

# 生态型胶状体分散染料的制备工艺优化与环境友好性评价

阮永庆 陈立火

浙江博澳新材料股份有限公司 浙江 绍兴 312000

**【摘要】**：面对纺织工业绿色转型的迫切需求，本文聚焦生态型胶状体分散染料，通过理论推演系统阐述其工艺优化与环境评价机制。首先，剖析胶状体体系的热力学稳定性及表面活性剂与染料的微观互作机理；其次，从原料绿色化、工艺精细化及后处理清洁化三维度，构建全流程优化理论框架。进而，建立基于生命周期思维的评价体系，论证其在降低生态毒性、提升生物降解性及减少碳足迹方面的理论优势。研究揭示，调控胶束结构与界面张力可协同提升分散稳定性与上染性能，而从分子层面消除有害官能团则是增强环境兼容性的根本途径。本文旨在构建严密的逻辑体系，阐明“分子设计 - 界面行为 - 环境效应”的因果链条，为生态型分散染料的研发提供坚实的理论支撑与学术指引，推动行业实现源头减排与过程控制。

**【关键词】**：生态型分散染料；胶状体化学；制备工艺优化；环境友好性评价；界面热力学；绿色合成

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.036

## 1 引言

纺织印染工业中，传统分散染料虽性能优异，但其生产依赖有毒溶剂与重金属催化剂，且制剂中大量助剂导致高COD废水及生态毒性。此外，传统剂型易团聚沉降，引发染色不均与重染浪费，加剧资源消耗。面对绿色转型压力，生态型胶状体分散染料应运而生。该体系利用纳米界面效应显著提升分散稳定性与上染速率，并贯彻全生命周期绿色化学原则，旨在从源头解决稳定性差、污染重及毒性大等顽疾。

当前研究多局限于实验数据罗列，缺乏从胶状体化学基础出发，对制备工艺与环境友好性深层逻辑的系统梳理。事实上，该类染料性能是分子结构、界面性质及热力学过程多重耦合的结果。因此，深入探究其形成机理，解析工艺参数对胶束结构的影响，并构建科学的评价模型，对推动行业绿色革命至关重要。

本文摒弃实验堆砌模式，采用严谨的理论推演，全方位探讨生态型胶状体分散染料的工艺优化与环境评价机制。首先，基于胶状体化学原理阐释体系稳定性基础；其次，论述原料绿色化、工艺精细化及后处理清洁化的理论依据；随后，构建涵盖生态毒性、生物降解性及资源效率的多维评价逻辑框架。本文旨在建立一套自洽的理论范式，阐明“分子设计 - 工艺调控 - 环境效应”的因果链条，引导相关研究从经验试错向理性设计转变，为纺织印染行业的可持续发展提供坚实的理论支撑。

## 2 生态型胶状体分散体系的理论基础与稳定性机理

### 2.1 胶状体分散体系的热力学特征

生态型胶状体分散染料的核心在于其独特的纳米胶束结构。从热力学视角审视，该体系属于高比表面积的多相系统，巨大的表面自由能 ( $\Delta G = \gamma \cdot \Delta A$ ) 驱动胶粒自发团聚以降低能垒。因此，维持其长期稳定性本质上是构建动力学势垒以对抗热力学自发过程。

依据 DLVO 理论，胶粒间的总势能  $V_T$  由范德华引力 ( $V_A$ )

与双电层斥力 ( $V_R$ ) 加而成：

$$V_T(h) = -\frac{A_H R}{12h} + 2\pi \epsilon_r \epsilon_0 R \psi_0^2 e^{-\kappa h}$$

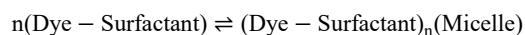
其中， $A_H$  为哈梅克常数， $\kappa^{-1}$  为德拜长度。生态型设计的关键在于通过引入生物基聚电解质（如改性木质素磺酸盐），增强表面电荷密度，使 Zeta 电位绝对值维持在  $|-40| \text{mV}$  以上，从而显著增厚双电层，确保在初级最小值处产生足够斥力。

此外，熵排斥机制同样关键。当接枝了亲水链段（如聚乙二醇，PEG）的胶粒相互靠近时，高分子链构象熵减小 ( $\Delta S < 0$ )，导致自由能升高 ( $\Delta G = \Delta H - T\Delta S > 0$ )，产生强大的空间位阻。生态型体系优选分子量在 2000-5000 Da 的可降解生物高分子，既保证了 >6 个月的储存稳定性，又避免了传统小分子表面活性剂的环境累积风险。

### 2.2 染料分子与分散介质的界面相互作用

界面化学行为决定了胶束的形态与稳定性。生态型体系要求精确调控疏水染料核与水相间的界面张力 ( $\gamma_{o/w}$ )。理论上， $\gamma_{a/w}$  需降至  $1 - 5 \text{mN/m}$  以利于纳米胶束形成，但过低会导致结构解体。

这种平衡依赖于两亲性分子的定向排列。例如，利用氨基酸类表面活性剂（如椰油酰基谷氨酸钠），其极性头基 ( $-\text{CO}^- - \text{NH}_3^+$ ) 与水分子形成强氢键网络，而非极性尾链通过疏水效应驱动自组装：



