文章编号: 1001-4543(2017)03-0183-07

DOI: 10.19570/j.cnki.jsspu.2017.03.005

基于多重光散射法及 DLVO 理论研究 TiO₂ 纳米颗粒在有机溶剂中的分散稳定性

付凤英 1 、 樊 丽 1 、 张 杰 2 、 朱学峰 1,2 、 陈海琴 1

(1. 上海第二工业大学城市建设与环境工程学院, 上海 201209; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要:利用 Turbiscan 多重光散射法研究了不同浓度的 TiO₂ 纳米颗粒在混合有机溶剂悬浮体系中的分散稳定性及 其影响因素。考察了不同浓度 TiO₂ 纳米颗粒在混合有机溶剂中的粒径变化情况。基于 DLVO 理论分析了 TiO₂ 纳米颗粒分散稳定性的机理。研究结果表明:随着混合有机溶剂悬浮体系中 TiO₂ 纳米颗粒浓度逐渐增大,悬浮体系稳定性趋于下降, TiO₂ 颗粒粒径逐渐增加且运动速率加快, 其机制在于 TiO₂ 粒子间的光子自由程逐渐降低, 相互间的 吸引作用力逐渐增大。

关键词: 多重光散射法; 纳米颗粒; 混合有机溶剂; 粒径; DLVO 理论

中图分类号: TO134.11 文献标志码: A

0 引 言

纳米颗粒是指尺寸在 1~100 nm 的超微粒子, 具有小尺寸效应、表面效应、体积效应等特点。纳 米颗粒因其较好的亲水性、热稳定性和机械强度, 广泛应用于环境等领域,如用于制备膜材料 [1-2]。然 而,由于纳米粉体具有极大的比表面积和较高的表 面能,在制备和使用过程中极易发生粒子的团聚,形 成二次粒子,致使其纳米效应减弱或失去,影响纳米 颗粒的作用效果。纳米颗粒在混合有机溶剂中的分 散是膜制备过程中的一个关键环节,研究和评价纳 米颗粒的分散稳定性具有重要意义 [3]。

影响纳米颗粒分散稳定性的因素很多,一般研究手段包括: zeta 电位法和扫描电镜法等 [4-6]。但上述方法对样品要求较高,高浓度样品需要经过稀释等多步操作,不能反映样品的真实状态,而且稳定性测量周期过长。为了探索纳米粉体在膜制备过程中的分散状况,本文利用 Turbiscan 多重光散射技术结合 DLVO 理论研究了纳米 TiO₂ 颗粒在铸膜液中的

分散稳定性。Turbiscan Tower 型分散稳定性分析仪采用多重光散射原理对样品进行实时监测扫描,并通过检测背散光强度和散射光强度的变化判断样品的稳定性程度,同时通过对体系中粒子移动的速率、沉淀相或乳化相的厚度、颗粒的平均粒径等进行直接观测,对引起不稳定变化的情况进行机理性研究 [7-9]。在对样品进行扫描的过程中,随着静置时间的延长,悬浮样品在上、中、下 3 部分出现不同光强变化,进而分析样品的稳定性状况。

与传统的表征手段相比, Turbiscan 多重光散射技术结合 DLVO 理论的方法具有以下优点:① 测定方法更客观准确, 样品无需稀释就可以研究其可逆或不可逆的不稳定现象, 避免了电镜等方法中的主观影响;② 样品稳定性表征测试周期短;③结合 DLVO 理论, 对样品的分散稳定性机理研究更透彻。

本文以 TiO_2 纳米颗粒为研究对象, 分析了 TiO_2 纳米颗粒在常用的铸膜液中分散稳定性随 TiO_2 纳米颗粒浓度变化的规律及机理。

收稿日期: 2017-02-24

通信作者: 朱学峰 (1983-), 男, 江苏张家港人, 副教授, 博士, 主要研究方向为膜分离处理污水及污泥研究。

E-mail: xfzhu@sspu.edu.cn.

