

颗粒亲水性对纳米流体表面张力的影响研究进展

张胜寒 韩晓雪

(华北电力大学(保定),保定 071000)

摘 要 纳米流体作为一种新型换热介质,其表面张力的变化与流体沸腾换热等热物理性质有着密切的联系。纳米流体通常由“两步法”制得,其表面张力受温度、纳米颗粒粒径、纳米颗粒体积分数或质量分数等多方面影响。在前人的研究中,表面张力随流体温度的升高而减小,随纳米颗粒粒径的增加而增大,但表面张力随纳米颗粒体积分数或质量分数的变化情况则不一致。通过总结由不同颗粒与不同基础流体组成的纳米流体表面张力的变化趋势,分析纳米流体表面张力的变化与颗粒亲水性的关系。分析结果表明:亲水型颗粒与疏水型颗粒对纳米流体表面张力的影响恰好相反;亲水型纳米颗粒体积分数或质量分数不同时,其纳米流体表面张力的变化也不相同。

关键词 纳米流体,纳米颗粒,表面张力,亲水性,疏水性

Advance in influence of hydrophilic particle on surface tension of nanofluid

Zhang Shenghan Han Xiaoxue

(Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric
Power University Baoding Campus, Baoding 071000)

Abstract As a new heat transfer medium, the surface tension of nanofluids has an important relationship with the thermophysical properties. Nanofluids mostly prepared with nanoparticles and base fluids by “two-step” method, sometimes with dispersant. The surface tension of nanofluids was influenced by temperature, particle size, particle concentration and so on. It was increased with increasing temperature and particles size, but the trend of surface tension was contradictory in the past research. Compared the composition of nanofluids, the difference may caused by nanoparticles or dispersant. The effect of hydrophilic particles and hydrophobic particles on the surface tension of nanofluids was opposite, and for hydrophilic particles, the surface tension changes were not the same at different particle concentrations.

Key words nanofluid, nanoparticle, surface tension, hydrophilicity, hydrophobicity

1 纳米流体的表面张力

纳米流体是指一种分散了金属或非金属纳米粉体的水、醇、油等传统换热介质形成的均匀稳定的流体。近年来,许多研究者对纳米流体的热物理性质,如纳米流体的导热性^[1-12]、黏性^[8,12-17]、表面张力^[8,14-18]等进行了研究。

表面张力是指液体表面分子受到的由于分子引力不均衡而产生的沿表面作用于任意界线上的拉力。热力学上的定义是:要将体系的表面能降至最小产生的力即为表面张力。表面张力是流体的重要物理性质之一,纳米流体是一种新型的换热介质^[19],大大提高了流体的导热系数和对流换热性能,纳米流体的表面张力对沸腾^[1-2,18,20-23]、热传递^[1,12,23-24]、热导率^[1]和临界热通量^[3-7]等热物理性

质有一定的影响。

目前,国内外研究者对纳米流体的表面张力进行了大量的实验和理论模型的研究,发现纳米流体的表面张力随温度的升高而减小^[9,15,18,25-31],随纳米颗粒粒径的增加而增大^[25-28,32],然而纳米颗粒的体积分数或质量分数对纳米流体表面张力的影响却截然不同^[6,8-9,15-18,23,25-31,33-37],引起这种结果的原因有可能是纳米颗粒的亲水性不同。因此,针对亲水性不同的纳米颗粒,总结了纳米颗粒体积分数或质量分数对纳米流体表面张力的影响。

