复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第31卷 第1期 2月 2014年
Vol. 31 No. 1 February 2014

文章编号：1000-3851(2014)01-0081-07

苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$颗粒制备及其电流变性能

钮晨光[1]，董旭峰[1]，赵 红*[1]，齐 民[1]，谭锁奎[2]，纪 松[2]
（1. 大连理工大学 材料科学与工程学院，辽宁 大连 116024；2. 中国兵器科学研究院 宁波分院，浙江 宁波 315103）

摘 要： 用沉淀法制备了苯胺-草酸氧钛锶($SrTi(C_2O_4)_2$)颗粒。FTIR分析表明，苯胺已引入到$SrTi(C_2O_4)_2$颗粒的表面；XRD分析表明，苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$颗粒为含少量结晶的无定形态。采用SEM观察颗粒的形貌，结果表明，随反应体系中苯胺与钛原子物质的量比$n_{aniline}/n_{Ti}$的增大，苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$颗粒由近似球状($n_{aniline}/n_{Ti}=0$)变为多面体状($n_{aniline}/n_{Ti}=2$)，而后变为棒状与团簇状颗粒的混合体系($n_{aniline}/n_{Ti}=3$)。以苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$颗粒为分散相制备颗粒质量分数为66.7%电流变液，电流变性能测试结果表明，在$n_{aniline}/n_{Ti}=2$时，电流变液具有较高的剪切应力和剪切屈服强度、较大的漏电流密度。苯胺在颗粒制备过程中起控制颗粒形貌的作用，在电流变液体系中起极性分子的作用，其对苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$电流变液性能的影响是两种效应综合作用的结果。

关键词： 电流变液；苯胺；$SrTi(C_2O_4)_2$颗粒；形貌；极性分子
中图分类号： TB381 **文献标志码：** A

Synthesis and electrorheological properties of aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$ particles

NIU Chenguang[1], DONG Xufeng[1], ZHAO Hong*[1], QI Min[1], TAN Suokui[2], JI Song[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. Ningbo Branch, China Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, Zhejiang, China)

Abstract: The aniline-strontium titanyl oxalate (aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$) particles were prepared by a precipitation method. FTIR patterns show that aniline has been added to the surface of the $SrTi(C_2O_4)_2$ particles. XRD patterns indicate that the particles are amorphous structure with a little of crystallization. The morphology of the particles was observed by SEM, the results of which indicate that with the increase of the molar ratio of aniline toTi atoms, $n_{aniline}/n_{Ti}$, the smorphology of aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$ particles change from approximate globular ($n_{aniline}/n_{Ti}=0$) to a polyhedron shape ($n_{aniline}/n_{Ti}=2$), and then a mixure consists of rod and cluster shaped particles ($n_{aniline}/n_{Ti}=3$). The electrorheological (ER) fluids were prepared with 66.7% mass fraction of aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$ particles with different aniline contentand tested. The experimental results indicate that the ER fluid prepared by the particles with a molar ratio of $n_{aniline}/n_{Ti}=2$ present the largest field-induced shear stress, yield stress and leak current density. The aniline controls the particle morphology during the preparation of the particles, and acts as polar molecules in the ER fluids system. The influence of the aniline on properties of the ER fluids is a combined effect of the two roles.

Keywords: electrorheological fluids; aniline; $SrTi(C_2O_4)_2$ particles; morphology; polar molecule

电流变液(Electrorheological Fluid, ERF)是由微米或纳米级的可极化颗粒分散于绝缘油中组成的悬浮体系。电流变液的剪切强度可在外电场作用下发生转变，且这种转变具有连续可调、响应迅速和状态可逆的特点[1]，可用于制造离合器、阻尼器和力矩传递装置等[2-3]。自2003年以来，多个研究组分别制备出一系列剪切屈服强度远高于传统电流变液的新型电流变液。虽然他们采用的颗粒体系不同，但共同的特点是在电流变液体系中引入极性分子或极性分子基团，引入的形式包括Wen等[4]采用的包覆(即形成核壳结构，如少量尿素包覆钡钛氧颗粒)、文献[5]～文献[7]中采用的掺杂(即加入

