

纳米无机粉体分散及界面作用机制探究

杨 华

四川宏量基筑建材有限公司 四川省 眉山市 620587

【摘 要】: 纳米无机粉体因高比表面积和高表面能易在液相中团聚,其分散稳定性受介质环境、分散剂吸附和机械能输入共同影响。本文以纳米 SiO₂ 水相分散为主要对象,分析 pH 值、离子强度、聚羧酸铵、硅烷偶联剂及超声搅拌条件对界面作用的调控机制,并结合 DLS、TEM 和 Zeta 电位等方法评价分散效果。结果表明,在 pH 值为 9.0、聚羧酸铵用量为 2.0%、超声功率为 600 W 条件下, SiO₂ 悬浮液分散性能明显改善, D50 粒径由 168 nm 降至 82 nm,多分散指数由 0.41 降至 0.18, Zeta 电位由 -24.6 mV 提高至 -43.2 mV,静置 72 h 后粒径变化率降至 4.3%。优化后悬浮液用于水性涂层时,透光率达到 91.6%,铅笔硬度达到 3H,说明界面电排斥与空间位阻协同作用可有效提升纳米 SiO₂ 粉体分散稳定性及应用性能。

【关键词】: 纳米 SiO₂; 粉体分散; 界面作用; Zeta 电位; 聚羧酸铵

0 引言

纳米无机粉体广泛应用于涂料、陶瓷、复合材料和功能膜等领域,其分散状态直接影响材料的透明性、力学性能和加工稳定性。然而,纳米颗粒表面能高、粒径小,在水相或聚合物体系中易形成软团聚或硬团聚,导致性能优势难以充分发挥。因此,揭示介质条件、分散剂结构和机械分散方式对颗粒界面行为的影响,对构建稳定悬浮体系和优化材料应用性能具有重要意义。

1 纳米无机粉体分散及界面作用的基础理论与研究现状

纳米无机粉体具有较高比表面积以及表面能,颗粒在液相或聚合物基体中容易发生团聚,分散过程本质上是外部能量、介质环境以及界面相互作用共同调控颗粒间距的过程。从胶体稳定性角度来看,颗粒表面的范德华引力、静电斥力、空间位阻以及溶剂化作用会共同决定体系的稳定状态,其中静电稳定主要依赖颗粒表面电荷形成的双电层排斥,空间位阻稳定则借助吸附层把颗粒接近过程中的构象压缩能提高。近年来,围绕二氧化硅、氧化铝、二氧化钛以及碳酸钙等典型纳米无机粉体的研究逐渐由单纯粒径控制转向界面层结构调节,分散剂分子构型、端基极性以及吸附强度被纳入分散机理讨论。现有研究已能解释多数水相体系的稳定化行为,但在高固含、多组分以及非水介质体系中,界面吸附的动态重排、颗粒软团聚破碎后的再聚集行为仍需进一步开展机制层面的辨析。

2 纳米无机粉体分散过程的关键影响因素及界面作用机制分析

2.1 分散介质对纳米无机粉体分散性的影响机制

水相 SiO₂ 纳米粉体的分散状态受介质酸碱性以及电解质浓

度共同调控, pH 值在 3-11 范围内变化时,硅醇基会发生质子化或去质子化转变,并把颗粒表面电荷密度以及 Zeta 电位推向不同水平。SiO₂ 等电点通常偏向强酸区间,因此在 pH 值由 3 升至 11 的过程中,颗粒表面负电性增强,双电层排斥作用随之提高,颗粒接近时需要克服更高静电势垒,软团聚体不易继续长大。离子强度从 0.01 mol/L 增至 0.1 mol/L 时,水相中反离子浓度提高,扩散层被压缩,颗粒间有效排斥距离缩短, Zeta 电位绝对值下降,范德华引力更容易在近距离接触中占据主导。结合界面双电层理论,剪切面处电势可由表面电势沿扩散层衰减过程来描述,公式如下:

$$\zeta = \psi_0 \exp(-\kappa x)$$

其中, ζ 表示剪切面处 Zeta 电位,单位为 mV, ψ_0 表示颗粒表面电势,单位为 mV, κ^{-1} 表示双电层厚度,单位为 nm, x 表示颗粒表面至剪切面的距离,单位为 nm。

该关系说明,离子强度提高会增大 κ 并压缩 κ^{-1} ,使剪切面电势衰减更快。由此可见,水相分散设计不能只把 pH 值当作单一调节变量,还需把盐离子背景纳入界面电势调控范围,避免高电解质环境削弱静电稳定贡献。

