

特约专栏

# 纳米流体强化沸腾换热研究进展

王东民, 全晓军, 李金京

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘 要:** 纳米流体是一种新型换热工质, 十分易于制备, 且与传统换热工质相比具有更高的热导率, 与微米/毫米颗粒悬浮液相比具有更高的稳定性, 在流动状态下纳米流体的压降也与传统换热工质的压降基本相同, 因此纳米流体被广泛应用于各种工程换热领域, 对提高传统散热方式下的热流密度具有重要研究价值。主要介绍了纳米流体的应用领域、制备方法、热物性特点、纳米流体对沸腾换热系数和临界热流密度的影响因素(粒径、浓度、亲疏水性和加热表面性质等), 最后对未来纳米流体强化沸腾换热的研究趋势进行了展望。

**关键词:** 纳米流体; 沸腾换热; 沸腾换热系数; 临界热流密度; 研究进展

**中图分类号:** TB383.1; TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2018)12-1033-06

## Progress in the Researches on Enhancement Effects of Nanofluids on Boiling Heat Transfer

WANG Dongmin, QUAN Xiaojun, LI Jinjing

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Nanofluid is a new kind of working fluid for heat transfer, which can be prepared easily and has higher thermal conductivity than conventional working fluid. It is highly stable compared with suspensions containing micron/millimeter particles and the pressure drop in flow of a nanofluid is nearly the same as that of a conventional fluid. Thus nanofluids are widely used in cooling applications and have great potential for enhancing heat dissipation heat flux. This paper has reviewed the applications, preparation and physical properties of nanofluids, effects of nanofluids on boiling heat transfer (including nanoparticles diameter, concentration, wettability and properties of heating surface). Finally, the challenges for investigations on boiling heat transfer of nanofluids in the future were prospected.

**Key words:** nanofluid; boiling heat transfer; boiling heat transfer coefficient; critical heat flux; research progress

### 1 前 言

随着工业技术的发展, 散热系统逐渐微型化并且迫切需要散热能力更强的散热系统, 这需要散热性能更好的换热工质和更先进的冷却系统。为此, 科学家们发现了一种新型换热工质——纳米流体。纳米流体是指将纳米尺寸的固体颗粒(通常在 100 nm 以下)均匀分散在液体中形成的稳定胶体分散液, 所采用的纳米颗粒材料通常为金属、金属氧化物或非金属材料, 分散的基本流体通

常为水、油、丙酮或乙二醇等。最初纳米流体因为在很低的浓度下就显示出比传统流体具有更高的热导率而备受关注<sup>[1, 2]</sup>。除此之外, 相比添加了微米颗粒或毫米颗粒的悬浮液, 纳米流体具有更长久的稳定性和更高的热导率, 并且在微通道内流动所需的压降也更小, 同时也不会腐蚀或堵塞微通道。

纳米流体因为比传统流体具有众多优异的物理性质而被广泛应用于各种工业领域。在核反应堆散热领域, 如果采用纳米流体作为冷却水, 那么在沸腾散热过程中燃料棒上将覆盖纳米颗粒, 使得核反应装置的压力水冷却反应堆内的燃料棒与冷却水之间的沸腾换热的临界热流密度提高<sup>[3]</sup>, 从而可以提高核反应堆的能量密度、可靠性和安全性。在电子器件散热领域, 因为纳米流体具有比传统流体更高的热导率以及其强化沸腾换热的特性, 纳米流体在微型高功率散热组件如高速计算微芯片的冷

收稿日期: 2018-06-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0406100); 国家自然科学基金项目(51676123)

第一作者: 王东民, 男, 1992 年生, 博士研究生

通讯作者: 李金京, 男, 1987 年生, 博士后, Email:

lijinjing@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.12.11

却中也具有重要应用前景<sup>[4]</sup>。采用纳米流体作为热管的换热工质(如微型槽道热管、网格吸液芯热管、振荡热管以及两相虹吸热管),可以极大增强换热速率、减小总体热阻、提高热管换热能力<sup>[5]</sup>。在汽车领域,因为纳米流体的热导率高于传统流体和其优良的润滑性能,采用纳米流体作为冷却液代替传统发动机冷却液(如:水和乙二醇的混合液),能极大提高汽车发动机的散热性能<sup>[6]</sup>。

