

结构色颜料的加色法制备及性能研究

李小婵*

(宁波融光纳米科技有限公司 宁波 315000)

Preparation and Properties of Structural Color Pigments by Additive Color Method

LI Xiaochan*

(Ningbo Inlight Technology Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract Structural color is achieved by exploiting the interference, diffraction, and scattering effects between incident light and micro-/nano-structures. Physical vapor deposition (PVD) process is one of the commonly used methods for realizing structural color pigments by breaking vacuum-deposited films into micro-scale flakes. Significant efforts are typically required when a new color is needed as new structural designs and retuning deposition tools are necessary. Inspired by the color blending techniques of traditional painting and drawing, the solution to the aforementioned problems of structural color is to mix different structural color pigments for various colors. Different from traditional chemical pigments or organic dyes, the structural color follows the additive color mixing principles as it generates colors in the reflective format. In this work, spectra and color properties of structural color pigments before and after color mixing were investigated. Measured spectra of mixed pigments are consistent with theoretical calculations, and L^* , a^* , b^* values are within the range of used basic pigments. The proposed mixing method of structural color here presents a more rapid and feasible way for the new color generation of structural color, which is of great help for improving the yield and reducing the cost when mass-producing.

Keywords Structural color, Physical vapor deposition process, Additive color, New color

摘要 结构色是利用入射光与微纳米结构之间产生干涉、衍射和散射效应来实现的。物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)工艺是制备结构色颜料的常用方法之一,通过将真空沉积的薄膜粉碎成微米尺度的薄片而获得结构色颜料。当出现新的颜色需求时,通常需要重新设计薄膜结构、优化工艺参数甚至制具等,工作量大、效率低。受到传统绘画调色的启发,解决结构色颜料上述问题的一种方法是将不同的结构色颜料进行混合,从而获得不同的颜色。与传统化学颜料或有机染料不同,结构色是以反射形式产生颜色,遵循加色法混合原则。文章研究了结构色颜料混合前后的光谱和颜色特性。混合型新颜料的光谱实测值与理论计算值一致, L^* 、 a^* 、 b^* 颜色特性值处于混合前各颜料对应的性能之间。文章提出的结构色颜料混合方法为结构色新颜色的开发提供了一种更快速且可行的方法,有利于大批量生产过程中提高良率和降低成本。

关键词 结构色 物理气相沉积工艺 加色法 新颜色

中图分类号:TB79

文献标识码:A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202407002

颜色,生活中随处可见,可分为化学色和结构色。化学色是由有机分子或离子等复杂的化合物等色素组成,其缺点是容易褪色。结构色是利用微纳米结构对入射光产生干涉、衍射、散射等物理作用,使物体对光进行选择反射或透射,从而呈现出不同的颜色^[1]。结构色在自然界中普遍存在,例

如蝴蝶翅膀。结构色具有饱和度高、闪烁度高、永不褪色、绿色环保等特点。结构色作为纳米科学领域研究和产业化的重点方向之一,在显示技术、光学器件、涂料、彩妆、防伪油墨、建筑装饰等工业领域^[2],都具有重要的应用。结构色的成色机理^[3-5]主要包括三类:第一类为薄膜干涉效应;法布里-珀罗

(F-P)腔^[6]、高低折射率交替的多层薄膜;第二类为衍射效应:其中最为典型是三维光子晶体^[7];第三类为散射效应:利用米氏散射效应,最为典型的是基于亚波长金属纳米结构的表面等离子激元共振效应产生的结构色。其中,薄膜干涉是自然界中最为常见实现结构色的途径。基于薄膜干涉效应的结构色是由多层薄膜堆积而成,结构简单,不需要高分辨图形加工,有利于大面积、大规模工业化生产。薄膜干涉型结构色包括 F-P 腔和高低折射率交替的多层薄膜结构。F-P 腔结构是由上表面和下表面的金属层以及中间的介质层组成;另一种利用多层膜结构是由高低折射率材料交替形成多层介质膜系^[8]。物理气象沉积技术(Physical Vapor Deposition, PVD)是制备干涉型结构色薄膜的常用工艺方法之一,包括电子束蒸发镀膜、磁控溅射镀膜、离子束辅助沉积等方式^[9-10]。PVD 工艺制备结构色颜料,包括多层光学薄膜结构设计、结构色薄膜镀膜、结构色薄膜洗膜、结构色薄膜粉碎、烘干等工艺步骤,从而形成平均粒径(D50)通常在 5–100 μm 的片状结构色颜料。

在大规模工业化生产中,一个结构色颜料新颜色的实现,通常需从理论结构设计开始,进行工艺抉择、试样探索、中试优化提升,当性能、良率、产能达到一定要求才能进入大规模生产阶段。对于新颜色的开发,全流程通常历时长、效率低、成本高、工作量大,并且还不一定能达到满意的效果。然而,在大规模的工业化应用中,对于新颜色及性能的需求,常常要求响应快、效率高、成本低。因此,探索一种能够快速实现结构色新颜色及性能的制备方式具有重要的意义。

