丝网印刷中油墨流变分裂转移理论的修正

李俊锋[1]，唐正宁[1]，黄 蜜[2]
(1. 江南大学，无锡 214122；2. 中国兵器工业第五九研究所，重庆 400039)

摘要： 介绍了油墨流变分裂转移理论，并论述了现有理论中，认为仅由承印物黏附力造成油墨变形的不足之处。基于伯萧叶定律，建立了网版上下表面的压力差方程。方程求得的最小网距符合实际生产中的经验数据，证明了压力差在网版回弹最初阶段是导致油墨变形转移的关键因素，从而对油墨流变分裂转移理论进行了修正。

关键词： 油墨流变分裂；伯萧叶定律；网距；丝网印刷
中图分类号： TS871.1；TS802 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2011)09-0094-04

Modification of Ink Rheology Splitting Transfer Theory in Screen Printing

LI Jun-feng[1]，*TANG Zheng-ning*[1]，*HUANG Mi*[2]
(1. Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. No. 59 Institute of China Ordnance Industry，Chongqing 400039，China)

Abstract： The theory of ink rheology splitting transfer was introduced and its limitation that ink splitting only depends on the adhesion of substrate was discussed. The pressure differential equations of the both sides of the mesh was formulated based on Poiseuile' law. The minimum mesh interval got from the equations corresponded to reality，proving that pressure is the key factor contributing to the splitting of ink. At last，the ink rheology splitting transfer was modified.

Key words： ink rheology splitting；Poiseuile' law；mesh interval；screen printing

丝网印刷中油墨的转移是由于网版与承印物的分离造成的，是指网孔中的油墨转移到承印物上的过程，是印刷完成的必须部分。和其他印刷方法一样，丝网印刷油墨转移量的多少可以用油墨转移率 f 来表示。

$$f = y/x \times 100\%$$

其中：y 表示转移的油墨量；x 表示网孔中原有的油墨量。

曾有过多种观点论述丝网印刷油墨转移的机理，如墨刀压力论、大气压力论、重力论及粘附力作用论等，但这些论点都为后来的实验所否定。目前，最受人推崇的是 20 世纪 70 年代末，由斯潘沃杰尔和埃尔玛·麦瑟斯密特提出的油墨流变分裂理论[1]。

1 油墨流变分裂理论及缺陷

1.1 油墨流变分裂理论[1]

油墨流变分裂理论的要点见图 1。

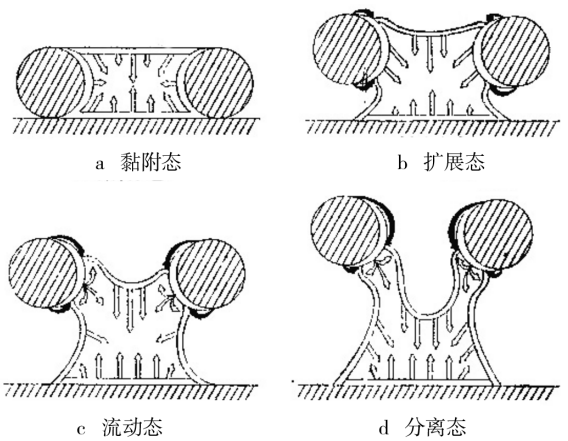

图 1 油墨流变分裂理论原理
Fig. 1 The schematic diagram of ink rheology splitting transfer theory

图 1a 表示刮印后，填满网孔的墨柱既与丝网粘附，又与承印物粘附，仅在网孔上方的油墨面为自由表面，呈现着表面张力。

图 1b 表示油墨的拉伸扩展状态。当网版与承印

收稿日期： 2011-03-05
作者简介： 李俊锋(1988－)，男，河南鲁山人，江南大学硕士生，主攻印刷工艺与技术。

物脱离时,网孔内的油墨受力变形,对粘弹性的油墨来说,由于改变其体积比改变其形状所需的能量大,因此受力的油墨只能改变其外形,而墨柱与丝网及承印物的粘附面是不太可能发生粘附分离的,于是变形只发生在非粘附面上,它们在拉伸应力和表面张力的共同作用下,形成了凹面。

