

纳米流体对流换热机理分析*

肖波齐^{1)2)†} 范金土²⁾ 蒋国平³⁾ 陈玲霞¹⁾

1) (三明学院物理与机电工程学院, 三明 365004)

2) (香港理工大学纺织与制衣系, 香港 999077)

3) (广州大学工程抗震中心, 广州 510405)

(2011年9月23日收到; 2011年11月28日收到修改稿)

考虑在纳米流体中纳米颗粒做布朗运动引起的对流换热, 基于纳米颗粒在纳米流体中遵循分形分布, 本文得到纳米流体对流换热的机理模型. 本解析模型没有增加新的经验常数, 从该模型发现纳米流体池沸腾热流密度是温度、纳米颗粒的平均直径、纳米颗粒的浓度、纳米颗粒的分形维数、沸腾表面活化穴的分形维数、基本液体的物理特性的函数. 对不同的纳米颗粒浓度和不同的纳米颗粒平均直径与不同的实验数据进行了比较, 模型预测的结果与实验结果相吻合. 所得的解析模型可以更深刻地揭示纳米流体对流换热的物理机理.

关键词: 纳米流体, 对流换热, 分形

PACS: 44.25.+f, 44.10.+i, 65.20.-w, 05.45.Df

1 引言

目前能源短缺与环境污染是全世界各国面临的重大难题, 应用纳米流体技术进行节材、节能、减排、低碳是缓解该问题的有效途径. 而传统的纯液体换热工质已很难满足一些特殊条件下的传热和冷却要求, 因此, 研制导热系数高、传热性能好的高效新型换热工质是当前传热传质技术的重点, 所以揭示纳米流体流动与传热机理显得异常重要. 现在低导热系数的换热工质已经成为研究新一代高效传热技术的主要障碍, 小温差下传递最大可能热量的强化液体沸腾换热的研究受到国内外广泛的重视, 其中纳米流体传热传质成为物理学科当前最热门的前沿课题之一. 强化传热不仅可以提高传热效率, 还能减少换热设备和能量传输系统的初期投资, 这对于目前国内外面临能源紧缺、环境污染严重等问题的解决方面无疑具有重大的意义. 常用换热工质如水、矿物油、乙二醇等导热系

数都比较低, 换热性能较差, 因此迫切需要研制导热系数高、换热性能好的新型高效换热流体. 把金属或者非金属纳米颗粒分散到流体介质中, 制备成均匀且稳定的纳米颗粒悬浮液, 是一种高性能新型换热介质. 1995年, 美国 Argonne 国家实验室 Choi 等人^[1]提出了一个崭新的概念——纳米流体. 目前国内外有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、中科院谢华清研究小组、东南大学施明恒研究小组等等, 都相继开展了纳米流体传热传质的相关研究, 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、光学性质等^[2-15]. 目前对纳米流体自然

* 国家自然科学基金(批准号: 11102100), 福建省自然科学基金(批准号: 2012J01017)和福建省省属高校科研专项基金(批准号: JK2011056)资助的课题.

† E-mail: xiaoboqi2006@126.com

对流的研究主要还是集中在实验方面, 理论研究还不多见, 部分研究结果由于实验与各种假设的限制只能应用在比较狭窄的范围内, 经验常数较多, 还有部分理论研究结果与实验数据的比较有一定的差距 [2-15]. 纳米流体对流换热机理学术争论一直持续不断、至今仍无法统一. 本文考虑了对流换热时纳米颗粒在悬浮液中的布朗运动及基本流体自然对流时活化穴遵循分形分布, 从分形的角度出发推导纳米流体对流换热的解析解, 研究纳米颗粒悬浮液的对流传热机理.

2 对流换热的机理模型

纳米流体作为一种新型的强化传热工质, 研究纳米颗粒在流体的运动和纳米流体对流换热是非常必要的. 然而目前对对流换热的认识, 还无法得到对纳米颗粒悬浮液都适用的通用换热准则公式. 纳米流体中悬浮的纳米颗粒受布朗力等力的作用做无规则运动, 布朗扩散、热扩散等现象存在于纳米流体中, 纳米颗粒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, 增强了对流换热. 在自然对流阶段, 由于壁面温度不高, 单个纳米颗粒对流换热的热量为

$$\varphi = h_n A_n \Delta T, \quad (1)$$

A_n 是直径为 D_n 的单个纳米颗粒的表面积, h_n 是纳米颗粒对流换热系数, ΔT 壁面过热度.

