　c 95 V,打样纸

图 4　喷墨记录点的内外边缘

Fig. 4 Inner and outer edge of recording dots

标记为反射系数 $R_{90}$ 的位置,黑线标记为反射系数 $R_{10}$ 的位置,从左到右分别是喷墨驱动电压 85 V/相纸打印、喷墨驱动电压 95 V/相纸打印、喷墨驱动电压 95 V/数码打样纸打印。可以看到以反射系数 $R_{90}$ 和 $R_{10}$ 定义记录点内、外边缘是与视觉基本相符的,$R_{10}$ 正是记录点的边缘。

## 4.2　记录点尺寸

按上述方法确定喷墨记录点的外边缘所对应的像素值后,就可以确定记录点尺寸。考虑到测量数据为 5 个像素宽度选区内的像素值平均值,同一径向方向上相邻选区的中心距离仅有 0.64 μm,因此可以根据同一径向方向上像素平均值最接近外边缘像素值的 2 个相邻选区中心的坐标,使用线性插值算法,计算出记录点该径向方向上外边缘像素值的坐标位置。根据记录点水平、垂直方向的直径尺寸,可以分别求得相同实验条件下 5 个记录点的几何中心位置坐标,通过坐标变换,将 5 个记录点中心对齐,求出 5 个记录点各径向方向上半径的平均值。在数据处理过程中发现,相同实验条件下的记录点尺寸相差不大,绝大多数半径长度误差都在 1 μm 以内,这说明墨滴转变为记录点的过程是可重复的、稳定的。

3 个实验条件下喷墨记录点各径向的半径长度见图 5。可以看出,高驱动电压所形成的喷墨记录点尺寸大于低驱动电压所形成的喷墨记录点尺寸,这说明,喷墨驱动电压对喷墨系统在承印材料上产生的记录点大小起决定性作用。高驱动电压情况下形成的墨滴更大,墨滴飞行速度更快,墨滴撞击纸张后的剩余动能更大,所以在纸张上的扩展与渗透行为更严

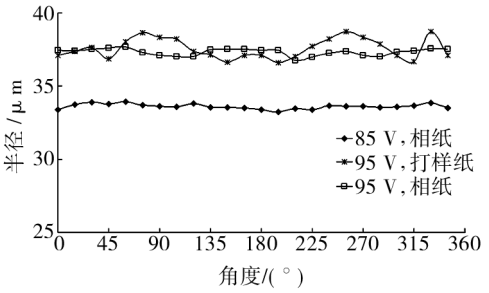



图 5　喷墨记录点不同角度的半径

Fig. 5 Radius of recording dots in different directions

重。

另外,承印材料各向同性程度也会影响到墨滴在其上的扩展及渗透行为,导致记录点在各径向方向上的半径差异。从图 5 可以看出,喷墨相纸上的记录点各方向上半径的差异很小,而数码打样纸上的记录点各方向上半径的差异比较明显。

## 4.3　记录点形状

根据前文对纸张表面的墨滴扩展的分析,墨滴转换得到的记录点应为圆形,这一点通过图 1 也可以验证。使用线性插值算法计算出记录点外边缘的位置后,就可计算记录点的圆度。3 种实验条件下记录点的圆度见表 1 和图 6。

**表 1　记录点的圆度**

**Tab. 1 Roundness of recording dots**

| 实验条件 | 圆度 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 样本 1 | 样本 2 | 样本 3 | 样本 4 | 样本 5 |
| 85 V,相纸 | 0.89 | 0.87 | 0.88 | 0.88 | 0.87 |
| 95 V,相纸 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.88 | 0.88 |
| 95 V,打样纸 | 0.80 | 0.81 | 0.71 | 0.73 | 0.83 |

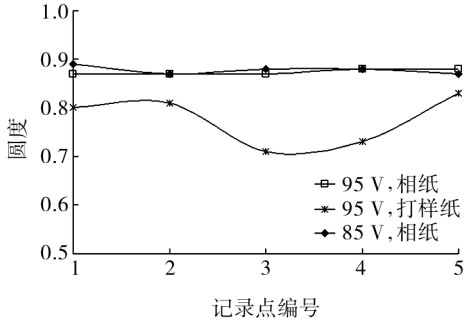



图 6　记录点圆度比较

Fig. 6 Comparison of recording dots roundness

根据表 1 画出的记录点圆度比较见图 6。无论驱

动电压是高还是低,喷墨相纸上记录点的圆度稳定且比较接近 1,记录点形状非常接近圆形。数码打样纸上记录点的圆度起伏较大,且圆度数值相对较小,这一点通过图 5 也可以验证。数码打样纸上记录点各径向的半径长度变化较大,构成的形状与圆形的差异就比较大。由此可见,喷墨记录点的形状与承印材料相关,主要受承印材料各向同性程度的影响,与墨滴喷射条件相关度不高。

