

声空化场下浸没在多孔介质中水平圆管传热的实验研究

周定伟, 刘登瀛, 胡学功, 张正芳

(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘要: 在水平圆管外填充固体颗粒情况下, 以丙酮为工质, 通过改变声空化强度、距离, 颗粒直径, 多孔层高度和液体过冷度等相关参数对水平圆管单相及沸腾换热的影响进行了实验研究。并分析了影响水平圆管换热的因素, 及沸腾滞后的影响规律。

关键词: 声空化; 多孔介质; 沸腾换热; 滞后

中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 引言

在光滑表面上覆盖多孔物料因其换热效率高和重要的工程应用背景(如热管的蒸发端、地热能的开发利用、冻土层温度分布的改善以及核反应堆事故后碎片层中的沸腾冷却等)而日益受到重视。Tsuchiya 和 Shimish 首先研究了被水浸没钢球层中的池沸腾换热现象^[1]。Afgan 等以及 Fand 等对掩埋在多孔介质中的表面进行了池沸腾换热特性的研究^[2-3]。施明恒等进一步分析了水平光滑表面堆积颗粒形成的多孔物料床的换热机理, 并且提出了极限热流密度和临界热流密度的计算式^[4]。王补宣等在实验及理论分析的基础上, 对多孔物料床的池沸腾换热特性进行了实验研究并提出了改善方法^[5]。文献[6~7]分别研究了系统真空度和颗粒直径及工质热物性等对多孔介质沸腾换热的影响, 而文献[8]则就加热面尺寸和方向对多孔介质的池沸腾换热进行了研究。

声空化是指向液体中辐射声波时, 在一定压强下液体中出现的微小汽泡随着声压的变化作脉动、振荡, 或伴随有生长、收缩以致破灭的现象^[9]。采用声空化强化传热方法实际上是利用超声波激活液体中的微小泡核并使之崩溃以释放出能量, 从而达到强化传热的目的。周定伟等就声空化场下纳米颗粒

对沸腾传热的影响进行了实验研究^[10], 结果表明, 与未添加纳米颗粒时的沸腾换热相比, 纳米颗粒的添加会使沸腾换热能力降低。作为一种应用基础研究, 本文作者首次对声空化场下浸没在多孔介质中水平圆管的换热特性进行了实验研究。

2 实验设备与方法

实验系统、实验件及实验方法同文献[10]。实验件安装在一个 200 mm × 200 mm × 230 mm 的不锈钢箱形容器中。实验工质为丙酮, 固体颗粒为玻璃球, 平均直径分别为 1.2、2.5、3.5 和 4.3 mm。实验前先用实验工质清洗、浸泡玻璃球以便消除杂质、污物和非冷凝性气体等因素对实验的影响。声空化是由超声电子发生器和压电超声换能器联机产生。超声电子发生器输出频率能自动跟踪, 从而使超声换能器维持较佳的共振工作状态。

热流密度 $q'' = UI/S$, S 为传热面积, U 和 I 分别为通过实验件的电压和电流。换热系数 $h = q''/(T_w - T_1)$, T_w 为壁面温度(为八根热电偶读数修正值的算术平均值), T_1 为液体温度。 q'' 和 h 的不确定度分别小于 5.5% 和 6%。除非特别说明, 超声换能器均置于实验件正上方, 玻璃球堆积高度与实验件上表面齐平。

3 实验结果与讨论

3.1 影响水平圆管换热的因素

3.1.1 声空化强度

声空化强度是指超声电子发生器输出的电流强度, 用 I 表示。它包括实验件所处位置声空化场的强度和声空化方向的影响。当实验玻璃球直径 $d = 2.5\text{mm}$,

