

# 纳米色浆的制备及其应用研究进展

郭政叙\*, 王光硕, 张家宁#

河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2025年9月8日; 录用日期: 2025年9月30日; 发布日期: 2025年10月15日

## 摘要

纳米色浆是指由纳米级颗粒(通常直径在1到100 nm之间)组成的色浆, 这些颗粒能够有效地散射和吸收光, 从而赋予材料独特的颜色和光学性能。与传统色浆相比, 纳米色浆具有更高的色彩鲜艳度、优异分散性和稳定性。由于其较小的颗粒尺寸, 纳米色浆可以在多种基材中均匀分散, 广泛应用于涂料、油墨、塑料、纺织品和电子产品等领域, 提升了产品的视觉效果和功能性。本文主要综述了纳米色浆的制备方法, 包括化学沉淀法、溶胶-凝胶法、微乳液法及机械研磨法, 探讨了其粒径、形貌及表面改性对性能的影响。最后, 本文进一步分析了纳米色浆在色彩表现、耐光性、导电性及环保性能方面的应用前景, 为相关领域的深入研究提供参考。

## 关键词

纳米色浆, 制备工艺, 应用, 分散性

# Research Progress on the Preparation and Application of Nano Pigment Paste

Zhengxu Guo\*, Guangshuo Wang, Jianing Zhang#

School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: September 8, 2025; accepted: September 30, 2025; published: October 15, 2025

## Abstract

Nano pigment paste refers to a colorant composed of nanoparticles (typically 1~100 nm in diameter) that efficiently scatter and absorb light, thereby endowing materials with unique color and optical properties. Compared to conventional pigment pastes, nano pigment pastes exhibit higher

\*第一作者。

#通讯作者。

color brilliance, superior dispersibility, and enhanced stability. Owing to their small particle size, they can be uniformly dispersed in various substrates and are widely used in coatings, inks, plastics, textiles, and electronic products, improving both visual appeal and functionality. This review focuses on the preparation methods of nano pigment pastes, including chemical precipitation, sol-gel, microemulsion, and mechanical grinding techniques, and discusses the influence of particle size, morphology, and surface modification on their performance. Furthermore, it analyzes the application prospects of nano pigment pastes in terms of color performance, lightfastness, conductivity, and environmental sustainability, providing valuable insights for further research in related fields.

## Keywords

Nano Pigment Paste, Preparation Technology, Application, Dispersibility

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

纳米色浆是指采用纳米粉体(如纳米铜、纳米银)为原料,采用适当的分散剂、稳定剂等对颜料进行表面改性而制得的颜料粒子。这些颗粒具有极高的比表面积和优异的光学性能,使其能够在不同的基材中实现均匀的颜色分布和更强的色彩表现力。其主要成分包括无机或有机纳米颗粒、分散剂和溶剂等。纳米色浆的应用,主要包括颜料色浆、油墨和塑料等。随着纳米技术的不断进步,纳米色浆作为一种新型材料逐渐受到重视。纳米材料在色浆制备中具备明显优势[1]。纳米材料的高比表面积使其能够更好地分散在溶剂中,从而提高了色浆的均匀性和稳定性,纳米颗粒通常还呈现出优异的光学特性,如更强的色彩鲜艳度和良好的光吸收能力,这使得纳米色浆在色彩表现方面优势显著。此外,纳米材料的粒径可调性允许制备出不同尺寸的颗粒,以满足特定应用的需求。在涂料和油墨中,纳米色浆的应用能够提升涂层的耐磨性、耐腐蚀性、耐候性和抗紫外线能力,从而延长产品的使用寿命[2]。随着环保法规的日益严格,纳米材料的无毒性和低环境影响特性使其成为开发绿色、可持续色浆的重要选择。纳米材料在色浆制备中的应用不仅提升了产品性能,也推动了行业向更环保和高效的方向发展。

