

纳米流体强化导热系数机理初步分析

李 强, 宣益民

(南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 从添加纳米粒子改变了液体结构和纳米粒子微运动两个方面, 分析了纳米流体强化导热系数的机理, 研究表明, 相对于在液体中添加毫米或微米级固体粒子以增加导热系数而言, 纳米流体强化导热系数的原因主要来自于纳米粒子的微运动, 通过测量不同温度下纳米流体的导热系数, 验证了纳米粒子微运动是纳米流体强化导热系数的主要因素。

关 键 词: 纳米流体; 强化传热; 导热系数; 微运动

中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 引 言

自从 1995 年美国 Argonne 国家实验室的 Choi 在国际上首次提出纳米流体的概念以来, 国内外一些研究人员分别测量了不同种类、不同体积份额配比的纳米流体导热系数, 分析了纳米粒子的种类、体积份额、尺度等因素对纳米流体导热系数的影响^[1~4]。研究表明在液体中添加纳米粒子, 显著增加了液体的导热系数, 显示了纳米流体在强化传热领域具有广阔的应用前景。

在液体中添加纳米粒子, 显著增大了液体的导热系数, 其原因可能有两个方面:

(1) 纳米流体导热系数增大的原因之一, 是由于固体粒子的导热系数远比液体大, 固体颗粒的加入改变了基础液体的结构, 增强了混合物内部的能量传递过程, 使得导热系数增大。

(2) 由于纳米粒子的小尺寸效应, 纳米流体中悬浮的纳米粒子受布朗力等力的作用, 作无规行走(扩散), 布朗扩散、热扩散等现象存在于纳米流体中, 纳米粒子的微运动使得粒子与液体间有微对流现象存在, 这种微对流增强了粒子与液体间的能量传递过程, 增大了纳米流体的导热系数。最重要的是, 纳米流体中悬浮的纳米粒子在作无规行走的同时, 粒子所携带的能量也发生了迁移, 同粒子与液体

间微对流强化导热系数相比, 粒子运动所产生的这部分能量迁移大大增强了纳米流体内部能量传递过程, 对纳米流体强化导热系数的作用更大。

下面分别从以上两个方面来分析纳米流体强化导热系数的机理。

2 纳米粒子改变基础液体结构

以往, 针对传统的在液体中添加毫米或微米级固体粒子以提高导热系数的理论分析中, 都是基于以下观点来分析混合物导热系数增大的原因: 即混合物中固体粒子是静止的, 粒子与液体间没有相对运动, 粒子强化混合物导热系数的原因是因为固体粒子的导热系数比液体大许多, 粒子的加入改变了液体的结构, 强化了混合物内部的能量传递过程, 使导热系数增大。由此, 许多学者给出了一些用来计算悬浮有微米或毫米级固体粒子的液-固混合物导热系数的理论公式。

Maxwell 提出了一个模型^[5], 用来计算悬浮有球形固体粒子的液-固混合物导热系数:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} \quad (1)$$

式中: k_p 是不连续粒子相的导热系数, k_f 是介质液体的导热系数, φ 是粒子的体积份额。Maxwell 模型未考虑粒子间的相互影响, 仅适用于粒子的体积份额非常小的两相混合物。

Rayleigh 考虑混合物中粒子间相互作用^[6], 提出了计算粒子均匀排列的理想液-固混合物的导热系数表达式:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 3\beta\varphi \left[1 - \beta\varphi - 0.525 \left(\frac{k_p - k_f}{k_p + \frac{4}{3}k_f} \right) \beta \varphi^{\frac{10}{3}} \right] \quad (2)$$

式中: β 由下式确定:

$$\beta = \frac{k_p - k_f}{k_p + 2k_f} \quad (3)$$

Jeffrey 同样在考虑粒子间相互作用的前提下^[7], 提出了适用于计算粒子非均匀排列、体积份额比较大的液—固两相混合物导热系数的表达式:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 3\beta\varphi + 3\beta\varphi^2(\beta + \Sigma) \quad (4)$$

