

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200313.001

碳纳米管/油酸复合物的纳米流体导电与润湿性能

关集俱^{*1,2}, 刘德利¹, 王勇², 冯伯华³, 许雪峰³
(1.常熟理工学院 机械工程学院, 常熟 215500; 2.苏州工业职业技术学院 精密制造工程系, 苏州 215104;
3.浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州 310014)

摘要: 在碳纳米管 (CNTs) 的空腔中填充油酸 (OA) 以制备出 CNTs/OA 复合物, 再以此复合物为添加剂制备一种纳米流体。对比研究了纳米流体的导电性能和润湿性能, 考察了添加剂质量浓度、酸处理时间、测试温度、电润湿等条件对上述性能的影响。结果表明, OA 被成功填充进 CNTs 内并形成复合物, 填充率约 20%, 在填充过程中 CNTs 的端面也得到了化学修饰, CNTs 的最佳酸化处理时间为 8 h; 与普通酸处理 CNTs 比, 复合物在基液中具有更好的分散性和表面活性, 能更好地提高纳米流体的导电性、润湿性, 复合物的最佳浓度约为 0.1%; 电润湿条件下, 随着电压的升高, 复合物浓度高的纳米流体的润湿性能提升更明显, 这可能是由于 CNTs 被 OA 填充后, 其自身的电导率和电容得到提高, 其所制备的纳米流体也具有更好的导电性和电容量特性。

关键词: 碳纳米管; 油酸; 复合物; 纳米流体; 导电性; 润湿性

中图分类号: TH162;TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)10-2582-08

Electroconductivity and wettability of nanofluids prepared by carbon nanotubes/oleic acid composite

GUAN Jiju^{*1,2}, LIU Deli¹, WANG Yong², FENG Bohua³, XU Xuefeng³
(1. College of Mechanical Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China; 2. Precision Manufacturing Engineering Department, Suzhou Vocational Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, China;
3. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The carbon nanotubes(CNTs)/oleic acid (OA) composite was prepared by filling OA into CNTs, then the nanofluid was prepared by the CNTs/oleic acid composite as additive. The conductivity and wettability of the nanofluid were investigated, and the effects of the content, acidification time, test temperature and electric field on the above properties were also studied. The results show that the composite is successfully formed with a filling rate of about 20%. During the preparing process, the end face of the CNTs is chemically modified, and the best acidification time is about 8 h. Compared with the acidified CNTs, the CNTs/OA composite has better surface activity and dispersion in the base solution, which can better improve the conductivity and wettability of the nanofluid, and the optimal content of the composite is about 0.1%. Under the condition of electrowetting, the wettability of the nanofluid with the higher content of the composite can be improved more obviously with the increase of voltage. This may be because the conductivity and capacitance of the CNTs are improved after the filling of OA, and the nanofluid prepared by the composite also has better conductivity and capacitance.

Keywords: carbon nanotubes; oleic acid; composite; nanofluid; conductivity; wettability

切削加工过程中, 切削液可以渗透到加工区 切削液能否快速、充分地渗入加工区域, 对切削加工效果的影响较大^[1-2]。近年来, 有研究者提出利

收稿日期: 2019-11-13; 录用日期: 2020-02-25; 网络首发时间: 2020-03-13 15:23:55
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200313.001>
基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金 (BK20170373); 国家自然科学基金青年基金 (51805345)
通信作者: 关集俱, 博士, 讲师, 研究方向为超分子材料组装、摩擦学、精密加工 E-mail: daweijiju@163.com
引用格式: 关集俱, 刘德利, 王勇, 等. 碳纳米管/油酸复合物制备的纳米流体导电与润湿性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(10): 2582-2589.
GUAN Jiju, LIU Deli, WANG Yong, et al. Electroconductivity and wettability of nanofluids prepared by carbon nanotubes/oleic acid composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(10): 2582-2589(in Chinese).

用比表面积和热容量大、导热性好、且润滑性能优良的纳米微粒制备纳米流体,可以显著改善切削液的性能。常用于制备纳米流体切削液的纳米微粒有 MoS_2 、 SiO_2 、 TiO_2 等固体润滑剂及碳纳米微粒(石墨、碳纳米管(CNTs)等)^[3-4]。

CNTs 是由层状石墨按一定的角度围绕中心线卷曲而成的,其导热系数可高达 $6\,000\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,且其内部空腔可在一定条件下允许其他物质填入,从而引起 CNTs 在电性能、传导性能、磁性能等方面的变化^[5-6]。CNTs 及其衍生物不仅能提高流体本身的传热和润滑性能^[7-8],且对流体的导电性、润湿性等也有显著影响。有研究表明,当纳米粒子的浓度低时,粒子间的间隙较大,此时纳米流体的导电性能主要由基液决定;当粒子浓度达到一定值时,粒子间的间隙变小,电子克服较小的势垒就能在粒子之间实现跃迁,此时纳米流体导电性能有大幅提升,并称此浓度为“逾渗阈值”^[9]。另外,纳米粒子与液体界面间的相互作用会导致液滴的润湿性质发生改变,粒子本身的物理特性、尺寸、体积分数等对纳米流体表面张力的影响较为显著,不同性质的纳米粒子将导致表面张力增加、不变或者降低^[10]。

