

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201704104



黑色色精与白色涂料质量配比 对涂层表面光反射率的影响

冉茂宇

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 首先,在水溶性白色涂料中混合不同质量比的黑色色精,形成几种混合涂浆,将混合涂浆均匀地涂在纸板上,并自然干燥,得到不同灰度的表面涂层试样.其次,通过一种称为圆盘-亮度的方法测量并计算每个试验样品的光反射率,并验证圆盘-亮度方法测量涂层表面光反射率的有效性.最后,根据 Kubelka-Munk 散射和 Lambert-Beer 定律,推导出涂层表面光反射率的计算关系模型,并根据该模型进行实测数据拟合.结果表明:涂层表面的光反射率计算模型可以很好地用于拟合实测数据;提出的计算模型或经验公式可用于指导白色涂料与黑色色精混合配制,获得所需的表面光反射率涂层.

关键词: 白色涂料; 黑色色精; 质量配比; 涂层表面; 光反射率

中图分类号: TU 113.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)06-0806-05

Influence of Weight Ratio of Black Colorant to White Paint on Light Reflectivity of Coated Surface

RAN Maoyu

(School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The black colorant was mixed within a water soluble white paint by different weight ratio to form several mixtures; the mixtures were coated on cardboard and naturally dried to produce test samples. The light reflectivity of each test sample was measured and calculated by the disc-luminance method, validity of disc-luminance method was also verified by comparing the measured results of same sample in different conditions. Based on the Kubelka-Munk scattering and the Lambert-Beer law, the calculation model of the light reflectivity of coated surface was deduced, and the measured data was fitted by this model. It is shown that the calculation model of light reflectivity for coated surface can be well used for the fitting the measured data; the calculation model or empirical formula presented in this paper can be used to guide the mixing of black colorant within white paint to obtain the coating with desired surface light reflectivity.

Keywords: white paint; black colorant; weight ratio; coated surface; light reflectivity

涂料被广泛用于建筑室内外粉刷和各种物件表面漆涂,既可以起到保护物件的作用,又可以形成各种明暗色彩,满足人们视觉的需要.涂料按其是否含有颜料,可分为原色涂料和颜料涂料.原色涂料就是涂料自身色彩和明暗度能符合实际需要,使用时直接涂刷,涂刷表面呈现涂料固有色.颜料涂料是指使

收稿日期: 2017-04-03

通信作者: 冉茂宇(1967-),男,教授,博士,主要从事建筑室内外物理环境、建筑节能与建筑热工的研究. E-mail: 373664489@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51678254)

用时自身色彩不能满足人们预期,需要与某种颜料进行配比、混合、调色,再涂刷的涂料. 用于混合调色的颜料又称为色精或色浆. 目前,市场上的各种原色涂料和色精通过适当配比和调色能呈现任意色彩. 关于涂料着色力、遮盖力、混合配色等,前人已有不少研究^[1-3],但关于调色颜料与基准涂料对比对涂层表面光反射率的影响研究却甚少. 涂层表面的光反射率是指反射光通量与入射光通量之比值,它不仅影响建筑室内外光环境,同时,也影响建筑外表的保温隔热及室内照明节能. 在建筑室内外光环境中,表面光反射率太大,会引起人眼视觉不舒适,形成眩光;但表面光反射率太小,又会造成光环境暗淡,不利于人眼视觉识别^[3]. 在我国现行建筑采光与设计标准中,对室内顶棚、墙面、地面和工作面的光反射率值有范围规定^[4-5]. 因此,可以说涂层表面光反射率既与涂层的明暗表现有关,又与建筑照明节能及眩光控制有关. 研究涂层表面光反射率与颜料配比之间的关系,对于光环境创造、涂料壁画的绘制及展现,都有实际意义. 另外,在某些特殊场合,需要精确的光反射率分布以维持和创造特殊的光环境^[6]. 鉴于建筑环境中大量使用的是水溶性白色涂料,因此,本文只研究黑色色精与白色涂料对比对涂层表面光反射率的影响,得出涂料光反射率与色精配比的经验计算式.

