

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

声波作用下铜球传热特性实验*

许伟龙^{1,2} 姜根山^{2†} 魏珠萍² 郝文卓²

(1 华北电力大学能源动力与机械工程学院 北京 102206)

(2 华北电力大学数理系 保定 071003)

摘要 针对频率为 500 Hz~3000 Hz 和声压级为 110 dB~133 dB 的声场作用对铜球在空气中自然冷却的传热特性的影响,通过热电偶测温的方法,分析铜球温度梯度的分布与声场声压级、频率以及铜球直径的关系。结果表面,当频率 f 一定时,随着声压级的增加,铜球的传热效果得到明显增强,对于直径为 5 mm 的铜球,在 133 dB 声场中传热系数最大增加了 25%。当声压级一定时,在频率范围中存在某一频率,此时铜球的传热系数最大,此特殊频率随着声压级的增大而增大。当铜球的直径为 5 mm 时,可以在低频段观测到声流效应的影响,而当铜球的直径为 10 mm、15 mm 时,很难在低频段辨别出声流效应的影响。所得结论为声波应用于电站锅炉中,强化煤颗粒燃烧提供了依据。

关键词 声场,铜球冷却,对流换热系数, Nu 数,传热强化因子

中图法分类号: TK124

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)01-0129-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.019

Experimental study of acoustically enhanced heat-transfer from copper sphere

XU Weilong^{1,2} JIANG Genshan² WEI Zhuping² HAO Wenzhuo²

(1 School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

(2 Department of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract The effects of acoustic frequency (500 Hz~3000 Hz) and sound pressure level (110 dB~133 dB) on the nature-convective heat transfer rate during cooling of a stationary sphere were investigated experimentally. The spheres were immersed in the air (27 °C). The temperature of the sphere was recorded using a data logger equipped with a T-type thermocouple in the center of the spheres. The relationship between sound pressure levels, frequency and the diameter of the sphere with the temperature gradient of the sphere were analyzed. The results show that higher sound pressure levels cause higher heat-transfer rate. When the diameter of the copper sphere is 5 mm, the heat transfer rate could be increased up to 1.25 times for SPL = 133 dB. However, there is a special frequency, at which Nu reaches a maximum, due to the flow separation caused by flow acceleration. This special frequency increases with increasing SPLs. When the sphere size is 5 mm, at low frequencies (500 Hz~700 Hz), acoustic streaming is the dominant factor. It results in an increasing Nu with decreasing frequency. However, when the sphere size is 10 mm or 15 mm, the effect of acoustic streaming is hardly detectable in the low frequency band. The conclusions highlight a good application prospect in combustion for the boiler.

Key words Acoustic field, Cooling, Convective heat transfer coefficient, Nusselt number, Enhancement factor

2017-10-30 收稿; 2017-11-14 定稿

*国家自然科学基金项目 (11474091, 11674093), 河北省自然科学基金项目 (A2015502077)

作者简介: 许伟龙 (1988-), 男, 湖北荆门人, 博士研究生, 研究方向: 声波在炉内的传播特性及声效应研究。

† 通讯作者 E-mail: gsjiang@ncepu.edu.cn

1 引言

在电站锅炉中,实现煤粉的高效燃烧主要通过三种途径:(1)强化煤粉气流的传热传质;(2)提高煤粉的高浓度聚集;(3)强化燃烧的初始阶段。近年来,大量研究表明,振荡流体中固体的传热传质率有明显的增强。这个现象已经得到了工程应用上广泛的关注及研究,如:强化燃烧^[1-2]、干燥^[3-4]以及强化管道换热^[5]等。实验证明,煤颗粒在强声波形成的振荡流中燃烧时,燃烧时间明显缩短,对提高燃煤效率是十分有效的^[6]。