本文提出利用各种润滑剂填充 CNTs 并制备一类复合物,再以复合物为添加剂制备纳米流体切削液,一方面可以改善切削液的导热、渗透性,另一方面复合物中的润滑剂可在加工区域释放,可起到更好的润滑作用。目前,尚缺乏对复合物所制备的纳米流体的导电性、润湿性方面的研究,而这对于纳米流体在切削加工中的应用,特别是在静电喷雾微量润滑^[11-12]方面的应用是十分重要的。因此,本文选用油酸(OA)作为填充剂制备 CNTs/OA 复合物,考察 OA 的填充对纳米流体导电性、润湿性的影响,并研究组分质量浓度、酸处理时间、电润湿等条件影响上述性能的机制。本文的研究为这种新型纳米流体切削液的实际应用提供理论基础,对纳米流体的导电、润湿和渗透等方面的研究具有一定参考价值。

1 实验部分

1.1 材料与纳米流体制备

1.1.1 原材料

多壁 CNTs(纯度>95%,内径为 20~50 nm)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS, AR 级),阿拉丁生化科技股份有限公司;浓 HNO_3 (浓度 65%~68%)、浓

H_2SO_4 (浓度 98%)、 H_2O_2 (浓度 30%)、吐温-80(TW-80)、无水乙醇(分析纯),无锡晶科化工有限公司;OA(分析纯),天津恒兴化学试剂制造有限公司;尺寸为 $40\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的 45#钢片,厚度为 0.5 mm,表面粗糙度 $R_a=0.8\text{ }\mu\text{m}$;厚度 1 mm 橡胶片;实验用水为去离子水。

1.1.2 CNTs/OA 复合物的制备

采用液相湿化学法制备复合物,制备方法如下:
(I) 在 1 L 三口烧瓶中投入 15 g 的 CNTs,再加入 800 mL 的浓 HNO_3 、浓 H_2SO_4 和 H_2O_2 混合物(体积比 3 : 1 : 1,再用水按体积比 1 : 1 稀释);利用 DF-101S 型恒温加热磁力搅拌器(上海力辰仪器科技有限公司),将混合物在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的水浴条件下回流 3~12 h,同时施加磁力搅拌(转速为 $500\text{ r}/\text{min}$);回流结束后,利用 XZ-4 型真空泵(上海圣科仪器设备有限公司)对产物进行真空抽滤,滤饼在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干,再利用 WZM 型实验球磨机(宜兴市丁蜀浩强机械厂)处理 8 h,将其粉碎成纳米微粒,即得到酸处理 CNTs。

(II) 将 7.5 g 的 OA 溶解到 200 mL 无水乙醇中,并投入 15 g 的酸处理 CNTs,将混合物装入球形瓶中抽真空至 -0.06 MPa ,温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$,并在此条件下超声搅拌 8 h;超声完成后,将产物进行抽滤,无水乙醇清洗滤饼,去除尚未被填充的 OA,滤饼在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干后球磨 8 h,即可制得 CNTs/OA 复合物。

采用 Nicolet 6700 红外光谱 (FTIR) 分析 CNTs 在被填充前后吸收峰的差异, KBr 压片;采用 FEI TECNAI G20 200KV 高分辨透射电子显微镜 (TEM) 观察样品的微观结构和填充形态,测试时加速电压为 200 kV;采用 TG-6300 型综合分析仪(德国卡尔蔡司公司)测定复合物的热失重曲线 (TG) 和差热分析曲线 (DSC),温升范围为 $10\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$,升温速率定为 $20\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

1.1.3 纳米流体的制备

制备纳米流体时,需用表面活性剂作为分散介质,使复合物在水中具有更好的分散稳定性。通过前期的分散稳定性试验,优选出非离子表面活性剂 TW-80 和阴离子表面活性剂 SDBS 的混合物(复配质量比为 7 : 3)作为分散剂,为了排除其他添加剂的影响,纳米流体的组成为复配表面活性剂和复合物或酸处理 CNTs。

纳米流体制备方法:首先,称取一定量的复配活性剂溶解于水中,配制出不同浓度的基础液;再称取一定质量的复合物或酸处理 CNTs 添加到

100 mL 基础液中，并将混合物在 50℃ 下机械搅拌 30 min；最后，利用 PS-80T 型超声清洗机(深圳市深科洁超声波设备有限公司)振动 1 h 后制备出充分分散的纳米流体。样品制备后静置 30 天，再进行测试。

1.2 纳米流体的导电与润湿性能测试

以纳米流体的接触角作为评价其润湿性的依据，采用 Kruss DSA25 接触角测量仪(德国 KRUSS

公司)对纳米流体在 45#钢表面的接触角进行测试，每次测试的液滴体积为 2 μL，在液滴与 45#钢表面接触 15 s 稳定后，通过移动试样台使液滴处于最佳显示状态，并测试读数，如图 1(a) 所示；采用 DDS-11A 型电导率测试仪(上海仪电科学仪器有限公司)测定样品的电导率，测定时取 50mL 样品于小烧杯内，将测定电极没入样品中，示数稳定后记录电导率值。不同样品测定方案如下。