图 1c 表示油墨的流动态。随着网版的进一步分离和非粘附表面积的进一步扩大,丝网上油墨粘附层内产生一个拉伸应力,该力与油墨的内聚力相平行,但方向相反,成了一种剪切应力。剪切应力比正应力更易于破坏油墨体,故油墨的分裂发生在丝网表面的粘附层,而承印面的粘附层未形成剪切拉伸,故不发生分裂。分裂后有一层很薄的粘附层(有时仅为单分子层)仍留在丝网上,称为静墨层。

图 1d 表示分离过程,即不断的剪切使油墨从丝网的边缘不断地分裂,最后成墨丝状而完全分离。

以上便是油墨流变分裂理论的核心内容。

1.2　该理论存在的缺陷

油墨与承印物间的黏附力使网孔中的油墨产生拉伸扩展变形,最终导致油墨的转移,是建立油墨流变分裂理论的一个重要依据,但此依据不符合实际情况。

网版的结构见图 2,其中 w 表示丝网的开口,d 表示网线直径,$2d$ 为网版的厚度。

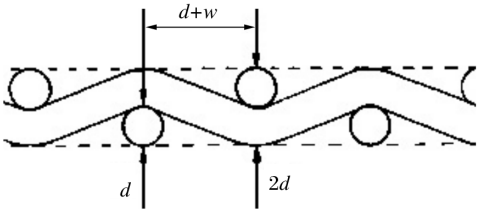

图 2　网版的结构

Fig. 2 Structure of screen plate

不考虑承印物表面的粗糙程度、油墨对网版及承印物的润湿性等因素,油墨与网孔的接触面积 $S_{孔}$ 要远大于与承印物的接触面积 $S_{承}$。

$$S_{孔}=4\times 2d\times w=8dw$$

$$S_{承}=w^2$$

为了使 $S_{孔}<S_{承}$,网孔的开度 w 应至少是网线直径 d 的 8 倍,但在实际生产中,w 与 d 的比例经常保持在 1∶1 或 2∶1,因此,油墨与网孔的接触面积 $S_{孔}$ 一般要大于油墨与承印物接触面积 $S_{承}$ 的 4 倍。所以,油墨与承印物间的黏附力是网孔中的油墨产生拉伸扩展变形的主要原因这一结论还需商榷。

2　油墨转移中压力差存在的证明[2]

在丝网印刷中,为了使网版表面的油墨透过网孔转移到承印物的表面,丝网印版的反面要与承印物的表面之间保持一定的距离,这个距离称为网距。网距比较大时,刮墨刀前部模版与承印物表面的密封区域很小,油墨的转移很低[3]。在一定范围内减小网距,可增加刮墨刀前部模版与承印物表面的密封区域,从而提高油墨转移率。若网距过小,密封区域过大时,刮墨刀后部的模版不能及时与承印物分离,油墨的转移率也很低。由此可知,密封区域在油墨转移中起着重要的作用,而密封区域会产生压力差。这时若用压力差计算得到的网距满足实际生产条件,则可以证明压力差在油墨转移中起关键作用。下面就依据压力差求网距。

2.1　刮印时网版的受力分析

刮墨刀以一定的倾斜角度和压力刮动油墨时,油墨会在刮墨刀前进力的作用下随刮墨刀一起向前流动,并且油墨内部也有对流,到达图文区域时,油墨在刮墨刀向下的挤压力、自身重力等力的作用下注入网孔。当刮墨刀刮过网孔的正上方时,油墨受到垂直挤压力的作用而发生变形,在刚刮过的一个微小范围内,会发生粘连。刮墨刀通过之后,丝网在回弹力作用下回弹,网孔中油墨受到的空气压力差、承印物黏附力、自身重力及承印物毛细力等力将与丝网对油墨的黏附力相抗衡,导致油墨发生剪切拉伸变形,当变形到达一定程度时,墨丝从中间某处断裂,完成油墨的转移[4]。

2.2　用压力差求网距

刮墨刀刮过的网版若有图文区域,由于油墨的作用,网版反面将与承印物发生一小段粘附。与承印物粘附处的网版只有在回弹力的作用下及时回弹才能提高油墨转移率,不会导致印刷故障。可是,网版在这个过程中要受到其两面压力差和已注满网孔中的油墨剪切力的作用,产生一个反向的拉力,阻碍网版的回弹。由油墨的动力粘度系数和其在网孔中的流动速度可以得到,油墨与网版接触处的粘性切应力 τ 为:

$$\tau=-\eta\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}\bigg|_{y=\frac{w}{2}}=\frac{py}{4d}\bigg|_{y=\frac{w}{2}}=\frac{pw}{8d}$$