液体过冷度 $\Delta T_{sub} = 25 \text{ K}$, 声空化距离 $L = 60 \text{ mm}$

球直径为 2.5 mm , 液体过冷度为 25 K , 声空化强度

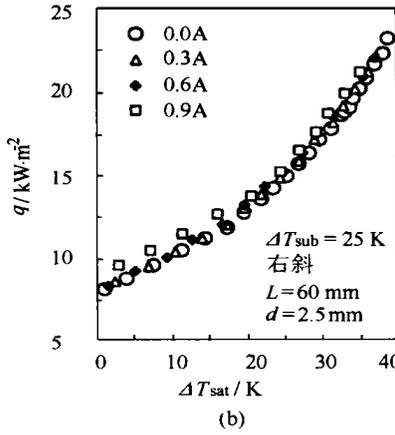
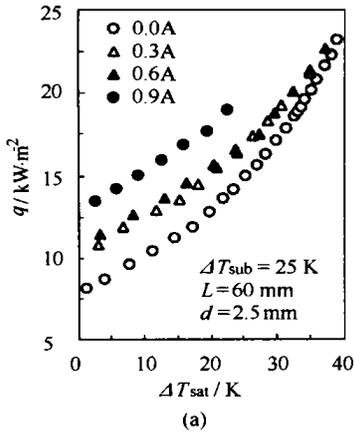


图 1

时, 声空化强度对水平圆管单相及沸腾换热的影响示于图 1。图 1(a) 为换能棒正对实验件的情形, 本文作者将池沸腾视为 $I = 0 \text{ A}$ 的换热情况。由图 1 可见, 随着声空化强度的增加, 水平圆管的单相及沸腾换热均得到显著增强。当换能棒偏离实验件中点而向右、向外移动(即右斜)时, 如图 1(b) 所示, 在一定的声空化强度 ($I = 0 \sim 0.6 \text{ A}$) 范围内, 水平圆管的换热特性基本上不受声空化强度的影响; 当声空化强度为 0.9 A 时, 水平圆管的单相对流及沸腾换热均得到明显提高。与图 1(a) 所示的换热情形相比, 声空化强度对水平圆管的换热影响呈现出不同的规律, 这就是声空化方向的影响。

3.1.2 声空化距离

声空化距离是指换能棒末端与实验件的空间垂直距离。图 2 示出了超声换能棒右斜于实验件中点时声空化距离对水平圆管换热的影响, 实验时玻璃

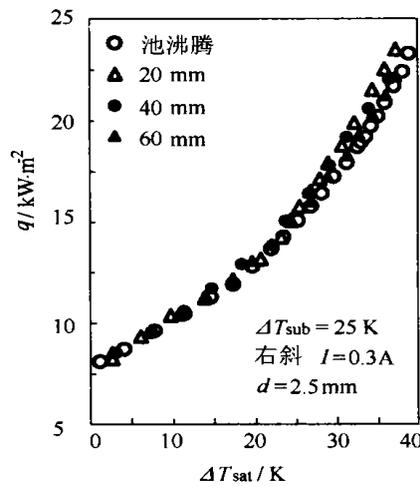


图 2 声空化距离的影响

圆管单相及沸腾换热强度, 且会导致沸腾热滞后的出现; 作者在实验中发现, 当玻璃球直径为 3.5 mm 时, 多孔层高度对换热的影响大大减弱。当声空化场存在且多孔层

高出换热上表面 30 mm 时, 一定实验条件下水平圆管单相对流换热不受声空化强度的影响, 而沸腾换

热则随着声空化强度的增加而增强, 且沸腾热滞后现象大为减弱。

3.1.4 颗粒直径

图 4 分别示出了无、有声空化场时玻璃球颗粒直径对换热的影响情况, 实验时液体过冷度均为 25 K 。由图 4(a) 可见, 与水平圆管池沸腾换热数据相比^[1], 各种直径固体颗粒的添加对单相对流换热均有一定的强化效果, 而对高热流密度下的

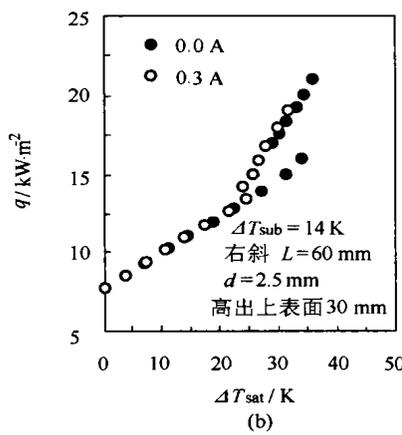
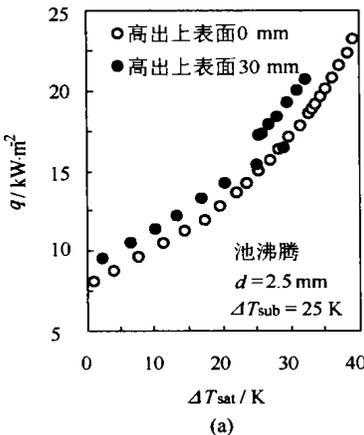