1 试样制备与配比

1.1 原材料

从市场上购买鑫盾牌水溶性白色涂料一桶,杭州富龙马牌黑色色精一瓶. 首先,将白色涂料在桶中搅拌均匀,然后,用大烧杯拾取适量涂料液,遵照涂料用法说明,在大烧杯中加入适量水配成试验液. 最后,取适量试验液进行干燥前后称量,得到基料质量占 38.29%,水分质量占 61.71%. 用滴管在色精瓶中吸取色精液,滴 40 滴色精液入小烧杯中,得到的色精液质量位 0.937 g,经干燥称量,得色精物质质量为 0.206 g,故在色精液中色精质量占 21.99%,水分质量占 78.01%. 称量采用 TP-213 型电子天平,其测量范围为 0~210 g,精度为 1 mg.

1.2 试样制备

用小烧杯取质量近乎相等的试验液,加入不同质量的黑色色精,搅拌混合均匀得不同灰度的混合涂料液,如表 1 所示. 表 1 中: m_1 为基料液质量; m_2 为色精液质量; m_T 为基料液与色精液的总质量.

表 1 涂料液标记及其混合配比
Tab. 1 Label and weight ratio of mixture

标记号	m_1 /g	m_2 /g	m_T /g	色精		涂料		水分	
				m /g	质量比/%	m /g	质量比/%	m /g	质量比/%
1 #	39.760	0	39.760	0	0	15.244 1	38.290 0	24.535 9	61.710 0
2 #	39.761	0.023	39.784	0.005 1	0.012 7	15.224 5	38.267 9	24.554 5	61.719 4
3 #	39.795	0.094	39.889	0.020 7	0.051 8	15.237 5	38.199 8	24.630 8	61.748 4
4 #	39.735	0.200	39.935	0.044 0	0.110 1	15.214 5	38.098 2	24.676 5	61.791 6
5 #	39.775	0.281	40.056	0.061 8	0.154 3	15.229 8	38.021 4	24.764 4	61.824 3
6 #	39.781	0.375	40.156	0.082 5	0.205 4	15.232 1	37.932 4	24.841 4	61.862 2
7 #	39.781	0.562	40.343	0.123 6	0.306 3	15.232 1	37.756 6	24.987 3	61.937 1

将不同灰度的涂料液均匀涂刷于 1 mm 的硬纸板上,自然干燥后,得到 7 种不同的灰度纸板,用激光切割机将不同灰度纸板切割成直径为 15 cm 的圆盘. 由于试样干燥后水分几乎已经散失,涂层中色精与涂料质量分数可以通过表 1 中的数据计算得到,试样涂层中色精与涂料质量分数,如表 2 所示. 表 2 中: w 为质量分数; n 为色精与基料质量比.

表 2 试样涂层中色精与涂料质量分数
Tab. 2 Weight ratio of black colorant to white paint in coated surface

试样	1 #	2 #	3 #	4 #	5 #	6 #	7 #
$w(\text{色精})/\%$	0	0.033 2	0.135 5	0.288 2	0.404 1	0.538 5	0.804 8
$w(\text{基料})/\%$	100.000 0	99.966 8	99.864 5	99.711 8	99.595 9	99.461 5	99.195 2
n	0	3.321×10^{-4}	1.357×10^{-3}	2.890×10^{-3}	4.057×10^{-3}	5.414×10^{-3}	8.113×10^{-3}

2 光反射率测试及可信度验证

根据文献[7],漫反射表面亮度 L 与其所受到的照度 E_0 有关,其表达式为

$$L = \frac{E_0 \rho}{\pi} \tag{1}$$

式(1)中: L 为表面亮度, $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$; E_0 为表面所受到的照度, lx ; ρ 为表面光反射率. 由式(1)可知:只要测出表面亮度和入射照度即可计算表面光反射率. 表面亮度 L 可用亮度计检测,但由于亮度计检测表面亮度时,是置于所测表面前面,会对入射光产生影响,因此,直接用亮度计检测表面亮度会产生较大误差. 提出的圆盘-亮度法测量光反射率^[8]原理,如图 1 所示. 图 1 中: R 为漫反射光圆盘的半径; E_P 为轴心线上距盘面为 H 的 P 点的照度. 表面亮度 L 与 E_P 关系为

