

## 纳米流体稳定性及对流传热特性研究

李俊皓, 张西龙\*, 张永亮

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525)

**摘要:**以 Cu 纳米流体为例, 探究表面活性剂和 pH 值对纳米流体稳定性的综合影响以及体积分数和温度对纳米流体对流传热特性的影响。研究表明: 添加 SDBS 表面活性剂并且在弱酸性时可以最长保持 11 d 的稳定性; 布朗运动和热泳运动对对流传热受到不同体积分数和温度表现出的影响不一致; 在管道对流传热中, 努塞尔数  $Nu$  随着体积分数和温度增大而增大。

**关键词:** 纳米流体; 对流传热; 稳定性; 传热机理; 数值模拟

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)01-0088-08

## Research on the stability and convective heat transfer characteristics of nanofluids

LI Junhao, ZHANG Xilong\*, ZHANG Yongliang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** Taking Cu nanofluid as an example, the combined effect of surfactant and pH on the stability of nanofluids and the effects of volume fraction and temperature on the convective heat transfer properties of nanofluids were investigated. The results of the study showed that the SDBS surfactant was added and remained stable for up to 11 days at weak acidity. Subjected to different volume fractions and temperatures, Brownian and thermophoretic motions exhibited inconsistent effects on convective heat transfer. In the convective heat transfer in ducts, the Nussle number increases with the increase of volume fraction and temperature.

**Key words:** nanofluids; convection heat transfer; stability; heat transfer mechanism; the numerical simulation

降低能源消耗, 推进能源可持续化利用是目前全球共同的目标。在这样的大环境下, 为了降低传统能源的消耗, 太阳能、地热能等新型能源进一步被开发利用。如何提高能源转化利用效率和提高传热效率成为新的研究方向。纳米流体是一种新型传热工质<sup>[1]</sup>, 因其传热能力优秀, 应用领域广泛<sup>[2]</sup>。

近年来国内外的研究者对纳米流体传热特性和稳定性进行了大量的研究。郝宇轩等<sup>[3]</sup>、FOTUKI-ANS 等<sup>[4]</sup>分别使用  $Fe_3O_4-H_2O$  纳米流体和 CuO 纳米流体进行对流传热实验, 发现在基液中添加纳米颗粒, 导热系数分别提高了 3.51% 和 25%。ZHANG 等<sup>[5]</sup>对 Cu 纳米流体进行对流换热实验, 发现体积分数

收稿日期: 2022-11-08

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2020M682206)

作者简介: 李俊皓(1997-), 男, 贵州安顺人。硕士, 研究方向为强化传热传质。E-mail: lijunhao998496@126.com。

\* 通信作者: 张西龙(1989-), 男, 山东济宁人。博士, 副教授。主要从事强化传热传质研究。E-mail: zhangxilong@qut.edu.cn。

提升对传热能力具有正向作用。JEAN<sup>[6]</sup>发现  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体随着颗粒直径的增大导热系数提升。MEENSKSHI 等<sup>[7]</sup>发现随着温度的增大 Cu 纳米流体的导热系数增大。RAGANI 等<sup>[8]</sup>对 Cu 纳米流体在平行通道中流动的传热行为进行研究,发现流速对换热能力也具有影响,相较于抛物线入口速度,均匀入口速度时传热能力更好。稳定性是保证纳米流体展现独特传热能力的前提<sup>[9]</sup>。KAGGWA 等<sup>[10]</sup>、CAC-UA 等<sup>[11]</sup>探究不同表面活性剂对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体稳定性的影响,发现阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS)是提升纳米流体稳定性最佳表面活性剂,稳定性最大可以提高 261.3%。通过以上研究结果可以发现:纳米流体相较于传统传热工质具有较高的导热能力,由于导热性可以受到多种因素影响具有较强的可控性。其独特的传热特性在未来工业中具有重要的应用前景,因此对于纳米流体传热特性的研究是很有必要的。

本文以 Cu 纳米流体作为研究对象,综合考虑表面活性剂、超声时间和 pH 值对稳定性的影响,找到保持 Cu 纳米流体稳定性最佳制备条件,通过理论分析和数值仿真 2 种方法探究 Cu 纳米流体管道对流换热的规律。

