



# 核态沸腾气泡动力学参数研究综述

高伟龙<sup>1,2</sup>, 叶芳<sup>1,2</sup>, 郭航<sup>1,2</sup>, 赵建福<sup>3-5</sup>, 陈浩<sup>1,2</sup>

(1. 北京工业大学 环境与生命学部 能源与动力工程学院, 北京 100124; 2. 北京工业大学 传热强化与过程节能教育部重点实验室及传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100124; 3. 中国科学院力学研究所 微重力重点实验室, 北京 100190; 4. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049; 5. 中国科学院力学研究所 高温气体动力学 国家重点实验室, 北京 100190)

**摘要:** 综述影响因素对核态沸腾中气泡动力学参数的影响, 影响因素包括压力、微重力、受热面热流密度、受热面过热度与工质过冷度、受热面倾角、受热面表面粗糙度、接触角、汽化核心间距、电场、磁场、超声波等。气泡动力学参数包括气泡脱离直径(半径)、气泡脱离频率、气泡等待时间、气泡生长时间、气泡生长周期、活性成核点密度。整理气泡动力学参数的经验关联式。现有关联式考虑的影响因素有限, 需要综合考虑更多的影响因素来准确预测气泡动力学参数。

**关键词:** 核态沸腾; 气泡动力学参数; 影响因素; 关联式

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-4416(2023)09-0A06-13

DOI:10.13608/j.cnki.1000-4416.2023.09.007

## 1 概述

随着科学研究的深入和制造技术水平的提高, 各领域的设备仪器都在逐渐小型化、集成化、紧凑化, 功率密度不断升高<sup>[1]</sup>。散热问题成为制约许多领域发展的瓶颈, 使设备工作稳定性、可靠性、寿命降低<sup>[2]</sup>。因此, 高效散热方式对大功率密度设备的散热十分必要。常见的散热方式有自然风冷、强制风冷、自然水冷、强制水冷、相变传热等, 与其他散热方式相比, 相变传热利用传热工质的显热和相变潜热, 传热能力更强。近年来, 相变传热一直被学者们广泛研究, 也被广泛应用于核电站、火力发电厂、电子元件、计算机数据中心、电动汽车等领域<sup>[3-8]</sup>。

池沸腾散热方式结构简单、不需要复杂的机械设备, 其中的核态沸腾能够在较低的温度梯度下散发大量热量, 因此成为最有效的散热方式之一。核态沸腾中, 液体工质从受热面吸热, 发生相变产生气

泡, 热量从受热面排出。气泡在受热面生长及脱离过程均受到不同力的作用, 气泡形成、生长、聚并、脱离过程对传热有很大影响<sup>[9]</sup>。为进一步理解核态沸腾的复杂过程, 必须对核态沸腾中气泡动力学参数的影响因素进行深入研究。

本文综述影响因素对核态沸腾中气泡动力学参数的影响, 整理气泡动力学参数的经验关联式。

## 2 气泡动力学参数及影响因素

### 2.1 气泡动力学参数

气泡动力学参数主要有: 气泡脱离直径(半径)、气泡脱离频率、气泡等待时间、气泡生长时间、气泡生长周期、活性成核点密度。

气泡脱离直径(半径)为气泡脱离受热面时的最终直径(半径), 由于气泡形状不是规则的球形, 因此一般用脱离时刻的气泡等效直径(半径)来代替最终直径(半径), 气泡等效直径(半径)指与气泡

第一作者简介: 高伟龙, 男, 硕士, 研究方向为池沸腾传热传质。

通信作者简介: 叶芳, 女, 副教授, 博士, 研究方向为传热传质、新能源。

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2022-12-17

体积同等的球体积的球直径(半径)。气泡脱离频率为气泡生长周期的倒数,气泡生长周期为气泡生成等待时间(简称气泡等待时间)和气泡生成后生长时间(简称气泡生长时间)之和。气泡等待时间为从上一个气泡脱离到下一个气泡生成所需要的时间,气泡生长时间为从气泡生成到气泡脱离所需要的时间。活性成核点密度为一定面积受热面上可以生成气泡的成核点数量。

## 2.2 影响因素

核态沸腾中气泡生长、聚并、脱离过程均复杂多变,气泡动力学参数受很多因素影响。根据影响因素来源,可将影响因素分为内在、外在两类。其中,内在因素主要包括压力、微重力、受热面热流密度、受热面过热度与工质过冷度、受热面倾角、受热面表面粗糙度、接触角、汽化核心间距等。外在因素主要为外加场,包括电场、磁场、超声波等。

### ① 压力

一些学者研究了压力对核态沸腾中气泡动力学参数的影响。Sakashita<sup>[10]</sup>研究了压力为 2.23、3.17、4.47 MPa 时,在水平受热面的水池沸腾中,随着压力增加,气泡生长速率减小,气泡脱离半径减小。Hutter 等人<sup>[11]</sup>用实验研究了 FC-72 在压力分别为 0.152、0.127、0.101 MPa 时,压力对气泡脱离频率的影响,结果表明,气泡脱离频率随压力增大略微下降。Migliani 等人<sup>[12]</sup>研究发现,R134a 池沸腾中气泡脱离频率随压力增大而增大,气泡脱离直径随压力增大而减小。

Surtaev 等人<sup>[13]</sup>研究了压力 8.8 ~ 103.0 kPa 对核态沸腾的影响,随着压力降低,活性成核点密度降低,而气泡生长速率和气泡脱离直径均增大。Michaie 等人<sup>[14]</sup>研究了从 4.2 kPa 到当地大气压的不同压力对气泡动力学参数的影响,结果表明,随着压力降低,气泡脱离直径和气泡脱离频率均增加。压力不同时,气泡分别呈现蘑菇形或蒸汽柱、扁球形、球形。

此外,Lamas 等人<sup>[15]</sup>研究了压力为 0.01 ~ 1.00 MPa 时,水、R134a、氨水等工质的池沸腾。研究发现,随着压力增加,气泡脱离直径减小,但变化不大,见图 1<sup>[15]</sup>。

### ② 微重力

微重力条件下核态沸腾中气泡的受力情况和常重力下有所不同,导致气泡动力学参数不同。因此,

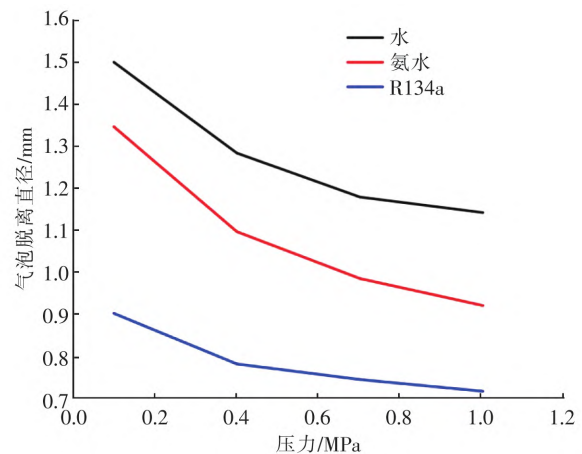


图 1 不同工质气泡脱离直径随压力的变化<sup>[15]</sup>

一些学者研究了重力对核态沸腾中气泡动力学参数的影响,并总结出气泡动力学参数与重力加速度(符号为  $g$ ,单位为  $m/s^2$ )的关系。

Hazi 等人<sup>[16]</sup>使用格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method, LBM)研究了水在水平受热面上的核态沸腾中重力对气泡脱离直径和气泡脱离频率的影响。发现气泡脱离直径与  $g^{-0.5}$  成正相关,气泡脱离频率与  $g^{-0.75}$  成正相关。

Gong 等人<sup>[17]</sup>及曾建邦等人<sup>[18]</sup>也用 LBM 方法研究了水的核态沸腾过程,得到了类似的关系式。易天浩等人<sup>[19]</sup>研究了在微重力条件下水池沸腾中单气泡的动力学行为及传热特性,模拟结果表明,气泡脱离直径与  $g^{-0.488}$  成正相关,气泡生长周期与  $g^{-1.113}$  成正相关。赵建福等人<sup>[20]</sup>模拟了重力条件对水池沸腾的影响,发现重力对气泡脱离直径和气泡生长时间影响较大,气泡脱离直径与  $g^{-1/3}$  成正相关,气泡生长时间与  $g^{-4/5}$  成正相关。

此外,还有学者定性研究了微重力条件对核态沸腾中气泡脱离直径和气泡脱离频率等气泡动力学参数的影响。Ma 等人<sup>[21]</sup>采用数值方法研究了微重力对恒定壁温水平亲水受热面气泡动力学参数的影响,研究发现,重力水平的降低会导致气泡脱离直径和气泡生长周期增加。Yi 等人<sup>[22]</sup>、金效兴<sup>[23]</sup>、赵锐等人<sup>[24]</sup>也发现了气泡脱离直径及气泡脱离时间随重力变化的相同研究结果。杨燕等人<sup>[25]</sup>采用数值模拟方法研究了微重力条件对水池沸腾中单气泡生长特性的影响,模拟结果表明,随着重力加速度减小,气泡脱离直径增大。

