

基于欧拉—拉格朗日观点的圆管内纳米流体流动换热的数值研究

张明建, 田茂诚, 张冠敏, 范凌灏

(山东大学能源与动力工程学院, 山东济南, 250061, Email: tianmc65@sdu.edu.cn)

摘要: 本研究采用单相流模型和 DPM 模型 (欧拉—拉格朗日离散相模型) 分别模拟了 Cu—水纳米流体在水平圆管内流动换热的特性。模拟结果得出 DPM 模型相对于单相流模型具有更高的准确性。并从纳米流体热物性以及纳米粒子微运动两种角度分析了纳米粒子强化流动换热的原因: 纳米流体强化换热不仅仅是热物性的提高, 同时也是纳米粒子微运动强化了动量和能量的交换, 增强换热。

关键词: 纳米流体; 对流换热; DPM; 数值模拟

1 引言

近十几年来, 对于纳米流体的研究主要通过实验和数值模拟的方法。文献[1]中通过实验研究了 Cu 纳米流体在水平圆管中的对流换热特性和流动特性。对于纳米流体的数值模拟主要有两种模型: 单相流模型^[2-4]和两相流模型。所谓的单相流模型就是固相和液相均被假定为连续相, 两相之间处于热平衡和相对运动平衡。由于单相流模型的性质, 颗粒运动对流动的影响的现象可以认为是单相流模型中未知和无法解释的现象。但是纳米流体终究是由液体与固体组成的两相流, 具有两相流的流动特性, 单一的单相流模型并不能从机理上去解释纳米流体强化换热的原理。鉴于此, 本研究将采用欧拉—拉格朗日离散型模型, 研究纳米流体在水平圆管中流动换热以及流动特性。

2 数值分析模型

2.1 几何模型

因圆管的对称性, 将三维问题简化为二维问题。计算模型所用的条件与文献[1]中完全一致, 管长 $L=1500\text{mm}$, 其中前 700mm 作为入口稳定段, $D=10\text{mm}$ 。

2.2 数学模型

在离散相模型中，粒子与流体的相互作用通过之间的作用力来表示。其中包括颗粒所受到的阻力、布朗作用力、热泳力、虚拟质量力以及由于由于压力梯度所产生的作用力。固相和液相之间的动量和能量交换通过源相建立,源项 S_u 和 S_E 分别代表流体与纳米粒子之间的动量和能量的双向耦合^[5]。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \frac{1}{\rho} (-\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V}) + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \nabla T = \frac{1}{(\rho c_p)} \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + S_E \quad (3)$$

$$S_u = \frac{dV_p}{dt} m_p \quad (4)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = F_D + F_B + F_T + F_V + F_P \quad (5)$$

$$F_D = \frac{18\mu_f}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (6)$$

$$F_B = \frac{216\nu K_B T}{\pi^2 \rho_f^5 C_c \left(\frac{\rho_p}{\rho_f}\right)^2} \quad (7)$$

$$F_T = \frac{7.02\pi d_p \mu_f (K + 21.18Kn)}{m_p \rho_f T (1 + 3.42Kn)(1 + 2K + 4.36Kn)} \nabla T \quad (8)$$

$$F_V = 0.5 \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{d(\mu_f - \mu_p)}{dt} \quad (9)$$

$$F_P = \left(\frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \mu_p \frac{d\mu_f}{dx} \quad (10)$$

$$S_E = \frac{dT_p}{dt} m_p c_{pp} \quad (11)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{6\kappa_f NU_p}{\rho_p c_{pp} d_p} (T_f - T_p) \quad (12)$$

$$NU_p = 2 + 0.6 \text{Re}_p^{0.5} \text{Pr}_f^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_f d_p |u_f - u_p|}{\mu_f} \quad (14)$$