肖波齐等人 [16,17] 曾经用分形理论成功的解决沸腾换热, 接着在没有加入纳米颗粒的纯水中, 肖波齐等人 [18] 又得到了沸腾换热的解析表达式, 模型预测值与实验符合. Wang 等人 [19] 也发现纳米流体中纳米颗粒的尺寸分布遵循分形标度关系, 本文试图用分形理论解决纳米流体对流换热.

某一直径为 D_n 的分形体 (如颗粒等) 与其累计数 N (如颗粒数量) 服从分形分布 [20]

$$N(L \geq D_n) = (D_{n,max}/D_n)^{d_f}, \quad (2)$$

把纳米颗粒形状当作球形, 式中 d_f 是颗粒的体积分形维数, $D_{n,max}$ 为纳米颗粒的最大直径.

从方程 (2) 可以得到尺寸在 D_n 与 $D_n + dD_n$ 之间的纳米颗粒数量 [20]

$$-dN = d_f D_{n,max}^{d_f} D_n^{-(d_f+1)} dD_n, \quad (3)$$

这里 $dD_n > 0$, $-dN > 0$, 这意味着颗粒数量随着颗粒尺寸的增大而减少, 这是与实际情况相符的, 因为对质量或者体积一定的纳米粉末悬浮在流体中, 如果纳米颗粒尺寸大, 则其数量就会减少. 颗粒体积分形维数 d_f 为 [20]

$$d_f = d_1 - \frac{\ln \Phi}{\ln(D_{n,min}/D_{n,max})}, \quad (4)$$

Φ 为颗粒在溶液中的体积份数 (浓度), d_1 是欧几里得维数, 在一个三维空间, $d_1 = 3$. 由于纳米颗粒在流体中是 3 维的, 所以本模型 d_1 取 3.

实际上 Feng 等人 [21] 对不同的颗粒用 (4) 式计算得到结果与实验数据进行比较, 当 $D_{n,min}/D_{n,max} = 10^{-3}$ 时, 模型预测结果实验数据最符合, 所以本文中纳米颗粒的尺寸比取 $D_{n,min}/D_{n,max} = 10^{-3}$.

所有颗粒在溶液中对流换热传递的总热量为

$$\begin{aligned} Q &= \int_{D_{n,min}}^{D_{n,max}} \varphi(-dN) \\ &= \int_{D_{n,min}}^{D_{n,max}} h_n A_n (-dN) \Delta T, \end{aligned} \quad (5)$$

这里 $(-dN)$ 从方程 (3) 得到. 我们把纳米颗粒看作球体, 则 $A_n = \pi D_n^2$, 根据对流换热系数定义, 单个纳米颗粒在纳米流体的运动引起的 h_n 为

$$h_n = (Nu \cdot k_{eff})/D_n, \quad (6)$$

这里 Nu 是液体绕球体流动的努塞尔数, k_{eff} 是纳米流体的有效热导率, Maxwell [22] 考虑球形固体颗粒投入溶液中, 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, 推导出悬浮液固体颗粒溶液的有效热导率表达式 k_{eff} 为

$$\begin{aligned} k_{eff} &= k_f [k_n + 2k_f - 2\Phi(k_f - k_n)] / \\ &\quad [k_n + 2k_f + \Phi(k_f - k_n)], \end{aligned} \quad (7)$$

这里 k_n 和 k_f 分别为纳米颗粒与基本流体的热导率.

把 (6) 式代入 (5) 式积分可以得到

$$Q = \int_{D_{n,min}}^{D_{n,max}} h_n A_n (-dN) \Delta T = \frac{(\pi Nu k_{eff} d_f) (D_{n,min}^{1-d_f} - D_{n,max}^{1-d_f}) D_{n,max}^{d_f}}{(d_f - 1)} \Delta T, \quad (8)$$

则纳米颗粒做布朗运动引起的热流密度为

$$q_n = \frac{Q}{\int_{D_{n,\min}}^{D_{n,\max}} A_n(-dN)} = \frac{k_f[k_n + 2k_f - 2\Phi(k_f - k_n)]Nu(1 - K_1^{1-d_f})(d_f - 2)}{[k_n + 2k_f + \Phi(k_f - k_n)](1 - K_1^{2-d_f})(d_f - 1)D_{n,\max}} \Delta T, \quad (9)$$