沸腾换热作为一种利用换热工质发生相变来散热的方式,具有比对流换热和导热更高的散热速率和更大的散热能力,因此对纳米流体强化沸腾换热的研究成为近年来的研究热点。下面介绍纳米流体的主要制备方法、物理性质、纳米流体对沸腾换热的影响,并对未来纳米流体强化沸腾换热的研究进行了展望。

## 2 纳米流体的制备及其物理性质

### 2.1 纳米流体的制备

纳米流体的制备方法通常分为两类:单步法和两步法。单步法指纳米颗粒的制备和纳米流体的制备是联合进行的,通常指通过物理气相沉积法或液相化学法来制备纳米颗粒及纳米流体。如 Eastman 等<sup>[7]</sup>利用流动的乙二醇液体冷却铜蒸汽来制备铜纳米流体, Liu 等<sup>[8]</sup>利用化学还原法制备水基铜纳米流体等。单步法的优点是不需要干燥和存储纳米颗粒,也不需要固体纳米颗粒分散到流体中去,因此避免了这些步骤所带来的纳米颗粒的团聚问题,提高了纳米流体的稳定性。但该方法的缺点是只有蒸汽压力较低的流体才适合采用单步法来制备纳米流体。

两步法指在第一步中先制备纳米颗粒,第二步将纳米颗粒分散在基本流体中。如 Hong 等<sup>[9]</sup>先通过化学蒸汽冷凝的方法制备铁纳米颗粒,然后将铁纳米颗粒分散在乙二醇中; Xuan 等<sup>[10]</sup>利用两步法制备了水基铜纳米流体以及油基铜纳米流体等。两步法的优点是目下纳米颗粒的制备已经实现商业化,可以很方便地购置。但由于纳米颗粒具有很高的表面能,在利用两步法制备纳米流体时,纳米颗粒在两个步骤中都会发生不同程度的团聚<sup>[11]</sup>。纳米颗粒的团聚会影响纳米流体的换热性能,甚至会导致纳米颗粒从纳米流体中析出、发生沉降或者堵塞换热通道。

为了抑制纳米流体中纳米颗粒的团聚,提高纳米流体的稳定性。通常可以采取超声处理、改变 pH 值、向纳米流体中添加分散剂、修饰纳米颗粒表面等手段来使纳米流体保持长期的稳定<sup>[12]</sup>。Li 等<sup>[13]</sup>发现在 pH=9.5 时,向水基铜纳米流体中添加分散剂能使纳米流体的稳定性达到最佳。Murshed 等<sup>[14]</sup>采用油酸和溴化十六烷基

三甲铵(CATB)作为分散剂加入到水基  $\text{TiO}_2$  纳米流体中以达到提高纳米流体稳定性的目的。Yu 等<sup>[15]</sup>采用等离子体聚合的方法修饰金刚石纳米颗粒表面,提高纳米颗粒表面的亲水性,从而提高纳米流体的稳定性。杨雪飞等<sup>[16]</sup>通过在二氧化硅纳米颗粒表面嫁接硅烷,利用空间位阻稳定性原理来提高二氧化硅纳米流体的稳定性。

### 2.2 纳米流体的物理性质

纳米颗粒分散到基本流体中可以极大增强基本流体的热导率。Choi 等<sup>[1]</sup>认为这是由于纳米颗粒的热导率高于基本流体; Xuan 等<sup>[17]</sup>认为除此之外,纳米颗粒在纳米流体中的布朗运动会引起起热分散效应,也是导致纳米流体热导率高于传统流体的原因。通常纳米流体热导率增强的原因主要有:基本流体中的导热、纳米颗粒内部的导热、纳米颗粒的布朗运动、纳米颗粒表面吸附的液体层以及纳米颗粒的团聚效应<sup>[18]</sup>。

低浓度的纳米颗粒分散到基本流体中会引起基本流体粘度的轻微变化,而对纳米流体粘度的研究相比纳米流体热导率的研究还很少。在低浓度下,往往利用 Einstein 公式<sup>[19]</sup>估算纳米流体的粘度,基于 Einstein 公式发展的 Brinkman 公式<sup>[20]</sup>则被广泛应用于纳米流体的数值模拟计算时针对纳米流体粘度的估算。