2 纳米颗粒体积分数或质量分数对纳米流体表面张力的影响

众多学者对水基氧化铝(Al_2O_3)纳米流体的表面张力进行了研究^[6-7,15,23,26-28,31-33]。大多数的研究

结果表明: Al_2O_3 -水纳米流体的表面张力均随 Al_2O_3 体积分数或质量分数的增加而下降^[6,15,27-28,33]。另外, Bhuiyan 等^[27-28]还测量了 TiO_2 -蒸馏水纳米流体(纳米颗粒粒径 21nm)的表面张力以及 SiO_2 -蒸馏水纳米流体(纳米颗粒粒径分别为 5~15nm、10~20nm)的表面张力,发现表面张力随纳米流体温度的升高而降低,随纳米流体体积分数的增加而升高。Kim 等^[6]研究了氧化锆(ZrO_2)-水纳米流体的表面张力,发现纳米流体的表面张力高于基础流体且随 ZrO_2 体积分数的增加而升高。Huminc 等^[9]制备了 FeC -水纳米流体,并加入羧甲基纤维素钠盐(CMCNa)做表面活性剂,发现当纳米颗粒质量分数为 0.1%和 0.5%时,纳米流体的表面张力低于基础流体;而当纳米颗粒质量分数为 1.0%时,纳米流体的表面张力大于基础流体,比较这三者发现表面张力随纳米颗粒质量分数的增加而升高。Zheng^[25]测量了氧化石墨烯(GO)-水纳米流体(纳米颗粒粒径分别为 80,30,14nm)的表面张力,发现纳米流体的表面张力高于基础流体且随纳米颗粒粒径和质量分数的增加而升高。Moosavi 等^[17]发现以 ZnO 为纳米颗粒,乙二醇和甘油混合液为基础流体,柠檬酸铵为表面活性剂的纳米流体的表面张力比基础流体大,且随纳米颗粒体积分数的增加而升高。Bhuiyan 等^[29]发现, SiO_2 -甲醇纳米流体的表面张力随纳米颗粒体积分数的增加而升高。Saad Tanvir 和 Li^[33]测量了 Al_2O_3 、 Al 、 B 、多壁碳纳米管(MWCNT)与乙醇形成的纳米流体,发现当纳米颗粒质量分数小于 3%时,纳米流体的表面张力只是随纳米颗粒质量分数的增加略微升高;当纳米颗粒质量分数大于 3%时,纳米流体的表面张力随纳米颗粒质量分数的增加而升高。

在 Al_2O_3 -水纳米流体表面张力的研究中也发现了例外的情况,如 Jeong 等^[7]和 Zhou 等^[31]均发现纳米流体的表面张力随 Al_2O_3 体积分数的增加而减小。Jeong 等研究了体积分数分别为 0.5%, 1%, 2%, 4%的 Al_2O_3 -水纳米流体的表面张力,发现纳米流体的表面张力随纳米流体体积分数的增加而降低。同样的, Zhou 等发现当 Al_2O_3 体积分数为 1%, 1.5%, 2%, 2.5%时,纳米流体的表面张力也降低,这两种纳米流体中均添加了表面活性剂做分散剂,出于保密原因没有告知分散剂具体是何种物质。此外, Panzali 等^[34]测量了体积分数分别为 2%, 4%, 8%的 CuO -水纳米流体的表面张力,发现体积分数为 8%的 CuO -水纳米流体的表面张力明

显低于体积分数为 4%的 CuO -水纳米流体的表面张力,而体积分数为 2%和 4%的 CuO -水纳米流体的表面张力则相同。Ahammed 等^[30]制备了体积分数分别为 0.05%, 0.1%, 0.15%的石墨烯(GR)-水纳米流体,并添加了体积分数为 5%的十二烷基苯磺酸钠(SDBS)用以稳定纳米流体,发现纳米流体的表面张力随纳米颗粒体积分数的升高而降低。Okubo^[35]测量了体积分数分别为 0.0001%, 0.001%, 0.01%, 0.1%的聚苯乙烯微球(DIB76、DIC27)-水纳米流体的表面张力,发现随纳米流体体积分数的增加,纳米流体表面张力降低。Chen 等^[36]在蒸发条件下测量了 0.5%合成锂皂石(laponite)、0.04% Ag 、聚吡咯衍生碳纳米管(p-CNTs)与去离子水形成的纳米流体的表面张力,发现在蒸发过程中,纳米流体的体积分数增加,流体表面张力下降,而 p-CNTs-水纳米流体的表面张力随着表面活性剂十二烷基磺酸钠(NaDBS)体积分数的增加而降低。p-CNTs-水纳米流体表面张力的研究结果与 Kumar 等^[23]的研究结果一致。Yang 等^[37]分别以纯水和质量分数为 25%的氨水溶液作为基础溶液,然后分别添加 SiC 、 TiN 、 Al_2O_3 与 SDBS、炭黑与聚氧乙烯辛基苯酚醚-10(OP-10),制备了 8 种纳米流体,其中 SiC 与纯水、氨水溶液以及 TiN 与纯水、氨水溶液形成的纳米流体的表面张力随纳米颗粒质量分数的增加而降低;而($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SDBS}$)与纯水、氨水溶液形成的纳米流体的表面张力,以及(炭黑+OP-10)与纯水、氨水溶液形成的纳米流体的表面张力则随表面活性剂 SDBS 与 OP-10 质量分数的增加而降低,且当表面活性剂的含量低于临界胶束浓度(CMC)时,加入纳米粒子可以增加流体的表面张力。Chinnam 等^[26]用 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 、 ZnO 与 60%丙三醇和 40%水的混合液制备了 4 种纳米流体(其中添加了表面活性剂,但未注明具体物质),并测量了 4 种纳米流体的表面张力,结果发现纳米流体的表面张力随纳米颗粒体积分数的增加而降低。Das 等^[8]用不同的表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)和乙二酸(AA)制备了 TiO_2 -水纳米流体,对其表面张力进行测量,发现表面张力降低,但这种降低是表面活性剂造成的。Saad Tanvir 和 Li Qiao 测量了质量分数为 0.1%的 Al -正癸烷纳米流体的表面张力,发现其表面张力随 Span80 体积分数的增加而降低。

