

# 超声波对池沸腾换热影响

张 佳 白博峰

(动力工程多相流国家重点实验室, 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

**摘 要** 对不同超声强度和辐射距离条件下过冷池沸腾换热特性进行了实验研究。超声波有效强化了沸腾起始段换热, 对高热流密度沸腾传热也有一定的强化作用。超声辐射距离越近, 强度越大, 强化传热效果越好。对单相对流和沸腾起始区传热, 超声波强化传热机理为空化作用; 高热流密度沸腾时超声波对强化传热的主要机理是声流作用。得到了传热实验关联式。

**关键词** 超声波; 池沸腾; 声流; 换热特性

中图分类号: TK121

文献标识码: A

文章编号: 0253-231X(2011)06-0961-04

## Pool Boiling Under Ultrasonic Wave

ZHANG Jia BAI Bo-Feng

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** Subcooled pool boiling heat transfer was experimentally studied under different ultrasonic intensity and emission distance. The results indicate that the ultrasonic wave can enhance the heat transfer under natural convection and initial boiling region and has a benefit to pool boiling heat transfer under high heat flux. Moreover, the closer emission distance to the heat surface is and the greater the ultrasonic intensity is, the better the enhancement heat transfer is. The mechanism of enhancement heat transfer under natural convection and initial boiling region is the cavitation influence, and the acoustic flow induced by the ultrasonic wave becomes domain mechanism under high heat flux pool boiling. Two correlations were proposed to predict the heat transfer coefficient under the two corresponding conditions.

**Key words** ultrasonic wave; pool boiling; acoustic flow; enhancement heat transfer

## 0 引 言

强超声波在媒介中传播时, 会产生一系列复杂而独特的效应, 如机械效应、热学效应、化学效应、光学效应等。在机械效应有搅拌、分散、除气、成雾、凝聚、冲击破碎和疲劳损坏作用; 在热学效应有声能被吸收而引起的整体加热、边界处的局部加热; 在化学效应中可以促进氧化、还原、促进高分子物质的聚合或解聚作用等。超声强化过程还产生四个附加效应, 即湍动效应、微扰效应、界面效应和聚能效应。以上这些特性给超声技术提供了广泛的发展和空间。

Wong<sup>[1]</sup> 实验表明高于临界声压时, 超声波从自然对流区 8 倍的强化传热效果降低至充分发展核态沸腾区的强化传热作用消失, 而低于临界声压时, 可以忽略其强化作用。Park<sup>[2]</sup> 发现过冷沸腾条件下较低热流密度时沸腾起始点提前, 在饱和核态

沸腾时传热被超声作用削弱。Nomura<sup>[3~5]</sup> 实验认为空化运动范围小适合微观尺寸的强化, 而声流运动属于宏观流动更适合宏观强化。周定伟<sup>[6~8]</sup> 认为超声空化对沸腾气泡成核有很大影响。

目前, 超声波对沸腾换热影响的研究还很不充分, 结论也并不一致。在完成超声作用下不同粗糙度表面沸腾换热实验研究后<sup>[9]</sup>, 本文就不同超声强度和辐射距离条件下的空化作用及声流作用对沸腾换热的影响开展实验研究。

## 1 实验装置与实验方法

如图 1 所示, 由实验件、实验腔、恒温系统、电加热系统、超声波发生装置和数据采集系统组成。超声波换能器辐射端为梯形圆台状, 下侧端面直径  $d=10$  mm, 辐射表面正对实验件表面, 距离分别为

收稿日期: 2010-12-02; 修订日期: 2011-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50476049)

作者简介: 张 佳 (1984-), 男, 陕西西安人, 硕士, 主要从事超声波强化传热技术研究。

30 mm、40 mm、50 mm、60 mm。超声波工作频率为 28 kHz±200 Hz，声强通过驱动电源调节，实验中采用辐射面振幅百分比来描述声强大小，分别为 33%、38%和 43%。实验腔由耐高温聚碳酸酯制成，尺寸为 200 mm×150 mm×210 mm，实验工质为去离子水，池液深度约为 110 mm。

