

纳米流体能量传递理论与应用

宣益民*

南京航空航天大学能源与动力工程学院, 南京 210016

* E-mail: ymxuan@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2013-09-03; 接受日期: 2013-12-10

国家自然科学基金(批准号: 50436020, 51225602)资助项目



摘要 本文围绕纳米流体的导热强化机理、流动与对流换热机制、能量传递的调控方法、传质特性以及应用技术等方面, 讨论了粒子属性、份额、尺度、悬浮稳定性和温度对纳米流体导热系数的影响规律, 从纳米粒子改变液体结构和纳米粒子微运动两个方面阐明了纳米流体导热强化机理. 介绍了纳米流体的流动与对流换热性能, 提出了纳米流体流动与对流换热的两相多尺度分析方法, 揭示了纳米粒子微运动及其所引起的流体微扰动对纳米流体对流换热的作用机制, 阐述了纳米流体的强化传质特性和热质比拟分析方法. 分析了外磁场作用下磁性纳米流体导热系数和对流换热的各向异性特征, 揭示了磁场对磁性纳米流体的结构、导热系数、流动与对流换热性能的影响规律, 阐明了磁性纳米流体能量自主传递特性与调控方法. 结合国内外研究进展, 介绍了纳米流体在强化传热和太阳能高效利用方面的应用研究.

关键词
纳米流体
能量传递
强化传热
强化传质

1 引言

热量传递过程几乎渗透到了领域和行业, 包括能源、动力、冶金、石油、化工等传统工业领域以及航空航天、电子、核能等高技术领域, 随着传热系统的热负荷日益增大, 对强化传热技术提出了新的更高的要求. 比如, 高温超导体的冷却、薄膜沉积中的热控制、强激光镜冷却、大功率电子元件散热及航天器热控制等等. 此时换热工质(如水、油、醇等)自身传热性能低已成为影响系统传热效能的主要瓶颈因素.

提高液体导热系数的一种有效方式是在液体中添加金属、非金属或聚合物固体粒子, 可增大液体导热系数, 强化其传热性能^[1]. 然而, 以往的研究都局限于用毫米或微米级的固体粒子^[2,3], 会带来流动阻力大幅增

加、管道磨损等不良后果, 阻碍了其应用的可行性. 1995年, 美国 Argonne 实验室的 Choi 教授提出了纳米流体(Nanofluid)的概念^[4], 即在液体中添加纳米颗粒而形成的纳米粒子悬浮液, 是突破传统工质低导热特性瓶颈的一种强化传热新方法.

纳米流体是由分散相(纳米粒子)和分散介质(基液)组成的分散体系. 一般而言, 悬浮的纳米粒子主要包括金属(如 Cu, Al, Ag, Au, Fe 等)、氧化物(如 Al₂O₃, CuO, SiO₂, TiO₂ 等)以及纳米碳管、石墨烯等, 基液的种类有水、乙二醇、油、甲苯、丙三醇、乙醇、氨水、R134a、R11、全氟三乙胺等. 为了提高纳米粒子的悬浮性能, 需要加入分散剂改变纳米粒子与周围基液、纳米粒子与纳米粒子之间的相互作用, 达到较好的悬浮粒子分散效果. 常用的分散剂主要有脂肪酸、

引用格式: 宣益民. 纳米流体能量传递理论与应用. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 269-279

Xuan Y M. An overview on nanofluids and applications (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 269-279, doi: 10.1360/092013-1236

PEO 硫醇、山梨酸油等阳离子表面活性剂和烷基苯磺酸盐、月桂酸钠、牛磺酸盐、磷酸盐等阴离子表面活性剂^[5]。

纳米流体是一种复杂的多相系统, 由于纳米粒子在液体中受到范德华引力、布朗力、相间阻力、重力、浮力等力的作用, 粒子与粒子、粒子与液体间的相互作用非常复杂, 纳米流体呈现出既不同于纯液体又有别于传统液固两相混合物的奇异的特征与能量传递特性, 存在许多重要科学问题亟待研究: (1) 传统的液固两相混合物导热理论和对流换热分析方法不适用于纳米流体, 必须建立新的理论方法以揭示纳米流体的能量传递机理. (2) 根据具体的传热要求设计纳米流体, 实现纳米流体能量传递过程的可控是实现纳米流体功能化应用的关键. (3) 纳米流体传质过程是否也能强化? (4) 纳米流体如何应用?

因此, 本文围绕纳米流体的导热强化机理、流动与对流换热机制、能量传递的调控方法、传质特性以及应用技术等方面, 系统介绍了纳米流体能量传递的基本特性和理论分析方法, 重点剖析了纳米粒子微运动及微扰动对纳米流体能量传递过程的作用机制, 介绍了纳米流体在高温流密度强化传热和太阳能等可再生能源利用领域的应用技术。

2 纳米流体导热的强化机理

2.1 纳米流体的导热系数

基于液体导热系数的瞬态双热线测量方法, 测量了不同种类、不同粒子体积份额的纳米流体的导热系数, 分析了纳米粒子体积份额、种类、尺度、纳米流体悬浮稳定性和温度对纳米流体导热系数的影响^[5-9], 如图 1 和 2 所示. 结果表明, 在液体中添加纳米粒子, 显著增加了液体的导热系数. 例如, 悬浮 5% 粒子体积份额的 Cu-水 (Cu 平均粒径 100 nm) 纳米流体的导热系数比水提高了 45% 左右. 粒子体积份额、属性、尺度、纳米流体悬浮稳定性和温度等因素是影响纳米流体导热系数的因素, 纳米粒子体积份额越大、粒子导热系数越高、粒径越小、纳米流体悬浮稳定性越好、纳米流体温度越高, 则纳米流体导热系数越大。

2.2 纳米流体导热系数的理论模型

纳米流体导热系数的强化机理有以下两个方面:

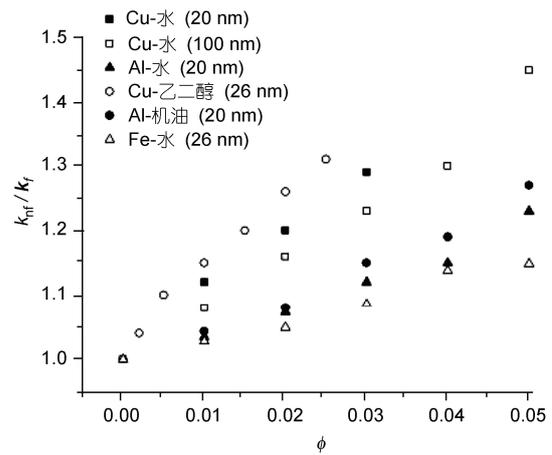


图 1 纳米流体的导热系数^[5]