## 1 纳米流体稳定性研究

纳米流体稳定性是指纳米颗粒长时间均匀悬浮在基液中,保证纳米流体稳定性是使纳米流体显示出正常导热性的前提条件<sup>[12-13]</sup>。由于分子间的吸引力和排斥力的相互作用,纳米颗粒会形成团聚体出现沉降现象破坏纳米流体的稳定性。为了满足实际应用条件,纳米流体作为传热工质需要保持稳定的导热性和流动性,因此探究纳米流体稳定性是很有必要的。本文通过沉降观测法来探究表面活性剂和 pH 值对纳米流体稳定性的影响,提出一种上层清液与时间之间的关系式,通过建立  $k$  与时间之间的关系可以更加清楚地观察纳米流体稳定性保持的时间:

$$k = \frac{H_0}{H} \quad (1)$$

式中: $k$  为上层清液高度和混合溶液总高度的比值,用来表征沉淀情况; $H_0$  为上层清液高度; $H$  为混合溶液总高度。

### 1.1 表面活性剂对稳定性的影响

制备 Cu 纳米流体首先将表面活性剂加入基液中进行磁力搅拌,再将纳米颗粒加入混合液中进行超声波振荡 1 h,最后将制备好的纳米流体转移到试管中静置。表面活性剂选用阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB),表 1 为材料物料信息。

表 1 材料物料信息

名称	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	比热容/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	导热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	外观
Cu	8978	1083.4	387.6	400	黑色颗粒
CTAB	1020	237.0~243.0	—	—	白色粉末
SDBS	1322	204.0~207.0	—	—	淡黄色颗粒

分别制备了质量分数之比为 1:0.5,1:1,1:2 的 Cu-SDBS 和 Cu-CTAB 纳米流体,通过静置 24 h 来观察各纳米流体样品组的稳定性情况。从图 1 和图 2 中,可以观察到 Cu-CTAB 纳米流体在质量分数之比为 1:0.5 时的稳定性最好,并没有出现上清液和沉淀的现象。而 Cu-SDBS 纳米流体在质量分数为 1:1 时稳定性最好。从以上现象可知,使 Cu 纳米流体保持良好稳定性的 2 种表面活性剂所需的质量分数不同。

将稳定性表现最好的质量分数之比为 1:1 的 Cu-SDBS 纳米流体和质量分数之比为 1:0.5 的 Cu-CTAB 纳米流体分别制备,观察长时间稳定性保持情况。规定当  $k > 0.8$  就判定纳米流体失去全部的稳定性。从图 3 中可以看出 Cu-CTAB 纳米流体在第 8 d 时已经完全失去稳定性,但是 Cu-SDBS 纳米流体在第 11 d 依然保持较好的稳定性。

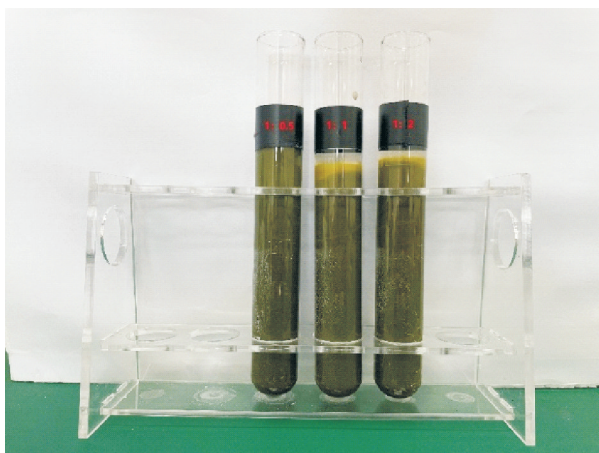


图1 Cu-CTAB纳米流体

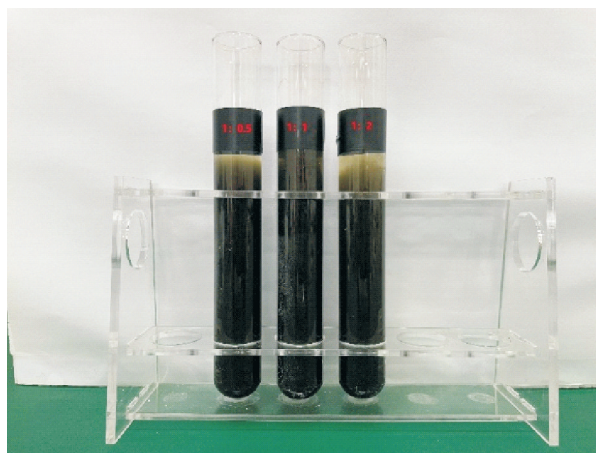


图2 Cu-SDBS纳米流体

从以上观察的现象可以得出:阴离子表面活性剂 SDBS 比阳离子表面活性剂 CTAB 可以更好地使 Cu 纳米流体保持稳定。这可能是因为 CTAB 电离出的阳离子与电解在基液中的铜离子相互排斥破坏了纳米流体的稳定性。