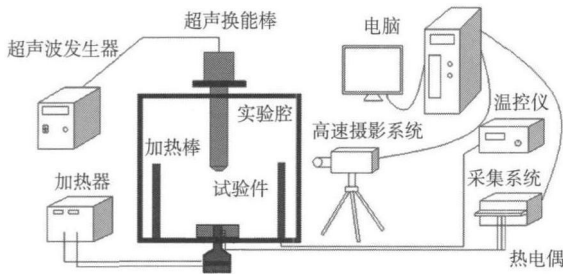


图 1 实验系统图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

实验段中采用紫铜平台导热法来加热实验表面。两根 500 W 加热棒插入紫铜台下部两个通孔内并通过调压器进行加热，由于紫铜台导热部分周围填满绝热玻璃棉，所以热量自然向上传导至紫铜柱顶端壁面。距离顶端壁面 3.8、8.3、12.8 mm 的位置，自上而下分别打孔 ( $\phi=0.5$  mm)，并分别焊入直径 0.2 mm 的 K 型热电偶。实验中通过稳态导热公式推算获得热流密度及表面温度。4 根 T 型热电偶安装在加热表面四周的电木平台上用于获得池温。利用温控仪控制加热棒功率，并结合导管抽注冷却水的方法，维持池温稳定在  $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。实验中所有温度信号最终通过 NI 系统采集。

实验开始前先用砂纸打磨实验表面并用丙酮清洗，之后通过辅助加热棒将实验工质加热至沸腾并稳定 30 min。待池液冷却至  $70^{\circ}\text{C}$  时开始启动加热器加热实验段并通过超声空化作用对池液进行除气同时消除加热表面孔隙中不凝气体带来的影响，半小时后池液和加热表面均稳定在  $60^{\circ}\text{C}$  时正式开始实验。实验开始后通过调整电源电压改变加热功率，在加热表面温度以及系统温度均稳定后采集数据。

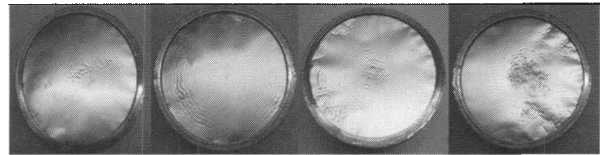
## 2 模拟结果

### 2.1 铝箔腐蚀实验

通过铝箔腐蚀法测量超声波辐射强度和空化场分布。本文所用铝箔厚 40  $\mu\text{m}$ ，将其套在电木平台表面上并紧贴。每组实验进行 5 min。

实验中发现超声波空化泡在铝箔表面上生长和震荡运动越剧烈，铝箔表面腐蚀越严重，见图 2 中

铝箔表面上小坑的分布。除了振幅百分比 43% 的超声由于声强高导致规律略有不同外，其他超声辐射条件下的规律统一。实验发现，铝箔表面超声空化泡现象越剧烈，表面腐蚀越严重。



(a)  $L=60$  mm (b)  $L=50$  mm (c)  $L=40$  mm (d)  $L=30$  mm

图 2 超声振幅百分比 33% 时不同辐射距离铝箔腐蚀状况  
Fig. 2 Corrosion of aluminum foil under ultrasonic wave amplitude of 33% with different emission distance

超声波在液体中形成的声场及其所对应的流场与辐射距离、辐射强度和辐射面形状有直接关系。本实验中超声辐射端为圆台正面及侧面，侧面辐射的超声波受池壁约束反射后与正面辐射的超声波耦合，由于相位差出现辐射增强或抵消的现象。将实验结果汇总在一张示意图，见图 3。空化气泡在辐射端距铝箔表面很近的情况下，竖直向下作用在整个铝箔表面上。增加辐射距离至  $L=30$  mm 后，铝箔表面周围环状区的空化腐蚀开始弱化，但表面中心腐蚀作用依旧非常明显。

