

纳米流体对流换热系数增大机理^{*}

谢华清[†] 陈立飞

(上海第二工业大学城市建设与环境工程学院, 上海 201209)

(2008 年 6 月 2 日收到, 2008 年 9 月 1 日收到修改稿)

纳米流体流动换热能力优于传统流体介质, 研究了纳米流体热物性的提升和热散射对其对流换热系数的影响, 结果表明, 纳米颗粒的加入, 优化了介质的热物性, 增大了导热系数, 强化了纳米流体内颗粒、流体以及流道管壁碰撞和相互作用, 同时加强了流体的混合脉动和湍流, 从而增大了对流换热系数.

关键词: 纳米流体, 换热系数, 热散射

PACC: 4410, 8270

1. 引言

近几年来, 纳米流体已成为传热和材料领域的研究热点之一, 对其优异性能和应用前景的探索备受关注. 世界各国, 尤其是技术先进国家均大力支持有关纳米流体开发与应用的研究工作. 国内外不少知名大学和研究机构的项目组, 如美国 Argonne 国家实验室 Choi 研究小组、英国利兹大学 Ding 研究小组、印度理工大学 Das 研究小组、清华大学王补宣研究小组、南京理工大学宣益民研究小组等等, 都相继开展了纳米流体强化传热的相关研究, 研究工作在实验和理论两方面不断深化. 研究的纳米流体系统包括氧化铝、碳化硅、氧化铜、碳管、氧化硅、氧化钛或铜等纳米粉体加入到水、醇或机油等基体流体中而制备成的纳米流体, 研究的热物理和传热性能包括导热系数、对流换热系数、沸腾传热临界热流、吸附制冷性能、热管换热性能等^[1-9]. 在纳米流体强化传热的机制研究方面, 一般认为, 固液界面处液体分子规则排列, 纳米颗粒布朗运动, 纳米颗粒内能量非线性传输以及纳米颗粒形态对纳米流体内传热行为有重要影响^[4, 10-13].

换热系数是流体热物性和流体流动的综合体现, 在供热或致冷的流体介质中加入纳米颗粒制备得到的纳米流体, 换热性能得到显著提升, 其主要原因可归结为以下几个方面: 首先, 纳米颗粒的加入,

优化了介质的热物性, 增大了导热系数; 其次, 强化了纳米流体内纳米颗粒、流体以及流道管壁碰撞和相互作用; 再者, 加强了流体的混合脉动和湍流; 最后, 纳米颗粒的分散, 使得介质内横向温度梯度减小, 加大了流道表面和介质间的温度梯度. 本文采用两种方法分析纳米流体的传热性能, 推导预测其对流换热系数的关系式, 一种方法是把纳米流体看作单相流体, 从热物性的提升来考虑; 另一种方法是把纳米流体看作固液两相混合物, 用两相流的方法来处理.

2. 优化热物性对增大换热系数的作用

对单相流体流动的研究, 各种条件下的对流换热关系式均有文献可查^[14]. 如果把纳米流体以单相流体处理, 就可以把这些关系式应用于纳米流体. 在一定条件下, 这种推延是合理的, 因为用作强化传热介质的纳米流体的固相体积含量很小 ($< 10\%$), 颗粒尺度小于 100 nm, 所以很容易流态化, 这时颗粒可以被看作流体. 假定纳米流体内分散的纳米颗粒和连续相的液体间没有相对滑动, 而且纳米颗粒和流体间处于局部热平衡, 则纳米流体可以看作是一种纯流体. 与单相流体不同的是, 这时热物性均需要用纳米流体的热物性.

对于圆管内层流流动, 当管壁处于恒温条件时, 无量纲对流换热系数 Nusselt 数 Nu 关系式由 Hausen

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA05Z232)和上海市曙光计划(批准号: 07SG56)资助的课题.

[†] E-mail: hqxie@eed.sspu.cn

建立^[14],其表达式为

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 Gz}{1 + 0.04(Gz)^{1/3}}, \quad (1)$$

式中,无量纲数 Nu (Nusselt 数), Gz (Gratz 数), Re (Reynolds 数), Pr (Prantl 数)的表达式分别为: $Nu = hD/\lambda$, $Gz = (Re \cdot Pr)(L/D)$, $Re = uD/\nu$, $Pr = \eta C_p/\lambda$, 无量纲数表达式中 h 为对流换热系数, L 为距入口处的距离, D 为流道内径, u 为介质流动的平均速度, ν 为介质的动力黏度, η 为介质的运动黏度, C_p 为介质的比热, λ 为介质的导热系数。