### 1.2 pH 值对稳定性影响

通过在 Cu 纳米流体中添加盐酸(HCl)和氢氧化钠(NaOH)来调节 pH 值。实验设置 5 种 pH 值的纳米流体,通过观察样品组的稳定性保持情况来探究制备 Cu 磁性纳米流体最佳 pH 值。选用质量分数之比为 1 : 1 的 Cu-SD-BS 纳米流体,分别调节 pH 值为强酸性(pH=3)、弱酸性(pH=5)、中性(pH=7)、弱碱性(pH=9)和强碱性(pH=11),超声振荡 1 h,最后观察样品组长时间稳定性保持情况。

图 4 为制备出的 Cu 纳米流体样品组静置 11 d 内沉淀的情况。从图 4 中可以看出 Cu 纳米流体在弱酸和中性的状态下稳定性进一步加强,其中 pH=7 状态下  $k$  值对比未调节情况下最多下降了 75%,pH=5 状态下  $k$  值对比未调节情况下最多下降了 80%。但是在 pH=3 的状态下加剧破坏了纳米流体的稳定性,对比未调节情况保持稳定性的天数减少了 2 d。

从以上现象可以得出 pH 值是影响 Cu 纳米流体稳定性的重要因素,在弱酸状态下可以进一步加强纳米流体稳定性。

## 2 纳米流体传热机理理论分析

纳米流体表现出异常的传热能力,有的研究者认为是纳米颗粒的布朗运动引起的<sup>[14-16]</sup>,有的研究者认为是热泳运动的原因<sup>[17-18]</sup>,也有研究者认为这 2 种原因并不能解释这种异常导热的能力变化。

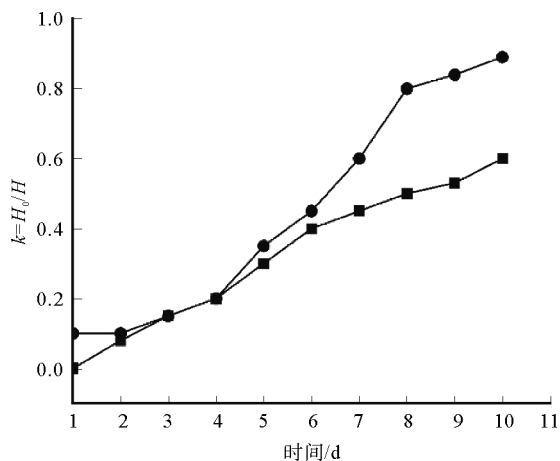


图3 纳米流体稳定性情况

■ Cu-SDBS纳米流体; ● Cu-CTAB纳米流体

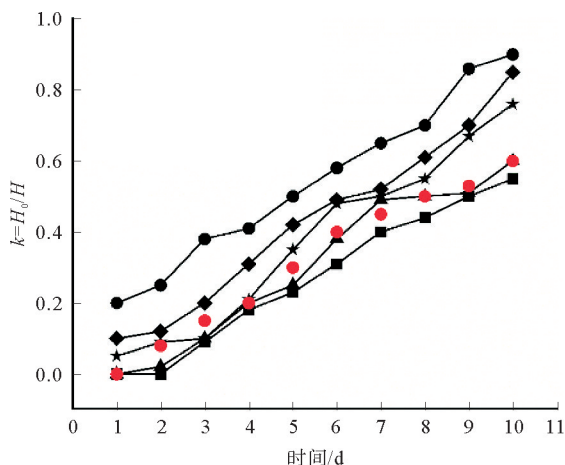


图4 不同pH的Cu-SDBS纳米流体沉淀情况

● pH=3; ■ pH=5; ▲ pH=7; ◆ pH=9; ★ pH=11; ● 未调节pH

## 2.1 理论分析

本文以纳米流体管道对流传热模型建立基于无滑移边界条件的纳米流体纳维-斯托克斯控制方程。通过对方程中的能量项进行定量分析,试图进一步解释纳米流体的传热机理。经过无量纲变化的纳米流体控制方程为

连续方程:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}$  为纳米颗粒  $x$  方向速度, m/s;  $\mathbf{v}$  为纳米颗粒  $y$  方向速度, m/s。

动量方程:

$$\mathbf{u} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\mathbf{u} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial y^2} \right) - \xi + \frac{1}{\rho_{nf} L^2} Gr \quad (4)$$

式中: $P$  为进口压力;  $\xi$  为变换的无量纲数;  $\rho_{nf}$  为纳米流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $L$  为管道长度, m;  $Gr$  为格拉晓夫数。

