

一种基于灰阶基底的涂料遮盖力测试新方法

王 华¹ 徐海松¹ Jim Nobbs² M. Ronnier Luo²

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027
² Department of Colour Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK)

摘要 目前涂料遮盖力测试中普遍使用改变涂料厚度的方法。为提高测试的效率和精度, 提出了改变基底样式并采用不同灰阶基底的遮盖力测试方法。基于对光线入射到薄膜后传播过程的分析, 结合唯象理论, 系统分析了专用基底上涂膜前后的 CIELAB 色差变化, 采用数学方法模拟出涂料的遮盖表现, 进而实现遮盖力的测试。与已有的德国标准化协会(DIN)方法、美国测试与材料协会(ASTM)方法以及光谱估计方法的实验比较表明, 新方法能够准确、快捷地测试遮盖力, 与 DIN 方法的参照结果相比其相对测试精度可达 0.1%~11%, 优于 ASTM 和光谱评估方法, 且对彩色涂料和非彩色涂料具有同样的可操作性。

关键词 视觉与色彩; 涂料; 遮盖力; 基底样式; 数学模拟

中图分类号 O432.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0281

A Novel Measurement Method of Hiding Power for Pigmented Material Based on Gray Level Substrate

Wang Hua¹ Xu Haisong¹ Jim Nobbs² M. Ronnier Luo²

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)
² Department of Colour Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK)

Abstract The general method measures hiding power of pigmented material based on varying layer thickness. A new measuring technique was developed by varying the substrate pattern and using the substrate with different gray levels to improve the efficiency and accuracy of the hiding power measurement. Considering the propagation of light after incidence in the layer according to the phenomenological theory, a mathematical model was proposed to simulate the covering ability of the pigment to measure its hiding power based on the systematic analysis of the CIELAB colour differences for the samples before and after painting on the specially designed substrate. The experimental comparison with the existent methods, including Deutsches Institut für Normung (DIN), American Society for Testing and Materials (ASTM) and spectral evaluation methods, shows that the proposed technique can measure the hiding power accurately and rapidly, with the relative accuracy of 0.1%~11% compared with the referenced results from DIN method. This new method outperforms ASTM and spectral evaluation methods for non-coloured pigment and colourful pigment as well.

Key words vision and color; pigmented material; hiding power; substrate pattern; mathematical simulation

1 引言

遮盖力是指涂料遮盖其基底颜色或色差的能力^[1~5], 是涂料施工性能的重要指标之一。基于遮盖力在工业应用中的重要性, 催生并发展了一系列

的测试方法^[3], 如直接目视测试方法、相对于某一参考涂料的比较法、基于不同厚度涂膜的内插法、基于 Kubelka-Munk 方程的外推法、结合色度学原理的光谱估计方法等。这些方法主要着力于涂料膜层

收稿日期: 2008-04-10; **收到修改稿日期**: 2008-06-23

作者简介: 王 华(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学工程、颜色科学与图像技术等方面的研究。

E-mail: whaigt@hotmail.com

导师简介: 徐海松(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事光学工程、颜色与影像科学、光电技术等方面的研究和教学工作。E-mail: chsxu@zju.edu.cn

的厚度变化,根据其在给定黑/白基底上的遮盖表现进行测试,但仍不能完全解决遮盖力测试的问题,如目测法操作粗糙、人为误差较大,比较法只能得到相对的遮盖力值,内插法需多次涂膜,而外推法和光谱估计法则需了解遮盖力的大致范围^[6,7]。因此,本文提出了一种基于变化的基底而非改变涂膜厚度的测试方法,即从遮盖原理出发建立一种新的模型实现对涂料遮盖能力的预估。

2 理论及方法

2.1 遮盖原理

遮盖力一般表示为达到遮盖所要求的涂布率,即人眼观察到的基底上对比度刚好消失时的膜层厚度所对应的倒数,以平方米/升(m^2/L)为单位^[3],或者采用达到遮盖的涂料用量来表示,单位为克/平方米(g/m^2)^[7]。

遮盖原理的讨论涉及唯象理论^[2,3,8],即关于入射到薄膜的光辐射如何受到吸收和散射影响的理论。当光束以一定角度(如 0°)入射到薄膜时,一小部分光线(4%)会在空气-薄膜界面被反射,其余部分将透射到薄膜层进行一系列的反射-散射循环,最后除了少部分被薄膜和基底吸收外,大部分(60%)会最终构成该物质的反射成份。