图 3

沸腾换热却起弱化作用,但消除了沸腾热滞后现象;同时,水平圆管沸腾传热曲线(热流密度随壁面过热度的变化)随颗粒直径的变化呈现出复杂的关系。当热流密度较低时,壁面处于单相对流换热状态,此

玻璃球高出换热上表面 30 mm,且其直径为 2.5 mm 时,水平圆管沸腾曲线随液体过冷度的增加而向左发生明显移动,即换热被强化,这与强润湿性液体池沸腾及液体中添加有纳米颗粒时液体过冷度的影响相一致^[10,12]。由图 5(a)还

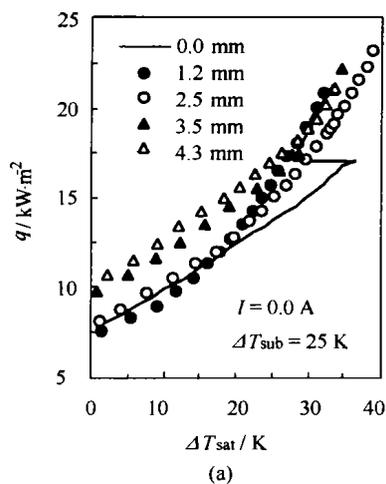


图 4

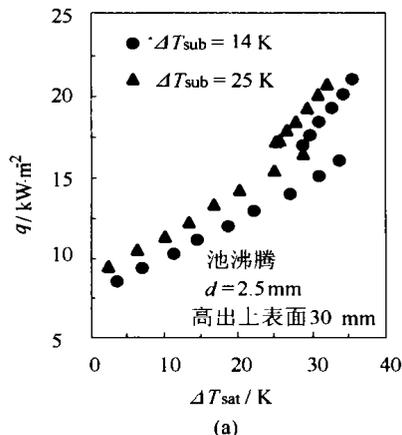
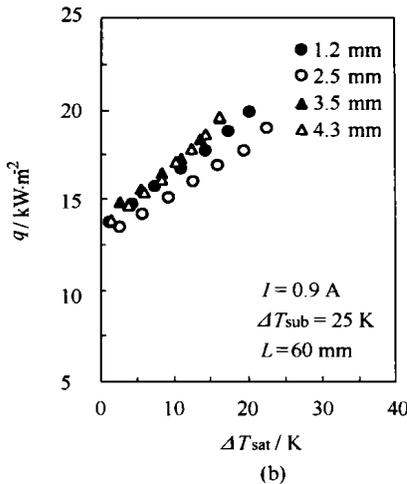
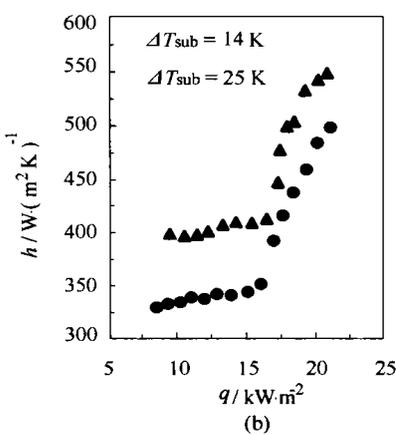


图 5



时,水平圆管的换热随着颗粒直径的增加而增强;当热流密度继续增加,水平圆管沸腾换热随颗粒直径增强的顺序依次为:2.5 mm, 4.3 mm, 3.5 mm, 1.2 mm。这不同于实验件竖直放置时的结果^[7]。当声空化场存在且其强度为 0.9 A 时,如图 4(b)所示,在一定实验条件下,与无声空化场时的情形相比,声空化场的存在大大提高了水平圆管的换热强度,其强化效果由弱至强依次为 2.5 mm, 1.2 mm, 4.3 mm, 3.5 mm。