### ③ 受热面热流密度

受热面热流密度对核态沸腾中活性成核点密

度、气泡脱离直径、气泡脱离频率有很大影响。

Gong 等人<sup>[26]</sup>在纯物质 0.1、0.3、0.5 MPa 以及混合物 0.3 MPa 的压力下, 20 ~ 150 kW/m<sup>2</sup> 的受热面热流密度范围内, 可视化观测了乙烷(R170)、异丁烷(R600a) 以及两者混合物的核态沸腾。发现, 受热面热流密度增加时, 纯物质和混合物的气泡脱离直径、气泡脱离频率均显著增加。Hamzekhani 等人<sup>[27]</sup>在研究了纯水、100% 纯度乙醇和二元混合物(乙醇/水、NaCl/水、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/水) 在大气压下的池沸腾过程中气泡行为特性, 结果表明, 几种工质的气泡脱离直径均随受热面热流密度增加而增加, 且气泡脱离直径波动幅度随受热面热流密度增加而增大, 硫酸钠溶液质量浓度为 300 kg/m<sup>3</sup> 时气泡脱离直径波动最大, 分别见图 2、3<sup>[27]</sup>。

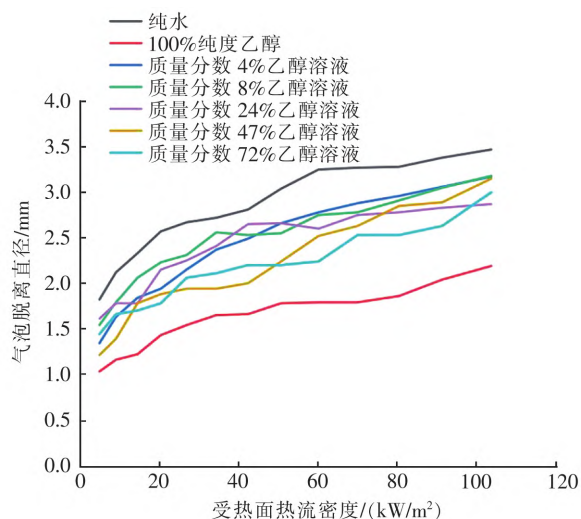


图 2 纯水、100% 纯度乙醇、乙醇溶液气泡脱离直径随受热面热流密度的变化<sup>[27]</sup>

Hetsroni 等人<sup>[28]</sup>在大气压条件下研究了受热面热流密度为 10、50 kW/m<sup>2</sup> 时对水和表面活性剂溶液池沸腾中气泡生长过程的影响, 结果发现, 低热流密度(10 kW/m<sup>2</sup>) 时, 水和表面活性剂溶液中气泡体积、生长速率等差别不大。但在高热流密度(50 kW/m<sup>2</sup>) 时, 表面活性剂溶液中沸腾剧烈。随着受热面热流密度增加, 水中气泡脱离直径增大, 而表面活性剂溶液中气泡脱离直径却减小。

Chien 等人<sup>[29]</sup>研究发现, 随着受热面热流密度增大, R-123 核态沸腾中气泡等待时间和气泡脱离直径均减小, 而活性成核点密度和气泡脱离频率均增加。钟达文等人<sup>[30]</sup>研究了热流密度对受热面朝下的水池沸腾气泡动力学参数的影响因素, 随着受

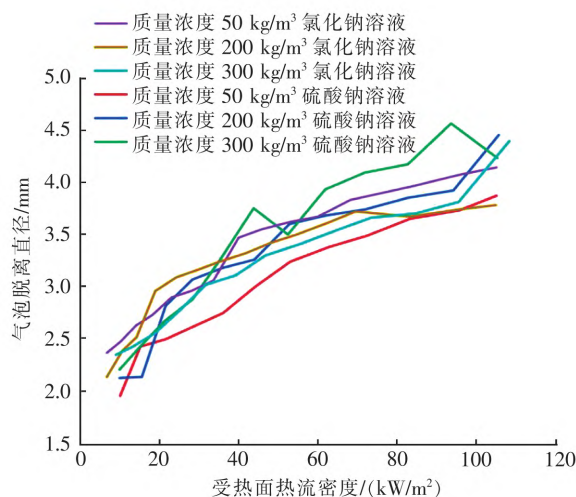


图 3 氯化钠溶液、硫酸钠溶液气泡脱离直径随受热面热流密度的变化<sup>[27]</sup>

热面热流密度增加, 气泡生长时间先减小后维持稳定。姚远等人<sup>[31]</sup>用实验研究了压力为 0.2 MPa 时, 在水平铜受热面上热流密度(14.65 ~ 80.79 kW/m<sup>2</sup>) 对乙烷池沸腾的影响, 实验发现, 随着受热面热流密度增大, 气泡脱离直径和脱离频率均增大, 脱离形状分别为球形、椭球形和不规则形状。Mchale 等人<sup>[32]</sup>在大气压条件下研究了 FC-77 在光滑和粗糙两种表面上池沸腾时气泡成核情况, 气泡脱离频率和上升速度均随着热流密度增加而增加。刁彦华等人<sup>[33]</sup>研究了 R113 在 0.1 MPa 时池沸腾中热流密度对气泡生长、聚并、脱离过程的影响, 研究发现, 随着热流密度增加, 气泡脱离时间缩短, 活性成核点密度增大。

#### ④ 受热面过热度 and 工质过冷度

受热面过热度对气泡动力学参数有一定影响, 一些学者针对这一问题开展了深入研究。Hutter 等人<sup>[11]</sup>研究了 FC-72 在池沸腾中硅表面过热度对气泡脱离频率、脱离直径及等待时间等的影响, 结果表明, 高过热度时, 气泡脱离频率几乎不变, 气泡脱离直径随过热度增加近似线性增加, 气泡等待时间随过热度增加而迅速缩短。Gong 等人<sup>[17]</sup>也研究发现, 气泡脱离直径随受热面过热度增加线性增加。赵建福等人<sup>[20]</sup>用 Level Set 数值模拟方法研究了常压下水池沸腾过程中单气泡的成长和脱离过程, 随着受热面过热度增加, 气泡脱离直径增加, 气泡生长时间缩短。Mchale 等人<sup>[32]</sup>研究了常压下 FC-77 在粗糙受热面和光滑受热面上的池沸腾过程。研究

发现,随着受热面过热度增加,气泡脱离直径、气泡脱离频率、活性成核点密度均增加。Zhang 等人<sup>[34]</sup>研究了常压下液氮池沸腾,发现气泡脱离直径随受热面过热度增加而增大。Gao 等人<sup>[35]</sup>研究了水在亚大气压(3.6~22.0 kPa)下不锈钢受热面池沸腾中气泡动力学参数,研究表明,随受热面过热度增大,热边界层变厚,气泡脱离直径变大。压力为 5.6 kPa 时不同受热面过热度的水池沸腾中气泡等效直径随时间的变化见图 4<sup>[35]</sup>。

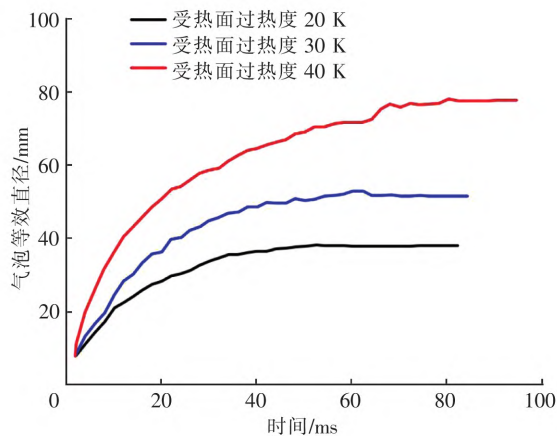


图 4 压力为 5.6 kPa 时不同受热面过热度的水池沸腾中气泡等效直径随时间的变化<sup>[35]</sup>

此外,池沸腾中工质温度对气泡动力学参数和传热特性也有很大影响。因此,一些学者研究了工质过冷度对气泡动力学参数的影响。毕景良等人<sup>[36]</sup>研究 FC-72 池沸腾发现,气泡脱离频率和气泡脱离直径均随工质过冷度增加而减小,由于不同过冷度下气泡的生长速度不同,因此气泡的生长状况不同,也导致气泡生长周期内不同时刻受热面热流密度的变化。Demiray 等人<sup>[37]</sup>采用微加热器阵列研究了工质过冷度对 FC-72 池沸腾的影响。实验表明,在低过冷度下,单气泡脱离直径和能量传递较大;高过冷度时,气泡脱离频率增加导致传热效率提高。Kim 等人<sup>[38]</sup>用实验方法研究了水池沸腾中工质过冷度对气泡动力学参数和周围流体流动的影响,实验结果表明,随着工质过冷度增加,气泡生长时间呈指数减小,气泡脱离直径也随之减小。Coulibaly 等人<sup>[39]</sup>研究了受热面恒温条件下过冷核态沸腾中气泡的聚并过程,实验结果表明,气泡脱离直径和气泡脱离频率随工质过冷度增加而减小,且与单气泡相比,气泡聚并导致受热面热流密度波动较大。