当 L 较大时,热边界充分发展(1)式可简化为

$$Nu = 3.66. \quad (2)$$

根据 $Nu = hD/\lambda$, 可得到

$$h = \frac{3.66\lambda}{D}. \quad (3)$$

以纳米流体为流动介质时的对流换热系数 h , 同以纯流体为流动介质时的对流换热系数 h_0 的比值为

$$\frac{h}{h_0} = \frac{\lambda}{\lambda_0}. \quad (4)$$

由(4)式可知,充分发展的圆管内层流流动,不同介质工作条件下,对流换热系数正比于介质本身的导

热系数,所以当介质的导热系数增大 50%, 其对流换热效率将增大 50%. 在实际应用时,纳米流体的热物性值应由实验测定. 为方便起见,假设纳米流体的热物性值满足现有的理论关系式,物质均为常物性. 在这两个假定条件下,导热系数应用 Hamilton 和 Crossor^[15]推导的模型来计算. 其表达式为

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda_p + (n-1)\lambda_0 - (n-1)\Phi(\lambda_0 - \lambda_p)}{\lambda_p + (n-1)\lambda_0 + \Phi(\lambda_0 - \lambda_p)} \quad (5)$$

式中下标 0 和 p 分别指代基液和纳米颗粒相应的量.

比热根据加和原理可表示为

$$C_p = \frac{(1-\Phi)\rho_0 C_{p0} + \Phi\rho_p C_{pp}}{(1-\Phi)\rho_0 + \Phi\rho_p}. \quad (6)$$

黏度的计算式为

$$\eta = \eta_0(1 + 2.5\Phi + H\Phi^2) \quad (7)$$

其中 H 为 Huggins 系数,其值因不同系统(粉体的团聚度及颗粒间的电化学力)而变, $5.0 \leq H \leq 15.0$. 密度计算式为

$$\rho = (1-\Phi)\rho_0 + \Phi\rho_p. \quad (8)$$

对于圆管内的湍流流动,其 Nusselt 数的经验关系式为^[16]

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}. \quad (9)$$

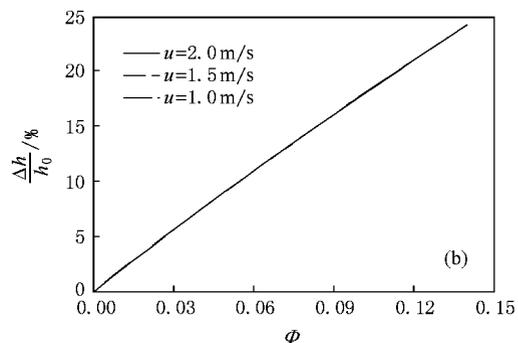
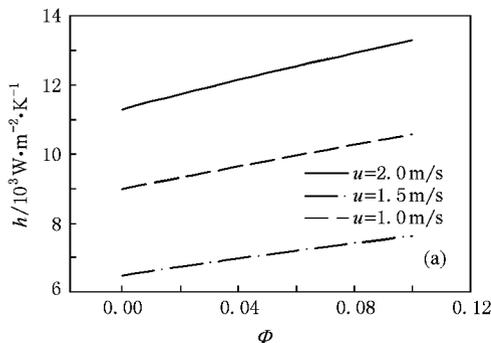


图 1 纳米颗粒加入量对流体对流换热系数的影响 (a) 对流换热系数 (b) 对流换热系数相对增加量

图 1 给出了纳米流体作为换热介质在圆管内湍流流动时,对流换热系数和介质内固相含量间的关系,计算时假设流动介质为 Al_2O_3/H_2O 纳米流体,流道内径等于 3 mm. 从图 1(a) 可以看出,纳米流体内固相含量增加,介质的对流换热系数随之增大;不同流速下的对流换热系数不同. 但是在不同流速条件下,对流换热系数的相对增加值却十分接近(见图 1(b)),这是由于把纳米流体看作了单相流体.