单球形颗粒和液滴在振荡流场中的传热传质研究最早在20世纪40年代,Marthelli和Boelter^[7]对单一球形粒子和小球滴燃料燃烧时热量和质量传输的影响进行了探索。Ranz等^[8]通过理论推导和实验分析,提出了稳流中单个颗粒在不同条件下传热传质计算公式,这一结果为研究者们所广泛接受,并应用于实际工业计算和相关数值模拟计算之中。Larsen等^[9]对Ranz所得到的公式进行了修改,提出了振荡流中单个颗粒的传热计算公式。Sayegh和Gauvin^[10]研究了环境为空气的传热传质现象,提出了振荡流中单颗粒的传热传质计算公式。何雅玲等^[11]对脉动流动强化凸块散热进行了数值研究,讨论了雷诺数 Re 、斯德鲁哈尔数 St 、脉动振幅 A 等参数对凸块散热性能和通道中压力损失的影响。数值结果表明,脉动流动加强了流体的扰动和掺混作用,增强了流体的传热能力。Valverde^[12]提出将强声波应用于循环流化床锅炉中,探讨了声波对颗粒的流动状态、传热传质等特性的强化作用。Hossein等^[4]采用实验的方法,研究了频率为25 kHz的超声波声场中铜球的传热特性,并分析了普朗特数 Pr 、声强等参数对换热系数的影响。许伟龙等^[13]对可听声范围的声场中,单煤粉颗粒的传热传质特性进行了数值研究,发现存在某一频率,颗粒的传热传质系数最大,且此特殊频率随着声压级的增大而增大。

在电站锅炉中,煤颗粒粒径在100 μm 左右,很难在实验中直接对颗粒进行传热研究。因此,在本文中利用铜球替代煤颗粒,通过分析铜球在不同声压级以及频率的声场中的冷却情况,探讨声波作用下铜球的换热特性。所得结论为进一步研究强声波促进煤颗粒燃烧提供了依据。

2 传热方程

铜球在空气中冷却,球坐标系下一维传热方程可以表示为

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

其中, r 为沿着铜球半径到球心的距离, α 为热扩散率, T 为温度, t 为时间。

铜球在空气中冷却的热传递过程包括铜球内部的热传导以及铜球与外界空气之间的对流换热,两种热传递方式对于铜球的温度场变化具有重要的影响,因此这里引入 Bi 数来表征两种热传递方式,表示为

$$Bi = \frac{hD}{\lambda}, \quad (2)$$

其中, h 为对流换热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; D 为物体的特征长度,对于铜球 D 为直径; λ 为导热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。若 Bi 数小于0.1,则铜球内部的热传导过程可以忽略不计。

控制方程的初始条件及边界条件分别为初始条件, $t = 0$ 时,

$$T(R, 0) = T_i, \quad (3)$$

边界条件, $t > 0$ 时,

$$\begin{cases} \frac{\partial T(0, t)}{\partial r} = 0, \\ -\lambda \frac{\partial T(R, t)}{\partial r} = h[T(R, t) - T_\infty] - Q_s, \end{cases} \quad (4)$$

当假设 $Bi < 0.1$,则有,

$$\frac{\partial T(R, t)}{\partial r} = 0. \quad (5)$$

边界条件中, Q_s 为声辐射作用下,传递给单位面积上铜球的能量。即假设,当铜球与空气温度相同,保持恒定状态时,在声波的作用下铜球的温度会升高。这样, Q_s 可以表示为

$$Q_s = \frac{mC_{ps} \frac{\Delta T_s}{\Delta t}}{A}, \quad (6)$$

式(6)中, m 为铜球的质量,kg; C_{ps} 为铜球的比热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; ΔT_s 为声波作用下,铜球的温度差; A 为铜球的面积。根据在不同声压级的声场中,测量常温中铜球的温度变化情况,即可得到在不同声压级声场中传递给铜球的声辐射能量。

根据上述条件,求解式(1),可得

$$T = \frac{\left\{ \exp\left(\frac{-hA}{\rho V C_{ps}} t\right) [h(T_i - T_\infty) - Q_s] \right\} + hT_\infty + Q_s}{h}, \quad (7)$$

或者

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \frac{\left\{ \exp\left(\frac{-hA}{\rho V C_{ps}} t\right) [h(T_i - T_\infty) - Q_s] \right\} + Q_s}{h(T_i - T_\infty)}, \quad (8)$$