## 2. 纳米色浆的制备方法

纳米色浆在涂料、油墨、塑料和纺织染色等领域展现出极大的应用潜力。纳米化处理使颜料颗粒拥有独特的光学、电学和化学特性,因此,制备均匀分散、稳定的纳米色浆成为当前研究的重点。纳米色浆是通过先进技术和精密设备,将传统颜料粒子进行纳米化或与纳米材料进行合理复合,从而实现水性化和浆料化。这种制备方式使得纳米色浆具备量子尺寸效应、表面效应、宏观量子隧道效应以及介电限域效应等纳米粒子特有的功能特性[3]。主要的纳米色浆制备方法包括高能球磨法、化学沉淀法、超声波分散法、喷雾干燥法和微乳液法。高能球磨法通过机械力实现颜料粒子的纳米化和均匀分散;化学沉淀法则在溶液中生成纳米沉淀物,适合复合颜料的制备;超声波分散法利用声空化效应打散颗粒团聚体,适合小批量制备;喷雾干燥法将悬浮液雾化干燥形成纳米级颗粒,利于大规模生产;而微乳液法通过纳米反应环境控制颗粒尺寸。

### 2.1. 高能球磨法

高能球磨法是一种常用的纳米色浆制备方法,主要通过机械能将颜料粒子打散并研磨至纳米尺度。该方法以研磨介质(如氧化锆球或氧化铝球)为媒介,通过高速旋转使颗粒之间发生剧烈撞击和摩擦,从而

将颜料颗粒粉碎成纳米级。高能球磨法适用于大多数无机颜料及一些耐磨性高的有机颜料。在球磨过程中,溶剂和分散剂的选择非常重要,然后通过机械搅拌或超声波等方法进一步分散,以确保色浆的均匀性和稳定性抑制颗粒的团聚。高能球磨法具有操作简单、适合大规模生产,且适用于多种颜料材料,但其缺点也有明显的缺点比如能耗较高,设备磨损大,以及可能导致污染。

钛有优良的防腐性能和化学反应活性。张巨生等人[4]采用机械球磨与化学反应相结合的高能球磨法,成功制备出具有良好分散性和储存稳定性的纳米钛改性聚合物。研究表明钛粉能被聚合物吸附和包覆,其粒度在 50 到 80 nm 之间,且分布均匀,在此基础上研磨制备了相应的重防腐纳米色浆。杨群等人[5]以赤铁矿为原料,采用马来酸酐-醋酸乙烯酯共聚物(PMV)作为分散剂,通过高能球磨法制备纳米级赤铁矿颜料水分散体。研究了研磨时间、研磨介质及分散剂用量对分散体粒径和 Zeta 电位的影响。

## 2.2. 化学沉淀法

化学沉淀法主要通过化学反应生成不溶性的纳米颗粒沉淀,制备得到具有良好分散性和稳定性的纳米色浆。制备的纳米颗粒表面积大,沉淀产物在干燥或使用过程中易发生团聚,因此需要加入额外的分散剂来防止。化学沉淀法的核心是控制反应条件,使可溶性金属盐或颜料前驱体在溶液中通过化学反应生成不溶性的沉淀颗粒。这些沉淀物被进一步处理和分散,最终形成纳米级颜料。具体步骤分为前驱体溶解、沉淀生成、控制晶化和粒径、后处理。

化学沉淀法通过调节沉淀条件(pH、反应温度、浓度等),可以有效控制颗粒的大小和形状。但是同样其需要精确控制 pH、温度、沉淀剂浓度等反应条件,否则易导致颗粒团聚或沉淀不均匀,以及后处理过程中沉淀产物往往需要多次洗涤、干燥和分散处理,增加了工艺难度和时间成本。Weiran 等人[6]通过采用化学沉淀法,利用 Co, Cr, Fe 三种金属氧化物的相互作用,深入研究了各种黑色色浆的合成。研究化学沉淀法在控制粒径、形貌和颜色性能方面的有效性。研究发现调节溶剂 PH 值,同时利用其管理高温稳定性实现均匀颗粒分散的能力。

## 2.3. 超声波分散法

超声波分散法主要利用超声波的空化效应来分散并均匀化纳米颗粒。通过将声波引入溶液中,使其振荡并产生高频的机械振动。这种振动会导致溶液内部产生“空化气泡”,即微小的真空气泡在高压下迅速形成和坍塌[7]。这种空化作用会引发强烈的局部高温高压环境,并产生剪切力和冲击波。这些效应对纳米颗粒的团聚具有显著的分散作用,能够将原本团聚的纳米颗粒逐渐分散成单个或较小的颗粒。具体而言超声波主要通过剪切空化气泡破裂时释放的高能剪切力能够打破颗粒之间的弱相互作用,减少团聚,同时在超声波作用下,表面活性剂可更有效地吸附在颗粒表面,进一步提升颗粒的分散性和稳定性。

