

塑料薄膜的光学性质对印刷品色彩的影响

陈杰¹, 田东文²

(1. 山西省运城学院, 运城 044000; 2. 上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093)

摘要: 通过分析入射到印刷品的光在表印塑料薄膜中传播路径的差异性, 研究了塑料薄膜的光学性质对印刷品色彩的影响。运用 Kubelka-Munk 理论、Saunderson 理论和辐射理论, 建立了光在表印塑料薄膜中辐射传输预测新模型, 为更好地分析表印塑料薄膜的呈色规律提供理论依据。

关键词: 光学性质; Kubelka-Munk 理论; 塑料印刷; 多重反射

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)19-0090-05

Influence of Plastic Film Optical Properties on Printed Matter Color

CHEN Jie¹, TIAN Dong-wen²

(1. Yuncheng University, Yuncheng 044000, China; 2. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

Abstract: The difference of travel path of incident light in printed plastic film was analyzed. The influence of the optical characteristic of the plastic film on color reproduction of the plastic printing was studied. A new radioactive transfer prediction model of light in printed plastic film was established using Kubelka-Munk theory, Saunderson theory, and radiation transfer theory. The purpose was to provide a theoretical basis for analyzing the color generation rule of surface-printed plastic film.

Key words: optical characteristic; Kubelka-Munk theory; plastic printing; multiple reflections

近年来,随着经济的发展,人民生活水平的提高,人们对包装印刷品外观质量与工艺的要求越来越高。商家为了更好的迎合消费者的喜好和习惯,选用印有新颖的图案和亮丽的色彩的精美塑料包装印刷品作为无形的广告产品进行促进销售。

为了保证精美塑料包装印刷品的色彩信息能正确地复制和传递,科研人员作了大量的研究工作。1998年, Hoffman 和 Kristen 2人以 Kubelka-Munk 理论^[1]和 Saunderson 修正理论^[2]为理论基础,提出另一个 Kubelka-Munk 颜色模型^[3],用它来描述色样的反射率。2000年, Patrick Emmel 和 Roger David Hersch 以矩阵的思想为基础,将 Kubelka-Munk 模型的数学公式作为表示形式扩展到半色调印刷品的研究中^[4]。2004年, Li Yang 等人以统计物理学为基础,将原来应用在均匀介质中的 Kubelka-Munk 模型推广到非均匀介质中,建立了新的 Kubelka-Munk 模型^[5],其思想是

从假设把入射光分为漫射光和定向光 2 方面进行研究。2007年,刘振以 Williams-Clapper 理论^[3]和辐射理论^[6]为基础,建立了塑料包装印刷品反射率的数学模型,并研究了塑料包装印刷品色彩再现的规律^[7]。

笔者以 Kubelka-Munk 理论^[1]、Saunderson 理论^[2]和辐射理论^[6]为理论基础,描述入射到印刷品表面上的光在印刷塑料薄膜中传播路径的差异性,并得出印刷塑料薄膜反射率的色彩预测新模型,同时进一步研究塑料薄膜的光学性质对印刷品色彩的影响。

1 塑料薄膜的光学性质

塑料是以聚合物(合成树脂)为主体的高分子材料^[6,8-10],并由树脂及填料、增塑剂、色料等添加剂组成的。塑料组成中所含有片状的填料和颗粒状的颜料,对光线进行吸收、多重反射、干涉等作用使塑料表

收稿日期: 2013-06-03

作者简介: 陈杰(1985-),女,山东临沂人,山西省运城学院教师,主攻塑料薄膜光学、半色调塑料印刷品色彩再现规律。

面获得美丽的光泽。

1.1 单层薄膜的多光束干涉

多光束干涉^[6]强度的计算采用复振幅,即先把振动迭加,再计算强度,见图1。

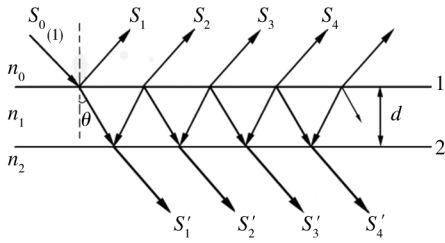


图1 多光束干涉
Fig. 1 Multi-beam interference

当光由折射率为 n_0 的介质射向折射率为 n_2 的介质时,假设 r 和 t 分别为振幅反射系数和振幅透射系数。当光由折射率为 n_1 的介质射向折射率为 n_2 的介质时,假设 r' 和 t' 分别为振幅反射系数和振幅透射系数。当 n_1 和 n_2 2种介质都没有吸收时,由斯托克定律可知: $r = -r'$ 和 $r^2 + tt' = 1$ 。