Vafaei 等<sup>[21]</sup>分析了碲化铋纳米颗粒的粒径和浓度对气-液表面张力的影响,发现随着浓度的增大,纳米流体气-液表面张力减小,超过某一浓度后表面张力反而增大。在同一浓度下,2.5 nm 比 10.4 nm 的纳米颗粒对应的纳米流体具有更小的气-液表面张力。综上,纳米颗粒的浓度和尺度对气-液表面张力具有重要影响。

## 3 纳米流体对沸腾换热的影响

### 3.1 纳米流体的沸腾换热系数

沸腾换热系数是评价一种换热工质在沸腾换热过程中换热速率的重要参数。当加热表面在沸腾换热过程中以恒定散热功率向不同换热工质中散热时,如果加热表面的散热温度越低,则表示对应的换热工质沸腾换热速率越大,其沸腾换热系数越高。

目前国内外学者在对纳米流体能否增强沸腾换热系数这一问题上还存在广泛争论。早期 Sonlani 等<sup>[22]</sup>认为沸腾过程中气泡的底部和加热表面之间存在极薄的液体层,而纳米颗粒在这层液体层内能增强该液层内部的导热,提高加热表面向沸腾气泡内的热量传递速率,从而使得纳米流体的沸腾换热系数比纯流体的更高。Wen 和 Ding<sup>[23]</sup>则认为纳米流体强化沸腾换热并不仅仅只受到该种因素的影响。Kim 等<sup>[24]</sup>提出在纳米流体沸腾过程中,纳米颗粒会沉积在加热表面,增大加热表面的亲水性,

这反而会使加热表面上的沸腾换热系数降低。Li 等<sup>[25]</sup>也认为纳米颗粒会在气泡底部富集(图 1)。Narayan 等<sup>[26]</sup>则认为纳米流体能否增强沸腾换热系数,取决于纳米颗粒的平均粒径和加热表面粗糙度的相对大小。如果纳米颗粒的平均粒径大于加热表面的粗糙度,那么沉积在加热表面上的纳米颗粒会增大加热表面的粗糙度,提高加热表面的活化成核点密度,增强沸腾换热系数(图 2<sup>[27]</sup>,

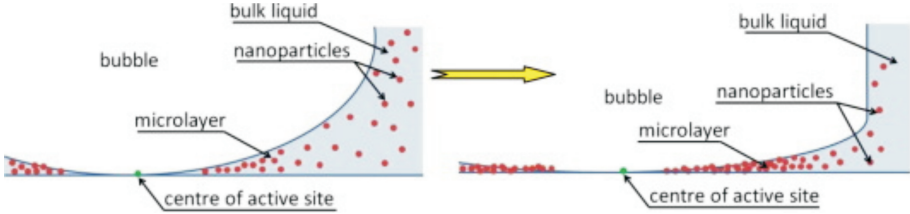


图 1 随着气泡的生长纳米颗粒在气泡底部富集的示意图<sup>[25]</sup>

Fig. 1 Schematic of enrichment and deposition of nanoparticles at the bottom of vapor bubbles as vapor bubbles grow<sup>[25]</sup>

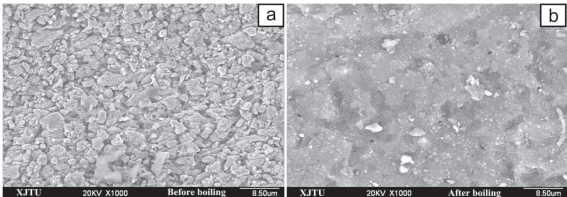


图 2 纳米流体沸腾前(a)和沸腾后(b)沉积纳米颗粒的加热表面的 SEM 照片<sup>[27]</sup>

Fig. 2 SEM images of heating surface before (a) and after (b) boiling of nanofluids with nanoparticles deposition<sup>[27]</sup>