收到初稿日期： 2013-01-18；**收到修改稿日期：** 2013-07-14；**网络出版时间：** 2013-07-29 12:35
网络出版地址： http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130729.1235.001.html
基金项目： 国家自然科学基金(51108062)；中央高校基本科研业务费专项资金(DUT13ZD(G)02)
通讯作者： 赵 红，副教授，研究方向为智能材料。 E-mail: zhaohong@dlut.edu.cn

少量极性分子，如尿素、三乙醇胺和乙酰胺等)以及 Liu 等[8]采用的接枝(即在颗粒表面引入极性基团，如羰基、羟基等)；此外，赵艳等的研究表明，在电流变液体系中加入适当的表面活性剂，也可较为明显地提高电流变液的剪切屈服强度[9]。上述新型电流变液的开发突破了传统电流变液剪切强度较低的瓶颈，使电流变液具有广阔的工业应用前景。

以往电流变液研究中所采用的有机极性分子和表面活性剂只有单一方面功能，其起到的是增加颗粒表面极性基团或分散颗粒、减小粒径的作用[10-11]。苯胺既是一种极性分子，也具有表面活性剂的作用，采用苯胺与介电型颗粒复合，不仅可在颗粒中引入极性分子或极性分子基团，同时也可控制颗粒的表观形貌，因而有望制备出综合性能较为优异的电流变液。基于该思路，本文采用沉淀法制备苯胺-草酸氧钛锶($SrTi(C_2O_4)_2$)复合颗粒，研究了苯胺加入量对颗粒成分、形貌，及其电流变液剪切屈服强度、漏电流密度和抗沉降性能的影响。

1　实　验

1.1　苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒制备

用沉淀法制备苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 复合颗粒。首先分别配制草酸和氯化锶的水溶液，并用盐酸调节氯化锶溶液的 pH 值至 2.0～2.5 备用。在冰浴条件下将氯化锶溶液滴加入钛酸四丁酯的乙醇溶液中(钛酸四丁酯：无水乙醇＝1：5，体积比)并不断搅拌，得到白色乳浊液。随后将草酸溶液加热至 60 ℃，将白色乳浊液在搅拌条件下滴加入其中(滴加速率约为 120 drops/min，即约 6 mL/min)，得到溶液 A。此时反应物的物质的量之比为钛酸四丁酯：氯化锶：草酸＝1：1：2。将苯胺分散于无水乙醇中，为保证反应的均匀进行，苯胺溶液的浓度不宜过高，本文所配制的苯胺溶液浓度为 0.5～3.0 mol/L(记为溶液 B)，随后将 B 溶液滴加入 A 溶液中，得到反应物沉淀。将沉淀抽滤、醇洗多次后，置于 50 ℃干燥箱中干燥 24 h 后研磨，制得苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 复合颗粒。为研究反应体系中苯胺加入量对复合颗粒形貌及电流变性能的影响，按照反应物中苯胺与钛物质的量之比 $n_{aniline}/n_{Ti}$＝1.5、2 或 3 制备苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 复合颗粒，并制备纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒作为对比组。

1.2　电流变液的配制

电流变液在配制前，将纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒及苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 复合颗粒在 110 ℃条件下干燥 2 h，以去除吸附水。基液采用黏度为 50 mm^2/s 的二甲基硅油，使用前在 120 ℃温度下进行 3 h 的烘干。将颗粒和硅油混合并充分搅拌至均匀，得到颗粒质量浓度为 66.7%的电流变液。

1.3　材料分析及性能测试

采用 EQUINOX55 型傅里叶红外光谱分析仪对颗粒进行成分分析，采用 XRD-7000 型 X 射线衍射仪对纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒及苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒进行结构分析，采用 Quanta450 型钨灯丝环境扫描电镜观察颗粒的形貌，对电流变颗粒采用 TGA/SDTA851e 热重分析仪进行 DTA(Differential Thermal Analysis)/TG(Thermogravimetry)/DTG(Differential Thermogravimetry)分析，热重分析在空气氛围中进行，测试所用加热速率为 10 ℃/min，温度范围为 25～900 ℃。采用 AccuPyc II 1340 型全自动密度分析仪对颗粒的密度进行测量。电流变液的电流变性能采用安东帕公司的 MCR301 旋转流变仪测定：测试剪切应力随电场强度变化时设置恒定剪切速率为 2 s^{-1}，测试剪切屈服强度时采用应力控制模式。