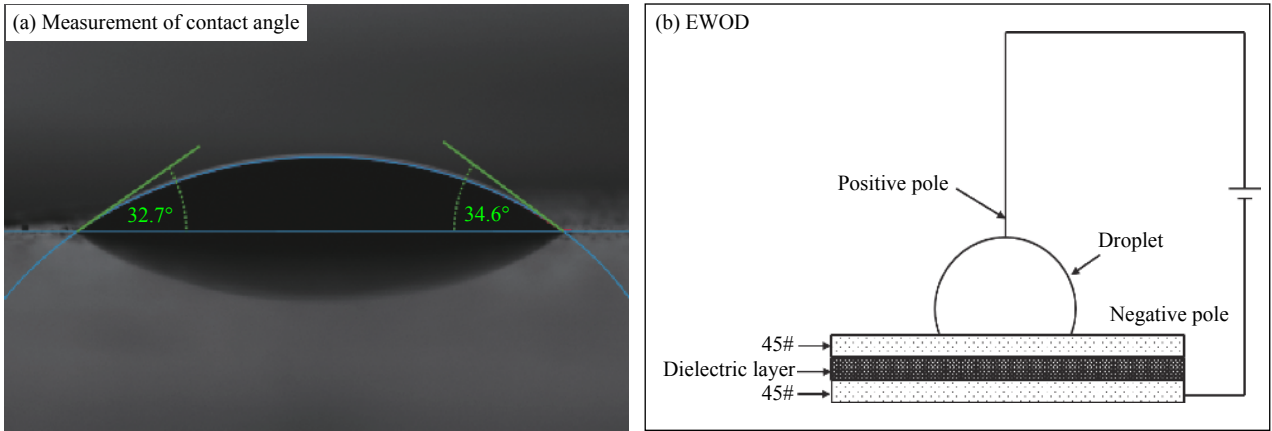


图 1 接触角的测量与电润湿测量接触角 (EWOD) 的原理
Fig. 1 Measurement of contact angle and measurement schematic diagram of electrowetting on dielectric (EWOD)

(a) 制备表面活性剂质量分数为 0.5wt%、复合物或酸处理 CNTs 质量分数在 0.01wt%~0.5wt% 之间变化的 15 组样品，测定各组样品的接触角和电导率，所用碳管经酸处理 8 h，测试温度 20℃。

(b) 利用酸处理时间分别为 2 h、4 h、6 h、8 h、10 h、12 h 的碳管，制备活性剂质量分数为 0.5wt%、复合物或酸处理 CNTs 质量分数为 0.1wt% 的 7 组样品，测定样品在 20℃ 温度下的电导率和接触角。

(c) 制备表面活性剂质量分数为 0.5wt%、复合物质量分数分别为 0.01wt% 和 0.1wt% 的 2 组样品，测定其在电润湿 (EWOD) 条件下的接触角，测试原理如图 1(b) 所示，为了接近实际切削工况，测试液滴在 45#钢片表面的接触角，介电层的材料为一种橡胶。电压由 eTM-L1503SPL 型直流稳压电源(东莞市同门电子科技有限公司)提供，首先测试温度为 20℃、电压在 0~150V 之间变化时的接触角，再测试电压为 10V、温度在 20~80℃ 之间变化时的接触角。

2 结果与讨论

2.1 CNTs/OA 复合物的表征结果

2.1.1 复合物的结构组成

图 2 为 CNTs、酸处理 CNTs、OA 和 CNTs/OA

OA 复合物的 FTIR 图谱。图 2(b) 中，CNTs 在酸处理后出现了新的吸收峰，如 3 632 cm⁻¹、1 722 cm⁻¹ 波长附近，这应归属于羟基、羧基等^[13]，表明酸处理后的 CNTs 端面键合了这些基团，有利于提高 CNTs 对基础液的亲和性，提高其在基础液中的分散稳定性^[14]；另外，发现在 1 543 cm⁻¹ 左右出现碳环结构的平面吸收峰，证明酸处理后 CNTs

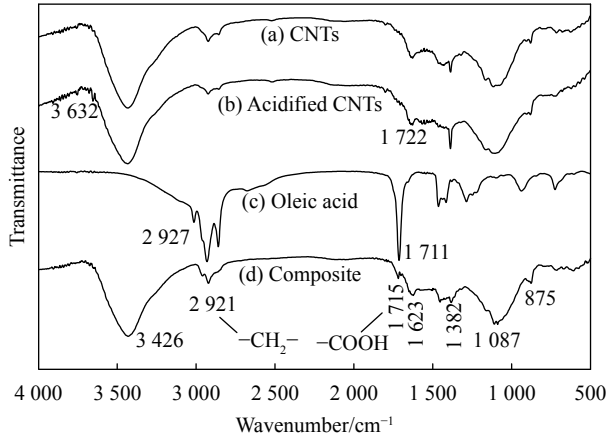


图 2 碳纳米管 (CNTs)、酸处理 CNTs、油酸 (OA) 和 CNTs/OA 复合物的 FTIR 图谱

Fig. 2 FTIR spectra of carbon nanotubes (CNTs), acidified CNTs, oleic acid (OA) and CNTs/OA composite

的管状结构得到了保存，这是管内能够填充油酸的前提。图 2(d) 中，复合物的 FTIR 图谱在 2927 cm⁻¹、1711 cm⁻¹ 峰位处出现了 OA 中—CH₂—、—COOH 基团的特征吸收峰；复合物的特征峰主要为酸处理 CNTs 和 OA 峰形的部分叠加，未出现新的特征峰，表明在填充时二者主要发生物理结合。

2.1.2 复合物的微观结构

图 3(a)~3(c) 分别为 CNTs、酸处理 CNTs 和 CNTs/OA 复合物的 TEM 图像。在图 3(a) 可见 CNTs 的中空结构；图 3(b) 中，酸处理 CNTs 管的端面有阴影区域存在，这是由于 CNTs 被酸处理截短后，其端面被羧基、羟基等基团修饰，使碳浓度得到提高。图 3(c) 中，所观测区域的 CNTs 管内存在被填充的 OA，这直观地证实了复合物的形成。分析认为，OA 溶解到无水乙醇中，减小了 OA 本身的表面张力，使其更易于通过毛细管效应进入管内，而后续制备过程中的烘干使无水乙醇挥发，管内的 OA 则得到保留。除管内的 OA 外，应该还有一部分 OA 分子结构在 CNTs 的端面外，图 3(d) 为一种 CNTs/OA 复合物的模型。