3.1.5 液体过冷度

液体过冷度对沸腾换热的影响历来就是传热学领域内几个有争议的问题之一。液体过冷度分别为 14 K 和 25 K 时水平圆管的换热情况示于图 5。当

可见,随着液体过冷度的增加,温度过头值减小,沸腾起始壁面过热度及相应的热流密度均有所提高。对于图 5(b)以 $h \sim q''$ 形式给出的沸腾曲线,随着过冷度的增加,水平圆管的单相对流及沸腾传热均明显地得到增强。

3.2 传热机理分析

文献[5]认为,填充固体颗粒对液池换热特性的影响可主要归纳为以下四点:(1)增加了活化中心的密度,从而引起强化换热的作用;(2)由于固体颗粒的导热性能优于液体,相当于在加热表面上增加了扩展表面的功能,有利于气泡的成长;(3)使加热面上气泡的成长和脱离所引起的液体扰动减弱,从而使沸腾换热强度下降;(4)阻碍了气泡的脱离和液体向加热面的补充,将使沸腾换热减弱。在低热负荷下,气泡的生成速率、脱离频率以及气泡的运动速度都较低,多孔物料层阻力的影响相对较小,前两者有利因素起主导作用,沸腾传热因此被强化;随着热流密度的逐步提高,多孔层阻力的影响逐步起主导作用,从而使沸腾换热被弱化。多孔层的存在对沸腾换热的总效果取决于这些影响的综合作用。对于图 4(a)所示的池沸腾换热情形而言,低热流密度下水平圆管单相对流换热因添加固体颗粒而扩展了换热面积导致换热效果增强;对于 $d = 1.2$ mm 的固体颗粒,当热流密度低于 10^4 W/m² 时,固体颗粒的添加降低了自然对流换热效果,这主要是由于液体的扰动较光滑表面自然对流有所削弱之故^[5]。在高热流密度区,由于阻碍沸腾传热强化的两个因素起主导作用,因而颗粒直径分别为 2.5 mm、3.5 mm 和 4.3 mm 的沸腾换热均被弱化;而对于 $d = 1.2$ mm 的固体颗粒,相对于其它直径的颗粒而言,它不但提

随着热流密度的逐步提高,多孔层阻力的影响逐步起主导作用,从而使沸腾换热被弱化。多孔层的存在对沸腾换热的总效果取决于这些影响的综合作用。对于图 4(a)所示的池沸腾换热情形而言,低热流密度下水平圆管单相对流换热因添加固体颗粒而扩展了换热面积导致换热效果增强;对于 $d = 1.2$ mm 的固体颗粒,当热流密度低于 10^4 W/m² 时,固体颗粒的添加降低了自然对流换热效果,这主要是由于液体的扰动较光滑表面自然对流有所削弱之故^[5]。在高热流密度区,由于阻碍沸腾传热强化的两个因素起主导作用,因而颗粒直径分别为 2.5 mm、3.5 mm 和 4.3 mm 的沸腾换热均被弱化;而对于 $d = 1.2$ mm 的固体颗粒,相对于其它直径的颗粒而言,它不但提

供了较多的活化中心以及扩展传热表面, 而且还具有一定的流化效果^[7], 流态化的颗粒对液体的扰动加强, 这在一定程度上也增强了换热效果, 以上几个因素综合作用的结果导致该直径颗粒的添加强化了沸腾换热。由图 5 还可见, 从四种直径固体颗粒获取的沸腾曲线互相靠近, 表明在高热流密度下气泡的脱离和液体的补充已成为影响沸腾换热的主要因素之一。