基金项目: 上海第二工业大学研究生项目基金 (A01GY16F030) 资助

1 实验部分

1.1 实验材料及仪器

有机溶剂二甲基亚砜 (DMSO) 和 N, N-二甲基乙酰胺为化学纯,由国药集团化学试剂有限公司提供。纳米二氧化钛购自 Sigma-Aldrich 试剂有限公司,纯度为 95%的白色疏松状粉末,原始粒径为 22 nm,电导率为 9.64 S/m。凝固浴为自来水。本研究中使用仪器有 AS5150 型超声清洗机 (北京华瑞博远科技有限公司), Turbiscan Tower 稳定性分析仪 (法国 Formulaction 公司), 马尔文 zeta 电位仪

(Zetasizernano, ZS90, Malvern, UK).

1.2 实验方法

1.2.1 不同浓度纳米分散溶液制备

制备了多组不同浓度的溶液以探究纳米浓度对粒径、光子自由程及粒径间相互作用能的影响。将不同剂量 (0,0.02,0.05,0.1,0.15 和 0.3 g)的二氧化钛分别加入 24 mL 的 DMSO 和 DMAC 体积比为 1:1 的混合溶剂中,混合均匀并超声分散 20 min 后制得不同浓度的纳米悬浮液,编号为 T_1,T_2,\cdots,T_6 。其中 T_1 样品为不添加纳米二氧化钛的混合溶剂,以作为对比。悬浮液的组成及相关参数如表 1 所示。

表 1 不同悬浮液中组成及浓度

Tab. 1 The components and concentrations of various suspending solutions

				1 0	
悬浮液	$m_{ m TiO_2}/{ m g}$	$V_{ m DMSO}$ /m L	$V_{ m DMAC}/{ m mL}$	TiO_2 体积浓度, Φ /%	TiO_2 浓度, $C/(mg\cdot L^{-1})$
T_1	0	12	12	0.0000	0.00
T_2	0.02	12	12	0.0196	833.33
T_3	0.05	12	12	0.0489	2 083.33
T_4	0.1	12	12	0.0978	4 166.67
T_5	0.15	12	12	0.1467	6 250.00
T_6	0.3	12	12	0.2934	12 500.00

1.2.2 多重光散射技术分析 TiO₂ 分散体系稳定性

将制备好的约 20 mL 悬浮液样品缓缓加入透明石英样品瓶,随后置于温度为 25 °C 的等温室中,在波长为 880 nm 的近红外脉冲光源下进行实时多次扫描,每个样品的扫描时间为 3.5 h。该仪器的 2 个探测器,透射光 (T) 探测器和背散射光 (BS) 探测器从样品底部向顶部扫描,扫描曲线描绘出透射光及背散射光随样品高度的变化情况,进而反映出样品的内部微观变化。本实验中的纳米悬浮液的透明度较低,故结合背散射光来分析。混合溶剂组 (未添加纳米 TiO₂) 虽然透明,但作为控制组同样以背散射光分析。

测量原理: 背散射光强度 BS (%) 与分散体系中光子传递的平均自由程 λ^* (μ m) 的关系为 $^{[10-11]}$ 。

$$BS \approx \frac{1}{\sqrt{\lambda^*}}$$
 (1)

 λ^* 与颗粒体积浓度 Φ 成反比, 与颗粒平均粒径 d 成正比, 即

$$\lambda^* = \frac{2d}{3\Phi(1-q)Q_s} \tag{2}$$

式中, g 和 Q_s 是 Mie 定律常数, 对特定的光学仪器, g 和 Q_s 是定值。

利用 Turbiscan 软件处理可得出样品的稳定性指数 (TSI), 它是在选定的高度下, 比较每一次扫描测量对前一次扫描测量的光强度的变化, 并将结果累计至样品总高度而获得的结果, 反映样品浓度和颗粒粒径在整个放置时间内变化幅度的综合, 变化幅度越大, 稳定性动力学指数越大, 体系越不稳定。

1.2.3 纳米颗粒凝聚速率的分析

本研究使用马尔文 zeta 电位仪, 运用动态光散射 (dynamic light scattering, DLS) 原理对微观颗粒粒径进行持续测量得到颗粒随时间增长的关系, 从而计算得到颗粒的凝聚速率。所有得到的粒径数据均为 Z-average (平均粒径), 这些粒径数据都是由累积分析法所求得。马尔文 zeta 电位仪使用波长为 633 nm 的镭射光以 90° 的检测角度对样品进行动态光检测, 时常约为 60 min。凝聚速率使用斜率 $\Delta D/\Delta t$ (nm/min) 表示, 其中 ΔD 表示选定时间内纳米颗粒水力直径的增长 (nm), Δt 表示选定时间的

