

超声波增强微粒嵌入多孔膜片的试验研究

马建伟¹, 陈韶娟², 许文娜³

(1. 青岛大学纺织服装学院, 山东青岛 266071; 2. 天津工业大学, 天津 300160; 3. 青岛泰能集团, 山东青岛 266071)

摘要: 研究了利用超声波将 40nm 的 ZnO 微粒子嵌入到多孔纺织材料中的可行性和影响因素。研究表明, 纳米分散液浓度越高, 膜片的增重百分率 $W(\%)$ 也越高, 浓度增加到 1% 时, 增重率的增长幅度明显减缓; 超声波作用时间越长, 增重百分率 $W(\%)$ 也越高; 膜片在在距离超声波换能器 $\lambda/2$ 和 $3\lambda/2$ 处具有较高增重百分率 $W(\%)$, 而在 λ 和 2λ 时则较低; 对于 40nm 的 ZnO 微粒来说, 超声波的频率为 40 kHz 时, 膜片的增重百分率 $W(\%)$ 最高。

关键词: 纳米材料; 多孔材料; 超声波; 空化; 分散

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2008)-05-0684-06

Experimental research on enhancement of embedding particles into porous films by ultrasonic

MA Jian-wei¹, CHEN Shao-juan², XU Wen-na³

(1. Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China; 3. Qingdao Taineng Group, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: The feasibility of embedding 40 nm ZnO particles into porous materials by using ultrasonic and its influence factors are studied. Through investigations, it is proved that the higher the concentration of nanoparticle suspension, the higher the weight of embedding percentage (EPW). However, the increasing trend of EPW will minish quickly when the concentration exceeds 1%. In addition, the longer the process time of ultrasonic, the higher the EPW. EPW is always higher when the distance between film and ultrasonic transducer is $\lambda/2$ and $3\lambda/2$, and lower when the distance is λ and 2λ . For 40 nm ZnO particles, EPW of the film affected by the ultrasonic of 42 kHz reaches the maximum.

Key words: nano-materials; porous materials; ultrasonic; cavitation; dispersion

1 引 言

超声波在对微细粒子的作用方面有着自身的优势, 如分散作用、凝聚作用等, 并因此广泛应用于化学、染整、清洗等领域^[1-6]。利用超声波对纳米材料进行分散也是近几年的研究热点, 已取得许多研究成果^[7-9]。与此同时, 将纳米材料用于纺织品的后整理也受到了人们的广泛关注, 并开发了一些有价值的功能产品, 如抗菌、防紫外产品等^[10-12]。

大量研究表明, 超声波对纳米材料和微小粒子具有良好的分散作用, 其分散作用主要来自于超声

波的空化效应, 空化效应强弱与超声波的频率、功率和分散液的粘度等有关^[13-17]。

在超声波作用下, 分散液中的微粒受到声辐射力、冲流、Stokes 阻力、有效浮升力和重力的综合作用。其中, 声辐射力和冲流与超声波的功率、频率和粒子的体积有关。功率越大、频率越低、粒子的体积越大, 超声波的辐射力和冲流越强^[18-22]。Stokes 阻力则与分散液的粘度 u 、粒子的直径 d 和粒子的运动速度 v 有关。

本文研究表明, 利用超声波可以将微细颗粒材料暂时并充分地分散于水中, 与此同时利用超声波能量将微细粒子嵌入到多孔纤维材料中。嵌入的量与超声波的频率、微细粒子的粒径等有关。目前尚未见到这方面的报道。

在超声波场作用下, 纳米分散液中的纳米粒子主要受到声辐射力 (Acoustic radiation force) F_a 、

收稿日期: 2007-08-22; 修回日期: 2007-11-25

基金项目: 山东省自然科学基金项目资助 (Y2001 F04)

作者简介: 马建伟 (1959-), 男, 山东青岛人, 博士, 教授, 研究方向为纺织新材料, 新工艺, 新设备。

通讯作者: 许文娜, E-mail: xwn9@hotmail.com

stocks阻力(Drag force) F_d 和有效浮升力(Buoyancy force) F_b 的作用。

(1) 声辐射力

平面行波的声辐射力总是正值，即其方向总是与行波前进方向一样。而平面驻波的声辐射力每半个周期变化一次方向。

超声驻波声场与微粒所受辐射力的关系如图 1 所示。在声波场的波峰、波谷和驻点,微粒所受辐射力均为 0。声场中 A 和 B 处的辐射力的正负符号不同是因为辐射力的方向是不同的,但都指向就近的声场驻点,即声场中任意位置的微粒都有向就近声场驻点运动的趋势。