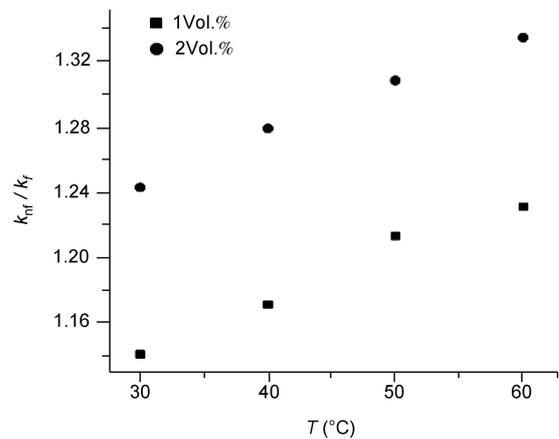


图 2 不同温度下 Cu-水纳米流体的导热系数^[7]

一是纳米颗粒改变液体的结构, 使液体变成液-固两相悬浮液, 影响了纳米流体内部的能量传递过程; 二是由悬浮于基液中的纳米粒子随机布朗运动引起并促进了流体内部的微扰动, 从而增强了纳米颗粒与基液之间的能量传递速率. 因此, 纳米流体的导热系数可表示如下^[7,10]:

$$k_{nf} = k_{m,eff} + k_{Br} \quad (1)$$

其中, k_{nf} 为纳米流体的表观导热系数, $k_{m,eff}$ 是静态导热系数, k_{Br} 是动态导热系数。

由纳米颗粒改变液体结构所引起的静态导热系数 $k_{m,eff}$ 可采用经典的 Maxwell 表达式计算; 根据 Green-Kubo 理论确定的纳米粒子微观运动、能量传递过程与宏观传输性质的关系, 可理论推导出动态导热系数 k_{Br} ^[10]. 于是

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\phi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \phi(k_p - k_f)} + \frac{18\phi H A k_B T}{\pi^2 \rho d_p^6} \tau. \quad (2)$$

这个表达式明确地反映了纳米流体导热系数强化机理, 包含了多个影响纳米流体导热系数的因素, 诸如悬浮粒子的随机动力学和随机热传递过程、纳米粒子与基液之间的能量传递、纳米粒子的体积份额、粒径和流体的温度以及分散剂等, 所有这些因素都对纳米流体内部微对流和能量传递过程产生相应的影响. 通过与不同研究小组的实验结果进行对比, 表明(2)式的计算结果与实验结果吻合^[10].

3 纳米流体的流动与对流换热机制

3.1 纳米流体的流动与对流换热特性

建立了纳米流体流动与对流换热特性的实验研究方法, 测量了不同粒子体积份额的纳米流体的对流换热系数和摩擦阻力系数. 研究发现了在相同雷诺数条件下, 纳米流体的对流换热系数比水明显增大, 且随粒子体积份额的增加而增大; 而由于纳米粒子的超细尺寸效应, 纳米流体的阻力系数与水相比并未明显增大^[11,12]. 例如, 在水中添加 2.0% 体积份额的 Cu 纳米粒子, 相同雷诺数条件下, 纳米流体的对流换热系数比水增大了约 60%.

悬浮的纳米粒子强化流体能量传递过程的两个主要机制是流体导热系数增大和粒子微扰动的影响, 考虑纳米流体的两相特征及纳米粒子微扰动机理, 提出了纳米流体对流换热的微扰动模型^[13]:

$$Nu_{nf} = c_1(1.0 + c_2\phi^{m_1} Pe_d^{m_2}) Re_{nf}^{m_3} Pr_{nf}^{0.4}. \quad (3)$$

式中粒子的贝克利数 Pe_d 可理解为是考虑了纳米流体中存在的纳米粒子微对流、微扩散效应对纳米流体对流换热的影响. 由实验数据可以确定(3)式中系数与指数, 计算值与实验值对比见图 5.

3.2 纳米流体流动与对流换热的两相多尺度分析方法

纳米流体是一个包含大量纳米粒子与周围基液相互作用的复杂多相流系统. 从不同尺度研究纳米流体的流动与能量传递过程, 可以揭示其不同的物理现象和相应的基本特征. 在介观尺度上, 需要考虑纳米流体的两相基本特征和悬浮粒子的布朗运动以及粒子与周围液体分子的相互作用; 在宏观尺度上, 就可

以将纳米流体视为一种混合均匀的拟单相工质, 可以直接将描述单相流体宏观流动过程的 N-S 方程应用于纳米流体. 因此, 将适用于不同尺度的方法耦合在一起, 形成一种经济、可行的多尺度分析方法是研究纳米流体流动与能量传递过程的有效途径.

建立了一种基于格子 Boltzmann 方法的纳米流体流动与能量传递过程的多尺度耦合分析模型^[14]: 在部分区域(如速度和悬浮纳米粒子分布变化比较剧烈的区域)考虑纳米流体的两相之间特征和粒子间的相互作用, 采用细网格多相模型; 在其他区域, 将纳米流体视为均匀混合的单相流体, 使用粗网格单相模型. 而在粗细网格的耦合区域, 信息传递遵循质量、动量和能量守恒基本原理.

1) 纳米流体宏观单相流模型(粗网格区域)

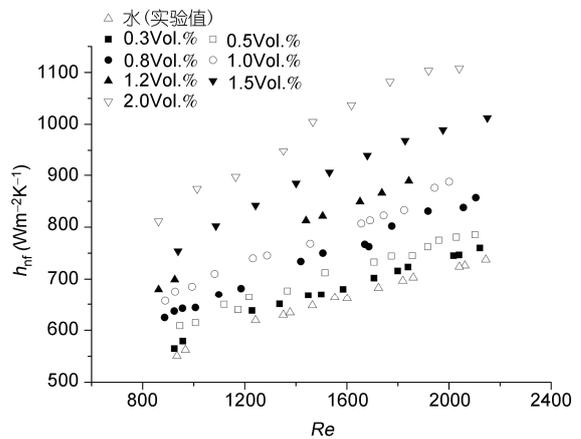


图 3 层流区 Cu-水纳米流体的对流换热系数^[12]