其中, T 为铜球的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_∞ 为空气的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_i 为铜球的初始温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据式(7),可以做出关于温度 T 与时间 t 的曲线,采用 MATLAB 软件对实验数据进行拟合,即可以得到对流换热系数 h 。根据采用上述方法得到的对流换热系数即可得到 Nu 数:

$$Nu = \frac{hD}{\lambda_f}, \quad (9)$$

式(9)中, λ_f 为流体媒质的导热系数。

声波作用下,铜球传热强化因子可以表示为

$$\text{强化因子} = \frac{Nu_s}{Nu_0}, \quad (10)$$

其中, Nu_s 为声波作用下实验得到铜球的 Nu 数,而 Nu_0 为没有声波作用下实验得到铜球的 Nu 数。

3 实验与结果分析

图1所示为实验装置示意图。实验系统采用工作台上设置喇叭(8 Ω , 500 W)作为声源,由声谱仪(北京声望型号 MC3642)产生信号,经功率放大器(FdB-Model TA1100)后,促使扬声器产生稳定的正弦波信号,传感器(型号 MPA-201)放置于铜球附近,采集铜球处的声信号。实验中,测试的声压级范围为 110 dB~133 dB,频率范围为 500 Hz~3000 Hz (在频率范围内,声波的波长远大于铜球的粒径)。根据文献[12],此时,铜球处的流场不仅受到外部势流的影响,同时会受到声流的影响,铜球表面会形成一个薄层,薄层中有剧烈运动的涡旋,属于 1 boundary layer 状态。此时,铜球的传热特性受到两部分流场的影响:(1) 外部势流的影响;(2) 声流的影响。

声流流体中固体的传热或传质特性理论研究目前已引起了广泛的关注,并在一些实验中已观测到传热传质效果得到了一定的强化。Gopinath 和 Miles^[14] 研究了在驻波声场中,声流效应影响小球

($A = 4\pi R^2$, $D = 2R$) 与流场之间的对流换热,通过求解动量和能量守恒方程,发现时间平均努赛尔数 Nu 主要与流雷诺数 Re_s 以及普朗特数 Pr 相关,关联式表示如下:

$$Nu = A_0 Re_s^m Pr^q, \quad (11)$$

式(11)中, $m = 0.5$, 系数 A_0 与指数 q 仅仅稍微取决于 Pr 数的值。式(11)表明 Nu 数与流雷诺数 Re_s 的平方根成正比, $Re_s = u_s R / \nu$ 。同时,滑移速度与频率成反比,因此可以得到 Nu 数与频率的平方根的成反比,由此可知,随着频率的增大,声流效应对铜球传热的影响越小。

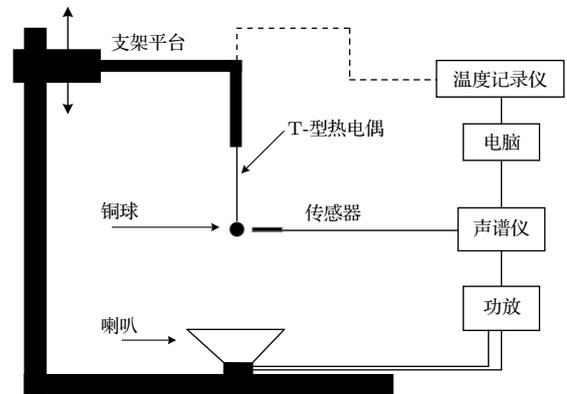


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the experimental setup

在实验中,选取了三种粒径的铜球,分别为 5 mm, 10 mm 以及 15 mm。铜球表面至球心钻取了一个 0.5 mm 的小孔,将 T 型热电偶插入并固定在小孔中,则热电偶测得的温度即为球心处的温度。同时,将铜球通过工作台悬吊起来,铜球距离扬声器的距离为 20 cm。热电偶测得的温度数据通过与之相连接的温度记录仪进行采集,温度记录仪每隔一秒钟记录一次数据,测量精度为 0.01 $^{\circ}\text{C}$ 。每组实验通过设定好频率以及声压级后,将铜球加热并于 120 $^{\circ}\text{C}$ 左右时加入声场,记录铜球 1 min 的温度变

化,冷却媒质为室内空气,温度控制在 27 °C。每组实验结束后,待铜球冷却至常温后,再进行下一组实验。同时,在没有声场的作用时,对铜球的自然对流换热也进行了测量,并作为参考。

由于声辐射的影响,传递给铜球的能量如式(6)所示,当铜球与环境温度保持一致并处于平衡状态时,记录在不同声压级的声场中,铜球的温度变化。发现在 110 dB~133 dB 的范围内,铜球的温度