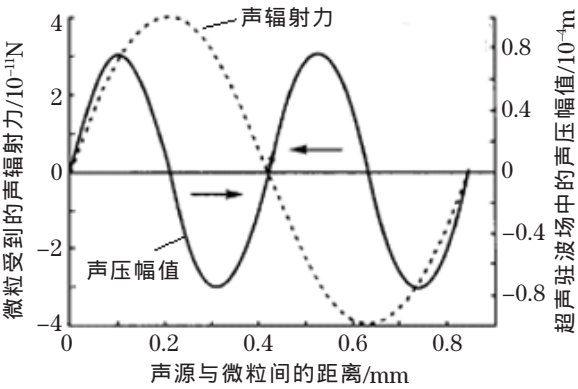


图 1 超声波声压幅值和微粒受到的声辐射力之间的关系

Fig.1 The relationship between the ultrasonic pressure and the radiation force on particles

设定微粒所处环境是连续的、没有粘性的理想介质,并且整个受力过程绝热,同时,超声波为小振幅波,环境温度为室温。刚性微粒在平面行波场中所受的声辐射力 F_a 的大小为^[23]:

$$F_a=R^3\kappa EF \tag{1}$$

其中, R 为颗粒半径, κ 是声波的波数, E 是声波的能量密度, F 是颗粒-流体体系的声对比因数。

悬浮颗粒会对该声波产生分散。颗粒与邻近颗粒产生的分散波场的相互作用会引起次级声辐射力。次级声辐射力会使得两个微粒或多孔材料与膜片的纤维之间相互吸引。尽管没有对悬浮颗粒与膜片参数之间的次级声辐射力进行预测,但是其大小应与文献[24]中预测的可将颗粒吸引到由玻璃珠组成的多孔介质中的次级声辐射力 ($F'_a \approx 4 \times 10^{-10} \text{N}$) 处于同一个数量级上。

(2) Stocks 阻力

在密度为 ρ_f , 粘度为 μ_f 的流体中, 直径为 d_p 的球形粒子以相对速度 v 运动时, 会受到来自流体的阻力 F_d , 当 $\text{Re} < 2$ (斯托克斯区域) 时, 可证明:

$$F_d=3\pi \cdot \mu_f \cdot d_f \cdot v \tag{2}$$

可见, Stocks 阻力与流体的密度、粘度、相对速度和粒子的直径成正比。

(3) 有效浮升力

有效浮升力是指微粒受到重力和浮力作用的总合。其值可由式(3)表示:

$$F_b=(\rho_f-\rho_p)g \cdot \frac{\pi}{6}d_p^2 \tag{3}$$

可见, 粒子的直径越大, 密度越小, 其有效浮升力越大。

由于分散液受到超声波的扰动, 在多孔介质中的颗粒也会受到一个水的阻力。表面移动的微粒的水阻在理论和实验上都有所研究^[25]。因此, 可以认为无论是主声辐射力还是次级声辐射力都大于颗粒在水中所受的阻力。由此可对多孔介质诱捕颗粒现象进行三方面的解释。

1.1 主声辐射力诱捕和多孔介质截留

如果多孔介质不会对主声场的传播影响很大, 那么单个颗粒可能会受到主声辐射力。对于声对比因数为正的颗粒(大多数悬浮于水中的固体), 声辐射压力会使微粒在声压节处聚集。多孔介质的作用可能仅仅是防止颗粒被液体带走, 因为流体试图把颗粒带走, 而颗粒的运动(沿流动方向)会受到由多孔材料组成的固体物质的阻挡。主声辐射压力会阻碍在障碍物周围的颗粒的任何运动, 并将它们送到节点位置。