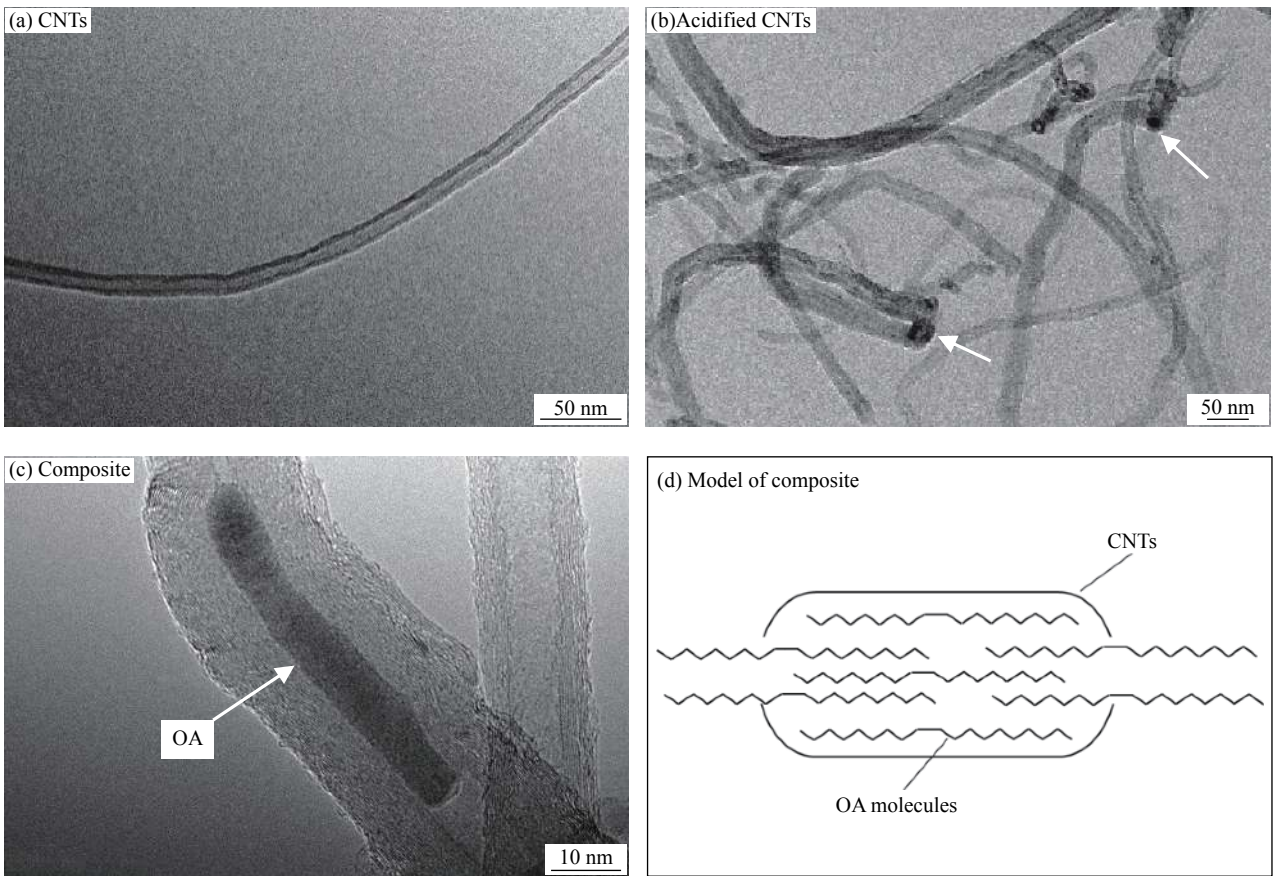


图 3 CNTs、酸处理 CNTs、CNTs/OA 复合物的 TEM 图像和复合物的分子模型

Fig. 3 TEM images of CNTs, acidified CNTs, CNTs/OA composite and molecular model of the composite

2.1.3 复合物的填充率

图 4 为 CNTs、酸处理 CNTs 和 CNTs/OA 复合物的 TG 和 DSC 分析结果。图 4(a) 中，CNTs 和酸处理 CNTs 的具有较相似的热失重过程，CNTs/OA 复合物在 100~200℃ 温度范围内有较明显的失重过程，这是 CNTs/OA 复合物中的 OA 受热逸出的结果。另外，OA 在 CNTs 中的填充率 (η) 可以根据相变潜热公式来计算^[15]：

$$\eta = \frac{H_f}{H_p} \times 100\% \tag{1}$$

其中： H_f 为复合物中 OA 的相变潜热； H_p 为相同质量的 OA 相变潜热 (J/g)。根据如图 4(b) 中 CNTs/OA 复合物、OA 的 DSC 曲线分别与基线所围区域的面积，可计算出 CNTs/OA 复合物中 OA 的相变潜热为 37.85 J/g，而相同质量 OA 的相变潜热为 181.25 J/g，因此可以求得 OA 的填充率约为 20%。