在颜色叠加技术中,常用到加色法。加色法是指将颜色光的红、绿、蓝三原色按照不同比例相加而混合出其它色彩的方法。由两种或两种以上的色光相混合时,会同时或在极短时间内连续刺激人的视觉器官,使人产生一种新的色彩感觉。这种由两种以上色光相混合,呈现另一种色光的方法,称为色光加色法。林田田等^[11]、李月佳等^[12]将加色法应用于粒径在 200–320 nm 的球状 SiO_2 光子晶体这种衍射效应型结构色上,利用加色法原理将具有不同色相的纳米 SiO_2 悬浮液按照不同质量比混合,制备出了具有新色相的光子晶体结构色。本文基于加色法原理,将采用 PVD 工艺方式且已规模化生

产的红、绿、蓝等色相的微米级片状结构色颜料按照不同组合方式进行混合,研究混合前后结构色颜料的光学、颜色等性能,探索加色法在应用于微米级片状结构色颜料的可行性,尝试为丰富结构色颜料色系及功能提供一种快速且低成本的方法。

1 实验

1.1 实验原料和制备方法

采用 PVD 工艺方法制备的结构色颜料作为加色法实验颜料。PVD 工艺制备结构色颜料的具体方法如下。首先,通过 TFCalc 或 Essential Macleod 等膜系理论仿真设计结构色薄膜的结构,本文采用高折射率材料(TiO_2)和低折射率材料(SiO_2)的交替叠加形成多层薄膜,通过优化高、低折射率材料层的厚度及比例,形成符合目标颜色或性能的多层光学薄膜结构。采用电子束蒸发镀膜机制备结构色薄膜。具体的,将玻璃等刚性基体置于真空腔室中,在基体上镀制脱膜剂薄膜层、结构色薄膜层;镀膜完成后,将承载结构色多层膜的基体从真空腔室取出,采用溶剂将脱膜剂层溶化;然后将剥离后的结构色薄膜用超声机进行超声使结构色薄膜层粉碎,将结构色薄膜制成需要的颗粒尺寸;最后将其过滤,用烘箱 100 $^{\circ}\text{C}$ 烘干,从而获得片状形貌结构色颜料。

加色法制备结构色颜料的具体方法:将 PVD 工艺制备的不同型号的结构色颜料按照弱对比色相、强对比色相^[13]以及有彩度与无彩度^[14]组合的方式在搅拌机中进行混合、搅拌均匀,从而制备出新的混合型结构色颜料。加色法制备结构色的具体实验方案如表 1 所示:其中,组合方式 1 表示弱对比色相的组合,组合方式 2 表示强对比色相的组合,组合方式 3 表示有彩度与无彩度的组合。

1.2 性能测试与表征

采用 JHY5100-H 激光粒度仪测试结构色颜料的粒径。将表 1 中各混合前后的结构色颜料以 3% 质量掺比加入树脂体系中搅拌均匀;然后用线棒涂布试验机刮涂在黑色的色卡纸上,利用色卡上的黑色吸收透过结构色颜料的光,以形成色彩鲜明的结构色。将刮涂有结构色颜料的色卡,采用 Phenix 光学显微镜表征结构色颜料的形貌,采用柯尼卡美能达的 CM-26 dG 便携式分光测色计测试其反射光谱和在 D65 光源 10 $^{\circ}$ 视场下 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^* 及 h 值^[15],采用徕卡摄像头拍摄色卡照片。另外,对混合型颜料

表 1 加色法制备结构色颜料的实验方案

Tab. 1 Experimental scheme of preparation for structural color pigments by additive color method

Combination mode	Pigment name before mixing	Mass ratio	Pigment name after mixing
1	1# Emerald Green	1	Hybrid Green A
	2# Deep Green	1	
1	3# Sapphire Blue	2	Hybrid Blue A
	4# Bluish Violet	5	
1	1# Emerald Green	3	Hybrid Olivine A
	5# Champaign Gold	5	
2	1# Emerald Green	25	Hybrid Celeste A
	3# Sapphire Blue	8	
2	1# Emerald Green	5	Hybrid Olivine B
	6# Red	4	
2	3# Sapphire Blue	1	Hybrid Grayish Blue A
	5# Champaign Gold	1	
2	6# Red	1	Hybrid Purplish Red A
	4# Bluish Violet	2	
3	1# Emerald Green	15	Hybrid Grayish Green A
	8# Silvery Grey	16	
3	7# Purplish Red	2	Hybrid Grayish Purple A
	8# Silvery Grey	1	

的反射光谱进行理论计算,理论计算方法如下:混合组分中各颜料的质量占有所有混合组分总质量的比例与各颜料在对应波段下的反射率的乘积进行求和。

2 结果与讨论

2.1 结构色颜料的形貌与粒径分布

图 1 为光学显微镜拍摄的采用 PVD 工艺制备的结构色颜料形貌图,结构色颜料的形貌为片状。图 2 为采用 PVD 工艺制备的结构色颜料的粒径分布图,实验过程中选用的结构色颜料的粒径分布在 5–80 μm,平均粒径(D50,累积分布=50%)在 17–22 μm。将采用 PVD 工艺制备的不同型号的结构色颜料进行组合,调配出的混合型结构色颜料,其粒径分布处于混合前的各结构色颜料的粒径之间。