### 4.4 墨滴扩展比

喷墨观测仪上 5 个喷嘴,使用不同驱动电压,在不同纸张上喷墨形成的记录点数据见表 2,其中,墨滴

**表 2 记录点的直径比较**

**Tab. 2 Comparison of recording dot diameters**

| 喷墨驱动电压/V | 墨滴/记录点编号 | 墨滴容积/pL | 墨滴直径/μm | 记录点平均直径/μm | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 喷墨相纸 | 数码打样纸 |
| 95 | 1 | 30 | 38.55 | 74.60 | 74.75 |
| | 2 | 29 | 38.12 | 74.29 | 74.34 |
| | 3 | 31 | 38.98 | 74.78 | 75.65 |
| | 4 | 31 | 38.98 | 74.82 | 75.78 |
| | 5 | 30 | 38.55 | 74.60 | 75.14 |
| 85 | 1 | 26 | 36.76 | 66.19 | – |
| | 2 | 27 | 37.22 | 67.16 | – |
| | 3 | 28 | 37.67 | 68.29 | – |
| | 4 | 26 | 36.76 | 66.54 | – |
| | 5 | 27 | 37.22 | 67.84 | – |

直径由球形墨滴容积换算得到,记录点平均直径为记录点上的 12 条直径平均值。使用表 2 的数据,利用式(3)计算得到不同实验条件下的墨滴扩展比绘制的曲线见图 7。可见喷墨系统在相同条件下工作时,不

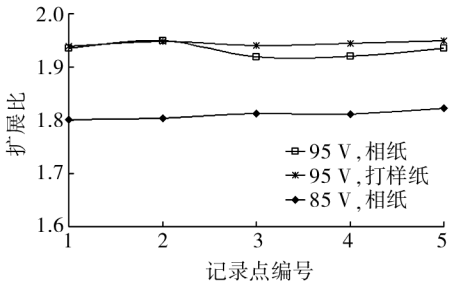



图 7 墨滴扩展比

Fig. 7 Spread-ratio of the droplet

同纸张类型对墨滴扩展比影响不大;当喷墨系统工作条件改变后,墨水的喷射状态发生了变化,导致墨滴扩展比的不同。参考文献[5]中给出的公式表明,墨滴扩展比与韦伯数和雷诺数有关,与纸张类型无关,图 7 的结果正好验证了这一点。

### 4.5 记录点模糊度

已用线性插值算法计算出了外边缘的位置,同理计算得到记录点内边缘的位置。可以通过同一半径上的内、外边缘像素坐标差值计算出记录点边缘模糊度。图 8 为 3 种实验条件下记录点各径向方向上的

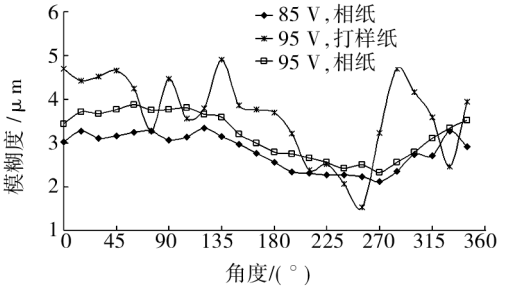



图 8 记录点的模糊度

Fig. 8 Blurriness of the recording dots

模糊度。按图 8 所示,不同条件下的记录点模糊度有所不同,但在不同径向方向间的变化规律比较接近。扩散程度在 90°附近都较大,最小值基本上在 270°附近。出现这种情况的原因应该包括墨滴喷射方向与纸张不是绝对垂直,纸张的吸收特性并非各向同性两个方面。另外,喷墨驱动电压小时,所形成的记录点模糊度小于驱动电压高时形成的记录点。虽然打样纸上记录点的个别位置模糊度很小,但总体上仍然满足这一规律。

将记录点同一径向方向上的模糊度和半径相比,得图 9。可以发现此比值的变化规律与模糊度绝对

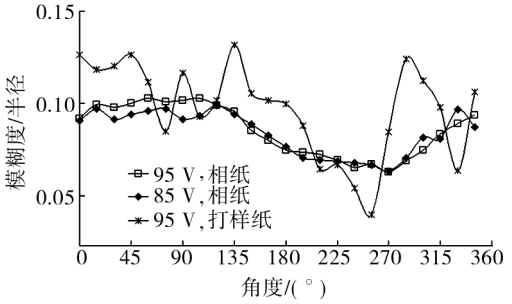



图 9 半径的模糊度比

Fig. 9 Ratio of blurriness and radius

值变化规律相近,而且不同的喷墨条件在相同的承印材料上的模糊度半径比基本相同。这说明记录点模糊度与记录点大小线性相关,随着记录点尺寸的变

化,模糊度也会相应发生变化。由文中4.4节的讨论可知,在相同喷墨条件下墨滴扩展比是不变的,所以记录点直径与墨滴直径成正比,由此可推知记录点的模糊度与墨滴直径是正比关系。

