

# 云母氧化铁的表面颜色差异识别研究

贺琦君<sup>1</sup>, 张海滨<sup>2</sup>, 陈蓉<sup>3</sup>, 魏进财<sup>4</sup>, 张翼<sup>1\*</sup>

(1.武汉工程大学资源与安全工程学院, 武汉 430074; 2.浙江瑞成新材料股份有限公司, 浙江 温州 325401;

3.武汉产品质量监督检验所, 武汉 430048; 4.格尔木藏格钾肥有限公司, 青海 格尔木 816000)

**摘要:** 云母氧化铁颜料的表面颜色差异研究旨在解决传统测色方法在珠光颜料颜色识别准确上的不稳定。本研究采用 CCD 传感器颜色识别系统, 并结合平顶光源, 对不同颜色校正算法进行比较, 最终选择动态阈值白平衡算法模型, 以实现云母氧化铁颜色的精准识别。通过对比分光光度计与 CCD 传感器颜色识别系统的颜色识别效果, 结果表明: CCD 传感器颜色识别系统具有明显的优势, 并且显著提升了传统颜色测量方法在色差值计算方面的稳定性和准确性。

**关键词:** 云母氧化铁; 分光光度计; CCD 传感器; 色差

中图分类号: TQ633 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)02-0015-04

## Research on Surface Color Difference Identification of Mica-Based Iron Oxide

HE Qi-jun<sup>1</sup>, ZHANG Hai-bin<sup>2</sup>, CHEN Rong<sup>3</sup>, WEI Jin-cai<sup>4</sup>, ZHANG Yi<sup>1\*</sup>

(1. Wuhan Institute of Technology, School of Resources and Safety Engineering, Wuhan 430074, China;

2. Zhejiang Ruicheng New Material Co., Ltd., Wenzhou 325401, Zhejiang, China; 3. Wuhan Product Quality Supervision and Inspection Institute, Wuhan 430048, China; 4. Golmud Zangge Potash Fertilizer Co., Ltd., Golmud 816000, Qinghai, China)

**Abstract:** The research on the surface color difference of mica iron oxide pigments aims to address the instability of traditional color measurement methods in accurately identifying the colors of pearlescent pigments. This study utilized a CCD sensor color recognition system in conjunction with a flat-top light source to compare different color correction algorithms. Ultimately, the dynamic threshold white balance algorithm model was chosen to achieve precise identification of mica iron oxide colors. By comparing the color recognition performance of spectrophotometers and CCD sensor color recognition systems, the experimental results demonstrated that the CCD sensor color recognition system has significant advantages and notably improves the stability and accuracy of traditional color measurement methods in color difference calculations.

**Key words:** mica iron oxide; spectrophotometer; CCD sensor; color difference

## 0 引言

云母氧化铁是一种物理性防锈颜料, 其主要成分是三氧化二铁, 其片状结构类似于天然云母, 这些片状

结构的形成使得光线穿过颜料时会发生干涉和散射现象。当光线与颜料表面相互作用时, 一部分赋予了云母珠光颜料独特的视觉效果, 使其呈现出闪耀的光泽和变幻多样的色彩, 基于这一显色原理, 云母氧化铁被广泛应用于多个领域。

测色对确保产品色彩一致性和质量至关重要, 尤其在化妆品、塑料制品和涂料等领域。通过测色分析, 可确定云母氧化铁的色差和色度值, 以控制产品色彩一致性, 满足市场需求。然而, 云母氧化铁的片状结构和干涉散射效应使颜色随观察角度和光照条件变化,

收稿日期: 2024-04-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 51974205; 云南省磷资源技术创新中心项目 202305AK340002-4。

作者简介: 贺琦君(1998—), 女, 硕士, 主要从事矿物加工智能化研究。E-mail: 1607599940@qq.com。

\*通信作者: 张翼, 男, 博士, 教授。E-mail: 21601334@qq.com。

传统颜色测量方法难以准确描述。

本研究通过采用分光光度计和 CCD 传感器结合平行光源的图像测色设备两种测量方式,对云母氧化铁进行色差和色度值的分析,旨在为珠光颜料测色系统的研究提供基础数据和理论支持。

## 1 设备选择与试验设计

### 1.1 设备选择

本研究的目的是对比两种不同的测量设备在云母氧化铁颜色识别上的表现。一种设备是传统的分光光度计 LS176,另一种是新型的 CCD 传感器搭配平顶光源的测色设备。对每种设备都进行详细的设置和校准,同时采取多次测色的方法,对每次测量的结果取平均值,以确保数据采集的准确性和可靠性。