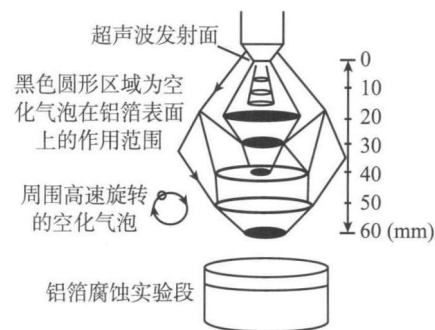


图 3 空化气泡作用区域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cavitation bubble distribution

继续增加辐射距离到  $L=40$  mm，空化泡束开始发散，铝箔表面环状区同中心区域均有明显腐蚀；继续增加辐射距离至  $L=50$  mm 时，空化气泡则很少在铝箔表面中心位置出现，对四周环状位置影响比较明显；随着辐射距离增加至  $L=60$  mm 处，表面中心位置又重新出现了较弱的空化腐蚀现象。此外，实验中还观察到，空化气泡束只在超声波换能器辐射面的某些特定位置产生。

### 2.2 超声波作用下池沸腾实验结果

图 4 为沸腾换热曲线实验结果。当超声辐射端

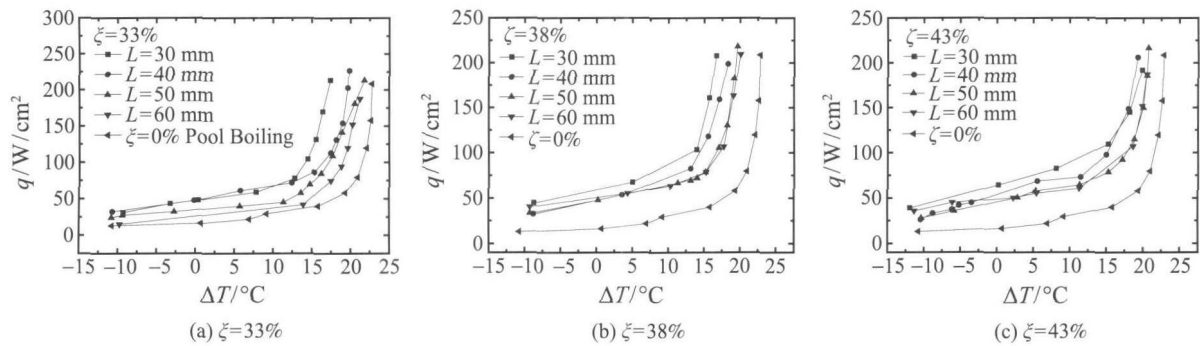


图 4 不同振幅百分比超声波在不同辐射距离下的沸腾换热曲线  
Fig. 4 Boiling curves under different ultrasonic wave amplitude and emission distance

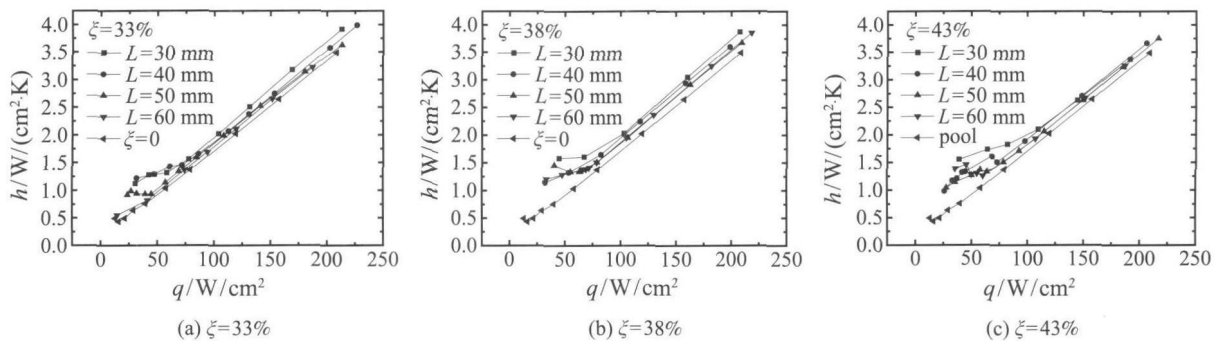


图 5 不同振幅百分比超声波在不同辐射距离下的传热规律  
Fig. 5 Heat transfer coefficient under different ultrasonic wave amplitude and emission distance