2.2 CNTs 的浓度与酸处理时间对纳米流体导电性能的影响

图 5(a) 为表面活性剂质量分数为 0.5wt% 时，CNTs/OA 复合物或酸处理 CNTs 的浓度对纳米流

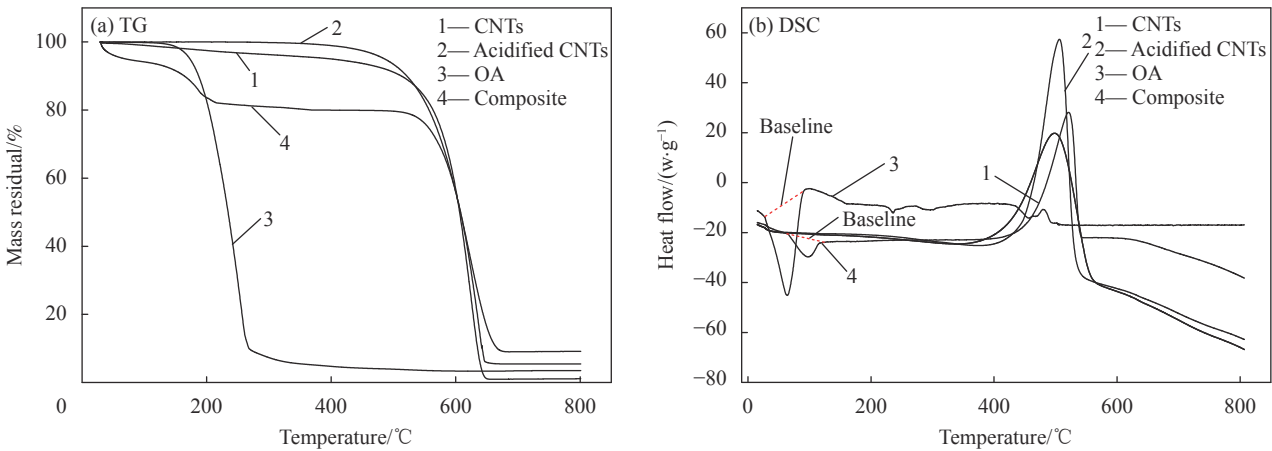


图 4 CNTs、酸处理 CNTs、OA 和 CNTs/OA 复合物的 TG 和 DSC 曲线

Fig. 4 TG and DSC curves of CNTs, acidified CNTs, OA and the CNTs/OA composite

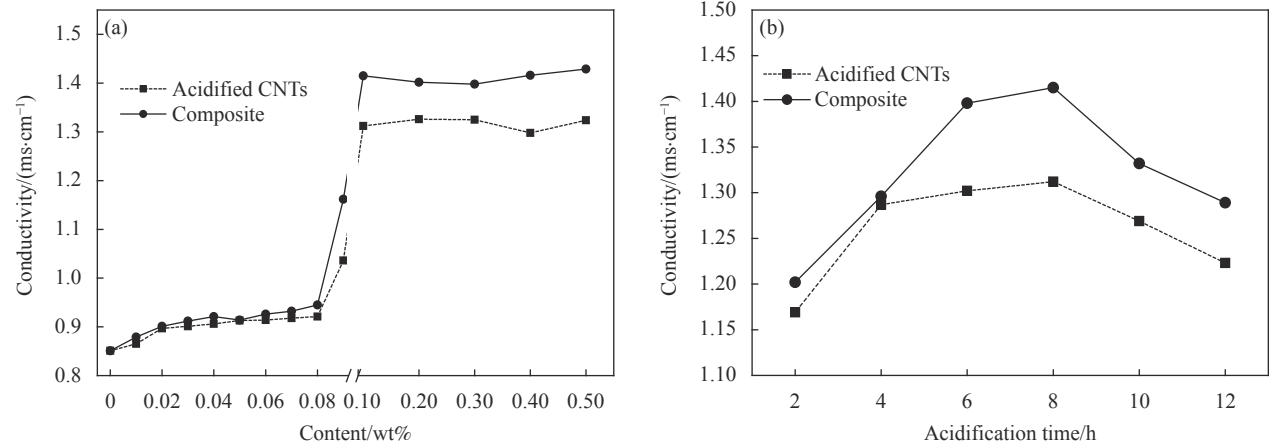


图 5 CNTs 浓度和酸处理时间对两种纳米流体电导率影响

Fig. 5 Effects of CNTs content and acidification time on electrical conductivity of two nanofluids

体电导率的影响。可见，当 CNTs 浓度在较低范围内变化时，电导率的变化不明显，当 CNTs/OA 复合物质量分数升至 0.1wt% 左右时，纳米流体的电导率有明显的提升。这是由于复合物自身具有一定的导电性，且随着管径和石墨层片螺旋角度不同，可以呈现为半导体或金属性质^[16-17]，当 CNTs 充分、稳定地分散到基液中、且质量分数达到一个“逾渗阈值”时，就会相互接触形成导电通路，使纳米流体的导电性会有显著提升^[18-19]。因此，本文中 CNTs/OA 复合物的“逾渗阈值”约为 0.1wt%，当超过此质量分数后再增加其含量时，纳米流体电导率的变化不明显，这是由于表面活性剂的质量分数限制了复合物的分散，导致多余的复合物出现团聚，影响电导率的提升。