2　结果与讨论

2.1　苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒结构分析

图 1 为纯苯胺、苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒($n_{aniline}/n_{Ti}$＝2)以及 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒的 FTIR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)谱图。可以看到，$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒的谱线在 1 689 cm^{-1} 处出现了 C＝O 吸收峰，在 1 425、1 281 和 909 cm^{-1} 处出现了 C－O 伸缩振动峰，在 816 cm^{-1} 处出现了 O－C＝O 伸缩振动峰，都是纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒生成的标志[12]。与纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒的红外谱线对比可以看出，苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒的红外谱线在 1 316 cm^{-1} 处出现了 C－N 伸缩振动峰，在 752 cm^{-1} 处出现了 N－H 摇摆振动峰，同时还在 1 620 cm^{-1} 处出现一个小的拐点，说明有 N－H 弯曲振动的存在。这些特征振动峰的存在均证明 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒表面含有苯胺分子，形成苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 复合颗粒。

图 2 为纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒与苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒($n_{aniline}/n_{Ti}$＝2)的 XRD 图谱。可以看出，当纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒和苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒的 X 射线散射方向与入射方向夹

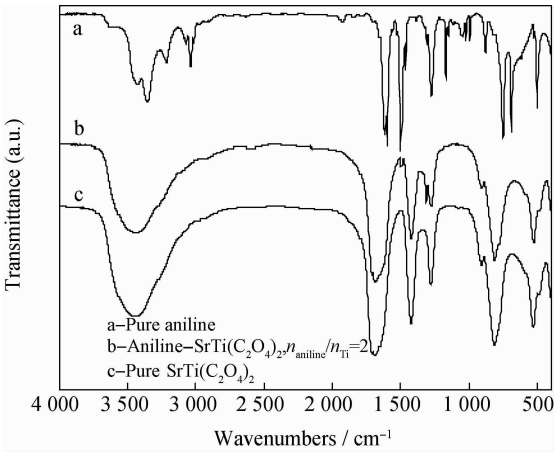

图 1 纯苯胺、苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒（$n_{aniline}/n_{Ti}=2$）和纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒 FTIR 谱图

Fig. 1 FTIR patterns of pure aniline, aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$ particles ($n_{aniline}/n_{Ti}=2$) and pure $SrTi(C_2O_4)_2$ particle

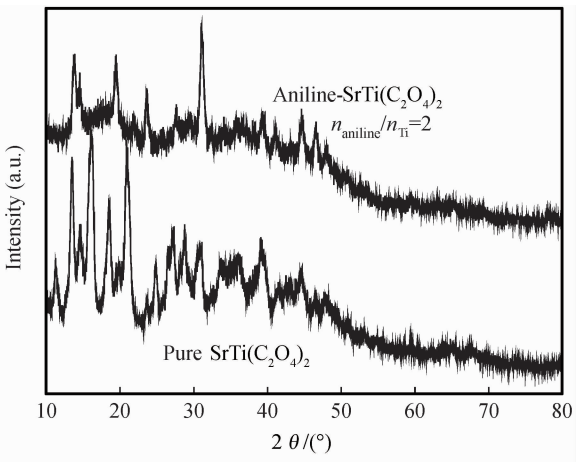

图 2 纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒和苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒（$n_{aniline}/n_{Ti}=2$）的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of pure $SrTi(C_2O_4)_2$ particles and aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$ particles ($n_{aniline}/n_{Ti}=2$)

角 2θ 在 23°～55°的范围内都有无定形结构的漫散射峰存在，但纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒在 11.4°、13.4°、14.6°、15.9°、18.5°和 21°等位置出现了尖锐的晶态峰，苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒则在 13.8°、19.5°、23.6°和 31°等位置出现了尖锐的晶态峰，这表明所制备的纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒和苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒都含有部分结晶相，整体都表现出半晶态的结构，但两种颗粒的晶态峰的位置不同，说明在颗粒的形成过程中苯胺参与了体系的化学反应，从而使原有产物的晶体结构发生了变化。