假设入射光束的振幅为1,并且不考虑介质对光波的吸收,则各束反射光的振幅 $A_1, A_2, A_3 \dots$ 依次为:
 $A_1 = r_1; A_2 = t_1 t_1' r_2; \dots$

由于光束之间的相位差是有规律的,当光束发生干涉时,每一光束(1, 2, 3, 4...)中后一光束均比前一光束多经历了一段光程,即光程差为:

$$\Delta = 2n_0 d \cos \theta \quad (1)$$

光程差相对应的相位延迟量为:

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_0 d \cos \theta \quad (2)$$

式中: d 为塑料薄膜的厚度; θ 为光束在塑料薄膜中传播的折射角; λ 为入射光束的波长。

1.2 单层薄膜的反射率

由单层薄膜的多光束干涉得知,单层薄膜表面的反射光束的复振幅依次为: $r_1, t_1 t_1' r_2 e^{-i2\delta}, t_1 t_1' r_1' r_2' e^{-i4\delta}, \dots$

如果薄膜足够大,则可认为反射光束数目趋于无穷,它们经过迭加后,光的反射率^[6,9-10]可以表示为:

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\delta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\delta} \quad (3)$$

由于光是一种电磁波,它可以用电场强度 E 和磁场强度 H 来描述,见图2。在薄膜的光学特性中,引

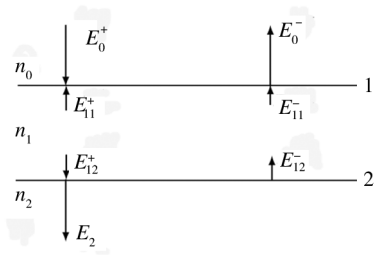


图2 单层薄膜的电场
Fig. 2 Electric field of single layer film

入等效介质的导纳 $Y = H_0 / E_0$, 见图3。在单层薄膜的等效界面两侧的电场和磁场强度的切线分量是连续的,即: $E_0 = E_2', H_0 = H_2'$ 。 E_2' 和 H_2' 分别表示电场强度 E 和磁场强度 H 的切线分量。

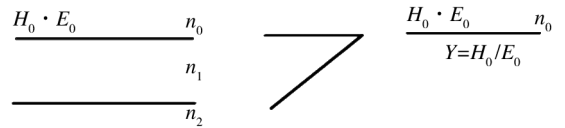


图3 单层薄膜的等效界面
Fig. 3 Equivalent interface of the single layer film

定义特殊矩阵 $\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{i}{n_1} \sin \delta \\ i n_1 \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}$ 为

基底和膜层组合,得出单层薄膜的反射率 $R^{[6,9-10]}$ 为:
$$R = \frac{(n_0 - n_2)^2 \cos^2 \delta + (n_0 n_2 / n_1 - n_1)^2 \sin^2 \delta}{(n_0 + n_2)^2 \cos^2 \delta + (n_0 n_2 / n_1 + n_1)^2 \sin^2 \delta} \quad (4)$$

2 光在半色调塑料薄膜中的传播路径

对于在塑料底基表面上直接印刷油墨的半色调印刷品来说,入射到印刷品表面上的光在印刷塑料薄膜中的传播路径见图4。文中把光在半色调塑料薄膜的传播路程^[8-10]大体分为三大段。