$$L = \frac{E_P}{\pi \sin^2 \alpha} \tag{2}$$

由式(2)可知:盘面在 P 点形成的照度 E_P 只与盘面亮度 L 和盘面在 P 点形成的锥角 α 有关. 由于 H 和 R 可以很准确测定,锥角 α 可通过 H 和 R 计算得到. 因此,只要测试出 P 点的照度 E_P ,就可按式(2)计算出盘面亮度 L . 用照度计同样可测出盘面的入射照度 E_0 ,盘面反光射系数 ρ 为

$$\rho = \frac{\pi L}{E_0} = \frac{E_P}{E_0 \sin^2 \alpha} \tag{3}$$

为了尽量消除外界光照度(亮度)对测试结果的影响,测试在长 \times 宽 \times 高为 $12.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$ 的房间中进行. 房间所有窗户为不透光窗帘遮挡,门上透明部分没有遮挡,有少量外界光进入房间内. 将试样盘固定在支架上并置于房间较暗处,将平行光源放置在试样盘斜对面,如图 2 所示.

对某种工况进行测试前,调整好各装置与测点相对位置. 首先,开启平行光源,调整支架高度及其与平行光源的距离,依据国家标准 GB/T 3978—1994《标准照明体及照明观察条件》,使平行光均匀斜向照射试样盘与盘面法线成 45° 夹角^[9]. 然后,调整照度计探头,使其在圆盘轴心线上并与盘面保持所需垂直距离 H 且不遮挡平行光,以提高测量精度. 多余的平行光从圆盘周围越过,很少再反射,从而最大限度降低反射光对测点照度的干扰.

调整好各装置与测点相对位置后,对某种工况进行正式测试时,先关掉平行光源,拿掉试样盘面,分别检测外界光进入房间在轴线测点和盘面中心处所形成的背景照度;再开启平行光源,待平行光照射稳定后测试盘面中心处入射照度 E_0 ;最后,将盘面按照原来的位置再次固定在支架上,测试其在轴线测点处形成的照度 E_P .

照度的测量采用 MINOLTA T-10M 型照度计,测量范围为 $0.01 \sim 299\,900.00 \text{ lx}$,精度为 $\pm 2\%$,探头直径为 12.5 mm . 垂直距离 H 测量采用的激光测距仪为 TM30,其测量范围为 $0.1 \sim 30.0 \text{ m}$,精度为 $\pm 1.5 \text{ mm}$. 每种工况的照度测量与垂直距离确定采用 3 次测量取值算术平均.

对于同一试样盘面,只要调整垂直距离 H 进行两次测量,就可验证上述原理与方法的正确性. 因为,对于同一试样盘面,距离 H 变化引起角 α 变化,也引起照度 E_P 的变化,但通过式(3)计算的盘面光反射率应为定值.

对各测点背景照度进行测试,其平均值为 10 lx ,相对误差不高于 2% . 对盘面中心位置处的入射照度 E_0 进行测试,减去背景照度后取平均值为 $E_0 = 5\,620 \text{ lx}$,其相对误差也不高于 2% . 对不同试样盘面在 $H = 36.3 \text{ cm} (\alpha = 11.674^\circ)$ 和 $H = 62.5 \text{ cm} (\alpha = 6.843^\circ)$ 下进行 P 点照度测试修正及亮度计算,结果如表 3 所示. 表 3 中: σ_ρ 是两种情况下测算光反射率值 ρ 相对于平均值 $\bar{\rho}$ 的相对误差. 由表 3 可知: σ_ρ 最大值仅为 $\pm 1.05\%$,说明测试原理与方法具有相当的可靠性和准确性.