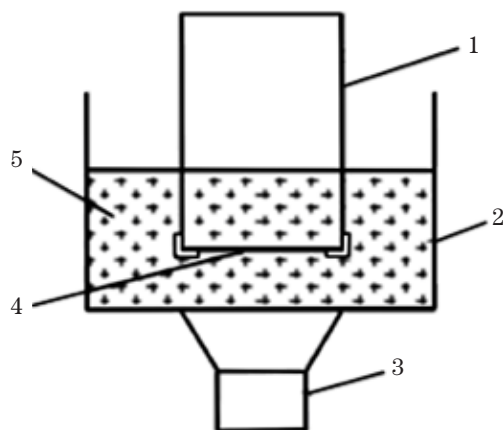
1.2 次级声辐射力形成的颗粒絮凝

在悬浮颗粒之间作用的次级声辐射力会引起颗粒之间的表面絮凝。当声波停止作用时, 由于流体拖力作用这些絮状物很容易分散开。如果这些絮状物比多孔介质的孔颈处大, 他们将会截留在里面。或者在主声辐射力的作用下, 颗粒将被压缩在驻波的节点位置, 此声辐射压力可以防止絮凝物被流体从膜片中带走。

1.3 次级声辐射力使微粒沉积在多孔介质表面

在微粒与多孔介质间的次级声辐射力会直接引起多孔介质内颗粒的沉积。在次级声辐射力的作用下, 颗粒会很牢固地嵌在多孔介质的内表面以致于流场根本不能带走它们。次级声辐射力会依次使其它的微粒粘附于上一层微粒上。

对于多孔介质对微粒截流的精确机理, 目前还需要继续研究。自从 1956 年 Biot 建立了理论以来^[26,27], 弹性波在浸透液体的多孔介质中的传播得以广泛研究。但是, 据我们所知, 里面没有提到微粒在多孔介质中所受的声辐射力。



1-试样夹持器 2-整理槽(底部尺寸为 12 cm×12 cm) 3-换能器
4-试样(多孔材料) 5-分散液(悬浊液)

图2 超声波设备的处理槽示意图

Fig.2 Schematic design of the treatment unit of ultrasonic equipment

通过和悬浮液的液体部分耦合使得超声平面波可以在多孔介质中传播。如图2所示,当悬浮液通过试样时,由于声波辐射力的作用,颗粒被留在了多孔介质中。对于溶剂是水的悬浮液来说,水的声阻抗($1.5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)与多孔介质的(聚丙烯为 $3.0 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)有一定差异。因此,一般认为,当声波穿过多孔介质时将会有对声波的内部反射和散射。在实验中,主声场的波长可与多孔介质参数的尺寸相比。因此,认为在充满多孔介质的流体内部的声场具有三维特性并且不易精确地描述。然而,假设作用于颗粒上的声辐射力由一个简单的声场产生,这有助于了解多孔介质截取颗粒装置的机理。

在驻波系统中,超声波辐射力将把纳米 ZnO 粒子从声压腹处推向声压节处,当粒子聚集到一定的重量后,足以克服液体的 Stocks 阻力和有效浮升力时,就开始沉淀。当聚集到一起的粒子没有遇到足够强大的超声波的作用,只是受到超声波的扰动,聚集到一起的粒子不会分散开。当聚集到一起的粒子一旦遇到足够强的超声波作用时,则聚集在一起的粒子将被超声波重新粉碎而形成悬浮液。

2 材料和方法

2.1 测试方法

颗粒材料: ZnO 颗粒平均粒径 40nm, 粒径分布如图3所示,由上海博纳科技有限公司提供。

织物试样:熔喷法聚丙烯过滤膜片(pp 滤膜),厚度为 $150 \mu\text{m}$, 平方米克重为 8 g/m^2 , 平均孔径 150 nm 。平均孔径用石油泡点法测量;水流速度为

