

文章编号:1000-582X(2006)09-0052-04

TiO₂ - 水纳米流体的粘度修正公式

刘玉东,李夔宁,童明伟,何钦波,刘彬,陈胜立

(重庆大学 动力工程学院,重庆 400030)

摘要:实验测量了 TiO₂ - 水纳米流体的粘度,发现测量值大大高于现有悬浮液粘度公式的计算值. 分析了计算值偏小的原因,并根据溶剂化效应引入有效体积分数的概念,对现有悬浮液粘度公式进行修正,得到了适用于计算纳米流体粘度的半经验公式.

关键词:粘度; 纳米流体; 有效体积分数; 溶剂化效应

中图分类号:TK124

文献标识码:A

纳米流体作为一种新型的功能流体,其较高的导热系数在强化传热领域具有极大的应用潜力^[1-2]. 自从 Choi 提出纳米流体的构想以来,人们普遍关注的是纳米流体的导热系数,而对其粘度等流变性质研究较少. 粘度是一个重要的流变参数,其大小对系统流动阻力和水泵电耗影响巨大. 目前可供参考的粘度资料集中在工业用粗颗粒悬浮液. 粗颗粒悬浮液是在工作流体中添加毫米或微米级固体颗粒,其粘度变化规律在低浓度时服从 Einstein 粘度公式及其它半经验公式. 但纳米流体是在基液中添加纳米级固体颗粒,由于纳米粒子的小尺寸效应,其行为接近于液体分子,表现出不同于粗颗粒悬浮液的特性,这些粘度公式能否适用还有待探讨. 笔者根据实测数据和理论分析,研究 Einstein 等粘度公式对 TiO₂ - 水纳米流体的适用性,并在此基础上提出纳米流体粘度的计算公式.

1 TiO₂ - 水纳米流体粘度的测量

1.1 测量仪器与样品

测量粘度的仪器采用成都仪器厂生产的锥板式粘度计 NXE-1B 型,并选配可测量小粘度的 A 转子系统. 该粘度计具有 LED 数字显示器、微型打印机、超量程指示和转轴保护等装置. 测量结果经微电脑处理后,可自动将粘度、剪切速率、剪切应力、样品编号等数据打印下来. 样品温度通过循环恒温浴槽 HS-4(B) 精确控制,其温度波动范围为 ±0.1 °C.

测量的样品为体积分数分别为 0.125 vol%、

0.25 vol%、0.5 vol%、1 vol% 的 4 种 TiO₂ - 水纳米流体. 经透射电镜测试,分散在去离子水中的 TiO₂ 纳米粒子平均直径为 60 nm.

1.2 测量步骤

在测量样品的粘度之前,先测量已知粘度的去离子水,其测量值与文献值的相对误差仅为 1.12%,说明该粘度计能保证测量精度. 然后在不同温度下测量各种浓度的 TiO₂ - 水纳米流体的粘度,考察在不同温度和纳米粒子浓度时的粘度大小.

测量粘度时,注意要在循环恒温浴槽水温平衡、试样杯温度稳定的状态下进行,一般可提前启动循环恒温浴槽.

1.3 测量结果

表 1 为不同温度下不同纳米粒子体积分数的粘度数据,其中体积分数为 0% 表示样品为去离子水. 从表 1 的结果可以看出,在基液中添加纳米粒子后,混合液的粘度均有所增加.

表 1 TiO₂ - 水纳米流体粘度测量值 mPa·s

温度/°C	体积分数/%				
	0	0.125	0.250	0.500	1.000
0	1.77	1.90	2.20	2.64	4.43
5	1.51	1.58	1.91	2.21	3.73
10	1.30	1.38	1.63	1.88	3.20
15	1.14	1.23	1.40	1.63	2.77
20	1.00	1.11	1.25	1.43	2.41
25	0.88	1.02	1.12	1.29	2.15

• 收稿日期:2006-04-15

基金项目:重庆市科技攻关项目(20025567);重庆大学博士启动基金.