式中: Σ 是一收敛级数的和, 其值的大小依赖于 k_p/k_f , 式(4)中 φ^2 的系数的范围从 $k_p/k_f = 0$ 时等于 0.588, 变化到 $k_p/k_f = 1$ 时的 0, 再增大到 $k_p/k_f = \infty$ 时的 4.51。用 Jeffrey 模型计算粒子均匀排列的液—固两相混合物的导热系数, 其结果与 Rayleigh 模型相近。

在此之后, Davis 和 Lu, Lin 等又先后提出了计算液—固两相混合物导热系数的表达式^[8-9]:

$$\text{Davis: } \frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + \frac{3(k_p - k_f)}{(k_p + 2k_f) - (k_p - k_f)\varphi} \times \left[\varphi + f\left(\frac{k_p}{k_f}\right)\varphi^2 + O(\varphi^3) \right] \quad (5)$$

$$\text{Lu and Lin: } \frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + a\varphi + b\varphi^2 \quad (6)$$

在 Davis 模型中, 当 $k_p/k_f = 10$ 时, $f(k_p/k_f) = 2.5$; $k_p/k_f = \infty$ 时, $f(k_p/k_f) = 0.5$ 。而 Lu 和 Lin 模型中, 当 $k_p/k_f = 10$ 时, $a = 2.25$, $b = 2.27$; $k_p/k_f = \infty$ 时, $a = 3.0$, $b = 4.51$ 。

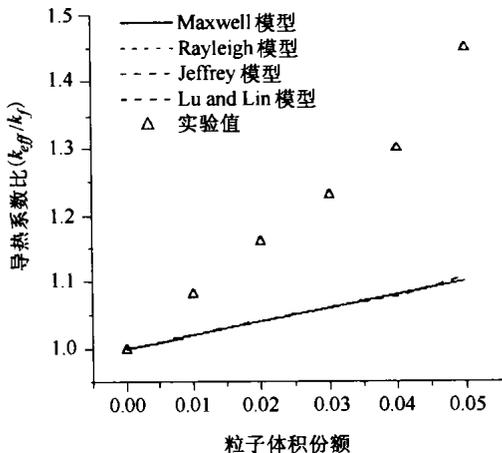


图 1 Cu—水纳米流体导热系数实验值与理论值的比较

图 1 给出了运用 Maxwell、Rayleigh、Jeffrey、Lu and Lin 四个模型计算水—Cu 纳米流体悬浮液导热系数, 通过与水—Cu 纳米流体导热系数的实验数据进行比较^[4], 可以清楚地发现纳米流体导热系数的

实验值远大于模型的计算值, 这表明以上理论模型仅适用于传统的悬浮有毫米或微米级固体粒子的两相混合物, 由于纳米流体内部的能量传递过程与传统的两相混合物不同, 以上模型对纳米流体并不适用。也就是说, 仅仅通过固、液相导热系数 k_p 、 k_f 、粒子体积份额 φ 三个参数来计算纳米流体的导热系数是不够的。

在纳米流体内部, 液体与粒子间的热传递过程是发生在液体与粒子的界面上, 显然, 粒子的表面形状是混合物导热系数的影响因素之一, 而以上提到的理论模型都是建立在固体粒子是球形的假想基础上, 没有考虑粒子的表面形状对混合物导热系数的影响。Hamilton 和 Crosser 在考虑固体粒子的表面形状对两相混合物导热系数影响的基础上^[10], 提出了混合物导热系数由下式进行计算:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\varphi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \varphi(k_f - k_p)} \quad (7)$$

式中: n 是经验形状因子, $n = 3/\Psi$ 。 Ψ 指粒子的球形度, 其定义为体积和粒子相等的球的表面积与粒子表面积之比。

Hamilton 和 Crosser 模型也仅仅考虑了固体粒子的表面形状对两相混合物的影响, 反映了两相混合物导热系数随粒子表面积的增加而增大, 而模型没有讨论下面一种情况: 即在同样的粒子表面形状条件下, 通过减小粒子的粒径, 同样粒子体积份额的悬浮液中所有粒子表面积的总和将增大许多。比如, 直径为 10 nm 的球形粒子, 其表面积与体积之比是直径为 10 mm 的球形粒子的 1 000 倍, Hamilton 和 Crosser 模型未能考虑粒子的尺度对混合物导热系数的影响。已进行的实验研究表明^[4], 悬浮有相同性质纳米粒子的纳米流体, 相同体积份额情况下, 粒子尺度小的纳米流体的导热系数高。

