

光学变色油墨的颜色测量方法研究

公绪平, 黄敏*, 沈跃桐, 魏子文, 李修, 刘瑜

北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600

摘要 为确定光变油墨颜色测量的几何条件, 选用不同企业提供的 22 个基于光变油墨印制的匀色色块, 使用 X-Rite MAT12 多角度分光光度计进行样品的颜色测量。结果表明, 在 $15^\circ:0^\circ(\text{as}15^\circ)$ 、 $45^\circ:-60^\circ(\text{as}-15^\circ)$ 测量条件下的油墨色度值与油墨生产商标定的颜色变化效果较为一致, 但现有测量条件不能全面表征光变油墨的颜色变化范围。进一步地, 使用 R1 角分辨光谱仪基于自定义的 (α, β) 测量条件进行样本的光谱测量, 提出选用 $5^\circ:0^\circ(\text{as}5^\circ)$ 和 $60^\circ:-55^\circ(\text{as}5^\circ)$ 测量条件可测得光变油墨的最大色调变化范围。基于 22 个样本在不同角度下的饱和度测量结果, 拟合得到 $45^\circ:-40^\circ(\text{as}5^\circ)$ 测量条件下可测得光变油墨较大饱和度值。使用上述 3 个测量条件, 可全面表征光变油墨颜色再现的属性, 同时也可进行不同品牌光变油墨的防伪鉴定。

关键词 视觉光学; 视觉色彩; 光变油墨; 颜色测量

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231218

1 引言

光变油墨(OVI)是一种由于薄膜干涉现象引起随角异色颜色变化的防伪油墨, 已广泛应用于票据和高档产品的包装印刷中, 如 2005 版 100 元和 50 元人民币面额数字的印刷, 100 美元面额数字的印刷等^[1]。使用这种油墨印制的产品, 不需要外界的辅助检测手段, 仅需在自然光下改变观察角度, 即可出现不同颜色变换的效果。而在实际应用中, 较少有量化的方法对光变油墨的颜色变化进行测量表征^[2], 油墨生产商和包装印刷企业仅通过目视方法进行油墨变色效果的评价, 这给防伪产品的真假鉴定和质量控制、评价带来较多不确定性^[3]。

针对干涉颜料的颜色测量, 2021 年美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials) ASTM E2539-14^[4] 标准推荐使用 $45^\circ:-60^\circ(\text{as}-15^\circ)$, $45^\circ:-30^\circ(\text{as}15^\circ)$, $15^\circ:-30^\circ(\text{as}-15^\circ)$, $15^\circ:0^\circ(\text{as}15^\circ)$ 的 4 个几何测量条件。Gómez 等^[5] 比较了 BYK-mac 多角度分光光度计与自行搭建设备在 r45as-15、r45as15、r45as25、r45as45、r45as75、r45as110 条件下的测量结果, 发现两种设备在 r45as-15 测量条件下的测量结果差异最大。Kirchner 等^[6] 使用接收方向距镜面反射方向夹角(镜面角)相同的几个测量条件测量干涉颜料, 发现 a^*b^* 色度值连接成的干涉线适用于表征干涉颜料。陈彪等^[7] 基于 r22.5as22.5、r45as-22.5 测量条件

设计了一个光变油墨颜色测量装置, 认为这两个角度下的 CIE $L^*a^*b^*$ 色度值可表征光变油墨印品的变色特征。2022 年 Cramer^[8] 的研究发现, 在测量过程中如果保持光源照明方向与探测器接收方向的夹角不变, 则样品的色调相同。GB/T 17001.7—2023^[9] 简化了光变油墨的颜色测量条件, 提出可用光源相对法线 45° 入射、与法线夹角 0° 和 60° 方向采集光谱能量, 即采用 r45as-15、r45as45 两个条件进行光变油墨的颜色测量。

为分析以上测量方法的有效性, 进一步确定与光变油墨颜色变化相对应的测量条件, 本文选用了不同油墨生产商提供的 22 个光变油墨印制的匀色色样。首先使用专业相机拍摄不同角度下的色样图像, 使用 X-rite MA-T12 多角度分光光度计和 R1 角分辨光谱仪在不同测量条件下进行样品的颜色测量, 提出一种可采集光变油墨所能呈现最大色调和饱和度变化范围的颜色测量条件。

2 基础理论

2.1 薄膜干涉呈色理论

光变油墨是由光学变色薄膜经粉碎、分级、表面化等过程处理后, 分散在油墨连接料中制成^[10]。光学变色薄膜是由多层折射率和厚度不同的材料经镀膜工艺制作而成^[11], 通过改变入射到其表面光的传播路径呈现特定颜色^[12]。图 1 是单层光变薄膜的呈色原理图。

入射光照射到薄膜表面, 一部分光经过薄膜第一

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-07-27; 录用日期: 2023-08-03; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61675029)、北京印刷学院科研创新团队项目(BIGCEc202302)

通信作者: *huangmin@bigc.edu.cn

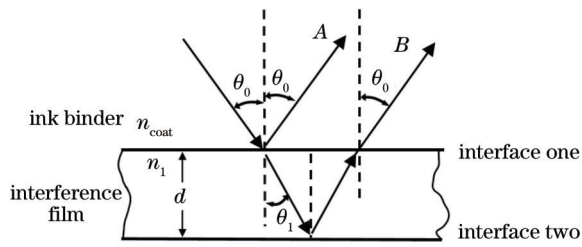


图 1 薄膜干涉原理

Fig. 1 Principle of thin film interference

表面反射形成光束 A,另一部分光透过薄膜第一表面经过折射和第二表面的反射,又经第一表面折射后形成光束 B,这两束光来自同一入射光,当光程差 Δ 满足干涉相长条件时^[13],呈色原理表示为

$$\Delta = 2d \sqrt{n_1^2 - n_{coat}^2 (\sin \theta_0)^2} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad (1)$$