超声波分散速度快,能在短时间内将纳米颗粒充分分散,适用于大规模工业化生产。能够有效破坏纳米颗粒团聚现象,使颗粒在色浆中分布均匀,从而提升色浆的均匀性和稳定性。相比其他机械分散方法,超声波分散设备简单,且无需高温高压,适合于温和条件下的分散。缺点是能耗较高;超声波分散过程中产生的高温可能会引起纳米颗粒的变性,尤其是在处理对温度敏感的材料时;效果易受条件影响例如溶液的粘度、超声频率及功率、处理时间等因素对分散效果有显著影响,操作条件需要严格控制[8]。

## 2.4. 喷雾干燥法

喷雾干燥法是一种用于制备纳米色浆的高效方法,主要利用快速蒸发来干燥颗粒悬浮液,将纳米材料均匀分布在基质中,从而实现高效的粒子干燥和均匀分散。在喷雾干燥过程中,色浆溶液通过雾化器喷入加热的气流中形成微小液滴,液滴迅速脱水,生成干燥的纳米颗粒。高温的加热气流会导致液滴中的溶剂快速蒸发,产生均匀的微纳米颗粒[9]。该过程通常在密闭系统中进行,以控制颗粒的形态和大小,

并减少环境对色浆的影响。喷雾干燥法速度快, 适合工业大化规模生产; 具有良好的分散性可以控制色浆颗粒的粒径和形态, 确保纳米材料在色浆中的均匀分布; 适用于热敏材料由于液滴蒸发过程中自身冷却, 喷雾干燥适合对温度敏感的材料。但是喷雾干燥法产率受限实验室喷雾干燥产率相对低(通常20%~70%), 且颗粒可能在干燥壁上沉积; 对于一些颗粒的形态控制有难度, 且在微小尺度上分离困难。

Yin 等人[10]通过将旋转填充床(RPB)中的高重力反溶剂沉淀与喷雾干燥相结合, 提出了一种制备稳定的分散染料(CI 分散黄 54)水性纳米分散体的简单方法。所制备产品的平均粒径为 120 nm, 可以很容易地在水中重新分散。与原始染料相比, 分散染料纳米颗粒的润湿性和分散性显著提高。此外, 纳米分散体的染色性能明显优于通过球磨微粉化的商业染料, 有望扩展到制备其他分散染料的高性能水性纳米分散体。

## 2.5. 微乳液法

作为一种高效且常用于制备纳米色浆的方法, 微乳液法利用水相和油相在表面活性剂和助表面活性剂的协同作用下形成纳米尺度的稳定乳液。这种方法因其在制备纳米颗粒时对粒径控制的精确性和高分散性, 被广泛用于纳米材料的制备[11][12]。微乳液是由水、油、表面活性剂和助表面活性剂组成的透明或半透明体系。它们会形成均匀的纳米尺寸结构, 可分为三种类型: 水包油型、油包水型、双连续相。

微乳液法的制备过程基于溶液中的粒子相互碰撞, 通过化学反应(如沉淀反应或溶解反应)形成纳米颗粒。微乳液中形成的纳米颗粒受到微小胶束空间的限制, 防止了团聚, 确保了粒径在纳米尺度范围内保持均匀[13]。微乳液中的粒子生成受到胶束内部空间的限制, 能够形成均匀粒径的纳米颗粒; 操作温和, 微乳液法通常在常温常压下操作, 适合温度敏感的物质; 微乳法制备的色浆具有高分散性保证了色浆的稳定性, 适合长期存储和使用。但是为了保证体系的稳定性, 微乳液法需要较高浓度的表面活性剂, 增加了生产成本; 关键的一点是微乳液的稳定性对温度和 pH 较为敏感, 这会影响色浆的实际应用范围[14]。