能量方程:

$$(V \cdot \nabla) T = \frac{1}{RePr} [\nabla^2 T + \frac{\nabla \phi \cdot \nabla T}{Le} + \frac{\nabla T^2}{Le \cdot N}] + \frac{Br}{RePr} \phi \quad (5)$$

$$\phi = 2 \left[ \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} \right)^2 \quad (6)$$

式中: $\phi$  为黏性力相关的扩散项;  $\phi$  为体积分数;  $\frac{\nabla \phi \cdot \nabla T}{Le}$  为与布朗运动相关的热扩散项;  $\frac{\nabla T^2}{Le \cdot N}$  为与热泳运动相关的热扩散项;  $Le$  为路易斯数, 是流体流动过程中传热和传质各自作用大小的无量纲数, 表示热扩散系数和质量扩散系数的比值;  $N$  为无量纲数, 表示颗粒流体流动中布朗运动扩散率与热扩散率的比值;  $T$  为纳米流体温度;  $Br$  为布林克曼数。

$$Le = \frac{k_{nf}}{(\rho C)_p D_B \phi} \quad (7)$$

$$N = \frac{\rho_{nf} D_B T_{in}}{\epsilon \eta_{nf} \Delta T} \quad (8)$$

式中: $k_{nf}$  为纳米流体导热系数;  $\rho$  为纳米流体密度;  $D_B$  为布朗运动扩散系数;  $\epsilon$  为比例系数;  $C$  为比热容, J/(kg · K);  $T_{in}$  为进口温度, K;  $\Delta T$  为变化温度, K;  $\eta_{nf}$  为纳米流体黏度。

## 2.2 计算结果分析

通过式(2)一式(8)对无量纲数  $Le$  和  $N$  进行计算。由于在式(5)中无量纲数  $Le$  和  $N$  在分母位置, 为了更直观观察各能量项在管道对流传热中贡献程度, 在图 5 和图 6 中对计算结果进行倒数处理。

从图 5 和图 6 中可以看出随着  $Cu$  纳米流体体积分数增大, 无量纲数  $1/Le$  和无量纲数  $1/Le \times N$  都在增大; 改变纳米流体进口温度, 随着温度的升高, 无量纲数  $1/Le$  和无量纲数  $1/Le \times N$  也在增大。

通过以上现象可以知: 随着温度和体积分数的增大, 与布朗运动和热泳运动相关热扩散项在  $Cu$  纳米流体管道对流传热中的贡献能力增大; 并且从数量级的角度来看, 热泳运动对管道对流传热的贡献要更重要一些。

## 3 纳米流体传热数值模拟

本文使用 ANSYS Fluent 2020 软件进行仿真。网格划分使用 ICEM 软件, 为了更好观察模型边界层温度变化, 对截面进行 O 型剖分和边界层加密处理。本文只考虑高  $Re$  下的流动情况, 因此选用  $k-\epsilon$  两方程模型, 为了保证壁面计算进度选用 scalable wall functions 壁面函数。计算方法选用 SIMPLE 算法, 由于使用的是六面体网格, 为提高计算精度空间离散方法均选用的二阶精度, 计算残差设置为  $10^{-6}$ 。

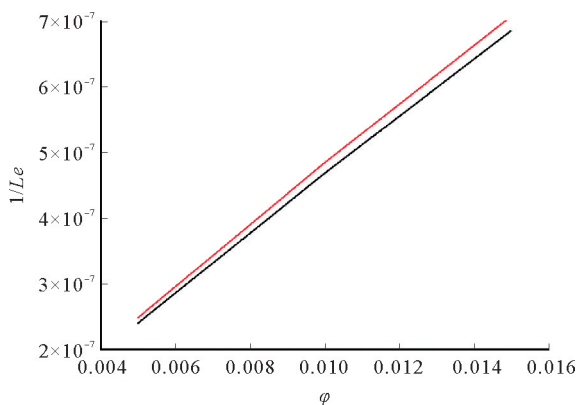


图5 布朗运动的热扩散项无量纲数计算结果  
—  $T_{in}=293\text{ K}$ ; —  $T_{in}=303\text{ K}$

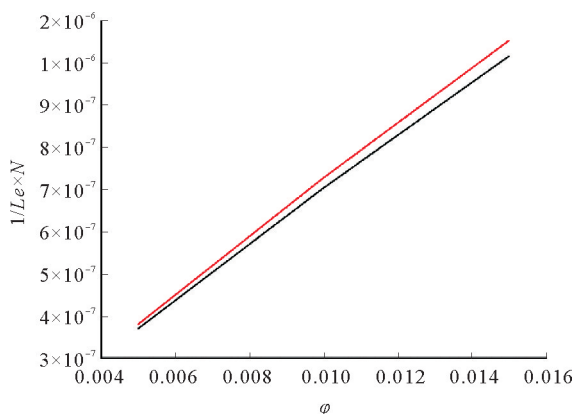


图6 热泳运动的热扩散项无量纲数计算结果  
—  $T_{in}=293\text{ K}$ ; —  $T_{in}=303\text{ K}$

### 3.1 几何模型及边界条件

图7为Cu纳米流体对流传热数值仿真的几何模型,管长为400 mm,管径为12 mm。其中进口为速度进口,进口温度  $T_{in}$  为293,303 K;出口为静压力出口;壁面为恒温壁面  $T_w=350\text{ K}$ 。