当固体颗粒堆积高度高出换热上表面 30 mm 时, 如图 3(a) 所示, 固体颗粒堆积高度的增加引起沸腾热滞后的发生。采用强润湿性液体浸没冷却光滑传热表面时, 由于传热表面上用以起沸的孔穴被液体淹没而捕捉不到气体, 气泡胚胎无法生成, 只有当壁面过热度增加到足以使一定尺寸孔穴内的气泡胚胎开始生成、长大并脱离传热表面时, 沸腾才开始发生^[13]。本文记叙的传热表面经过细砂纸打磨因而比较光滑, 且丙酮液体的表面张力较小, 因此, 其池沸腾换热曲线会出现热滞后现象^[11]。当往液池中加入固体颗粒且使其高度与传热上表面平齐时, 固体颗粒的添加增加了活化中心密度及传热面积导致水平圆管换热强度明显增强, 同时, 因气泡胚胎易于形成而使沸腾滞后现象受到抑制(由图 3 可见 $d = 3.5 \text{ mm}$ 的沸腾曲线仍可见滞后现象); 当固体颗粒堆积高度进一步增加并高出传热上表面 30 mm 时, 液池因固体颗粒的添加而减少了液体量及其含气总量, 且阻碍了气泡的脱离和液体向加热面的补充。前者有利于滞后现象的发生, 而后者则对沸腾传热起弱化作用。值得注意的是, 沸腾滞后的发生总是伴随着沸腾起始前换热强度的降低。因此, 上述影响因素综合作用的结果导致了沸腾滞后的发生。由于上述诸影响因素均不受液体过冷度的影响, 因而, 图 5(a) 所示的各过冷度下的沸腾曲线均出现了滞后现象。

文献[13]认为声空化场存在时, 整束空化气泡在传热表面上形成的强烈射流及单个空化气泡产生的局部微冲流导致传热边界层厚度减薄是水平圆管单相对流传热强化的最主要原因。当液池中添加固体颗粒后, 固体颗粒阻碍了空化气泡对传热表面的直接冲击作用, 如图 6 所示, 因而图 1(b) (0.9 A 沸腾曲线除外)、图 2 和图 3(a) 中所有沸腾曲线的单相对流传热均与无声空化场时的自然对流换热强度相同, 这是超声换能棒右斜于实验件的情形; 当换能棒正对实验件时, 与前者相比, 相同声空化强度下的空化气泡对传热表面的影响增强, 尤其是对传热上表

面具有一定的射流冲击作用, 这大大减薄了传热边界层的厚度, 因而图 1(a) 中各声空化强度下的传热效果均高于自然对流传热效果; 由于声空化强度增加会产生更多的空化气泡, 而后者将使传热表面与液体间进行更多的质的传递与热的交换, 且声空化强度达到一定值时会使小直径颗粒的玻璃球产生流态化效果, 从而减少了覆盖在传热表面上的玻璃球数目, 因而水平圆管单相对流换热会随着声空化强度的增加而明显增强。

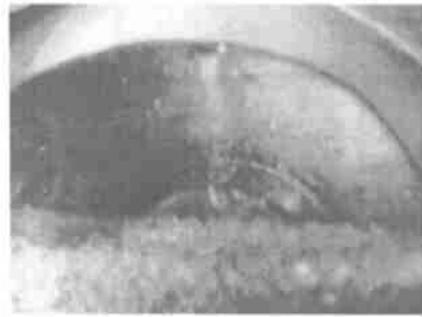


图 6 空化气泡对多孔介质传热的影响

声空化场强化沸腾传热不仅由上述强化单相对流传热的因素引起, 而且还包括由空化气泡引起沸腾实际参与面积增加以及空化气泡对传热表面孔穴内

气泡胚胎的生成、长大和脱离的直接影响^[11]。本文作者认为, 当超声波作用于液体中时, 只有当超声电子发生器输出的高频电频率与超声换能棒固有的振动频率相一致时, 才会激起超声换能棒在共振状态下工作, 使其振动最强, 从而在被处理的液体中引起强烈的空化现象。液池中添加的固体颗粒虽然有阻碍空化气泡对传热表面的直接冲刷作用, 却不可能像液体中添加的纳米颗粒那样减弱换能棒在液体中产生空化气泡的效果, 因而, 换能棒在液体中的振动仍可在换热表面周围激发并产生空化气泡。换句话说, 空化气泡对传热表面孔穴内气泡胚胎的生成、长大和脱离仍然起作用, 只要声空化强度足够大。因而, 如图 1(a) 和图 4(b) 所示超声换能棒正对实验件时及如图 1(b)、图 2 和图 3(b) 所示换能棒右斜于实验件时所获取的沸腾传热曲线均在一定程度上向左偏离于相同状态下获取的池沸腾曲线, 也即声空化场的存在强化了浸没在多孔介质中水平圆管的沸腾传热。