图 3 为纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒和苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒的 DTA/TG/DTG 曲线，由图 3(a)可知，纯颗粒主要经历 3 次失重过程，在空气中总失重为 53.33%。本研究中纯锶钛氧的分解过程与文献[13]中所述一致，在 25～250 ℃范围内的吸热峰为水分子的分解吸热；在 250～450 ℃范围内的放热峰是由草酸的分解过程产生；在 600 ℃附近的吸热峰则证明 $SrTiO_3$ 最终的形成[13]。如图 3(b)所示，苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒总失重为 54.16%，在 35～200 ℃范围内的吸热峰同样来自水分子的分解吸热；值得注意的是在 550～600 ℃范围内该颗粒出现一个强烈的放热峰，此处分解放热源于颗粒中剩余小分子有机物的热解，其放热强度比纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒高很多。这是由于苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒中存在苯胺分子的苯环，证明在该颗粒中苯胺分子可能已与原络合物发生了化学键合作用。

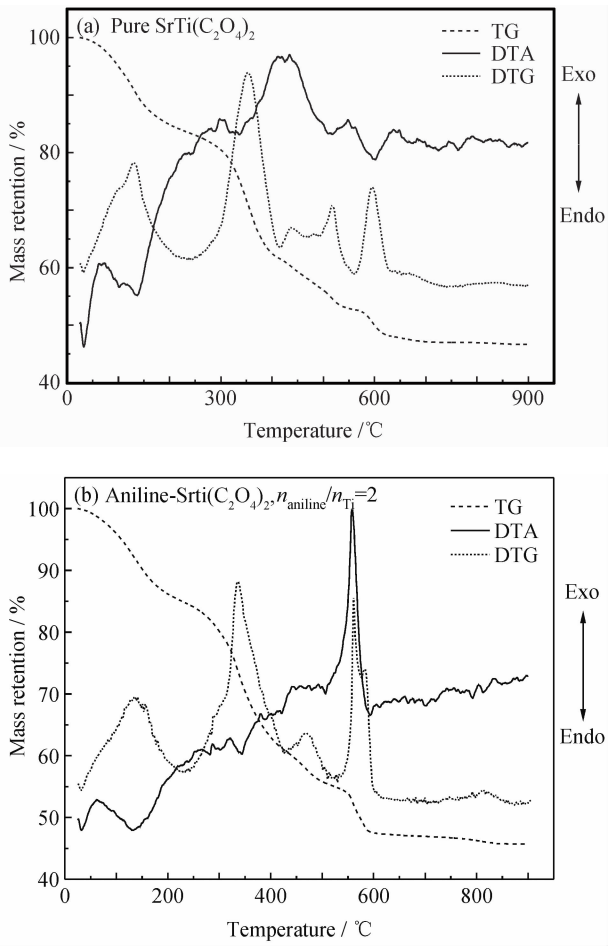

图 3 纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒和苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒（$n_{aniline}/n_{Ti}=2$）25～900 ℃ DTA/TG/DTG 综合分析曲线

Fig. 3 DTA/TG/DTG comprehensive analysis curves of pure $SrTi(C_2O_4)_2$ particles and aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$ particles ($n_{aniline}/n_{Ti}=2$) around 25～900 ℃

2.2　苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒表观形貌

图 4 和图 5 分别为纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 及 3 种不同配比的苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒在高倍率和低倍率下观察的 SEM 照片。由图 4(a)和图 5(a)可见，纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒为类球状形态，且表面无规则形貌；当反应体系中 $n_{aniline}/n_{Ti}=1.5$ 时，颗粒表面已开始有多边形层片状的结构生成，颗粒的边缘有棱角出现，甚至有薄片状的颗粒存在，如图 4(b)和图 5(b)所示；继续增大苯胺加入量，当 $n_{aniline}/n_{Ti}=2$ 时，颗粒变为有较平整棱面的多面体结构，部分颗粒侧面仍可看出有层片结构存在，颗粒的粒径约为 5 μm，如图4(c)和图 5(c)所示；而当 $n_{aniline}/n_{Ti}=3$ 时，如图 4(d)和图 5(d)所示，可以看到颗粒是由微小粒子的团簇和相对较大的棒状颗粒共同构成的混合体系，棒状颗粒的长径比约为 10。因此可见，苯胺的加入在苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒制备的过程中具有表面活性剂的作用，通过控制反应体系中苯胺与锶离子的物质的量之比，可以得到不同形貌的苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒。