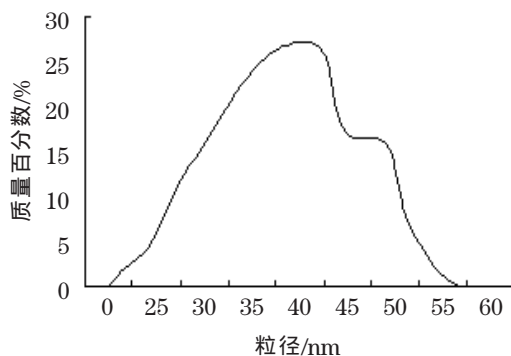


图3 纳米 ZnO 的粒径分布

Fig.3 The particle size distribution of nano ZnO

10ml/min, 孔隙率为 73%, 气泡压力为 8 g/m^2 。试样直径为 10cm。由上海新亚过滤器有限公司提供。试验前,需对试样进行煮炼处理。

超声波处理机:包括四个独立的处理槽($12 \text{ cm} \times 13 \text{ cm} \times 14.5 \text{ cm}$)、一个信号发生器(A001, 青岛大学)和一个信号放大器(B001, 青岛大学)。每个处理槽的底部都安有一只功率为 60W 的换能器,频率分别为:28kHz、40kHz、51kHz、59kHz。

2.2 测试方法

试验步骤:试验前,先将试样在 80°C 下烘 2h, 放在干燥皿冷却干燥 24h, 用精度为 0.0001g 的天平称取试样原始重 G_0 ;在处理浴中加蒸馏水 1000ml, 加纳米 ZnO 5g, 助剂 0.5%(根据需要), 调整 pH 值为 7, 开启超声波处理机, 预分散 20min, 然后, 将试样固定在夹持装置上, 并将夹持装置固定在选定频率的处理槽中, 使试样距超声波换能器 5cm, 如图2所示(可以认为此系统为驻波系统)。开启超声波处理机, 在选定的超声波频率下处理 20min。然后取下试样, 用蒸馏水冲洗 2 遍, 再用蒸馏水在超声波作用下清洗 3 遍, 每次 10min。最后取出试样, 在 80°C 下烘干 2h, 再放在干燥皿中冷却干燥 24h, 用精度为 0.0001 g 的天平称取嵌入微细颗粒材料后的试样重量 G_1 ; 每一试验重复 5 次, 取平均值计算粒子的嵌入重量百分率 $W(\%)$:

$$W(\%) = \frac{(G_1 - G_0)}{G_0} \times 100\% \quad (4)$$

3 结果和讨论

3.1 纳米分散液浓度对增重百分率 $W(\%)$ 的影响

试验条件:频率为 40kHz, 距离为 $3\lambda/2$, 时间为 20min。

纳米分散液浓度对增重百分率 $W(\%)$ 的影响趋势是随着纳米分散液浓度增加, 膜片的增重率 W

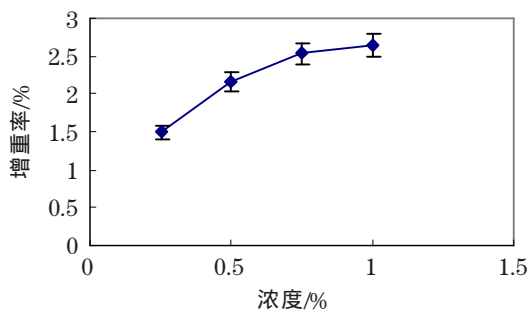


图 4 纳米分散液浓度对增重率的影响

Fig.4 Influences of the concentration of nano dispersion on EPW

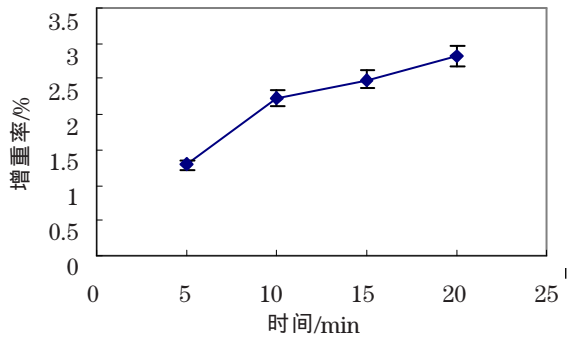


图 5 超声作用时间对增重率的影响规律

Fig.5 Influences of the process time on EPW

(%)也逐渐增加,浓度增加到 1%时,增重率的增长幅度明显减缓。如图 4 所示。

3.2 超声波作用时间对膜片的增重百分率 $W(\%)$ 的影响

试验条件:频率为 40kHz,距离为 $3\lambda/2$,浓度为 0.5%。

如图 5 所示,随着超声波作用时间的延长,增重百分率 $W(\%)$ 持续增加。

3.3 膜片与声源之间的距离对膜片增重的影响

超声波的频率不同,其波长不同,声压节和声压腹的位置也是不同的。本文针对 28kHz、40kHz、51kHz 三种频率,分别将试样置于 $\lambda/2$ 、 $3\lambda/4$ 、 λ 、 $3\lambda/2$ 、 2λ 处,测定增重率 $W(\%)$ 。分散液浓度为 0.5%,作用时间为 20min。