这里 $K_1 = D_{n,\min}/D_{n,\max}$. 根据分形介质的统计特性, Yu 等人 [20] 得到颗粒的平均直径与最大直径的关系

$$D_{n,\max} = \frac{(d_f - 1)}{(K_1 - K_1^{d_f})} \bar{D}_n. \quad (10)$$

把方程 (10) 代入方程 (9), 方程 (9) 简化为

$$q_n = \frac{k_f[k_n + 2k_f - 2\Phi(k_f - k_n)]Nu}{[k_n + 2k_f + \Phi(k_f - k_n)]} \times \frac{(K_1^{2-d_f} + K_1^{d_f} - 2K_1)(d_f - 2)d_f}{(K_1^{2-d_f} - 1)(d_f - 1)^2(\bar{D}_n)(\Delta T)^{-1}}. \quad (11)$$

方程 (11) 表示纳米颗粒做布朗运动引起的热流密度是温度、纳米颗粒的平均直径、纳米颗粒的浓度、纳米颗粒的体积分形维数、基本液体的物理特性的函数. 没有引进参数, 与传统的模型相比, 该分形模型包含较少的经验常数, 并且每个参数都有物理意义. 方程 (11) 说明纳米颗粒做布朗运动引起的热流密度与纳米颗粒的平均直径成反比, 这是符合物理现象的, 因为越小直径的纳米颗粒在液体中的布朗运动越剧烈, 从而引起较多的热量.

对饱和的基本流体加热表面自然对流的热流密度可以表示为 [23]

$$q_f = (1 - mN_c \pi D_b^2) h_f (T_w - T_f), \quad (12)$$

这里 h_f 是基本流体自然对流的平均热传递系数, $m = 1.8$ 是比例系数 [24], Han 等人 [25] 取得了 h_f 的表达式. 对湍流, 当瑞利数 $2 \times 10^7 < Ra < 3 \times 10^{10}$, h_f 表示为

$$h_f = 0.14 \rho_f c_p [\gamma g \alpha_f^2 \Delta T / \nu_f]^{1/3}, \quad (13)$$

对层流, 当瑞利数 $10^5 < Ra < 2 \times 10^7$, $h_{f,nc}$ 表示为

$$h_f = 0.54 \rho_f c_p [\gamma g \alpha_f^3 \Delta T / (\sqrt{A} \nu_f)]^{1/4}, \quad (14)$$

这里 ρ_f 是基本液体的密度, C_p 是定压比热, α_f 是基本液体的热扩散率, γ 是基本液体的体积热膨胀系数, ν_f 是基本液体的运动黏度, g 是重力加速度, A 是加热表面的面积.

Yu 等人 [26] 通过类比基本流体加热表面的活化穴与多空介质, 得到基本流体自然对流加热表面的活化穴分形表达式

$$\chi = (D_{c,\min}/D_{c,\max})^{d_2 - d_{f,c}}, \quad (15)$$

这里 χ 是加热表面活化点的体积分数, $D_{c,\min}$ 与 $D_{c,\max}$ 是基本流体加热表面的活化穴的最小与最大尺寸, d_2 是欧基理德维数, 由于加热表面是平面 2 维的, $d_2 = 2$.

Feng 等人 [21] 对不同的多空介质计算得到结果与实验数据进行比较, 当 $D_{c,\min}/D_{c,\max} = 10^{-3}$ 时, 模型预测结果实验数据最符合. 基本流体加热表面的活化穴的分形维数可以表示为 [27]

$$d_{f,c} = \ln[\bar{D}_{c,\max}/(\sqrt{2}D_{c,\min})] / \ln(K_2^{-1}). \quad (16)$$

把方程 (15) 代入方程 (12), 基本流体自然对流的分形模型为

$$q_f = (1 - mx) h_f \Delta T = (1 - mK_2^{2-d_{f,c}}) h_f \Delta T, \quad (17)$$

这里 $K_2 = D_{c,\min}/D_{c,\max}$, 方程 (17) 表示基本流体自然对流的热流密度式壁面过热度, 活化穴的分形维数和基本液体的物理特性的函数.