图 5(a) 中，与酸处理 CNTs 制备的纳米流体

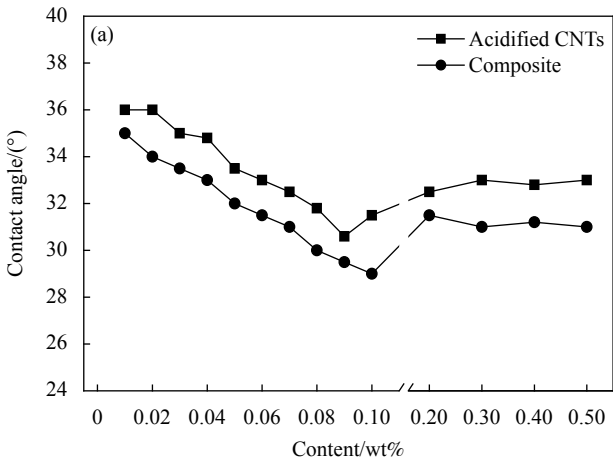
比，CNTs/OA 复合物纳米流体具有更好的导电性能。这首先是由于复合物的端面上存在 OA 的分子基团，这改善了复合物与基础液的“亲和性”，使其具有更好的分散性，使电子只须克服较小的势垒就可以在导电粒子之间实现跃迁；另外，OA 的填充可能对 CNTs 自身的导电性具有一定的提高作用^[20-21]，这对纳米流体导电性能的提升也有促进作用。

图 5(b) 为表面活性剂和 CNTs 浓度分别为 0.5wt% 和 0.1wt% 时，CNTs 的酸化处理时间对纳米流体电导率的影响。可见，随着处理时间的增加，电导率先增大后减小。这主要是由于酸处理时间越长，CNTs 长径比越小，OA 对 CNTs 的填充和修饰越充分，CNTs/OA 复合物在基液中的分散性及其自身的导电性也越好，越易形成导电通

路; 但长径比过小可能对导电通路有破坏作用, 又会导致纳米流体的导电性变差。

2.3 CNTs 浓度与酸处理时间对纳米流体润湿性的影响

图 6(a) 为表面活性剂质量分数为 0.5wt% 时, CNTs/OA 复合物或酸处理 CNTs 质量分数的变化对纳米流体润湿性的影响。可见当 CNTs/OA 复合物质量分数不断增加时, 纳米流体接触角呈先增大后减小的趋势。分析认为经过酸处理及内部填充后, CNTs/OA 复合物本身具有一定的表面活性^[22-23], 在基液中分散完全后, 其与基液分子间的排斥作用增加了自由表面上的分子间距, 从而起到降低表面张力的作用^[24-25], 因而在基液中添加 CNTs/OA 复合物纳米微粒, 可以使基液具有更好的润湿性。而当 CNTs/OA 复合物浓度过高时, 会出现团聚现象, 使纳米流体的分散性变差、黏度增大, 组分的分子间作用力增大, 从而导致接触角变大。



与酸处理 CNTs 制备的纳米流体比, CNTs/OA 复合物纳米流体具有更好的润湿性能。这是由于部分处于管端的 OA 分子基团可使复合物具有更强的表面活性, 对表面张力的减弱效应也更明显。但处于 CNTs 内的 OA 基团对润湿性的影响不大, 位于 CNTs 端面的 OA 基团对润湿性有显著影响。

图 6(b) 为酸处理时间对纳米流体接触角的影响。可见, 随着处理时间的增大, CNTs/OA 复合物纳米流体接触角有减小的趋势, 一方面, 酸处理时间越长, CNTs 的长径比越小, 所具有的比表面积越大, 其在基液中的分散也越均匀, 对表面张力的降低效果越明显^[26]; 另一方面, 酸处理时间越长, OA 对 CNTs 的修饰和填充越充分, CNTs/OA 复合物的表面活性也越强。但酸处理时间过长会破坏 CNTs 结构的完整性, 影响 OA 在 CNTs 中的填充及 CNTs 自身的导电性能, 结合图 5(b) 的分析, 判断 CNTs 的酸处理时间以 8 h 左右为宜。

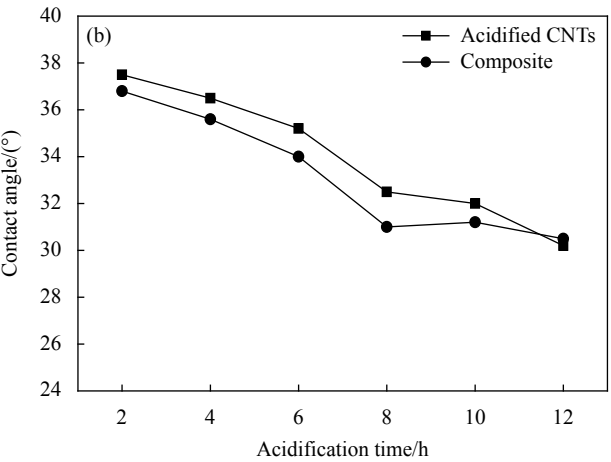


图 6 CNTs 浓度和酸处理时间对两种纳米流体润湿性的影响

Fig. 6 Effects of content of CNTs and acidification time on wettability of the nanofluids

2.4 电润湿的电压、温度条件对不同复合物含量的纳米流体润湿性的影响

图 7(a) 为 CNTs/OA 复合物质量分数分别为 0.01wt% 和 0.1wt% 的两种纳米流体在不同电压条件下接触角的变化情况。可见与未施加电场比, 施加 10 V 电压后, 纳米流体的接触角有明显的降低。关于电润湿的作用机制, 目前主要有热力学、能量最小化、电动力学等观点, 前两者基于能量观点认为: 在电场作用下, 纳米流体的液滴与介电层之间电荷积累产生的电容效应导致能量变化,

材料表面的分子排列发生变化, 引起微液滴表面张力改变, 从而使接触角变化^[27]。Lippmann 首先研究了汞-盐溶液间的电毛细现象, 得到积分形式的 Lippmann 第一方程, 再结合 Young 润湿方程, 可得到 Young-Lippmann 电润湿基本方程^[28]:

$$\cos\theta = \cos\theta_0 + \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r V^2}{2\gamma_{LV}} \tag{2}$$