式中: k 为常数,取值为 $0, 1, 2, \dots$ 。对于一个确定的光

变油墨样本,薄膜厚度 d 、薄膜折射率 n_1 、连接料折射率 n_{coat} 是确定的。可见,干涉光的波长 λ 是入射角 θ_0 的函数,光变油墨可在不同照明角度下呈现不同颜色。

2.2 颜色测量几何条件

目前,市面上常见的多角度颜色测量仪器主要有两种,一种是便携式多角度分光光度计,如 X-rite MA-T6、X-rite MA98 和 X-rite MA-T12 等。图 2 为 X-rite MA-T12 多角度分光光度计的 12 个几何测量条件,2 个接收角 (45° 和 15°) 各自对应 6 个人射角。测量条件的名称由 r, as 与两个数字组成^[5-9]。r 后面的数字表示接收方向与法线的夹角,简称接收角。as 后的数字是入射方向与镜面反射方向的夹角,简称镜面角。ASTM E2539-14 推荐在 (r, as) 命名方法的基础上增加接收方向距法线夹角^[4],即以 45:-60 (as-15) 命名 r45as-15 测量条件,为保留与相关领域研究的一致性,本文后续以 (r, as) 几何测量条件进行介绍。

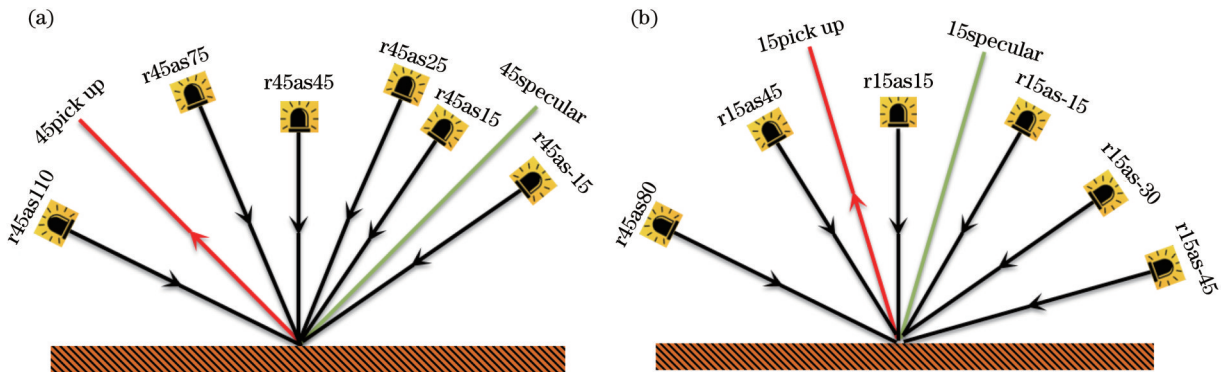


图 2 X-rite MA-T12 多角度分光光度计 12 个几何测量条件。(a) 45° 接收角; (b) 15° 接收角

Fig. 2 Twelve geometric measurement conditions of X-rite MA-T12 multi angle spectrophotometer. (a) 45° receiving angle; (b) 15° receiving angle

另一种是如图 3 所示的上海复享 R1 角分辨光谱仪^[14],其入射臂在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 内可调、接收臂在 $0^\circ \sim 360^\circ$

内可调,可根据需要自行设置入射臂和接收臂的角度。

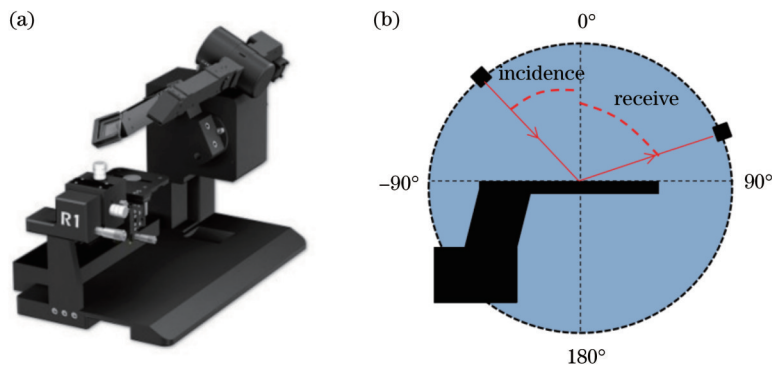


图 3 R1 角分辨光谱仪与测量条件。(a) 测量装置; (b) 测量条件

Fig. 3 R1 angle-resolved spectrum device and measurement conditions. (a) Measurement device; (b) measurement conditions

X-rite MA-T12 的 12 个测量条件可满足 ASTM E2539-14 推荐的测量条件。使用 R1 角分辨光谱仪时,可自行设置测量条件对光变油墨进行更加全面的

测量。本文将选用以上两种仪器分别进行光变油墨的颜色测量分析。

3 实验方法

3.1 实验样本

选取不同防伪油墨厂家提供的 22 种由光变油墨印制的匀色色样, 编号为 No. 1~No. 22。出厂前, 企业已分别标定了样本在不同角度下的颜色变化效果, 如 No. 1~No. 4 样本的颜色变化分别命名为“金黄变银”“黄变蓝绿”“草绿变天蓝”“紫红变金黄”。