2.2 分散剂类型及用量对界面作用的调控机制

围绕 SiO₂ 纳米粉体开展分散剂调控时,聚羧酸铵以及硅烷偶联剂在界面上的作用路径存在明显差异。聚羧酸铵依靠羧酸根与 SiO₂ 表面羟基产生氢键作用以及静电吸附,其分子链向水相伸展后形成带电吸附层,把静电排斥以及空间位阻耦合起来;硅烷偶联剂则更倾向于借助水解后的硅醇基与 SiO₂ 表面硅醇基发生缩合反应,形成相对稳定的 Si—O—Si 界面连接,并把有机端基暴露在介质中以改变表面润湿状态。分散剂用量处于 0.5%-3.0% 时,低用量阶段界面覆盖不足,裸露表面仍可能

发生桥连团聚；用量提高后，吸附层厚度增加，颗粒接近过程中构象压缩能提高，分散稳定性随之改善；过量分散剂残留于连续相中时，游离链段可能引发耗竭作用或提高体系黏度，反而削弱粉体运动自由度。见图1所示，分散剂吸附及分散过程可概括为粉体润湿、分子吸附、吸附层形成、团聚体解离以及稳定悬浮5个连续界面过程，其中吸附层厚度以及端基取向决定了颗粒间排斥势垒的形成质量。

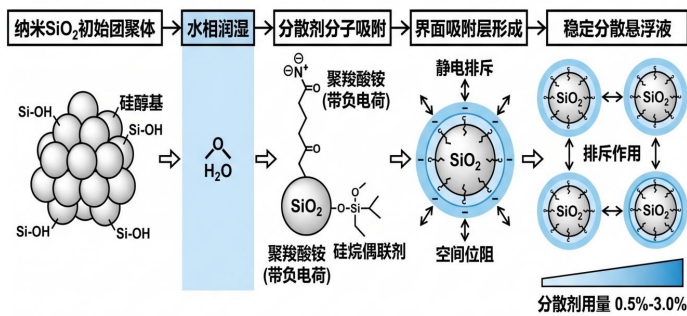


图1 纳米SiO₂粉体分散剂吸附及分散过程流程图

2.3 机械分散条件对界面结构及分散效果的影响

机械分散过程把外加能量传递给 SiO₂ 团聚体，使液相剪切、空化冲击以及颗粒碰撞共同参与团聚结构解离。超声功率处于 200–800 W 时，空化泡崩塌产生的微射流能够作用于团聚体内部弱结合区域，促使软团聚破碎，并暴露新的活性表面；但功率过高会造成局部温升以及颗粒瞬时碰撞增强，界面吸附尚未完成时容易出现再聚集。搅拌速度在 500–2000 rpm 范围内变化时，宏观流场剪切有助于提高粉体润湿效率以及分散剂传质速率，低速条件下团聚体主要随流场迁移，破碎效率有限；较高速率可把剪切应力传递至团聚体边缘，使粒子间液膜更易进入接触间隙。需重点关注的是，机械能输入并非独立决定分散效果，其作用依赖介质黏度、分散剂吸附速率以及粉体固含量。较适宜的工艺路径应把超声短时高能破碎与中高速搅拌维持分散结合起来，使新生界面在再次碰撞前被分散剂覆盖，从而降低界面自由能并延缓团聚结构重建。

3 纳米无机粉体分散效果的表征与优化策略

3.1 纳米无机粉体分散效果的多维度表征方法

纳米 SiO₂ 粉体在水相中的分散状态具有粒径尺度小、界面电荷敏感以及团聚结构可逆等特性，单一表征手段难以把悬浮液稳定性完整呈现出来。动态光散射 DLS 可把布朗运动引起的散射光强涨落转化为水合粒径分布，适宜用于判断颗粒是否由微米级软团聚向纳米级分散状态转变。测试过程中需控制样品浓度以及稀释介质一致性，避免稀释过程改变双电层厚度。粒

径中位值、平均粒径以及多分散指数可共同反映分散均匀性，其中多分散指数降低通常意味着团聚体数量减少，粒径分布趋于集中。

透射电镜 TEM 更侧重于颗粒形貌以及局部团聚结构观察，可把 DLS 所得水合粒径结果与颗粒实际接触形态进行对应分析。对于 SiO₂ 纳米粉体而言，TEM 图像中若颗粒边界清晰、相互间存在可辨识间隔，说明分散剂吸附层在样品干燥前具有一定隔离作用；若出现链状黏连或大片堆叠，则表明界面覆盖不足或干燥诱导团聚较明显。Zeta 电位测试则从界面电荷角度评价悬浮液稳定性，绝对值较高时，颗粒间静电排斥势垒更容易抵消范德华吸引。鉴于 DLS 对少量大团聚体较敏感、TEM 容易受到制样干扰、Zeta 电位不能直接给出空间位阻强度，较合理的评价路径应把粒径分布、微观形貌以及界面电势放在同一条件体系下进行交叉印证，从而减少单项指标造成的判断偏差。