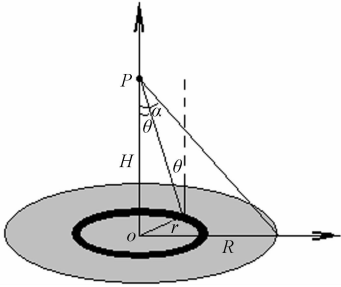


图 1 散射表面光反射率测试原理
Fig. 1 Test theory of scattering light reflectivity of surface



图 2 实际测试布置与方法
Fig. 2 Layout and method of measurement in practice

表 3 试样光反射率测试结果及验证

Tab. 3 Measured result of light reflectivity of different samples and verification of test method

序号	$H=36.3\text{ cm }(\alpha=11.674^\circ)$		$H=62.5\text{ cm }(\alpha=6.843^\circ)$		$\bar{\rho}$	σ_{ρ}
	E_p/lx	ρ	E_p/lx	ρ		
1#	229.93	0.999 3	78.07	0.978 5	0.988 9	± 1.05
2#	181.63	0.789 4	61.93	0.776 3	0.782 9	± 0.84
3#	146.03	0.634 7	49.67	0.622 6	0.628 7	± 0.96
4#	110.27	0.479 3	38.10	0.477 6	0.478 5	± 0.18
5#	101.30	0.440 3	35.17	0.440 8	0.440 6	± 0.06
6#	83.13	0.361 3	28.97	0.363 1	0.362 2	± 0.25
7#	71.07	0.308 9	25.06	0.314 1	0.311 5	± 0.84

3 涂层表面光反射率的计算模型

Kubelka-Munk 散射模型,如图 3 所示.图 3 中: I 和 J 分别是 X 处薄层 dX 上下界面进入的光辐射量; I_{S1} 和 J_{S1} 分别是 I 和 J 的向前散射量; I_{S2} 和 J_{S2} 分别是 I 和 J 的向后散射量; I_a 和 J_a 分别是 I 和 J 在 dX 中的被吸收量.涂层视为厚度为 X 的宽阔半透明体,其由粒径远小于 X 的黑色颗粒和白色颗粒构成.黑色颗粒对光主要起吸收作用,白色颗粒对光主要起散射作用.由于颗粒分散的均匀性,在半透明体内部任意处任何方向上光的吸收系数 K 和散射系数 S 不变.

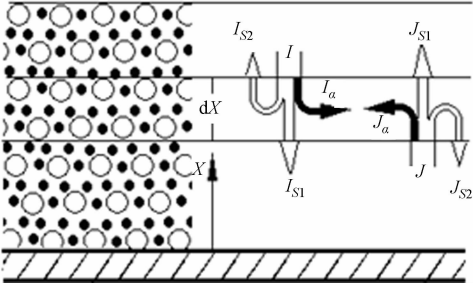


图 3 Kubelka-Munk 散射模型
Fig. 3 Kubelka-Munk scattering model

根据 Kubelka-Munk 散射理论,在半透明体内部任意平行于表面的界面,同时,有光的向下和向上传播.任意界面处向上的光传播量与向下的光传播量之比值定义为界面的光反射率,它与吸收系数 K 、散射系数 S 、距离 x 有关.当涂层厚度 X 足够厚时,底层基材的反射效应消失,涂层表面的光反射率 ρ 只取决于 K 和 $S^{[10]}$, ρ 表示为

$$\rho = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\left(\frac{K}{S} + 2\right) \frac{K}{S}}. \tag{4}$$

设黑色颗粒与白色颗粒的真实重度分别为 γ_b 和 γ_w ,它们所占体积分别为 V_b 和 V_w ,记总体积为 V ,则黑色颗粒与白色颗粒的体积浓度分别为

$$C_b = V_b/V, \quad C_w = V_w/V.$$

涂层中黑色色精与白色基料的质量配比与其体积浓度比值之间的关系为

$$n = \frac{V_b \gamma_b}{V_w \gamma_w} = \frac{\gamma_b C_b}{\gamma_w C_w}. \tag{5}$$