使用 Canon EOS 760D 相机 [微距模式, 曝光 800 ISO, 分辨率 6000×4000 dpi (每英寸点数)] 在距离样

本 40 cm 处拍摄, 如图 4(a) 所示。使用 iPhone 8 plus 手机的手电筒作为照明光源 (设置亮度最低模式), 图 4(b) 为使用柯尼卡 CL500A 分光照度计测量的手机光源相对光谱功率 $S(\lambda)$ 分布, 光源色温为 4810 K, 显色指数为 96.0。拍摄过程中为避免其他光照射到样本, 以长度为 10 cm 的黑色卷筒纸对光源的光路进行收束, 使光源沿直线照射到样本表面。光源相对法线 15° 、 45° 方向照明, 分别在与法线夹角 0° 和 60° 方向处拍摄。由于光路可逆, 以上拍摄条件与 r45as-15、r45as45、r15as15、r15as-45 测量条件相对应。

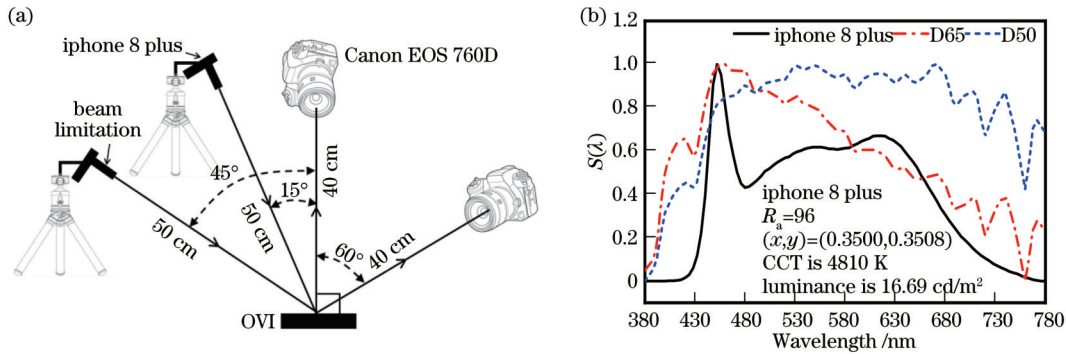


图 4 拍摄实际效果。(a) 相机拍摄条件; (b) 照明光源的相对光谱功率

Fig. 4 Photographing the actual results. (a) Camera shooting conditions; (b) relative spectral power distribution of light sources

实验分别拍摄了 22 个样本在不同条件下的实际颜色变化效果, 并使用 KEYENCE VK-X200K 型 3D 激光共聚焦显微镜放大 400 倍测量了其微观结构图^[15], 以 No. 1~No. 8 样本的实际效果和微观结构图为例分析说明, 如图 5 所示。由于手机光源的显色指数为 96, 且是与日光具有相近光色的白光光源, 因此拍摄的图像具有较好的参考意义。

在显微镜下观测不同光变油墨样本, 均为分布在油墨连接料中倾角不同、大小不一的薄膜碎片。油墨

生产厂商标定的光变油墨颜色变化为: A 颜色变 B 颜色, 分别对应于图 5 中 r15as15 (颜色 A) 和 r45as-15 (颜色 B) 两种拍摄条件下的视觉变化效果, 测量得到的颜色均较为鲜亮。同时也可发现, GB/T 17001.7—2023 推荐的 r45as45、r45as-15 测量条件与企业标称的光变油墨颜色变化并不对应。如 No. 4 样本标定的颜色变化为“紫红变金黄”, 与国标推荐的 r45as45 条件下测量的颜色不一致, 该条件下的颜色接近非彩色, 色调特征不明显。

Number	microstructures	r45as45	r45as-15	r15as15	r15as-45	Number	microstructures	r45as45	r45as-15	r15as15	r15as-45
No.1						No.5					
No.2						No.6					
No.3						No.7					
No.4						No.8					

图 5 不同样品的微观图 and 不同角度变色效果

Fig. 5 Microstructures of different samples and visual appearance at difference angles

考虑到目前对光变油墨的颜色评价以人眼目视为主, 为对其颜色变化效果进行准确的量化表征和评价, 本文将对光变油墨的光谱反射率和色度参数

进行测量, 确定与人眼视觉感知效果对应的光变油墨测量条件, 也可测量、表征不同光变油墨的颜色表现能力。

3.2 光谱和色度测量

3.2.1 多角度分光光度计

使用 X-rite MA-T12 多角度分光光度计测量了 22 个样品,图 6 为 No. 1~No. 8 样品的光谱能量 $E(\lambda)$ 。

可见, r45as-15、r45as15、r15as15 和 r15as-15 条件下采集到的样品 $E(\lambda)$ 光谱能量均较高,且大多数样品

的 $E(\lambda)$ 高于 100%。在其他测量条件下采集到的光谱能量较低,使得很多颜色接近非彩色。图 6 中, No. 2、No. 6 和 No. 8 号样本在 r45as-15 条件下测量的 $E(\lambda)$ 曲线与其他条件下的差异较大,说明此时测量得到的色调与其他条件下的差异较大。