3.2 基于界面作用机制的分散工艺优化及效果评估

结合前文关于 pH 值、分散剂吸附以及机械能输入的机制分析，SiO₂ 水相分散工艺可把弱碱性介质当作界面电荷调控条件来使用。pH 调节至 9 时，颗粒表面硅醇基去质子化程度提高，负电性增强；聚羧酸铵用量控制在 2.0% 时，界面覆盖较充分且游离链段引发的耗竭效应相对有限；超声功率设定为 600 W 时，空化破碎能够削弱软团聚体内部连接，同时不易因过强局部碰撞诱发快速再聚集。该组合参数还需配合中高速搅拌维持悬浮状态，使新暴露表面在较短时间内完成分散剂吸附。

表 1 列出了优化前后纳米 SiO₂ 粉体分散效果的对比情况。优化后样品的 D50 粒径由 168 nm 降至 82 nm，多分散指数由 0.41 降至 0.18，Zeta 电位由 -24.6 mV 调整至 -43.2 mV，说明粒径集中性以及界面电排斥能力同步改善。静置 72 h 后，粒径变化率为 4.3%，低于 5%，未观察到明显沉降分层，表明静电排斥以及空间位阻在该条件下形成了较稳定的协同作用。在应用性能方面，优化后 SiO₂ 悬浮液加入水性涂层体系后未产生肉眼可见颗粒缺陷，涂膜透光率维持在 91.6%，铅笔硬度达到 3H，说明分散质量改善能够进一步降低无机颗粒局部富集对涂层外观以及力学均匀性的影响。

表1 优化前后纳米SiO₂粉体分散效果对比表

对比项目	优化前工艺	优化后工艺
pH值	6.5	9.0
聚羧酸铵用量	0.8%	2.0%
超声功率	300 W	600 W
D50粒径	168 nm	82 nm
多分散指数	0.41	0.18
Zeta电位	-24.6 mV	-43.2 mV
静置72 h后粒径变化率	18.7%	4.3%

对比项目	优化前工艺	优化后工艺
静置72 h外观状态	底部轻微沉降	无明显分层
水性涂层透光率	86.4%	91.6%
涂膜铅笔硬度	2H	3H

4 结语

纳米 SiO₂ 粉体的稳定分散并非单一工艺参数作用结果，而是表面电荷调控、分散剂吸附层构建和机械能适度输入共同作

用的结果。弱碱性环境可增强颗粒负电性，适量聚羧酸铵可提供静电排斥与空间位阻，合理超声和搅拌有助于团聚体解离及新生界面稳定。后续研究可进一步关注高固含、多离子和复杂树脂体系中的吸附动态变化，以提升纳米无机粉体在实际工业体系中的分散可控性。

参考文献

[1]张开程, 徐刚. 前驱体水分含量对钇稳定氧化锆纳米粉体分散性的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2025, 43(05):765-771+832.

[2]孟新刚. 混合炸药中各组分间界面作用及力学增强机制研究[D]. 导师: 曹雄;徐金江. 中北大学, 2024.

[3]陈瑞欣, 郭彩缘, 沈旭初, 杜贤若, 李文娟, 袁丛辉, 郑高峰. 尾矿基轻质纳米纤维膜的静电纺丝制备及其阻燃性能[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2026, 65(01):169-177.

[4]赵静波, 夏红伟, 李洋, 朱加明, 万其军, 罗春雨. 探究阻垢剂作用机制与多元分类及体系发展应用[J]. 粘接, 2025, 52(10):90-93.

[5]吴景旭, 陈国庆, 吐尔迪·吾买尔. C8H8/PVP-rGO粉体的制备及在非极性溶剂中的分散性研究[J]. 炭素技术, 2025, 44(02):24-28.

[6]迪力夏提·阿不力孜. EPS对铁基生物炭吸附As(III)的调控机制研究[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(12):199-205.

[7]王鑫, 李恩泽, 肖夏慧, 程芳琴. 乳液在分离技术中的研究进展及应用[J]. 应用化工, 2025, 54(02):478-483.

[8]陈泽斌, 王学仁, 强洪夫, 付潇, 邹子杰. 固体推进剂基体/填料界面微观粘接性能研究进展[J]. 固体火箭技术, 2025, 48(03):372-382.

[9]董芋双, 王志国, 李徐佳, 赵越超, 赵子琦, 宋永臣. 基于热力学界面作用的表面活性剂驱油特性分析[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(12):3626-3633.

作者简介: 杨华(1988—), 男, 汉族, 本科, 研究方向为无机非金属材料。