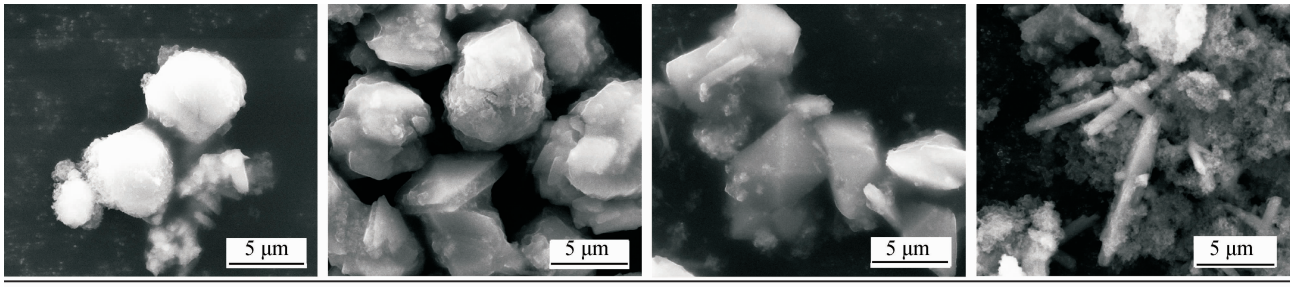

图 4　在高倍率下纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒和不同苯胺添加量的苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒的 SEM 照片

Fig4　SEM microphotographs of pure $SrTi(C_2O_4)_2$ particles and aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$ particles with different aniline addition content at high magnification

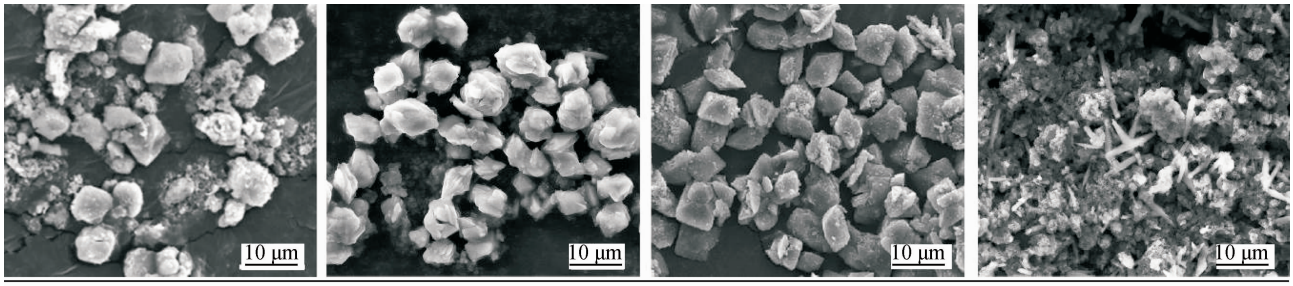

图 5　在低倍率下纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒和不同苯胺添加量的苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒的 SEM 照片

Fig5　SEM microphotographs of pure $SrTi(C_2O_4)_2$ particles and aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$ particles with different aniline addition content at low magnification

2.3　苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒电流变性能

图 6 为不同苯胺含量的苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒电流变液剪切应力随电场强度的变化曲线。在低电场强度下，纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液随电场强度的增加其剪切应力上升缓慢；在 3 kV/mm 电场强度下，剪切应力才有明显上升，在 5 kV/mm 电场下，剪切应力为 3 kPa；而苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液在较低的电场强度下(0.5 kV/mm)即表现出明显的电流变效应，在同一电场强度下，其剪切应力值均高于 $SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液，可见苯胺的加入能够明显地提高材料的电流变效应。

随着苯胺加入量的增加，苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液剪切应力提高，呈现较优的电流变效应，其原因在于苯胺是一种极性分子，根据极性分子电流变液模型可知[14]，颗粒表面吸附一定量的极性分子，可以大大地提高电流变液的剪切应力。当苯胺掺入量进一步增大至 $n_{aniline}/n_{Ti}=2$ 时，在5 kV/mm 电场下，其剪切应力增加到 10 kPa，同时剪切应力随电场强度的变化呈线性关系，这也符合巨电流变液的特征[4]。其性能提高一方面是由于苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$复合颗粒所含的极性分子进一步增加，另一方面由于颗粒呈现多面体形态，颗粒间的相互作用面积增大从而导致颗粒间相互作用力增强。然而当苯胺量进一步提高至 $n_{aniline}/n_{Ti}=3$ 时，其电流