3.3.1 超声波频率为 28kHz 时

膜片与声源距离对增重率的影响规律是随着距离的增加,增重率曲线呈波动状,如图 6 所示。试样在距离为 λ (5.36cm)和 2λ (10.72cm)处增重率均较低,在 $\lambda/2$ (2.68cm)和 $3\lambda/2$ (8.04cm)处增重率均较高。 $W_{\min}(\%)$ 为 0.89%, $W_{\max}(\%)$ 为 4.36%。

3.3.2 超声波频率为 40kHz 时

影响规律也为波动状,如图 7 所示。试样在距离为 $3\lambda/2$ (5.63cm)处增重率最高。 $W_{\min}(\%)$ 为 2.55%, $W_{\max}(\%)$ 为 5.81%。

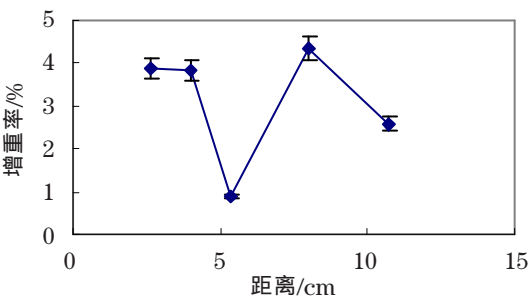


图 6 28 kHz 时膜片与声源之间的距离对增重率的影响

Fig.6 Influences of the distance between the film and sound source on EPW when the frequency is 28 kHz

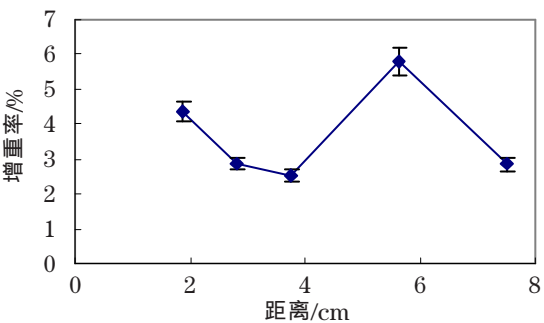


图 7 40kHz 时膜片与声源之间的距离对增重率的影响

Fig.7 Influences of distance between the film and sound source on EPW when the frequency is 40kHz

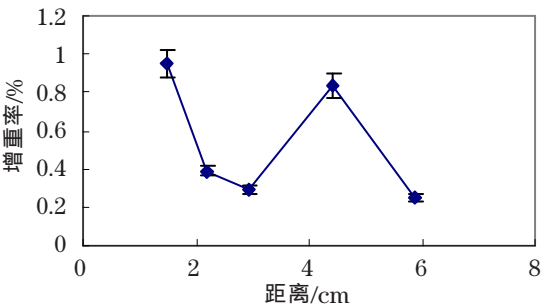


图 8 51kHz 时膜片与声源之间的距离对增重率的影响

Fig.8 Influences of the distance between the film and sound source on EPW when the frequency is 51kHz

3.3.3 超声波频率为 51kHz 时

影响规律仍为波动状,如图 8 所示。试样在距离为 λ (2.94cm)和 2λ (5.88cm)处增重率均较低,在 $\lambda/2$ (1.47cm)和 $3\lambda/2$ (4.41cm)处增重率均较高。 $W_{\min}(\%)$ 为 0.25%, $W_{\max}(\%)$ 为 0.95%。

比较图 6、图 7、图 8 可以发现,对 40nm 的 ZnO 来说,频率为 40kHz,试样距声源 $3\lambda/2$ (5.63cm)时,增重率最高,高达 5.81%。而频率为 51kHz 时,试样距声源 2λ (5.88cm)时,增重率最低,只有 0.25%,相差 20 多倍。这对纳米材料的功能整理来说是极其重要的。