### ⑤ 受热面倾角

对核态沸腾的早期研究主要在水平向上的受热面开展,观察气泡动力学参数和对传热特性的影响。然而水平受热面易较早出现壁面干燥,从而降低传热性能,导致过早达到临界热流密度,甚至将设备烧坏。加之一些设备的受热面也确实存在一定倾角,因此部分学者研究了受热面倾角对池沸腾的影响,池沸腾中受热面倾角见图 5<sup>[40]</sup>。由图 5 可知,0°为受热面水平向上,90°为受热面竖直向右,180°为受热面水平向下。

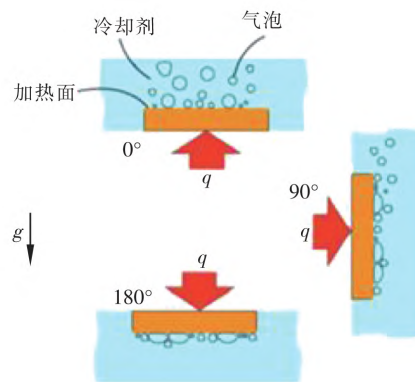


图 5 池沸腾中受热面倾角<sup>[40]</sup>

Tanjung 等人<sup>[41]</sup>对去离子水池沸腾中印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)不同倾角对气泡行为的影响开展了实验研究,受热面倾角为 0°和 45°时,气泡在壁面的垂直方向生成和脱离,但 45°时气泡会在脱离受热面前滑移一段距离。倾角为 90°和 135°时,气泡生成后沿受热面向上滑移。倾角为 180°时,气泡产生后在壁面聚集。当倾角为 90°时,核态沸腾开始的受热面热流密度、气泡等待时间、气泡脱离直径、活性成核点密度最大,气泡脱离频率最小。

Chuang 等人<sup>[42]</sup>研究了不同受热面倾角对水池沸腾中气泡动力学参数的影响,根据实验结果得知,随着受热面倾角增加,气泡脱离直径和气泡脱离频率增加,观察发现活性成核点密度与倾角无关。Wang 等人<sup>[43]</sup>实验研究了去离子水在常压下池沸腾中气泡动力学参数受加热面倾角的影响,研究发现,倾角大于 90°时,随受热面倾角增大,气泡脱离直径增大,气泡脱离频率减小。

### ⑥ 受热面表面粗糙度

核态沸腾中受热面表面粗糙度对气泡动力学参数和传热过程有重要影响,因为不同表面粗糙度易

导致活性成核点密度、气泡脱离频率及气泡脱离直径不同,从而导致传热性能不同。

Suszko 等人<sup>[44]</sup>研究了 PF-5600 电介质溶液在铜受热面上核态沸腾过程,实验结果表明,随着受热面表面粗糙度增加,活性成核点密度和气泡脱离频率增大,但气泡脱离直径减小。Bovard 等人<sup>[45]</sup>实验研究了纯工质(纯水、乙醇、丙酮)的池沸腾气泡动力学参数,结果发现,随表面粗糙度增加,气泡脱离直径减小。Mchale 等人<sup>[32]</sup>研究了 FC-77 在不同表面粗糙度的受热面池沸腾中的气泡动力学参数,结果表明,表面粗糙度对气泡脱离直径有影响,活性成核点密度随受热面表面粗糙度增大而增大。Wang 等人<sup>[43]</sup>实验研究了去离子水在常压下气泡动力学参数受受热面表面粗糙度的影响,研究发现,随着受热面表面粗糙度增大,沸腾传热系数增大,受热面倾角  $90^\circ \sim 180^\circ$  时,光滑受热面上的气泡脱离直径小,气泡脱离频率大。

#### ⑦ 接触角

受热面润湿性是影响核态沸腾的重要因素,它可以通过接触角来表示。接触角表征液体和固体壁面接触的能力,是固、液和气三相交界处形成的角,池沸腾中一般分为动态接触角、静态接触角。实际的气泡生长过程中随着气泡基底的收缩和扩张,接触角也在动态变化,即动态接触角有利于准确分析气泡生长过程。静态接触角为动态接触角范围内的某一确定值,一些研究中为了简化模型,将气泡生长过程中的接触角设为恒定值,即静态接触角。未特殊指明时,本文的接触角指动态接触角。

Wang 等人<sup>[46]</sup>研究了接触角对水池沸腾中气泡动力学参数和传热特性的影响,结果表明,气泡脱离时间随接触角增加而增加。Hazi 等人<sup>[16]</sup>根据数值模拟结果得到水池沸腾中,静态接触角与气泡脱离直径相关性不大,但气泡脱离频率随静态接触角增大而增大。Gong 等人<sup>[17]</sup>采用 LBM 方法研究了水池沸腾中气泡的生成、生长、脱离过程,结果发现,气泡生长周期随着接触角增加而增加,且接触角对气泡脱离直径的影响不大。Ardron 等人<sup>[47]</sup>对池沸腾中的接触角进行了建模,结果表明,接触角对高压下气泡脱离直径有很大影响。

#### ⑧ 汽化核心间距

汽化核心间距是影响气泡动力学参数的一个重要因素,学者们对汽化核心间距进行了一定研究。

其中一些研究在受热面上设置人工空腔,当作汽化核心,空腔间距即为汽化核心间距,空腔排列方式即汽化核心排列方式。Zhang 等人<sup>[48]</sup>研究了有 2 个人工空腔的受热面上蒸馏水池沸腾中人工空腔的相互作用,发现影响人工空腔的 3 个因素:气泡间流体动力相互作用、人工空腔间热相互作用、水平和倾斜气泡聚并。当汽化核心间距  $S$  与气泡脱离直径  $D_d$  的比  $S/D_d > 3$  时,人工空腔相互独立,不受 3 个因素的影响。 $2 < S/D_d \leq 3$  时,受气泡间流体动力相互作用影响,气泡脱离频率更高。 $1.5 < S/D_d \leq 2$  时,气泡间流体动力相互作用、人工空腔间热相互作用两个影响因素相互竞争,由于后者的影响更占优,导致气泡脱离频率较低。当  $S/D_d \leq 1.5$  时,3 个影响因素共存并相互竞争,气泡脱离频率大幅增加。

Nitesh 等人<sup>[49]</sup>研究了大气压下 FC-72 池沸腾中空腔间距对气泡动力学参数的影响,研究发现,空腔间距对气泡脱离频率和脱离直径无影响,但空腔间距对活性成核点密度有很大影响,空腔间距为 0.75 mm 时,活性成核点密度最大,空腔间距为 0.5 mm 时活性成核点密度最小。Hutter 等人<sup>[50]</sup>研究了 FC-72 的人工空腔成核位点相互作用的池沸腾过程,结果表明,气泡脱离直径随汽化核心间距增加而增加。Golobic 等人<sup>[51]</sup>用实验研究了水池沸腾中受热面上 2~4 个人工空腔间不同排列方式的相互作用,空腔间距为 2.6~4.1 mm,结果表明,人工空腔为 2 个时,人工空腔之间的相互作用,使 1 个人工空腔活性增加,另 1 个人工空腔活性降低甚至直接失去活性。Bon 等人<sup>[52]</sup>研究了 FC-72 和正己烷核态沸腾过程,空腔间距为 75~600  $\mu\text{m}$ ,结果表明,与光滑受热面相比,有圆柱形空腔的受热面传热系数提高,随着空腔深度增加,活性成核点密度增加。Bi 等人<sup>[53]</sup>用微阵列加热器研究了 FC-72 池沸腾中汽化核心间距对双气泡聚并的影响, $S/D_d$  为 0.49 时,由于距离太小,生成的气泡立即聚并为 1 个大气泡,与单气泡相比气泡脱离频率减小。 $S/D_d$  为 0.80 时,由于气泡发生连续聚并现象,双气泡先发生水平聚并,然后与新生成的气泡再发生聚并,最后离开受热面。 $S/D_d$  为 0.98 时,只发生双气泡间的水平聚并,在短时间内完成聚并与脱离过程,受热面热流密度增大不是很明显。 $S/D_d$  为 0.94 时,气泡在上升过程中聚并。Chatpun 等人<sup>[54]</sup>在低热流密度范围内,采用实验方法研究了不同空腔距离和不同空腔