2.2 弱对比色相系列的组合及其光谱、颜色性能

图 3 为弱对比色相组合系列混合前后的反射率光谱图,其中混合前各结构色颜料及混合后获得的混合型新型号的色卡反射率光谱采用分光测色计测试,混合型新型号的理论计算反射率光谱采用 1.2 所述对应的方法计算。从图 3 可以看出,混合型

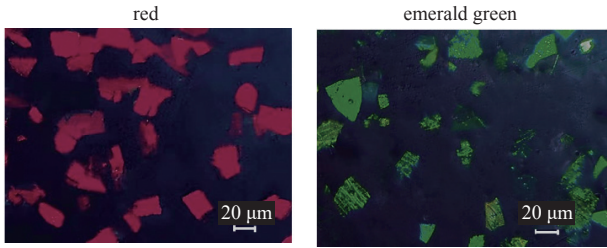


图1 光学显微镜拍摄的采用 PVD 工艺制备的结构色颜料形貌图(放大倍数 20×10)

Fig. 1 Morphology of structural color pigment prepared by PVD process captured by optical microscope (magnification 20×10)

新型号的色卡反射率光谱的测试结果与理论计算反射率光谱相比,波形基本一致,各波长下对应的实际与理论反射率数值间的偏差较小,(实际值–理论值)/理论值*100%≤10%。理论计算与实际结果基本吻合。因此,实验前可通过理论计算来优化配方,使理论配方的反射率光谱计算结果基本符合目标要求,理论预测配方的光谱性能,从而快速获得初始配方、减少实验次数。实验中若实际结果未达到目标要求,可根据已有实验结果及配方,再次进行理论优化,为下次实验提供更精准配方,提高效率。

图 4 为弱对比色相组合系列结构色颜料混合前后的色卡照片,可以观察到不同型号结构色颜料混合后产生了不同于混合前的新颜色。如表 2 所示,混合型新型号的 L^* 、 a^* 、 b^* 值处于混合前各颜色的对应性能之间,色相 h 不同于混合前各颜料色相 h 。

综上,采用同类色、邻近色等弱对比色相的结构色颜料进行组合,可以制备出新的颜色;而且可以通过 1.2 所述的理论计算反射率光谱的方法,理论计算新配方的反射率光谱,理论预测混合后新颜料的光谱性能,符合加色法原理,从而快速获得符合目标要求的配方、提高配色效率。

2.3 强对比色相系列的组合及其光谱、颜色性能

图 5 为强对比色相组合系列混合前后的反射率光谱图,其中混合前各结构色颜料及混合后获得的混合型新型号的色卡反射率光谱采用分光测色计测试,混合型新型号的理论计算反射率光谱采用 1.2 所述对应的方法计算。从图 5 可以看出,混合型新型号色卡反射率光谱的测试结果与理论计算反射率光谱相比,波形相近,各波长下对应的实际与理论反射率数值间的偏差较小,(实际值–理论值)/理论值*100%≤15%。理论计算与实际结果基本吻

合。因此,实验前可以通过理论计算来优化配方,使理论配方的反射率光谱计算结果基本符合目标要求,理论预测配方的光谱性能,从而快速获得初始配方、减少实验次数。实验过程中,若实际结果未达到目标要求,可以根据已有实验结果及配方,再次进行理论计算和优化,为下一次实验提供更精准的配方,从而提高配色效率。

图 6 为强对比色相组合系列结构色颜料混合前后的色卡照片,可以观察到不同型号结构色颜料混合后产生了不同于混合前的新颜色。如表 3 所示,混合型新型号的 L^* 、 a^* 、 b^* 值处于混合前各颜色对应性能之间,色相 h 不同于混合前各颜料的色相 h 。强对比色相组合系列与弱对比色相组合系列相比,不同之处在于,近距离(大概 2 m 距离内)观察时强