长短 (min)。

1.2.4 DLVO 理论分析

DLVO 理论认为胶体在一定条件下能否稳定存在取决于胶体之间相互作用的势能, 颗粒间的总势能 $(V_{\rm T})$ 为范德华作用势能 $(V_{\rm A})$ 和静电作用势能 $(V_{\rm R})$ 之和, 计算公式为

$$V_{\rm T} = V_{\rm A} + V_{\rm R} \tag{3}$$

对于球体和球体的碰撞, 范德华作用力和两球 形颗粒间静电作用力分别为:

$$V_{\rm A} = -\frac{Aa_1a_2}{6h(a_1 + a_2)}\tag{4}$$

$$V_{\rm R} = 64\pi \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} \left(\frac{K_B T}{ze}\right)^2 \gamma_1 \gamma_2 e^{(-kh)}$$
 (5)

式中: a_1 和 a_2 是球体的半径; h 是两球体的分离距离; A 是 Hamaker 常数; z 表示离子价态; e 表示单位原电荷; κ 是德拜长度; γ 为颗粒表面电荷的无量纲常数, 可由下式计算

$$\gamma = \tanh\left(\frac{ze\varphi}{K_B T}\right) \tag{6}$$

式中: φ 为表面电荷, 近似于颗粒的 zeta 电位。 此外本研究中 DLVO 计算所用 Hamaker 常数为 $1.00 \times 10^{-19[12]}$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度纳米颗粒的 Turbiscan 光谱分析

在利用 Turbiscan 多重散射法分析纳米颗粒分 散稳定性的研究中,多数研究探讨的是不同分散剂 对纳米颗粒分散稳定性的影响[13-14]。本研究选取 不同浓度的纳米 TiO₂ 颗粒, 利用 Turbiscan 多重散 射技术测定了不同浓度的纳米 TiO2 悬浮液背散射 光强随时间的变化 (见图 1)。图中: 横坐标表示样品 的高度(h),底部高度为零;纵坐标表示背散射光强 值, 图中不同曲线表示不同时间样品瓶内的背散射 光强情况。由图 1 可见, 悬浮液样品沿样品池高度 由低到高方向分为3个部分。在底部出现向上凸起 的峰,表示样品在底部出现沉淀。峰的强度也随浓 度的增大而逐渐增大,这表示纳米的沉淀现象越来 越严重。在样品的中部背散射光强度呈梯度式递减. 表明样品正逐渐在顶部出现澄清现象。在顶部的向 下的背散射光强峰更加验证了顶部澄清的这一现 象,且峰强度的高低反映了澄清现象的强弱[15-17]。 未添加纳米 TiO₂ 颗粒的 T₁ 样品的背散射光强则在 样品内部未出现明显的变化。添加纳米 TiO2的5组 样品中底部沉淀和顶部澄清现象随纳米 TiO₂ 颗粒 浓度的增大而逐渐增强。

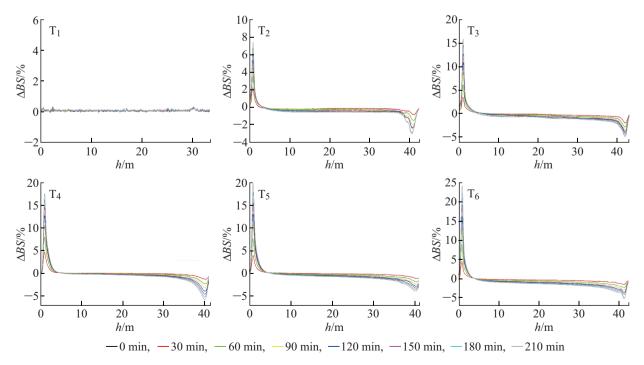


图 1 不同浓度的纳米 TiO₂ 悬浮液背散射光强随时间的变化图谱

Fig. 1 Backscattering light intensity variation for different concentrations of TiO₂ suspending solutions with the time