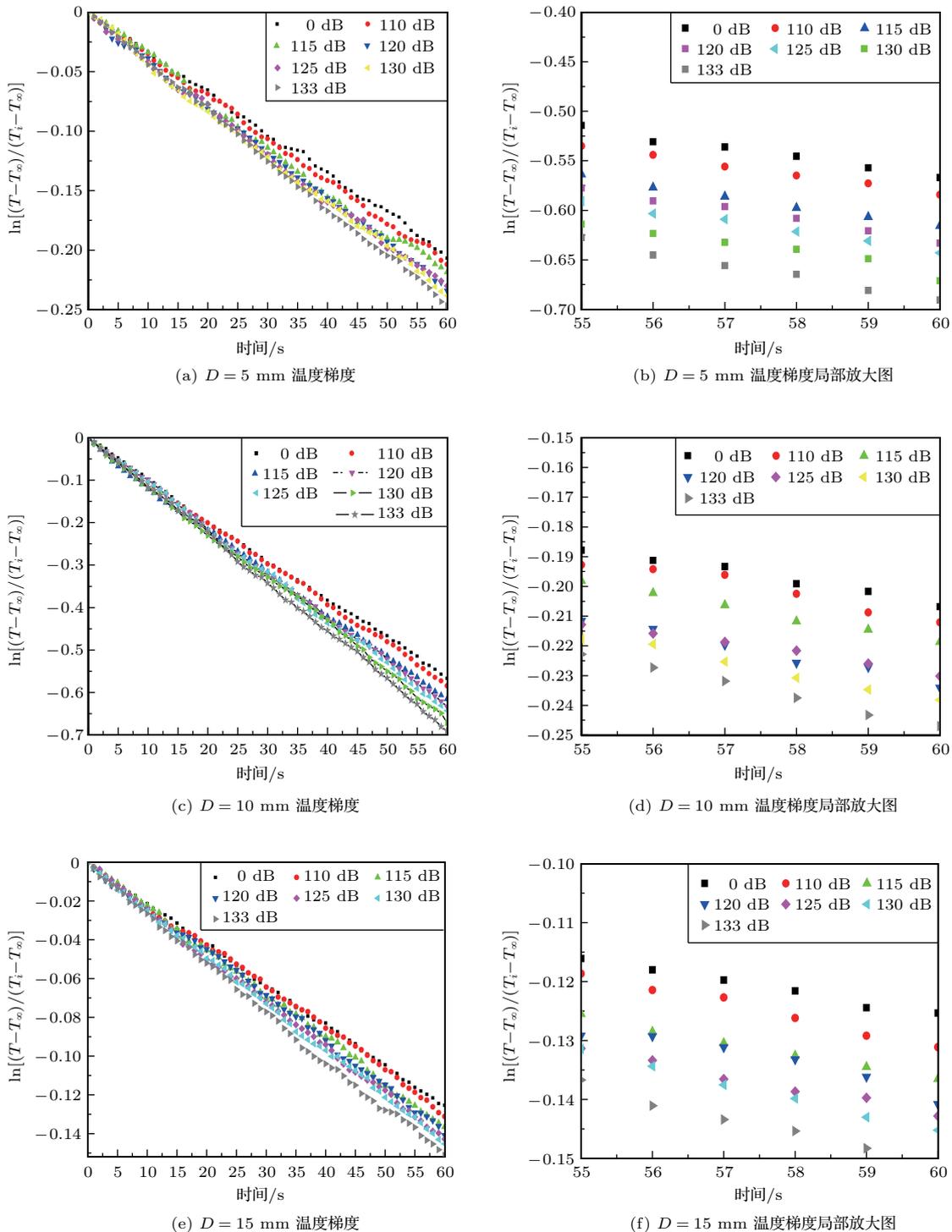


图2 声频率为 1 kHz,不同声压级的声场作用下铜球的温度比率分布

Fig. 2 Effect of different SPL for frequency of 1 kHz on the temperature ratio during cooling a stationary sphere

几乎保持不变,即 Q_s 可以忽略,式(7)和式(8)可以简化为

$$T = \frac{\exp\left(\frac{-hA}{\rho VC_{ps}}t\right) \cdot h(T_i - T_\infty) + hT_\infty}{h}, \quad (12)$$

或者

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp\left(\frac{-hA}{\rho VC_{ps}}t\right). \quad (13)$$

根据式(13),对等式左边的温度比率取自然对数,可得一无量纲数,设其为LnTR,

$$\text{LnTR} = \ln \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty}. \quad (14)$$