作者简介:刘玉东(1972-),男,重庆忠县人,重庆大学博士,主要从事冰蓄冷及纳米流体强化传热的研究.

2 现有粗颗粒悬浮液粘度计算公式

目前许多计算粗颗粒悬浮液粘度的半经验公式大多数是由 Einstein 粘度公式演变而来^[3-4]. 对低浓度的胶体溶液或悬浮液, Einstein 推导出下面的关系式:

$$\eta = \eta_0(1 + 2.5\varphi). \quad (1)$$

式中, η 为胶体溶液或悬浮液的粘度, η_0 为基液即分散介质的粘度, φ 为分散相所占的体积分数.

对较高浓度的悬浮液, Brinkman 建议将 Einstein 粘度公式改为:

$$\eta = \eta_0(1 - \varphi)^{-2.5}. \quad (2)$$

Vand 证明在浓度更高时, 下式更适用^[5]:

$$\eta = \eta_0 \exp[(2.5\varphi + 2.7\varphi^2)/(1 - 0.609\varphi)]. \quad (3)$$

式(3)称为 Vand 公式.

Tomas 认为对固体粒子球形度较高的高浓度悬浮液, 采用下式精度较高:

$$\eta = \eta_0[1 + 2.5\varphi + 10.05\varphi^2 + 0.00273\exp(16.6\varphi)]. \quad (4)$$

3 现有粘度公式对纳米流体的适用性

分别计算式(1) - (4)在不同温度和不同浓度的粘度值, 并与表 1 的测量值比较, 结果如图 1 - 图 4 所示. 很明显, 几个经验公式的计算值比实测值普遍偏小, 浓度越高, 这种偏离越严重. 这说明, 对于纳米流体, 不能直接套用悬浮液的粘度公式.

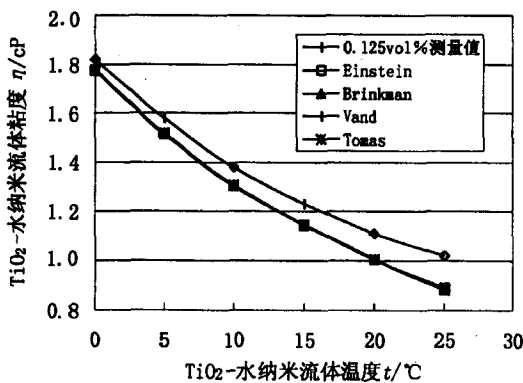


图 1 现有粘度公式与测量值比较(0.125 vol%)

4 现有悬浮液粘度公式的修正

4.1 计算值偏小的原因分析

式(1) - (4)计算结果偏小的原因, 主要在于推导过程中作了以下假设^[4]:

- 1) 粒子是远大于液体分子的圆球;
- 2) 粒子呈刚性且与分散介质无相互作用;
- 3) 稀溶液, 液体流经粒子时, 各流层互不影响;

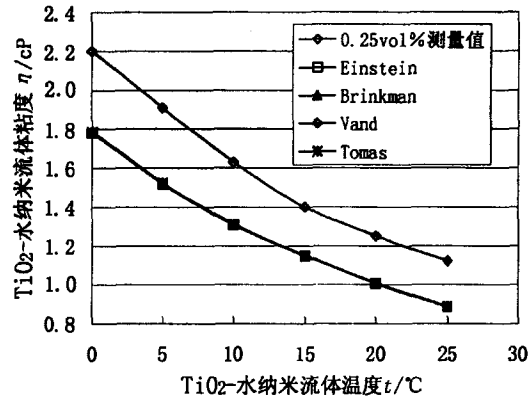


图 2 现有粘度公式与测量值比较(0.25 vol%)