周鹏等人[15]以端乙烯基聚硅氧烷、甲基丙烯酸甲酯、丙烯酸丁酯三者共聚物为壁材, 有机颜料铜酞菁蓝为芯材, 采用细乳液聚合制得了颜料纳米胶囊。研究发现, 乳化剂 SDS 能提高聚合体系稳定性, 从而可部分抵消端乙烯基聚硅氧烷和铜酞菁蓝加入导致的粒径增大、分布变宽和体系失稳趋势。在优化工艺基础上所制颜料纳米胶囊有望用于丝绸涂料印花领域。杨桂琴等人[16]研究了纳米钴蓝颜料微乳液制备过程中, 增溶水量对微乳液滴的影响, 并讨论了微乳液滴对最终制得的粒子粒径的影响。结果表明, 调节增溶水量可控制纳米粒子的粒径大小, 对制得的纳米钴蓝颜料进行了 XRD 和 TEM 表征, 并通过颜色测定与分析, 探讨了纳米粒子的量子尺寸效应。

## 3. 纳米色浆的特性

纳米粒子因其独特的物理和化学特性, 在众多领域引起了广泛关注。纳米粒子的高比表面积使其具有增强的反应性和优异的分散性, 这在涂料和油墨中尤为重要, 能够实现更均匀的颜色分布和更高的色彩饱和度。纳米粒子的量子尺寸效应导致其在光学性能上的显著提升, 能够改变光的吸收和散射特性, 从而提升涂层的光泽和透明度。纳米粒子的机械性能也较传统颗粒更为优越, 能够增强基材的强度和耐磨性。由于其小尺寸, 纳米粒子通常展现出低粘度和良好的流变性能, 这使得它们在加工和应用时更为便利[17][18]。

### 3.1. 纳米粒子的分散性和稳定性

纳米粒子的分散性和稳定性在纳米色浆的制备中起着至关重要的作用, 直接影响最终产品的性能和应用效果。良好的分散性确保纳米粒子在基材中均匀分布, 避免聚集和沉淀现象, 这有助于提高涂层的色彩饱和度和均匀性。高度分散的纳米粒子具有更大的比表面积, 增强了其与基质的相互作用, 从而提

高了色浆的反应性和功能性[19]。在涂布和印刷等应用过程中,良好的分散性可以降低粘度,改善流变性能,增强加工的便利性。稳定性差的纳米色浆容易发生颗粒聚集和沉降,导致色浆在储存和使用过程中出现分层和沉淀,影响其性能。稳定的纳米色浆对温度、pH 和其他环境因素的变化具有更强的抵抗力,确保在不同条件下的性能一致性。良好的稳定性延长了纳米色浆的保质期,使其在运输和储存过程中不易变质,确保了商业应用的可靠性。

徐辉等人[20]研究了羧甲基改性 NFC 的特性及其对颜料分散稳定性和低固含量涂料流变性能的影响。结果表明,颜料分散液的黏度随羧甲基改性 NFC 添加量的增加而升高,但随着羧甲基取代度的提升而降低。增加 NFC 的羧甲基取代度和添加量能够提高颜料分散液的悬浮体积百分比,改善分散稳定性。在对涂料性能的研究中发现,随着 NFC 羧甲基取代度的提高,涂料的假塑性逐渐减弱,黏度也随之降低,从而对涂料的流变性能起到一定调节作用。

### 3.2. 光学性能

纳米粒子的尺寸、形状与颜色之间存在密切的关系,这主要源于量子尺寸效应和光的散射、吸收机制。当粒子尺寸缩小到纳米级时,电子的运动受到限制,导致其能级分布发生变化。这种变化影响到粒子的光学性质,如吸收和发射光的波长,从而影响颜色表现,这就是纳米粒子的量子尺寸效应。纳米粒子的尺寸同样与光吸收和散射有关,较小的纳米粒子通常会呈现不同于大颗粒的颜色[21]。例如,金属纳米粒子在不同尺寸下表现出不同的颜色,金属银的纳米粒子在尺寸为几十纳米时呈现出黄色,而在更小尺寸下则呈现蓝色。纳米粒子的形状(如球形、棒状、片状等)对其光学特性有显著影响。不同形状的粒子对光的散射和吸收方式不同,可能导致不同的颜色表现。纳米粒子还具有极性与共轭效应,在有机纳米粒子中,形状可能影响分子间的相互作用,进而改变其电子结构和颜色表现[22]。

