

## Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) 纳米核壳颗粒电流变行为

杨建国<sup>1</sup>, 纪松<sup>2</sup>, 孟庆伟<sup>1</sup>, 谭锁奎<sup>2</sup>, 郭红燕<sup>2</sup>, 赵红<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024; 2. 中国兵器科学研究院宁波分院, 宁波 315103)

**摘要:** 通过 Sol-Gel 法制备出 Ni 颗粒表面均匀包覆尿素掺杂二氧化钛涂层的纳米核壳颗粒 Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea), 对其电流变行为进行了研究. 结果表明颗粒热处理温度和尿素加入量对其电流变活性有较大影响, 热处理温度高于 320℃ 以后剪切强度明显降低; 尿素与 Ti 的质量比为 30% 时, 剪切强度达到 40kPa (4kV/mm 直流电场), 是无尿素时的 10 倍, 但过量的尿素使强度下降. 显微镜观察直流电场下电流变液的结构显示, 尿素与 Ti 的质量比为 30% 时核壳颗粒电流变液形成的柱粗壮、致密, 尿素过量时柱产生断裂, 无尿素时柱纤细、疏松. 尿素中的极性分子是影响 Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) 颗粒电流变行为的重要因素.

**关键词:** 电流变效应; 纳米镍; 极性分子; 二氧化钛

中图分类号: TB381

文献标识码: A

## Electrorheological Behavior of Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) Core-shell Nano Particles

YANG Jian-Guo<sup>1</sup>, JI Song<sup>2</sup>, MENG Qing-Wei<sup>1</sup>, TAN Suo-Kui<sup>2</sup>, GUO Hong-Yan<sup>2</sup>, ZHAO Hong<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Sciences, Ningbo 315103, China)

**Abstract:** The Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) core-shell nano particles composed of nano Ni particles and urea-doped TiO<sub>2</sub> coating, were synthesized by using Sol-Gel method, and their electrorheological (ER) behaviors were investigated. The results show that ER activity of the particles are closely associated with heat-treatment temperature and urea content. The shear stress decreases when the particles is heat-treated above 320℃. When the mass ratio of urea to Ti is 30%, the shear stress of the ER fluid made from Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) particles reaches 40kPa (the DC electric field is 4kV/mm), which is 10 times as high as that made from particles without urea. However, the shear stress decreases when excessive urea is added. The microstructure observation of the ER fluids under DC electric field shows that the particles aggregate to form thicker and dense column structure when the mass ratio of urea to Ti is 30%, while the column structure is broken when excessive urea (>30%) is added. A thin and loose column structure is formed in ER fluid without urea added. It is suggested that the ER behaviors is substantially correlated with the polar molecules in urea.

**Key words:** electrorheological effect; Ni nano-particle; polar molecule; TiO<sub>2</sub>

电流变液一般是由可极化颗粒(分散相)分散于绝缘油(基液)中形成的一种悬浮液. 当对它施加电场时, 其粘度、剪切强度瞬间变化几个数量级, 由低粘度流体转换到高粘度固体. 当电场撤去以后, 它又可以在毫秒时间内恢复到液态, 这种变化可逆、连续, 表现出良好的电控力学行为, 在交通工具、液压设备、机械制造业、传感器技术等领域具有广泛的应用前景. 但是目前电流变材料的强度较低, 尚不能满

足工程应用需要<sup>[1-5]</sup>.

颗粒极化是产生电流变效应的重要原因, 分散相微粒必须由可极化分子构成, 或者其表面上有大量可极化性分子或离子对<sup>[6]</sup>. 目前已开发出许多具有可极化性分子或离子对的分散相微粒材料, 如无机化合物 SiO<sub>2</sub>、金属氧化物 TiO<sub>2</sub>、钛酸盐 BaTiO<sub>3</sub>、有机高分子材料明胶以及一些高分子半导体材料等<sup>[7-10]</sup>. 为了使颗粒具有较高的极化性能, 人们还在导电性

的金属颗粒表面包覆陶瓷涂层作为分散相. Conrad 等<sup>[11]</sup>通过对不同方式包覆的复合颗粒结构的研究,从理论上预言,由高介电常数的绝缘外层包覆高导电核心结构,其剪切屈服应力的理论值可望达到 100kPa. 这是由于高导电核心具有较大的极化强度,提供适宜的电导率,而陶瓷绝缘外层可以提高材料的耐电场击穿能力,并有效限制表面电荷的运动,提高链结构的稳定性<sup>[12]</sup>. 但是目前该类核壳颗粒电流变强度仍然远低于其理论预测值,仅达到 2kPa<sup>[13-14]</sup>. 为了提高其电流变强度,需要进一步提高颗粒的极化强度.