Saad Tanvir 和 Li Qiao 还测量了质量分数为 0.1%~10%的多壁碳纳米管(MWCNTs)-去离子

水纳米流体以及 Span80 做表面修饰剂的 Al_2O_3 (质量分数为 0.1%~10%)、Al、B 与正癸烷形成的纳米流体的表面张力,发现纳米颗粒质量分数小时,纳米流体的表面张力随纳米颗粒质量分数的增加而降低,逐渐稳定后,纳米流体的表面张力随纳米颗粒质量分数(1%~10%)的增加而升高。Hemat Ranjbar 等研究了质量分数为 1%~10%的

MgO 与三甘醇(TEG)形成的纳米流体以及 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 与 TEG 形成的纳米流体(纳米颗粒粒径分别为 80,20nm)的表面张力,发现表面张力随着纳米颗粒质量分数的增加均先减小再增加,且随表面活性剂 Span80 体积分数的增加而降低。纳米流体表面张力随纳米颗粒体积分数或质量分数的变化情况见表 1。

表 1 纳米颗粒体积分数或质量分数对纳米流体表面张力的影响

纳米颗粒	纳米颗粒 表面性质	颗粒粒 径/nm	颗粒体积分数或 质量分数/%	基础流体	分散剂	相较于基础流体 表面张力变化	表面张力的变化
SiO_2 [27-28]	亲水	5~15, 10~20	0.05~0.25(体积分数)	蒸馏水	—	高于基液	升高
Al_2O_3 [27-28]	亲水	13,50	0.05~0.25(体积分数)	蒸馏水	—	—	升高
Al_2O_3 [15]	亲水	50	0~1g/L	水	无	高于基液	升高
Al_2O_3 [33]	亲水	25	0.1,0.5,1,2,3,4,5,7,10 (质量分数)	去离子水	无	—	升高
Al_2O_3 [6]	亲水	110~210	0.001,0.01,0.1(体积分数)	水	—	高于基液	升高
ZrO_2 [6]	亲水	110~250	0.001,0.01,0.1(体积分数)	水	—	高于基液	升高
TiO_2 [27-28]	亲水	21	0.05~0.25(体积分数)	蒸馏水	—	—	升高
FeC [9]	亲水	14.2	0.1,0.5,1.0(质量分数)	水	CMCNa (亲水)	0.1%,0.5%低于 基液,1%高于基液	升高
GO [25]	亲水	80,30,14	0.02,0.04,0.06,0.08, 0.10(质量分数)	水	—	高于基液	升高
ZnO [17]	亲水	—	乙二醇和甘油混合液	柠檬酸铵(亲水)	高于基液	升高	升高
SiO_2 [29]	亲水	5~15	0.05~0.25(体积分数)	甲醇	—	高于基液	升高
Al_2O_3 [33]	亲水	25	0.1,0.5,1,2,3,4,5,7,10 (质量分数)	乙醇	无	—	升高
Al [33]	亲水	18	0.1,0.5,1,2,3,4,5,7,10 (质量分数)	乙醇	无	—	升高
B [33]	亲水	80	0.1,0.5,1,2,3,4,5,7,10 (质量分数)	乙醇	无	—	升高
MWCNTs [33]	亲水改性	8~15	0.1,0.5,1,2,3,4,5,7,10 (质量分数)	乙醇	无	—	升高
Al_2O_3 [7]	亲水	47	0.5,1,2,4(体积分数)	水	有	低于基液	降低
Al_2O_3 [32]	亲水	10,20, 50,100	1,1.5,2,2.5(体积分数)	水	有	10,20nm 低于基液; 50,100nm 高于基液	降低
DIB76 [35]	疏水	109	0.0001~0.1(体积分数)	水	—	—	降低
DIC27 [35]	疏水	91	0.0001~0.1(体积分数)	水	—	—	降低
CuO [34]	亲水	30	2,4,8(体积分数)	水	—	低于基液	2%与4%相等, 8%低于4%
GR [33]	疏水	厚度: 1~5nm	0.05,0.1,0.15(体积分数)	水	SDBS (亲水亲油)	低于基液	降低