式中：w 为网版的开度；d 为丝径；p 为网版上下表面的压差，近似看为大气压。根据单个网孔的面积，可以得到单个网孔所受到的粘性切应力的总和为：

$$\tau_{总}=\tau\cdot 4w\cdot 2d=pw^2$$

图 3 中的灰色区域表示压差在单个网孔上的作用区域，根据已知的丝网参数可以计算出灰色区域的面积 A 为：

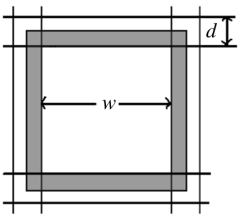

图 3 单个网孔的受力面积

Fig. 3 The force area of single mesh

$$A=2(w+d)\cdot\frac{d}{2}+2w\cdot\frac{d}{2}$$

根据压力差的作用面积，可以获得单个网孔受到的总压力：

$$P=p\cdot A=p(2wd+d^2)$$

因此，单个网孔所受到的合力可近似为单个网孔所受的总压力与所受的粘性切应力的合力，即：

$$f=P+\tau_{总}=\frac{p}{N^2}$$

假设垂直于刮墨刀前行方向的图文长度一致，为 L，N 为丝网目数，则网版受到的总的向下的牵拉力为：

$$F_{牵拉}=LNf=\frac{pL}{N}$$

网版向上的回弹力由绷网张力 T 垂直向上的分力所提供，并在图文边界处达到最小值，设此最远处与刮墨刀运行反方向的网版边界的距离为 b，见图 4，在边界处的回弹力为：

$$F_{回弹}=T\cdot\frac{s}{\sqrt{b^2+s^2}}$$

由于 b 远大于 s，于是原式可改为：

$$F_{回弹}=T\cdot\frac{s}{b}$$

为使最远处的网版也能够及时回弹，回弹力应满足：

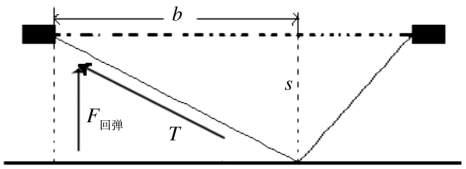

图 4 网版回弹力的分量

Fig. 4 Component of snapping back force of screen plate

$$T\cdot\frac{s}{b}\geqslant F_{牵拉}$$

由此得网距的下限：

$$s\geqslant\frac{pbL}{TN}$$

参考文献[2]证明了此不等式与实际应用相符合。进一步分析该不等式可知，在网版回弹的瞬间，其上下两侧存在一个接近大气压的压力差，并且在回弹的短暂瞬间，这个压差对于油墨从网孔中注出起着关键作用，由此可知油墨流变分裂理论是需要进行修正的。

3 对油墨流变分裂理论的修正

修正的油墨流变分裂理论要点见图 5。

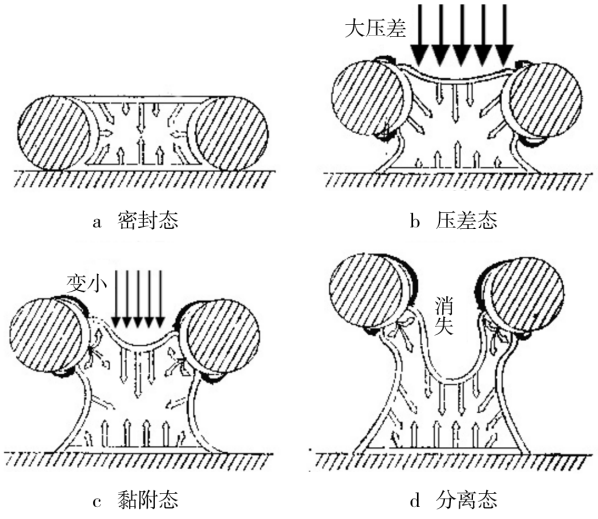

图 5 修正后的油墨流变分裂理论原理

Fig. 5 The schematic diagram of the modified ink rheology splitting transfer theory