其中: θ 是电场作用下固-液界面接触角; θ_0 是无电场作用下固-液界面平衡接触角; ε_0 是真空介电常数; ε_r 是忽略液滴电容条件下介电层的介电常

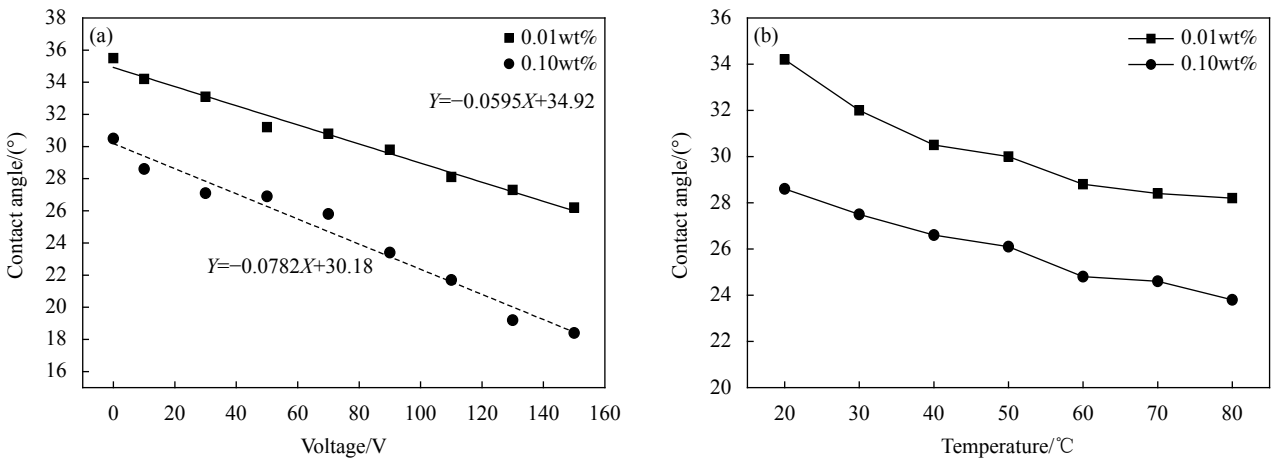


图7 测试电场电压和温度对不同 CNTs/OA 复合物质量分数的纳米流体润湿性的影响

Fig. 7 Effect of voltage and temperature on wettability of the nanofluids prepared by different mass fractions of CNTs/OA composite

数； d 是介电层厚度； γ_{LV} 是液-气接触界面的表面张力； V 为电场电压。

图 7(a) 中，当测试电压在 0~150 V 之间变化时，两种纳米流体切削液的接触角均有减小趋势。而从图中拟合虚线可知，CNTs/OA 复合物质量分数为 0.1wt% 的纳米流体的接触角的减小趋势更明显，结合式 (2) 分析认为：首先，在本文实验条件下，纳米流体液滴的电容可能不能被忽略，计算 ϵ_r 时需要计入液滴的电容；其次，在不同电压条件下，两种纳米流体 ϵ_r 的值有变化，且变化的差异性较大，这可能与纳米流体本身的电容特性有关。对于经过内部填充复合物而言，其所制备的较高浓度的纳米流体，在相同条件下的电导率较好，OA 的填充使其电荷容量也较高。

图 7(b) 为 CNTs/OA 复合物质量分数分别为 0.01wt% 和 0.1wt% 的两种纳米流体在不同温度条件下接触角的变化情况。随着测试温度的升高，接触角也呈逐渐减小的趋势，这主要是由于温度升高后，纳米流体各组分子之间的距离增大，吸引力减弱，导致表面张力降低、接触角减小^[29]。

3 结论

(1) 油酸 (OA) 被填充到碳纳米管 (CNTs) 内形成复合物，填充率 20% 左右，填充过程中，CNTs 被化学修饰，CNTs 的最佳酸化处理时间为 8 h 左右。

(2) 与酸处理 CNTs 比，CNTs/OA 复合物在基础液中具有更好的分散性和表面活性，能更好地提高纳米流体的导电性、润湿性，CNTs/OA 复合物在基础液中的最佳质量分数约为 0.1wt%。

(3) 电润湿条件下，随着电压的升高，CNTs/OA 复合物浓度较高的纳米流体的润湿性能提升更明显，这可能是由于被 OA 填充后，CNTs/OA 复合物的电导率和电容得到提高，其所制备的纳米流体也具有更好的导电性和电容量特性。

参考文献：

[1] WILLIAMS J A. The action of lubricants in metal cutting[J]. *Journal Mechanical Engineering Science*, 1977, 19(5): 202-212.

[2] 韩荣第, 张悦, 王扬. 刀—屑接触区摩擦润滑的毛细管模型研究[J]. *润滑与密封*, 2009, 34(2): 1-4.

HAN Rongdi, ZHANG Yue, WANG Yang. Study on capillary model of tool-chip interface friction and lubricating[J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(2): 1-4(in Chinese).

[3] PARK K H, EWALD B, KWON P Y. Effect of nano-enhanced lubricant in minimum quantity lubrication balling milling[J]. *Journal of Tribology*, 2011, 133(3): 3526-3537.

[4] LI B K, LI C H, ZHANG Y B, et al. Heat transfer performance of MQL grinding with different nanofluids for Ni-based alloys using vegetable oil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 154: 1-11.