唯象理论主要在不考虑涂料微粒及其属性^[9]情况下处理光能或者光通量,其中最经典也是最重要的是 Kubelka-Munk 理论,即双光通理论。由 Kubelka-Munk 理论可得

$$\ln \frac{(R - a - b)(R_g - a + b)}{(R_g - a - b)(R - a + b)} = 2bSh, \quad (1)$$

式中 R_g 为基底的反射系数, h 为薄膜的厚度, R 为薄膜的反射系数, $a = 1 + (K/S)$, $b^2 = a^2 + 1$, K 和 S 分别是膜层的光吸收和散射系数。

从遮盖力的定义和式(1)可知,遮盖力受到薄膜吸收系数、散射系数以及薄膜与基底反射系数的影响,即受到涂料本身和基底的双重影响。

2.2 测试方法

已有的方法主要基于黑/白(由黑色和白色色块构成一个对比组)基底,以改变涂膜厚度来实现遮盖力的测试,因而需多次涂膜。本文改变基底的模式,设计了包含一组灰阶对(由灰色和白色色块组成)的专用基底来达到遮盖力的测试,以减少涂膜的次数。该基底由 10 个灰阶对构成,从近白色/白色渐变到黑色/白色,包含了从 3 到 70 CIELAB 单位的色差范围,如图 1 所示。



图 1 专用基底的样式

Fig. 1 Designed substrate pattern

本文在物理学原理的基础上通过数学模拟的方法来测试遮盖力,从“遮盖力受涂料和基底双重影响”的基本遮盖原理出发,利用国际照明委员会(CIE)色度参数表示涂膜层的视觉印象,以灰色和白色色块之间的 CIELAB 色差^[10] ΔE_{ab}^* 作为判断遮盖的标准,即把 $\Delta E_{ab}^* = 1$ 作为临界值,当该色差小于 1 时表示已经完全遮盖^[4],然后采用曲线拟合模拟出涂料的遮盖表现,从而实现遮盖力的测试。

对于不同颜色的涂料,分别对同一厚度不同浓度和同一浓度不同厚度的涂膜样本进行先验测试。实验结果发现,对于不同的涂料,基底灰阶对的色差 dE_g^* 和涂膜后样本灰阶对的色差 dE^* 存在一定的关系。对于不同涂料的某一厚度,涂膜前后 10 个灰阶对的样本色差关系可绘成如图 2 所示的曲线(黄、绿、蓝的质量浓度均为 1%),其中实线为模拟的趋势线,不同的涂料对应类似的曲线,其形状均接近对数函数,只是曲线的倾斜度不同,深色的遮盖能力较强,则其曲线更靠近横轴即更趋于水平。相应地,对于同一涂料的不同厚度也能得到类似的曲线簇,且涂膜越厚其曲线越接近横轴即越趋于水平。可见,曲线的倾斜度反映了涂料遮盖力的大小。同时考虑到遮盖力受涂料本身和基底的影响,提出了一个非线性方程来模拟涂料的遮盖过程,表

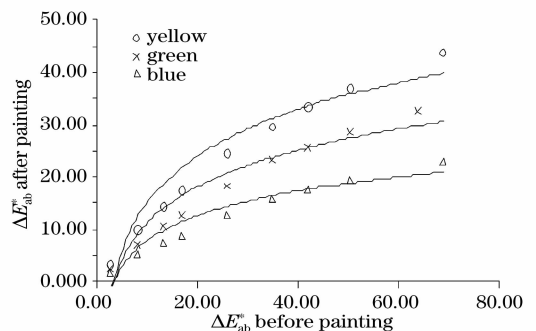


图 2 色差对比曲线

Fig. 2 Comparison curves of color difference

征涂膜后灰阶对的色差对应于基底色差随厚度变化的趋势,即

$$(dE^* - \sigma) = a_1 S_p + a_2 \ln(Z_0 + dE_g^*) + a_3 S_p \ln(Z_0 + dE_g^*) \quad (2)$$

式中, S_p 为涂布率(完全遮盖时的涂布率即为遮盖力值), Z_0 为 dE_g^* 的零偏置量, σ 为预估 dE^* 的标准偏差, $a_i (i = 1, 2, 3)$ 为系数。(2) 式中, dE_g^* 为固定量, S_p 为自变量, dE^* 为因变量, 由此可通过基底的 10 对灰阶在涂膜前后的色差变化来模拟遮盖表现, 从而预测 dE^* 为 1 时对应的遮盖力。