童俊等人[23]通过测试色浆的可见光-近红外光谱曲线,研究了粒径分布对光谱特性的影响。结果表明,随着色浆体系粒径分布的减小,光谱曲线的反射率逐渐降低。与常见的健康植被绿叶相比,所制备的色浆在可见光-近红外波段基本能够模拟绿色植被的光谱特性,具备一定的伪装效果。Walaal 等人[24]将木质素复合纳米粒子作为纳米颜料引入到涂料中,制备具有良好的抗紫外和抗菌性能的多功能彩色涂料。

### 3.3. 防腐性

纳米色浆的防腐性能是其在涂料和涂层应用中一个重要的特性,主要体现在屏蔽效应和反应性。纳米色浆中的纳米颗粒能够形成致密的涂层,提供物理屏障,减少氧气和水分的渗透,从而减缓基材的氧化和腐蚀速度。某些纳米颗粒(如氧化锌、二氧化钛等)具有光催化活性,能够在光照条件下促进化学反应,分解有害物质,进一步提高防腐性能。

Zheng 等人[25]通过化学改性纳米二氧化钛复合水性环氧涂料增强耐蚀性,研究主要利用纳米二氧化钛的表面能,表面能参数变化的量化值反映在纳米  $\text{TiO}_2$  的不同程度的化学蚀变。防腐技术在确保重大工程顺利实施、减少腐蚀损失和节约资源方面发挥着关键作用,受到广泛关注。考虑到环保因素和处理成本,涂覆涂层被认为是最经济且高效的防腐方式[26]。涂层能够有效隔绝腐蚀介质与金属基材的接触,从而实现持久的防腐效果。陈朝阳等人[2]文考察了两种不同硅氧烷低聚物改性剂制备的改性纳米防腐浆料对环氧树脂-硅溶胶体系涂料物理性能和防腐性能的影响。研究发现涂料中纳米颗粒的团聚可能造成其形成的涂层中纳米颗粒分布不均匀,团聚的区域内颜基比过大而引起成膜物质的缺失,造成对纳米颗粒的包覆不足,令腐蚀介质可以快速渗透;在纳米防腐功能颗粒不足的区域则颜基比过小,造成局部涂层致密度和强度偏小,在没有纳米颗粒填充的情况下成膜易导致涂层内部形成微孔和微裂纹,影响涂层的耐蚀性。

## 4. 纳米色浆的应用

### 4.1. 在涂料中的应用

纳米色浆在涂料中的应用日益广泛，其独特的物理和化学特性使其成为提升涂料性能的重要组成部分。纳米色浆具有高饱和度，较小粒径和高比表面积使得其能够提供更高的色彩饱和度和亮度，显著提升涂层的视觉效果。良好的分散性使得纳米色浆在涂料中能够均匀分布，避免颗粒聚集现象，确保色彩的一致性。纳米粒子的加入能够提高涂层的机械强度和韧性，使其在受到冲击和摩擦时更具耐用性，减少剥落和开裂的风险。纳米色浆能够形成致密的涂层，提供物理屏障，减少氧气和水分的渗透，从而有效降低基材的腐蚀速度。

有些涂料要求色浆中的颜填料的颗粒粒径小于 10  $\mu\text{m}$ ，这就需要三辊研磨机，甚至纳米砂磨机对色浆进行研磨以得到粒径适宜的防腐色浆[27]。林光宁等人[28]采用低聚合度硅氧烷改性剂 GL-527、GL-1110 分别对复合铁钛粉进行表面改性，制备改性纳米防腐色浆，并结合粒径分布、Zeta 电位检测和微观形貌观察，对复合铁钛粉防腐色浆进行研究。

### 4.2. 在油墨中的应用

纳米色浆独特的性质使其能够显著提高油墨的性能和应用范围。主要是由于纳米色浆的较小粒径和高比表面积使其能够提供更鲜艳的色彩和更高的光泽度，提升油墨的视觉效果；纳米色浆通常表现出较低的粘度，有助于提高油墨的流动性和可操作性，适应各种印刷工艺，如喷墨、柔版和胶印。