[5] 王治宇, 赵宗彬, 邱介山. 碳纳米管填充技术研究[J]. *化学进展*, 2006, 18(5): 563-572.

WANG Zhiyu, ZHAO Zongbin, QIU Jieshan. Development of filling carbon nanotubes[J]. *Progress in Chemistry*, 2006, 18(5): 563-572(in Chinese).

[6] 魏智强, 李维学, 冯旺军. 纳米镍颗粒填充碳纳米管的制备与磁性[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(6): 124-128.

WEI Zhiqiang, LI Weixue, FENG Wangjun. Preparation and magnetic property of Ni nanoparticles filled carbon nanotubes[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(6):

- 124-128(in Chinese).
- [7] 宣益民, 李强. 纳米流体强化传热研究[J]. *工程热物理学报*, 2000, 21(4): 466-470.
- XUAN Yimin, LI Qiang. Heat transfer enhancement of nanofluids[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2000, 21(4): 466-470(in Chinese).
- [8] ALAA Mohamed. Tribological behavior of carbon nanotubes as an additive oil lithium grease[J]. *Journal of Tribology*, 2015, 137(1): 1-5.
- [9] TANG B L, CHEN G X, CHEN Q F. Research and Manufacture of nano-silver conductive ink[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 174: 405-408.
- [10] LI Y, WU H A, WANG F C. Effect of a single nanoparticle on the contact line motion[J]. *Langmuir*, 2016, 32(48): 12676-12685.
- [11] HUANG S Q, LV T, WANG M, et al. Enhanced machining performance and lubrication mechanism of electrostatic minimum quantity lubrication-EMQL milling process[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(1-4): 655-666.
- [12] 杨林初, 汤正成, 苏宇. 静电雾化切削的雾化形态研究[J]. *江苏科技大学学报*, 2018, 32(5): 684-689.
- YANG Linchu, TANG Zhengcheng, SU Yu. Investigation on atomization form of electrostatic atomization cutting[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology*, 2018, 32(5): 684-689(in Chinese).
- [13] GHERMAN C, TUDOR M C, CONSTANTIN B, et al. Pharmacokinetics evaluation of carbon nanotubes using FTIR analysis and histological analysis[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2015, 15(4): 2865-2869.
- [14] 晋卫军, 孙旭峰, 王煜. 碳纳米管溶解性及其化学修饰[J]. *新型炭材料*, 2004, 19(4): 312-317.
- JIN Weijun, SUN Xufeng, WANG Yu. Solubilization and functionalization of carbon nanotubes[J]. *New Carbon Materials*, 2004, 19(4): 312-317(in Chinese).
- [15] SINHA-RAY S, SAHU R P, YARIN A L. Nano-encapsulated smart tunable phase change materials[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(19): 8823-8827.
- [16] BERBER S, KWON Y K, TOMANEK D. Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(20): 4613-4616.
- [17] 安宁丽, 李嘉宾, 叶静静, 等. Fe_3O_4 -碳纳米管/聚偏氟乙烯复合材料的制备与性能[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(12): 3247-3252.
- AN Ningli, LI Jiabin, YE Jingjing, et al. Preparation and properties of Fe_3O_4 -carbon nanotubes/polyvinylidene fluoride composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(12): 3247-3252(in Chinese).
- [18] GLORY J, BONETTI M, HELEZEN M, et al. Thermal and electrical conductivities of water-based nanofluids prepared with long multiwalled carbon nanotubes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(9): 094309-1-7.
- [19] GRUJICIC M, CAO G, ROY W N. A computational analysis of the percolation threshold and the electrical conductivity of carbon nanotubes filled polymeric materials[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39: 4441-4449.
- [20] EBBESEN T W, LEZEC H J, HIURA H, et al. Electrical conductivity of individual carbon nanotubes[J]. *Nature*, 1996, 382(6586): 54-56.
- [21] DUJARDIN E, EBBESEN T W, HIURA H, et al. Capillarity and wetting of carbon nanotubes [J]. *Science*, 1994, 265(5180): 1850-1852.
- [22] 沈钟, 赵振国, 康万利. 胶体与表面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 109-111.
- SHEN Zhong, ZHAO Zhenguo, KANG Wanli. Colloid and surface chemistry[M]. Beijing: China Chemical Industry Press, 2012: 109-111(in Chinese).
- [23] 刘洪国, 孙德军, 郝京诚. 新编胶体与界面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 110-112.
- LIU Hongguo, SUN Dejun, HAO Jingcheng. New colloid and interface chemistry[M]. Beijing: China Chemical Industry Press, 2016: 110-112(in Chinese).
- [24] LU G, DUAN Y Y, WANG X D. Surface tension, viscosity, and rheology of water-based nanofluids: A microscopic interpretation on the molecular level[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2014, 16: 2564.
- [25] TANVIR S, QIAO L. Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2012, 7(1): 226.
- [26] KARTHIKEYAN A, COULOMBE S, KIETZIG A M. Wetting behavior of multi-walled carbon nanotube nanofluids[J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(10): 105706.
- [27] WALKER S W, SHAPIRO B. Modeling the fluid dynamics of electrowetting on dielectric(EWOD)[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(4): 986-1000.
- [28] 赵亚涛. 表面与界面物理力学[M]. 北京: 科学出版社. 2012: 228-232.
- ZHAO Yapu. Physical and mechanics of surface and interface[M]. Beijing: China Science Press, 2012: 228-232(in Chinese).
- [29] KUMARR, MILANOVA D. Effect of surface tension on nanotube nanofluids[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(4): 227.