2003 年温维佳等<sup>[15]</sup>制备了用尿素包覆草酸钛钡纳米颗粒电流变液,极大地提高了电流变效应,所提出的“表面极化饱和”模型成功地解释了其高强度电流变液的产生原因,其主要源于颗粒表面形成的饱和极化层之间的相互作用,从而使电流变液材料的研究和应用发展到一个新阶段. 本工作开发出一种由金属纳米 Ni 颗粒表面包覆二氧化钛 ( $\text{TiO}_2$ ) 和尿素 (Urea) 组成的核壳颗粒  $\text{Ni}/(\text{TiO}_2 + \text{Urea})$  作为电流变液的分散相,并对其电流变行为进行了研究.

## 1 实验过程

### 1.1 $\text{Ni}/(\text{TiO}_2 + \text{尿素})$ 核壳颗粒电流变液的制备

采用溶胶-凝胶 (sol-gel) 法制备  $\text{Ni}/(\text{TiO}_2 + \text{Urea})$  核壳颗粒. 首先对 Ni 颗粒进行表面活化-羟基化处理,然后加入二氧化钛的前驱物钛酸盐,使其包覆在羟基化的 Ni 颗粒表面,随后水解缩聚生成第一层无定形  $\text{TiO}_2$  包覆层. 为了使包覆层厚度均匀,对颗粒进行两层循环包覆工艺,具体实施方案为:将  $\phi 50\text{nm}$  的镍粉放入  $8\text{mol/L}$  NaOH 的水溶液中浸泡 20min 进行羟基化处理,从溶液中磁性分离出颗粒,向颗粒中加入钛酸四丁酯的乙醇溶液 ( $V(\text{钛酸四丁酯}):V(\text{无水乙醇}) = 1:1$ ), 超声搅拌并分离颗粒;然后加入含有去离子水、尿素的无水乙醇混合溶液,通过调节尿素与钛的质量比例控制尿素加入量,超声搅拌并分离颗粒,将颗粒进行热处理烘干,再将颗粒放入 NaOH 的水溶液中重复上述包覆过程两次,获得  $\text{Ni}/(\text{TiO}_2 + \text{Urea})$  复合颗粒. 同时,按以上步骤在不加尿素条件下制备  $\text{Ni}/\text{TiO}_2$  核壳颗粒. 将一定质量的颗粒与复合基液 ( $V(\text{氟硅油}):V(\text{甲基硅油}) = 1:1$ ) 配制成电流变液.

### 1.2 核壳颗粒结构及电流变活性的表征

将颗粒在乙醇中超声分散均匀,置于透射电镜铜网上,在透射电镜 (TEM) 上观察颗粒核壳结构;将颗粒在傅立叶红外光谱分析仪 (FT-IR) 上进行官能团检测;在 X 射线衍射仪 (XRD) 上对颗粒进行晶体结

构分析.

电流变液的剪切应力及其与剪切速率的关系由改装的 NXS-11A 型 (成都仪器厂制备) 旋转粘度计测量,转子底端圆盘与固定外桶底端间距为  $(1.000 \pm 0.001)\text{mm}$ , 剪切速率范围  $0.1 \sim 996\text{s}^{-1}$ , 在转子与固定外桶壁之间接入直流高压电源,并接入微安表测量电流变液的漏电流密度.