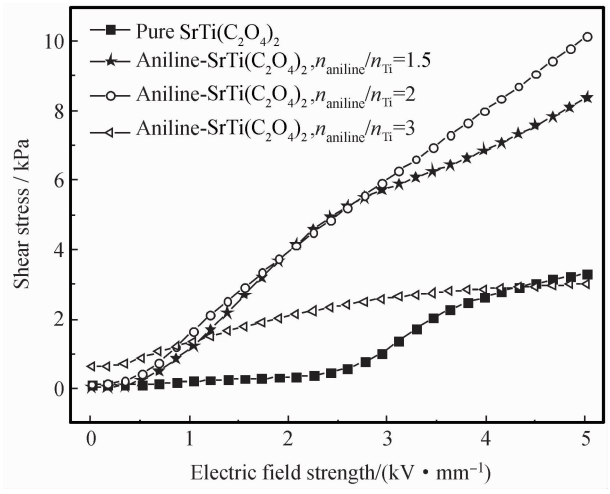

图 6 纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 不同苯胺含量的苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒电流变液的剪切应力随电场强度的变化

Fig. 6 Shear stress of pure $SrTi(C_2O_4)_2$ aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$ electrorheological fluids with different aniline content as a function of electric field strength

变效应下降。其原因是，虽然苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 复合颗粒所含极性分子比例更高，但由于此条件下颗粒为棒状和微粒团簇的混合体系，位阻效应较大，颗粒间难以形成致密的柱状结构，反而导致其电流变效应下降。因此苯胺提高电流变效应的作用存在最佳加入量。

图 7 为在 5 kV/mm 电场强度下，以不同颗粒所配制电流变液的剪切屈服强度随苯胺加入量的变化曲线。可见，在 5 kV/mm 的电场强度下，纯草酸氧钛锶颗粒的剪切屈服强度最低，仅为 11.17 kPa；而在加入苯胺后，电流变液的剪切屈服强度都有提高。苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液在 $n_{aniline}/n_{Ti}=2$ 时，剪切屈服强度达到了最大的 56.43 kPa，并且比 $n_{aniline}/n_{Ti}=1.5$ 时电流变液的剪切屈服强度高出很多，说明此时极性分子含量已达最佳值，同时颗粒的多面体形态也提高了电流变液的成链强度；而当苯胺量提高至 $n_{aniline}/n_{Ti}=3$ 时，其电流变液的剪切屈服强度与纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒相比提高较少，再次说明棒状和微粒团簇在体系中的位阻作用影响了其成链强度。

图 8 为纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 及苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液的漏电流密度随电场强度的变化曲线。可见，各电流变液漏电流密度随电场的变化趋势与其剪切应力随电场的变化趋势完全一致。纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒电流变液的漏电流密度最小，而随着反应体系中苯胺掺入量的增大，苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液的漏电流密度显著增大，在 $n_{aniline}/n_{Ti}=2$ 时，电流变液的漏电流密度最大，达到了 17.68 μA/cm^2，一方面是因为此时苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒中极性分子的量较大，另一方面，多面体颗粒间在沿电流方向的相互作用面积也较球形颗粒的更大。而当苯胺掺入量进一步增大时（$n_{aniline}/n_{Ti}=3$），苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液的漏电流密度减小，其原因在于棒状及团簇状混合颗粒体系沿电场方向的颗粒间相互作用面积较小，且颗粒间距较远，从而导致其漏电流密度降低。