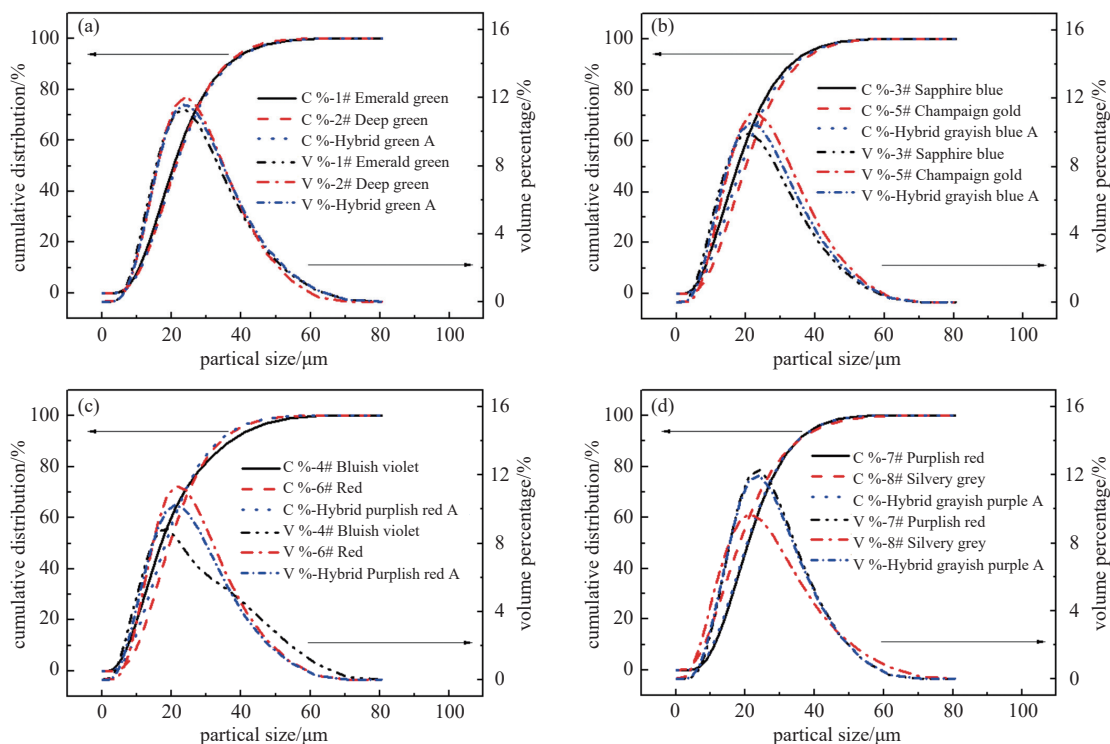
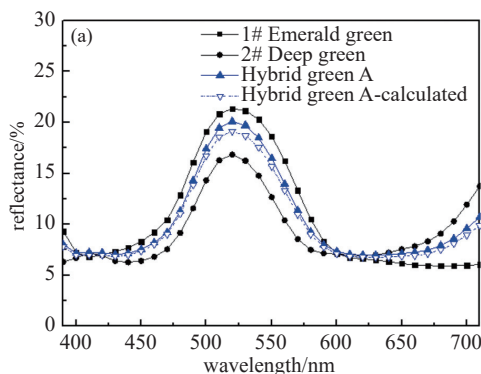


图2 采用 PVD 工艺制备的结构色颜料的粒径分布图。(a) 1# Emerald Green、2# Deep Green 及 Hybrid Green A 的粒径分布图, (b) 3# Sapphire Blue、5# Champaign Gold 及 Hybrid Grayish Blue A 的粒径分布图, (c) 4# Bluish Violet、6# Red 及 Hybrid Purplish Red A 的粒径分布图, (d) 7# Purplish Red、8# Silvery Grey 及 Hybrid Grayish Purple A 的粒径分布图

Fig. 2 Particle size distribution of structural color pigment prepared by PVD process. (a) Particle size distribution of 1# Emerald Green, 2# Deep Green and Hybrid Green A, (b) particle size distribution of 3# Sapphire Blue, 5# Champaign Gold and Hybrid Grayish Blue A, (c) particle size distribution of 4# Bluish Violet, 6# Red and Hybrid Purplish Red A, (d) particle size distribution of 7# Purplish Red, 8# Silvery Grey and Hybrid Grayish Purple A



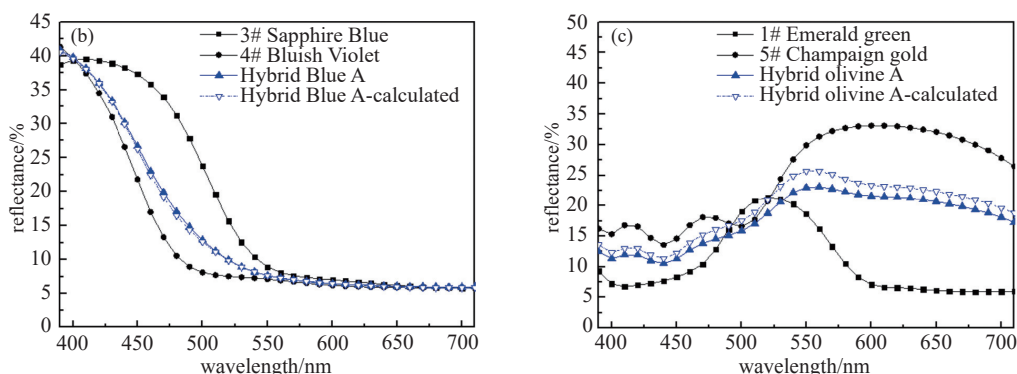


图3 弱对比色相组合系列混合前后的反射率光谱图。(a)1# Emerald Green、2# Deep Green 及 Hybrid Green A 的反射率光谱图, (b)3# Sapphire Blue、4# Bluish Violet 及 Hybrid Blue A 的反射率光谱图, (c)1# Emerald Green、5# Champaign Gold 及 Hybrid Olivine A 的反射率光谱图