图 2 表示在样品中部的光强变化。由图可见,在 3.5 h 的测定过程中纳米 TiO₂ 悬浮液的背散射光强 逐渐降低, 且降低幅度逐渐增大。根据多重光散射的 理论可知, 在粒子体积浓度较小时, 背散射光强的降 低间接反映了纳米因团聚导致的粒径的增大[11]。 ΔBS 变化越小, 反映悬浮液越稳定, $T_1 \sim T_6$ 的 ΔBS 变化逐渐增大,表示悬浮液的稳定性随着纳米 TiO₂ 颗粒浓度的逐渐增大而增大 [18]。不同浓度的 纳米 TiO₂ 悬浮液的动力学参数如图 3 所示。稳定性 指数越大, 体系越不稳定 [19-20]。 $T_1 \sim T_6$ 号样品的 稳定性指数逐渐增大,且随着时间的延长逐渐增大。 这可能是因为随着浓度的逐渐增大,纳米团聚现象 越来越严重,上部的澄清、中部的絮凝和底部的沉 淀也越来越严重, 悬浮体系越来越不稳定, 且不稳定 性随时间的增加而逐渐增加[21]。底部的沉淀状况 如图 4 所示。图中 T₆ 号样品首先出现沉淀分层, 其 次是 $T_3 \sim T_5$ 号样品, 最后是 T_2 号样品。 T_6 号的分 层厚度最大, 即是说 T₆号的沉淀现象最严重, 其次

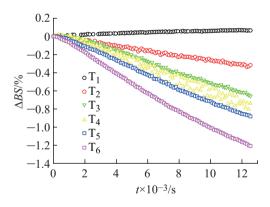


图 2 6 种悬浮液的 ΔBS 与时间的关系

Fig. 2 Relationships between ΔBS of six kinds of suspending solutions and time

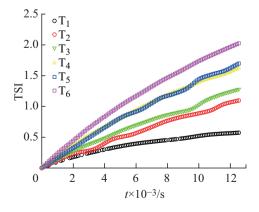


图 3 不同浓度的纳米 TiO₂ 悬浮液稳定性指数随时间变化 Fig. 3 The change of TSI for various concentration of TiO₂ suspending solution with the time

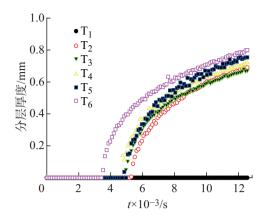


图 4 不同浓度的纳米 TiO₂ 悬浮液的分层厚度随时间变化 情况

Fig. 4 The changeof demixing thickness forvarious concentration of TiO₂ suspending solutions withthe time

是 T_5 号样品。沉淀厚度的顺序也与不稳定性状况基本一致。

2.2 不同浓度纳米 TiO_2 颗粒的粒径分析

图 5 表示 5 种不同浓度的纳米悬浮液中纳米 TiO_2 粒径的变化情况。由图可见, T_2 号悬浮液的纳米 TiO_2 粒径几乎不变,粒径大小较为稳定。然而 $T_3 \sim T_6$ 号 4 种浓度的悬浮液中纳米 TiO_2 粒径随时间变化较为明显。5 种悬浮液的粒径增长速率如表 2 所示。在 60 min 的测定时间内,5 种体系中纳米 TiO_2 颗粒的粒径随时间的延长而逐渐增大, T_2 悬浮液的增长速率最低为0.083 8,粒径增长极为缓慢。 $T_3 \sim T_6$ 号 4 种悬浮液中纳米 TiO_2 粒径的增长速率显著增加,随纳米 TiO_2 浓度的增大而逐渐由 T_3 号悬浮液的33.298 逐渐增加到 T_6 号悬浮液的51.303。 $T_3 \sim T_6$ 号 4 种浓度的悬浮液中纳米 TiO_2 溶液的稳定性也可能因粒径的快速增加而下降,而 T_2 号溶液因粒径变化而引起的稳定性的变化幅度

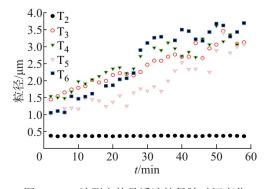


图 5 DLS 法测定的悬浮液粒径随时间变化

Fig. 5 Changes of particle sizes in the suspending solutions with the timewith DLS measurement

表 2 不同浓度的纳米 TiO₂ 悬浮液中粒径增长速率 Tab. 2 Growth rates of particle sizes in different concentrations of TiO₂ suspending solutions

	悬浮液						
	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6		
$\Delta D/\Delta t$	0.0838	33.298	34.774	38.053	51.303		