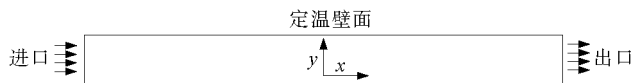


图7 几何模型

### 3.2 网格无关性验证及仿真程序验证

在计算开始前,为证明网格数量对模拟仿真结果没有影响,进行网格无关性验证。本文以水作为传热介质,在  $Re=6000$  情况下进行验证。从图8看出,当网格数量达到306 460个时,赛努尔数  $Nu$  相较于网格数223 748变化幅度为3.1%,相较于网格数418 263变化幅度为1.8%, $Nu$  的变化幅度不大。综合考虑计算时间成本和计算准确性,选用此网格进行数值仿真计算。

为了进一步验证数值仿真计算结果的有效性和准确性。将水在湍流状态下  $Nu$  随  $Re$  变化数值仿真值与已提出的湍流状态下管道换热关联式 Gnielinski<sup>[19]</sup> 公式计算值进行对比,从图9可以看出最大误差在±10%以内。综上所述,此模型数值计算结果具有有效性和准确性。

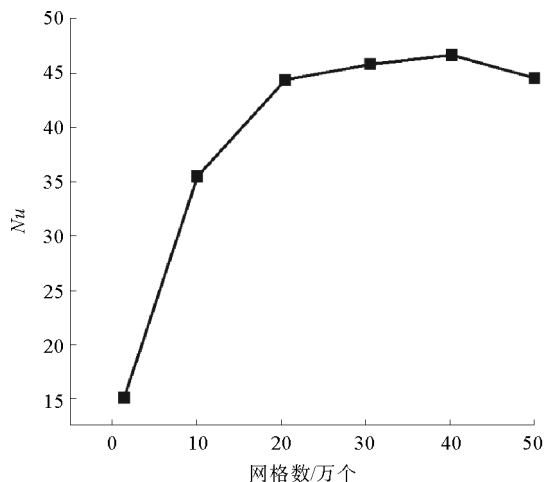


图8 水的  $Nu$  随网格数量的变化( $Re=6000$ )

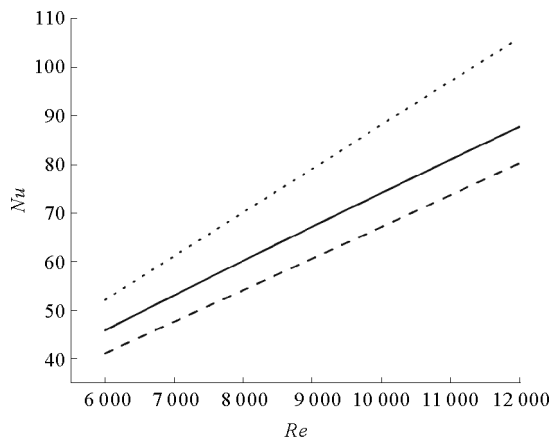


图9 湍流状态下数值仿真结果与 Gnielinski公式计算值对比

— 仿真结果; - - - Gnielinski公式结果-10%;  
· · · · Gnielinski公式结果+10%

### 3.3 计算结果分析

#### 3.3.1 体积分数对努塞尔数 $Nu$ 的影响

图10为  $T_{in}=293\text{ K}$ ,  $Re=14\ 000$  的情况下,不同体积分数下出口温度。从图10中可以明显看出:Cu

纳米流体的出口温度明显比纯水的出口温度高; 随着体积分数的增大, 出口温度也在增大。添加 Cu 纳米流体可以增强传热能力, 并且随着体积分数的增大, Cu 纳米流体传热能力增强。