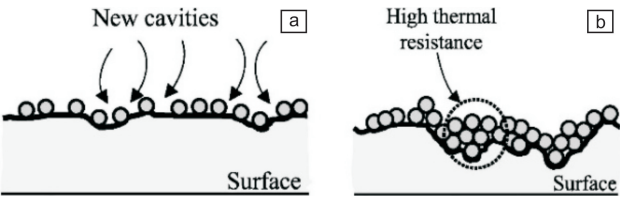


图 3 纳米颗粒沉积在光滑加热表面(a)和粗糙加热表面(b)对沸腾换热造成不同影响的示意图<sup>[28]</sup>

Fig. 3 Schematic of different effects of nanoparticles deposition on smooth heating surface (a) and rough heating surface (b) on boiling heat transfer<sup>[28]</sup>

最近, Quan 等<sup>[30]</sup>发现中等亲水性的纳米颗粒(接触角为 37°左右)沉积在加热表面上会增大加热表面的粗糙度,进而使加热表面上的沸腾换热系数增大;而强亲水性的纳米颗粒(接触角为 22°左右)沉积在加热表面上并不会使得加热表面粗糙度明显增大,且会形成较厚的沉积层,增大纳米流体和加热表面之间的热阻,恶化沸腾换热系数(图 4)。

除了沉积在加热表面上的纳米颗粒会影响沸腾换热系数外,悬浮于纳米流体中的纳米颗粒也会通过影响沸

图 3a<sup>[28]</sup>)。而如果纳米颗粒的平均粒径小于加热表面的粗糙度,那么沉积在加热表面上的纳米颗粒会填平加热表面上的空穴,减小加热表面的粗糙度,从而减小加热表面的活化成核点密度,弱化沸腾换热系数(图 3b<sup>[28]</sup>)。但纳米颗粒过度沉积到加热表面上会导致加热表面和换热流体间导热热阻增大,使沸腾换热系数减小。而且纳米颗粒常常会以团聚体的形式沉积到加热表面上<sup>[29]</sup>。

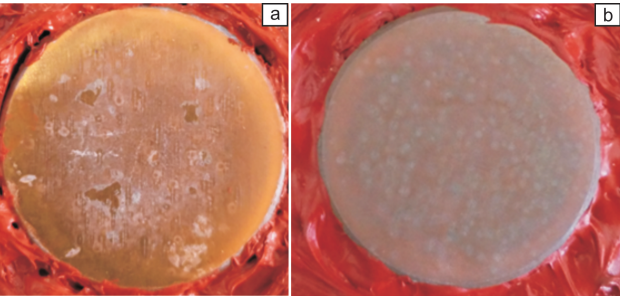


图 4 中等亲水性纳米颗粒(a)和强亲水纳米颗粒(b)在加热表面上沉积的照片<sup>[30]</sup>

Fig. 4 Photos of moderately hydrophilic nanoparticles (a) and strongly hydrophilic nanoparticles (b) deposition on heating surfaces<sup>[30]</sup>

腾气泡对沸腾换热系数造成重要影响。Vafaei 等<sup>[21]</sup>就发现悬浮的纳米颗粒会减小纳米流体的表面张力,从而使纳米流体中产生的沸腾气泡尺寸更小,增强沸腾换热系数。Tu 等<sup>[31]</sup>也发现在水基  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体沸腾换热实验中产生的沸腾气泡小于纯水中产生的沸腾气泡。Xu 等<sup>[32]</sup>通过开展  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体的流动沸腾实验,发现纳米流体中产生的沸腾气泡比纯水中的更小,并提出这是因为纳米颗粒分散在气泡底部极薄的液体层内,增大了气泡底部液体层内的压力,促进了气泡的脱离。该压力即为 Wen<sup>[33]</sup>提出的纳米颗粒聚集在气泡底部引起的结构分离压力(图 5)。李启明等<sup>[34]</sup>利用热力学理论分析了纳米流体沸腾换热的成核过程,指出纳米颗粒会在界面聚集,降低气液界面自由能,因此纳米流体内更容易成核。

Quan 等<sup>[30]</sup>发现中等亲水性的纳米颗粒(接触角为 37°左右)会吸附到沸腾气泡的界面上,抑制气泡之间的合并,促进沸腾换热系数的提高;而强亲水性的纳米颗粒(接触角为 22°左右)不会吸附到沸腾气泡的界面上,