另一方面, 运用 Hamilton 和 Crosser 模型计算 Al_2O_3 —水 ($k_p/k_f = 66$) 和 Cu—水 ($k_p/k_f = 666$) 的纳米流体的导热系数可以看出, 在给定纳米粒子球形度的情况下, 纳米流体的导热系数随纳米粒子的属性的变化很小。如图 2 所示, 分别在水中添加 5% 体积份额的 Al_2O_3 、Cu 的纳米粒子, Hamilton 和 Crosser 模型的计算结果显示, Cu—水纳米流体的导热系数仅比 Al_2O_3 —水纳米流体大 0.1%, 而实验结果显示 Cu—水纳米流体的导热系数比 Al_2O_3 —水纳米流体大了将近 100%^[13], 显然, Hamilton 和 Crosser 模型未能正确地反映出纳米粒子的属性对纳米流体

导热系数的影响。

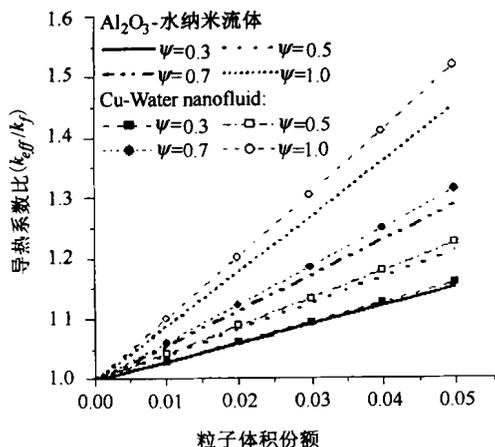


图2 运用 Hamilton 模型计算的 Al₂O₃—水纳米流体和 Cu—水纳米流体的导热系数

由于纳米粒子的小尺寸效应, 纳米流体内部的动量及能量传递的机理与悬浮有微米或毫米级固体粒子的液—固混合物不同, 因此, 不能简单地将计算悬浮有微米或毫米级固体粒子的液—固混合物导热系数的公式直接用于计算纳米流体的导热系数。

3 纳米粒子微运动强化导热系数的作用分析

前面讨论的所有两相混合物导热系数的传统理论公式都认为粒子是静止的, 显然, 当混合物中粒子的粒径比较大时, 这种假设是正确的。但对于纳米流体来说, 由于粒子的粒径在纳米尺度, 受布朗力等力的作用, 纳米流体中悬浮的纳米粒子作无规行走(扩散), 布朗扩散、热扩散等现象存在于纳米流体中, 纳米粒子的微运动使得粒子与液体间有微对流现象存在, 这种微对流增强了粒子与液体间的能量传递过程, 增大了纳米流体的导热系数, 纳米粒子存在着的微运动现象是强化纳米流体能量传递过程的关键因素。

在纳米流体内部, 纳米粒子的行为及运动受到作用在粒子上的微作用力的支配, 这些微作用力包括范德瓦耳斯力及由粒子表面双电层引起的静电力以及驱动粒子作布朗运动的布朗力等, 粒子与液体间微运动的强弱程度受这些力共同作用的影响, 即纳米流体导热系数的增大比例受到以上这些微作用力的影响。

在以上提到的这些微作用力中, 布朗力和静电

力的作用仅仅在粒子非常小的情况下才会非常明显, 范德瓦耳斯力会随着粒子的间距的增大而减小。因此, 可以预料, 纳米流体的导热系数和纳米粒子的粒径、纳米粒子在液体中的分布以及纳米粒子的形状等因素存在着一定的关系, 这一点已被实验所验证^[4]。