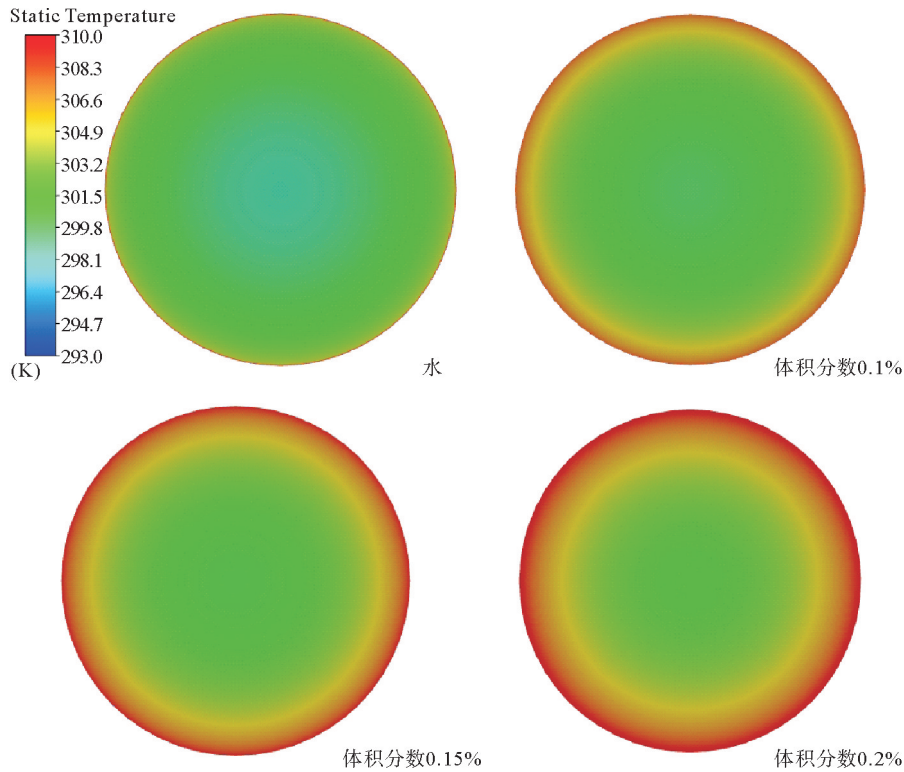


图 10 不同体积分数下出口温度

图 11 显示了纳米流体进口温度为 293 K 情况下 Cu 纳米流体的  $Nu$  随  $Re$  变化规律。为了再次验证仿真结果的准确性, 将体积分数为 0.1% 的计算值与 XUAN 等<sup>[20]</sup> 的实验值进行对比, 可以看出仿真值与实验值最大误差仅为 7.6%。

从图 11 中可以看出, Cu 纳米流体的  $Nu$  值比水的  $Nu$  值大, 并且随着体积分数的增大而增大。在进口温度为 293 K, 体积分数为 0.1% 的情况下  $Nu$  值最大增大了 7.5%; 体积分数为 0.15% 的情况下  $Nu$  值最大增大了 19.5%; 体积分数为 0.2% 的情况下  $Nu$  值最大增大了 24.9%。

从宏观的角度解释: 这是因为随着纳米流体体积分数的增大, 在流动过程中越来越多的纳米颗粒形成了更多和更长的纳米颗粒链。这种链状结构可以增大纳米流体的导热率。从微运动的角度解释: 结合第 2 章的结论可以得知, 随着体积分数的增大, 布朗运动和热泳运动对于热扩散的贡献越来越大, 因此表现出随着体积分数的增大  $Nu$  值增大。

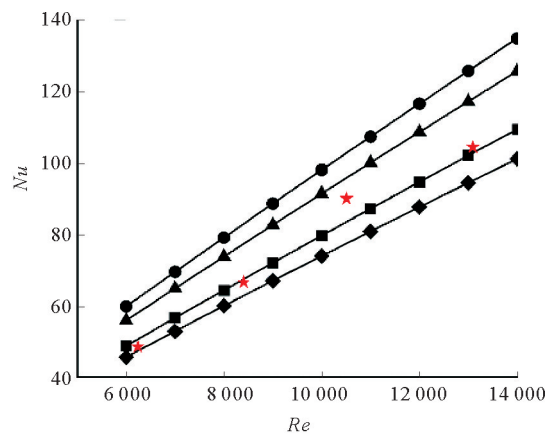


图 11 不同体积分数下  $Nu$  随  $Re$  的变化

◆ 体积分数为 0%; ■ 体积分数为 0.1%; ▲ 体积分数为 0.15%;  
● 体积分数为 0.2%; ★ 文献[20]实验值

### 3.3.2 温度对努塞尔数 $Nu$ 的影响

图12为不同进口温度的Cu纳米流体的 $Nu$ 的变化图。从图12中可以看出在体积分数为0.1%,0.15%和0.2%的情况下,进口温度为303 K的 $Nu$ 值都比进口温度为293 K时的 $Nu$ 值大。其中在体积分数为0.15%的情况下, $Nu$ 值最大提高了1.3%。这说明随着温度的增大,Cu纳米流体的导热系数增大。