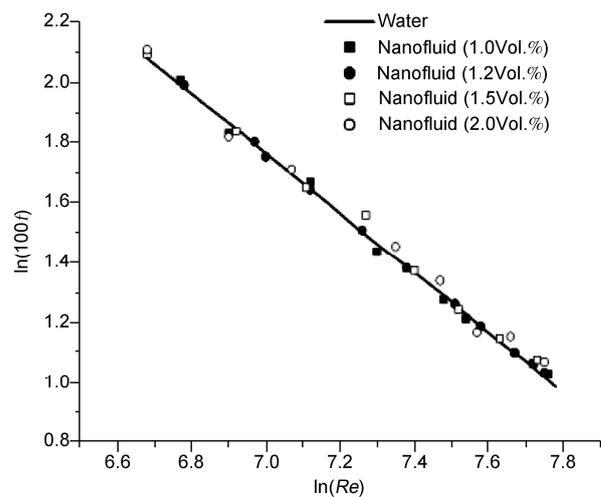


图 4 层流区 Cu-水纳米流体的阻力系数^[12]

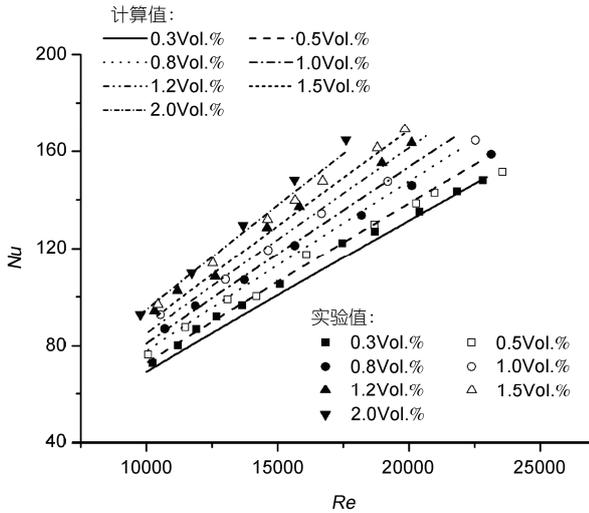


图5 湍流区纳米流体实验值与(3)式的计算值^[11]

采用 D2Q9 模型的纳米流体粒子密度分布关系 $f(X,t)$ 和采用 D2Q4 模型的纳米流体能量分布关系 $F(X,t)$ 分别为

$$f_i(\mathbf{X} + \mathbf{e}_i \Delta t^c, t + \Delta t^c) - f_i(\mathbf{X}, t) = -\frac{1}{\tau_\rho} [f_i(\mathbf{X}, t) - f_i^{\text{eq}}(\mathbf{X}, t)], \quad (4)$$

$$F_i(\mathbf{X} + \mathbf{e}_i \Delta t^c, t + \Delta t^c) - F_i(\mathbf{X}, t) = -\frac{1}{\tau_T} [F_i(\mathbf{X}, t) - F_i^{\text{eq}}(\mathbf{X}, t)]. \quad (5)$$

2) 纳米流体多相流模型(细网格区域)

在多相流区域, 必须考虑纳米流体的两相属性, 即基液和纳米粒子相须相互独立处理. 于是

$$f_i^\sigma(\mathbf{X} + \mathbf{e}_i \Delta t^f, t + \Delta t^f) - f_i^\sigma(\mathbf{X}, t) = -\frac{1}{\tau_\rho^\sigma} [f_i^\sigma(\mathbf{X}, t) - f_i^{\sigma \text{eq}}(\mathbf{X}, t)]. \quad (6)$$

$$F_i^\sigma(\mathbf{X} + \mathbf{e}_i \Delta t^f, t + \Delta t^f) - F_i^\sigma(\mathbf{X}, t) = -\frac{1}{\tau_T^\sigma} [F_i^\sigma(\mathbf{X}, t) - F_i^{\sigma \text{eq}}(\mathbf{X}, t)]. \quad (7)$$

其中, 平衡函数 $f_i^{\text{eq}}(\mathbf{X}, t)$, $F_i^{\text{eq}}(\mathbf{X}, t)$, $f_i^{\sigma \text{eq}}(\mathbf{X}, t)$, $F_i^{\sigma \text{eq}}(\mathbf{X}, t)$ 以及网格微观量与宏观量之间的关系见参考文献^[14-16].

应用上述模型, 计算分析了纳米流体聚集结构和能量传递过程. 研究发现了纳米粒子的布朗运动能有效地阻止纳米粒子的凝集和沉降, 使粒子分布更加均匀, 纳米粒子微运动增强了粒子与粒子、粒子

与液体、粒子与壁面之间的相互作用, 强化了纳米流体的能量传递过程.

4 纳米流体能量传递的调控方法

对于悬浮有磁性纳米粒子(如 Fe_3O_4 , Fe, Ni 等)的一类兼具流体流动性和磁体磁性的功能型纳米流体—磁性纳米流体, 可以通过改变外加磁场的强度、方向和性质, 调控磁性纳米流体的聚集结构、热物性参数以及对流换热特性.

分别建立了外磁场作用下磁性纳米流体的黏度、导热系数与对流换热性能的实验系统, 系统地研究了磁性纳米流体的热物性参数与对流换热性能随外磁场的变化规律^[17-19]. 结果发现: 在外磁场作用下, 磁性纳米流体的热物性参数与对流换热性能具有明显的各向异性特征. 例如, 外加与磁性纳米流体流动方向垂直的磁场, 磁性纳米流体的黏度大于其在相同磁场强度的平行方向磁场作用下的黏度^[17]; 当外加与热流传播方向平行的磁场, 磁性纳米流体的导热系数大于相同磁场强度与热流传播方向垂直的磁场作用下的导热系数^[18](图 6); 当磁场梯度与磁性纳米流体流动方向相同或相反时, 磁性纳米流体的对流换热过程被明显强化或减弱^[19](图 7).

通过引入磁性体积力 F_m 、粒子间磁偶极矩作用的磁性力 F_{mm} , 建立了磁性纳米流体的格子 Boltzmann 两相流动与传热模型, 计算模拟了外加磁场作用下磁性纳米流体能量传递过程^[20-22]. 研究发现: 当外磁场作用于磁性纳米流体时, 磁性粒子的磁矩迅速与

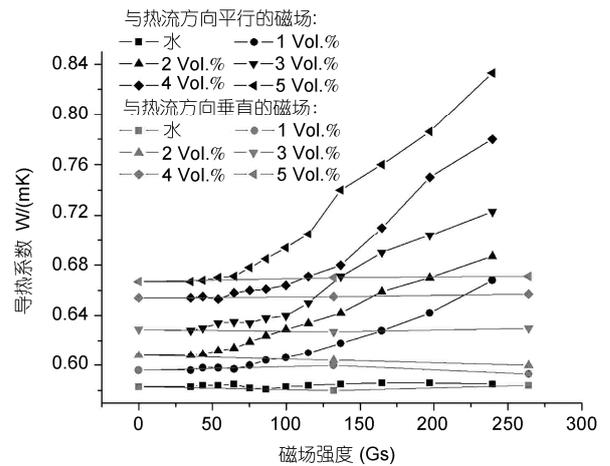


图6 水-Fe(26 nm)磁性纳米流体的导热系数^[17]