到目前为止, 很少有关于粒子微对流增大悬浮液导热系数的研究报道, 仅有的几篇文献也只考虑微作用力中的某一个力或某几个力对悬浮液导热系数影响的基础上^[11], 提出了计算悬浮有微米级球形粒子作旋转运动情况下的液—固两相悬浮液的导热系数公式:

$$k_{eff} = k_f \left\{ 1 + \varphi \left[\frac{1.176(k_p - k_f)^2}{(k_p + 2k_f)^2} + 5 \left[0.6 - 0.028 \frac{k_p - k_f}{k_p + 2k_f} \right] \right] \times Pe_f^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (8)$$

式中: $Pe_f = (r^2 \gamma \rho c_{pf} / k_f)$, r 是粒子的半径; γ 是粒子做布朗运动的速度梯度; ρ 是液体的密度; c_{pf} 是液体定压比热。

Gupte 等考虑粒子热扩散对悬浮液导热系数的影响^[2], 针对一种固、液两相具有相同导热系数、密度和比热的理想悬浮液, 提出了如下的计算悬浮液导热系数的公式:

$$k_{eff} = k_f [1 + (0.0556 Pe + 0.1649 Pe^2 - 0.0391 Pe^3 + 0.0034 Pe^4)] \quad (9)$$

式中: 修正的贝克列数 Pe 由下式定义:

$$Pe = \left[\frac{UL\rho c_p}{k_f} \right] \varphi^{3/4} \quad (10)$$

式中: U 是粒子的热扩散速度;

$$L = (r/\varphi^{1/3}) \times (4\pi/3)^{1/3}.$$

应该注意到, 式(8)和式(9)仅适用于大粒子的两相悬浮液, 采用以上两式来计算纳米流体的导热系数, 会发现导热系数增大的比例非常小, 与实验数据不符^[3]。其原因可能在于纳米流体中纳米粒子的运动规律与大粒子在液体中的运动规律完全不同, 作用在粒子上的微作用力与粒子的粒径有很大关系, 微作用力的作用机制也有很大差异。显然, 与毫米或微米级固体粒子相比, 纳米粒子受布朗力等微作用力的作用更大, 纳米粒子的微运动更强。另外, 因为粒子的尺度与粒子的双电层厚度相比, 在一个数量级范围内, 比如, 金属纳米粒子在水中吸附阴离子而形成的双电层厚度约为 10~100 nm, 此时, 悬浮在液体中纳米粒子表面的静电力对粒子的影响也非常大, 静电力对粒子行为的影响不能忽视。因此, 简

单地采用式(8)和式(9)来分析纳米流体导热系数是不可行的。不过,另一方面,式(8)和式(9)清楚地表明了粒子的微运动强化了悬浮液内部的能量传递过程,增大了悬浮液的导热系数。

然而,要精确地计算纳米流体中存在的这些微作用力对纳米流体导热系数的影响是非常困难的,其原因是作用于纳米粒子上的微作用力依赖于纳米粒子的尺寸、粒径分布、表面特性以及粒子与液体的化学性质等许多因素,而对于这些影响因素的作用机制和规律,就目前来说,还很缺乏,有待于进一步的研究。

4 纳米粒子微运动强化纳米流体导热系数的实验验证

纳米流体强化导热系数机理的理论分析表明^[3],除了纳米粒子改变了基础液体结构使导热系数增大外,纳米流体导热系数增大的主要原因是因为纳米粒子的微运动效应,纳米粒子的微运动大大增强了纳米流体内部能量传递过程,强化了纳米流体的导热系数。

显然,纳米粒子微运动受到作用在粒子上的微作用力(比如布朗力、静电力等)的支配,粒子微运动的强度受这些力共同作用的影响,这些微作用力与纳米粒子的尺寸、粒径分布、表面特性以及粒子与液体的化学性质等许多因素有关,同时,微作用力的大小随纳米流体悬浮液体系温度的变化而变化,纳米流体的温度越高,作用在纳米粒子上的微作用力越大,纳米粒子微运动的速率越高,则纳米流体导热系数增大的比例越大。