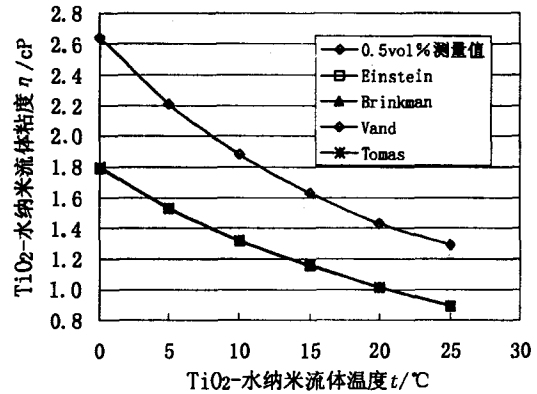


图 3 现有粘度公式与测量值比较(0.5 vol%)

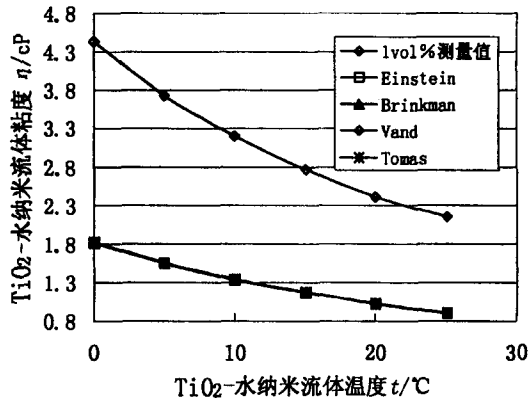


图 4 现有粘度公式与测量值比较(1 vol%)

显然, 对于纳米流体而言, 这些假设都不成立. 本实验样品中纳米粒子的直径在 60 nm 左右, 与液体分子直径相差不是很悬殊, 使得纳米粒子的行为接近于水分子的行为; 并且根据透射电镜的测量, 纳米粒子并不都是圆球形, 相当一部分为椭球形及其他不规则形状. 在相同的体积分数下, 任何对球形粒子的偏离必然导致粘度的增加. 因为纳米粒子在流动时, 既有平移运动, 又有旋转运动, 形状不对称的纳米粒子会比圆球形对称粒子消耗更多的能量, 宏观表现为粘度的增大. 同时, 纳米流体是动力学不稳定体系, 纳米粒子之间以

及纳米粒子与分散介质间有相互作用力,在流动时会相互干扰,因而也会导致分散体系粘度增加.

另外,影响粘度大小的一个重要因素是粒子表面的溶剂化效应.溶剂化效应是指溶剂分子将纳米粒子表面包裹起来,形成一定厚度的溶剂化层,使粒子的有效尺寸增大的现象.溶剂化效应使得纳米粒子的有效体积分数增大.

显然,这些因素在现有悬浮液粘度公式中均没有考虑,导致计算值严重小于测量值.

4.2 纳米流体粘度修正公式

从上面的分析可知,影响纳米流体粘度的因素是非常复杂的,长期以来,人们一直在寻找更符合实际情况的理想公式.但实际上,如果将所有因素都考虑进去,就会变得异常繁琐而缺乏实用性.因此,笔者考虑将全部影响因素归结为一项:溶剂化效应^[3-4,6],通过因溶剂化效应增大的有效体积分数去修正式(1) - (4)中的体积分数,从而得到计算纳米流体粘度的修正公式.

根据 Paul C. Hiemenz 的推导^[3,6],有效体积分数 ϕ_{eff} 可表示为:

$$\phi_{eff} = \phi(1 + \Delta R/R)^3, \quad (5)$$

式中, ΔR 为溶剂化层的厚度, R 为纳米粒子半径. 如何估算和测量 ΔR 的大小, 至今没有一个简单可行的方法. 笔者, 采用实验数据计算出 ΔR . 具体步骤为: 用式(5)中的 ϕ_{eff} 代替式(1) - (4)中的 ϕ , 然后根据实测粘度值, 反算得出 ΔR . 算出 ΔR 后, 就可由式(5)计算出有效体积分数 ϕ_{eff} , 然后将式(1) - (4)中的 ϕ 用 ϕ_{eff} 代替, 就得到 4 个修正的经验公式.