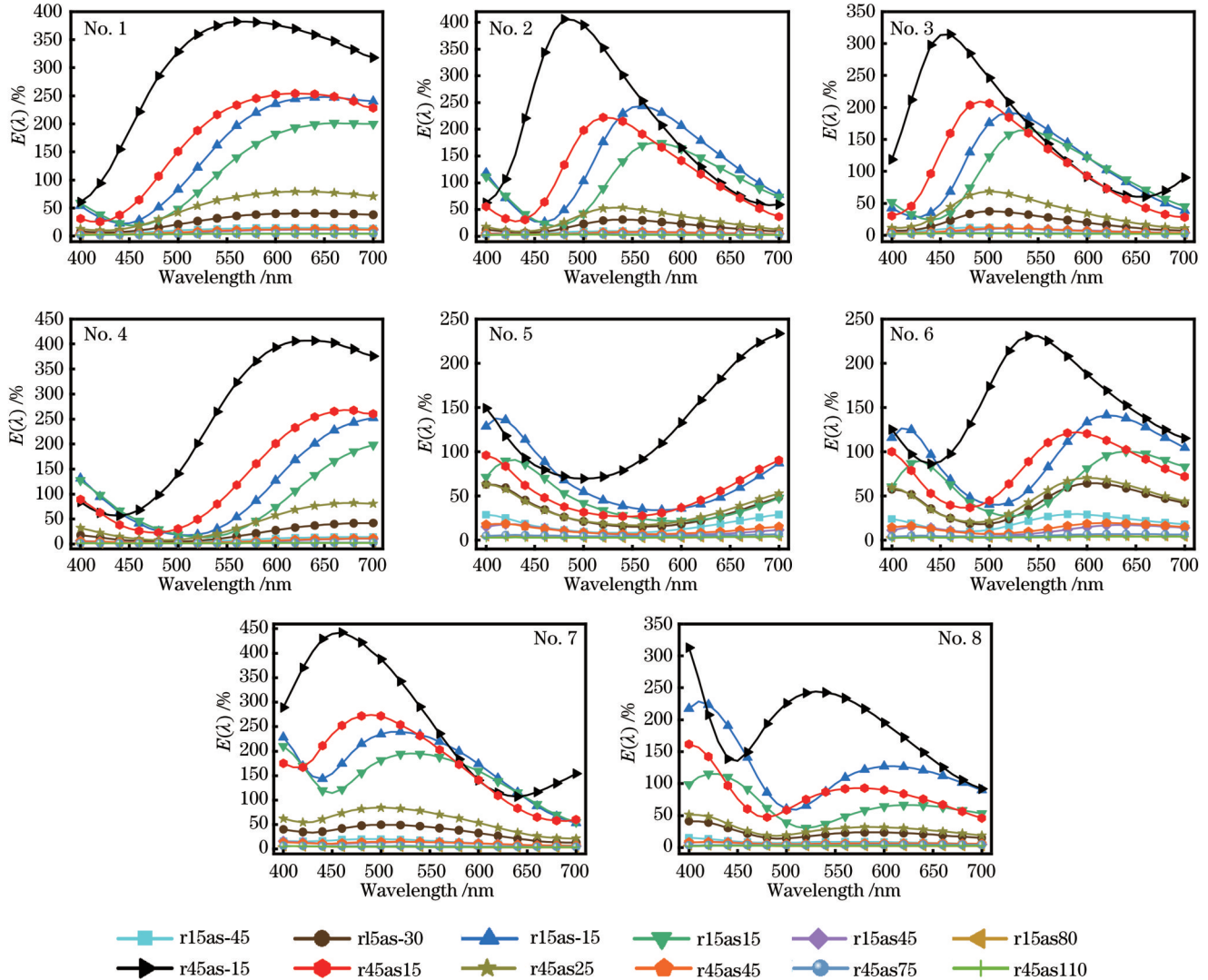


图 6 X-rite MA-T12 测量不同样品的光谱能量分布

Fig. 6 Spectral distributions of different samples using X-rite MA-T12

基于 D65/10° 条件,计算 No. 1~No. 8 样本在 45° 接收角和 15° 镜面角方向的 $a_{10}^* b_{10}^*$ 色度值,分别绘制在图 7 中。图 7(a) 和图 7(b) 为固定 45° 和 15° 接收角,分别在 6 个不同镜面角下采集的 $a_{10}^* b_{10}^*$ 色度值;图 7(c) 为固定 45° 和 15° 接收角,分别在 ±15° 镜面角方向入射下采集的 $a_{10}^* b_{10}^*$ 色度值。

图 7(a) 中 6 个测量条件的接收角均为 45°,除 r45as-15、r45as15 条件下的饱和度较高外,其他条件下的饱和度均较低,且与 r45as15 条件下的测量色调较接近。图 7(b) 中 6 个测量条件的接收角均为 15°,只有 r15as-15、r15as15 饱和度较高,且 15° 接收角下的色调

变化范围较小。图 7(c) 中测量条件的镜面角为 ±15°,采集到的油墨样本饱和度均较高,色调范围变化较大,且在 r15as15 和 r45as-15 测量条件下的色调差最大。r15as15 和 r45as-15 测量条件,相较 GB/T 17001.7—2023 中推荐的 r45as45 和 r45as-15 测量条件,更能反映光变油墨样本的色调变化,且与标称的光变油墨变色效果更加对应。如 No. 2 样品为“黄变蓝绿”,r15as15 条件可测得黄色,r45as-15 条件可测得蓝绿色。现有便携式多角度分光光度计大多设有这两个测量条件,使用此类仪器可简单、快捷测量光变油墨的颜色变化。