这里我们把纳米流体对流换热的总热流密度分为两部分: 纳米颗粒做布朗运动对流换热引起的热流密度 (q_n) 和基本流体自身对流换热的热流密度 (q_f), 则纳米流体对流换热的热流密度可以表示为

$$q_{nc} = q_n + q_f. \quad (18)$$

把方程 (11) 和 (17) 代入方程 (18), 则纳米流体对流换热的总热流密度为

$$q_{nc} = \left\{ \frac{k_f[k_n + 2k_f - 2\Phi(k_f - k_n)]Nu}{[k_n + 2k_f + \Phi(k_f - k_n)]} \times \frac{(K_1^{2-d_f} + K_1^{d_f} - 2K_1)(d_f - 2)d_f}{(K_1^{2-d_f} - 1)(d_f - 1)^2(\bar{D}_n)} + h_f(1 - mK_2^{2-d_{f,c}}) \right\} \Delta T. \quad (19)$$

方程 (19) 表示纳米流体对流换热的总热流密度是温度、纳米颗粒的平均直径、纳米颗粒的浓度、纳米颗粒的体积分形维数、基本液体的物理特性的函数. 没有引进参数, 与传统的模型相比, 该分形模型包含较少的经验常数, 并且每个参数都有物理意义.

在方程 (19) 中, k_n 和 k_f 及 Nu 分别为纳米颗粒与基本流体的导热系数及流体的努塞尔数, 对特定的纳米颗粒与特定的流体可以通过查找相关专业书籍得到其数值; ϕ 与 \bar{D}_n 分别为纳米颗粒在溶液中的浓度和纳米颗粒的平均直径, 本分形模型在与文献中的实验数据进行比较时, 文献给出了相应的数据, 在后面讨论部分, 我们与 Das^[4] 等的实验数据进行比较时, 该文献 [4] 给出了 $\bar{D}_n = 38 \text{ nm}$, $\phi = 1\%$ 与 $\phi = 2\%$; h_f 是基本液体自然对流的平均热传递系数, 根据流体的物理特性是湍流还是层流由方程 (14) 得到; $m = 1.8$ ^[24] 是方程 (12) 中的比例系数; K_1 是最小纳米颗粒直径与最大纳米颗粒直径的比值, K_2 是加热表面最小活化穴直径与最大活化穴直径的比值, 对遵循分形规律的纳米颗粒与加热表面的活化穴, Feng^[21], Cai^[29-32], 以及最近 Jiang 等人^[33] 对不同的分形介质计算得到结果与实验数据进行比较, 当最小尺寸与最大尺寸的比值为 10^{-3} 时, 计算结果与实验最符合, 为了简化计算, 本模型我们这里取 $K_1 = K_2 = 10^{-3}$; d_f 是纳米颗粒的体积分形维数, 由方程 (4) 给出; $d_{f,c}$ 是加热表面活化穴的分形维数, 由方程 (16) 给出.

3 结果与讨论

为了验证本分形模型的正确性, 我们与不同实验数据进行比较. Das 等^[4] 研究了矩形容器内纳米流体 (Al_2O_3 -水) 的池沸腾传热实验, Das 等^[4] 测得 Al_2O_3 纳米颗粒平均直径 $\bar{D}_n = 38 \text{ nm}$, 从图 1 我们可以观察到, 模型预测的结果与 Das 的实验数据^[4] 较好地符合, 实线代表本分形模型的预测, 分形模型的预测值根据方程 (19) 计算得到. 从图 1 中可以观察到, 随着温度升高, 实验结果比模型预测结果大, 这是因为温度较低时, 对流换热引起的热流密度占主导地位, 核沸腾引起的热流密度可以忽略不计, 而随着温度升高, 核沸腾引起的热流密度逐渐增加, 最终占主导地位, 所以实验结果比模型预测结果大. 图 2 是两个不同浓度的分形模型预测

值与实验数据的比较, 在图 2 中虚线与实线分别代表纳米颗粒浓度为 $\phi = 1\%$ 与 $\phi = 2\%$ 时模型预测值, 从图 2 可以看到, 模型预测值与实验是符合的, 再次证明了本分形模型的正确性. 从图 2 我们还可以观察到纳米颗粒浓度的增加引起沸腾曲线向右偏移, 随着纳米颗粒的加入, 沸腾曲线在自然对流阶段相对比较持久, 这是与实验结果^[4,28] 相符合的. 本研究成果揭示了纳米流体对流传热规律, 为研制高效的换热器和散热器奠定理论和技术基础, 对纳米流体对流换热的机理有新的推动, 这对于纳米流体在流动与传热的理论与实验将具有重要的学术意义和科学价值.