计算出的 ΔR 和 ϕ_{eff} 见表 2.

表 2 ΔR 及 ϕ_{eff}

粘度公式	$\Delta R/nm$	ϕ_{eff}/ϕ
Einstein	85.05	56.40
Brinkman	62.87	29.70
Vand	56.41	23.90
Tomas	57.54	24.85

用表 2 中的 ϕ_{eff} 代替式(1) - (4)中的 ϕ , 得到纳米流体粘度计算的修正公式:

Einstein 粘度修正公式为

$$\eta = \eta_0(1 + 141\phi), \quad (6)$$

Brinkman 粘度修正公式为

$$\eta = \eta_0(1 - 29.7\phi)^{-2.5}, \quad (7)$$

Vand 粘度修正公式为

$$\eta = \eta_0 \exp[(59.8\phi + 1542\phi^2)/(1 - 14.6\phi)], \quad (8)$$

Tomas 粘度修正公式:

$$\eta = \eta_0 [1 + 62.1\phi + 6206\phi^2 + 0.00273 \exp(412.5\phi)]. \quad (9)$$

分析表 2 中的 ΔR 值, 发现除了 Einstein 公式的 ΔR 偏大外, 其他都很接近, 因为溶剂化层的厚度取决于纳米流体本身的性质, 与采用什么公式计算无关. 取表 2 中后 3 个 ΔR 的平均值, 得到 $\Delta R = 58.9 \text{ nm}$, 即水分子及分散剂分子在纳米粒子表面包裹了厚度为 58.9 nm 的液体层, 溶剂化效应非常显著^[7-9], 使纳米粒子的有效尺寸大大增加, 如图 5 所示.

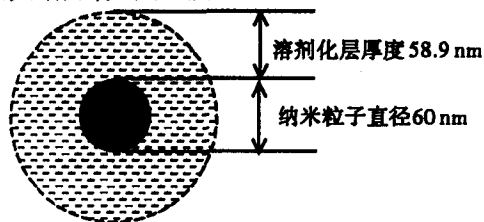


图 5 溶剂化层模型

4.3 粘度修正公式的验证

分别计算式(6) - (9)在不同温度和不同浓度的粘度值, 并与测量值比较, 结果如图 6 - 图 11 所示.

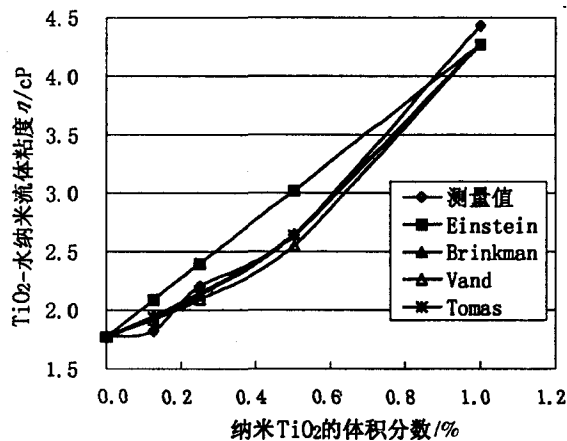


图 6 粘度修正公式与测量值比较(0 °C)

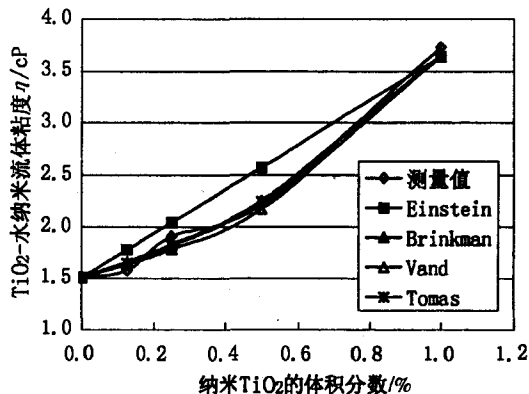


图 7 粘度修正公式与测量值比较(5 °C)