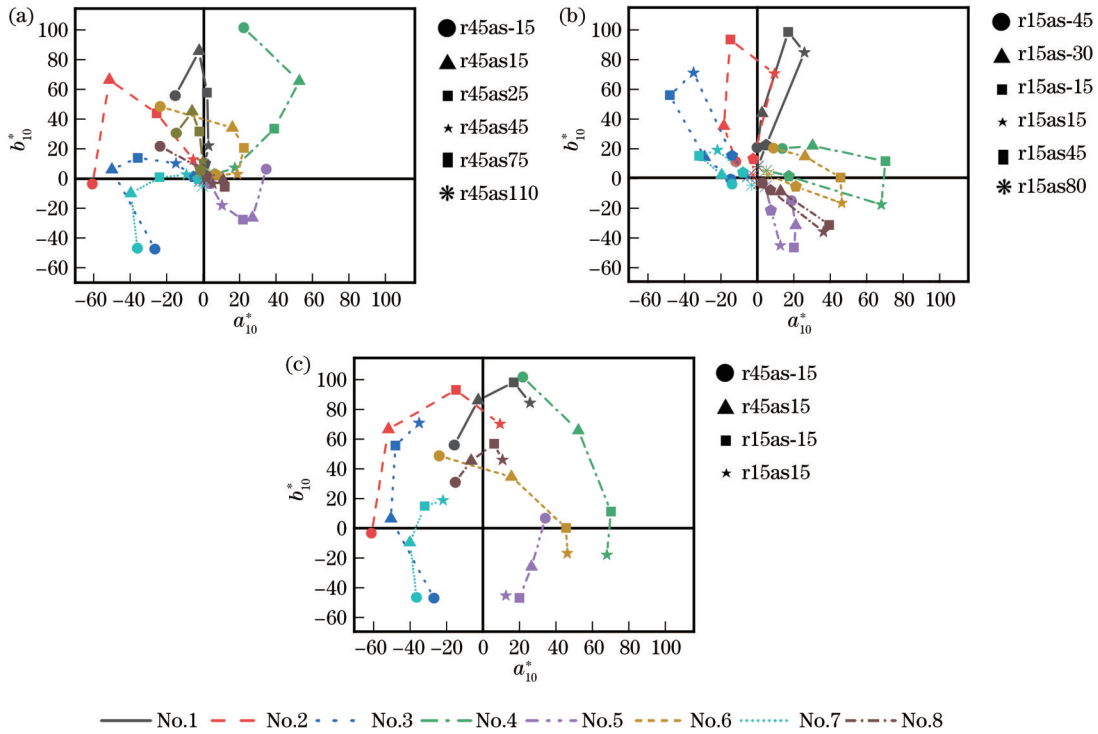


图 7 不同测量条件下的 $a_{10}^*b_{10}^*$ 色度值。(a)45°接收角;(b)15°接收角;(c)15°镜面角

Fig. 7 $a_{10}^*b_{10}^*$ chromaticity values at different measurement conditions. (a) 45° receiving angle; (a) 15° receiving angle; (c) 15° specular angle

上述测量主要基于 X-rite MA-T12 进行,由于该仪器仅有 12 个测量条件,以下将使用角分辨测量仪器做进一步测量分析。

3.2.2 角分辨光谱仪

使用上海复享的 R1 角分辨光谱仪进行测量,并定义 (α, β) 的测量条件,如图 8 所示。其中,镜面角 $\alpha = |i_r - i_d|$ 、 $\beta = i_r + i_d$ 为光源入射方向与光谱能量接收方向的夹角, i_r 为光源入射方向距样本平面法线的夹角, i_d 为光谱能量接收方向距样本平面法线的夹角。相应地, r45as-15、r45as15、r15as-15、r15as15 的 4 个测量条件以 (α, β) 表示分别为 (15, 105)、(15, 75)、(15, 45)、(15, 15)。

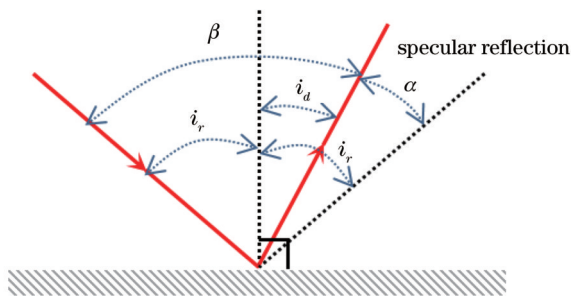


图 8 (α, β) 测量条件示意图

Fig. 8 Diagram of the measurement condition of (α, β)

分别以 $\alpha = 5^\circ$ 和 15° , β 在 $5^\circ \sim 135^\circ$ 间变化,步长为 10° 的测量条件采集 No. 1~No. 8 样本的光谱能量,基

于 D65/10° 条件计算得到的样本 $a_{10}^*b_{10}^*$ 色度值,如图 9 所示。其中,图中实线曲线代表 5° ,虚线曲线代表 15° 镜面反射方向采集到不同 β 角下的色度值,不同符号代表不同 β 角下的测量结果。ASTM E2539-14 标准推荐 $45^\circ: -60^\circ$ (as-15°)、 $45^\circ: -30^\circ$ (as15°)、 $15^\circ: -30^\circ$ (as-15°)、 $15^\circ: 0^\circ$ (as15°) 的 4 个测量条件也在图中标记。

当 β 角相同时,增加 α 角(偏离镜面反射方向),采集到的样品饱和度降低,色调不变,因此 β 角的变化会引起色调和饱和度的变化。当 $\alpha = 0^\circ$ 时,对于光泽度较高的样品,可能会存在镜面反射光过强引起较大测量误差,本文推荐在 $\alpha = 5^\circ$ 的情况下进行测量结果的分析。

图 9 中, $45^\circ: -60^\circ$ (as-15°)、 $45^\circ: -30^\circ$ (as15°)、 $15^\circ: -30^\circ$ (as-15°)、 $15^\circ: 0^\circ$ (as15°) 的 4 个测量条件并没有采集到光变油墨样品可呈现色调的最大变化范围。其中, r15as15 对应的 $(\alpha, \beta) = (15, 15)$ 测量条件与图 9 中的 $(\alpha, \beta) = (15, 5)$ 测量条件下采集到的色调较为接近。由于 R1 角分辨光谱仪的入射臂与接收臂存在 5° 左右的空间位阻,可视为测量条件 r15as15 已可采集到光变油墨的一个色调的边界。而 r45as-15 对应的 $(\alpha, \beta) = (15, 105)$ 测量条件,与另一个变色方向的色调边界仍有较大差距。如 No. 7 样本,生产厂家对这种油墨的变色定义为“草绿变天蓝”,当 β 在 $105^\circ \sim 135^\circ$ 范围内时,样本呈现一种“深蓝色”, $45^\circ: -60^\circ$ (as-15°)、 $45^\circ: -30^\circ$ (as15°)、 $15^\circ: -30^\circ$ (as-15°)、 $15^\circ: 0^\circ$ (as15°) 的 4 个测量条件无法检测到这一颜色,无法判断光变油墨在这一范