3.4 超声波频率对增重百分率 $W(\%)$ 的影响

对超声波频率分别为 28kHz、40kHz、51kHz、59kHz 时对增重百分率 $W(\%)$ 的影响进行试验。试样距超声波换能器为 $3\lambda/2$,处理时间为 20min。试验

结果如图 9 所示。随着超声波频率的增大,膜片的增重率有增加的趋势,到 40kHz 以后,随着超声波频率的增大,膜片的增重率迅速减小。这可能与空化阈值随着超声波频率的提高而提高有关。

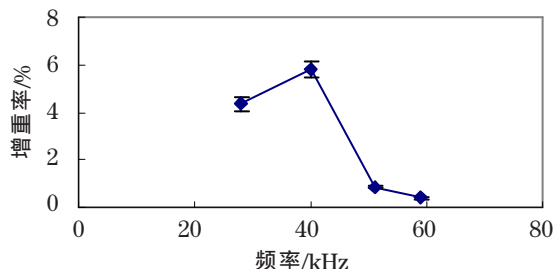


图 9 超声波频率对增重率的影响规律

Fig.9 Influences of the frequency of ultrasonic on EPW

3.5 电镜观察

图 10 是频率为 28kHz 超声波作用 20min 后,纳米材料在膜片断面的扫描电镜照片。

由图 10 可知,纳米材料确实已进入多孔材料的内部。几乎所有的膜片断面的扫描电镜照片均有纳米材料溢出的现象,这与纳米材料受到“孔喉”周围的纤维挤压有关。

尽管每次试验的最后都对试样进行冲洗和超声波清洗,但是进入多孔纺织材料内的粒子大部分不能清洗出来。因此,一般情况下在纺织材料的内部,超声波的能量达不到空化阈,轻微的振动,反而可以增加纳米粒子之间的碰撞,导致凝聚沉淀于“孔壁”上。这也就确定了进入多孔材料的粒子具有较好的牢度和耐久性。

4 结 论

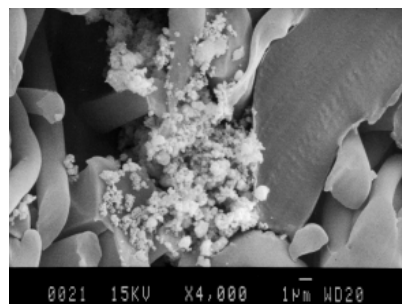
(1) 超声波场中的微粒主要会受到三种力的作用:声辐射力、有效浮升力和 stocks 阻力,其中以声辐射力的作用最为显著。

(2) 微粒在超声波场中将会更多的嵌入到多孔材料中,其作用机理可以有三种解释:

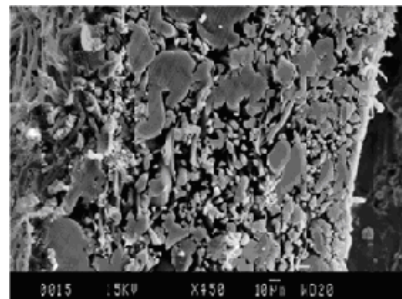
①主声辐射力使微粒向声压节(或声压腹)处聚集而诱捕;②微粒间的次级声辐射力使微粒产生适当絮凝,防止微粒随水流流出;③微粒和多孔材料间的次级声辐射力使微粒与多孔材料表面牢固结合。

(3) 以聚丙烯过滤膜片作为多孔材料,在超声波作用下,微小粒子能够深深地嵌入到膜片中,嵌入的量与以下几个参数有关。

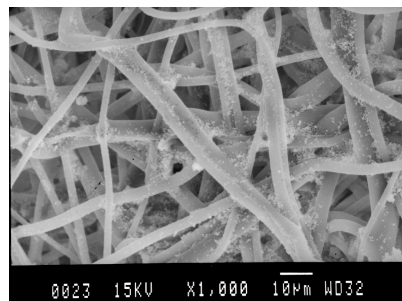
①纳米分散液浓度越高,膜片的增重百分率 $W(\%)$ 也越高,浓度增加到 1%时,增重率的增长幅度明显减缓。②超声波作用时间越长,增重百分率 $W(\%)$