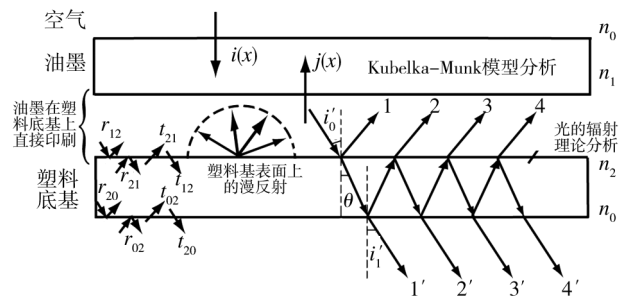


图4 光在半色调塑料薄膜中的传播路径
Fig. 4 Light spread in halftone printed plastic

第 1 段路径是光在印刷品表面图文部分和空白部分上的传播。假设入射到半色调印刷品表面上的光为正入射光,由于它会在图文部分中油墨内部发生光的散射和吸收作用,因此文中对在印刷塑料薄膜表面图文部分和空白部分传播的光采用 Kubelka-Munk 理论^[1]进行分析,见图 5。

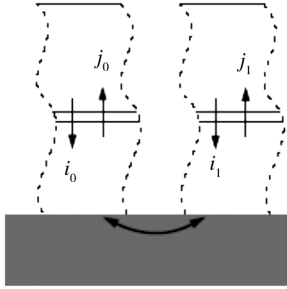


图 5 光在印刷塑料薄膜表面上的传播

Fig. 5 Light spread on the surface of printed plastic medium

把经典的 Kubelka-Munk 理论扩展到半色调塑料薄膜中可以得出如下的矩阵^[1]:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_0(x)}{dx} \\ \frac{di_1(x)}{dx} \\ \frac{dj_0(x)}{dx} \\ \frac{dj_1(x)}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_0+S_0 & 0 & -S_0 & 0 \\ 0 & K_1+S_1 & 0 & -S_1 \\ S_0 & 0 & -(K_0+S_0) & 0 \\ 0 & S_1 & 0 & -(K_1+S_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ j_0 \\ j_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中, dx 代表 1 个极薄油墨层的厚度; i_0 和 i_1 分别代表空白部分和图文部分的向下光能流; j_0 和 j_1 分别代表空白部分和图文部分的向上光能流; K_0 和 K_1 分别代表空白部分和图文部分的吸收系数; S_0 和 S_1 分别代表空白部分和图文部分的散射系数^[5]。

第 2 段路径是光在空气-印刷表面界面的传播。由于入射光会在空气和印刷油墨之间发生多重内反射,因此文中采用 Saunderson 理论^[2]对通过分析光在第 1 段路径传播所建立的 Kubelka-Munk 模型加以修正,见图 6。

令从空气入射到印刷表面的光能流为 i , 从印刷表面出射到空气的光能流为 j , r_i 为光能流 j 在空气-印刷表面界面的内表面反射因子, r_s 为光能流 i 在空气-印刷表面界面的外表面反射因子。由 Judd 定律所知,内表面反射因子 r_i 和外表面 r_s 都是关于折射率