张天翔等人[29]以氯醚树脂和乙烯基纳米  $\text{SiO}_2$  为共聚单体，采用半间歇种子乳液聚合方法制备了氯醚树脂/纳米  $\text{SiO}_2$  改性丙烯酸酯复合乳液，并制备了水性油墨，测定或表征了其性能。 $\text{SiO}_2$  粒子在乳胶膜中分散较为均匀，氯醚树脂/纳米  $\text{SiO}_2$  改性丙烯酸酯复合乳液性能稳定，与同类产品 E0503 丙烯酸酯乳液相比，复合乳液的固含率更高，黏度更小，固化后薄膜的柔韧性更强，在应用方面具有一定的优势。

## 5. 研究进展与前景

随着工业科技的不断进步，人们对色浆的性能要求愈加严格。将颜料色浆纳米化能够有效提升涂层的耐久性、耐候性、耐热性和耐化学性。同时，纳米化的颜料色浆不仅改善了涂层的质感，降低了涂料成本，还赋予涂层更优越的理化性能和新功能，从而增强表面特性并提高其在涂料体系中的分散性。纳米色浆的研究近年来取得了显著进展，主要集中在制备技术、性能优化和应用扩展等方面。随着纳米技术的发展，各种高效制备方法如高能球磨法、化学沉淀法和微乳液法等逐渐成熟，使得纳米色浆的制备更加高效和可控。此外，研究者们不断探索纳米色浆在涂料、油墨、塑料和复合材料等领域的应用，发现其优越的分散性、耐久性和光学特性，使其在市场上展现出强大的竞争力。

纳米色浆的研究仍将持续深化。随着环保法规的日益严格，水性和低 VOC 纳米色浆的开发将成为重要方向。同时，纳米色浆的功能化研究也将进一步拓展，例如通过设计多功能纳米颗粒赋予涂层自清洁、抗菌和智能响应等新特性。此外，结合机器学习和数据驱动的方法，优化纳米色浆的性能和制备工艺，将为实现更高效的应用提供新的思路。

## 参考文献

- [1] 杜长森, 张明俊, 宋立新, 等. 超细涂料色浆的制备及其稳定性研究[J]. 涂料工业, 2012, 42(3): 65-69.
- [2] 陈朝阳, 谢其峰, 冯耀民, 等. 含不同改性剂的纳米防腐色浆对金属防腐涂料性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43(8): 125-132.
- [3] 伍金平, 杜长森, 吕仕铭, 等. 纳米技术在水性色浆中的应用评述[J]. 江苏化工, 2008(3): 12-14.