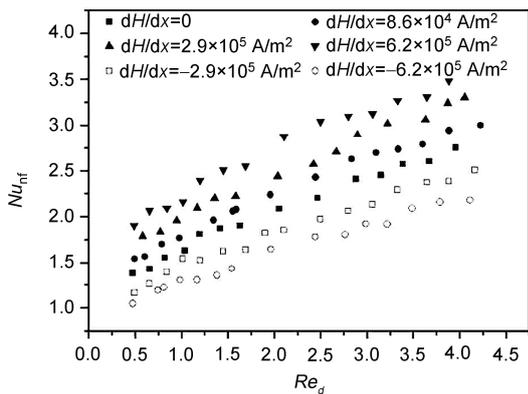


图7 水-Fe₃O₄ (10 nm)磁性纳米流体的对流换热性能^[19]

外磁场方向取向一致, 粒子沿磁场方向形成链状结构, 正是磁性粒子随外磁场变化的链状结构导致了磁性纳米流体热物性参数的各向异性特征^[20]. 在梯度磁场作用下, 磁性纳米流体会受到与流动方向相同或相反的磁体积力作用, 从而导致磁性纳米流体的对流换热过程得到强化或减弱, 另外磁场梯度与温度梯度之间的耦合关系影响了磁性纳米流体内部的热磁对流特性, 进而影响磁性纳米流体的能量传递过程^[21,22].

5 纳米流体的传质特性

悬浮纳米粒子的微扰动或微对流影响着基液内部能量传递过程, 同样也会影响着流体的传质过程.

为了研究纳米流体的传质特性, 建立了纳米流体质扩散系数的 Taylor 分散法测量系统^[23], 将罗丹明 B 染色滴滴入纳米流体中, 利用显微摄影技术观测染色剂在纳米流体中的扩散过程, 记录染色剂在纳米流体中扩散移动前锋阵面位置随时间的变化关系, 利用下式计算得到染色滴在纳米流体中的有效质扩散系数:

$$\langle (\Delta L)^2 \rangle = 2Dt. \tag{8}$$

式中, $\langle (\Delta L)^2 \rangle$ 表示平均平方位移, D 表示扩散系数, t 表示扩散时间.

图8给出了罗丹明 B 分别在水和 Cu-水纳米流体 (粒子体积分额为 0.1%, 平均粒径 25 nm) 中的扩散照片^[23], 从结果可以清楚看出罗丹明 B 在纳米流体中扩散前锋阵面移动显然比在水中的快, 悬浮的纳米粒子显著加快了染色滴在基液中的扩散, 强化液体

内部的质量扩散过程.

图9给出了罗丹明 B 在不同温度、几种粒子体积分额 Cu-水纳米流体中的扩散系数^[23]. 从图中可看出, 罗丹明 B 在纳米流体中的扩散系数大于其在去离子水中的扩散系数, 且扩散系数随着纳米粒子体积分额的增加和纳米流体温度的升高而增大.

与纳米流体导热强化机制类似, 悬浮纳米粒子强化基液内部传质过程的原因主要在以下两个方面: (1) 纳米粒子自身不规则布朗运动直接推动了质量扩散过程; (2) 纳米粒子随机运动引起了周围流体的微扰动强化了传质过程.

基于热质比拟理论, 提出了计算包括粒子布朗运动引起的微对流影响在内的纳米流体有效质扩散率的模型^[24]:

$$D_{nf}^* = D_0 + D_{i,nf} = D_0 [1 + Cf(Re, Sc, \phi)]. \tag{9}$$

式中, D_0 为二元混合物的分子扩散率; 纳米粒子布朗运动微运动及其微扰动所产生纳米流体质量扩散强化部分是 $D_{i,nf} = D_0 Cf(Re, Sc, \phi)$. 只要有足够的实验数据, 通过对实验数据的整理, 就能得到带有经验性

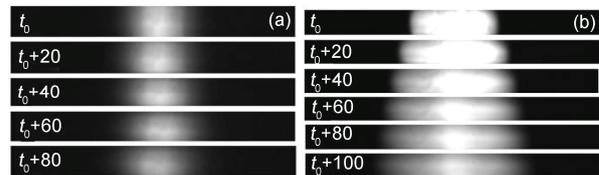


图8 罗丹明 B 扩散照片^[23]
(a) 水; (b) Cu-水纳米流体

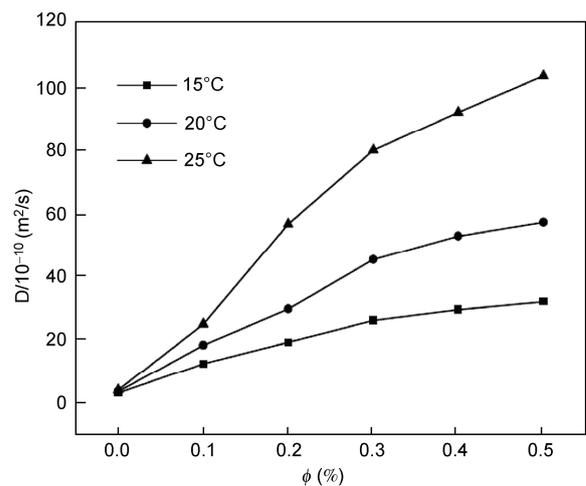


图9 罗丹明 B 在 Cu-水纳米流体中的扩散系数^[23]

质的具体表达式.

6 纳米流体的应用技术

纳米流体作为一种新型的高效、高传热性能的能量输运工质,在强化传热和可再生能源利用领域具有十分广阔的应用前景.下面简单介绍纳米流体在强化传热和太阳能高效利用方面的应用研究.

6.1 强化传热领域

纳米粒子的掺入能够明显改善原来介质的热特性,纳米流体技术的一个最直接应用是强化原来基液的导热系数和传热特性,提高热系统的传热性能.

1) 航天器热控制

泵驱动液体回路系统承担着将航天器舱内热负荷通过中间换热器传递至外循环回路最终散热于外太空环境.目前,液体回路系统采用的传热工质是一种冰点低、比热大、黏度小、无毒的化合物,具有适合在航天器中使用的独特优点,但由于它的导热系数极低(10°C 时导热系数为 $0.137\text{ W/m}\cdot\text{K}$,仅是相同温度下水的导热系数的22%),很难满足航天器不断增长的高强度、高负荷传热的要求,成为进一步提高航天器液体回路系统传热效率、研制高效紧凑的航天器热控制系统的主要障碍^[25].