也不会对沸腾气泡的合并脱离等造成影响,因此不会促进沸腾换热系数的提高(图6)。Hu 等<sup>[35]</sup>则发现随着热流密度的增加,石墨烯-乙二醇水纳米流体的沸腾换热系数增加,其存在纳米流体最优浓度,使得沸腾换热系数最大(图7)。

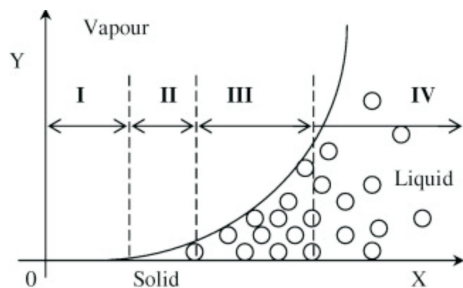


图5 纳米颗粒在气泡底部聚集引起结构分离压力<sup>[33]</sup>

Fig. 5 Concentrated nanoparticles under vapor bubbles resulting structure disjoint pressure<sup>[33]</sup>

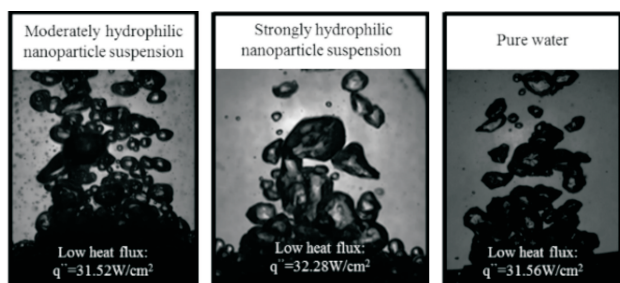


图6 中等/强亲水性纳米流体以及纯水中沸腾气泡的图片<sup>[30]</sup>

Fig. 6 Photo of vapor bubbles in strongly/moderately hydrophilic nanoparticles suspension and pure water<sup>[30]</sup>

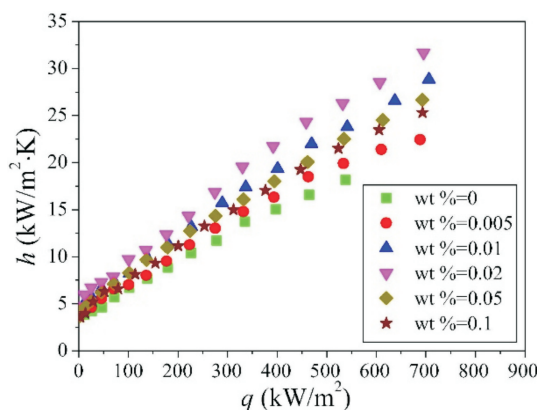


图7 不同石墨烯纳米颗粒浓度下石墨烯-乙二醇水纳米流体沸腾换热系数随加热热流密度的变化曲线<sup>[35]</sup>

Fig. 7 Variation curves of boiling heat transfer of graphene-ethylene glycol/water nanofluids with heating heat flux density under different concentrations of graphene nanoparticle<sup>[35]</sup>

### 3.2 纳米流体沸腾换热的临界热流密度

沸腾换热的临界热流密度是衡量换热工质最大换热

能力的重要参数。沸腾换热的临界热流密度指当散热表面上的散热功率不断提高直至达到某一临界值时,加热表面上迅速产生的大量沸腾气泡来不及脱离加热表面,合并成一层气膜覆盖在加热表面上。这时加热表面与换热工质之间的沸腾换热系数急剧下降,加热表面温度迅速上升,沸腾换热状态由核态沸腾变为膜态沸腾。因此,换热工质的临界热流密度越高,表示该换热工质能够承受的散热功率越高。