由于遮盖力受涂料本身和基底两方面因素的影响, 故测量流程应包括对基底本身性质的测量以及在涂膜后对样本的测量, 其基本测量步骤如图 3 所示。

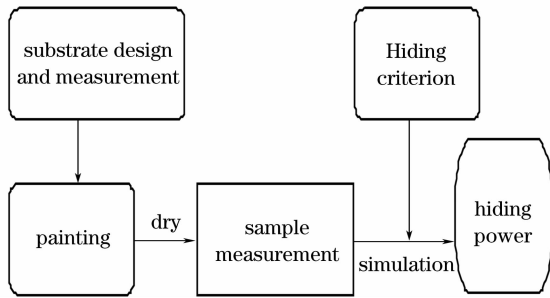


图 3 遮盖力测量基本流程

Fig. 3 Main flow chat for the measurement of hiding power

3 实验结果及讨论

经过反复的测试和比较, 设计确定的基底所包含的 10 对灰阶的 CIELAB 色差值。实验以黄、绿、蓝、灰以及白色油漆作为测试对象, 由于主要考虑一定浓度下不同色漆的遮盖力, 故选择 1% 的色漆质量百分比进行涂膜实验。采用英国 RK 公司生产的电动涂布机进行涂膜操作, 由不同的 K 棒涂布得到不同的膜层厚度。利用美国爱色丽公司的分光光度计 SP64 分别测得未涂漆前的基底和干燥后漆膜样本的光谱反射比, 并计算出在 CIE 标准照明体 D65 下的 CIELAB 色差值, 其中基底上 10 个灰阶对的平均色差分别为 2.45, 8.04, 13.02, 16.65, 25.63, 34.77, 41.74, 50.23, 63.73, 68.74 CIELAB 色差单位。同时, 按照美国测试与材料协会 (ASTM) 标准中的称重法^[8]测量干燥后的漆膜厚度, 并取三次测量的平均值作为所用 6 种 K 棒代表的漆膜厚度, 分别为 8.67 μm , 15.13 μm , 27.44 μm , 48.70 μm , 90.55 μm 和 159.83 μm 。

根据测得的 CIELAB 色差数据, 采用最小二乘法可以优化得到(2)式的最佳参量设置, 其结果如

表 1 所示。可见, 灰色漆的优化参量明显偏大, 主要是因为它的遮盖能力较强而使其色差关系曲线接近水平。每一种色漆对应(2)式的一组系数, 优化后的拟合式即可适用于该色漆各个厚度样本的遮盖力测试。按临界值 ($dE^* = 1$) 判据由(2)式计算出遮盖力值, 结果如表 2 所示。为了便于比较, 表 2 中同时给出了德国标准化学会 (DIN) 方法^[4]、ASTM 方法^[11]以及光谱估计方法^[12] (SPEV) 的实验结果。DIN 方法为基于不同涂膜厚度的内插法, 采用了传统黑/白色基底上 6 个厚度膜层的插值结果, 其实验结果精确度高, 通常被认为接近于涂料遮盖表现的真实轨迹^[6]; ASTM 和 SPEV 方法分别对应于基于 Kubelka-Munk 方程的外推法和结合色度学原理的光谱估计方法, 只需在传统基底上施涂一个膜层即可得到各自的结果, 而本文方法则需在专用基底上 2~3 个厚度的涂膜。实际上, 对于未知的涂料, DIN 方法可能要更多厚度涂膜才能得到精确的插值结果, 而 ASTM 和 SPEV 方法只需涂膜一个厚度的前提是预知遮盖力范围并采用接近遮盖的厚度才能预测到精确结果, 且 ASTM 方法还受限于涂料的 CIE 色刺激值需大于 15%。可见, 本文方法虽然尚未能实现一次涂膜即得到结果, 但比 DIN 方法相对快捷, 且无需预知遮盖范围, 也不受涂料颜色强度的限制。当需进一步提高测试效率时, 可采用扫描仪经设备的色度特征化^[13]实现 10 个灰阶对颜色的一次性同时测量。

表 1 数学模拟模型的优化参量

Paints	a_1	a_2	a_3
Yellow	0.0011	3.7175	-0.0214
Green	-0.1417	-1.4298	0.1549
Blue	-0.0855	-0.8613	0.0961
Gray	-28219.8	-0.1	1867.4
White	-0.0799	-0.1924	0.1233

表 2 遮盖力测试实验结果数据 (m^2/L)

Methods	Yellow	Green	Blue	Gray	White
DIN	5.50	14.09	16.23	47.74	6.00
New method	6.07	13.40	14.38	44.15	6.01
ASTM	5.85	13.00	13.94	56.67	5.69
SPEV	4.47	13.42	14.29	44.19	6.24