采用纳米流体的两步制备方法,将Cu纳米粒子(平均粒径26 nm)与航天用液体工质按一定比例共混,制备了航天用纳米流体工质,实验研究了纳米流体的导热系数、黏度、对流换热性能和阻力特性^[9].结果表明,纳米粒子的加入提高了航天器液体回路工质的导热系数和对流换热性能,例如,2.5%粒子体积份额的纳米流体导热系数比纯工质提高了45%;2.0%粒子体积份额的纳米流体对流换热系数提高了27.5%,而纳米流体的阻力几乎没有增加.研究验证了纳米流体强化传热技术应用于航天器的可行性,为研制高效紧凑的航天器液体回路系统换热性能强化提供了新方法.

2) 电子散热

随着电子器件与设备的功率和散热热流密度越来越大,液冷技术将应用于电子冷却领域(如射流及喷雾冷却、液冷环路、热管等),如果采用纳米流体作为液冷系统的冷却工质,将可望提高液冷系统的冷却能力.

将高传热性能的Cu-水纳米流体作为换热工质引入射流技术,实验测试了不同纳米粒子体积份额的Cu-水纳米流体(平均粒径25 nm)射流冲击传热特性^[26].结果表明,在水射流介质中添加纳米粒子,可大大增强射流系统的散热冷却能力.例如,3.0%粒子体积份额的纳米流体射流换热系数比水提高了52%.纳米粒子体积份额、粒径、射流冲击高度、冲击角和入口射流速度等是影响射流冲击换热性能的主要影响因素.因此,提出了包括以上各影响因素在内的纳米流体射流冲击实验关联式^[26]:

$$Nu_{\text{nr}} = 0.2464(1.0 + 2.2061\phi^{0.8464} Pe_d^{0.2715}) Re_{\text{nr}}^{0.5375} Pr_{\text{nr}}^{1/3} \cdot [1.0 + 0.3923(H/D) + 0.0086(H/D)^2 - 0.0259(H/D)^3]. \quad (10)$$

温度敏感型磁性纳米流体(比如煤油基锰锌铁氧体温度敏感型磁性纳米流体等)是一类特殊的磁性纳米流体,其饱和磁化强度会随温度的升高而显著减小,利用温度敏感型磁性纳米流体的温度特性和磁热效应等性质,在外加磁场和温度梯度作用下,不需要附加任何外加能量驱动,可以实现能量的直接传递.因此,面向电子散热,建立了温度敏感型磁性纳米流体自动冷却的设计方法^[27,28],研制了磁性纳米流体自动冷却装置^[29](如图10所示),实验研究了装置的散热性能,分析了磁场位置、大小以及温度对装置散热性能的影响^[29-31].结果表明,自动冷却装置可产生稳定的热磁对流,实现对发热器件的散热冷却,用于小型电子器件的冷却.该冷却装置不需要机械泵,因而提高了系统的可靠性和稳定性,并且避免了机械泵工作时带来的振动和噪声.

如何降低接触热阻已成为高热流密度电子散热的关键问题之一.基于纳米流体强化传热的原理与

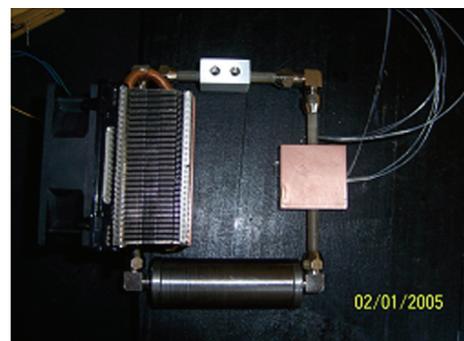


图10 (网络版彩图) 温度敏感型磁性纳米流体自动冷却装置^[29]

方法,在普通热界面材料(如环氧树脂等)中掺杂纳米材料,可以强化普通热界面材料的传热性能.例如,通过在环氧树脂中掺杂纳米 Cu 粉(100 nm)和多壁碳纳米管制备了新型热界面材料,相同压力条件下,与普通的石墨导热垫相比,接触热阻可以从 $105 \text{ mm}^2 \text{ K/W}$ 降低到 $18 \text{ mm}^2 \text{ K/W}$.

热管作为一种利用液态工质相变传热原理的高效传热元件,已广泛应用于电子设备冷却等领域.国内外一些学者将纳米流体强化传热技术应用于热管,希望能进一步提高热管的传热性能.例如, Tsai 等人^[32]开展了 Au-水纳米流体热管和以普通去离子水作为工质的热管的传热性能对比实验研究.结果显示,采用 Au-水纳米流体作为热管内的传热工质,可以显著降低热管的传热热阻.对于相同的热管,去离子水工质热管的热阻值为 0.27°C/W ,而以 Au-水纳米流体作为工质的热管热阻仅为 0.17°C/W ,降低约 37%. Israeli 等人^[33]实验研究了 CuO 纳米流体强化热管的性能,发现纳米粒子体积浓度为 3.0%的纳米流体,可以使得热管的总热阻减小 12.5%. Naphon 等人^[34]研究了 21 nm 的 Ti-R11 纳米流体热管的传热性能,发现 0.1%粒子体积比的纳米流体热管,传热效率提高了 40%.

3) 发动机冷却

Kulkarni 等人^[35]在 50%浓度的乙二醇水溶液里掺加 Al_2O_3 纳米粒子,作为柴油发电机夹套的冷却工质,明显提高了冷却效果. Al_2O_3 纳米粒子体积浓度 6%的纳米流体可以将对应于乙二醇水溶液的 78.1% 换热效率提高到 81.1%. Tzeng 等人^[36]分别将 CuO 和 Al_2O_3 纳米粒子掺加到冷却机油中,以提高 4 轮驱动汽车动力传递系统的冷却效率,避免过高的热应力产生,取得了良好的效果.

4) 核能系统

由于纳米流体比基液具有导热系数高、传热能力强的优点,用纳米流体取代传统的核能系统冷却剂,将有望提高冷却剂与堆芯能量传递效率,降低冷却剂流量,减小反应堆尺寸,对于提高核能系统的安全性与经济性有重要意义.为此,麻省理工学院(MIT)建立了一个多学科交叉的纳米流体应用于核能系统的研究中心,以评估纳米流体对核能系统安全性与经济性的影响.研究表明,与水相比,添加 0.01%~0.1%体积比的 Al, ZnO 和 Diamond 形成的纳米流体可强化临界热流密度 40%~50%(流量在 2000~2500

$\text{kg/m}^2\text{s}$ 范围内),同时 Al-水纳米流体的稳定性实验表明,纳米粒子可在伽马辐射下稳定悬浮^[37].