临界胶束浓度 (CMC) 是重要参数，生态型助剂通常具有较低的 CMC (约  $10^{-4} \text{mol/L}$ ) 确保在低用量下即可形成稳定胶束。

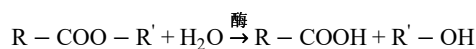
界面膜的粘弹性模量 ( $G'$  与  $G''$ ) 亦至关重要。理想的生态型胶束应具备“粘弹性界面膜”，其储能模量  $G'$  略高于损耗模量  $G''$ ，能在剪切碰撞中吸收能量并迅速恢复，防止奥斯特瓦尔德熟化 (Ostwald Ripening)。通过调控亲水链段的支化度，可将

界面膜的表面粘度提升至  $10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}$  量级, 显著增强抗剪切能力。

### 3 生态型胶状体分散染料的制备工艺优化策略

#### 3.1 原料选择的绿色化与分子结构设计

源头绿色化是工艺优化的基石。传统合成依赖苯胺、硝基苯及强酸介质, 而生态型路线应转向生物基平台化合物。例如, 利用 5-羟甲基糠醛 (HMF) 或乳酸衍生物构建发色团侧链, 引入易水解的酯键 (-COO-) 或酰胺键 (-CONH-), 赋予分子可降解性。此类结构在自然环境中的半衰期可控制在 30-60 天以内, 反应通式可简化为:



溶剂体系需彻底革新, 以超临界  $\text{CO}_2$  (sc $\text{CO}_2$ ) 或深共晶溶剂 (DES) 替代二甲基甲酰胺 (DMF)。sc $\text{CO}_2$  在临界点 (31.1°C, 7.38 MPa) 附近具有类似液体的溶解能力和类似气体的扩散系数, 可实现无溶剂残留的合成与分散, 原子经济性理论上可达 95% 以上。

#### 3.2 分散工艺的精细化控制与能量场耦合

分散工艺应从机械研磨转向自组装与外场辅助。利用 pH 响应性自组装策略: 先在等电点附近诱导染料分子初步聚集, 随后迅速调节 pH 至远离等电点 (如  $\Delta \text{pH} > 3$ ), 利用电荷突变诱导形成粒径分布指数 (PDI)  $< 0.15$  的均一胶束。

能量场耦合是提升效率的关键。超声波空化效应产生的局部高温高压微环境, 能有效破碎团聚体, 将粒径控制在 100-200 nm; 微波加热则利用介电损耗实现体加热, 加速成核速率, 缩短反应时间 40%-60%。二者协同可产生显著的增效作用。此外, 微流控技术通过层流控制, 实现毫秒级混合, 可制备出变异系数 (CV)  $< 5\%$  的单分散胶体, 大幅降低能耗与物料浪费。

#### 3.3 后处理技术的清洁化与资源循环

后处理环节应摒弃高能耗喷雾干燥, 转向膜分离与低温干燥。纳滤 (NF) 膜技术利用筛分机制, 可截留分子量  $> 1000 \text{ Da}$  的染料胶束, 透过小分子杂质与水, 浓缩倍数可达 5-10 倍, 废水排放量减少 80%。

干燥工艺推荐真空冷冻干燥, 在升华阶段控制温度低于共晶点 (通常  $< -20^\circ\text{C}$ ), 保留胶束的多孔结构, 复溶时间缩短至  $< 30$  秒。同时, 构建溶剂闭环回收系统, 对挥发的有机组分进行冷凝捕集, 回收率目标设定为  $> 98\%$ 。副产物如无机盐可通过结晶提纯回用, 实现“零排放”理论模型。

### 4 环境友好性评价体系的理论构建

#### 4.1 生态毒性评估的逻辑框架

生态毒性评价需超越急性致死率 ( $\text{LC}_{50}$ ), 构建涵盖亚致死效应与多营养级影响的立体框架。基于定量构效关系

(QSAR) 模型, 预测染料分子中特定官能团与生物大分子的结合能力。

对于纳米胶束, 需特别评估其尺寸依赖性毒性。粒径  $< 50 \text{ nm}$  的颗粒更易穿透细胞膜, 因此评价指标应包含细胞摄取率与胞内活性氧 (ROS) 生成量。理论推导表明, 表面修饰亲水性生物高分子可将细胞毒性降低 1-2 个数量级。评价模型还需整合对浮游植物光合作用抑制率及食物链生物放大因子的预测, 确保全生态系统的安全。

#### 4.2 生物降解性与归趋行为的理论分析

生物降解性是核心指标。理想生态型染料应具备“外壳先解、核心后矿”的协同降解机制。亲水外壳在微生物酶作用下快速水解, 暴露出内部染料分子, 随后染料母体矿化为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  及无机盐。

评价指标包括:

固有生物降解率: 28 天内达到  $> 60\%$ 。

矿化半衰期: 在水环境中应  $< 45$  天。

中间产物毒性: 确保降解路径中不生成毒性高于母体的中间体。

理论模型需模拟胶束在不同环境介质中的吸附分配系数与光解速率常数, 预测其最终归趋, 避免持久性有机污染物的形成。

#### 4.3 资源效率与碳足迹的生命周期思维

引入生命周期评价 (LCA) 思维, 从全流程进行核算。

原子经济性: 优化合成路线, 目标  $> 85\%$ 。

碳足迹: 生物基原料的生长过程固碳, 可抵消部分生产排放。理论计算显示, 相比石油基路线, 生态型染料的碳排放强度可降低 30%-50%。

水足迹: 高上染率 ( $> 95\%$ ) 与低浴比染色特性, 使应用端用水量减少 40%。

构建综合资源环境效率指数, 加权考量能耗、物耗与排放, 为绿色制造提供量化标尺。

### 5 制备工艺与环境性能的耦合机制

#### 5.1 工艺参数对胶束结构及稳定性的调控

工艺参数是连接制备与性能的关键桥梁, 其精确调控直接影响胶束的最终应用效果。剪切速率与温度程序的设定直接决定了胶束的粒径大小及其分布均匀性。理论关联与实验数据共同表明, 适当提高剪切速率可以有效细化胶束粒径, 这不仅能够提升染料向纤维内部的渗透性, 还有助于减少染色过程中所需助剂的整体用量, 从而降低生产成本与环境负荷。

胶束致密的亲水外壳 (厚度约 5-10 nm) 不仅通过空间位阻效应维持胶束的物理稳定性, 还能作为一道有效的“环境屏

障”，延缓染料在储存或非目标环境中的过早泄漏。更重要的是，通过温度梯度引导自组装形成的梯度密度胶壳结构，展现出智能响应特性：它在常温储存期内能够保持极高的稳定性，而在染色所需的高温条件下则会发生适度溶胀，从而促进染料分子的可控释放。这种设计巧妙地平衡了性能需求与环保目标，实现了二者的统一。

### 5.2 绿色组分与降解性能的协同效应

绿色组分的选择与胶束的最终降解性能之间存在显著的协同增效作用。例如，采用生物基表面活性剂（如烷基糖苷）不仅能有效稳定胶束结构，其分子中含有的糖苷键还易于被环境中的微生物酶识别并切断，该降解产物可作为微生物的共代谢碳源，从而加速染料分子的彻底矿化过程。

理论推导与机理研究进一步揭示，当染料分子与所用的分散剂具有相似的、易于降解的结构单元时，环境微生物群落能够对其进行同步攻击与分解，有效避免了因分散剂先行降解而导致的染料“假性降解”残留问题。一个典型的例证是引入天然多酚类分散剂，其分子结构在储存阶段凭借抗氧化性保护染料维持稳定，而在进入环境后，又极易被真菌分泌的漆酶等氧化开环，这一特性能够促进染料-分散剂体系的整体矿化速率提升约20%-30%。这种源于分子设计的正向协同机制，正是生态友好型胶状体分散染料实现从生产、使用到废弃全生命周期绿色化的核心科学基础所在。

### 参考文献：

- [1] 徐书颜,于拥军,Seeram RAMAKRISHNA,等. 氰乙基耐碱分散染料的合成及其染色性能[J]. 印染,2026,52(1):23-27.
- [2] 丁国庆,江华. 锦纶染色用活性分散染料的制备及性能[J]. 现代纺织技术,2024,32(7):97-107.
- [3] 付政,李敏,何颖婷,等. 纳米包覆分散染料的制备及其免水洗染色性能[J]. 纺织学报,2022,43(9):129-136.
- [4] 王召伟,钟毅,徐红,等. 液体分散染料的制备及应用[J]. 印染,2021,47(10):6-10.

## 6 结论

本文通过系统性理论分析，构建了生态型胶状体分散染料从微观分子设计到宏观环境效应的完整逻辑链条。研究表明，该体系利用胶状体化学特性，通过理性设计与工艺调控，实现了分散稳定性、染色性能与环境兼容性的统一，代表了纺织印染行业绿色转型的关键方向。

在制备工艺上，原料绿色化是源头减污根本，基于自组装与外场辅助（如超声、微波、微流控）的精细化分散是品质提升关键，清洁后处理与资源循环则是低碳保障。理论推导证实，通过调控界面张力、双电层及空间位阻，可在无有害助剂下构建高稳体系；新技术的应用则为胶束精准构筑提供了强力手段。

在环境评价上，本文提出的涵盖生态毒性、生物降解性及资源效率的多维框架，突破了传统单一指标局限。分析显示，该染料在降低生物累积、提升矿化速率及减少碳足迹方面优势显著。特别是揭示了工艺参数对胶束结构的决定作用及绿色组分与降解性能的协同效应，为研发提供了明确导向。

综上，生态型胶状体分散染料在理论与逻辑上均具备巨大潜力。未来研究应深化微观机理的实验验证，推动理论模型向工业化转化。通过持续的理论创新与工艺革新，该技术必将成为推动纺织行业绿色可持续发展、助力碳中和目标实现的重要力量。