通过自制的微型电流变液槽,在具有照相及摄像-计算机即时监控功能的 SZX12 型 Olympus 正置显微镜上对直流电场下颗粒的成链过程、结构形态进行观察,实验装置如图 1 所示. 观察时,将电流变液滴入到粘接在玻璃片上的间距  $1\text{mm}$  的两铜板组成的空隙内 (微型电流变液槽),施加电场,通过摄像镜头和相机采集图像,在计算机上实时观察,采用显微镜的放大倍率为 225 倍,电极间施加的电场强度为  $4\text{kV/mm}$ , 电流变液颗粒浓度为 10%.

## 2 实验结果及分析

### 2.1 核壳颗粒结构表征

图 2 为  $\text{Ni}/(\text{TiO}_2 + \text{Urea})$  核壳颗粒经  $120^\circ\text{C}$  烘干后在 TEM 下的形貌,一层浅灰色的约为  $2\text{nm}$  厚的涂层较均匀地包覆在暗黑色颗粒 (Ni) 的表面, Ni 颗粒

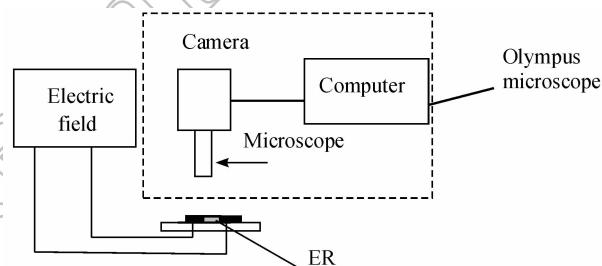


图 1 电流变液结构形态观察系统

Fig. 1 Microstructure observation system of ER

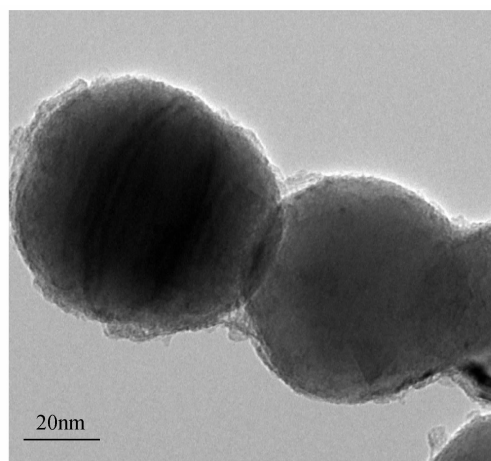


图 2  $120^\circ\text{C}$  烘干后  $\text{Ni}/(\text{TiO}_2 + \text{Urea})$  颗粒的 TEM 照片

Fig. 2 TEM morphology of  $\text{Ni}/(\text{TiO}_2 + \text{Urea})$  particles after heat-treated at  $120^\circ\text{C}$

无裸露现象,核壳结构完整。

图3为不同颗粒的XRD图谱,Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea)粒经120℃烘干后,只有Ni的衍射峰,没有出现钛氧化物相关衍射峰,在衍射角20°附近呈现出弱的非晶态峰,表明包覆层为无定型态。与原始Ni颗粒的衍射图相比,Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea)颗粒中Ni的衍射峰向右偏移,这可能是由于包覆层的存在使得Ni特征峰产生偏移。320℃处理后的Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea)颗粒中Ni的特征衍射峰明显降低,出现TiO<sub>2</sub>的尖峰,说明加热前的包覆层含有TiO<sub>2</sub>成分,在320℃加热后无定形的TiO<sub>2</sub>转化为TiO<sub>2</sub>晶体,且TiO<sub>2</sub>在纳米镍颗粒表面形成了完整的包覆层,使Ni颗粒在XRD分析中不能产生衍射现象。而500℃加热的Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea)颗粒出现更多的钛氧化物的衍射峰,表明TiO<sub>2</sub>在高温下发生了更多类型的晶体转变。这一结果表明实验设计的包覆工艺可在纳米Ni颗粒表面获得均匀完整包覆的纳米TiO<sub>2</sub>涂层。