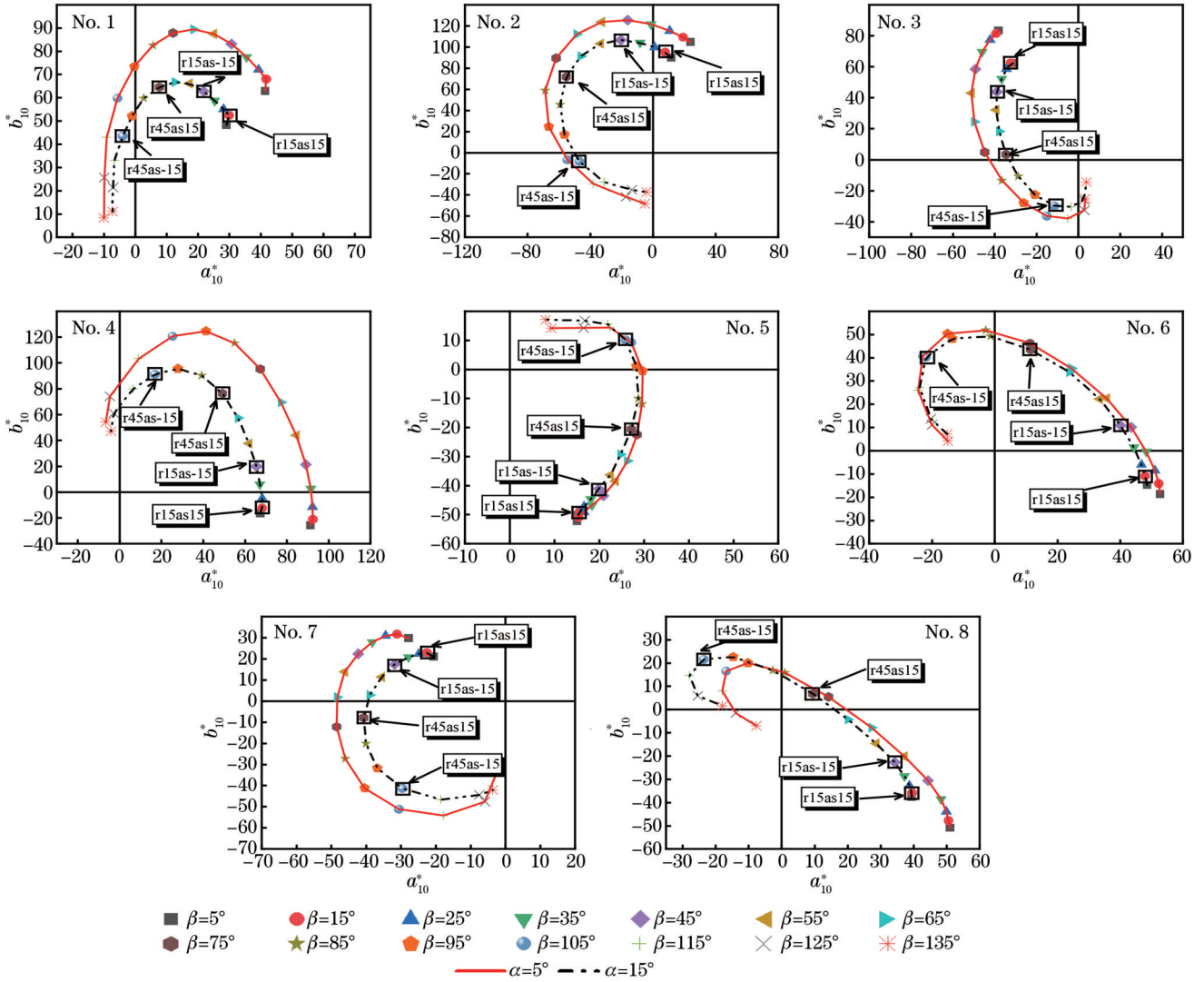


图 9 不同 (α, β) 测量条件下的 $a_{10}^* b_{10}^*$ 色度值分布

Fig. 9 Distributions of $a_{10}^* b_{10}^*$ chromaticity values at different (α, β) measurement conditions

围内的呈色特点,建议给出一个 β 角更大的测量条件描述其色调变化。同时由图 9 可知, β 角也不应设置过大:当 $\beta=135^\circ$ 时采集到的饱和度较低,接近非彩色;当 $\alpha=5^\circ, \beta$ 分别为 $115^\circ, 125^\circ, 135^\circ$ 时, 22 个样本的平均饱和度和 C^* 分别为 52.99、39.11、27.00。综合对 22 种光变油墨的颜色测量结果,在考虑到饱和度的情况下,选择 $\beta=115^\circ$ 作为光变油墨另一个色调变化的采集边界。

进一步地,为研究 β 角与饱和度 C^* 间的变化关系,测量 $\alpha=5^\circ$ 时 22 个样本在不同 β 角下的饱和度 C^* ,将不同样品的 C^* 值分别归一化为 C_{normal}^* ,其中, C_{normal}^* 最大值为 1,最小值为 0,其余数据按比例缩放至 $(0, 1)$ 范围内,如图 10 所示。