TiO_2 [8]	亲水	21	0.1,0.5,1.0,1.5,2.0 (质量分数)	蒸馏水	CTAB,AA (疏水)	低于基液	随表面活性剂浓度的 增加而降低
p-CNTs [23,36]	疏水	—	—	去离子水	NaDBS (亲水亲油)	高于基液	随 NaDBS 浓度的 增加而降低
SiC [37]	疏水	40	0.1,0.2,0.3,0.4(质量分数)	纯水	无	低于基液	降低
TiN [37]	疏水	15	0.1,0.2,0.3,0.4(质量分数)	纯水	无	低于基液	降低

续表							
纳米颗粒	纳米颗粒 表面性质	颗粒粒 径/nm	颗粒体积分数或 质量分数/%	基础流体	分散剂	相较于基础流体 表面张力变化	表面张力的变化
SiC ^[37]	疏水	40	0.1,0.2,0.3,0.4(质量分数)	25%氨水	无	低于基液	降低
TiN ^[37]	疏水	15	0.1,0.2,0.3,0.4(质量分数)	25%氨水	无	低于基液	降低
Al ₂ O ₃ ^[37]	亲水	20	0.1(质量分数)	纯水	SDBS	表面活性剂浓度低于 CMC 时,低于基液;高于 CMC 时,高于基液	随 SDBS 质量分数的增加而降低,低于 CMC 时,纳米颗粒增加表面张力
炭黑 ^[37]	疏水	20	0.1(质量分数)	纯水	OP-10 (亲水)	表面活性剂浓度低于 CMC 时,低于基液;高于 CMC 时,高于基液	随 OP-10 质量分数的增加而降低,低于 CMC 时,纳米颗粒增加表面张力
Al ₂ O ₃ ^[37]	亲水	20	0.1(质量分数)	25%氨水	SDBS	表面活性剂浓度低于 CMC 时,低于基液;高于 CMC 时,高于基液	随 SDBS 质量分数的增加而降低,低于 CMC 时,纳米颗粒增加表面张力
炭黑 ^[37]	疏水	20	0.1(质量分数)	25%氨水	OP-10	表面活性剂浓度低于 CMC 时,低于基液;高于 CMC 时,高于基液	随 OP-10 质量分数的增加而降低,低于 CMC 时,纳米颗粒增加表面张力
质量分数 0.1%							
Al ^[33]	亲水	18	0.1(质量分数)	正癸烷	Span80 (亲油)	—	随 Span80 体积分数的增加而降低
Al ₂ O ₃ ^[26]	亲水	45,20	0.5~6,1~4(体积分数)	60%丙三醇+40%水	有	低于基液	降低
SiO ₂ ^[26]	亲水	30,20	1~5,1~6(体积分数)	60%丙三醇+40%水	有	低于基液	降低
TiO ₂ ^[26]	亲水	15	0.5,1.0,1.5(体积分数)	60%丙三醇+40%水	有	低于基液	降低
ZnO ^[26]	亲水	50,36	0.5~6,0.5~4(体积分数)	60%丙三醇+40%水	有	低于基液	降低
MWCNTs ^[33]	亲水改性	8~15	0.1,0.5,1,2,3,4,5,7,10 (质量分数)	去离子水	无	—	先降低后升高
Al ₂ O ₃ ^[33]	亲水	25	0.1,0.5,1,2,3,4,5,7,10 (质量分数)	正癸烷	Span80	—	先降低后升高
Al ^[33]	亲水	18	0.1,0.5,1,2,3,4,5,7,10 (质量分数)	正癸烷	Span80	—	先降低后升高
B ^[33]	亲水	80	0.1,0.5,1,2,3,4,5,7,10 (质量分数)	正癸烷	Span80	—	先降低后升高
MgO ^[32]	亲水	20	0~10(质量分数)	三甘醇	Span80	—	先降低后升高
γ-Al ₂ O ₃ ^[32]	亲水	80,20	0~10	三甘醇	Span80	—	先降低后升高
0.5% laponite ^[36]	亲水	25~30	蒸发过程	去离子水	无	低于基液	降低
0.04% Ag ^[36]	亲水	10~30	蒸发过程	去离子水	无	低于基液	降低