Fig. 3 Weak contrast hue combination: reflectance spectra of color card coated with structural pigment before and after mixing. (a) Reflectance spectra of color card coated with 1# Emerald Green, 2# Deep Green and Hybrid Green A, (b) reflectance spectra of color card coated with 3# Sapphire Blue, 4# Bluish Violet and Hybrid Blue A, (c) reflectance spectra of color card coated with 1# Emerald Green and 5# Champaign Gold and Hybrid Olivine A

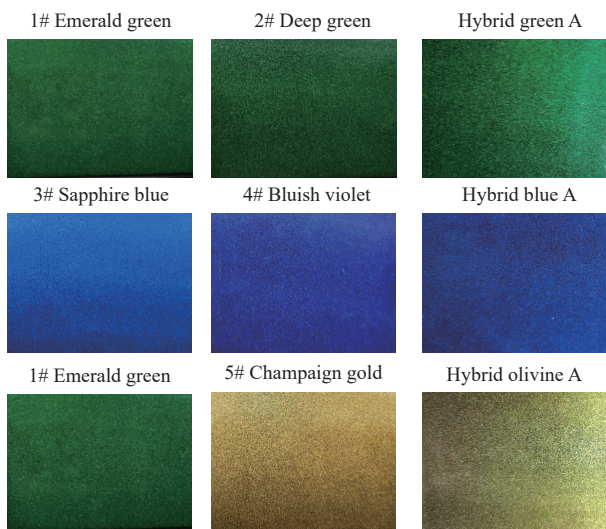


图4 弱对比色相组合系列混合前后的色卡照片

Fig. 4 Weak contrast hue combination: photograph of color card coated with structural pigment before and after mixing

对比色相组合系列能看到混合前各颜料颜色的杂点。这主要是因为采用 PVD 工艺制备的片状结构色颜料的平均粒径通常在几微米至数百微米, 相比于传统有机颜料这种纳米级别的颜料以及纳米级光子晶体来说, 其粒径相对较大, 所以当色相相差较大的强对比色相系列型号之间混合后, 虽然整体色相会呈现出一种新的颜色, 但由于混合前色相差较大且粒径相对较大, 故在近距离肉眼观察时能看到带有混合前各自颜料颜色的杂点。

综上, 采用色相差异较大的强对比色相的结构色颜料间进行组合, 可以制备出新的颜色; 而且可以通过 1.2 所述的理论计算反射率光谱的方法, 理论计算新配方的反射率光谱, 理论预测混合后新颜料的性能, 符合加色法原理, 从而快速获得符合目标要求的配方、提高配色效率。强对比色相组合系列间混合后虽然在肉眼近距离观察时能看到带有混合前各自颜料颜色的杂点, 但这取决于应用场景, 在很多应用领域例如建筑装饰、美妆等应用领域是可以接受这种情况的。

2.4 有彩度与无彩度系列的组合及光谱、颜色性能

图 7 为有彩度与无彩度组合系列混合前后的反射率光谱图, 其中混合前各结构色颜料及混合获得的混合型新型号的色卡反射率光谱采用分光测色计测试, 混合型新型号的理论计算反射率光谱采用 1.2 所述对应的方法计算。从图 7 可以看出, 混合型新型号的色卡反射率光谱的测试结果与理论计算反射率光谱相比, 波形基本一致, 各波长下对应的实际与理论反射率数值间的偏差很小, (实际值-理论值)/理论值*100%≤5%。理论计算与实际结果吻合。因此, 实验前可以通过理论计算来优化配方, 使理论配方的反射率光谱计算结果基本符合目标要求, 理论预测配方的光谱性能, 从而快速获得初始配方、减少实验次数。实验过程中, 若实际结果未达到目标要求, 可以根据已有实验结果及配方, 再次进行理论计算和优化, 为进行下一次实验提供

表 2 弱对比色相组合系列混合前后的颜色性能

Tab. 2 Weak contrast hue combination: color performance before and after mixing

Pigment name	$L^*(D65)$	$a^*(D65)$	$b^*(D65)$	$C^*(D65)$	$h^\circ(D65)$
1# Emerald Green	45.3	-30.0	14.6	33.4	154.0
2# Deep Green	39.8	-22.0	12.3	25.2	150.9
Hybrid Green A	43.5	-27.1	14.2	30.6	152.3
3# Sapphire Blue	42.6	2.5	-41.1	41.1	273.5
4# Bluish Violet	33.4	16.7	-34.5	38.3	295.8
Hybrid Blue A	36.5	11.7	-37.0	38.8	287.6
1# Emerald Green	45.3	-30.0	14.6	33.4	154.0
5# Champaign Gold	59.1	6.0	21.1	21.9	74.1
Hybrid Olivine A	52.3	-2.2	18.1	18.2	96.9