5) 制冷系统

纳米流体可应用于各类传质过程的强化,如提高溴化锂水溶液、氨水吸收式制冷系统中的吸收效率.

Kim 等人^[38]分别将 Cu, CuO 和 Al_2O_3 纳米颗粒加入到氨水中,实验观测氨水对通过一孔板释放出的氨气泡的吸收过程,发现纳米粒子都能强化氨气泡在氨水中的吸收过程,所有三种纳米粒子中的 Cu 纳米粒子的强化效果最为明显;氨水溶液中氨的初始浓度越高,纳米粒子强化氨气泡在氨水中吸收过程的效果越明显.

Kang 等人^[39]分别研究掺加铁纳米粒子(Fe)和碳纳米管(CNT)的溴化锂水溶液的落膜式吸收过程的传热传质强化效果,纳米粒子质量浓度为 0.01%和 0.1%. 实验研究发现,这两种粒子的加入都明显提高了溴化锂水溶液与水蒸汽之间的传热传质过程,粒子对传质过程的强化效果比对传热过程的强化更为明显.比较两种纳米粒子,发现碳纳米管粒子对传质过程的强化效果比铁纳米粒子对传质过程的强化更为明显.0.01%碳纳米管粒子质量浓度可以提高吸收速率 1.16 倍,0.1%碳纳米管粒子质量浓度可以提高吸收速率 1.48 倍;0.01%铁纳米粒子质量浓度可以提高吸收速率 0.71 倍,0.1%铁纳米粒子质量浓度可以提高吸收速率 0.90 倍.

6.2 可再生能源利用领域

高效利用太阳能是可再生能源科学与技术领域的重要目标之一.将纳米流体技术引入太阳能利用领域,通过调控太阳能与纳米粒子的相互作用过程,可有效提高太阳能的吸收能力,强化太阳能的利用效率.

1) 太阳能光催化制氢

光催化水制氢方法因为其可能成为低成本、可持续大规模获得清洁燃料的技术受到越来越多的关注.因为水对于来自太阳的可见光波段辐射是透明的,利用可见光直接分解水是不可能的,必须借助于具有合适禁带值的半导体粒子的光催化作用.这些纳米尺度的半导体光催化粒子悬浮于水中,在太阳光子照射下,将粒子表面的水分子分解为氢和氧^[40].从其构成看,半导体纳米颗粒和水组成的悬浮液也是

纳米流体. 光催化制氢的效率除了与悬浮的半导体纳米粒子的禁带值有关, 也与悬浮纳米粒子的浓度、比表面积、分布结构以及粒子与太阳光相互作用过程有关.

采用离散偶极子近似方法(DDA)对悬浮于水中的 Ag/SiO₂/CdS 纳米核壳结构粒子的光子吸收性能进行了研究^[41]. 结果表明, 由于太阳光在金属核心的 Ag 粒子表面产生了等离激元共振效应, 从而使得核壳结构的纳米粒子显著提高了太阳光的捕获和吸收能力(如图 11 所示), 粒子的太阳吸收特性受到核心 Ag 粒子粒径、SiO₂ 层厚度等因素影响.

在此基础上, 进一步开展了 Al/CdS-水纳米流体光吸收特性的研究, 制备了 Al/CdS-水纳米流体, 研究表明, 粒子尺寸、体积浓度等对纳米流体的光吸收率有着重要影响作用.

2) 太阳能集热器

提高太阳能集热器的集热效率是人们设计高性能太阳能集热器追求的一个主要目标, 因为纳米流体内悬浮的纳米粒子既可以有效地提高原来流体的太阳光吸收率, 又大大地改善了流体工质的传热能力, 为研制高性能的太阳能集热器提供了一条崭新的思路^[42]. 与采用纯基液作为工质的集热器相比, 纳米流体太阳能集热器的最显著特点在于它将纳米流体直接作为太阳能吸收器, 发挥了流体的体吸收作用而不是原来的表面吸收, 可大大强化集热器吸收太阳能的能力.

Tyagi 等人^[43]研究了粒子体积浓度为 0.1%~5% 的 Al-水纳米流体工质的太阳能集热器的效率, 结果

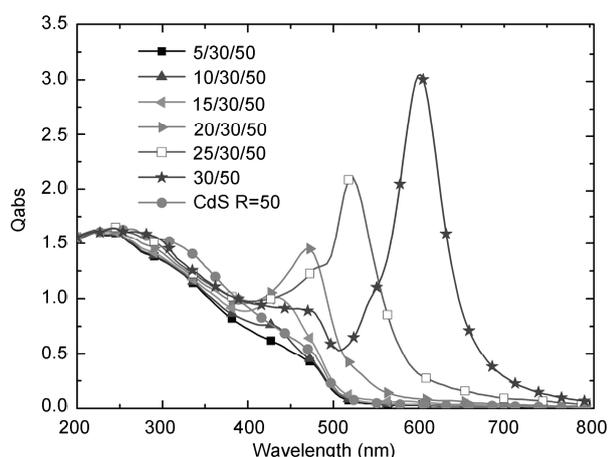


图 11 Ag/SiO₂/CdS 核壳结构纳米粒子光吸收效率^[41]

表明, 粒子体积浓度小于 1% 时, 集热器的效率得到明显的提高. 与水工质相比, 纳米流体工质的太阳能集热器效率提高了约 10%. 而当体积浓度高于 2% 后, 集热器的效率就不再继续升高了.

Otanicar 等人^[44]理论与实验研究了不同种类的纳米流体工质(碳纳米管-水、石墨-水和银-水纳米流对太阳集热器性能的影响. 研究表明, 加入少量的纳米颗粒可以使集热器效率得到显著的提高, 当纳米颗粒的体积浓度达到 0.5% 之后, 集热器的效率保持平稳不变, 甚至随着体积浓度的升高有轻微的降低. 在所研究的几种纳米流体中, 0.24% 体积浓度的 20 nm 银-水纳米流体的强化效果最佳.

纳米流体工质的太阳能集热器效率与纳米流体的光谱特性和流速、粒子浓度、粒径和材料属性、系统结构等因素有关. 其中, 纳米流体的光谱特性对太阳能的吸收特性有重要影响, 而光谱特性与纳米粒子浓度、粒径、材料属性等有关. 更进一步的是, 采用由磁性粒子制备的磁性纳米流体作为太阳能集热器的工质, 在外加磁场作用下, 可调控磁性纳米流体的光谱特性^[45], 能够实现太阳能吸收过程的调控, 提高集热器的效率.