图4为不同颗粒的红外光谱检测结果,由图可知,120℃烘干的Ni/TiO<sub>2</sub>颗粒在3450和1600cm<sup>-1</sup>附近处出现了较强的O—H伸缩振动峰,这与制备过程中对Ni颗粒的羟基化处理以及sol-gel制备工艺产生的Ti—OH有关,在400~800cm<sup>-1</sup>处出现了弱的Ti—O键振动峰,说明涂层中存在无定形的钛氧化物。Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea)颗粒经120℃烘干后,除了存在O—H峰外,还在2945cm<sup>-1</sup>处出现了C—H的伸缩振动峰,在1376cm<sup>-1</sup>附近出现了C=O伸缩振动峰,显示该颗粒表面存在较多的极性基团,尿素成功地掺杂到涂层内。经320℃热处理的Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea)颗粒与120℃的相比,仅存在少量O—H峰,但峰强与加热的Ni/TiO<sub>2</sub>颗粒和Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea)颗粒

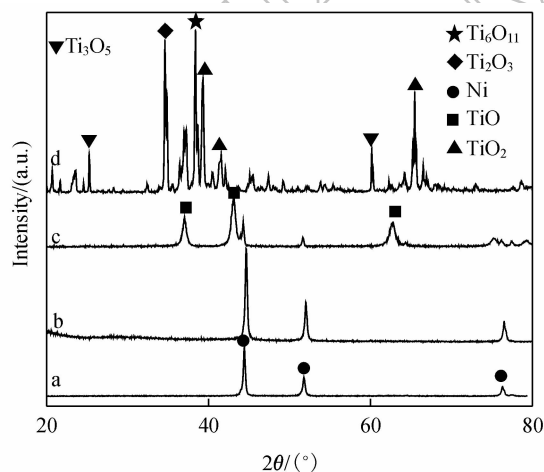


图3 不同颗粒的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of the different particles

(a) Pure Ni particles; (b-d) Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) particles after heat-treated at 120℃, 320℃, 500℃, respectively

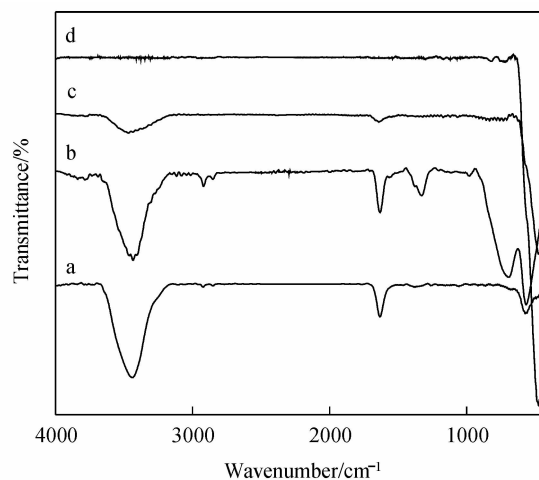


图4 不同颗粒的FT-IR图谱

Fig. 4 FT-IR spectra of different particles

(a) Ni/TiO<sub>2</sub> particle after heat-treated at 120℃; (b-d) Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) particles after heat-treated at 120℃, 320℃, 500℃, respectively

120℃明显降低,其中C—H和C=O峰消失,表明较高的热处理温度使极性基团减少。500℃加热的Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea)颗粒的红外光谱无极性基团特征峰存在,说明颗粒表面极性基团脱附、消失。随热处理温度的升高核壳颗粒在400cm<sup>-1</sup>处Ti—O键震动峰变强,这表明钛氧化物已形成晶态,与XRD衍射图谱相一致。上述结果表明本实验设计的包覆工艺在Ni颗粒表面成功地包覆了尿素掺杂TiO<sub>2</sub>的涂层。

## 2.2 核壳颗粒的电流变强度测定

图5为不同颗粒电流变液在颗粒浓度为30% (分散相颗粒质量与复合基液体积之比)、剪切速率30s<sup>-1</sup>时的剪切应力与电场强度的关系。从图中看出,