将图 10 中 β 角和饱和度 C^* 间的散点关系用多项式进行拟合,如图中的黑色实线所示,结果为

$$f(\beta) = p_1 \times \beta^3 + p_2 \times \beta^2 + p_3 \times \beta + p_4, \quad (2)$$

式中: $p_1 = -2.14 \times 10^{-6}$; $p_2 = 2.78 \times 10^{-4}$; $p_3 = -5.51 \times 10^{-4}$; $p_4 = 0.21$; 拟合优度为 0.73。

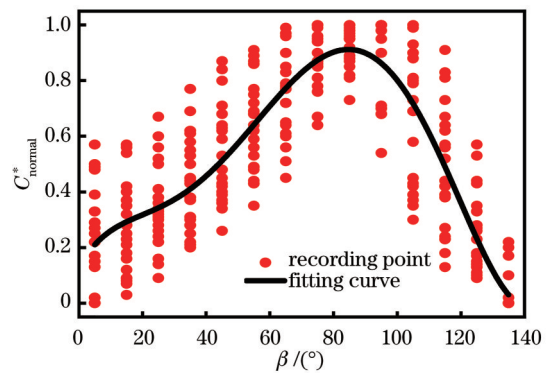


图 10 β 角与 C_{normal}^* 的关系

Fig. 10 Relationship between angle of β and C_{normal}^*

$f(\beta)$ 取极大值时 $\beta=85.65^\circ$, 为方便设置测量角度,可取 $\beta=85^\circ$ 。在测得光变油墨中间色调变化的过程中,同时测得光变油墨呈现的高明度高饱和度颜色。

通过上述测量分析可见,适用于测量光变油墨干涉效果引起色调变化的测量条件以 (α, β) 表示为 $(5,$

5)、(5, 85)、(5, 115), 对应的(r , as)测量条件为 $r5as5$ 、 $r45as5$ 和 $r60as5$, 对应 ASTM E2539-14 的测量条件为 $5^\circ:0^\circ(as5^\circ)$ 、 $45^\circ:-40^\circ(as5^\circ)$ 和 $60^\circ:-55^\circ(as5^\circ)$ 。

4 结 论

为确定光变油墨的颜色测量几何条件, 本文选取了不同油墨生产厂商提供的 22 个光变油墨样本进行颜色测量分析。可得出以下结论:

1) $15^\circ:0^\circ(as15^\circ)$ 、 $45^\circ:-60^\circ(as-15^\circ)$ 测量条件分别对应现有油墨生产商对光变油墨颜色变化效果的定义, 可在测量光变油墨较大色调变化范围的同时, 节省测量时间。

2) 使用 R1 角分辨光谱仪基于自定义的(α, β)测量条件进行光变油墨样本的颜色测量, 分析 a^*b^* 色度值发现, α 角较小时饱和度较大, 但几乎不影响色调, β 角影响色调的同时影响饱和度大小。

3) 现有 ASTM E2539-14 测量条件未涉及到光变油墨最大色调、最大饱和度变化范围。通过 β 角确定色调最大变化范围为 $5^\circ\sim 115^\circ$, 通过 α, β 角确定饱和度最大的测量条件为 $\alpha=5^\circ, \beta=85^\circ$ 。

4) 如需进行光变油墨颜色变化范围测量(采集其较大色调变化范围和较高饱和度), 推荐使用 $5^\circ:0^\circ(as5^\circ)$ 、 $45^\circ:-40^\circ(as5^\circ)$ 和 $60^\circ:-55^\circ(as5^\circ)$ 的测量条件。

参 考 文 献

- [1] Maile F J, Pfaff G, Reynders P. Effect pigments: past, present and future[J]. Progress in Organic Coatings, 2005, 54(3): 150-163.
- [2] Cramer W R. Color measurement[J]. Physical Sciences Reviews, 2021, 6(10): 607-664.
- [3] Soon J M, Manning L. Developing anti-counterfeiting measures: the role of smart packaging[J]. Food Research International, 2019, 123: 135-143.
- [4] American Society for Testing and Materials. A standard test method for multiangle color measurement of interference pigments: E2539-14[S]. West Conshohocken: ASTM

- International, 2021.
- [5] Gómez O, Perales E, Chorro E, et al. Visual and instrumental assessments of color differences in automotive coatings[J]. Color Research & Application, 2016, 41(4): 384-391.
- [6] Kirchner E, Cramer W. Making sense of measurement geometries for multi-angle spectrophotometers[J]. Color Research & Application, 2012, 37(3): 186-198.
- [7] 陈彪, 王洪波. 光可变油墨颜色特性的测量方法: ZL2000115502.4[P]. 2003-10-15.
Chen B, Wang H B. Method of measuring color characteristics of optical variable ink: ZL2000115502.4[P]. 2003-10-15.
- [8] Cramer W R. Visual and instrumental assessment of interference pigments[J]. Color Research & Application, 2022, 47(1): 5-12.
- [9] 国家市场监督管理总局. 国家标准化管理委员会. 防伪油墨第 7 部分: 光学可变防伪油墨: GB/T 17001.7—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Anti-counterfeiting printing ink—Part 7: optical variable anti-counterfeiting printing ink: GB/T 17001.7—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [10] 倪星元, 吕俊霞, 魏建东, 等. 复合纳米光学变色薄膜[J]. 光学学报, 2004, 24(4): 433-436.
Ni X Y, Lü J X, Wei J D, et al. Composite nano chromotropic film[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(4): 433-436.
- [11] Yang Q Y, Zhang X A, Bagal A, et al. Antireflection effects at nanostructured material interfaces and the suppression of thin-film interference[J]. Nanotechnology, 2013, 24(23): 235202.
- [12] Diamanti M V, Del Curto B, Pedferri M P. Interference colors of thin oxide layers on titanium[J]. Color Research & Application, 2008, 33(3): 221-228.
- [13] Castaneda R, Matteucci G. New physical principle for interference of light and material particles[M]//Advances in imaging and electron physics. Amsterdam: Elsevier, 2017, 204: 1-37.
- [14] 吕瑞琦, 王磊, 刘博文, 等. 基于同轴转臂的角分辨光谱测量系统[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1224001.
Lü R Q, Wang L, Liu B W, et al. Angle resolved spectrometer based on coaxial rotation arms[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1224001.
- [15] 张洪飞, 谈梦科, 及少勇, 等. 激光共聚焦扫描显微镜的光学设计[J]. 光学仪器, 2016, 38(3): 221-225.
Zhang H F, Tan M K, Ji S Y, et al. Optical design of laser confocal scanning microscopy[J]. Optical Instruments, 2016, 38(3): 221-225.