振幅百分比  $\xi=33\%$  时, 在不同辐射距离条件下, 相比无超声作用, 池沸腾曲线发生明显左移。 $\xi=38\%$  和  $43\%$  条件下  $L=50\text{ mm}$  和  $60\text{ mm}$  沸腾曲线各自相互重合, 而在  $L=40\text{ mm}$  和  $30\text{ mm}$  时强化作用明显。实验结果表明超声波对沸腾换热的强化效果与辐射距离和辐射强度有关, 辐射端距加热表面越近, 强化传热能力越强; 沸腾起始点所对应的壁面过热度减小, 减小幅度随辐射距离的减小而增加。

传热系数计算中, 温差  $\Delta T$  用壁温  $T_w$  减池温  $T_l$  来计算。因为超声波作用后流体宏观湍动会搅混加热表面附近温度场, 使冷热流体更好混合, 传热温差按池温  $60^\circ\text{C}$  计算。传热系数实验结果见图 5。

初始沸腾区超声波强化换热能力随距离变化非常明显。说明低热流密度时, 传热强化主要依靠加热表面附近超声空化产生的强搅动作用, 距离加热表面越近, 超声空化的搅动作用越强。

在高热流密度沸腾段, 超声波强化换热的的能力均有所降低, 且辐射距离对换热强化程度变小。这是由于高热流密度沸腾段, 气泡产生能力较强, 脱离运动较为剧烈, 超声波不能有效到达加热表面减小热边界层或对气泡成核产生影响。对比图 3 中空化场随辐射距离的变化来看, 空化场都会对加热表

面产生作用, 并且随距离的减小而增加。这说明高热流密度的沸腾, 空化作用不是强化换热的主因。

实验发现, 无超声作用时, 加热表面上生成的气泡可以自由地向上长大脱离或者爆破为很多更小的蒸汽泡; 而在超声波作用下, 加热表面上方没有出现这些长大脱离或者爆破的蒸汽泡, 蒸汽泡在加热表面处生成后或冷凝爆破或从侧面随流场横向脱离。因此超声波所产生的声流作用强化了加热表面附近冷热流体的混合, 使得过冷池液能够较快接触过热液层和蒸汽泡, 有效强化了换热。

### 2.3 超声波作用下换热关联式

由于超声波影响换热机理不同, 以不同机理的关联式形式整理实验结果。单相对流和沸腾起始段, 超声波强化传热的主要机理为超声空化作用, 高热流密度沸腾时主要机理为声流作用。

根据 Wong 的数据整理经验<sup>[1]</sup> 以及本文实验结果, 单相对流和沸腾起始区基于自然对流换热关联式形式, 并进行改进, 以合理考虑超声作用。超声波对换热的影响由超声波辐射距离  $L$  和超声波发射面振幅百分比决定。由于换能器深入水中深度不同, 克服负载获得谐振所需的能量也不同, 因此超声振动功率通过振源振幅百分比来描述。提出下式:

$$Nu = 10.71(Gr^*Pr)^{0.32}[1 + U^{0.78}] \quad (1)$$

$$Gr^* = GrNu = \frac{g\alpha ql^4}{\lambda\nu^2} \quad (2)$$

$$U = \xi\lambda/L \quad (3)$$

式中特征长度  $l$  取加热表面的边长。定性温度采用加热壁面温度与主流温度的算术平均值。从图 6 中可以看到关联式 (1) 的平均预测误差为  $\pm 9.2\%$ 。

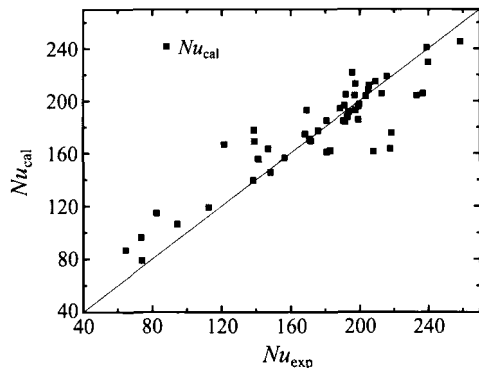


图 6 自然对流和沸腾起始区  $Nu$

Fig. 6 Comparison between prediction and experiment of Nusselt number under natural convection and initial boiling region