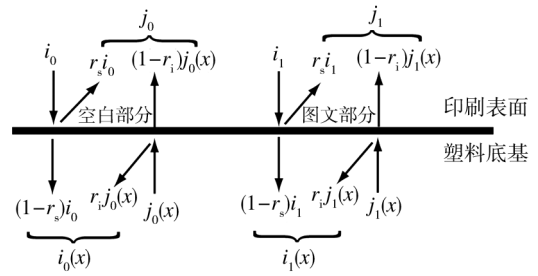


图 6 Saunderson 理论

Fig. 6 Saunderson-theory diagram

n_{01} 的函数^[2,5]。

考虑到光在空气-印刷表面界面处会发生多次内反射,图 6 中在空气-印刷表面界面处传播的入射光遵循光通量的守恒定律,得到 $i(x)$ 的方程。由此,从空气-印刷表面界面处出射光通量的守恒得到 j 的方程,最后联立两方程得出以下方程组^[2]:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ j_0 \\ j_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-r_s} & 0 & \frac{-r_i}{1-r_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-r_s} & 0 & \frac{-r_i}{1-r_s} \\ \frac{-r_s}{1-r_s} & 0 & 1-r_i-\frac{r_i r_s}{1-r_s} & 0 \\ 0 & \frac{-r_s}{1-r_s} & 0 & 1-r_i-\frac{r_i r_s}{1-r_s} \end{bmatrix} \cdot \exp \left\{ \begin{bmatrix} K_0+S_0 & 0 & -S_0 & 0 \\ 0 & K_1+S_1 & 0 & -S_1 \\ S_0 & 0 & -(K_0+S_0) & 0 \\ 0 & S_1 & 0 & -(K_1+S_1) \end{bmatrix} X \right\} \begin{bmatrix} i_0(0) \\ i_1(0) \\ j_0(0) \\ j_1(0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

假设光子的交换只是发生在承印材料塑料底基上,即 $x=0$ 。由此可见,向下的光能流 $i_0(0)$, $i_1(0)$ 和塑料底基的反射率 ρ_p 决定着向上的光能流 $j_0(0)$ 和 $j_1(0)$, 则式(6)可以用 ρ_p 表示为:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ j_0 \\ j_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-r_s} & 0 & \frac{-r_i}{1-r_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-r_s} & 0 & \frac{-r_i}{1-r_s} \\ \frac{-r_s}{1-r_s} & 0 & 1-r_i-\frac{r_i r_s}{1-r_s} & 0 \\ 0 & \frac{-r_s}{1-r_s} & 0 & 1-r_i-\frac{r_i r_s}{1-r_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0(0) \\ i_1(0) \\ j_0(0) \\ j_1(0) \end{bmatrix}$$

$$\exp \left\{ \begin{bmatrix} K_0+S_0 & 0 & -S_0 & 0 \\ 0 & K_1+S_1 & 0 & -S_1 \\ S_0 & 0 & -(K_0+S_0) & 0 \\ 0 & S_1 & 0 & -(K_1+S_1) \end{bmatrix} \cdot X \right\} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_{0,0} & \delta_{0,1} \\ 0 & 0 & \delta_{1,0} & \delta_{1,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0(0) \\ i_1(0) \\ \rho_p i_0(0) \\ \rho_p i_1(0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中3个矩阵分别为 Saunderson 校正矩阵, Kubelka-Munk 矩阵和光散射矩阵。 X 表示油墨层的厚度; δ_{uv} 表示一个光子以油墨层的 v 界面元进入另一个油墨层的 u 界面元的概率,在矩阵方程式中同一行或同一列的 δ_{uv} 之和等于1。

由于正入射到图文部分和空白部分的光强是相同的,即 $i_0 = i_1 = i$ 。同时,假设图文部分的面积为 a_s 和散射系数 $S_1 = 0$,那么空白部分所对应的面积为 $1 - a_s$ 和吸收系数 $K_0 = 0$ 。考虑到光在油墨内部可能会发生横向散射,根据反射定律可以得出印刷塑料薄膜表面的反射系数^[9-10] $R_{\text{总}}$ 为:

$$R_{\text{总}} = \frac{j}{i} = r_s + \frac{\rho_p(1-r_s)(1-r_i)(1-a_s+a_s T)^2}{1-\rho_p r_i(1-a_s+a_s T^2)} \quad (8)$$

其中, T 为入射光通过油墨的透射率 ($T = \exp[-K_1 X]$)。

第3段路径是光在承印材料塑料薄膜中的传播。

$$\rho_p = \frac{(n_1 - n_0)^2 \cos^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} n_2 d \cos \theta \right) + \left(\frac{n_1 n_0}{n_2} - n_2 \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} n_2 d \cos \theta \right)}{(n_1 + n_0)^2 \cos^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} n_2 d \cos \theta \right) + \left(\frac{n_1 n_0}{n_2} + n_2 \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} n_2 d \cos \theta \right)} = \frac{n_2^2 (n_1 - n_0)^2 + (n_1 n_0 - n_2^2)^2 \tan^2 (2\pi n_2 d \cos \theta / \lambda)}{n_2^2 (n_1 + n_0)^2 + (n_1 n_0 + n_2^2)^2 \tan^2 (2\pi n_2 d \cos \theta / \lambda)} \quad (10)$$