排列方式对蒸馏水池沸腾气泡动力学参数的影响,结果表明,气泡脱离直径、气泡脱离频率均受空腔距离和空腔排列方式的影响。

综合以上文献可知,双气泡及多气泡的生长、聚并、脱离及气泡动力学参数、传热特性均受到汽化核心间距和排列方式的影响,不同汽化核心间距易导致气泡聚并的不同结果,同时气泡的聚并频率、聚并后脱离直径及脱离频率和传热效果也不同。

### ⑨ 外加场

外加电场对核态沸腾的气泡动力学参数有很大影响,当池沸腾中外加电场作用时会导致电流体动力学效应(EHD)。Gao 等人<sup>[55]</sup>研究了外加电场对 R113 池沸腾中气泡形成、生长、脱离过程的影响,结果表明,随着外加电场电压增大,气泡脱离直径及气泡脱离频率均减小,见图 6、7<sup>[55]</sup>。

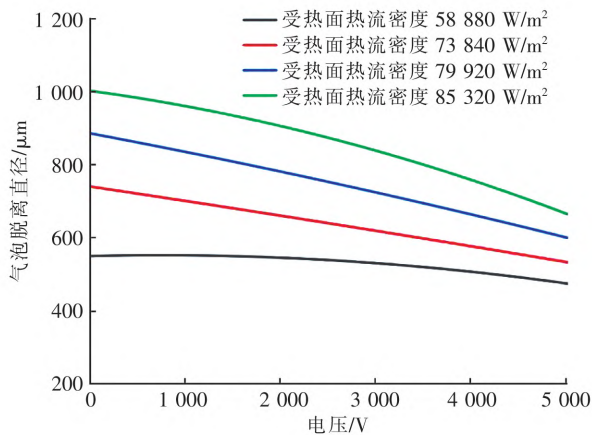


图 6 不同受热面热流密度下外加电场电压对气泡脱离直径的影响<sup>[55]</sup>

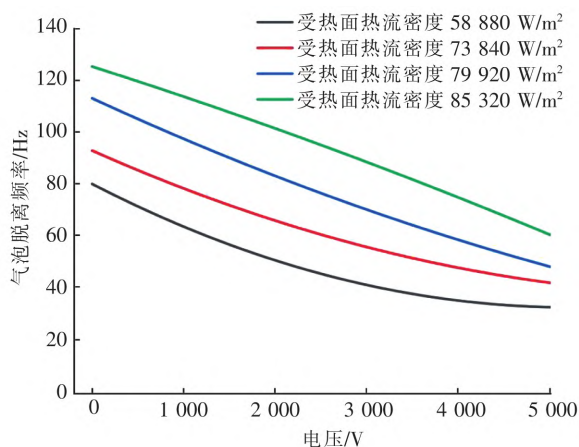


图 7 不同受热面热流密度下外加电场电压对气泡脱离频率的影响<sup>[55]</sup>

陈帅<sup>[56]</sup>研究了不同重力条件下均匀电场和非均匀电场对气泡生长、脱离过程的影响。常重力下,均匀电场作用使气泡被横向压缩,缩短了收缩与脱离时间。随重力降低,电场对加速气泡脱离的作用减弱。相同重力下,均匀电场作用增大了气泡上升速度。与均匀电场相比,非均匀电场在常重力下加速了气泡脱离频率,非均匀电场中,电场强度越大,气泡上升速度越快。

外加磁场对池沸腾中气泡动力学参数及传热速率有一定影响,但在这方面的研究较少。目前的一些研究主要为在工质中添加磁性物质,然后研究磁场的影响。Rahmati 等人<sup>[57]</sup>研究了水在可变磁场中的池沸腾过程。实验通过在沸腾池中放置铁磁珠,并改变电压来控制磁场,结果发现,无磁场时,沸腾传热系数变化不明显,而有磁场时,沸腾传热系数增加,气泡脱离速率加快。Liu 等人<sup>[58]</sup>实验研究了有无磁场时,水基磁性流体的池沸腾过程。结果表明,施加非均匀磁场时,气泡脱离直径减小。在磁场作用下,气泡的形状发生很大改变,气泡底部面积变大,在中间形成气泡颈,较大的底面积可以吸收更多的热量,加速了气泡生长,导致气泡更快脱离,最终强化沸腾传热。

超声波是池沸腾中气泡动力学参数和传热特性的影响因素之一,主要通过对池沸腾中的液体施加超声波,研究影响作用。Khooshechin 等人<sup>[59]</sup>通过添加表面活性剂和施加超声波两种方法对纳米流体池沸腾进行了实验研究,他们发现,超声波导致不同受热面热流密度下的沸腾传热系数均有所增加,同时超声波导致气泡脱离直径增大。

## 3 气泡动力学参数经验关联式

### 3.1 气泡脱离直径

气泡脱离直径是重要的气泡动力学参数,通常可以用实验或力平衡的方法确定。采用实验方法时,使用高速摄像机记录沸腾过程,然后用图像处理软件处理拍摄结果,最终得到气泡脱离直径。另一种方法是通过分析计算气泡脱离过程中所受各项力的平衡,获得气泡脱离直径<sup>[60]</sup>。气泡脱离过程中受力可以分为促进气泡脱离的力和阻碍气泡脱离的力<sup>[61]</sup>。浮力和压力为促进气泡脱离的力,液体惯性力、阻力和表面张力则是阻碍气泡脱离的力。基于上述分析,学者们开发了关于气泡脱离直径的关联式。

Fritz<sup>[62]</sup>考虑了使气泡从受热面脱离的浮力和使气泡保持在受热面的表面张力的平衡,得到了水和溶液的气泡脱离直径 $D_d$ 关联式(简称Fritz关联式):

$$D_d = 0.0208\theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}}$$

式中  $D_d$ ——气泡脱离直径  $\mu\text{m}$

$\theta$ ——接触角  $(^\circ)$

$\sigma$ ——表面张力  $\text{N/m}$

$g$ ——重力加速度  $\text{m/s}^2$

$\rho_L$ ——工质液相密度  $\text{kg/m}^3$

$\rho_v$ ——工质气相密度  $\text{kg/m}^3$

Fritz关联式中,水的接触角为 $45^\circ$ ,溶液的接触角为 $30^\circ$ 。由Fritz关联式可知,气泡脱离直径和接触角、表面张力以及工质物理性质有关。Fritz关联式作为气泡脱离直径的基本形式,仅考虑了浮力和表面张力,接下来关于气泡脱离直径的部分研究是关于Fritz关联式的修正。

Cole等人<sup>[63]</sup>实验观察发现,气泡生长速率和气泡脱离直径成正相关,因此考虑气泡生长速率,修正了Fritz关联式。Ruckenstein<sup>[64]</sup>、Stralen等人<sup>[65]</sup>以及Gorenflo等人<sup>[66]</sup>修正了Fritz关联式,包含了工质热扩散系数和雅各布数。Kocamustafaogullari<sup>[67]</sup>通过包括工质液相和气相的密度比来修正Fritz关联式。Wenzel<sup>[68]</sup>通过包括雅各布数、普朗特数和阿基米德数修正了Fritz关联式。Phan等人<sup>[69]</sup>在Fritz关联式基础上进行了修正,研究了接触角对气泡脱离的影响,将气泡脱离直径与接触角和工质物理性质关联起来。Nam等人<sup>[70]</sup>在具有隔离微腔的硅衬底上形成CuO纳米结构的超亲水表面进行了单气泡动力学特性研究,考虑了作用于气泡的浮力和表面张力的平衡,得到了气泡脱离直径的模型。

Cole等人的关联式为<sup>[63]</sup>:

$$D_d = 0.0208\theta \sqrt{\frac{\sigma g_c}{g(\rho_L - \rho_v)}} \cdot \left[ 1 + 0.0025 \left( \frac{dD}{dt} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

式中  $g_c$ ——重力修正系数

$D$ ——气泡直径  $\mu\text{m}$

$\frac{dD}{dt}$ ——气泡增长率  $\text{m/s}$

Ruckenstein的关联式为<sup>[64]</sup>:

$$D_d = \frac{3\pi^2 \rho_L a_L^2 g^{0.5} (\rho_L - \rho_v)^{0.5}}{\sigma^{1.5}} Ja^{\frac{4}{3}} \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)} \right]^{0.5}$$

式中  $a_L$ ——工质液相热扩散率  $\text{m}^2/\text{s}$

$Ja$ ——雅各布数

Stralen等人的关联式为<sup>[65]</sup>:

$$D_d = 2.63 \left( \frac{Ja^2 a_L^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \left[ 1 + \left( \frac{2\pi}{3Ja} \right)^{0.5} \right]^{0.25}$$

Gorenflo等人的关联式为<sup>[66]</sup>:

$$D_d = c \left( \frac{Ja^4 a_L^4}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{2\pi}{3Ja} \right)^{0.5} \right]^{\frac{4}{3}}$$

式中  $c$ ——系数<sup>[66]</sup>

Kocamustafaogullari的关联式为<sup>[67]</sup>:

$$D_d = 2.64 \times 10^{-5} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}} \left( \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_L} \right)^{0.9}$$