从微观的角度解释:结合第2章的结论可以得到,随着温度的增大,布朗运动和热泳运动对于热扩散的贡献越来越大,因此表现出随着进口温度的增大纳米流体的 $Nu$ 值增大。

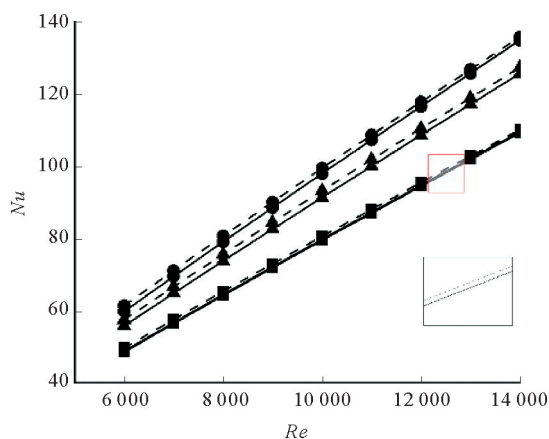


图12 不同温度下 $Nu$ 随 $Re$ 的变化

- $T_{in}=303$ , 体积分数为0.2%; -●-  $T_{in}=293$ , 体积分数为0.2%;
- ▲-  $T_{in}=303$ , 体积分数为0.15%; -▲-  $T_{in}=293$ , 体积分数为0.15%;
- $T_{in}=303$ , 体积分数为0.1%; -■-  $T_{in}=293$ , 体积分数为0.1%

## 4 结论

本文研究了Cu纳米流体稳定性及对流传热特性。对表面活性剂和pH值对Cu纳米流体稳定性的综合影响进行探究和分析。建立基于无滑移边界条件的纳米流体纳维-斯托克斯控制方程,通过无量纲变换和定量分析解释Cu纳米流体在对流传热过程中传热机理。通过与数值仿真计算结果进行比较,进一步分析体积分数和进口温度对Cu纳米流体对流传热特性的影响。通过研究得到以下结论:

1) 添加表面活性剂和调节pH值可以明显提高Cu纳米流体稳定性。添加质量分数之比为1:1的Cu-SDBS纳米流体,并调节pH值为弱酸性可以最长保持11 d稳定性。

2) 阴离子表面活性剂比阳离子表面活性剂可以更好地保持Cu纳米流体的稳定性。因为阳离子会与电离出的铜离子相互排斥破坏纳米流体稳定性。调节pH值可以改变纳米颗粒等电点从而增强稳定性。pH值对Cu纳米流体稳定性增强程度为:强酸性<弱碱性<强碱性<中性<弱酸性。

3) 体积分数和温度会影响Cu纳米颗粒布朗运动和热泳运动对热扩散贡献程度。随着体积分数和温度的增大布朗运动和热泳运动的热扩散项增大。但从数量级的角度可以看出热泳运动贡献程度更大。

4) Cu纳米流体在管道对流传热中, $Nu$ 随着体积分数的增大而增大,最多可以提高24.9%。当进口温度提高,纳米流体 $Nu$ 也在增大,这可能是由于随着体积分数和温度的提升,布朗运动和热泳运动的热扩散系数在对流传热过程中的贡献增大的结果。

### 参考文献(References):

- [1] 张巧慧,朱华. 新型传热工质纳米流体的研究与应用[J]. 能源工程,2006(2):52-54.  
ZHANG Qiaohui,ZHU Hua. Research and application of a new heat transfer fluid nanofluid[J]. Energy Engineering,2006(2):52-54.
- [2] LI J,ZHANG X,XU B,et al. Nanofluid research and applications: A review[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2021,127(1):105543.
- [3] 郝宇轩,张西龙,林荣会. 磁激励下 $Fe_3O_4$ -水纳米流体对流换热的数值模拟[J]. 低温与超导,2020,48(9):68-72.  
HAO Yuxuan,ZHANG Xilong,LIN Rong-hui. Numerical simulation of convective heat transfer in  $Fe_3O_4$ -water nanofluid under magnetic excitation[J]. Low Temperature and Superconductivity,2020,48(9):68-72.
- [4] FOTUKIANS M,ESFAGANY M N. Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2010,37(2):214-219.
- [5] ZHANG L,HU Y,LI M. Numerical study of natural convection heat transfer in a porous annulus filled with a Cu-nanofluid[J]. Nanomaterials,2021,11(4):990.
- [6] JEAN I R. A review on thermophysical properties and nusselt number behavior of  $Al_2O_3$  nanofluids in heat exchangers[J]. Journal of Thermal Science,2021,30(2):418-431.