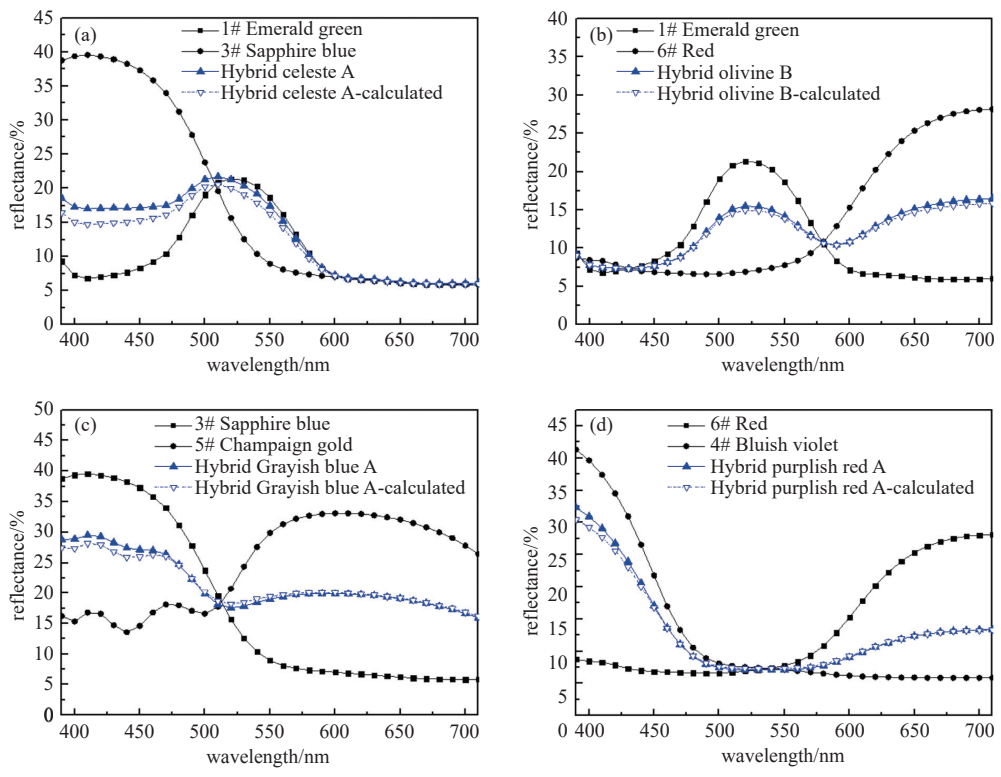


图5 强对比色相组合系列混合前后的反射率光谱图。(a)1# Emerald Green、3# Sapphire Blue 及 Hybrid Celeste A 的反射率光谱图, (b)1# Emerald Green、6# Red 及 Hybrid Olivine B 的反射率光谱图, (c)3# Sapphire Blue、5# Champaign Gold 及 Hybrid Grayish Blue A 的反射率光谱图, (d)4# Bluish Violet、6# Red 及 Hybrid Purplish Red A 的反射率光谱图

Fig. 5 Strong contrast hue combination: reflectance spectra of color card coated with structural pigment before and after mixing. (a) Reflectance spectra of color card coated with 1# Emerald Green, 3# Sapphire Blue and Hybrid Celeste A, (b) reflectance spectra of color card coated with 1# Emerald Green, 6# Red and Hybrid Olivine B, (c) reflectance spectra of color card coated with 3# Sapphire Blue, 5# Champaign Gold and Hybrid Grayish Blue A, (d) reflectance spectra of color card coated with 4# Bluish Violet, 6# Red and Hybrid Purplish Red A

更精准的配方,从而提高配色效率。

图 8 为有彩度与无彩度组合系列结构色颜料混合前后的色卡照片,可以观察到有彩度的 1#翠绿色、7#紫红色分别与无彩度 8#银灰色混合后产生了新颜色。如表 4 所示,混合型新型号的 L^* 、 a^* 、 b^* 值

处于混合前各颜色对应性能之间,色相 h 不同于混合前各颜料的色相 h 。通过高彩度颜料与无彩度颜料的混合,高彩度颜色的饱和度 C 得到降低。

综上,有彩度与无彩度的结构色颜料的组合,可以制备出新的颜色,高彩度颜料的饱和度 C 降低,

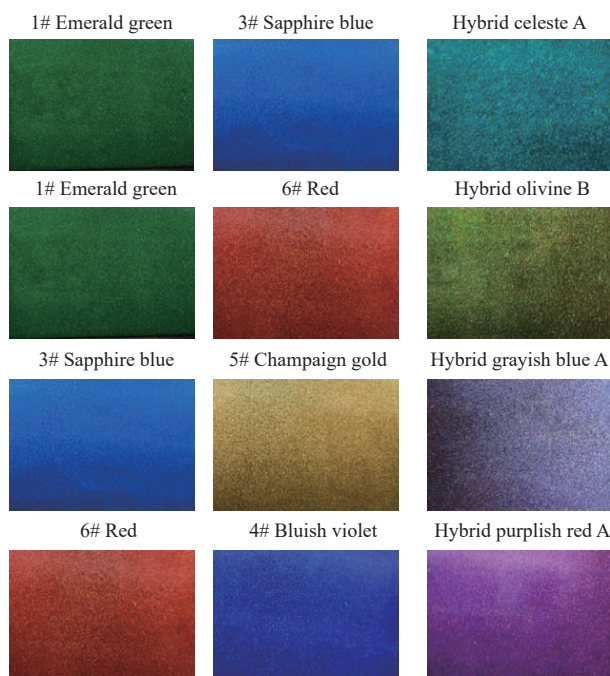


图6 强对比色相组合系列混合前后的色卡照片

Fig. 6 Strong contrast hue combination: photograph of color card coated with structural pigment before and after mixing