为了验证纳米粒子微运动对纳米流体导热系数的作用机制,采用瞬态热线法测量了 1.0 Vol. %、2.0 Vol. % 两种体积份额的 Cu—去离子水纳米流体(Cu 纳米粒子的平均粒径为 25 nm)在不同温度下的导热系数^[4]。

图 3 给出了去离子水以及两种体积份额的 Cu—去离子水纳米流体在不同温度条件下的导热系数实验数据。实验结果表明,水的导热系数随温度的升高而增大。比如,如果水的温度从 30 °C 升高到 60 °C,则水的导热系数从 0.601 W/(m·K) 增大到 0.651 W/(m·K),增大了 8.32%。有很多文献讨论了水导热系数随温度变化的微观机理,认为其原因在于:随着温度的升高,水分子热振动的速率加快,分子间碰撞频率及强度加剧,热量传递加快,导热系

数增大。

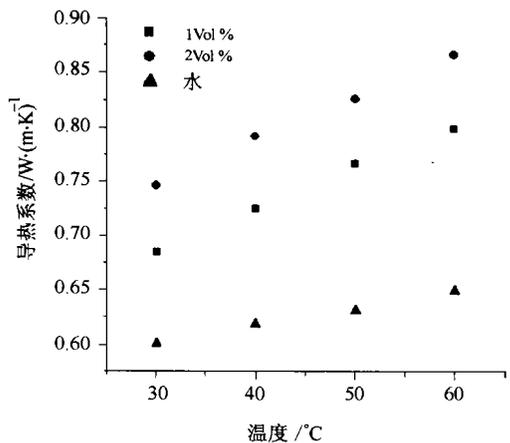


图 3 不同温度条件下水和 Cu—水纳米流体导热系数

分析纳米流体导热系数的实验数据,可以发现,Cu—去离子水纳米流体的导热系数随着温度的升高而增大,而且,与水相比,纳米流体导热系数随温度增大的比例明显比水导热系数增大的比例高。例如,如果温度从 30 °C 升高到 60 °C,则 1.0 Vol. % 体积份额的 Cu—水纳米流体的导热系数从 0.685 W/(m·K) 增大到 0.8 W/(m·K),增大了 16.79%; 2.0 Vol. % 体积份额的 Cu—去离子水纳米流体的导热系数从 0.7458 W/(m·K) 增大到 0.8675 W/(m·K),增大了 16.31%。这说明,随着纳米流体温度的升高,纳米流体导热系数增大的主要原因除了悬浮液中水分子热振动强度增加效应以外,更为重要的是,由于纳米流体悬浮液体系温度的提高,作为纳米流体内部能量传递主要介质—纳米粒子微运动的强度加剧,粒子与粒子、粒子与液体间碰撞的频率加大,能量传递的速率加快,使得纳米流体导热系数增大,说明粒子微运动是纳米流体强化导热系数的主要因素。

5 结语

从添加纳米粒子改变了液体结构和纳米粒子微运动两个方面分析了纳米流体强化导热系数的机理,研究表明,由于纳米粒子的小尺寸效应,纳米流体中悬浮的纳米粒子作微运动,纳米流体强化导热系数的原因主要来自于纳米粒子微运动。

测量了不同温度下 Cu—去离子水纳米流体的

(下转第 584 页)

象的发生,且高、低热流密度下颗粒直径对水平圆管换热特性的影响不同;

(2) 多孔层高度增加强化了单相对流及沸腾传热,却出现了热滞后现象;多孔层的存在并不改变液体过冷度对传热的影响规律;

(3) 声空化场的存在可强化浸没在多孔介质中水平圆管的单相对流及沸腾传热,但增强效果受换热棒与实验件的距离和方向以及声空化强度等的影响,且其变化规律与无多孔介质时相同;

(4) 空化汽泡对浸没在多孔介质中的传热表面孔穴内汽泡胚胎的生成、长大和脱离的直接影响是其强化沸腾传热的主要原因。

参考文献:

[1] TSUCHIYA M, SHIMISH S. Pool boiling in water with steel ball[C]. **6th National Heat Transfer Symposium of Japan**. 1969. 25—28.
 [2] AFGAN N H, JOVIC L, KOVALEV S A, *et al.* Boiling heat transfer from surfaces with porous layers[J]. **Int J Heat Mass Transfer**, 1985, **28**(2): 415—422.
 [3] FAND R M, ZHENG T, CHENG P. The general characteristics of boiling heat transfer from a surface embedded in a porous medium[J].