注:“—”表示原文中未提到;“无”表示未添加;“有”表示已添加,却不知具体物质。

分析表 1 发现:当纳米流体中没有表面活性剂或表面活性剂为亲水型(如 CMCNa、柠檬酸铵等)时,亲水型纳米颗粒(如 Al₂O₃、TiO₂、SiO₂ 等)会增加纳米流体的表面张力,且随颗粒体积分数或质量分数的增加而升高;当纳米流体中存在疏水性表面活性剂(如 Span80、SDBS 等)或纳米颗粒为疏水型颗粒(如炭黑、GR、碳纳米管等)时,纳米流体的表面张力降低,且随颗粒体积分数或质量分数的增加而减小;但也有例外情况,如锂皂石与银均为亲水型颗

粒,而且纳米流体中没有添加表面活性剂,但纳米流体表面张力仍然降低。这是因为纳米流体体积分数的变化是通过蒸发过程实现的,不同于常用的“两步法”制备方法,再加上没有对环境和气候进行控制,所以液滴的蒸发速率从开始到结束都是不同的。蒸发过程中影响表面张力的不仅仅是颗粒的体积分数,因此纳米流体表面张力的变化不符合上述规律。当表面活性剂的含量低于 CMC 时,加入纳米粒子可以增加纳米流体的表面张力。

综上所述,可以发现大部分纳米流体的基础流体为亲水型溶剂,在通过“两步法”制备或直接购买的此类纳米流体中,当所有颗粒(包括纳米颗粒和分散剂)均为亲水型时,纳米流体的表面张力大于基础流体,且随亲水型颗粒体积分数或质量分数的增加而升高,如 Al_2O_3 -水纳米流体;而当纳米颗粒或分散剂有一种为疏水性物质时,纳米流体的表面张力小于基础流体,且随疏水型颗粒体积分数或质量分数的增加而减小,如 GR-水纳米流体。但当基础流体为亲油型溶剂且分散剂也为亲油型时,分散剂与基础流体互溶,互溶物作为新溶剂,因此纳米流体表面张力的变化由纳米颗粒决定。此外,纳米流体的表面张力还受颗粒体积分数和质量分数的影响。对于亲水型颗粒,当颗粒质量分数较小时,纳米流体表面张力先降低,之后随着颗粒质量分数的增加,纳米流体表面张力升高。

3 结果分析

范德华力是只存在于分子与分子之间或惰性气体与原子之间的一种分子间作用力,也被称为内聚力,而表面张力就是用来解释分子内聚力的一种基本物理现象。因此得出上述结论的原因可以归纳为以下几种:

首先,纳米颗粒润湿性是造成表面张力不同的一个重要原因。对于亲水性纳米颗粒,在去离子水内部比在去离子水表面受到的吸引力大,纳米颗粒更多地分散在水的内部,水表面处的纳米粒子较少。由于纳米颗粒与水分子之间的相互作用比水分子之间的相互作用强,因此表面的水分子被更强地向内拉,这种吸引力缩小了界面处的分子间距,增加了表面张力。然而,对于疏水性纳米颗粒,纳米颗粒在去离子水表面比在去离子水内部受到的斥力小,纳米颗粒聚集在表面。疏水性纳米颗粒与水分子之间的排斥力增加了界面处的分子间距,从而减小了液体内部与表面水分子之间的吸引力,降低了表面张力。因此亲水性不同的纳米颗粒对纳米流体表面张力的影响也不同。

其次,当亲水型纳米颗粒的质量分数较小时,颗粒之间的距离远远大于颗粒粒径,在排斥力的作用下,液/液界面的表面能降低,导致纳米流体表面张力下降。在质量分数较大的纳米颗粒中,由于范德华力产生的吸引力克服了颗粒间的静电排斥力,使得表面自由能增加和表面张力升高。质量分数小的亲水型纳米颗粒会导致纳米流体表面张力下降,而

质量分数较大的亲水型纳米颗粒会提高纳米流体的表面张力。

再次,含有低浓度($<\text{CMC}$)表面活性剂时,添加的纳米颗粒将吸收其表面的表面活性剂分子,这将导致“游离”表面活性剂含量降低,使纳米流体的表面张力增加。这种变化并非纳米颗粒本身性质引起的。

4 结论

(1)亲水型纳米颗粒和表面活性剂提高基础流体的表面张力,纳米流体的表面张力随着颗粒体积分数或质量分数的增加而升高;疏水型纳米颗粒或表面活性剂降低基础流体的表面张力,纳米流体的表面张力随着颗粒体积分数或质量分数的增加而下降。

(2)亲水型纳米颗粒质量分数较小时,纳米流体的表面张力随颗粒质量分数的增加而下降;亲水型纳米颗粒质量分数较大时,纳米流体的表面张力随颗粒质量分数的增加而升高。

(3)当表面活性剂浓度低于 CMC 时,添加纳米颗粒将提高纳米流体的表面张力。

参考文献

- [1] Pinto R V, Fiorellif A S. Review of the mechanisms responsible for heat transfer enhancement using nanofluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108(5): 720-739.
- [2] Gamesh G, Prbhu N K. Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment[J]. Nanoscale Research Letters, 2011, 6(1): 334-348.
- [3] Lv L C, Liu Z H. Boiling characteristics in small vertical tubes with closed bottom for nanofluids and nanoparticle-suspensions[J]. Heat Mass Transfer, 2008, 45(1): 1-9.
- [4] Kim H. Enhancement of critical heat flux in nucleate boiling of nanofluids; a state-of-art review[J]. Nanoscale Research Letters, 2011, 6(1): 415-432.
- [5] Kamatchi R, Venkatachalapathy S, Nithya C. Experimental investigation and mechanism of critical heat flux enhancement in pool boiling heat transfer with nanofluids[J]. Heat Mass Transfer, 2016, 52(11): 2357-2366.
- [6] Kim S J, Bang I C, Buongiorno J, et al. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(19/20): 4105-4116.
- [7] Jeong Y H, Chang W J, Chang S H. Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nanofluids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(11/12): 3025-3031.