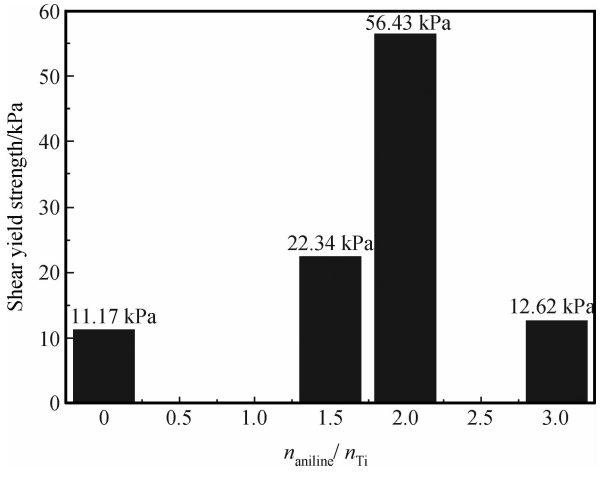

图 7 5 kV/mm 电场强度下，纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 和不同苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液的剪切屈服强度随苯胺加入量变化

Fig. 7 Shear yield strenyth of pure $SrTi(C_2O_4)_2$ and different aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$ electrorheological fluids with different aniline content as a function of aniline content under 5 kV/mm electric field strength

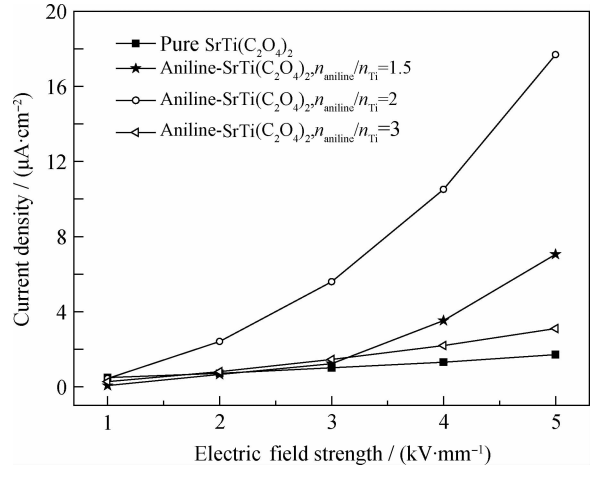

图 8 不同苯胺含量的苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液的漏电流密度随电场强度变化曲线

Fig. 8 Leakage current density curves of puer $SrTi(C_2O_4)_2$ and aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$ electrorheological fluids with different aniline content as a function of electric field strength

2.4　苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$电流变液的沉降稳定性

为保证电流变液在长期放置后分散相颗粒与基液不发生严重分离而影响其性能，需要研究电流变液的抗沉降性能。这种胶体的稳定性一方面与液体和分散相固体的密度匹配度有关，另一方面与分散相和液体的润湿性相关[15]。图 9 为纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 和苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液在室温条件下 30 天沉降性曲线和样品照片。图 9 中示意图的 a 值表示颗粒沉积层上表面距硅油液面高度，b 值表示颗粒沉积层高度。由图可见纯草酸氧钛锶电流变液在 30 天后已沉降至原高的 41.9%，而苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液的抗沉降性大幅提高，为 91.0%。此前两类样品用置换气体法测出的密度为：纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒 2.281 9 g/cm^3，苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒2.236 6 g/cm^3，两者相差并不明显。因此可以认为，造成两种电流变液沉降性具有如此大差异的原因是苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒的表面带有更多的极性分子，即苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 颗粒表面的 C=O、C-N 和 N-H 键会与硅油中的 Si-O 键产生更强的氢键链接，从而提高颗粒在硅油中的润湿性，因而苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 会表现出更强的抗沉降性能。

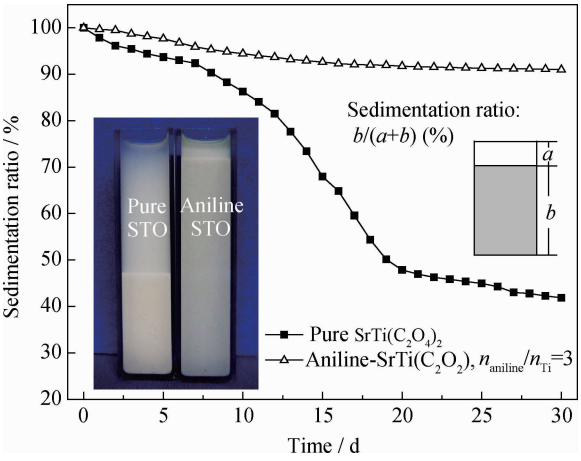

图 9　纯 $SrTi(C_2O_4)_2$ 和苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$($n_{aniline}/n_{Ti}=3$)电流变液的抗沉降速率随时间的变化
(内附两种样品 30 天沉降实验照片)