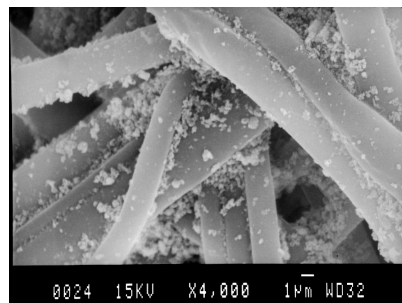
(a) 膜片内部的纳米材料



(b) 横截面上的纳米材料分布情况



(c) 表面(面向超声换能器的表面)上的纳米材料分布情况



(d) (c)的放大图

图 10 经过超声纳米整理的膜片的内部扫描电镜照片

Fig.10 SEM photos of the internal film finished with nano-materials by ultrasonic

(%) 也越高。③膜片在在距离超声波换能器 $\lambda/2$ 和 $3\lambda/2$ 处具有较高增重百分率 $W(\%)$,而在 λ 和 2λ 时则较低。④对于 40nm 的 ZnO 微粒来说,超声波的频率为 40kHz 时,膜片的增重百分率 $W(\%)$ 最高。

可以推知,只要选择适宜的声场参数(频率、功率)就可以使处理浴中超声波的能量在多孔材料外部达到对超声分散目的,而在多孔材料内部对纳米材料实现超声凝聚,从而拓宽了纳米材料在纺织品功能整理应用途径。

需要指出的是,对于不同纳米材料和不同纺织品来说,声场参数(频率、功率)和助剂对颗粒材料嵌入百分率的影响是不同的,其影响规律和机理有待进一步研究,这些将在另文中加以报道。

(4)通过观察膜片的扫描电镜照片可知,纳米材料可以较深地嵌入膜片内部,在膜片孔隙位置纳米材料聚集现象较为突出;嵌入膜片的纳米材料有较好的水洗牢度,在经过多次试验洗涤后膜片中仍旧保留可观数量的微粒。