3. 热散射对强化传热的影响

虽然纳米流体比大颗粒悬浮液更具备流体的性

质,但它本质上是两相物质,具有固液混合物的通性. 不论从微观尺度还是从宏观尺度来看,在纳米流体流动中,有多因素起作用,如重力、布朗运动引起的作用力、流体和颗粒间的摩擦力、扩散、沉降和分散等可能同时存在,流体和颗粒界面将不再满足无滑边界,纳米颗粒的无规则运动增加了流体内部的热能传递,即纳米颗粒流动过程中的热散射. 对等壁温圆管内流来说,热散射使得圆管内流体的温度分布平坦化,降低了流体内部的温度梯度,因而管壁和纳米流体介质间的温差比纯流体介质大,进而增大了介质和管壁的热交换. 因此,纳米流体强化传热可以从以下两方面来解释:一方面纳米颗粒的加入优化

了介质的热物性参数;另一方面,纳米颗粒的混乱运动产生的热散射,加速了介质内的能量交换。

在前节中考虑了第一个因素,但忽略了第二个因素,这时流动边界层温度分布方程为

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla(\mathbf{u}T) \right] = \nabla(\lambda \nabla T). \quad (10)$$

如果考虑纳米颗粒引起的流动速度场和温度场的脉动,用微元体积平均的方法,纳米流体流动的速度 \mathbf{u} 和温度 T 可表示为^[17]

$$T = \bar{T} + \tilde{T}, \quad (11)$$

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \tilde{\mathbf{u}}, \quad (12)$$

其中, \bar{T} 为所取体积 ΔV 内平均温度, $\bar{T} = \frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} T dV$, $\bar{\mathbf{u}}$ 为所取体积 ΔV 内平均速度, $\bar{\mathbf{u}} = \frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} \mathbf{u} dV$, 且 $\frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} \tilde{T} dV = 0$, $\frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} \tilde{\mathbf{u}} dV = 0$. 假设流体和颗粒间的界面很小,可以忽略不计,把(11)和(12)式代入(10)式,经整理后,得到考虑纳米颗粒引起的流动的速度场和温度场的脉动影响后的能量方程为

$$\rho C_p \left[\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \nabla(\bar{\mathbf{u}}\bar{T}) \right] = \nabla[(\lambda \Delta \bar{T}) - \rho C_p(\tilde{\mathbf{u}}\tilde{T})]. \quad (13)$$

上式右边差分内多项式为总热流 \mathbf{q}_{sum} , 即

$$\mathbf{q}_{\text{sum}} = -(\lambda \nabla \bar{T} - \rho C_p(\tilde{\mathbf{u}}\tilde{T})) = \mathbf{q} + \mathbf{q}_{\text{dis}}. \quad (14)$$

与单相流体流动的能量方程(10)式右边差分内多项式相比,(14)式右边多了一项,代表了由于热散射引起的热流. 湍流边界层模型中,动量、热量、和质量的输运看作是旋涡运动所造成的,这种在边界层中的小部分流体运动很短的时间就失去了它们的本性. 由于这种运动,使动量、能量和组分的输运显著增强. 类似于湍流模型,可以定义由于热散射引起的热扩散率 α_{dis} , 有

$$\alpha_{\text{dis}} = -\frac{(\tilde{\mathbf{u}}\tilde{T})}{\nabla \bar{T}}. \quad (15)$$

把(15)式代入(13)式中,则(13)式变为

$$\rho C_p \left[\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \nabla(\bar{\mathbf{u}}\bar{T}) \right] = \nabla[(\lambda \nabla \bar{T}) + \rho C_p \alpha_{\text{dis}} \nabla \bar{T}]. \quad (16)$$

把(16)式写作

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \nabla(\bar{\mathbf{u}}\bar{T}) = \nabla[(\alpha + \alpha_{\text{dis}}) \nabla \bar{T}]. \quad (17)$$

把(17)式改写为

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \nabla(\bar{\mathbf{u}}\bar{T}) = \nabla[\alpha(1 + \epsilon_D) \nabla \bar{T}], \quad (18)$$

其中 ϵ_D 定义为热散射系数, $\epsilon_D = \frac{\alpha_{\text{dis}}}{\alpha}$. 可见,考虑纳米颗粒的混乱运动产生的热散射后,得到的微分方程形式与单相流体流动相同,只是增加了一个反映热散射大小的参数 ϵ_D . ϵ_D 等于纳米颗粒微扰动引起的热散射和宏观热扩散间的比值. 很明显, ϵ_D 与纳米颗粒的性质(热物性、大小和形状)、固相含量、流体性质以及流动的模式密切相关. 由于影响因素的复杂性,难以通过解析解求得 ϵ_D 的值, ϵ_D 值一般需要通过实验测量获得,通过数值求解包含各影响因素的两相流方程也可预测 ϵ_D 值的大小.