由实验结果可知, 本文方法的测试结果与 DIN 参照值相比, 对于黄、绿、蓝、灰和白色漆的相对误差分别为 10%、5%、11%、8% 和 0.1%, 除了黄

色漆的结果稍劣于 ASTM 方法(9%)之外,对其他色漆的测试精度均高于 ASTM 和 SPEV 方法,验证了该方法的可行性和有效性。本文方法对于黄色漆的测试精度相对偏低主要是由于其遮盖厚度(约 182 μm)明显大于实验所用最大涂膜厚度(159.83 μm)而使预测误差较大所致。ASTM 方法只考虑了涂料的明度因素,所以相对于其他利用色差计算的方法其误差偏大。同时,若能改进实验条件,使实际得到的膜层厚度与遮盖厚度更加接近,则可进一步提高本方法的预期测试精度。另一方面,实验发现,可将本方法采用的 10 个灰阶对减少到 5 个甚至更少,其测试精度虽有所下降,但仍能获得与其他方法相近的结果。

4 结 论

提出了一种采用 10 个灰阶对为基底并基于 CIELAB 色差的涂料遮盖力测量新方法,以提高测试效率并扩展适用范围。通过对不同厚度或不同浓度涂膜样本的先验测试分析可知,涂膜前后样本的色差存在近似对数函数关系且曲线的倾斜度随涂料颜色的加深而趋于水平,从而基于唯象理论建立了模拟遮盖过程的数学模型。经与几种已有方法的实验比较表明,新方法的评估过程快捷,具有更高的精度,CIELAB 色差评估和数学模拟方法的应用使新方法可同时适用于彩色涂料和非彩色涂料的测试。

参 考 文 献

1 Zheng Sunxin. Science and technology foundation of pigments and painting [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007, 84~95
郑顺兴. 涂料与涂装科学技术基础[M]. 北京:化学工业出版社, 2007, 84~95

2 H. G. Volz. Industrial Color Testing: Fundamentals and Techniques [M]. Weinheim: VCH, 1995, 67~107
3 P. Kubelka, F. Munk. An article on optics of paint layers [J]. *Z. Tech. Phys.*, 1931, **12**, 593~601
4 M. Cremer. Evaluation of hiding power of organic coatings-measurement, methods and their limitations [J]. *Progress in Organic Coatings*, 1981, **9**(3): 241~279
5 R. McDonald. Colour physics for industry [M]. Bradford: Society of Dyers and Colourists on behalf of the Dyers' Company Publications Trust, 1987, 299~304
6 E. L. Cairns. Measuring hiding power of colored paint [J]. *Journal of Paint Technology*, 1972, **44**(572): 76~83
7 Wu Xuan. Review of hiding power of paint and its measuring methods [J]. *Pigment Industry*, 2002, **32**(1): 38~41
吴 璇. 色漆的遮盖力及其测试方法述评[J]. 涂料工业, 2002, **32**(1): 38~41
8 Zeng Hua, Bai Fengxiang, Liao Ningfang *et al.*. A new effective method for getting absorption and scattering coefficients of dyestuffs [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(7): 978~981
曾 华, 白凤翔, 廖宁放 等. 一种有效获取染料光吸收和散射系数的新方法[J]. 光学学报, 1996, **16**(7): 978~981
9 Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Theoretical analysis and numerical calculation of transmitted light intensity of light scattering from nano-particle random scatterers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 951~956
叶云霞, 范滇元. 光通过纳米颗粒随机散射体透射光强的计算及分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 951~956
10 Wang Zhehong, Xu Haisong. Study of color discrimination threshold using CRT display, part II: evaluation of classical color-difference formulae [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1344~1348
汪哲弘, 徐海松. 用阴极射线管显示器研究辨色阈值 II: 典型色差公式评价[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1344~1348
11 ASTM. Standard test method for hiding power of paints by reflectometry, ASTM D2805 [S]. West Conshohocken: ASTM international, 1996
12 H. G. Volz. The principle of spectral evaluation in pigment testing. A review of 20 years' application of a successful method [J]. *Progress in Organic Coatings*, 1987, **15**(2): 99~124
13 Wang Yong, Xu Haisong. Colorimetric characterization for scanner based on polynomial regression models [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1135~1138
王 勇, 徐海松. 基于多项式回归模型的扫描仪色度特征化[J]. 光学学报, 2007, **27**(6): 1135~1138