图2所示为声频率 1 kHz, 不同声压级的声场中,铜球温度比率随时间的分布曲线,测试时间为 60 s。在测试时间内, LnTR 的值越小,铜球冷却的越快。从图2中可以看到, LnTR 的曲线接近于线性分布,随着声压级的增大,铜球的冷却效率越高。

图3展示了在不同声频率与声压级的作用下,铜球对流换热系数 h 的变化。频率的变化范围为 500 Hz~3 kHz,声压级变化范围为 110 dB~133 dB。将测得的对流换热系数代入到式(2)中,可得 $Bi \ll 0.1$, 满足假设的初始条件式(5),即可以忽略铜球内部的热传导。图4展示了在不同声频率与声压级的作用下,铜球 Nu 数的分布。通过曲线拟合的方法,根据对流换热系数 h ,即可得到 Nu 数。图5为在不同声频率与声压级的作用下,传热强化因子的分布情况。 Nu 数越大表明了传热效率越高,以及强化因子越大。因此,从图4和图5中可以发现,随着声压级的增大,铜球的换热效率越高。图5(a)中,可以看到当声压级为 133 dB 时,强化因子最大值为 1.25,表明了 133 dB 的声场中,铜球的传热效率最高可以增大 25%。当铜球粒径为 10 mm 和 15 mm 时,强化因子的最大值分别为 1.28 和 1.3。虽然这里可以看到,相对于直径为 5 mm 以及 10 mm 的铜球而言,直径为 15 mm 时,铜球的强化因子的最大值最高,然而,还需要更多的研究来证明,颗粒粒径越大,声波强化传热的效果越好这一结论。

同样从图4以及图5中可以发现,随着频率的增大,铜球表面漩涡周期性地脱落,扰动了流场分布,促进了铜球与空气之间的换热,即 Nu 数随着频率的增大而增大。然而,当频率超过某一特殊频率时, Nu 数随着频率的增大逐渐减小,这是由于随着漩涡数量的不断增加,前一个周期脱落的漩涡还

来不及对铜球表面的进行冷却就被下一个周期的涡旋带走,这样会导致在铜球表面附近形成一个热层,这个热层反而会导致铜球的传热传质效果减弱, Nu_t 的值也会减小。

另外,当铜球直径为 5 mm 时,可以发现在 500 Hz~700 Hz 的范围内,随着频率的增大, Nu 减小,这主要是受到了声流效应的影响。然而,当铜球直径增大到 10 mm 和 15 mm 时,声流效应的影响在 500 Hz~700 Hz 这个频段已经很难分辨出来了。

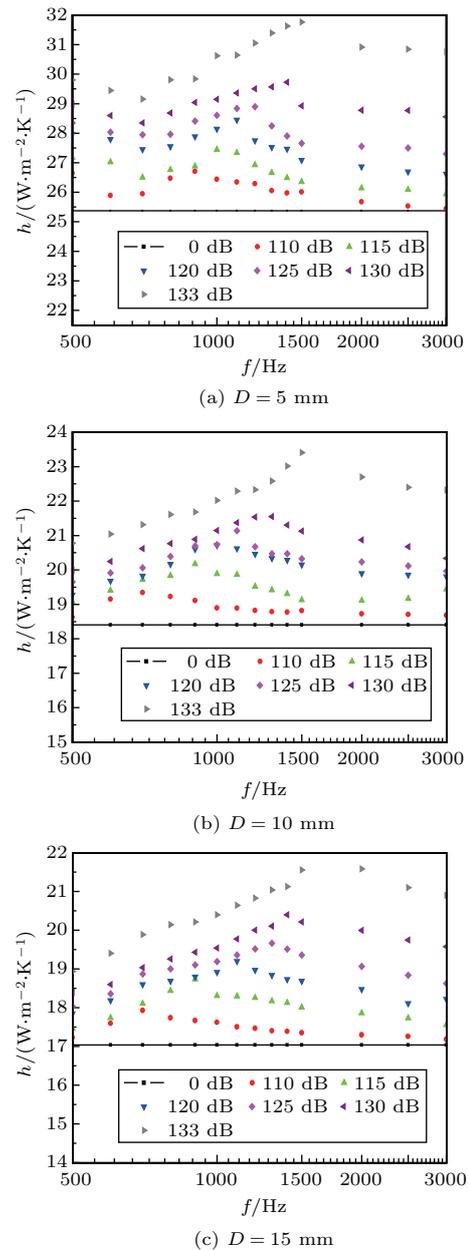
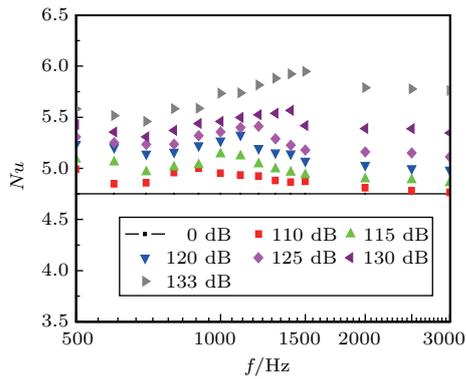
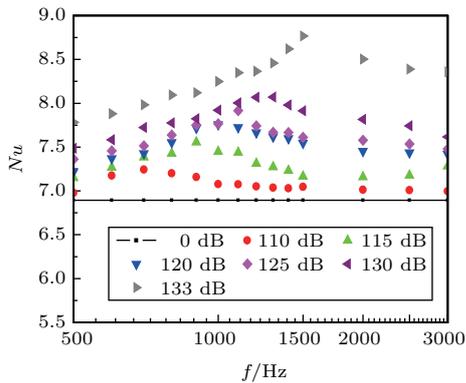