3) 太阳能直接蒸汽发生器

当太阳光照射于纳米流体, 光、悬浮粒子和基液之间发生复杂的相互作用, 光的吸收和光转化为热的过程得到增强, 产生明显的光热效应, 每一颗悬浮的纳米粒子就像是一个光纳米加热器^[46]. 利用纳米粒子的光热效应, 使得粒子周围的液体直接汽化为蒸汽, 无需将液体整体加热至饱和温度, 大大减小了汽化所需的能量. 太阳能直接蒸汽发生器技术为蒸馏、海水淡化、杀菌等提供了新方法.

Neumann 等人^[47]的理论分析表明, 在被纳米流体吸收的太阳辐射能量中, 80% 被用于汽化蒸汽, 只有 20% 的太阳能用来加热基液. 他们还开展了利用纳米流体技术的乙醇太阳直接蒸馏的实验研究, 通过在基液中添加 1~3 nm 的 Au/SiO₂ 复合结构纳米粒子后, 测量出的蒸馏物中的乙醇浓度明显高于普通热蒸馏法.

4) CO₂ 捕获与吸收

CO₂ 的捕获与吸收对于提高能源系统(如 IGCC 等)的效率、减小温室气体排放有重要意义. 利用纳米流体强化传质的原理, 学者们开展了纳米流体强化 CO₂ 捕获与吸收特性的研究.

Jung 等人^[48]在甲醇中添加 40~50 nm 的 Al_2O_3 纳米粒子, 研究了不同粒子体积份额纳米流体的 CO_2 的吸收性能. 结果表明, 相比于纯的甲醇, 纳米流体的 CO_2 吸收率都得到提高, 在他们所研究 0.005%~0.1% 粒子体积份额范围内, 粒子体积份额为 0.01% 时 CO_2 的吸收率提高程度最大(提高了 8.3%).

Kang 等人^[49]实验研究了 Al_2O_3 -NaCl 水溶液纳米流体的 CO_2 吸收特性. 结果表明, CO_2 吸收率在 0.01% 粒子体积份额时达到最大, 继续增大粒子体积份额, CO_2 吸收率几乎不随粒子浓度而变化. 对于 0.01% 粒子体积份额的纳米流体, 当纳米流体温度为 30°C, 20°C 和 10°C 时, 相比较与 NaCl 水溶液, CO_2 吸收率分别提高了 11.0%, 12.5% 和 8.7%.

7 未来研究展望

纳米流体作为一种新型高效的工质, 展现了其在能源科学与技术领域及相关领域应用的广阔的需求空间和应用前景. 随着人们对纳米流体能量质量传递规律与机理认识的不断深入, 随着纳米流体应

用领域的持续扩展, 纳米流体的研究将不断面临新的挑战, 相关的研究工作也将继续深入和拓展. 围绕着纳米流体在能源科学与技术领域迫切的应用需求, 需要继续深化下列研究工作.

1) 建立纳米流体热物性参数的数据库. 纳米流体的热物性与输运参数(包括导热系数、黏度、比热等)除了受到纳米粒子体积份额、种类、尺度和流体温度等因素影响之外, 还与粒子在基液中的结构分布以及是否添加分散剂有关. 目前, 有关纳米流体热物性参数的实验结果存在一定的分散性. 因此, 需要建立包括以上各影响因素在内的纳米流体热物性参数数据库.

2) 纳米流体长期使用的可靠性评估. 粒子的悬浮稳定性和粒子对系统工作性能的影响(比如对泵和管道的磨损等)需要深入研究与评估, 为纳米流体的应用提供依据.

3) 纳米流体在不同领域的应用技术研究. 继续开展纳米流体在诸如强化传热、高功率电子器件热管理、大功率动力装置冷却、可再生能源利用、 CO_2 捕获与吸收、强化传质、制冷空调、相变蓄能等相关方面的应用研究, 推动纳米流体技术的应用与发展.

参考文献

- 1 Maxwell J C. A Treatise on Electricity and Magnetism. 2nd ed. London: Clarendon Press, 1881
- 2 Ahuja A S. Augmentation of heat transfer in laminar flow of polystyrene suspensions. *J Appl Phys*, 1975, 46: 3408-3425
- 3 Sohn C W, Chen M M. Microconvective thermal conductivity in disperse two-phase mixture as observed in a low velocity couette flow experiment. *J Heat Transfer*, 1981, 103: 47-51
- 4 Choi S U S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In: Siginer D A, Wang H P, eds. *Developments and Applications of Non-newtonian Flows*. New York: ASME, 1995. 99-103
- 5 宣益民, 李强. 纳米流体能量传递理论与应用. 北京: 科学出版社, 2010
- 6 Xuan Y, Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. *Inter J Heat Fluid Flow*, 2000, 21: 58-64
- 7 Xuan Y M, Li Q, Hu W F. Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. *AIChE J*, 2003, 49: 1038-1043
- 8 Li Q, Xuan Y, Wang J. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2005, 30: 109-116
- 9 Li Q, Xuan Y M. Enhanced heat transfer behaviors of new heat carrier for spacecraft thermal management. *J Spacecraft Rockets*, 2006, 43: 687-690
- 10 Xuan Y M, Li Q, Zhang X, et al. Stochastic thermal transport of nanoparticle suspensions. *J Appl Phys*, 2006, 100: 043507
- 11 Xuan Y M, Li Q. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. *J Heat Transfer Trans ASME*, 2003, 125: 151-155
- 12 Li Q, Xuan Y M. Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid. *Sci China Tech Sci*, 2002, 45: 408-416
- 13 Xuan Y M, Roetzel W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer*, 2000, 43: 3701-3707
- 14 Zhou L J, Xuan Y M, Li Q. Multiscale simulation of flow and heat transfer of nanofluid with lattice Boltzmann method. *Inter J Multiphase Flow*, 2010, 36: 364-374
- 15 Xuan Y M, Yao Z P. Lattice Boltzmann model for nanofluids. *Heat Mass Transfer*, 2005, 41: 199-205
- 16 Xuan Y M, Yu K, Li Q. Investigation on flow and heat transfer of nanofluids by the thermal Lattice Boltzmann model. *Progress Comput Fluid Dynamics*, 2005, 5: 13-19
- 17 Li Q, Xuan Y M, Wang J. Measurement of the viscosity of dilute magnetic fluids. *Int J Thermophys*, 2006, 27: 103-113
- 18 Li Q, Xuan Y M, Wang J. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. *E Exp Thermal Fluid Sci*, 2005, 30: 109-116
- 19 Li Q, Xuan Y M. Experimental investigation on heat transfer characteristics of magnetic fluid flow around a fine wire under the influence of an external magnetic field. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2009, 33: 591-596