较小,该结果与多重光散射技术的稳定性指数 (TSI) 分析结果相一致,即 T_2 号悬浮液的稳定性最好, $T_3 \sim T_6$ 稳定性出现不同程度的下降。该现象也与 王萍等 [22] 在探索分散剂对纳米 TiO_2 悬浮液稳定性影响中的研究结果一致。

2.3 基于 DLVO 理论的作用力分析

传统的 DLVO 理论认为, 胶体粒子间同时存在着范德华引力和因双电层重叠而产生的静电斥力, 且两者均与粒子间距离有关。当粒子相互靠近时, 其间排斥能可以超过吸引能, 在总作用能一距离关系曲线上形成势垒, 从而阻止胶体粒子相互靠近和凝结, 使胶体体系稳定。DLVO 理论能很好地解释胶体和表面工程中很多实际作用力的情况, 故为了更加精确地探索 TiO₂ 纳米粒子的粒径及相互之间的作用力随悬浮液中纳米粉体体积浓度的变化情况, 本实验中又适当增加了纳米浓度实验组数。由多重光散射技术测定的不同体积浓度的下纳米 TiO₂ 颗粒的纳米粒径、光子自由程及 DLVO 理论分析的相互间作用力随时间的变化情况分别如图 6~8 所示。

由图 6 可知, 悬浮液中纳米 TiO₂ 的粒径随体积浓度的增加而逐渐增加。在浓度低于 0.08%时,粒径随浓度增加而变化较大, 在浓度超过 0.08%时粒径随浓度的变化逐渐趋于稳定。由图 7 可知, 悬浮液中纳米 TiO₂ 颗粒间的光子自由程随浓度的逐渐增大而逐渐减小。光子自由程表示粒子在连续 2 次碰撞之间所通过的自由路程的平均值, 在本体系中可简单理解为两纳米 TiO₂ 粒子之间的距离, 故在悬浮液中纳米 TiO₂ 浓度逐渐增大时, 纳米 TiO₂ 粒子间的距离逐渐减小 [^{23]}。Turbiscan 的光子自由程的测定很好地量化了随体积浓度变化而引起的纳米 TiO₂ 粒子间距离的变化过程。由此不难看出, 在高浓度时纳米 TiO₂ 粒子的光子自由程的变化也逐渐趋于稳定, 对应于图 6 所示粒径的变化规律。在高浓度时粒径的增长和光子自由程 (即两粒子间距离)

的减小逐渐降低可能是因为浓度较大时, 悬浮液中 纳米 TiO2 粒子间的挤压和浓缩程度已经很大。针 对高度浓缩的体系,即使增加体系中纳米颗粒的浓 度,纳米之间的粒径和浓缩程度的变化与低浓度体 系相比也不明显。图 8 展示了纳米 TiO₂ 粒子间的 相互作用能(U)随体积浓度的变化情况。不难看出, 纳米 TiO₂ 粒子间的相互作用力为负, 即呈现吸引作 用, 且随浓度的逐渐增大, 吸引作用力逐渐增大, 即 随悬浮液中纳米 TiO2 浓度的增大, 纳米间的团聚趋 势逐渐增大,越容易团聚。该现象与唐艳军等[24]在 利用 DLVO 理论对改性纳米 CaCO3 水相分散体系 的稳定机理探讨中认为改性纳米 CaCO3 水相分散 稳定性的改善主要归因于偶联剂在纳米颗粒表面的 吸附使得空间位阻效应变大,从而空间位阻势能增 大这一结论一致。由多重光散射理论, 因纳米团聚 而引起的悬浮液的稳定性也应该逐渐增大,这与图1

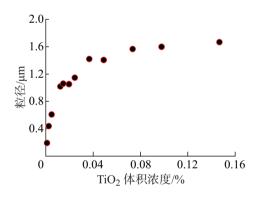


图 6 悬浮液中 Turbiscan 方法测定的粒径随 TiO₂ 体积浓度 的变化关系

Fig. 6 The relationship between particle sizes determined by Turbiscanwith volumnconcentrations of TiO₂ in the suspending solutions