Wenzel的关联式为<sup>[68]</sup>:

$$D_d = 0.25 \sqrt{1 + \left( \frac{Ja}{Pr} \right)^2 \left( \frac{10^5}{Ar} \right)} \sqrt{\frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}}$$

式中  $Pr$ ——普朗特数

$Ar$ ——阿基米德数

Phan等人的关联式为<sup>[69]</sup>:

$$D_d = \left( 6 \sqrt{\frac{3}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\rho_L}{\rho_v} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{\rho_L}{\rho_v} - 1 \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \tan^{-\frac{1}{6}} \theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}}$$

Nam等人的关联式为<sup>[70]</sup>:

$$D_d = \sqrt{\frac{24 \sin^2 \theta}{2 + 3 \cos \theta - \cos^3 \theta}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}}$$

以上关于气泡脱离直径的关联式及模型是基于Fritz关联式的相关性展开。此外,其他学者也通过实验研究或数值模拟研究方法提出了关于气泡脱离直径的关联式。Jamialahmadi等人<sup>[71]</sup>进行了圆柱形不锈钢加热器外部NaCl溶液、KNO<sub>3</sub>溶液和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液的池沸腾实验,测量了气泡脱离直径,提出了考虑受热面热流密度的电解质溶液气泡脱离直径的关联式。Kim等人<sup>[72]</sup>得到了亚气压条件下气泡脱离直径的关联式,将气泡脱离直径与雅各布数和工质物理性质联系起来,相关性预测实验数据的相对误差在 $\pm 20\%$ 以内。Suszko等人<sup>[44]</sup>在受热面热流密度 $0.5 \text{ W/cm}^2$ 下,对PF-5060池沸腾中光滑和粗糙的铜受热面进行了实验,分别得到了光滑和粗糙受热面气泡脱离直径与气泡生长时间的关联式。

Jamialahmadi等人的关联式为<sup>[71]</sup>:

$$D_d = \left( 96.75 + \frac{0.01425q}{\ln q} \right)^{-1}$$

式中  $q$ ——受热面热流密度,  $W/m^2$

Kim 等人的关联式为<sup>[72]</sup>:

$$D_d = 0.164 \cdot 9Ja^{0.7} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}}$$

Suszko 的关联式为<sup>[44]</sup>:

光滑表面:

$$D_d = \frac{234 + 81 \sqrt{t_g}}{10^6}$$

粗糙表面:

$$D_d = \frac{206 + 48 \sqrt{t_g}}{10^6}$$

式中  $t_g$ ——气泡生长时间,  $s$

以上研究表明, 气泡脱离直径与工质物理性质、表面张力以及接触角、受热面热流密度等参数有关。

### 3.2 气泡脱离频率

气泡脱离频率是研究核态沸腾过程的另一个重要的气泡动力学参数<sup>[60]</sup>, 取决于气泡等待时间和气泡生长时间, 是两者之和的倒数:

$$f = \frac{1}{t_g + t_w}$$

式中  $f$ ——气泡脱离频率,  $Hz$

$t_w$ ——气泡等待时间,  $s$

大量研究发现, 气泡脱离频率与受热面过热度、工质物理性质、接触角、空腔距离及相邻气泡相互作用等有关, 受热面表面粗糙度也有明显影响<sup>[31]</sup>。由于早期的研究单独确定气泡生长时间和等待时间比较困难, 因此常把气泡脱离频率与其他参数结合起来计算。Jakob 等人<sup>[73]</sup>研究发现, 在液氮和水的核态沸腾过程中, 气泡脱离直径和脱离频率的乘积是恒定的:

$$fD_d = 0.078$$

此外, Hatton 等人<sup>[74]</sup>提出了一个相关性, 该相关性显示了气泡脱离直径与气泡脱离频率二次方的乘积和工质热扩散率的关系:

$$fD_d^2 = 284.7a_L$$

Cole<sup>[75]</sup>给出了气泡脱离频率和气泡脱离直径的表达式:

$$fD_d^{0.5} = \left[ \frac{4g(\rho_L - \rho_v)}{3\rho_L} \right]^{\frac{1}{2}}$$

根据实验数据, Ivey<sup>[76]</sup>针对水核态沸腾提出了 3 个不同区域: 动力区域、过渡区域、热力学区域。

动力区域: 浮力和阻力作用于不断增长的气泡, 有关联式:

$$fD_d^{\frac{1}{2}} = 0.9g^{\frac{1}{2}}$$

过渡区域: 浮力、阻力和表面张力为主要力, 作用于气泡, 有关联式:

$$fD_d^{\frac{3}{4}} = 0.44g^{\frac{1}{4}}$$

热力学区域: 气泡增长占主导地位, 有关联式:

$$fD_d^2 = C$$

式中  $C$ ——常数

Kumada 等人<sup>[77]</sup>研究了高热流密度和大气压下圆形水平圆盘上气泡脱离频率, 通过对力平衡方程进行分析, 提出了气泡脱离频率的半经验方程, 方程包括密度比、运动黏度和受热面尺寸。Sakashita 等人<sup>[78]</sup>在大气压至 7 MPa 的压力下, 研究了水池沸腾中高热流密度下气泡脱离频率, 提出了气泡脱离频率关联式, 气泡脱离频率不受受热面热流密度和压力的影响, 关联式中包含工质密度比、运动黏度和表面张力。Hamzekhani 等人<sup>[79]</sup>利用实验方法研究了水和氯化钠溶液在常压、不同热流密度下的池沸腾过程, 提出了预测气泡脱离频率的关联式, 关联式中包含气泡脱离直径、表面张力、重力加速度、气液密度差和热流密度等参数。

Kumada 等人的关联式为<sup>[77]</sup>:

$$f = \frac{0.215 \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_v)}{\rho_L} \right]^{\frac{5}{9}}}{(\nu_L D_s^3)^{\frac{1}{9}}}$$

式中  $\nu_L$ ——液相运动黏度,  $m^2/s$

$D_s$ ——受热面直径,  $mm$

Sakashita 等人的关联式为<sup>[78]</sup>:

$$f = 0.6 \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_v)}{\rho_L} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \left\{ \nu_L \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_v) \rho_L^2 \nu_L^4}{\sigma^3} \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}^{-\frac{1}{3}}$$

Hamzekhani 等人的关联式为<sup>[79]</sup>:

$$f = 0.015 \frac{\Delta\rho^{0.25} g^{0.75}}{\sigma^{0.25}} \left( \frac{q}{\Delta\rho^{0.25} g^{0.75} \sigma^{0.75}} \right)^{0.44} \cdot \left( \frac{\Delta\rho^{0.25} g^{0.75} D_d}{\sigma^{0.5}} \right)^{0.88}$$

式中  $\Delta\rho$ ——液相和气相的密度差,  $kg/m^3$

综合以上研究, 大多数关联式中气泡脱离频率与气泡脱离直径相关。气泡脱离频率受各种状态和气泡特性相关参数的影响, 如气泡脱离直径、气泡等待时间、气泡生长时间、表面张力、受热面热流密度



和工质热物理性质,无法全面准确预测所有情况的气泡脱离频率。因此,应综合考虑受热面表面粗糙度、空腔尺寸、压力等,从而建立适用性更强的气泡脱离频率关联式。

### 3.3 气泡等待时间

气泡等待时间是一个重要的气泡动力学参数,对池沸腾中受热面的传热速率有重要影响,学者们提出了许多关联式。

Han 等人<sup>[80]</sup>提出了气泡等待时间的关联式,结果表明,随着空腔尺寸增大,气泡等待时间先增大后减小,随着受热面过热度增加,气泡等待时间减小:

$$t_w = \frac{9}{4\pi a_L} \left[ \frac{R_c (T_w - T_L)}{(T_w - T_{sat}) \left( 1 + \frac{2\sigma}{R_c \rho_v r} \right)} \right]^2$$

式中  $R_c$ ——空腔半径  $\mu\text{m}$

$T_w$ ——受热面温度  $\text{K}$

$T_L$ ——流体温度  $\text{K}$

$T_{sat}$ ——工质饱和温度  $\text{K}$

$r$ ——汽化潜热  $\text{kJ/kg}$

Stralen 等人<sup>[81]</sup>建立了纯液体池沸腾中气泡等待时间和气泡生长时间之间的关系,结果发现,同一成核点,气泡等待时间是气泡生长时间的3倍:

$$t_w = 3t_g$$

Jeremy 等人<sup>[9]</sup>考虑了气泡生长阶段由微液层蒸发引起的过热降低的效应,提出了近似的气泡等待时间关联式:

$$t_w = \frac{\nu_L^{\frac{2}{3}}}{g^{\frac{2}{3}} \gamma_L^{\frac{2}{3}} \pi a_L^{\frac{1}{3}} (T_w - T_{sat})^{\frac{2}{3}}}$$