### 1.2 样品制备

使用精度为 0.000 1 g 的分析天平称量 0.25 g 云母氧化铁粉,并加入 4.75 g 树脂,进行充分搅拌混合;将搅拌后的云母粉适量滴于黑白遮盖力卡纸上,利用间隙深度为 100 μm 的涂膜器将云母粉匀速往后拉,形成可供测色的样品卡纸。

## 2 颜色数据采集与分析

颜色数据采集在颜色研究和应用中扮演着重要角色。通过准确获取云母氧化铁的颜色数值特征,可以为后续的颜色分析、配色等提供可靠的数据支持。国际照明委员会(CIE)在 1976 年推荐的 Lab 色度系统是一种广泛应用的色度空间模型,它与具体的设备无关,可以用来描述任何颜色。其中 L 值表示色度轴上的亮度,a 和 b 值则表示在红-绿和黄-蓝两个色度方向上的色差。

为了量化基准色与测色样之间的色差,依据 GB/T 11186.4—2014 《电子成像设备数字测量方法 第 4 部分:色度》<sup>[4]</sup>,采用了 CIE 1976 规定的色差计算方法,计算公式如下:  $\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$ 。当  $\Delta E$  在 0~0.25 之间时,我们称之为理想匹配,表示颜色非常接近,肉眼几乎无法察觉到差异;当  $\Delta E$  在 0.25~0.50 之间时,仍可接受这种匹配,表示颜色差异较小;当  $\Delta E$  在 0.5~1.5 之间时,颜色差异已经变得较为明显;但当  $\Delta E$  超过 1.5 时,肉眼就能明显察觉到色彩的不匹配。

### 2.1 基于分光光度计的颜色数据采集

使用 LS176 分光光度计进行测量,分光光度计工作原理见图 1,其测色原理是可见光谱域逐点测量,即在一些离散点上测量,通常每隔 10 或 20 nm 测量一个点,在 400~700 nm 的范围内测量 16~31 个点,主要涉及到光的反射和透射。具体公式如下:反射率  $(R) = \text{反射强光}(I_1) / \text{入射光强}(I_0)$ ,透射率  $(T) = \text{透射强}$

光( $I_2$ )/入射光强( $I_0$ )。

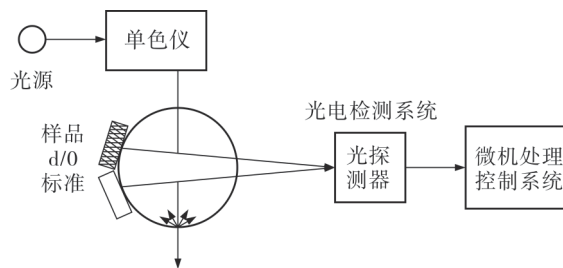


图 1 分光光度计工作原理

反射率( $R$ )是物体表面反射光强与入射光强之比,用于描述物体表面对光的反射能力。当光线照射到物体表面时,一部分光会被反射回来,这部分光的强度与入射光的强度之比即为反射率。

透射率( $T$ )是物体透射光强与入射光强之比,用于描述光线穿过物体的能力。当光线照射到透明或半透明物体时,一部分光会穿过物体,这部分光的强度与入射光的强度之比即为透射率。

分光光度计通过测量不同波长的反射率和透射率,可以绘制出分光曲线,从而确定物体的颜色及其变化。同时,根据观察方式的不同,分光测色计可以分为“0/45°”和“d/8°积分球”两种测量方式。其中,“0/45°”主要用于测量平滑物体表面的颜色,而“d/8°积分球”则可以测量物体表面的色差。对应的各个样品的试样颜色以及与标样的色差见表 1。

表 1 分光光度计测量数据结果

组号	基准色			测试色			$\Delta E$
	L	a	b	L	a	b	
1	59.58	2.00	23.02	60.34	1.48	23.22	0.94
2	61.60	1.88	23.76	60.52	2.00	23.37	1.15
3	59.40	1.78	22.77	60.52	2.00	23.37	1.19
4	61.19	2.64	23.69	59.87	1.96	22.79	1.74
5	61.25	2.05	23.45	60.76	2.07	23.22	0.54
6	61.53	1.89	23.57	60.75	1.98	24.02	0.90
7	60.86	2.31	23.26	59.84	1.36	23.66	1.45
8	60.06	2.40	22.87	59.22	1.82	23.02	1.03
9	59.89	2.00	22.57	59.97	2.26	23.38	0.85
10	59.47	1.71	22.65	60.49	2.29	23.64	1.58
11	60.26	1.92	23.32	59.75	2.11	22.64	0.87
...	...	...	...	...	...	...	...