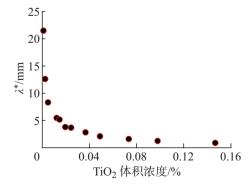


图 7 不同体积浓度下的纳米 TiO₂ 悬浮液中光子自由程的 变化情况

Fig. 7 The relationship between mean free paths determined by Turbiscanwith different volumn concentrations of ${\rm TiO_2}$ in the suspending solutions

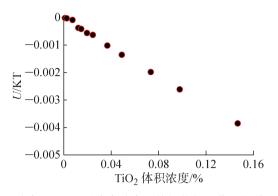


图 8 纳米 TiO₂ 悬浮液中纳米颗粒间的相互作用能随 TiO₂ 体积浓度的变化

Fig. 8 The change with interaction energy of nanoparticles with different volumnconcentrations of TiO₂ in the TiO₂ suspending solutions

中的光谱图和图 3 中的稳定性指数所呈现出的稳定性测定结果相一致。

3 结 论

本文用 Turbiscan 多重光散射技术系统分析了不同浓度的纳米 TiO₂ 颗粒在混合溶剂悬浮液体系中的背散射光谱图、体系稳定性和分层厚度,同时采用马尔文 zeta 电位仪对不同浓度的纳米 TiO₂ 颗粒在悬浮体系中粒径的变化情况进行了进一步的探究,为探索该体系中纳米 TiO₂ 颗粒分散稳定性的变化机理,本文采用 DLVO 理论进行作用能的相关分析,得到以下结论:

- (1) Turbiscan 分析表明, 随着纳米 TiO₂ 颗粒浓度逐渐增大, 混合溶剂悬浮体系在底部的沉淀和顶部的澄清逐渐加强, 背散射光强的变化也逐渐增大, 不同浓度体系的稳定性逐渐下降, 底部的分层厚度逐渐增加。
- (2) 纳米 TiO_2 颗粒分散稳定性与粒径变化相关。纳米 TiO_2 颗粒浓度升高, 其粒径增大, 增长速率提高, 而分散稳定性降低。
- (3) DLVO 理论分析表明, 逐步提高纳米 TiO₂ 颗粒浓度, 其粒径逐渐增大, 粒子间的光子自由程逐渐减小。当纳米 TiO₂ 颗粒浓度达到 0.08%以上时该变化趋于平缓。纳米 TiO₂ 颗粒间呈现吸引作用, 且作用能随浓度的增大而增大。

参考文献:

[1] 孙娥, 丁安伟, 张丽. 纳米分散系的制备与应用 [J]. 中国新药杂志, 2007, 16(2): 118-120.

- [2] 贾晓林, 谭伟. 纳米粉体分散技术发展概况 [J]. 非金属 矿, 2003, 26(4): 1-3.
- [3] 宋晓岚, 邱冠周, 杨振华, 等. 水相介质中纳米 CeO₂ 的分散行为 [J]. 稀有金属, 2005, 29(2): 167-172.
- [4] 董震, 杨建忠, 郭晓玲. 纳米 TiO₂ 粒子的分散研究 [J]. 印染助剂, 2005, 22(9): 28-30.
- [5] PI J K, YANG H C, WAN L S, et al. Polypropylene microfiltration membranes modified with TiO₂ nanoparticles for surface wettability and antifouling property [J]. Journal of Membrane Science, 2016, 500: 8-15.
- [6] MADAENI S S, GHAEMI N. Characterizaiton of selfcleaning RO membranes coated with TiO₂ particles under UV irradiation [J]. Journal of Membrane Science, 2007, 303(1): 221-233.
- [7] ARAUJO J, NIKOLIC S, EGEA M A, et al. Nanostructured liquid carriers for triamcinolone acetonide delivery to the posterior segment of the eye [J]. Colloids and Surfaces BBiointerfaces, 2011, 88(1): 150-157.
- [8] ATA S, YATES P D. Stability and flotation behaviour of silica in the presence of a non-polar oil and cationic surfactant [J]. Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects, 2006, 277(1): 1-7.
- [9] AZEMA N. Sedimentation behaviour study by three optical methods-granulometricand electrophoresis measurements, dispersion optical analyser [J]. Powder Technology, 2006, 165(3): 133-139.
- [10] 黄翔峰, 程航, 陆丽君, 等. 利用稳定性分析仪研究化学破乳过程 [J]. 化工进展, 2010, 29(5): 825-830.
- [11] 冯建国, 郁倩瑶, 史雅丽, 等. Turbiscan Lab 分散稳定性 分析仪研究异丙甲草胺水乳剂物理稳定性 [J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(6): 152-159.
- [12] WANG H, DONG Y N, ZHU M, et al. Heteroaggregation of engineered nanoparticles and kaolin clays in aqueous environments [J]. Water research, 2015, 80: 130-138.
- [13] 夏朝辉, 吕丽云, 王虹. Turbiscan Lab 多重散射法研究纳 米银溶胶的分散稳定性 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(7): 1992-1996.
- [14] 王锦, 王建利. Turbiscan Lab 浓缩体系分散稳定性分析仪在拟薄水铝石浆液中的应用 [J]. 铝镁通讯, 2006, 22(2): 22-25.
- [15] SZYMANSKA A, SADOWSKI Z. Effects of biosurfactants on surface properties of hematite [J]. Adsorption, 2010, 16(4/5): 233-239.
- [16] WISNIEWSKA M, SZEWCZUK-KARPISZ K. Removal possibilities of colloidal chromium (III) oxide from water using polyacrylic acid [J]. Environ Sci Pollut Res, 2013, 20(6): 3657-3669.
- [17] CERDEIRA M, PALAZOLO G G, CANDAL R J, et al.