无彩度颜料的饱和度 C 提高; 而且可以通过 1.2 所述的理论计算反射率光谱的方法, 理论计算新配方的反射率光谱, 理论预测混合后新颜料的光谱性能, 符合加色法原理, 从而快速获得符合目标要求的配方、提高配色效率。

3 结论

本文采用 PVD 工艺制备了粒径为微米级的片状结构色颜料, 并基于加色法原理将该结构色颜料

表 3 强对比色相组合系列混合前后的颜色性能

Tab. 3 Strong contrast hue combination: color performance before and after mixing

Pigment name	$L^*(D65)$	$a^*(D65)$	$b^*(D65)$	$C^*(D65)$	$h^\circ(D65)$
1# Emerald Green	45.3	-30.0	14.6	33.4	154.0
3# Sapphire Blue	42.6	2.5	-41.1	41.1	273.5
Hybrid Celeste A	45.9	-21.8	-5.4	22.4	193.9
1# Emerald Green	45.3	-30.0	14.6	33.4	154.0
6# Red	38.0	19.9	10.6	22.6	28.1
Hybrid Olivine B	42.7	-9.0	13.6	16.3	123.7
3# Sapphire Blue	42.6	2.5	-41.1	41.1	273.5
5# Champaign Gold	59.1	6.0	21.1	21.9	74.1
Hybrid Grayish Blue A	51.5	6.1	-12.5	13.9	295.9
6# Red	38.0	19.9	10.6	22.6	28.1
4# Bluish Violet	33.4	16.7	-34.5	38.3	295.8
Hybrid Purplish Red A	34.7	18.9	-23.4	30.0	308.9

通过弱对比色相、强对比色相以及有彩度与无彩度组合的方式按照一定比例进行混合, 研究了混合前与混合后结构色颜料的光谱及颜色性能差异。结果显示: 混合型新型号的反射光谱实测值与理论计算波形相吻合; 混合型新型号的 L^* 、 a^* 、 b^* 值处于混合前各颜料对应的性能之间, 色相不同于混合前各颜料的色相。简而言之, 微米级片状结构色颜料可以基于加色法原理, 通过不同色相颜料进行组合的方式制备出新的颜色。利用加色法原理制备新的结构色颜料的过程简单高效, 这为采用 PVD 工艺制备的结构色颜料在丰富色系及功能的过程中更快响应、提高效率、降低成本、保证良率等提供了一种确实可行的方式。

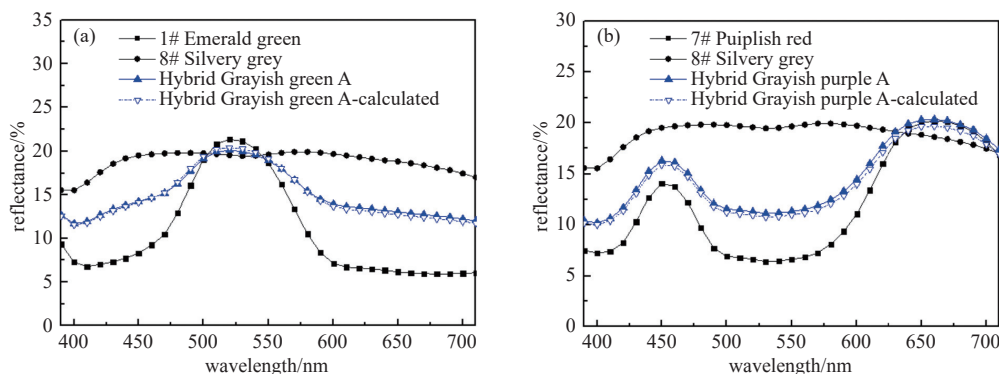


图7 有彩度与无彩度组合系列混合前后的反射率光谱图。(a) 1# Emerald Green、8# Silvery Grey 及 Hybrid Grayish Green A 的反射率光谱图, (b) 7# Purplish Red、8# Silvery Grey 及 Hybrid Grayish Purple A 的反射率光谱图

Fig. 7 Chrominance and non-chrominance combination: reflectance spectra of color card coated with structural pigment before and after mixing. (a) Reflectance spectra of color card coated with 1# Emerald Green, 8# Silvery Grey and Hybrid Grayish Green A, (b) reflectance spectra of color card coated with 7# Purplish Red, 8# Silvery Grey and Hybrid Grayish Purple A



图8 有彩度与无彩度组合系列混合前后的色卡照片

Fig. 8 Chrominance and non-chrominance combination: photograph of color card coated with structural pigment before and after mixing