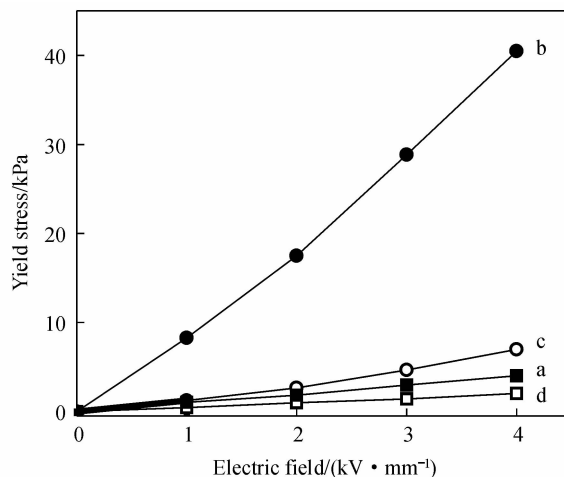


图5 不同颗粒电流变液剪切应力与电场强度的关系

Fig. 5 Shear stress vs electric field strength for different particles ER fluids

(a) Ni/TiO<sub>2</sub> particle after heat-treated at 120℃; (b-d) Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) particles after heat-treated at 120℃, 320℃, 500℃, respectively

经 120℃ 加热的 Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) 颗粒, 随电场强度的增加剪切应力呈线性增大, 在直流电场 4kV/mm 时的剪切应力达到 40kPa, 是相同条件下 Ni/TiO<sub>2</sub> 电流变液的 10 倍. 但该颗粒经 320° 加热后电流变性能明显降低, 其剪切应力降到 7kPa, 而 500° 加热后剪切应力仅为 2kPa.

图 6 为 120℃ 加热的 Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) 电流变液剪切应力与剪切速率的关系. 随着剪切速率的增加, 剪切应力先升高, 当剪切速率大于一定值(约 20s<sup>-1</sup>) 后, 剪切应力随剪切速率的增加而趋于稳定. 因此本实验选取在剪切速率大于 20s<sup>-1</sup> 的条件下测定电流变性能.

不同颗粒电流变效应的变化源于颗粒包覆层中极性基团的变化, 结合红外光谱分析认为: 经 120℃ 烘干的 Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) 颗粒, 存在 O—H、C—H 和 C=O 极性基团, 当温度达到 320℃ 时, 极性基团大部分分解, 颗粒表面只有少量的 O—H 基团, 导致电流变强度较低, 经 500℃ 加热后极性基团全部分解, 颗粒表面极性基团消失, 电流变强度最低, 甚至低于 Ni/TiO<sub>2</sub> 电流变液. 这一结果表明极性分子尿素可以显著提高 Ni/TiO<sub>2</sub> 核壳颗粒的电流变性能, 其增强电流变强度的原因是颗粒表面产生的极性基团的作用.

通过调整核壳颗粒包覆层尿素加入量, 考察了尿素含量对电流变液性能的影响. 图 7 为不同尿素/钛质量比的 Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) 电流变液的剪切应力与电场强度的关系. 随着尿素含量的增加剪切应力先增大, 当颗粒包覆层尿素/钛质量比为 30% 时, 剪切应力最大, 达到 40kPa(4kV/mm 时), 当尿素含量过高时电流变液的剪切应力反而降低, 这说明表层极性基团的数量对电流变液性能的提高有一极限值, 过多的极性基团反而使电流变性能降低.

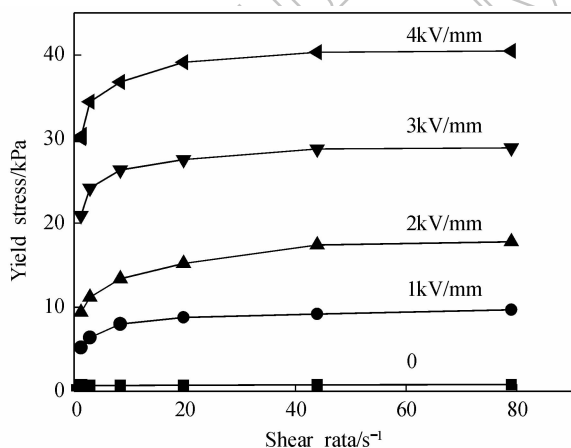


图 6 不同电场下经 120℃ 加热 Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) 电流变液剪切应力与剪切速率的关系 (颗粒浓度 30%)

Fig. 6 Shear stress vs shear rate at different electric field for Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) ER fluid (particle concentration 30%)  
Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) particle after heat-treated at 120℃

图 8 为漏电流密度与尿素加入量的关系, 随着尿素加入量的增加, 电流变液的漏电流密度增大, 当尿素含量大于 40% 以后, 漏电流密度急剧增大. 因此过高的尿素含量, 使漏电流密度过大, 会导致电流变液击穿, 反而使电流变液失效.

Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) 电流变液所具有较强的电流变效应在于金属纳米颗粒 Ni 表面聚了更多的极化自由电子, 而包覆层中尿素的加入又使颗粒表面具有较多的极性基团, 因此颗粒产生的界面极化及包覆层尿素中的极性基团产生的表面极化共同作用提高了颗粒的极化能力, 从而使电流变液具有较大的剪切强度. 当纳米金属及其粒径一定时, 包覆层中尿素含量成为调控颗粒极化能力和电流变性能的重要因素.

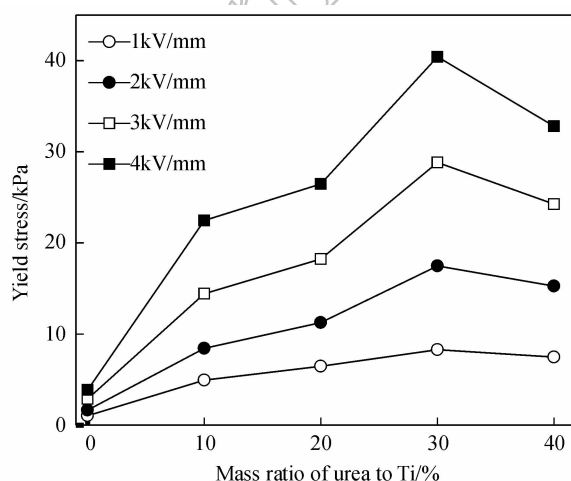


图 7 在不同电场下电流变液的剪切应力与尿素加入量 (尿素/钛质量比) 的关系

Fig. 7 Relationship of shear stress and mass ratios of urea to Ti at different electric fields

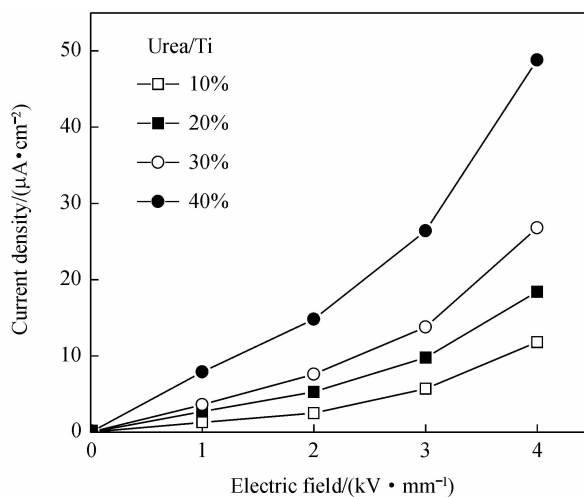


图 8 在不同电场下电流变液漏电流密度与尿素加入量的关系

Fig. 8 Relationship of leakage current density and the addition of urea at different electric fields