热散射在大颗粒悬浮液流动和流体流过多孔介质的传热过程中起加强热量传递的作用^[18-23]. 对于纳米流体的流动,采用 Kuwahara 等^[23]的数值计算结果,具体关系式为

$$\epsilon_D = \frac{0.022 Pe_D^{1.7}}{\Phi^{0.25}} \quad Pe_D < 10, \quad (19a)$$

$$\epsilon_D = 0.052 \Phi^{0.5} Pe_D \quad Pe_D > 10, \quad (19b)$$

式中 $Pe_D = Pe\Phi^{0.5}$. 图2是根据(19)式计算的纳米流体流动过程中的热散射系数,纳米流体内固相颗粒平均粒径为 50 nm. 从图中可以看出, ϵ_D 随 Peclet 数增大而增大,表明对于固相含量和颗粒尺度一定的纳米流体,流速增大,因热散射引起的热量传输增大. 热散射系数与固相含量有关,在相同的 Peclet 数条件下, ϵ_D 随纳米流体内固相含量的增加而增加.

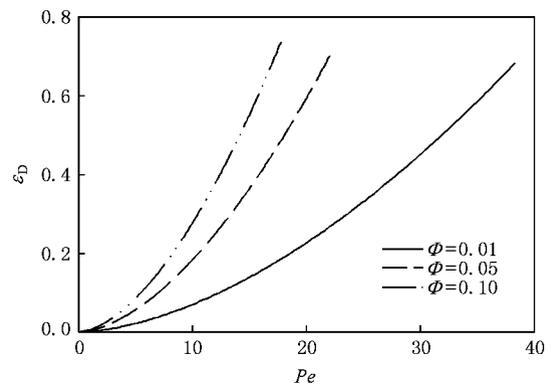


图2 热散射系数和 Peclet 数的关系

对于稳态流动的圆管内流,(18)式可简化为

$$\bar{\mathbf{u}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 + \epsilon_{D,r}) r \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(1 + \epsilon_{D,x}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right]. \quad (20)$$

上式考虑了在径向和纵向热散射效果的不同,如果轴向温度梯度远小于径向温度梯度,即

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} \gg \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2}, \quad (21)$$

则(20)式可简化为

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 + \epsilon_{D,r}) r \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right]. \quad (22)$$

当层流的速度边界层充分发展时,轴向的速度梯度

为零,径向速度分布为

$$\bar{u}(r) = 2u_m \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (23)$$

其中 u_m 为流动平均速度,可由流动介质的密度 ρ , 质量流率 \dot{m} , 流道的横截面积 A 表示为 $u_m = \dot{m} / (\rho A)$. 根据不同的边界条件,用有限差分的方法解方程(22),可求得对流换热系数.

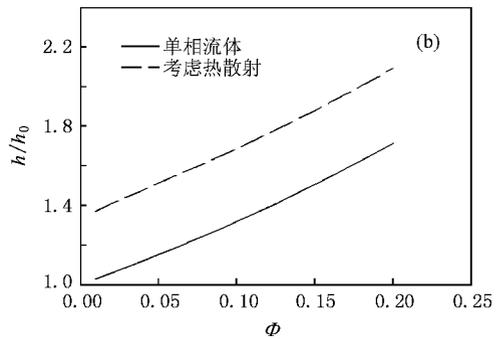
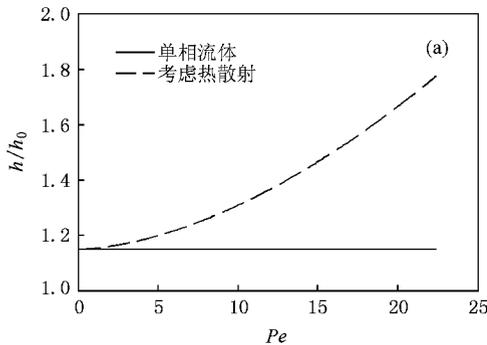


图3 纳米流体在充分发展的等表面温度圆管内层流的相对对流换热系数 (a) 与 Pe 的关系, (b) 与固相体积分含量的关系

图3给出了以纳米流体为介质流动和以基体流体为介质流动时的对流换热系数的比值 h/h_0 , 流动为充分发展的圆管内流, 边界条件为等温表面, 纳米流体中的纳米颗粒平均粒径为 50 nm. 当纳米流体的固相体积分含量为 0.05 时, 如果把纳米流体当作单相流体来处理, 即仅考虑纳米颗粒加入对优化介质热物性的作用, 那么, 纳米流体流动时的换热系数比分散流体增加一个固定值, 且增加量不随 $Peclet$ 数的变化而变化(如图 3(a) 中实线所示), 如果考虑流动时纳米颗粒引起的热散射影响, 则 h/h_0 随 $Peclet$ 数的增大而迅速增大(如图 3(a) 中虚线所示), 表明流动条件和颗粒尺度对 h/h_0 有显著影响. 当流动条件一定时, h/h_0 随纳米颗粒含量的增加而增加, 考虑流动时纳米颗粒引起的热散射影响得到的 h/h_0

较仅考虑纳米颗粒加入优化介质热物性大, 而且二者差值随 ϕ 的增加而略有增加(见图 3(b)), 表明热散射对对流换热系数的效果随固相加入量的增加而增加, 但不显著.