## 5　结语

借助墨滴观测仪和工业显微镜分别获取了墨滴在撞击纸张前后的状态及数据。参照ISO 13660规定线条边缘内边界和外边界的方法,定义了喷墨记录点内、外边缘对应的反射系数,通过对喷墨记录点图片的仔细测量,验证了其准确性。喷墨记录点尺寸主要受喷墨系统喷射条件影响,如喷墨驱动电压大,则喷墨记录点尺寸大,与承印材料基本无关;而喷墨记录点形状均匀性与承印材料相关程度高。分别计算了喷墨系统在不同纸张上的墨滴扩展比,验证了喷墨系统在相同条件下工作时,纸张类型对墨滴扩展比影响不大。记录点内外边缘间的径向距离即为记录点模糊度。圆周方向上不同位置的模糊度受墨滴喷射方向与纸张垂直程度、纸张吸收各向同性程度的影响,且模糊度与同一径向上记录点半径线性相关。

喷墨记录点的扩展分析是围绕孤立喷墨记录点展开的,相邻墨滴间的相互影响以及墨水重叠打印的情况还未涉及,而且受条件限制,只使用一种墨水进行了喷墨实验。另外,喷墨印刷的应用领域不断拓宽,新型承印物上的墨滴扩展情况是否与纸张相同,还值得继续深入研究。

**参考文献:**

[1] 姚海根. 喷墨印刷[M]. 北京:印刷工业出版社,2011.
YAO Hai-gen. Ink Jet Printing[M]. Beijing: Graphic Communication Press,2011.

[2] EMMEL P, HERSCH R D. A Unified Model for Color Prediction of Halftoned Prints[J]. Journal of Imaging Science and Technology,2000,44(4):351-359.

[3] 高松,唐正宁,王成林,等. 纸张喷墨印刷的网点铺展渗透研究[J]. 包装工程,2008,29(2):52-54.
GAO Song, TANG Zheng-ning, WANG Cheng-lin, et al. Research on Ink Spreading and Penetration on Paper in Ink-jet Printing[J]. Packaging Engineering,2008,29(2):52-54.

[4] 顾小萍,唐正宁. 对喷墨印刷中油墨铺展和渗透的研究[J]. 包装工程,2005,26(5):98-100.
GU Xiao-ping, TANG Zheng-ning. Research on Ink Penetration and Spreading in Ink-jet Printing[J]. Packaging Engineering,2005,26(5):98-100.

[5] ASAI Akira, SHIOYA Makoto, HERASAWA Shinichi, et al. Impact of an Ink Drop on Paper, Recent Progress in Ink Jet Technologies[M]. Springfield: Society for Imaging Science and Technology,1999.

[6] ISO/IEC 13660, Information Technology-Office equipment-Measurement of Image Quality ATtributes for Hardcopy Output-Binary Monochrome Text and Graphic Images[S].

(上接第70页)

ZHANG Chun-he, ZHANG Da-peng, ZHOU Hong. Analysis and Evaluation of Storage Time Limit of Damp-proof Package[J]. Packaging Engineering,2008,29(1):47-49.

[4] 谭亚辉. 防潮包装中的干燥剂包装[J]. 包装工程,1990,11(1):47-48.
TAN Ya-hui. The Desiccant Packaging in Moisture-proof Packaging[J]. Packaging Engineering, 1990,11(1):47-48.

[5] 尹章伟,刘全香,林泉. 包装概论[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
YIN Zhang-wei, LIU Quan-xiang, LIN Quan. Overview of Packaging[M]. Beijing: Chemical Press,2008.

[6] 潘松年. 包装工艺学[M]. 北京:印刷工业出版社,2007.
PAN Song-nian. Packaging Technics[M]. Beijing: Print Press,2007.

[7] 孙蓉芳. 防潮包装的机理与应用[J]. 包装工程,1994,15(4):157-160.
SUN Rong-fang. Mechanism and Application of Moisture-proof Package[J]. Packaging Engineering, 1994,15(4):157-160.

[8] 刘力桥,奚德昌. 防潮包装的研究方法[J]. 包装工程,2003,24(2):19-21.
LIU Li-qiao, XI De-chang. Investigating Method for Moisture Proof Packaging[J]. Packaging Engineering,2003,24(2):19-21.

[9] 杨保义,张杰. 变色硅胶干燥剂吸湿性能研究[J]. 装备环境工程,2010,7(2):32-35.
YANG Bao-yi, ZHANG Jie. Study on Moisture Absorption Characteristic of Allochroic Silica Gel [J]. Equipment Environmental Engineering,2010,7(4):32-35.

[10] 杨天合. 防潮剂的防潮机理分析[J]. 表面技术,1992,21(5):222-225.
YANG Tian-he. Analysis on the Meehanism of Moisture Proof Agent[J]. Surface Technology, 1992,21(5):222-225.