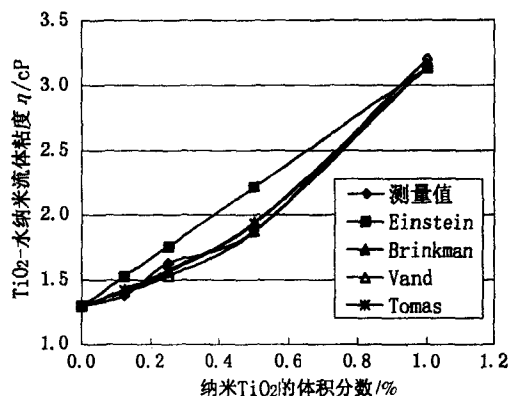


图 8 粘度修正公式与测量值比较(10 °C)

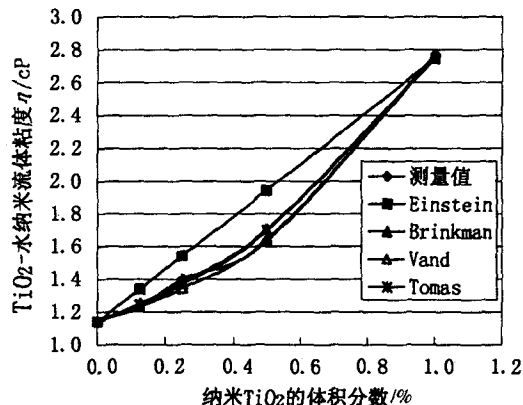


图 9 粘度修正公式与测量值比较(15 °C)

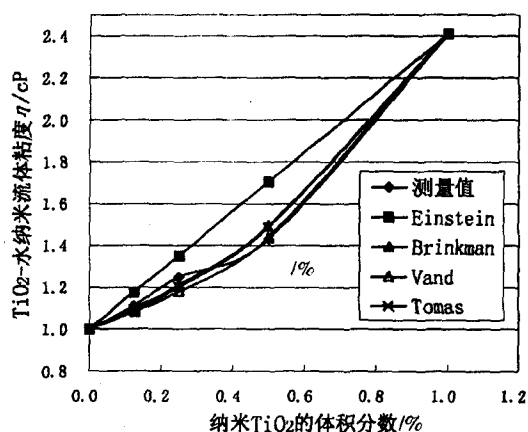


图 10 粘度修正公式与测量值比较(20 °C)

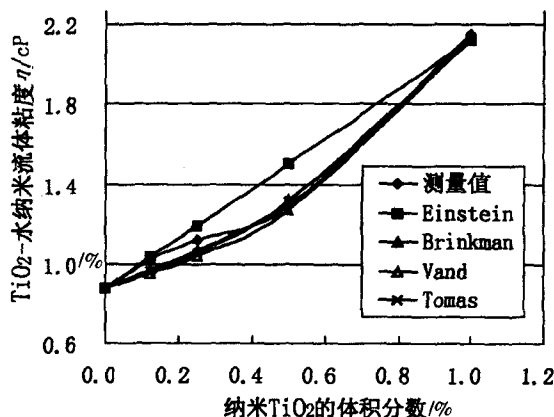


图 11 粘度修正公式与测量值比较(25 °C)

从图 6 - 图 11 知, vand、Brinkman 及 Tomas 粘度修正公式在各种温度和浓度下与测量值吻合很好, Einstein 粘度修正公式偏大. 因此, 推荐采用 vand、Brinkman 及 Tomas 粘度修正公式计算纳米流体的粘度, 而 Brinkman 粘度修正公式的表达式最简单, 因此也最实用.