联立式(10)和式(8),则整个半色调塑料薄膜表面的反射率 $R_{\text{总}}$ 为:

$$R_{\text{总}} = \frac{[n_2^2 (n_1 + n_0)^2 + (n_1 n_0 + n_2^2)^2 \tan^2 (2\pi n_2 d \cos \theta / \lambda)] r_s + [n_2^2 (n_1 - n_0)^2 + (n_1 n_0 - n_2^2)^2 \tan^2 (2\pi n_2 d \cos \theta / \lambda)] (1 - r_s - r_i) (1 - a_s + a_s T^2)}{[n_2^2 (n_1 + n_0)^2 + (n_1 n_0 + n_2^2)^2 \tan^2 (2\pi n_2 d \cos \theta / \lambda)] - [n_2^2 (n_1 - n_0)^2 + (n_1 n_0 - n_2^2)^2 \tan^2 (2\pi n_2 d \cos \theta / \lambda)] r_i (1 - a_s + a_s T^2)} \quad (11)$$

3 塑料薄膜的光学性质对印刷品色彩的影响

印刷塑料薄膜的颜色,是指光线经印刷塑料薄膜选择性吸收后,反射刺激到人眼,最后在人的头脑中所产生的色彩。在印刷生产控制过程中,人们通过密度测量仪测出的数值主要来控制墨层的厚度和网点扩大,进而提高印刷塑料薄膜的质量。

联立色彩中的密度公式 $D = \lg(1/R_{\text{总}})$ 和式(10),

当穿过油墨的正入射光传递到塑料薄膜表面上时,它们会在表面上发生漫反射现象,这是由于印刷前经过表面预处理后的塑料薄膜表面上产生了大量的砂目。同时,继续向前传播的光还会在塑料薄膜内部发生多重内反射^[9-10]。由此,运用多光束干涉理论和多重反射理论来描述光在塑料底基中的传播过程,见图7。

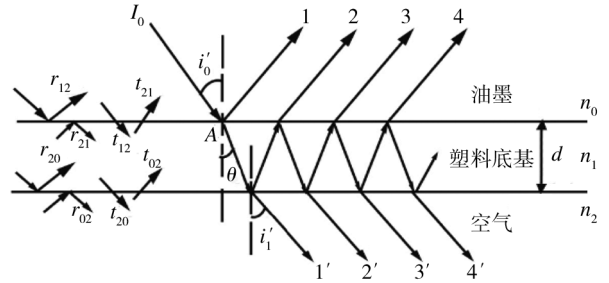


图7 光在塑料薄膜内的多重内反射

Fig.7 Multiple internal reflections of light in the plastic film

由塑料薄膜的光学性质可以知道,印刷塑料薄膜表面的总反射率^[8-9]为:

$$\rho_p = \frac{(n_1 - n_0)^2 \cos^2 \delta + \left(\frac{n_1 n_0}{n_2} - n_2 \right)^2 \sin^2 \delta}{(n_1 + n_0)^2 \cos^2 \delta + \left(\frac{n_1 n_0}{n_2} + n_2 \right)^2 \sin^2 \delta} \quad (9)$$

根据光的干涉理论,把 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d \cos \theta$ 代入式(9)

中,可得出:

可得出印刷塑料薄膜的颜色特性与塑料薄膜的光学性质之间的函数关系: $D \propto f(n_1, n_2, d, \theta)$ 。

分析上述函数关系总结出塑料薄膜的光学性质对印刷塑料薄膜色彩的影响如下所述。

由于塑料薄膜的不同组成成分决定着塑料薄膜的不同光学性质,但是在同一塑料薄膜当中,它们主要受光的2种干涉的影响:①当光在塑料薄膜内发生等倾干涉时,若 i'_0 保持不变,光程差 δ 仅仅与塑料薄膜的厚度 d 有关,厚度不同会导致光的干涉条纹呈现