图 5a 表示刮印后，填满网孔的墨柱既与丝网粘附，又与承印物粘附，形成一个密封区域，仅在网孔上方的油墨面与大气压接触，为后续网版回弹，产生压

力差打下基础。

图 5b 表示油墨受压差作用而被注射的状态。当网版与承印物脱离时，这个区域形成一个较网板上表面大气压低的低压区域。在这个压差的作用下，网孔犹如注射器一样，将油墨注出网孔。考虑到网孔壁对油墨的摩擦作用，油墨将发生层流，即在网孔中心位置的油墨，速度较高，而靠近网孔壁区域的油墨，由于阻力的作用，速度较低，从而形成了凹面。

图 5c 表示油墨的黏附态。随着网版的进一步分离和非粘附表面积的进一步扩大，这个压差迅速减小，黏附力逐渐起主要作用。考虑到丝网上油墨粘附层内产生一个拉伸应力，该力与油墨的内聚力相平行，但方向相反，成了一种剪切应力。剪切应力比正应力更易于破坏油墨体，故油墨的分裂发生在丝网表面的粘附层，而承印面的粘附层未形成剪切拉伸，故不发生分裂。

图 5d 仍主要表示分离过程，这时不再有压差的存在，而不断的剪切使油墨从丝网的边缘不断地分裂，最后成墨丝状而完全分离，完成油墨的转移。

4　结语

丝网印刷被称为万能印刷，承印材料广泛、墨层厚实、成本低廉，在纺织、包装、防伪等行业有着重要的应用[5-6]。由于这些优点，使得它在完成传统的图文复制的基础上，更赋予了印刷的现代制造功能，例如显示器等平板显示器件、PCB 电路板等电路器件的印制。在这些现代制造中，丝网印刷业已作为一道工序，融入到它们的制造工艺过程中，既减少了工艺复杂度，又降低了成本。当然，这些专业化领域应用的不断开拓，要求丝网印刷不断向更精更细的方向发展[7]。加大对丝网印刷技术的研究，理解其油墨转移的机理，掌握其科学合理的工艺过程，对于提高其印刷质量有着非常重要的意义。

参考文献：

[1]　黄天甫. 丝网印刷[M]. 武汉：测绘出版社，1992.

[2]　李俊锋，唐正宁. 用 Poiseuille 理论确定网印中的最佳网距[J]. 包装工程，2009，30(6)：67－69.

[3]　李俊锋，朱旭耀. 网印图像的扩大变形及补偿[J]. 包装工程，2009，30(2)：99－101.

[4]　RIEMER D E. Analytical Engineering Model of the Screen Printing Process：Part I[J]. Solid State Technology，1988(8)：12－14.

[5]　郑德海，郑军明. 丝网印刷工艺[M]. 北京：印刷工业出版社，1994.

[6]　曹振英，丘淙. 丝网印刷技术问答[M]. 北京：印刷工业出版社，1890.

[7]　李婧伟，唐正宁. 基于印制电路板精细丝网印刷过程的数学模型研究[J]. 包装工程，2008，29(2)：49－59.

（上接第 29 页）

[3]　张艳伟，崔国华，王磊磊. 瓦楞纸箱纸板抗压及堆码强度计算研究[J]. 中国包装，2008(3)：77－78.

[4]　彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 第 1 版. 北京：印刷工业出版社，2006.

[5]　瓦楞纸箱价格计算方法[EB/OL]. (2011-01-17). http://wenku.baidu.com.（余不详）

[6]　薛叶玲，卢立新. 卡夫饼干运输包装纸箱抗压性能与配纸置优化的研究[D]. 无锡：江南大学，2009.

[7]　陈康，吉庆霞，焦莉莉，等. 基于层次分析法的水质稳定药剂配方的性价比模型及其应用[J]. 华东理工大学学报，2009，35(1)：62－65.

[8]　周媛. 瓦楞纸板的结构增强与配比技术研究[D]. 无锡：江南大学，2007.

[9]　李广才. 合理设计提高瓦楞纸箱抗压强度[J]. 印刷技术，2010(5)：33－34.

[10]　陈希荣. 瓦楞纸箱的配纸优化系统设计[J]. 出口商品包装，2007(6)：74－78.