式中  $\gamma_L$ ——流液相体膨胀系数  $\text{K}^{-1}$

### 3.4 气泡生长时间

气泡生长时间内初始气泡不断吸收热量直到气泡脱离,对气泡动力学特征有显著的影响。Zuber<sup>[82]</sup>研究了非均匀温度场中气泡动力学特性,提出了气泡生长时间与工质热扩散率、气泡脱离直径和雅各布数有关:

$$t_g = \frac{D_d^2}{16b^2 Ja^2 a_L}$$

式中  $b$ ——系数,取值范围  $1 \sim \sqrt{3}$

Lee 等人<sup>[83]</sup>在不同边界条件下,提出了气泡生长时间的预测关联式,气泡生长时间与气泡脱离直径和雅各布数成正相关:

$$t_g = 67.5 Ja a_L \frac{\rho_L D_d}{\sigma}$$

以上对气泡等待时间和生长时间的总结表明,空腔尺寸、气泡脱离直径、受热面过热度及工质物理性质等对气泡等待时间和气泡生长时间有重要影响。

### 3.5 活性成核点密度

活性成核点密度也是池沸腾中气泡动力学参数之一,随着活性成核点密度增加,气泡数量也随之增加,最终导致壁面传热系数增加。许多研究中通常采用抛光、刻蚀、化学提拉法以及在受热面使用各种类型的涂层等方法来增加活性成核点密度<sup>[84]</sup>。研究人员开发了许多确定成核点密度的关联式。

Zou 等人<sup>[85]</sup>实验研究了 R134a 过冷沸腾时不锈钢和铜受热面上的成核点分布。根据研究结果,与不锈钢受热面相比,铜受热面的成核点分布更加均匀,这是不同热导率金属受热面的成核点间相互作用的结果。Hibiki 等人<sup>[86]</sup>根据实际受热面,对活性成核点密度建立模型,模拟结果表明,活性成核点密度是空腔临界尺寸和接触角的函数,随着受热面过热度增加,活性成核点密度增加。Paul 等人<sup>[87]</sup>在大气压条件下,研究了铂丝上水池沸腾实验的气泡动力学参数,结果表明,随着受热面热流密度增加,活性成核点密度增加。Qi 等人<sup>[88]</sup>研究了蒸馏水和乙醇在黄铜和不锈钢受热面的池沸腾,蒸馏水成核点密度与空腔临界半径的倒数趋势相似,乙醇在粗糙和镜面抛光黄铜受热面上的活性成核点密度没有显著差异。Li 等人<sup>[89]</sup>开发了适用于压力范围  $0.101 \sim 19.8 \text{ MPa}$ ,包含受热面过热度、压力、接触角3个变量的池沸腾中活性成核点密度模型,研究发现,受热面过热度对活性成核点密度的增加有促进作用。

Benjamin 等人<sup>[90]</sup>实验研究了中低热流密度下蒸馏水、四氯化碳、正己烷、丙酮在不同表面粗糙度的不锈钢和铝壁受热面上池沸腾中的活性成核点密度。结果发现,活性成核点密度与受热面表面粗糙度、表面张力、受热面过热度、受热面热物性、工质物理性质有关,提出了活性成核点密度关联式:

$$n_s = 218.8 Pr^{1.63} \left( \frac{\lambda_w \rho_w c_w}{\lambda_l \rho_l c_{p,l}} \right) R^{-0.4} (T_w - T_{sat})^3$$

$$R = 14.5 - 4.5 \frac{R_s P}{\sigma} + 0.4 \left( \frac{R_s P}{\sigma} \right)^2$$

式中  $n_s$ ——活性成核点密度  $m^{-2}$   
 $\lambda_w$ ——受热面热导率  $W/(m \cdot K)$   
 $\rho_w$ ——受热面密度  $kg/m^3$   
 $c_w$ ——受热面比热容  $J/(kg \cdot K)$   
 $\lambda_L$ ——工质液相热导率  $W/(m \cdot K)$   
 $c_{p,L}$ ——工质液相比定压热容  $J/(kg \cdot K)$   
 $R$ ——受热面相对表面粗糙度  
 $R_a$ ——受热面平均表面粗糙度  $\mu m$   
 $p$ ——压力  $Pa$

Sarafraz 等人<sup>[91]</sup>提出了预测活性成核点密度的关联式,发现活性成核点密度和受热面热流密度成指数函数关系:

$$n_s = 0.8886q^{0.95031}$$

上述研究表明,活性成核点密度的确定涉及工质物理性质、表面张力、接触角、受热面热流密度、受热面过热度、空腔尺寸等参数。此外,这些关联式仍不能准确预测实验数据。

#### 4 结束语

综述了不同影响因素对核态沸腾中气泡动力学参数的影响,整理了气泡动力学参数的经验关联式。虽然关于核态沸腾中气泡动力学特性的研究已有很多,但所提出的气泡动力学参数关联式仅能准确预测各自的实验结果,而不能准确预测他人的实验结果。这是由于现有关联式中考虑的影响因素有限,因此需要综合考虑更多的影响因素来准确预测气泡动力学参数。

#### 参考文献:

- [1] 何伟. 电子设备散热特性分析与仿真方法研究(硕士学位论文)[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 1-2.
- [2] LIN S, BANERJEE K. Cool Chips: Opportunities and Implications for Power and Thermal Management[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2008, 55: 245-255.
- [3] ANDERSON T M, MUDAWAR I. Microelectronic Cooling by Enhanced Pool Boiling of a Dielectric Fluorocarbon Liquid[J]. Journal of Heat Transfer, 1989(3): 752-759.
- [4] NARUMANCHI S, TROSHKO A, BHARATHAN D, et al. Numerical Simulations of Nucleate Boiling in Impinging Jets: Applications in Power Electronics Cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008(1/2): 1-12.
- [5] FAN S, DUAN F. A Review of Two-Phase Submerged Boiling in Thermal Management of Electronic Cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 150: 119324-1-24.
- [6] CUI Y F, YU H Y, WANG H J, et al. The Numerical Modeling of the Vapor Bubble Growth on the Silicon Substrate Inside the Flat Plate Heat Pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 147: 118945-1-12.
- [7] ALI A F, EL-GENK M S. Spreader for Immersion Nucleate Boiling Cooling of a Computer Chip with a Central Hot Spot[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 53: 259-267.
- [8] BIRBARAH P, GEBRAEL T, FOULKES T, et al. Water Immersion Cooling of High Power Density Electronics[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 147: 118918-1-13.
- [9] JEREMY C H, WANG E N. Bubble Nucleation, Growth and Departure: a New, Dynamic Understanding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 145: 118803-1-8.
- [10] SAKASHITA H. Bubble Growth Rates and Nucleation Site Densities in Saturated Pool Boiling of Water at High Pressure[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2011(5): 734-743.
- [11] HUTTER C, KENNING D B R, SEFIANE K, et al. Experimental Pool Boiling Investigations of FC-72 on Silicon with Artificial Cavities and Integrated Temperature Microsensors[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010(4): 422-433.
- [12] MIGLANI A, JOO D, BASU S, et al. Nucleation Dynamics and Pool Boiling Characteristics of High Pressure Refrigerant Using Thermochromic Liquid Crystals[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 60: 188-200.
- [13] SURTAEV A, SERDYUKOV V, MALAKHOV I, et al. Effect of Subatmospheric Pressures on Heat Transfer, Vapor Bubbles and Dry Spots Evolution During Water Boiling[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 112: 109974-1-11.
- [14] MICHAIE S, RULLIÈRE R, BONJOUR J. Experimental Study of Bubble Dynamics of Isolated Bubbles in Water Pool Boiling at Subatmospheric Pressures[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 87: 117-128.
- [15] LAMAS M I, JABARDO J M S, ARCE A, et al. Numerical Analysis of the Bubble Detachment Diameter in Nucleate Boiling[J]. Journal of Physics Conference Series, 2012, 395: 012174-1-8.