表 4 有彩度与无彩度组合系列混合前后的颜色性能

Tab. 4 Chrominance and non-chrominance combination: color performance before and after mixing

Pigment name	$L^*(D65)$	$a^*(D65)$	$b^*(D65)$	$C^*(D65)$	$h^*(D65)$
1# Emerald Green	45.3	-30.0	14.6	33.4	154.0
8# Silvery Grey	51.4	-0.8	0.9	1.2	131.4
Hybrid Grayish Green A	48.5	-11.6	6.1	13.1	152.3
7# Purplish Red	35.6	19.0	-8.9	20.9	335.0
8# Silvery Grey	51.4	-0.8	0.9	1.2	131.4
Hybrid Grayish Purple A	42.5	10.3	-4.4	11.2	336.9

参 考 文 献

[1] Wang D Y, Liu Z Y, Wang H Z, et al. Structural color generation: from layered thin films to optical metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(6): 1019–1081

[2] Li Y J, Hu J T, Zeng Y X, et al. Recent progress on structural coloration[J]. *Photonics Insights*, 2024, 3(2): R03

[3] Yang Z M. The design, fabrication and application of nano color media based on F-P cavities[D]. Hunan University, 2017 (杨正美. 基于 FP 腔的纳米彩色介质: 设计、制作及应用 [D]. 湖南大学, 2017 (in Chinese))

[4] Yang Z M, Ji C G, Liu D, et al. Enhancing the purity of reflective structural colors with ultrathin bilayer media as effective ideal absorbers[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7: 1900739

[5] Xuan Z, Li J Y, Liu Q Q, et al. Artificial structural colors and applications[J]. *The Innovation*, 2021, 2: 100081

[6] Zhang Q, Wan X X, Xue Z S, et al. Effect of fill density on hue and saturation of asymmetric Fabry-Pérot nanocavities[J]. *Printing and Digital Media Technology Study*, 2023(6): 14–21,48 (章倩, 万晓霞, 薛智爽, 等. 填充密度对非对称 Fabry-Pérot 纳米腔结构色色相和饱和度的影响 [J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2023(6): 14–21,48 (in Chinese))

[7] Zuo L N, Peng Y, Guo H H, et al. Research progress of structural color construction based on multi-dimensional photonic crystals and amorphous photonic crystals[J]. *Advanced Textile Technology*, 2019, 27(6): 1–15 (左丽娜, 彭瑜, 郭贺虎, 等. 基于多维光子晶体及非晶光子晶体的结构色构筑研究进展 [J]. 现代纺织技术, 2019, 27(6): 1–15 (in Chinese))

[8] Wang D Y, Li M X, Lu R S, et al. Multilayer thin film based structural color filters: principle, fabrication, and applications[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2021, 50: 1287–1306 (王丹燕, 李墨馨, 陆如斯, 等. 多层膜结构色滤光片的原理、制备及应用 [J]. 人工晶体学报, 2021, 50: 1287–1306 (in Chinese))

[9] Perkins J, Cheng H Y, Craig C, et al. Color tunable, lithography-free refractory metal-oxide metacoatings with a graded refractive index profile[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(7): 2601–2606

[10] Vorobyova M, Biffoli F, Giurlani W, et al. PVD for decorative applications: a review[J]. *Materials*, 2023, 16(14): 4919

[11] Lin T T, Yang D, Gao W H, et al. Low angle-dependent structurally colored films over full visible spectrum[J]. *Journal of Textile Research*, 2022, 43(2): 149–155 (林田田, 杨丹, 高伟洪, 等. 具有低角度依赖性的全可见光谱结构色薄膜的制备 [J]. 纺织学报, 2022, 43(2): 149–155 (in Chinese))

[12] Li Y J, Gao W H, Yang S, et al. Preparation and optical properties of full spectrum SiO₂ structure color films by additive color method[J]. *Journal of Textile Research*, 2023, 44(2): 168–175 (李月佳, 高伟洪, 杨树, 等. 全光谱 SiO₂ 结构色薄膜的加色法制备及其光学性能 [J]. 纺织学报, 2023, 44(2): 168–175 (in Chinese))

[13] Guo S R. Research on the geometric color matching method based on the 24-color-wheel[J]. *Journal of JingDeZhen University*, 2022, 37(6): 36–39 (郭素蓉. 基于 24 色相环的几何配色法研究 [J]. 景德镇学院学报, 2022, 37(6): 36–39 (in Chinese))

[14] Liu R L. New color difference evaluation method for vehicle effect coating researching[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2013, 43(6): 57–62 (刘仁龙. 新型汽车效果涂料色差评估方法的探讨 [J]. 涂料工业, 2013, 43(6): 57–62 (in Chinese))

[15] Li Y, Huang M, Wang Y, et al. Performance of CIE color matching functions tested by metamerism reflected samples[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(5): 244–251 (李钰, 黄敏, 王宇, 等. 用异谱反射色检验 CIE 颜色匹配函数的表现 [J]. 光学学报, 2022, 42(5): 244–251 (in Chinese))