4 结论

(1) 与未添加固体颗粒时的换热情形相比, 多孔层的存在分别强化和弱化了低、高热流密度下的单相对流和沸腾换热效果, 却抑制了沸腾热滞后现

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接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)

of measuring pulverized coal concentration by the system was investigated. In consideration of the thermal relaxation effect in two-phase flows a calculation formula is proposed based on a revised Reynolds number and Nusselt number. The test data obtained by using the above two revised numbers to correlate the gas-solid two-phase flow round the thermal probes have shown that the gas-solid two-phase flow and single-phase one have an identical heat exchange relation. On the basis of this mechanism the thermal probe measurement method has made it possible to keep the relative deviation of pulverized-coal concentration measurement results within $\pm 15\%$. **Key words:** gas-solid two-phase flow, pneumatic transport, heat transfer, measurement, thermal probe

射流对高温空气燃烧过程中 NO_x 生成的影响 = **The Influence of Jet Flows on NO_x Generation during a High-temperature Air Combustion Process** [刊, 汉] / WANG Jie-teng QI Hai-ying, LI Yu-hong, YOU Chang-fu (Institute of Thermal Energy Engineering under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 575 ~ 579

Presented are the NO_x generation mechanism during a fuel combustion process and various influencing factors. In addition, in connection with the specific features of high-temperature air combustion (HiTAC) and the basic theory of jet flows the authors have investigated the influence of an entrainment of fuel and air jet flows on NO_x generation rate occurring at the HiTAC mode. The results of the investigation may provide a theoretical basis for the selection of a rational design and operating parameters as well as for the attainment of super-low NO_x emissions and sizable energy-savings when operating at the HiTAC mode. Furthermore, they can also promote the industrial application and popularization of this advanced HiTAC technology in China. **Key words:** jet flow, high-temperature air combustion, NO_x emissions

声空化场下浸没在多孔介质中水平圆管传热的实验研究 = **Experimental Research on the Heat Transfer in a Horizontal Circular Tube Immersed in a Porous Medium under the Action of an Acoustic Cavitation Field** [刊, 汉] / ZHOU Ding-wei, LIU Deng-ying, HU Xue-gong, ZHANG Zheng-fang (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 580 ~ 584

With the outside portion of a horizontal circular tube being packed by solid granules acetone is used to serve as a working medium. Under this condition an experimental research has been performed to identify the influence of various parameters on the single-phase convection and boiling heat transfer, including boiling hysteresis, in the above-cited tube immersed in a porous medium. Such parameters include the intensity and distance of acoustic cavitation, granule diameter, height of a porous layer, fluid subcooling, etc. **Key words:** acoustic cavitation, porous medium, boiling heat transfer, hysteresis

低浓度 CTAC 减阻流体流动性能试验研究 = **Experimental Investigation of the Flow Properties of a Low-concentration CTAC (Cetyl Trimethyl Ammonium Chloride) Drag Reducing Fluid** [刊, 汉] / XU Peng, WANG De-zhong, HU Li-guang, ZHOU Hao-jun (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 585 ~ 588

Through the measurement of the drag reducing properties of a CTAC (cetyl trimethyl ammonium chloride) solution obtained were the characteristics of variation of these properties with the change in salt concentration. The results of an investigation indicate that even for one and the same drag reduction mode there exists a limiting value and an optimized selection for drag reduction. Meanwhile, a laser phase Doppler anemometer was employed to investigate the turbulent flow characteristics of a drag reducing fluid and, as a result, speed pulse curves were obtained for 50 kinds of operating conditions. It has also been discovered through the investigation that the transverse and axial speed pulses as well as Reynolds stress of the drag reducing fluid are markedly smaller than those of a Newtonian fluid. The correlation between the axial