参 考 文 献

- [1] LIU Y, YANG H, Sakanishi A. Ultrasound: Mechanical gene transfer into plant cells by sonoporation. *Biotechnology Advances*[J]. 2006, **24**(January/February): 1-16.
- [2] Shao H P, Lee Hyosook. Synthesis of nano-size magnetite coated with chitosan for MRI contrast agent by sonochemistry[A]. *Intermag Asia 2005: Digests of the IEEE International Magnetism Conference*[C]. 2005; 231.
- [3] Thakore K A, Smith C B, Clapp T G. Application of ultrasound to textile wet processing[J]. *ADR*, 1990, **79**(10): 30-38, 44.
- [4] Saligram A N, Shukla S R, Mathur M. Dyeing of polyester fibers using ultrasound[J]. *JSDC*, 1993, **109**(July/August): 263-266.
- [5] 姜岩, 陆丽欣. 声化学及其在纺织品染色工艺中的应用[J]. *印染*, 1998, **24**(11): 52-54.
JIANG Yan, LU Lixin. Application of ultrasonic wave to textiles dyeing[J]. *Dyeing and Finishing*, 1998, **24**(11): 52-54.
- [6] 陈思忠. 我国功率超声技术近况与应用进展[J]. *声学技术*, 2002, **21**(1): 46-49.
CHEN Sizhong. The present situation and its application developing trend of high power ultrasonic technique in China[J]. *Technical Acoustics*, 2002, **21**(1): 46-49.
- [7] 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.
SONG Xiaolan, QIU Guanzhou, YANG Zhenhua, et al. Dispersion behaviors of CeO₂ nanoparticles in water suspension[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*. 2005, **29**(2): 167-172.
- [8] 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, 21.
JIA Xiaolin, TAN Wei. Development of dispersion technology on nanopowder[J]. *Nonmetallic Mines*, 2003, **26**(4): 1-3, 21.
- [9] 李召好, 李法强, 马培华. 超细粉末团聚机理及其消除方法[J]. *盐湖研究*, 2005, **13**(1): 31-36.
LI Zhaohao, LI Faqiang, MA Peihua. Elimination Methods and mechanism of agglomeration of ultrafine powders[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2005, **13**(1): 31-36.
- [10] 王玉辉, 孟家光. 纳米抗菌织物的杀菌机理及制备方法[J]. *针织工业*, 2005, 6: 56-58.
WANG Yuhui, MENG Jianguang. The sterilization mechanism and producing method of nano-anti-bacterial fabrics [J]. *Knitting Industries*, 2005, 6: 56-58.
- [11] 马振华, 许海育. 纳米材料防紫外线整理的应用研究[J]. *印染助剂*, 2005, **22**(4): 11-14.
MA Zhenhua, XU Haiyu. Research on the application of the nanometer material anti-uv finishing[J]. *Textile Auxiliaries*, 2005, **22**(4): 11-14.
- [12] Mehert, Reiner et al. UV-curable acrylate nanocomposites for functional coatings: properties and applications[J]. *VDI Berichte*, 2005, 45-53.
- [13] 孙丹红, 石碧. 声空化—声化学反应的主动动力[J]. *皮革科学与工程*, 2001, **11**(3): 18-22.
SUN Danhong, SHI Bi. Cavitation—Main power of sonochemistry[J]. *Leather Science and Engineering*, 2001, **11**(3): 18-22.
- [14] 王萍辉. 超声空化影响因素[J]. *河北理工学院学报*, 2003, **25**(4): 154-161.
WANG Pinghui. A study and analysis on influencing factor of the ultrasonic cavitation[J]. *Journal of Hebei Institute of Technology*, 2003, **25**(4): 154-161.
- [15] 高秋生. 对液体空化机理的进一步探讨[J]. *河海大学学报*, 1999, **27**(5): 63-67.
GAO Qiusheng. Further exploration of liquid cavitation mechanism[J]. *Journal of Hohai University*, 1999, **27**(5): 63-67.
- [16] 黄继汤. 空化与空蚀的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991. 25-29.
HUANG Jitang. Theory and application of cavitation and cavitation damage[M]. Beijing: Qinghua University Publishing House, 1991. 25-29.
- [17] Uchida, Takeyoshi, Hamano, et al. Basic study on effects of acoustic intensity and sound pressure on surface modification and dispersion of diamond particles[J]. *Proc. IEEE Ultrasonics Symposium (Montreal)*, 2004. III.1635-III.1638.
- [18] 吴嘉, 李冰航. 驻波管中的颗粒悬浮现象及其分析[J]. *实验力学*, 2001, **16**(2): 180-187.
WU Jia, LI Binghang. Particles suspension in a standing wave tube and its analysis[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2001, **16**(2): 180-187.
- [19] King L. B. On the acoustic radiation pressure on sphere. [M]. London: Pro R. Soc, 1934, A147: 211-240.
- [20] Rudnick J. Measurements of the acoustic radiation pressure on a sphere in standing wave field [J]. *J. Acoust. Soc. Am*, 1951, **23**: 633-634.
- [21] Westervelt P J. The theory of steady force caused by sound waves[J]. *J Acoust. Soc. Am* 1951; 23: 312-315.
- [22] Simon A. Penpenic L, Gondrexon N, Taha S, Dorange G. A comparative study between classical stirred and ultrasonically-assisted dead-end ultrafiltration[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2000, 7: 183-186.
- [23] 杨克己, 张宝龙. 微构件所受超声辐射理论研究[J]. *工程设计学报*, 2004, **11**(6): 316-320.
YANG Keji, ZHANG Baolong. Theoretical research on ultrasonic radiation force of micro-components[J]. *Journal of Engineering Design*, 2004, **11**(6): 316-320.
- [24] Sanjay Gupta, Donald L. Foke. Acoustically driven collection of suspended particles within porous media [J]. *Ultrasonics*, 1997, **35**: 131-139.
- [25] Schlichting H. Boundary layer theory [M]. New York: McGrawHill, 1968, 154.
- [26] 唐爱民, 梁文芷. 超声波预处理对速生材木浆纤维结构的影响[J]. *声学技术*, 2000, **19**(2): 30-34.
TANG Aimin, LIANG Wenzhi. Studies on the structure changes of fast-growing wood fiber treated by ultrasonic wave[J]. *Technical Acoustics*, 2000, **19**(2): 30-34.
- [27] 何友秦. 超声波清洗(一)[J]. *声学技术*, 1990, **9**(2): 46-48.