2.3 边界条件

数值模拟软件为 FLUENT, 基液为水, 纳米粒子为 Cu, 粒子直径为 100nm, 入口雷诺数范围为 800~2000, 入口边界条件为速度入口, 入口温度为 300K, 出口边界条件为压力出口, 出口压力为 0 Pa, 壁面为恒热流无滑移边界条件。纳米粒子射入方式为进口面射入, 纳米粒子的追踪为非稳态追踪, 粒子流量由雷诺数、粒子密度、入口直径和粒子体积分数决定。动量、能量都采用二阶迎风格式离散方程, 压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法。计算过程中进行如下假设: ①忽略纳米流体中粒子与粒子之间的团聚作用; ②考虑到粒子所受范德华力与其他作用力相比太小, 忽略范德华力的影响; ③流体处于充分发展段且不考虑辐射的影响。

3 结果与讨论

3.1 传统单相流预测公式

单相流模型, 即假设纳米粒子与基液处于运动平衡和热平衡, 两者拥有相同的速度与温度, 单相流模型的核心内容是: 纳米流体的热物性。本次试验与模拟所采用的纳米粒子为 Cu, 粒子直径为 100nm, 本研究将采用精度较高的纳米流体热物性预测式^[6]。

3.2 数值模型验证

本研究对于圆管的模拟采用的是二维轴模型, 在管长 x 和管径 r 方向进行网格划分, 取 $\text{Re}=800$ 时的工况进行网格无关性验证。考虑到 r 和 x 方向网格数的影响, 采用了 6 种网格情况: 10×1000 、 20×1000 、 30×1000 、 50×1000 、 75×1000 、 50×2000 。由计算结果来看当网格数为 50×1000 时, 网格对于 NU 数的影响已经非常小, 因此该模拟计算采用 50×1000 的网格数量。

在进行纳米流体流动换热之前, 首先进行了纯水的在该模型流动换热的特性分析, 并与已有的经验公式和实验结果进行分析, 计算结果如图 1 所示。从模拟结果发现, 模拟结果与实验和经验公式十分接近, 三者误差在 4% 以内, 从而可见该模型具有很高的精度。

3.3 与文献数据对比

为了比较两种模型的模拟结果的准确性, 将两种模型模拟结果与文献中的实验结果进行了对比。

由图 2 左侧纳米流体对流换热系数折线图可以看出: 在纳米粒子体积分数较低时 ($\text{Vol}=0.5\%$), 两种模型的模拟结果的偏差不大 (单相流模型的最大偏差为 6.7%, DPM 模型的偏差在 3% 以内)。由此可得在低纳米粒子体积分数的情况下, DPM 模型更加准确; 不过单相流模型的偏差也在允许范围内, 考虑到模拟的时间问题, 单相流模型也是一个不