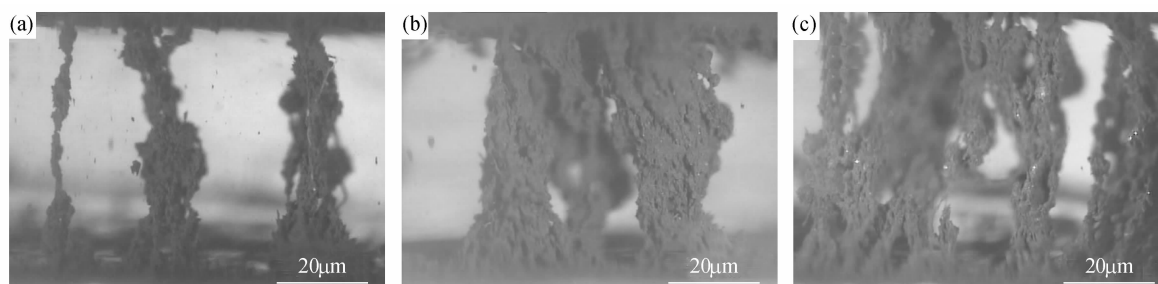


图9 电流变液在直流电场下柱的形貌

Fig. 9 Images of columns in ER under dc field

(a) Ni/TiO<sub>2</sub> particles without urea; (b-c) Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) particles with addition of 30%, 40% urea, respectively

尿素含量的提高有利于增强颗粒的极化强度,但是由于尿素和陶瓷颗粒 TiO<sub>2</sub> 以共混的形式包覆于金属颗粒的外表面,包覆层中的 TiO<sub>2</sub> 不能对尿素中的极性基团起到绝缘作用,因此随尿素含量的增加电流变液的漏电流增大,当加入过量的尿素时,必将导致电流变液击穿,使电流变液失效。

### 2.3 在直流电场下电流变液的结构观察

电流变液在施加电场时颗粒形成横跨两极的链或柱,电流变强度取决于颗粒间的结合强度及链、柱结构的破坏形貌,细柱的力学性能较弱,致密粗壮的柱具有较大的抗剪切强度,且粗柱中的颗粒结构更稳定<sup>[16]</sup>。

图9为在直流电场下观察到的 Ni/TiO<sub>2</sub> 和 Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) 电流变液的显微结构,可见核壳颗粒中尿素的加入量对柱的结构有较大影响。无尿素的 Ni/TiO<sub>2</sub> 电流变液尽管有低程度聚集的柱状结构形成,但柱结构疏松、较细,柱之间聚集趋势不明显,柱结构强度差(图9(a))。随着尿素含量的增加,柱的直径变粗,柱内颗粒致密度增大,相邻柱有相互吸引、聚集趋势,当尿素/钛的质量比为30%时,柱直径最粗壮、最致密(图9(b))。但是当尿素浓度达到40%以后,柱的直径又变细,致密度下降,并且发生柱断裂、塌陷现象(图9(c))。链的聚集过程与颗粒的极化及其静电相互作用力有关,而颗粒的极化程度与其分子结构有关。颗粒表层无极性分子或极性基团时,颗粒的界面极化较弱,颗粒及链之间的吸引力较小,难于聚集形成较粗的柱。尿素的加入在颗粒表层聚集了较多的极性基团:O—H、C—H、C=O等,这些极性基团提供了极化电荷使颗粒表面具有更大的界面极化,增加颗粒的极化强度,颗粒之间或形成的柱之间相互吸引力吸附周围的颗粒,或使相邻的细柱聚集成较粗的柱<sup>[17]</sup>。当颗粒表面极性分子含量过高时,由于漏电流密度过大,使颗粒间的结合力减弱,颗粒或柱间的吸引力减小,甚至产生电击穿,电流变液柱状结构破坏,甚至坍塌。因此,核壳颗粒适宜含量的极性分子尿素的加入大幅提高电流变响应,

使电流变强度增加,但过量的极性分子使电流变强度下降<sup>[18-20]</sup>。

## 3 结论

1) 利用 Sol-Gel 方法及多层包覆工艺在纳米镍颗粒表面均匀地包覆了厚度约 2nm 的尿素掺杂 TiO<sub>2</sub> 涂层,获得了将金属、陶瓷和有机极性分子溶于一体的纳米核壳结构 Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea)。

2) Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) 核壳颗粒中尿素含量对电流变活性有较大影响。随核壳颗粒中尿素含量的增加,电流变液剪切强度增大,当尿素加入量达到30%时,电流变液剪切强度最大,达到40kPa(4kV/mm 直流电场),是无尿素的 Ni/TiO<sub>2</sub> 核壳颗粒的10倍,但过量的尿素使电流变活性降低,极性基团的存在是提高电流变强度的主要原因。