- [16] HAZI G, MARKUS A. On the Bubble Departure Diameter and Release Frequency Based on Numerical Simulation Results [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2009, 52: 1472 – 1480.
- [17] GONG S, CHENG P. Lattice Boltzmann Simulation of Periodic Bubble Nucleation, Growth and Departure from a Heated Surface in Pool Boiling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2013, 64: 122 – 132.
- [18] 曾建邦, 李隆键, 廖全, 等. 池沸腾中气泡生长过程的格子 Boltzmann 方法模拟 [J]. *物理学报*, 2011(6): 520 – 529.
- [19] 易天浩, 陈超越, 雷作胜, 等. 微重力池沸腾中的气泡和传热行为数值模拟 [J]. *空间科学学报*, 2019(4): 469 – 477.
- [20] 赵建福, 李震东, 张良. 不同重力条件下单气泡池沸腾现象的数值研究 [J]. *空间科学学报*, 2012(4): 537 – 543.
- [21] MA X J, CHENG P, GONG S. Mesoscale Simulations of Saturated Pool Boiling Heat Transfer Under Microgravity Conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2017, 114: 453 – 457.
- [22] YI T H, LEI Z S, ZHAO J F. Numerical Investigation of Bubble Dynamics and Heat Transfer in Subcooling Pool Boiling Under Low Gravity [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2019, 132: 1176 – 1186.
- [23] 金效兴. 低微重力场下池内沸腾气泡动力学及传热数值模拟(硕士学位论文) [D]. 上海: 上海大学, 2014: 42 – 47.
- [24] 赵锐, 程文龙, 刘期聂, 等. 重力条件对沸腾气泡特性的影响 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2009(7): 728 – 733, 762.
- [25] 杨燕, 潘良明, 魏敬华. 重力对单气泡生长特性的影响 [J]. *空间科学学报*, 2012(3): 376 – 382.
- [26] GONG M Q, WU Y F, DING L, et al. Visualization Study on Nucleate Pool Boiling of Ethane, Isobutane and Their Binary Mixtures [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2013, 51: 164 – 173.
- [27] HAMZEKHANI S, FALAHIEH M M, AKBARI A. Bubble Departure Diameter in Nucleate Pool Boiling at Saturation: Pure Liquids and Binary Mixtures [J]. *International Journal of Refrigeration* 2014, 46: 50 – 58.
- [28] HETSRONI G, MOSYAK A, POGREBNIYAK E, et al. Bubble Growth in Saturated Pool Boiling in Water and Surfactant Solution [J]. *International Journal of Multiphase Flow* 2006(2): 159 – 182.
- [29] CHIEN L H, WEBB R L. Measurement of Bubble Dynamics on an Enhanced Boiling Surface [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1998(3): 177 – 186.
- [30] 钟达文, 史昊鹏, 孟继安, 等. 加热面朝下的池沸腾气泡动态行为研究 [J]. *原子能科学技术*, 2020(10): 1795 – 1800.
- [31] 姚远, 公茂琼, 陈汉桔, 等. 乙烷核态池沸腾中的气泡生长、脱离和上升 [J]. *科学通报*, 2018(3): 356 – 364.
- [32] MCHALE J P, GARIMELLA S V. Bubble Nucleation Characteristics in Pool Boiling of a Wetting Liquid on Smooth and Rough Surfaces [J]. *International Journal of Multiphase Flow* 2010(4): 249 – 260.
- [33] 刁彦华, 赵耀华, 王秋良. R-113 池沸腾气泡行为的可视化及传热机理 [J]. *化工学报*, 2005(2): 227 – 234.
- [34] ZHANG X B, CHEN J Y, XIONG W, et al. Visualization Study of Nucleate Pool Boiling of Liquid Nitrogen with Quasi-Steady Heat Input [J]. *Cryogenics* 2015, 72: 14 – 21.
- [35] GAO W Z, QI J Y, YANG X, et al. Experimental Investigation on Bubble Departure Diameter in Pool Boiling Under Subatmospheric Pressure [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2019, 134: 933 – 947.
- [36] 毕景良, 柯道友, 林曦鹏. 核态沸腾中气泡动力学及传热机理分析 [J]. *工程热物理学报*, 2012(7): 1233 – 1236.
- [37] DEMIRAY F, KIM J. Microscale Heat Transfer Measurements During Pool Boiling of FC-72: Effect of Subcooling [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer* 2004(14/16): 3257 – 3268.
- [38] KIM H, PARK H. Bubble Dynamics and Induced Flow in a Subcooled Nucleate Pool Boiling with Varying Subcooled Temperature [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2022, 183: 122054 – 1 – 18.
- [39] COULIBALY A, LIN X P, BI J L, et al. Bubble Coalescence at Constant Wall Temperatures During Subcooled Nucleate Pool Boiling [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2013, 44: 209 – 218.
- [40] EGBO M, BORUMAND M, NASERSHARIFI Y, et al. Review: Surface Orientation Effects on Pool-Boiling with Plain and Enhanced Surfaces [J]. *Applied Thermal Engineering* 2022, 204: 117927 – 1 – 27.
- [41] TANJUNG E F, ALUNDA B O, LEE Y J, et al. Experimental Study of Bubble Behaviors and CHF on Printed Circuit Board (PCB) in Saturated Pool Water at Various Inclination Angles [J]. *Nuclear Engineering and Tech-*

- nology 2018(7): 1068 – 1078.
- [42] CHUANG T J ,CHANG Y H ,FERNG Y M. Investigating Effects of Heating Orientations on Nucleate Boiling Heat Transfer ,Bubble Dynamics ,and Wall Heat Flux Partition Boiling Model for Pool Boiling [J]. Applied Thermal Engineering 2019 ,163: 114358 – 1 – 12.
- [43] WANG C L ,LI P X ,ZHANG D L ,et al. Experimental Study on the Influence of Heating Surface Inclination Angle on Heat Transfer and CHF Performance for Pool Boiling [J]. Nuclear Engineering and Technology 2022 (1): 61 – 71.
- [44] SUSZKO A ,EL – GENK M S. Saturation Boiling of PF – 5060 on Rough Cu Surfaces: Bubbles Transient Growth ,Departure Diameter and Detachment Frequency [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer , 2015 91: 363 – 373.
- [45] BOVARD S ,ASADINIA H ,HOSSEINI G ,et al. Investigation and Experimental Analysis of the Bubble Departure Diameter in Pure Liquids on Horizontal Cylindrical Heater [J]. Heat Mass Transfer 2017 53: 1199 – 1210.
- [46] WANG H Y ,LOU Q ,LIU G J ,et al. Effects of Contact Angle Hysteresis on Bubble Dynamics and Heat Transfer Characteristics in Saturated Pool Boiling [J]. International Journal of Thermal Sciences 2022 ,178: 107554 – 1 – 13.
- [47] ARDRON K H ,GIUSTINI G ,WALKER S P. Prediction of Dynamic Contact Angles and Bubble Departure Diameters in Pool Boiling Using Equilibrium Thermodynamics [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer , 2017 ,114: 1274 – 1294.
- [48] ZHANG L ,SHOJI M. Nucleation Site Interaction in Pool Boiling on the Artificial Surface [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2003(3): 513 – 522.
- [49] NITESH D N ,SUSHIL H B ,RICHARD C J. Effect of Nucleation Site Spacing on the Pool Boiling Characteristics of a Structured Surface [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2006(17/18): 2829 – 2839.
- [50] HUTTER C ,SEFIANE K ,KARAYIANNIS T G ,et al. Nucleation Site Interaction Between Artificial Cavities During Nucleate Pool Boiling on Silicon with Integrated Micro – Heater and Temperature Micro – Sensors [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,2012 (11/12): 2769 – 2778.
- [51] GOLOBIC I ,GJERKEŠ H. Interactions Between Laser – Activated Nucleation Sites in Pool Boiling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,2001(1): 143 – 153.
- [52] BON B ,KLAUSNER J ,MCKENNA E. An Investigation of Pool Boiling Heat Transfer on Single Crystal Surfaces and a Dense Array of Cylindrical Cavities [J]. Journal of Heat Transfer 2013(12): 121501 – 1 – 13.
- [53] BI J L ,CHRISTOPHER D M ,LIN X P ,et al. Effects of Nucleation Site Arrangement and Spacing on Bubble Coalescence Characteristics [J]. Experimental Thermal & Fluid Science 2014 52: 116 – 127.
- [54] CHATPUN S ,WATANABE M ,SHOJI M. Experimental Study on Characteristics of Nucleate Pool Boiling by the Effects of Cavity Arrangement [J]. Experimental Thermal & Fluid Science 2005(1): 33 – 40.
- [55] GAO M ,CHENG P ,QUAN X J. An Experimental Investigation on Effects of an Electric Field on Bubble Growth on a Small Heater in Pool Boiling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2013 67: 984 – 991.
- [56] 陈帅. 不同重力和电场下气泡动力学行为研究(硕士学位论文) [D]. 北京: 北京石油化工学院 ,2019: 23 – 58.
- [57] RAHMATI P ,EBRAHIMID M ,HAKKAKI F A. Enhancement of Pool Boiling Heat Transfer Using Ferromagnetic Beads in a Variable Magnetic Field [J]. Applied Thermal Engineering 2020 ,164: 114439 – 1 – 9.
- [58] LIU J H ,GU J M ,LIAN Z W ,et al. Experiments and Mechanism Analysis of Pool Boiling Heat Transfer Enhancement with Water – Based Magnetic Fluid [J]. Heat Mass Transfer 2004 41: 170 – 175.
- [59] KHOOSHECHIN M ,FATHI S ,SALIMI F ,et al. The Influence of Surfactant and Ultrasonic Processing on Improvement of Stability and Heat Transfer Coefficient of CuO Nanoparticles in the Pool Boiling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2020 ,154: 119783 – 1 – 12.
- [60] LOCHAN M R ,KUMAR D M. A Critical Review on Bubble Dynamics Parameters Influencing Boiling Heat Transfer [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017 78: 466 – 494.
- [61] GHAZIVINI M ,HAFAEZ M ,RATANPARA A ,et al. A Review on Correlations of Bubble Growth Mechanisms and Bubble Dynamics Parameters in Nucleate Boiling [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry , 2022 ,147: 6035 – 6071.
- [62] FRITZ W. Maximum Volume of Vapor Bubbles [J]. Physikalische Zeitschrift ,1935 36: 379 – 384.
- [63] COLE R ,SHULMAN H L. Bubble Departure Diameters