由于 γ_b 和 γ_w 为定值,式(5)表明涂层中黑色颗粒与白色颗粒的质量配比与两种颗粒的体积浓度成正比.令 $k_1 = \gamma_w/\gamma_b$,式(5)可以改写为

$$\frac{C_b}{C_w} = k_1 n. \tag{6}$$

将涂层视为黑色颗粒与白色颗粒的分散体系,根据 Lambert-Beer 定律,分散体系中溶质对光的吸收与溶质的体积浓度成正比,故涂层中黑色颗粒的吸收系数 $K \propto C_b$;同样,假设分散体系中溶质对光的散射系数与溶质的体积浓度成正比,故涂层中白色颗粒的散射系数 $S \propto C_w$,由此表示出 K/S 与 C_b/C_w , n 之间的关系,即

$$\frac{K}{S} = k_2 \frac{C_b}{C_w} = k_3 n. \tag{7}$$

式(7)中: k_2, k_3 为比例常数.将式(7)代入式(4),得到涂层表面光反射率与质量配比之间的关系模型为

$$\rho = 1 + an - \sqrt{(b + cn)n}. \tag{8}$$

式(8)中: a, b, c 为常数.用式(8)回归实验数据,验证这种关系模型的正确性.

4 实验数据拟合与经验计算公式

将表 3 测算的光反射率平均值 $\bar{\rho}$ 与表 2 的色精与涂料质量配比 w 用式(8)拟合,拟合结果如图 4 所示.由图 4 可知:实验数据用式(8)拟合相当妥帖,相关系数达到 0.998 873.将回归常数 $a=55.151, b=153.43, c=798.86$ 代入式(8),涂层表面光反射率经验计算式为

$$\rho = 1 + 55.15n - \sqrt{(153.43 + 798.86n)n}. \quad (9)$$

经验计算,式(9)能为不同光反射率的表面涂料配制提供方便.

5 结论

- 1) 利用圆盘-亮度法测量扩散表面光反射率具有相当好的准确性和可信度.
- 2) 基于 Kubelka-Munk 散射和 Lambert-Beer 定律,推导出的涂层表面光反射率与黑色色精质量配比的关系,能够很好地拟合实测数据.
- 3) 提出的计算模型或经验公式可用于指导白色涂料与黑色色精混合配制,获得所需的表面光反射率涂层.

参考文献:

[1] 孙道兴,魏燕彦. 涂料调制与配色技术[M]. 北京:中国纺织出版社,2008:56-74.

[2] 吴飞,江振经. 一种迷彩涂料配色方法的研究[J]. 现代涂料与涂装,2011,14(5):1-4.

[3] 华南理工大学. 建筑物理[M]. 广州:华南理工大学出版社,2008:310-311.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中国建筑科学研究院. 建筑采光设计标准: GB 50033—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:15-20.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中国建筑科学研究院. 建筑照明设计标准: GB 50034—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013:15-16.

[6] 冉茂宇,常志刚,杨若菡. 新型人工天空半球内表面亮度分布的理论[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2002,23(3): 272-277. DOI:10.3969/j.issn.1000-5013.2002.03.012.

[7] 西安冶金建筑学院. 建筑物理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1987:126-128.

[8] 冉茂宇,赵红利. 扩散材料光反射系数简易测试新原理及方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2013,34(1):96-99. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2013.01.0096.

[9] 国家技术监督局,中国计量科学研究院. 标准照明体及照明观测条件: GB/T 3978—1994[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1994:2-3.

[10] KUBELKA P,MUNK F. Ein beitrage zur potic der Farbanstrich[J]. Thech Physik,1931(12):593.

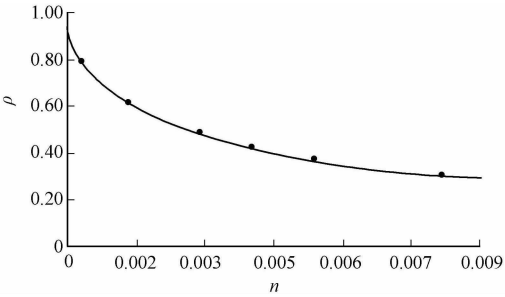


图 4 色精与涂料质量配比与涂层外表光反射率关系

Fig. 4 Relationship between weight ratio and light reflectivity of coated surface

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)