3) Ni/(TiO<sub>2</sub> + Urea) 核壳颗粒尿素含量对电场下形成柱的结构有较大影响。随核壳颗粒中尿素含量的增加,柱由疏而细变得密而粗,使电流变强度提高,但是尿素含量过大时,发生柱的断裂、变细,从而导致电流变强度降低。

### 参考文献:

- [1] Block H, Kelly J P. Electro-rheology. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1988, **21**: 1661-1667.
- [2] Halsay T C. Electrorheological fluids. *Science*, 1992, **258**(5083): 761-766.
- [3] Whittle M, Bullough W A. The structure of smart fluids. *Nature*, 1992, **385**: 373.
- [4] 王宝祥, 左朝阳, 赵晓鹏 (WANG Bao-Xiang, et al). 改性高岭土/氧化钛复合材料的制备及其高电流变活性. *无机材料学报* (Journal of Inorganic Materials), 2004, **19**(4): 886-870.
- [5] Yin J B, Zhao X P. Preparation and enhanced electrorheological activity TiO<sub>2</sub> doped with chromium ion. *Chem. Mater.*, 2004, **16**(2): 321-328.
- [6] 路阳, 王学昭, 王风平, 等. 电流变液研究新进展. *材料导报*, 2009, **23**(2): 6-8.

- [7] 庞雪蕾, 唐芳琼(PANG Xue-Lei, *et al*). 电流变液体的研究进展. 化学进展(Prog. Chem.), 2004, **16**(6): 849-857.
- [8] 乔荫颇, 尹剑波, 赵晓鹏. 表面改性纳米氧化钛的强电流变效应. 材料研究学报, 2006, **20**(4): 417-421.
- [9] 赵艳, 王宝祥, 赵晓鹏(ZHAO Yan, *et al*). Cr 离子改性氧化钛/丙烯酸胺纳米电流变液及其性能研究. 无机材料学报(Journal of Inorganic Materials), 2006, **21**(3): 671-675.
- [10] 王学昭, 沈容, 温维佳, 等. 钛酸钙体系电流变液的研究. 功能材料, 2006, **37**(5): 681-683.
- [11] Conrad H, Wit C W, Tang X, Conductivity in electrorheology. in Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Conf on ERF, MR suspensions and their Applications, Nakano M, Koyama K. ed. Singapore: World Scientific, 1998, 77.
- [12] Wu C W, Conrad H. Multi-coated spheres: recommended electrorheological particles. *J. Phys. D: Appl.*, 1998, **31**: 3312-3315.
- [13] Tam W Y, Yi G H, Wen W J, *et al*. New electrorheological fluid: theory and experiment. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(15): 2987-2990.
- [14] Men S, Xu X, Lan Y, *et al*. The electrostatic interaction between coated particle in a host liquid. In: Tao R, Shaw S eds. Proc. 7<sup>th</sup> Inter. Conf. on ER Fluids and MR Suspensions. Hono2 lala Hawaii, 1999, 246-251.
- [15] 温维佳, 黄先祥, 杨世和, 等(WEN Wei-Jia, *et al*). 巨电流变效应及其机理. 物理(Physics), 2003, **32**(12): 777-779.
- [16] Wu C W, Conrad H. Shear strength of electrorheological particle clusters. *J. Mater. Sci. Eng. A*, 1998, **248**: 161-164.
- [17] 刘秧生, 官建国, 马会茹. 聚苯胺修饰草酸氧钛钡电流变性能的研究. 功能材料, 2008, **39**(11): 1832-1834.
- [18] Lu K Q, Shen R, Wang X Z, *et al*. Polak molecule type electrorheological fluids. *Int. J. Mod. Phys. B*, 2007, **21**(28/29): 4798-4805.
- [19] Shen R, Wang B Z, Wen W J. TiO<sub>2</sub> based electrorheological fluid with high yield stress, *et al. Int. J. Mod. Phys. B*, 2005, **19**(7/8/9): 1104-1109.
- [20] Lu K Q, Shen R, Wang W J, *et al*. The electrorheological fluids with high shear stress. *Int. J. Mod. Phys. B*, 2005, **19**(7/8/9): 1065-1070.