Fig. 9　Sedimentation properties of pure $SrTi(C_2O_4)_2$ and aniline-$SrTi(C_2O_4)_2$($n_{aniline}/n_{Ti}=3$) electrorheological fluids as a function of time (inset: 30 days' sedimentation experiment photograph of the two samples)

3　结　论

(1) 采用沉淀法制备出含少量结晶的苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$复杂络合物颗粒，可以通过控制苯胺加入量控制颗粒表面形貌。

(2) 制备过程中苯胺掺入量对苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$电流变液的电流变性能有较大影响，并存在最佳值。本研究中，当苯胺与钛原子的物质的量之比 $n_{aniline}/n_{Ti}=2$时，苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液具有较高的场致剪切应力、剪切屈服强度和较大的漏电流密度。

(3) 苯胺-$SrTi(C_2O_4)_2$ 电流变液具有比纯 $SrTi(C_2O_4)_2$电流变液更佳的抗沉降性能。

参考文献：

[1] Winslow W M. Induced fibration of suspensions[J]. Journal of Applied Physics, 1949, 20(12): 1137-1140.

[2] Wang B X, Zhao X P. Preparation of kaolinite/titania coated nanocomposite particles and their electrorheological properties [J]. Journal of Material Chemistry, 2003, 13(9): 2248-2253.

[3] 陆　军，赵晓鹏. 聚邻苯二胺/蒙脱土纳米复合材料的合成及其电流变效应[J]. 复合材料学报，2004，21(4)：8-12.
Lu Jun, Zhao Xiaopeng. Electrorheological behavior of poly-o-phenylenediamine/montmorillonite nanocomposite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(4): 8-12.

[4] Wen W J, Huang X X, Yang S H, et al. The giant electrorheological effect in suspensions of nanoparticles[J]. Nature Materials, 2003, 2: 727-730.

[5] Wei J H, Zhao L H, Peng S L, et al. Wettability of urea-doped TiO_2 nanoparticles and their high electrorheological effects[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2008, 47(3): 311-315.

[6] Cao J G, Shen M, Zhou L W. Preparation and electrorheological properties of triethanolamine-modified TiO_2[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2006, 179(5): 1565-1568.

[7] Cheng Y C, Guo J J, Xu G J, et al. Electrorheological property and microstructure of acetamide-modified TiO_2 nanoparticles[J]. Colloid Polym Sci, 2008, 286(13): 1493-1497.

[8] Liu F H, Xu G J, Wu J H, et al. Synthesis and electrorheological properties of oxalate group-modified amorphous titanium oxide nanoparticles[J]. Colloid Polym Sci, 2010, 288(18): 1739-1744.

[9] 赵　艳，王宝祥，赵晓鹏. 改性纳米氧化钛电流变液的制备及其特性[J]. 复合材料学报，2006，23(3)：96-102.
Zhao Yan, Wang Baoxiang, Zhao Xiaopeng. Synthesis and electrorheological properties of modified TiO_2 nanoparticles [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(3): 96-102.

[10] Qiao Y P, Yin J B, Zhao X P. Oleophilicity and the strong electrorheological effect of surface-modified titanium oxide nano-particles[J]. Smart Materials and Structures, 2007,

16(2)：332-339.

[11] Cao J G, Shen M, Zhou L W. Preparation and electrorheological properties of triethanolamine - modified TiO_2[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2006, 179(5): 1565-1568.

[12] Fan W, Niinistö L. Preparation of strontium titanate using strontium titanyl oxalate as precursor[J]. Materials Research Bulletin, 1994, 29(4): 451-458.

[13] Gallagher P K, Thomson J. Thermal analysis of some barium and strontium titanyl oxalates[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1965, 48(12): 644-647.

[14] Wang X Z, Shen R, Wen W J, et al. High performance calcium titanate nanoparticle ER fluids[J]. International Journal of Modern Physics B, 2005, 19(7-9): 1110-1113.

[15] Wu J H, Xu G J, Cheng Y C, et al. The influence of high dielectric constant core on the activity of core-shell structure electrorheological fluid[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2012, 378(1): 36-43.