Int J Heat Mass Transfer. 1987, **30**(6): 1231—1235.
 [4] SHI M H, JIANG L L. Boiling heat transfer in liquid saturated porous bed[A]. **Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation** [C]. New York: Hemisphere Pub Corp, 1990. 465—472.
 [5] 王补宣, 马 骥, 施明恒. 多孔物料床的池沸腾换热特性及其改善方法[J]. **工程热物理学报**, 1992 **13**(3): 293—296.
 [6] 童庆明, 张洪济. 颗粒多孔层在真空状态下的沸腾滞后[J]. **工程热物理学报**, 1996 **16**(4): 461—465.
 [7] 莫海龙, 马同泽, 张正芳. 浸没在多孔介质中的竖直管沸腾换热实验研究[J]. **工程热物理学报**, 1996 **17**(1): 80—85.
 [8] RAINEY K N, YOU S M. Effect of heater size and orientation on pool boiling heat transfer from microporous coated surfaces[J]. **Int J Heat Mass Transfer**, 2001, **44**(10): 2589—2599.
 [9] 马大猷, 沈 壕. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社 1983.
 [10] 周定伟, 刘登瀛, 马重芳. 声空化场下纳米颗粒对沸腾传热影响的实验研究[J]. **热能动力工程**, 2001, **16**(6): 594—597.
 [11] ZHOU D W, LIU D Y. Boiling heat transfer with acoustic cavitation [J]. **Progress in Natural Science** 2002 **12**(6): 246—250.
 [12] 周定伟, 马重芳, 刘登瀛. 强润湿性液体池沸腾传热的实验研究和机理分析[J]. **热能动力工程**, 2002, **17**(1): 47—50.
 [13] 周定伟, 刘登瀛. 声空化场强化单相对流传热的实验研究[J]. **自然科学进展**, 2002, **12**(5): 100—103.

(渠 源 编 辑)

(上接第 571 页)

导热系数,实验结果表明,纳米流体的导热系数随温度的升高而增大,与水相比,纳米流体导热系数随温度增大的比例明显比水导热系数增大的比例高,验证了纳米粒子微运动是纳米流体强化导热系数的主要因素。

参考文献:

[1] XUAN Y, LI Q. Heat transfer enhancement of nanofluids[J]. **Int J of Heat and Fluid Flow**. 2000, **21**(1): 58—64.
 [2] LEE S, CHOI U S, LI S, *et al.* Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles[J]. **J of Heat Transfer**, 1999, **121**: 280—289.
 [3] WANG XINWEI, XU XIANFAN, CHOI U S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture[J]. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**. 1999 **13**: 474—480.
 [4] LI Q, XUAN Y. Experimental investigation on transport properties of nanofluids[A]. **Heat Transfer Science and Technology** [C], 2000. 757—762.
 [5] MAXWELL J C. A treatise on electricity and magnetism[M]. 2nd ed U K: Clarendon Press. 1881.
 [6] Lord Rayleigh. *Phil Mag*, 1892. 34.