- [8] Das P K, Mallik A K, Gangul Y R, et al. Synthesis and characterization of TiO_2 -water nanofluids with different surfactants [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 75(7): 341-348.
- [9] Huminic A, Huminic G, Fleaca C, et al. Thermal conductivity, viscosity and surface tension of nanofluids based on FeC nanoparticles [J]. Powder Technology, 2015, 284(11): 78-84.
- [10] Yu W, Xie H Q, Bao D. Enhanced thermal conductivities of nanofluids containing graphene oxide nanosheets [J]. Nanotechnology, 2009, 21(5): 055705.
- [11] Yu W, Xie H Q, Chen L F, et al. Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe_3O_4 nanofluids prepared via phase-transfer method [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 2010, 355(1/2/3): 109-113.
- [12] Turgut A, Tavman I, Chirtoc M, et al. Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO_2 nanofluids [J]. International Journal of Thermophysics, 2009, 30(4): 1213-1226.
- [13] Zafarani-moattar M T, Shekaari H, Munes-rast R, et al. Stability and rheological properties of nanofluids containing ZnO nanoparticles, poly(propylene glycol) and poly(vinyl pyrrolidone) [J]. Fluid Phase Equilibria, 2015, 403(15): 136-144.
- [14] 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(9): 1-11.
- [15] Zhu D S, Wu S Y, Wang N. Surface tension and viscosity of aluminum oxide nanofluids [C]//The 6th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion. AIP Conference Proceedings, 2010, 1207(1): 460-464.
- [16] 赵贯甲, 毕胜山, 吴江涛. 表面光散射法液体粘度和表面张力实验系统研制 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(1): 36-40.
- [17] Moosavi M, Goharshadi E K, Youssefi A. Fabrication, characterization, and measurement of some physicochemical properties of ZnO nanofluids [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, 31(4): 599-605.
- [18] Mursheds M S, Milanova D, Kumar R. An experimental study of surface tension-dependent pool boiling characteristics of carbon nanotubes-nanofluids [C]//ASME 2009 7th International Conference on Nanochannels, Pohang, South Korea; 2009: 75-80.
- [19] Choi U S. Enhancing thermal conductive of fluids with nanoparticles [J]. ASME FED, 1995, 231(66): 99-105.
- [20] 许世民, 郎中敏, 王亚雄, 等. 羧基化碳纳米管/水纳米流体核沸腾传热研究 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(2): 210-317.
- [21] 毕胜山, 史琳. 纳米流体沸腾传热研究进展 [J]. 化工进展, 2007, 26(10): 1411-1418.
- [22] 唐萧, 刁彦华, 赵耀华, 等. $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-R141b}$ 纳米流体的池内核态沸腾传热特性 [J]. 化工学报, 2012, 63(1): 64-70.
- [23] Kumar R, Milanova D. Effect of surface tension on nanotube nanofluids [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(7): 073107.
- [24] Saleh H, Hadhimi I. Combined surface tension and natural convection of nanofluids in a square open cavity [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index, Mechanical and Mechatronics Engineering, 9(2): 540.
- [25] Zheng Z Z. Experimental investigation on surface tension of water-based graphene oxide nanofluids [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1082: 297-301.
- [26] Chinnam J, Das D K, Vazjha R S, et al. Measurements of the contact angle of nanofluids and development of a new correlation [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 62(3): 68-80.
- [27] Bhuiyan M H U, Saidur R, Mostafizur R M, et al. Experimental investigation on surface tension of metal oxide-water nanofluids [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 65(7): 82-88.
- [28] Bhuiyan M H U, Saidur R, Amalina M A, et al. Effect of nanoparticles concentration and their sizes on surface tension of nanofluids [J]. Procedia Engineering, 2015, 105: 431-437.
- [29] Bhuiyan M H U, Saidur R, Amalina M A, et al. Effect of surface tension on SiO_2 -methanol nanofluids [J]. Materials Science and Engineering, 2015, 88: 012056.
- [30] Ahammed N, Asirvatham G, Wongwises S. Effect of volume concentration and temperature on viscosity and surface tension of graphene-water nanofluid for heat transfer applications [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 123(2): 1399-1409.
- [31] Zhou Z Y, Di Q Q, Liu B, et al. Experimental study on the surface tension of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanofluid [J]. Materials Science Forum, 2016, 852: 394-400.
- [32] Ranjbar H, Khosravi-nikou M R, Safiri A, et al. Experimental and theoretical investigation on nano-fluid surface tension [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27: 1806-1813.
- [33] Tanvir S, Li Q. Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials [J]. Nanoscale Research Letters, 2012, 7(1): 226-235.
- [34] Panzali M N, Kanaris A G, Antoniadis K D, et al. Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30(4): 691-699.
- [35] Okubo T. Surface tension of structured colloidal suspensions of polystyrene and silica spheres at the air-water interface [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1995, 171(1): 55-62.
- [36] Chen R H, Phuoc T X, Martell O D. Surface tension of evaporating nanofluid droplets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(11/12): 2459-2466.
- [37] Yang L, Du K. Investigations of surface tension of binary nanofluids [J]. Advanced Materials Research, 2011, 347/348/349/350/351/352/353: 786-790.

收稿日期: 2017-11-29

修稿日期: 2018-02-10