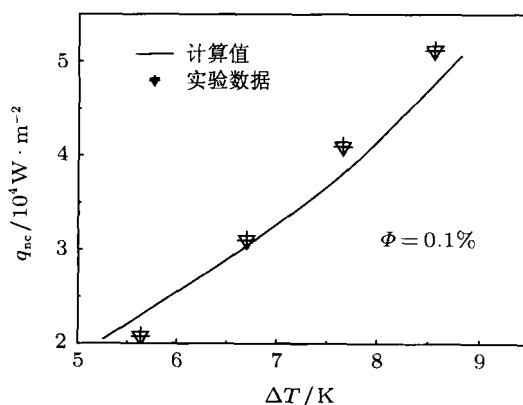


图 1 模型预测与实验数据的比较

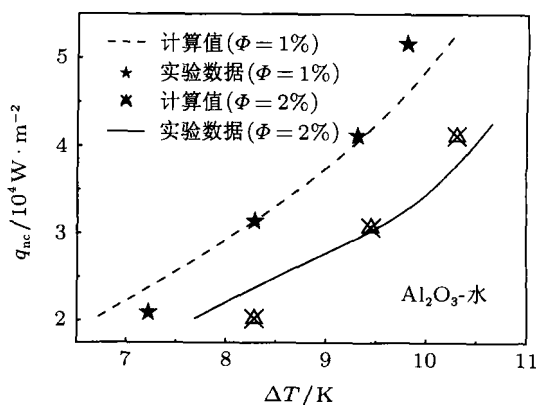


图 2 不同浓度 Al_2O_3 -水纳米流体对流有换热的热流密度与实验数据的比较

4 结论

本文基于分形理论研究了纳米流体对流换热的热流密度. 在这个分形模型中, 纳米流体对流换

热的总热流密度是温度、纳米颗粒的平均直径、纳米颗粒的浓度、纳米颗粒的体积分形维数、基本液体的物理特性的函数. 本模型没有引进其他参数, 与传统的模型相比, 该分形模型包含较少的经验常数, 并且每个参数都有物理意义. 从该分形模

型发现纳米颗粒浓度的增加引起沸腾曲线向右偏移, 随着纳米颗粒的加入, 沸腾曲线在自然对流阶段相对比较持久. 最后, 对结果进行讨论, 与实验数据进行了比较, 发现模型预测与实验结果是很好地符合, 从而证实了模型的正确性.