5 结论

现有悬浮液的粘度公式在计算高浓度纳米流体粘度时结果严重偏小, 并且浓度越高计算误差越大, 必须在实验的基础上进行修正.

纳米流体的溶剂化效应造成纳米粒子有效体积分数的增大. 在引入有效体积分数修正后的粘度公式中, Einstein 粘度修正公式偏大, 其余均跟测量值吻合良好. 在实际应用中, 建议采用较为简洁的 Brinkman 粘度修正公式, 即 $\eta = \eta_0(1 - 29.7\varphi)^{-2.5}$.

参考文献:

[1] XUAN YM, LI Q. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2000, 21(1):

258 - 264.

[2] LEE S, CHOI SU S, LI S, et al. Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles[J]. J. of Heat Transfer, 1999, 121: 280 - 289

[3] 高濂, 孙静, 刘阳桥. 纳米粉体的分散及表面改性[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[4] 沈钟, 赵振国, 王果庭. 胶体与表面化学(第 3 版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[5] 李德才. 磁性流体理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[6] PAUL CIHIEMENZI. 胶体与表面化学原理[M]. 周祖康, 马季铭译. 北京: 北京大学出版社, 1986, 82 - 88.

[7] 程世贤. 对 Einstein 粘度公式 - 溶剂化效应的一点建议[J]. 广西中医学院学报, 2001, 4(2): 3 - 4.

[8] 魏庆莉, 王书娟, 张书圣, 等. C60 - 甲苯分散体系流变性质的研究[J]. 青岛化工学院学报, 1997, 18(3): 211 - 214.

[9] 胡林, 张朝平, 郑璐瑶, 等. 磁悬浮液体中颗粒对分散体系流变性的影响[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2000, 17(3): 194 - 198.

- [3] 郭清富. 热还原法炼镁的配料计算[J]. 轻金属, 1987, (3):38-40.
- [4] 罗黎. 皮江法炼镁原料制备过程中的工艺控制[J]. 轻金属, 1999, (4):38-40.
- [5] 李军. 硅热法炼镁中影响还原真空因数的分析[J]. 轻金属, 1995, (2):37-39.
- [6] 阎守义. 我国皮江法炼镁的现状与分析[J]. 轻金属, 2005, (6):37-40.

Study on Producing Magnesium Technology for Dolomite

JIANG Han-xiang, ZHAO Qi-qiang, GUO Hong, LIN Lin,
LONG Zhi-hui, LIANG Li, ZHANG Bin

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The main factors that influence the yield of magnesium in Pidgeon process are discussed. The study shows that making qualified spheric agglomeration, the activity of incinerated dolomite, the ratio of charging materials, the kind and amount of reductant added, the time and temperature of reducing, vacuum level, and the grain size of charging materials have effects on the yield of magnesium. It are found out The best adaption of reducing time and temperature. The result shows that the yield of magnesium reaches the highest point when the temperature is 1 230 °C, the reducing time is ten hours and the ratio of charging materials is 1. 15. The average yield is more than 75%, a better level than international standard. After analysis, the economic effects is considerable by this way.

Key words: dolomite; magnesium; briquetting

(编辑 李胜春)

(上接第55页)

Viscosity-correction Equations of TiO₂-water nanofluids

LIU Yu-dong, LI Kui-ning, TONG Ming-wei, HE Qin-bo, LIU Bin, CHEN Sheng-li

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The Viscosities of TiO₂-water nanofluids are obtained experimently, which are much greater than the calculated values of the existing viscosity formulations of suspensions. By analyzing the solvation effect of the solid/liquid interfacial layers, a concept of effective volume fraction is introduced into the usual viscosity formulations, the correction equations of which can correctly predict the magnitude of the viscosities of TiO₂-in-water nanofluids.

Key words: nanofluids; viscosity; effective volume fraction; solvation effect

(编辑 陈移峰)