4. 结 论

纳米流体流动时换热系数增大的原因有两方面, 一方面是纳米颗粒的加入, 优化了原流体介质的热物性; 另一方面是纳米流体流动过程中, 其内纳米颗粒的混乱运动产生的热散射, 加强了介质内的能量交换, 纳米颗粒热散射对强化换热的贡献, 归结为在与单相流体形式相同的流动微分方程中增加了一个反映热散射大小的热散射系数.

[1] Lee S 1999 *J. Heat Transfer* **121** 280

[2] Xie H 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 4586

[3] Eastman J A 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 718

[4] Wang B X 2003 *Int. J. Heat Mass Transf.* **46** 2655

[5] Xuan Y, Li Q 2003 *J. Heat Transf.* **125** 151

[6] You S M 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3374

[7] Lee S, Choi U S 1996 *Recent Advance in Solids/Structures and Application of Metallic Materials* (New York: ASME) p227

[8] Kim J K 2007 *Int. J. Refrigeration* **30** 50

[9] Ma H B 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 143116

[10] Xie H Q, Xi T G, Wang J C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1444 [谢华清、奚同庚、王锦昌 2003 物理学报 **52** 1444]

[11] Xue Q 2003 *Phys. Lett. A* **307** 313

[12] Kumar D H 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 144301

[13] Xu J 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 4486

[14] Wang W, Guo W 1990 *Heat Transfer* (Taipei: Qiantai Press) p185 (in Chinese) [王文盛、郭文振 1990 热传递学(台北: 乾泰图书有限公司) 第 185 页]

- [15] Hamilton R L , Crosser O K 1962 *I & EC Fundamentals* **1** 187
- [16] Ge X S , Wang Y F , Guo K L 1985 *Fundamentals of Heat Transfer* (Hefei : Anhui Education Press) p219 (in Chinese) [葛新石、王义方、郭宽良 1985 传热的基本原理(合肥:安徽教育出版社)第 219 页]
- [17] Xuan Y , Roetzel W 2000 *Int. J. Heat and Mass Transfer* **43** 3701
- [18] Hunt M L , Tien C L 1988 *Int. J. Heat Mass Transfer* **31** 301
- [19] Avila R , Cervantes J 1995 *Int. J. Heat Mass Transfer* **38** 1923
- [20] Beckman L , Law V J , Bailey R V , Rosenberg D U 1990 *AIChE J.* **36** 598
- [21] Han K S , Sung H J , Chung M K 1991 *Int. J. Heat Mass Transfer* **34** 63
- [22] Eidsath D A , Carbonell R G , Whitaker S , Herman L R 1983 *Chem. Eng. Sci.* **38** 1803
- [23] Kuwahara F , Nakayama A , Koyama H 1996 *J. Heat Transfer* **118** 756

Mechanism of enhanced convective heat transfer coefficient of nanofluids^{*}

Xie Hua-Qing[†] Chen Li-Fei

(School of Urban Development and Environmental Engineering , Shanghai Second Polytechnic University , Shanghai 201209 , China)

(Received 2 June 2008 ; revised manuscript received 1 September 2008)

Abstract

Nanofluids have enhanced heat transfer capacity compared to conventional fluids. In the present paper , the effects of the thermophysical properties and thermal dispersion on the convective heat transfer coefficients of nanofluids have been investigated. The analytical results show that the effective thermal conductivities of a nanofluid is enhanced with the addition of nanoparticles into the base fluid. The collisions between nanoparticles , fluid molecules , and the wall of flow-tube are intensified , leading to enhanced mixing agitation and turbulence. Improved thermophysical properties and thermal dispersion result in the convective heat transfer coefficient enhancement of nanofluids.

Keywords : nanofluids , heat transfer coefficient , thermal dispersion

PACC : 4410 , 8270

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA05Z232) and Shanghai Educational Development Foundation and Shanghai Municipal Education Commission (Grant No. 07SG56).

[†] E-mail : hqxie@eed.sspu.cn