错的选择。

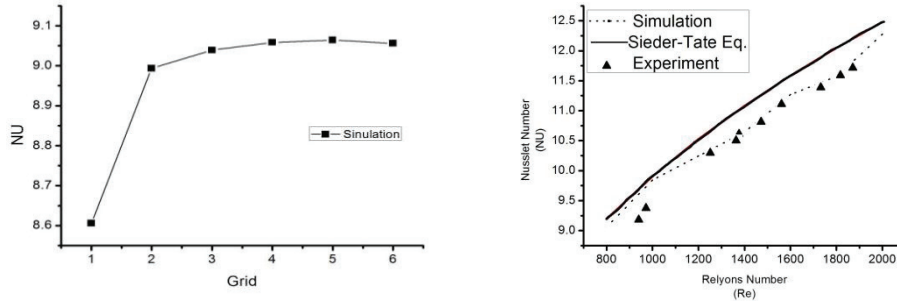


图 1 网格无关性与模型验证

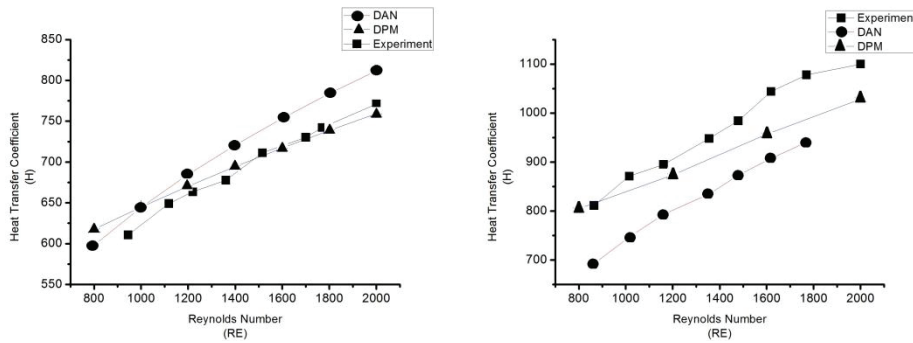


图 2 纳米流体对流换热系数 (左 vol=0.5%, 右 vol=2%)

图 2 右侧纳米流体对流换热系数折线图可以看出：在纳米粒子体积分数偏高时 (Vol=2%)，单相流模型的结果与实验结果偏差过大 (最大偏差在 15%左右)，DPM 模型相对于单相流模型与实验结果更加吻合 (最大偏差为 8%)。由此可得在高纳米粒子体积分数的情况下，DPM 模型更加准确；单相流模型偏差过大而不能准确的模拟出实验的真实情况。

3.4 结果分析

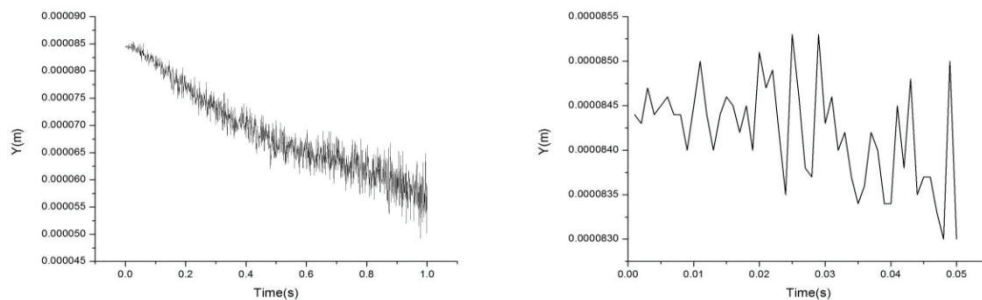


图 3 流动中纳米粒子的轨迹

图 3 左是粒子在 1s 时间内在 Y 方向的运动轨迹,从图可以看到纳米粒子会在不同流体层内的相互运动,因此这样会导致不同流体层内粒子与液体进行热量交换,导致纳米粒子的速度和温度发生显著的变化。图 3 右为粒子在 0.05s 时间内在 Y 方向的运动轨迹。轨迹线中存在的脉动现象,说明流体中纳米颗粒所受布朗力而产生的布朗运动特征。纳米粒子的运动轨迹的几何形状具有显著的分形特征,其中包括很小的波动以及大的涨落。

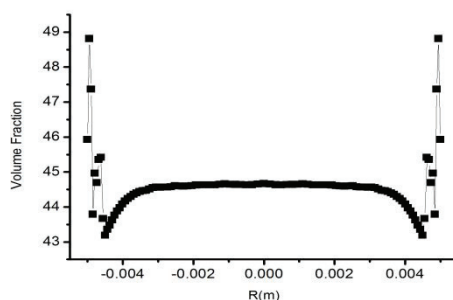


图 4 纳米粒子在管内充分发展段区域体积分数分布

由图 4 可得在壁面边界层范围内纳米粒子的浓度达到最大,然后沿着径向方向先减小后增大,到达中心流场区域后浓度保持恒定。纳米粒子在近壁区的富集导致了边界层内纳米颗粒体积分数的急剧增加,形成了高浓度的纳米流体层,极大地促进了边界层内部能量的传递。已知纳米粒子在流体内部与流体存在相对滑移,近壁处纳米粒子的聚集使得相间滑移效应更加明显。纳米粒子的存在即破坏了边界层结构,大量的聚集现象提高了边界层内部整体的热导率,使得换热能力大幅度提升。