- [1] Choi U S in Siginer D A, Wang H P eds. *Developments and Applications of non-Newtonian flows ASME FED-231* (New York: [s.n.]) p99
- [2] Xuan Y M, Li Q 2000 *Int. J. Heat Fluid Flow* **21** 58
- [3] Xie H Q, Xi T G, Wang J C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1444 (in Chinese) [谢华清, 奚同庚, 王锦昌 2003 物理学报 **52** 1444]
- [4] Das S K, Putra N, Roetzel W 2003 *Int. J. Heat Mass Transfer* **46** 851
- [5] Jang S P, Choi S U S 2004 *Appl. Phys. Letts.* **84** 4316
- [6] Milanova D, Kumar R 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 233107
- [7] Prasher R, Bhattacharya P, Phelan P E 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 025901
- [8] Hong K S, Hong Tae-Keun, Yang Ho-Soon 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 031901
- [9] Liu Z H, Liao L 2008 *Int. J. Heat Mass Tran.* **51** 2593
- [10] Trisaksri V, Wongwises S 2009 *Int. J. Heat Mass Tran.* **52** 1582
- [11] Xie H Q, Chen L F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2513 (in Chinese) [谢华清, 陈立飞 2009 物理学报 **58** 2513]
- [12] Zhao S, Yin J B, Zhao X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3302 (in Chinese) [赵晟, 尹剑波, 赵晓鹏 2010 物理学报 **59** 3302]
- [13] Duangthongsuk W, Wongwises S 2010 *Int. J. Heat Mass Tran.* **53** 334
- [14] Avramenko A A, Blinov D G, Shevchuk V 2011 *Phys. Fluids* **23** 082002
- [15] Wang Y, Keblinski P 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 073112
- [16] Xiao B Q, Yu B M 2007 *Int. J. Thermal Sci.* **46** 426
- [17] Xiao B Q, Yu B M 2007 *Int. J. Multiphase Flow.* **33** 1126
- [18] Xiao B Q, Wang Z C, Jiang G P, Chen L X, Wei M J, Rao L Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2513 (in Chinese) [肖波齐, 王宗璇, 蒋国平, 陈玲霞, 魏茂金, 饶连周 2009 物理学报 **58** 2523]
- [19] Wang B X, Zhou L P, Peng X F 2003 *Int. J. Heat Mass Tran.* **46** 2665
- [20] Yu B M, Cheng P 2002 *Int. J. Heat Mass Tran.* **45** 2983
- [21] Feng Y J, Yu B M, Zou M Q, Zhang D M 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 3425
- [22] Maxwell J C 1954 *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Cambridge: Oxford University Press) p435
- [23] Mikic B B, Rohsenow W M 1969 *J. Heat Transfer* **91** 245
- [24] Judd R L, Hwang K S 1976 *Int. J. Heat Mass Tran.* **98** 623
- [25] Han C Y, Griffith P 1965 *Int. J. Heat Mass Tran.* **8** 887
- [26] Yu B M, Cheng P 2002 *AIAA J. Thermophysics and Heat Transfer* **16** 22
- [27] Yu B M, Cheng P 2002 *J. Heat Transfer* **124** 1117
- [28] Bang I C, Chang S H 2005 *Int. J. Heat Mass Tran.* **48** 2407
- [29] Cai J C, Yu B M, Zou M Q, Luo L 2010 *Energy Fuels* **24** 1860
- [30] Cai J C, Yu B M 2010 *Fractals* **18** 417
- [31] Cai J C, Yu B M, Zou M Q, Mei M F 2010 *Chem. Eng. Sci.* **65** 5178
- [32] Cai J C, Yu B M 2011 *Transp. Porous Media* **89** 251
- [33] Jiang G P, Tao W J, Huan S, Xiao B Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 070503 (in Chinese) [蒋国平, 陶文俊, 浣石, 肖波齐 2012 物理学报 **61** 070503]

Analysis of convection heat transfer mechanism in nanofluids*

Xiao Bo-Qi^{1)2)†} Fan Jin-Tu²⁾ Jiang Guo-Ping³⁾ Chen Ling-Xia¹⁾

1) (*Department of Physics and Electromechanical Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China*)

2) (*Institute of Textiles and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 99907, China*)

3) (*Earthquake Engineering Research Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China*)

(Received 23 September 2011; revised manuscript received 28 November 2011)

Abstract

Energy shortage and environment pollution are the major and large problems presently encountered by human all over the world. It is an effective way to save energy and reduce emission of polluted gas by using the nanofluids technology. There has been not a widely recognized theory which can explain flow and heat transfer of nanofluids until now. So the mechanism of flow and heat transfer of nanofluids is not clear. Considering the Brownian motion of nanoparticles in nanofluids, a mechanism model for heat transfer by heat convection is proposed based on the fractal distribution of nanoparticle. No additional/new empirical constant is introduced. The proposed fractal model for heat flux of nanofluids is found to be a function of temperature, average nanoparticle size, concentration, fractal dimension of nanoparticles, fractal dimension of active cavities on boiling surfaces and basic fluid property in pool boiling. The model predictions are compared with the existing experimental data, and fair agreement between the model predictions and experimental data is found for the cases of different nanoparticle concentrations and different average nanoparticle diameters. The analytical model can reveal the physical principles for convection heat transfer in nanofluids.

Keywords: nanofluids, convection heat transfer, fractal

PACS: 44.25.+f, 44.10.+i, 65.20.-w, 05.45.Df

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11102100), the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant No. 2012J01017), and the Scientific Research Special Foundation for Provincial University of Education Department of Fujian Province of China (Grant No. JK2011056).

† E-mail: xiaoboqi2006@126.com