- 20 Xuan Y M, Ye M, Li Q. Mesoscale simulation of ferrofluid structure. *Int J Heat Mass Transfer*, 2005, 48: 2443–2451
- 21 Xuan Y M, Li Q, Yang Z D. Mesoscale analysis of thermal flow of magnetic fluids. *Numer Heat Tr A Appl*, 2006, 49: 1009–1018
- 22 Xuan Y M, Li Q, Ye M. Investigations of convective heat transfer in ferrofluid microflows using lattice-Boltzmann approach. *Inter J Thermal Sci*, 2007, 46: 105–111
- 23 Fang X P, Xuan Y M, Li Q. Experimental investigation on enhanced mass transfer in nanofluids. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 203108
- 24 Xuan Y M. Conception for enhanced mass transport in binary nanofluids. *Heat And Mass Transfer*, 2009, 46: 277–279
- 25 余后满. 载人航天器液体回路主动热控技术. *航天器工程*, 1994, 4: 54–60
- 26 Li Q, Xuan Y M, Yu F. Experimental investigation of submerged single jet impingement using Cu-water nanofluid. *Appl Thermal Eng*, 2012, 36: 426–433
- 27 Li Q, Lian W L, Sun H, et al. Investigation on operational characteristics of a miniature automatic cooling device. *Int J Heat Mass Transfer*, 2008, 51: 5033–5039
- 28 Lian W L, Xuan Y M, Li Q. Design method of automatic energy transport devices based on the thermomagnetic effect of magnetic fluids. *Int J Heat Mass Transfer*. 2009, 52: 5451–5458
- 29 Xuan Y M, Lian W L. Electronic cooling using an automatic energy transport device based on thermomagnetic effect. *Appl Thermal Eng*, 2011, 31: 1487–1494
- 30 Lian W L, Li Q, Xuan Y M. Particle image velocimetry for an automatic cooling device using temperature-sensitive magnetic fluid. *Sci China Tech Sci*, 2008, 51: 1203–1210
- 31 Lian W L, Xuan Y M, Li Q. Characterization of miniature automatic energy transport devices based on the thermomagnetic effect. *Energy Conversion Manage*, 2009, 50: 35–42
- 32 Tsai C Y, Chien H T, Ding P P, et al. Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance. *Mater Lett*, 2004, 58: 1461–1465
- 33 Israeli T, Agami Reddy T, Cho Y I. Investigation on the use of nanofluids to enhance heat pipe performance. *Inter Solar Energy Conference*, 2004. 243–251
- 34 Naphon P, Thongkum D, Assadamongkol P. Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant–nanoparticles mixtures. *Energy Conversion Manage*, 2009, 50: 772–776
- 35 Kulkarni D P, Vajjha R S, Das D K, et al. Application of aluminum oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant. *Appl T Eng*, 2008, 28: 1774–1781
- 36 Tzeng S C, Lin C W, Huang K D, et al. Heat transfer enhancement of nanofluids in rotary blade coupling of four-wheel-drive vehicles. *Acta Mechanica*, 2005, 179: 11–23
- 37 Buongiorno J, Hu L W. Innovative technologies: Two-phase heat transfer in water-based nanofluids for nuclear applications. *Res Rep: Nuclear Engineering Education Research (NEER) Program*, July 31, 2009
- 38 Kim J K, Jung J Y, Kang Y T. The effect of nano-particles on the bubble absorption performance in a binary nanofluid. *Int J Refrigeration*, 2006, 29: 22–29
- 39 Kang Y T, Kim H J, Lee K I. Heat and mass transfer enhancement of binary nanofluids for H₂O/LiBr falling film absorption process. *Int J Refrigeration*, 2008, 31: 850–856
- 40 Ashokkumar M. An overview on semiconductor particulate systems for photoproduction of hydrogen. *Int J Hydrogen Energy*, 1998, 23: 427–438
- 41 Duan H L, Xuan Y M. Enhancement of light absorption of cadmium sulfide nanoparticle at specific wave band by plasmon resonance shifts. *Phys E*, 2011, 4: 1475–1480
- 42 Taylor R A, Phelan P E, Otanicar T P, et al. Nanofluid optical property characterization: Towards efficient direct absorption solar collectors. *Nanoscale Res Lett*, 2011, 6: 225
- 43 Tyagi H, Phelan P, Prasher R. Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector. *J Sol Energy Eng*, 2009, 131: 041004
- 44 Otanicar T P, Phelan P E, Prasher R S, et al. Nanofluid-based direct absorption solar collector. *J Renewable Sustainable Energy*, 2010, 2: 033102
- 45 Fang X P, Xuan Y M, Li Q. Measurement of the extinction coefficients of magnetic fluids. *Nanoscale Res Lett*, 2011, 6: 237
- 46 Richardson H H, Carlson M T, Tandler P J, et al. Experimental and theoretical studies of light-to-heat conversion and collective heating effects in metal nanoparticle solutions. *Nano Lett*, 2009, 9: 1139–1146
- 47 Neumann O, Urban A S, Day J, et al. Solar vapor generation enabled by nanoparticles. *ACS Nano*, 2012, 7: 42–49
- 48 Jung J Y, Lee J W, Kang Y T. CO₂ absorption characteristics of nanoparticle suspensions in methanol. *J Mechanical Sci Tech*, 2012, 26: 2285–2290
- 49 Lee J W, Kang Y T. CO₂ absorption enhancement by Al₂O₃ nanoparticles in NaCl aqueous solution. *Energy*, 2013, 53: 206–211

An overview on nanofluids and applications

XUAN YiMin

School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

The purpose of this review paper is to introduce some progresses in nanofluid technology and applications. The enhancement mechanism of heat conduction of nanofluids and heat and mass heat transport inside nanofluids as well as controlling methods are outlined. Also, a series of possible applications of nanofluids are discussed. The effects of properties, fractions and sizes of nanoparticles on flow and heat transport processes of nanofluids are discussed. The roles of the suspension stability and temperature in affecting thermal conductivity of nanofluids are analyzed. Furthermore, challenges of improving nanofluid technology and putting it in more and more applications are involved.

nanofluid, energy transport, enhanced heat transfer, enhanced mass transfer

doi: 10.1360/092013-1236