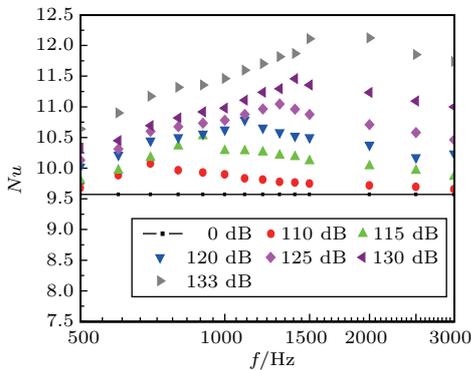
图3 对流换热有效系数 h 随频率的分布曲线
Fig. 3 Distribution of convective heat-transfer coefficient h during cooling of a stationary sphere as a function of frequency



(a) $D = 5 \text{ mm}$



(b) $D = 10 \text{ mm}$



(c) $D = 15 \text{ mm}$

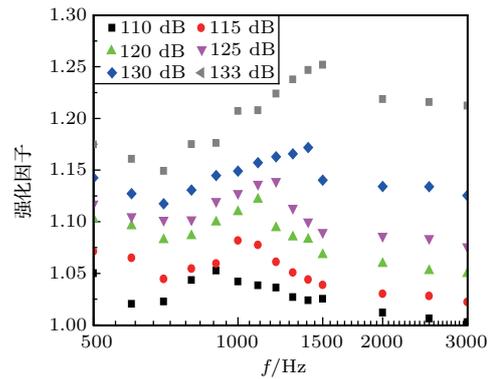
图4 Nu 数随频率的分布曲线

Fig. 4 Distribution of Nu number during cooling of a stationary sphere as a function of frequency

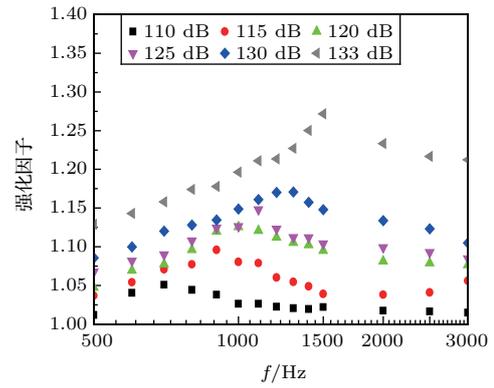
4 结论

本文通过对频率 $f = 500 \text{ Hz} \sim 3000 \text{ Hz}$ 、声压级 $\text{SPL} = 110 \text{ dB} \sim 133 \text{ dB}$ 的声场作用影响铜球传热特性的实验, 获得了声场频率、声压级、铜球直径与铜球换热系数的换热系数的定量关系, 提出了以下结论:

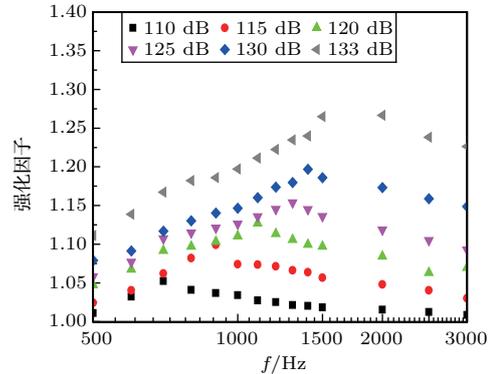
(1) 随着声压级的提升, 铜球的换热系数与传



(a) $D = 5 \text{ mm}$



(b) $D = 10 \text{ mm}$



(c) $D = 15 \text{ mm}$

图5 传热强化因子随频率的分布曲线

Fig. 5 Distribution of heat-transfer enhancement factor during cooling of a stationary sphere as a function of frequency

热强化因子增大, 铜球的冷却速度得到提高, 换热效果增强, 直径为 5 mm 的铜球在 133 dB 的声场中, 传热系数最高提升了 25% ;

(2) 实验表明, 当声波波长大于颗粒粒径时, 在声频率范围中, 存在某一声频率, 此时铜球的传热系数 Nu 有最大值, 这主要是受到颗粒壁面流动分离的影响, 此特殊频率随着声场声压级的增大而增大;

(3) 随着铜球直径的增大, 相对于直径为 5 mm

以及10 mm的铜球,直径为15 mm时,铜球的强化因子的最大值最高,然而,还需要更多的研究来证明。且当铜球直径为5 mm时,可以在低频段(500 Hz~700 Hz)时观测到声流效应的影响,而随着铜球直径的增大,在此频段分辨不出声流效应的作用。

参 考 文 献

- [1] Jiang G S, Zheng Y C, Pan J, et al. The enhancement of pulverized-coal combustion by using sound waves[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(4): 3468–3468.
- [2] 王瀛洲, 韩璞. 声场强化煤粉燃烧的试验研究[J]. *动力工程学报*, 2014, 34(4): 271–274.
Wang Yingzhou, Han Pu. Research on boiler combustion enhancement by sound field[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2014, 34(4): 271–247.
- [3] Kiani H, Sun D W, Zhang Z. The effect of ultrasound irradiation on the convective heat transfer rate during immersion cooling of a stationary sphere[J]. *Ultrason Sonochem*, 2012, 19(6): 1238–1245.
- [4] Kiani H, Sun D W, Zhang Z. Effects of processing parameters on the convective heat transfer rate during ultrasound assisted low temperature immersion treatment of a stationary sphere[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 115(3): 384–390.
- [5] Dhanalakshmi N P, Nagarajan R, Sivagaminathan N, et al. Acoustic enhancement of heat transfer in furnace tubes[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2012, 59(9): 36–42.
- [6] Ha M Y, Kim S M. Combustion of a single droplet in the presence of an oscillating flow[J]. *KSME Journal*, 1995, 9(2): 209–224.
- [7] Marthelli R C, Boelter L M. The effect of vibration on heat transfer by free convection from a horizontal cylinder[C]. *Proc. 5th Int. Congress of Applied Mechanics*, 1939: 578–584.
- [8] Ranz W E, Marshall W R. Evaporation from drops, part I and part II[J]. *Chemical Engineering Progress*, 1952, 48(3): 141–146, 173–180.
- [9] Lasen P S, Jense J W. Evaporation rates of drops in forced convection with superposed transverse sound field[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1978, 21(4): 511–517.
- [10] Sayegh N N, Gauvin G D. Numerical analysis of variable property heat transfer to a single sphere in high temperature surroundings[J]. *A. I. Ch. E. JI*, 1979, 25(3): 522–534.
- [11] 何雅玲, 杨卫卫, 赵春风, 等. 脉动流动强化换热的数值研究[J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(3): 495–497.
He Yaling, Yang Weiwei, Zhao Chunfeng, et al. Numerical study of enhancing heat transfer by pulsating flow[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26(3): 495–497.
- [12] Valverde J M. Acoustic streaming in gas-fluidized beds of small particles[J]. *Soft Matter*, 2013, 9(37): 8792–8814.
- [13] 许伟龙, 姜根山, 安连锁, 等. 强声波作用下烟气夹带单颗粒煤粉传热特性的数值研究[J]. *动力工程学报*, 2017, 37(10): 788–795.
Xu Weilong, Jiang Genshan, An Liansuo, et al. Heat transfer characteristics around single coal particles entrained by flue gas under the action of high intensity acoustic field[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2017, 37(10): 788–795.
- [14] Gopinath A, Mills A F. Convective heat transfer from a sphere due to acoustic streaming[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, 94(3): 1773–1774.