- [7] MEENSKSHI K S,SUDHAN E. Preparation and characterization of copper oxide-water based nanofluids by one step method for heat transfer applications[J]. *Chemical Science Transactions*,2015,4(1):127-132.
- [8] RAGANI S,BAHRAMI A. Numerical investigation of copper-water nanofluid flowing in a parallel plate channel[J]. *Heat Transfer Research*,2019(7):617-632.
- [9] WANG X J,LI X,YANG S. Influence of pH and SDBS on the stability and thermal conductivity of nanofluids[J]. *Energy & Fuels*,2009,23(5):270-278.
- [10] KAGGWA A,CARSON J K,ATKINS M,et al. The effect of surfactants on viscosity and stability of activated carbon,alumina and copper oxide nanofluids[J]. *Materials Today:Proceedings*,2019,18:510-519.
- [11] CACUA K,ORDOEZ F,ZPAPATA C,et al. Surfactant concentration and pH effects on the zeta potential values of alumina nanofluids to inspect stability[J]. *Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects*,2019,583:123960.
- [12] 侯献军,叶心雨,王友恒,等. 石墨烯/氧化铝纳米冷却液稳定性和导热性能研究[J]. *武汉理工大学学报*,2022,44(5):1-7.  
HOU Xianjun, YE Xinyu, WANG Youheng, et al. Study on stability and thermal conductivity of graphene/alumina nano-coolant[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*,2022,44(5):1-7.
- [13] NASIRI A, SHARIATY-NIASAR M, RASHIDI A, et al. Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*,2011,35(4):717-723.
- [14] KALPANA G,MADHURA K R,IYENGAR S S. Numerical computation on Marangoni convective flow of two-phase MHD dusty nanofluids under Brownian motion and thermophoresis effects[J]. *Heat Transfer:Asian Research*,2020,49(1):626-650.
- [15] AKAJE T W,OLAJUWON B I. The effects of an inclined magnetic field,Brownian motion,and thermophoresis on the flow of electrically conducting and chemically reacting Casson nanofluids using Soret-Dufour mechanisms[J]. *Advances in Nanoparticles*,2022,11:55-71.
- [16] DAS R K,SOKHAL G S,SEHGAL S S. A numerical study on the performance of water based copper oxide nanofluids in compact channel;Science direct[J]. *Materials Today:Proceedings*,2020,33(3):1499-1504.
- [17] UMAVATHI J C, CHAMKHA A J. Convective stability of a permeable nanofluid inside a horizontal conduit; Fast chemical reactions[J]. *Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM)*,2021,187:155-170.
- [18] ALRESHIDI N A, SHAH Z, DAWAR A, et al. Brownian motion and thermophoresis effects on MHD three dimensional nanofluid flow with slip conditions and joule dissipation due to porous rotating disk[J]. *Molecules*,2020,25(3):729.
- [19] GNIELINSKI V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flows[J]. *International Journal of Chemical Engineering*,1976,16:359-367.
- [20] XUAN Y,LI Q. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids[J]. *Journal of Heat Transfer*,2003,125(1):151-155.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)

---

### (上接第 87 页)

- [13] 赵东平,王卢伟,喻渝,等. 隧道系统锚杆研究现状与发展方向[J]. *土木工程学报*,2020,53(8):116-128.  
ZHAO Dongping, WANG Luwei, YU Yu, et al. Research status and development direction of tunnel system bolt[J]. *China Civil Engineering Journal*,2020,53(8):116-128.
- [14] 于远祥,陈宝平,张涛,等. 基于锚杆受力分析的软岩隧道变形规律及柔模支护技术[J]. *中国公路学报*,2018,31(6):254-263.  
YU Yuanxiang, CHEN Baoping, ZHANG Tao, et al. Deformation law and flexible formwork support technology of soft rock tunnel based on force analysis of rock bolt[J]. *China Journal of Highway and Transport*,2018,31(6):254-263.
- [15] 赵亚军,朱欣鹏. 回采巷道锚杆支护参数的选择[J]. *煤炭技术*,2018,37(9):10-12.  
ZHAO Yajun, ZHU Xinpeng. Selection of rock bolting parameters in mining roadway[J]. *Coal Technology*,2018,37(9):10-12.
- [16] 时常悦,何玲玲,李进贵. 公路隧道锚杆不同加固范围作用效果模拟分析[J]. *河南科技*,2013(9):134.  
SHI Changyue, HE Lingling, LI Jingui. Simulation analysis of the effect of highway tunnel bolt[J]. *Journal of Henan Science and Technology*,2013(9):134.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)