[7] JEFFREY D J. Conduction through a random suspension of spheres [A]. **In: Proceedings of the Royal Society of London** [C], Series A, 1973, **335**(1602): 355—367.
 [8] DAVIS R H. The effective thermal conductivity of a composite material with spherical inclusions[J]. **International Journal of Thermophysics**. 1986, **7**(3): 609—620.
 [9] LU S, LIN H. Effective conductivity of composites containing aligned spherical inclusions of finite conductivity[J]. **Journal of Applied Physics** 1996 **79**(9): 6761—6769.
 [10] HAMILTON R L, CROSSER O K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems [J]. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**. 1962, **1**(3): 187—191.
 [11] LEAL L G. On the effective conductivity of a dilute suspension of spherical drops in the limit of low particle peclet number[J]. **Chemical Engineering Communications**. 1973, **1**(1): 21—31.
 [12] GUPTA S K, ADVANI S G, HUQ P. Role of micro-convection due to on-affine motion of particles in a mono-disperse suspension[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 1995, **38**(16): 2945—2958.
 [13] 宣益民, 胡卫峰, 李 强. 纳米流体的聚集结构和导热系数模拟[J]. **工程热物理学报**, 2002, **23**(2): 206—208.

(渠 源 编 辑)

Revealing from the Law of Thermodynamics Its Connotation [刊, 汉] / WANG Jia-xun, WANG Qing-zhao, ZHANG Xiao-dong (Power Engineering Department, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 561 ~ 564

The exposition and seeking of an implicit economic theory from many a law of physics can serve as a new approach for combining a thermodynamics analysis with an economic one. A specific analysis has been conducted of the economic theory of revealing its connotation from the first and second laws of thermodynamics. To this end, it is essential to clarify the existing misguidance of these two laws, especially the deep-seated misguidance of the second law. A further deepening of the understanding has been attained of the reasoning used by Georgescu Roegen in the statement "entropy law per se constitutes in substance the most cost-effective economic process among numerous laws". **Key words:** entropy, entropy law, new classic economics, ecological economics

地源热泵运行经济性分析 = An Analysis of the Operating Cost-effectiveness of a Ground-source Heat Pump [刊, 汉] / WANG Yong-biao, LI Bing-xi, JIANG Bao-cheng (Energy Science and Engineering School under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 565 ~ 567

In the light of the excessively low outdoor temperatures prevailing in Chinese northern frigid regions the authors have proposed a space heating system based on the use of ground-source heat pumps. There exist three driving modes for such pumps, namely, by electric motors, diesels and gas engines. In addition, there are three auxiliary heat supply sources, i. e., electric boilers, oil-fired ones and gas-fired ones. The authors have analyzed and compared the operating cost of various systems during a change of primary energy utilization rate and fuel price. The results of this comparison show that the operating cost of the driving modes by using gas engines, electric motors and diesel engines are respectively 6%, 40% and 57% higher than that of a central district heating system using boilers. **Key words:** ground-source heat pump, space heating, primary energy utilization rate, operation cost-effectiveness

纳米流体强化导热系数机理初步分析 = A Preliminary Analysis of the Intensified Thermal-conductivity Mechanism of Nano-fluids [刊, 汉] / LI Qiang, XUAN Yi-min (Power Engineering Institute under the Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 568 ~ 571, 584

The mechanism of an intensified thermal conductivity achieved through the use of nano-fluids is analyzed from the following two aspects, namely, a changed liquid structure due to the addition of nano-particles and the micro-motion of nano-fluids. The results of the analysis indicate that relative to the enhanced thermal conductivity effected by the addition in fluids of millimeter or micrometer-grade particles the enhanced thermal conductivity made possible by nano-fluids has come about mainly due to the micro-motion of the nano-particles. Through the measurement of the thermal conductivity of nano-fluids under various temperatures it has been verified that the micro-motion of the nano-particles represents a major factor contributing to the enhancement of thermal conductivity by the nano-fluids. **Key words:** nano-fluid, intensified heat transfer, thermal conductivity, micro-motion

电厂送粉系统煤粉浓度测量的热探头方法研究 = Research on a Thermal Probe Method for the Measurement of Pulverized-coal Concentration in a Pulverized-coal Transport System of a Power Plant [刊, 汉] / LIU Lei, ZHOU Fang-de (National Key Laboratory for Power Engineering Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 572 ~ 575

The measurement of pulverized coal concentration represents one of the problems requiring an urgent solution in the area of gas-solid two-phase flows. The authors have developed a measuring system incorporating thermal probes. The feasibility