Color Measurement Methods for Optically Variable Ink

Gong Xuping, Huang Min*, Shen Yuetong, Wei Ziwen, Li Xiu, Liu Yu

School of Printing and Packaging Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China

Abstract

Objective The gonio-chromatic attributes of optically variable ink (OVI) lead to its extensive applications in anti-counterfeit printing, such as confidential documents, banknotes, and packaging products. Products printed with this ink exhibit a notable color-changing effect when observed from various angles. Although current color measurement standards specify a large number of measurement geometries, there is a lack of research on assessing the efficacy of these conditions for OVI. Consequently, manufacturers rely on subjective evaluations for determining the color-changing effects of OVI,

resulting in substantial uncertainty in the quality control of anti-counterfeit products. Thus, it is imperative to conduct a systematic study on the color measurement methods of OVI to accurately capture the color-changing effects of OVI.

Methods We employ different color measurement instruments to test measurement geometries on 22 OVI samples, supplied by ink manufacturers. The employed measurement geometries are extensively adopted for gonio-apparent object characterization, following the notation stipulated in the ASTM E2539-14. Initially, the OVI microstructure is observed at $400\times$ magnification using a 3D laser confocal microscope, and images are captured by a Canon EOS 760D camera in measurement geometries of $45^\circ:-60^\circ$ (as- 15°), $45^\circ:-30^\circ$ (as 15°), $15^\circ:-30^\circ$ (as- 15°), $15^\circ:0^\circ$ (as 15°). Then, the X-Rite MAT12 multi-angle spectrophotometer is leveraged to measure the spectral power distributions and chromaticities of the samples in 12 geometries. These results are utilized for evaluating the geometries recommended by international standards. Finally, the influence of measurement variables α and β on OVI chromaticity is investigated by customizing 28 different geometries using an R1 angle-resolved spectrometer to find the optimal measurement geometries for OVI.

Results and Discussions Images captured in four measurement geometries using a 3D laser confocal microscope and a Canon EOS 760D are compared with the color-changing effects labeled by manufacturers (Fig. 5). Results demonstrate that the r45as45 and r45as-15 geometries in GB/T 17001.7—2023 do not correspond well with the named samples. However, the color changes between the r15as15 and r45as-15 geometries show a better correlation with their designated names. The measurement results from the X-Rite MAT12 indicate that due to the gonio-chromatic characteristics of OVI, there are notable differences in the spectral power distribution of different measurement geometries (Fig. 6). The chromaticities of the samples under multiple measurement geometries are calculated by D65/ 10° and compared in CIE 1976 a^*b^* diagrams (Fig. 7). The hue changes between the r15as15 and r45as-15 geometries are more obvious than r45as45 and r45as-15 in GB/T17001.7—2023. By utilizing the R1 angle-resolved spectrometer with customized α and β variables, the α angle is set at $5^\circ/15^\circ$, β varies from 5° to 135° , and the spectral energy of eight samples is collected. The calculated chromaticities indicate that with a constant β angle, the sample saturation decreases when the α angle increases from 5° to 15° , with unchanged hue (Fig. 9). Furthermore, polynomial regression is employed to analyze the relationship between the β angle and saturation C^* (Fig. 10). The geometries $5^\circ:0^\circ$ (as 5°), $45^\circ:-40^\circ$ (as 5°), and $60^\circ:-55^\circ$ (as 5°) best characterize the range of hue changes in OVI.

Conclusions We primarily report on the color measurement results of OVI samples for a range of measurement geometries and derive three key findings. First, the colorimetric properties observed in the $15^\circ:0^\circ$ (as 15°) and $45^\circ:-60^\circ$ (as- 15°) measurement geometries align with the color-changing effects designated for OVI by ink manufacturers. These geometries enable to capture a more extensive range of hue variations in OVI. Second, the color measurements of OVI samples using the R1 angle-resolved spectrophotometer based on the customized α and β measurement conditions reveal that smaller α angles correspond to higher saturation levels with little effect on hue, while β angles influence both hue and saturation. Finally, the measurement geometries outlined in ASTM E2539-14 are insufficient to cover the maximum hue and saturation change ranges for OVI. The β angle ranging from 5° to 115° is identified to cover the maximum range of hue changes. Meanwhile, the highest saturation is found at measurement geometries of $\alpha=5^\circ$ and $\beta=85^\circ$. Therefore, the measurement geometries $5^\circ:0^\circ$ (as 5°), $45^\circ:-40^\circ$ (as 5°), and $60^\circ:-55^\circ$ (as 5°) are found to effectively represent the hue and saturation changes in OVI.

Key words visual optics; visual color; optically variable ink; color measurement