- at Subatmospheric Pressures [J]. AICHE Chemical Symposium Series ,1966 62: 6 – 16.
- [64] RUCKENSTEIN R. Recent Trends in Boiling Heat and Mass Transfer [J]. Applied Mechanics Reviews ,1964 , 17: 663 – 672.
- [65] STRALEN S ,ZIJL W. Fundamental Developments in Bubble Dynamics [C]// HITC. The 6th International Heat Transfer Conference. Toronto: HITC ,1978: 429 – 450.
- [66] GORENFLO D ,KNABE V ,BEILING V. Bubble Density on Surfaces with Nucleate Boiling – Its Influences on Heat Transfer [C]// HITC. The 8th International Heat Transfer Conference. San Fransisco: HITC ,1986: 1995 – 2000.
- [67] KOCAMUSTAFAOGULLARI G. Pressure Dependence of Bubble Departure Diameter for Water [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer ,1983 ( 6 ) : 501 – 509.
- [68] WENZEL U. Saturated Pool Boiling and Subcooled Flow Boiling of Mixtures at Atmospheric Pressure ( Ph. D) [D]. New Zealand: University of Auckland ,1992: 20 – 27.
- [69] PHAN H T ,CANNEY N ,MARTY P ,et al. A Model to Predict the Effect of Contact Angle on the Bubble Departure Diameter During Heterogeneous Boiling [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer , 2010( 8 ) : 964 – 969.
- [70] NAM Y ,AKTINOL E ,DHIRV K ,et al. Single Bubble Dynamics on a Superhydrophilic Surface with Artificial Nucleation Sites [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2011( 7/8 ) : 1572 – 1577.
- [71] JAMIALAHMADI M ,HELALIZADEH A ,MULLER – STEINHAGEN H. Pool Boiling Heat Transfer to Electrolyte Solutions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2004( 4 ) : 729 – 742.
- [72] KIM J ,KIM M H. On the Departure Behaviors of Bubble at Nucleate Pool Boiling [J]. International Journal of Multiphase Flow 2006( 10/11 ) : 1269 – 1286.
- [73] JAKOB M ,FRITZ W. Versuche Uber Den Verdampfungsvorgang [J]. Forschung Auf Dem Gebiet Des Ingenieurwesens ,1931 2: 435 – 447.
- [74] HATTON A P ,HALL I S. Photographic Study of Boiling on Prepared Surfaces [C]// IHTC. Proceedings of the 3rd International Heat Transfer Conference. Chicago: IHTC ,1966: 24 – 37.
- [75] COLE R. Bubble Frequency and Departure Volumes at Subatmospheric Pressures [J]. AICHE Journal ,1967 , 13: 779 – 783.
- [76] IVEY H J. Relationships Between Bubble Frequency , Departure Diameter and Rise Velocity in Nucleate Boiling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,1967( 8 ) : 1023 – 1040.
- [77] KUMADA T ,SAKASHITA H ,YAMAGISHI H. Pool Boiling Heat Transfer – I. Measurement and Semi – Empirical Relations of Detachment Frequencies of Coalesced Bubbles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,1995( 6 ) : 969 – 977.
- [78] SAKASHITA H ,ONO A. Boiling Behaviors and Critical Heat Flux on a Horizontal Plate in Saturated Pool Boiling of Water at High Pressures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2009( 3/4 ) : 744 – 750.
- [79] HAMZEKHANI S ,FALAHIEH M M ,KAMALIZADEH M R ,et al. Experimental Study on Bubble Departure Frequency for Pool Boiling of Water/NaCl Solutions [J]. Heat Mass Transfer 2015 51: 1313 – 1320.
- [80] HAN C Y ,GRIFFITH P. The Mechanism of Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling – Parts I [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,1965 8: 887 – 913.
- [81] STRALEN S J D ,SOHAL M S ,COLE R ,et al. Bubble Growth Rates in Pure and Binary Systems: Combined Effect of Relaxation and Evaporation Microlayers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,1975 ( 3 ) : 453 – 467.
- [82] ZUBER N. The Dynamics of Vapor Bubbles in Nonuniform Temperature Fields [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,1961( 1/2 ) : 83 – 98.
- [83] LEE H C ,BYUNG D O ,BAE S W ,et al. Single Bubble Growth in Saturated Pool Boiling on a Constant Wall Temperature Surface [J]. International Journal of Multiphase Flow 2003( 12 ) : 1857 – 1874.
- [84] STOJANOVIC A D ,BELOSEVIC S V ,CRNOMARKOVIC N D ,et al. Nucleate Pool Boiling Heat Transfer: Review of Models and Bubble Dynamics Parameters [J]. Thermal Science 2022 26: 157 – 174.
- [85] ZOU L ,JONES B G. Thermal Interaction Effect on Nucleation Site Distribution in Subcooled Boiling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2012( 11/ 12 ) : 2822 – 2828.
- [86] HIBIKI T ,ISHII M. Active Nucleation Site Density in Boiling Systems [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2003( 14 ) : 2587 – 2601.

( 下转第 A33 页)

ference room are analyzed. Some field measurements in the conference room are conducted during the transition season, and the simulation results are consistent with the actual measurements. Other conditions during the transition season and summer are further studied. The influence of different opening ratios of building doors and windows on CO<sub>2</sub> volume fraction distribution in the conference room is explored. Under the condition of closing the exterior windows of the building in summer, the overall air circulation in the building is weak, and the conference room is prone to high CO<sub>2</sub> volume frac-

tion. Therefore, if necessary, mechanical ventilation measures should be taken for the conference room. Different seasons have a significant impact on the CO<sub>2</sub> volume fraction level in the conference room. The opening ratio of building doors and windows also has an impact on CO<sub>2</sub> volume fraction distribution in the conference room.

**Key words:** field model; network model; conference room in inner area; CO<sub>2</sub> volume fraction; natural ventilation strategy

(本文责任编辑:李欣雨)

(上接第A18页)

- [87] PAUL D D, ABDEL - KHALIK S I. A Statistical Analysis of Saturated Nucleate Boiling Along a Heated Wire [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1983(4): 509 - 519.
- [88] QI Y, KLAUSNER J F. Comparison of Nucleation Site Density for Pool Boiling and Gas Nucleation [J]. *Journal of Heat Transfer* 2006(1): 13 - 20.
- [89] LI Q, JIAO Y J, AVRAMOVA M, et al. Development, Verification and Application of a New Model for Active Nucleation Site Density in Boiling Systems [J]. *Nuclear Engineering and Design* 2018, 328: 1 - 9.
- [90] BENJAMIN R J, BALAKRISHNAN A R. Nucleation Site Density in Pool Boiling of Saturated Pure Liquids: Effect of Surface Microroughness and Surface and Liquid Physical Properties [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1997(1): 32 - 42.
- [91] SARAFRAZ M M, PEYGHAMBARZADEH S M, ALAVI F S A. Enhancement of the Pool Boiling Heat Transfer Coefficient Using the Gas Injection into the Water [J]. *Polish Journal of Chemical Technology* 2013(4): 100 - 109.

### Review of Research on Dynamic Parameters of Nuclear Boiling Bubbles

GAO Weilong, YE Fang, GUO Hang,

ZHAO Jianfu, CHEN Hao

**Abstract:** The influence of influencing factors on bubble dynamics parameters in nuclear boiling is reviewed. The influencing factors include pressure, microgravity, heat flux density of heating surface, superheat of heating surface and subcooling of working fluid, inclination angle of heating surface, surface roughness of heating surface, contact angle, vaporization core spacing, electric field, magnetic field, ultrasonic wave, and so on. Bubble dynamic parameters include bubble detachment diameter (radius), bubble detachment frequency, bubble waiting time, bubble growth time, bubble growth cycle and active nucleation point density. The empirical correlation formulas of bubble dynamics parameters are summarized. The existing correlation formulas consider limited influencing factors, and it is necessary to comprehensively consider more influencing factors to accurately predict bubble dynamic parameters.

**Key words:** nuclear boiling; bubble dynamic parameters; influencing factors; correlation formula

(本文责任编辑:贺明健)



第十五届中国土木工程詹天佑获奖工程:南京牛首山文化旅游区佛顶宫工程