- [4] 张巨生, 掌继锋, 刘志刚, 等. 应用高能球磨法制备纳米钛改性聚合物的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007(12): 2204-2207.
- [5] 杨群, 陈薇, 陆大年, 等. 高能球磨法制备纳米赤铁矿矿物颜料水分散体[J]. 应用化工, 2013, 42(7): 1265-1267.
- [6] Zhang, W., Li, Z., Wu, G., Wu, W., Zeng, H., Jiang, H., *et al.* (2023) Preparation, Chromatic Properties Analysis and Proportioning Optimization of Co-Cr-Fe-Based Black Pigment. *Materials*, **16**, Article No. 5785. <https://doi.org/10.3390/ma16175785>
- [7] Said, M.I., El-Said, A.I., Aly, A.A.M. and Abou-Taleb, A. (2018) Ultrasound Assisted Facile Synthesis of Mn(II) and Cu(II) Coordination Polymers and Their Use as Precursors for  $\alpha$ -Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and CuO Nanoparticles: Synthesis, Characterization and Catalytic Properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, **46**, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.04.001>
- [8] 邓庚凤, 李志午, 周小明. 微波-超声波协同制备纳米球形氧化镉[J]. 稀有金属与硬质合金, 2021, 49(2): 29-35.
- [9] 林锋, 蒋显亮, 任先京, 等. 喷雾干燥 YPSZ 纳米结构热喷涂粉末材料制备及表征[J]. 功能材料, 2005, (11): 1769-1771.
- [10] Yin, X., Xu, W., Pu, Y., Zhai, J., Wang, D. and Wang, J. (2020) Preparation of Aqueous Nanodispersions of Disperse Dye by High-Gravity Technology and Spray Drying. *Chemical Engineering & Technology*, **43**, 2118-2125. <https://doi.org/10.1002/ceat.201900570>
- [11] Garden, A.L., van der Salm, L., Schwass, D.R. and Meledandri, C.J. (2013) Towards a Tunable Microemulsion Method for Nanoparticle Synthesis. *RSC Advances*, **3**, Article No. 2192. <https://doi.org/10.1039/c2ra21491a>
- [12] Malik, M.A., Wani, M.Y. and Hashim, M.A. (2012) Microemulsion Method: A Novel Route to Synthesize Organic and Inorganic Nanomaterials. *Arabian Journal of Chemistry*, **5**, 397-417. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.09.027>
- [13] Tartaro, G., Mateos, H., Schirone, D., Angelico, R. and Palazzo, G. (2020) Microemulsion Microstructure(s): A Tutorial Review. *Nanomaterials*, **10**, Article No. 1657. <https://doi.org/10.3390/nano10091657>
- [14] Choi, J. and Kang, M. (2006) Preparation of Nano Disperse Dyes from Nanoemulsions and Their Dyeing Properties on Ultramicrofiber Polyester. *Fibers and Polymers*, **7**, 169-173. <https://doi.org/10.1007/bf02908262>
- [15] 周鹏, 向忠, 崔中兰, 等. 细乳液法制备 P(DMS-Acr)/PB 颜料纳米胶囊[J]. 丝绸, 2018, 55(10): 9-14.
- [16] 杨桂琴, 韩冰, 王雪松, 等. 微乳液法制备纳米钴蓝颜料及粒径控制[J]. 天津大学学报(英文版), 2002(4): 291-294.
- [17] 王宏志, 高濂, 郭景坤. 纳米结构材料[J]. 硅酸盐通报, 1999(1): 31-34.
- [18] 朱世东, 徐自强, 白真权, 等. 纳米材料国内外研究进展II——纳米材料的应用与制备方法[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(4): 1-8.
- [19] Kissa, E. (1990) Partitioning and Stability of Aqueous Dispersions. Particle Size of Dye Dispersions. *Langmuir*, **6**, 478-481. <https://doi.org/10.1021/la00092a030>
- [20] 徐辉, 朱玉莲, 戴红旗. 羧甲基改性纳米纤维素对颜料分散与涂料性能的影响[J]. 中国造纸学报, 2017, 32(4): 16-21.
- [21] 佟国香, 李毅, 黄毅泽, 等. 二氧化钒纳米粒子光学特性及制备方法研究进展[J]. 电子元件与材料, 2012, 31(3): 82-86.
- [22] 闫鹏飞, 周德瑞, 王建强, 等. 水热法制备掺杂铁离子的 TiO<sub>2</sub> 纳米粒子及其光催化反应研究[J]. 高等学校化学学报, 2002(12): 2317-2321.
- [23] 童俊, 许卫东, 鲁川杨, 等. 色浆颗粒大小对光谱曲线的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(5): 96-99.
- [24] Gawad, E., Zaher, A.S.K. and Nawwar, A.G. (2024) Exploring the Utilities of Rice Straw Black Liquor (Part XI): Enhancing the UV Resistance, Color, Antimicrobial, and Mechanical Characteristics of Epoxy Coatings Using Lignin-Based Hybrid Nano-Pigments. *Progress in Organic Coatings*, **197**, Article ID: 108866.
- [25] Zheng, H., Xiang, G., Khalaf, A.H., Lin, B., Wang, Y., Zhang, H., *et al.* (2024) Thermodynamic Prediction of Filler Surface Modification by APTES on Corrosion Resistance of Nano-TiO<sub>2</sub>/Waterborne Epoxy Coatings. *Surface and Coatings Technology*, **489**, Article ID: 131105. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131105>
- [26] 唐政, 耿春冬. 金属防护用自修复防腐涂层的制备方法研究进展[J]. 当代化工研究, 2023(2): 84-87.
- [27] 刘杰, 申乾宏, 阙永生, 等. 色浆和助剂对金属防腐涂料的影响[J]. 上海涂料, 2021, 59(3): 4-6.
- [28] 林光宁, 林清华. 改性纳米防腐色浆的研制[J]. 上海涂料, 2024, 62(2): 21-24.
- [29] 张天祥, 裴青梅. 氯醚树脂/纳米 SiO<sub>2</sub> 改性丙烯酸酯复合乳液的制备及其在水性油墨中的应用研究[J]. 中国胶粘剂, 2023, 32(11): 28-33.