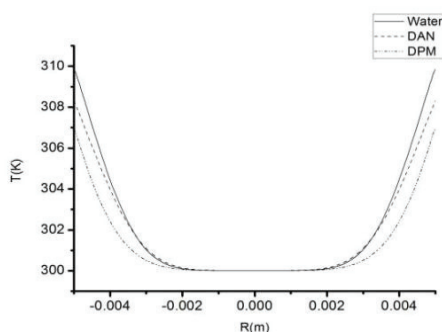


图 5 $Re=1600$, 流体出口温度分布

由图 5 纯水、单相流模型和 DPM 模型纳米流体出口处温度分布可知,由于纳米粒子的在壁面的聚集,使得壁面边界层的温度降低,并且从出口界面温度分布可以看出,纳米粒子在流体内的存在,作为了流体内的换热介质。起到了“搅拌”的作用,由于其较高的热导率,使得温度分布更加均匀,换热得到增强

4 结论

本研究采用单相流模型与离散相模型（DPM）分别模拟了纳米流体在水平圆管内的层流流动换热，并将模拟结果和实验数据对比，通过模拟结果可得：①DPM 模型相对于单相流模型具有更高的准确度；②纳米流体的强化换热并不仅仅是流体热物理性质的改变，与流体内纳米粒子的微运动有着重要的关系，粒子的微运动强化了动量和能量的交换，增强换热。

参 考 文 献

- 1 李强, 宣益民. 铜-水纳米流体流动与对流换热特性[J]. 中国科学 (E 辑), 2002, 32 (3) : 331-337.
- 2 S.R. Hosseini, M. Sheikholeslami, M. Ghasemian, D.D. Ganji. Nano fluid heat transfer analysis in a microchannel heat sink (MCHS) under the effect of magnetic field by means of KKL model Powder Technol., 2018,324: 36-47.
- 3 A. Purusothaman, N. Nithyadevi, H.F. Oztop, et al. Al-salem. Three dimensional numerical analysis of natural convection cooling with an array of discrete heaters embedded in nanofluid filled enclosure Adv. Powder Technol., 2016,27: 268-280.
- 4 H.H. Najafabadi, M.K. Moraveji. CFD investigation of local properties of Al₂O₃/water nanofluid in a converging microchannel under imposed pressure difference. Adv. Powder Technol., 2017,28: 763-774.
- 5 董双岭. 纳米流体流动与相间作用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.7
- 6 A. Albojamal, K. Vafai. Analysis of single phase, discrete and mixture models, in predicting nanofluid transport Int. J. Heat Mass Transf., 2017,114 : 225-237.

Numerical study on flow and heat transfer of nanofluids in a circular tube based on euler-lagrangian

ZHANG Ming-jian, TIAN Mao-cheng, ZHANG Guan-min, FAN Ling-hao

(School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China, Email:

tianmc65@sdu.edu.cn)

Abstract: In this paper, the single-phase flow model and the DPM model (Euler-Lagrangian discrete phase model) are used to simulate the flow and heat transfer characteristics of Cu-water nanofluids in horizontal tubes. The simulation results show that the DPM model has higher accuracy than the single-phase flow model. The reasons for the enhanced flow heat transfer of nanoparticles were analyzed from the perspectives of nanofluid thermal properties and nanoparticle micromotion. Nanofluid enhanced heat transfer is not only the improvement of thermal properties, but also the micro-motion of nanoparticles enhances the exchange of momentum and energy, and enhances heat transfer.

Key words: nanofluid, convection heat transfer, DPM, numerical simulation