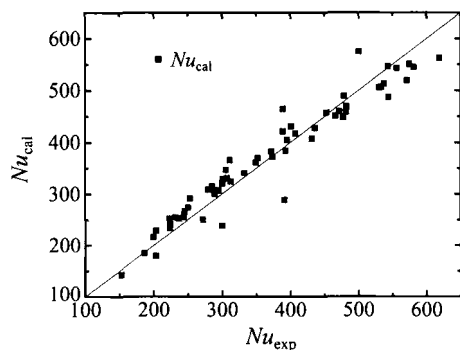


图 7 高热流密度沸腾  $Nu$

Fig. 7 Comparison between prediction and experiment of boiling Nusselt number under high heat flux

高热流密度沸腾传热过程可认为是单相对流和对流汽化过程的叠加。提出下式：

$$Nu = 0.1(GrPr)^{0.66}E^{0.263}[1 + U^{0.73}] \quad (4)$$

$$E = \frac{h_{fg}\rho_v(T_w - T_s)}{T_s\sqrt{\sigma g(\rho_L - \rho_v)}} \quad (5)$$

图 7 表明关联式 (4) 的平均预测误差为  $\pm 7.2\%$ 。

### 3 结 论

超声波在池液中产生的空化场受超声波辐射探头形状、辐射距离和反射面形式等因素的影响会形成不同的空化泡流场。

得到了有关超声强化传热的认识：单相对流和沸腾起始段，超声波强化传热的主要机理为超声空化作用；高热流密度沸腾时超声空化由于受蒸汽泡的影响不能有效到达加热表面，减小了强化传热程度，超声波对强化传热的主要机理是声流作用，通过影响沸腾蒸汽泡的脱离运动强化了传热。得到了传热实验关联式。

### 参 考 文 献

- [1] Wong S W, Chon W Y. Effects of Ultrasonic Vibrations on Heat Transfer to Liquids by Natural Convection and by Boiling [J]. AICHE J., 1969, 15: 281-288
  - [2] Park K A, Bergles A E. Ultrasonic Enhancement of Saturated and Subcooled Pool Boiling [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1988, 31: 664-667
  - [3] Nomura S, Nakagawa M. Ultrasonic Enhancement of Heat Transfer on Narrow Surface [J]. Heat Transfer-Japanese Research, 1993, 22: 546-558
  - [4] Nomura S, Yamamoto A, Murakami K. Ultrasonic Heat Transfer Enhancement Using a Horn-Type Transducer [J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2002, 41: 3217-3222
  - [5] Nomura S, Nakagawa M, Mukasa S, et al. Ultrasonic Heat Transfer Enhancement with Obstacle in Front of Heating Surface [J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2005, 44: 4674-4677
  - [6] ZHOU D W, LIU D Y. Boiling Heat Transfer with Acoustic Cavitation [J]. Prog. Nat. Sci., 2002, 12: 468-471
  - [7] ZHOU D W, LIU D Y. Effect of Acoustic Cavitation on Boiling Heat Transfer [J]. Exp. Therm. Fluid Sci., 2002, 26: 931-938
  - [8] ZHOU D W, LIU D Y. Heat Transfer Enhancement of Copper Nanofluid with Acoustic Cavitation [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2004, 47: 3109-3117
  - [9] 张佳, 吕友军, 张西民, 等. 超声作用下不同粗糙度表面沸腾换热实验研究 [J]. 工程热物理论, 2010, 30(9): 1524-1527
- ZHANG Jia, LÜ Youjun, ZHANG Ximin, et al. Effect of Surface Roughness on Pool Boiling Heat Transfer in an Ultrasonic Field [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 30(9): 1524-1527