线形或圆形,进而影响印刷塑料薄膜表面上光的反射量不同,即印刷品的色调和阶调发生相应的变化;②当光在塑料薄膜内发生等厚干涉时,由于光程差 $\delta = \delta(i_0')$ 是关于入射角 i_0' 的函数,对于同一级条纹来说,它们具有相同的倾角。光的干涉条纹有明纹 $\delta(i_0') = k\lambda (k=1, 2, 3, \dots)$ 和暗纹 $\delta(i_0') = (2k+1)\lambda/2 (k=0, 1, 2, \dots)$ 之分。亮纹会增加印刷塑料薄膜表面光的总反射量,则 $R_{\text{总}}$ 增大,根据光密度公式可以得出 D 值会随之降低,那么印刷品上所呈现的色调会变浅,即亮度升高,饱和度降低;暗纹会降低印刷塑料薄膜表面光的总反射量,印刷品在此处区域色调会变暗淡。综上所述,干涉条纹的形状和明暗不同,印刷塑料薄膜表面各个区域反射的光通量也不相同,随之会影响印刷品表面的颜色特性,进而也会改变人对印刷塑料薄膜表面各个区域的色彩阶调产生的层次感和立体感。

4 结语

采用 Kubelka-Munk 理论、Saunderson 理论和辐射传递理论分析了塑料薄膜的光学性质对印刷品色彩的影响,引入了光在印刷塑料薄膜各层中传播的思想,并考虑光进入到塑料薄膜中受到各组成成分的影响,以及光以电磁波的形式在塑料薄膜中传播,确定了光在印刷塑料薄膜表面总的反射率,最终建立了新的印刷塑料薄膜的色彩预测模型。文中没有考虑印刷塑料薄膜中里面印刷工艺、油墨的光学特性以及在彩色塑料底基上印刷图文,只是考虑了塑料薄膜的光学性质对表面印刷得到的印刷塑料薄膜色彩的影响。新模型的建立对印刷塑料薄膜色彩再现规律分析与印刷品质量检测系统的研制提供了理论依据。

参考文献:

- [1] KUBELKA P, MUNK F. Ein Beitrag Zur Optik Der Farbanstriche, Zeits[J]. F. Techn. Physik, 1931, 12: 593-601.
- [2] SAUNDERSON J L. Calculation of the Color Pigmented Plastics[J]. J Opt Soc Am, 1942, 32(9): 727-736.
- [3] WILLIAMS F C, CLAPPER F R. Multiple Internal Reflections in Photographic Color Prints[J]. Journal of the Optical Society of America, 1953, 43: 457-595.
- [4] 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.
- [5] YANG L, KRUSE B. Revised Kubelka-Munk Theory I. Theory and Applications[J]. J Opt Soc Am, 2004, 21(9): 1933-1941.
- [6] 章志鸣, 沈元华, 陈惠芬. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
ZHANG Zhi-ming, SHEN Yuan-hua, CHEN Hui-fen. Optics [M]. Beijing: Academic Press, 2000.
- [7] 刘振, 张逸新, 臧冬娟. 塑料包装印刷品色彩再现规律研究[J]. 包装工程, 2007, 28(5): 18-20.
LIU Zhen, ZHANG Yi-xin, ZANG Dong-juan. Research on Color Reproduction Performance of Printed Plastic Package [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(5): 18-20.
- [8] 齐晓堃, 周文华, 杨永刚. 印刷材料及适性[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2008.
QI Xiao-kun, ZHOU Wen-hua, YANG Yong-gang. Printed Materials and Printability [M]. Beijing: Graphic Communications Press, 2008.
- [9] 何炜德. 塑料印刷技术[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1994.
HE Wei-de. Plastic Printing Technique [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Publishing House, 1994.
- [10] 徐艳芳, 黄敏, 刘浩学. 印刷应用光学[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2007.
XU Yan-fang, HUANG Min, LIU Hao-xue. Applied Optics of Printing [M]. Beijing: Graphic Communications Press, 2007.
- [11] 胡成发. 印刷色彩与色度学[M]. 北京: 印刷工业出版社, 1993.
HU Cheng-fa. Printing Color and Chroma [M]. Beijing: Graphic Communications Press, 1993.