### 2.2 基于 CCD 传感器的颜色数据采集

采用 CCD 传感器进行测量时,是通过捕捉物体

表面的像素点颜色来获取颜色信息。CCD 传感器是一种光电转换器件,可以将光信号转换为电信号。根据测量需求,工业相机会裁剪一个区域,该区域包含物体表面的像素点,见图 2。在该区域内,CCD 传感器对每个像素点的颜色进行测量。每个像素点的颜色值通常由红、绿、蓝 3 个通道的数值表示,即 RGB 值。这些 RGB 值反映了每个像素在红、绿、蓝 3 个光谱成分上的光强度。

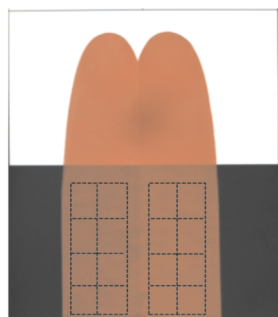


图 2 测量区域示意

CCD 传感器会将每个像素点的颜色信息从 RGB 色彩空间转换到 Lab 色彩空间。这个转换过程涉及使用颜色转换算法,通常基于国际标准 CIE 1931 XYZ 色彩空间模型。通过 RGB 到 XYZ 的转换,再进一步转换到 Lab 色彩空间,可以得到每个像素点在 Lab 空间中的颜色值。对应的各个样品的试样颜色以及与标样的色差见表 2。

表 2 平行光源下 CCD 传感器图像颜色测量数据

组号	基准色			测试色			$\Delta E$
	L	a	b	L	a	b	
1	68.60	4.93	37.97	68.84	4.31	37.91	0.76
2	70.68	5.21	38.63	69.24	4.42	37.92	1.82
3	69.59	5.35	38.41	70.33	4.24	38.30	1.43
4	71.23	5.39	39.00	68.97	4.36	37.56	2.91
5	69.80	5.20	38.33	70.41	4.54	39.11	1.20
6	68.83	5.33	38.10	69.23	4.86	38.79	1.00
7	68.72	5.41	37.78	68.81	5.26	37.72	0.91
8	70.01	5.09	37.22	67.11	5.02	37.41	3.14
9	69.80	5.20	38.33	69.97	5.32	39.25	1.74
10	70.07	5.29	38.52	69.82	5.21	39.05	0.61
11	68.50	5.03	37.48	69.27	5.03	38.67	1.43
...	...	...	...	...	...	...	...

### 2.3 颜色校正算法

在使用 CCD 传感器进行图像采集后,由于光源、

摄像头设置和环境等因素的影响,图像中的颜色信息可能会出现偏差,因此需要对图像进行颜色校正处理。颜色校正算法是一系列用于调整图像中颜色分布的技术,旨在消除或减小各种因素对图像颜色的影响,使之更接近物体真实的颜色表现。常见的算法包括灰度世界算法模型(根据图像平均颜色假设灰色)、完美反射算法模型(根据最亮点进行校正)以及动态阈值白平衡算法模型(根据动态阈值自适应调整白平衡)。

针对上文云母氧化铁系列颜料制备的样品卡纸,应用上述 3 种算法对图像进行颜色校正,然后与原样品卡纸图像进行对比。评估指标包括像素值差异(MSE)、结构相似性指数(SSIM)和颜色差异指数(CCI),结果见表 3。

表 3 图像白平衡校正算法比较

算法模型	MSE	SSIM	CCI	校正后图像效果
灰度世界算法	37.59	0.89	37.98	色彩还原度较高,但整体暗淡
完美反射算法	74.68	0.81	23.04	亮度较高,但色彩饱和度略低
动态阈值白平衡算法	24.85	0.96	15.98	白点校正准确,色彩自然

根据表 3 的数据对比,动态阈值白平衡算法在图像白平衡校正中表现卓越。在像素值差异(MSE)方面,该算法以 24.85 的极低值明显优于灰度世界算法的 37.59 和完美反射算法的 74.68,这显示了动态阈值白平衡算法在颜色校正时能够更精确地匹配原始图像的像素信息。在结构相似性指数(SSIM)上,动态阈值白平衡算法高达 0.96,远超过灰度世界算法的 0.89 和完美反射算法的 0.81,表明该算法在保持图像结构细节方面具有显著优势。此外,在颜色差异指数(CCI)上,动态阈值白平衡算法的 15.98 远低于其他两种算法,进一步证明了其在颜色校正方面的准确性和高效性。综上所述,动态阈值白平衡算法在图像白平衡校正上表现出色,能有效消除颜色偏差,保持图像色彩自然且准确,是图像白平衡校正的优选算法。