- Factors affecting initial retention of a microencapsulated sunflower seed oil/milk fat fraction blend [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2007, 84(6): 523-531.
- [18] 孙术国, 高彦祥, 麻成金, 等. Turbiscan 分析仪快速评价 胡萝卜素乳状液的稳定性 [J]. 食品科学, 2008, 29(10): 93-96.
- [19] ATANASE L I, LERCHJP, RIESS G. Water dispersibility of non-aqueous emulsions stabilized and viscosified by apoly(butadiene)-poly(2-vinylpyridine)-poly(ethylene oxide) (PBut-P2VP-PEO) triblock copolymer [J]. Colloid Surf A-Physicochem Eng Asp, 2015, 464: 89-95.
- [20] MONDRAGÓN R, SEGARRAC, MARTÍNEZ-CUENCA R, et al. Experimental characterization and modeling of thermophysical properties of nanofluids at high temperature conditions for heat transfer applications [J]. Powder

- Technol, 2013, 249(3): 516-529.
- [21] CHO D, BAIK J.H, CHOI DH, et al. Dispersion stability of 1-octanethiol coated Cu nanoparticles in a 1-octanol solvent for the application of nanoink [J]. Appl Surf Sci, 2014, 309(4): 300-305.
- [22] 王萍, 李璐璐, 刘素文, 等. 分散剂对纳米 TiO₂ 悬浮液稳 定性的影响 [J]. 中国陶瓷, 2008, 44(20): 20-22.
- [23] BORDES C, SNABRE P, FRANCES C, et al. Optical investigation of shear- and time-dependent microstructural changes to stabilized and depletion-flocculated concentrated latex sphere suspensions [J]. Powder Technology, 2003.130(1): 331-337.
- [24] 唐艳军, 李友明, 薛国新. 改性纳米 CaCO₃ 分散体系稳 定性和扩展 DLVO 理论 [J]. 中国造纸学报, 2010, 25(2): 54-58.

The Study of TiO₂ Nanoparticle Dispersity in Organic Solvents Based on Multiple Light Scattering and DLVO Theory

FU Fengying¹, FAN Li¹, ZHANG Jie², ZHU Xuefeng^{1,2}, CHEN Haiqin¹

(1. School of Urban Developmentand Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The size of TiO₂ nanoparticles, the stability and processes like sedimentation and clarification of the suspending mixed organic solvents system were investigated by employing multiple light scattering technique. The change of nanoparticle size in various concentration of suspending solutions with time had also been explored. In order to clarify the mechanism of these changes, the interaction of nanoparticles in the systems by applying DLVO theory was analyzed. The results showed that along with the increase of the TiO₂ nanoparticle concentration in the suspending mixed organic solvents system, the suspending solution systems were increasingly unstable. The size of nanoparticles were increased gradually and the growth rate was also enhanced. The mechanism was that the mean free paths decreased and the attraction interaction increased gradually as well.

Keywords: multiple light scattering; nano-particles; mixed organic solvents; particle size; DLVO theory