### 3 数据对比及分析

对表 1、表 2 的  $\Delta E$  值进行折线比较,见图 3。根据结果可知,表 2 的  $\Delta E$  普遍高于表 1。

根据表 4 中的 Shapiro-Wilk 正态性检验结果,表 1、表 2 的  $\Delta E$  值 p-value > 0.05,说明表 1 和表 2 的  $\Delta E$  值符合正态分布。

使用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较表 1 和表 2 的  $\Delta E$  值是否有显著差异,结果见表 5。根据表

5 可知,  $P$  值为 0.01,  $<0.05$ , 因此可以拒绝零假设, 即表 1 和表 2 的  $\Delta E$  值有显著差异。

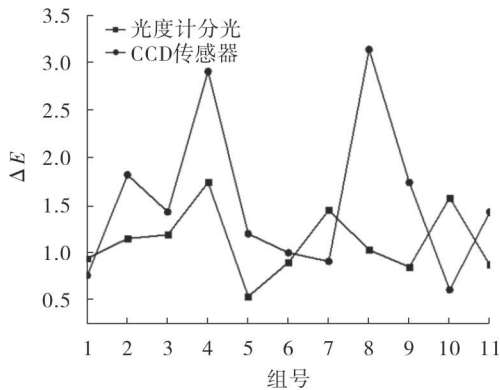


图 3 分光光度计和 CCD 传感器  $\Delta E$  对比

表 4  $\Delta E$  值正态性检验

表	W	p-value
1	0.92	0.24
2	0.91	0.30

表 5  $\Delta E$  值单因素方差分析表

项目	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
表 1-表 2	11	4.08	4.08	7.99	0.01
Residuals	19	10.30	0.54		

使用多重比较 (Tukey HSD) 方法进行分析, 结果见表 6。由表 6 可知, 表 1 和表 2 的  $\Delta E$  值的平均差异为 0.95, 置信区间为 [0.22, 1.67],  $P$  值为 0.01。从数据分析结果来看, CCD 传感器测得的试验数据在  $\Delta E$  值方面表现更好, 其颜色测量结果相对于分光光度计更为稳定和准确。

表 6  $\Delta E$  值多重比较分析结果

项目	Diff	Lower	Upper	p adj
表 1-表 2	0.95	0.22	1.67	0.01

#### 4 结语

综上所述, 可以得出结论:

1) 颜色校正算法: 在对比试验中, 动态阈值白平衡算法的 MSE (像素值差异)、SSIM (结构相似性指数) 和 CCI (颜色差异指数) 值分别为 24.85、0.96、15.98。动态阈值白平衡算法表现最佳, 能够准确消除颜色偏差。

2) 数据对比及分析: 通过对试验数据进行分析, 发现 CCD 传感器测得的试验数据在  $\Delta E$  值方面表现更好, 其颜色测量结果相对于分光光度计更为稳定和准确。

通过对比研究, 验证了不同颜色测量方法之间的差异, 可以为后续研究提供方向和指导, 促进建立统一的颜色测量标准, 从而推动不同颜色测量设备之间的互操作性和可比性, 进一步推动颜色测量技术的发展和應用。

#### 参考文献:

- [1] 熊燕英, 李秀敏, 费明, 等. 云母钛珠光颜料的研究进展[J]. 山东化工, 2023(19): 82-85.
- [2] 公绪平, 黄敏, 沈跃桐, 等. 光学变色油墨的颜色测量方法研究[J]. 光学学报, 2023(22): 188-195.
- [3] Commission Internationale de l'Eclairage(1976). Colorimetry: CIE 1976 Lab\* color space and its associated color differences [M]. Vienna: Central Bureau of the CIE.
- [4] 黄子昕, 张霞, 孙璐, 等. 分光光度计在全彩 3D 打印颜色测量中的应用研究[J]. 数字印刷, 2022(5): 16-25.
- [5] Trezona P W. Derivation of the 1964 CIE 10-degree XYZ colour-matching functions and their applicability in photometry[J]. Color Research and Application, 2001(1): 67-75.
- [6] 李瑞娟. RGB 到 CIE XYZ 色彩空间转换的研究[J]. 包装工程, 2009(3): 79-81.
- [7] Buchsbaum G.A spatial processor model for object colour perception[J]. Journal of the Franklin Institute, 1980(1): 1-26.
- [8] Barnard K, Cardei V, Funt B.A comparison of computational color constancy algorithms: methodology and experiments with synthesized data[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002(9): 972-984.
- [9] Lam E Y. Combining gray world and retinex theory for automatic white balance in digital photography [C]. IEEE Proceedings of the Ninth International Symposium on Consumer Electronics, Macau: IEEE, 2005: 134-139.
- [10] Gasparini F, Schettini R. Color balancing of digital photos using simple image statistics [J]. Journal of Pattern Recognition, 2004(6): 1201-1217.