目前国内外学者的研究结果一致表明纳米流体的临界热流密度高于传统流体。影响纳米流体临界热流密度的因素主要包括纳米颗粒的粒径、纳米颗粒浓度、纳米流体表面张力、沉积到加热表面的纳米颗粒沉积层。Moreno 等<sup>[36]</sup>发现 3 nm 的纳米颗粒对应的纳米流体的临界热流密度相比纯流体增大了 31%,而随着纳米颗粒粒径的增大,纳米流体的临界热流密度相比纯流体的增长幅度逐渐减小。You 等<sup>[37]</sup>通过实验研究发现随着水基  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体的浓度从 0.001 增长到 0.025 g/L,纳米流体的临界热流密度不断增大,最大增幅可达 200%。Jeong 等<sup>[38]</sup>发现随着磁性纳米流体浓度从  $1 \times 10^{-6}$  增大到  $1 \times 10^{-4}$ ,纳米流体的临界热流密度增幅从 160% 增至 240%。纳米流体的表面张力也是纳米流体临界热流密度增长的重要影响因素。Kumar 和 Milanova<sup>[39]</sup>通过实验研究发现纳米流体和基本流体表面张力的不同是延迟碳纳米管纳米流体临界热流密度到来的原因。

沉积到加热表面上的纳米颗粒沉积层主要通过改变加热表面的亲水性和毛细作用影响纳米流体的临界热流密度。Kim 等<sup>[40]</sup>指出纳米颗粒沉积到加热面上后增大了加热面的亲水性,从而使得纳米流体的临界热流密度比纯流体的更高。Zhang 和 Jacobi<sup>[41]</sup>也得到了类似的结论(图8)。Park 等<sup>[42]</sup>研究了水基  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体和石墨烯纳米流体的临界热流密度,并指出与临界热流密度相关的临界波长的改变是临界热流密度增大的主要原因。仅仅靠加热表面亲水性的增强还解释不了纳米流体临界热流密度比纯流体大大增强的现象。Kim 等<sup>[43]</sup>指出纳米颗粒在加热面上的沉积层具有毛细吸液作用,能将更多的液体吸引到气泡底部的干斑区域,抑制气泡底部干斑的生长,延缓临界热流密度的到来(图9)。近年来,Quan 等<sup>[30]</sup>提出纳米颗粒的接触角也能对纳米流体的临界热流密度产生重要影响。中等亲水性的纳米颗粒(接触角为  $37^\circ$  左右)能吸附在气泡界面上,抑制气泡合并成覆盖在加热表面上的气膜,延缓纳米流体膜态沸腾换热的到来;而强亲水性的纳米颗粒(接触角为  $22^\circ$  左右)却因为不能吸附到气泡界面上,不能抑制气泡合并,不能延缓纳米流体膜态沸腾换热的到来。

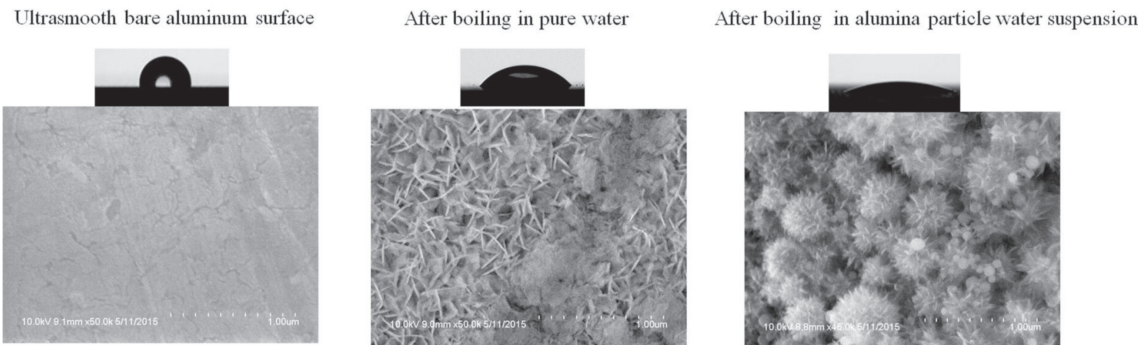


图 8  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米颗粒在加热表面上沸腾沉积的 SEM 照片及其与加热表面接触角<sup>[41]</sup>

Fig. 8 SEM images of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles deposition on heating surfaces after boiling heat transfer and the contact angle between  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles and the heating surface<sup>[41]</sup>

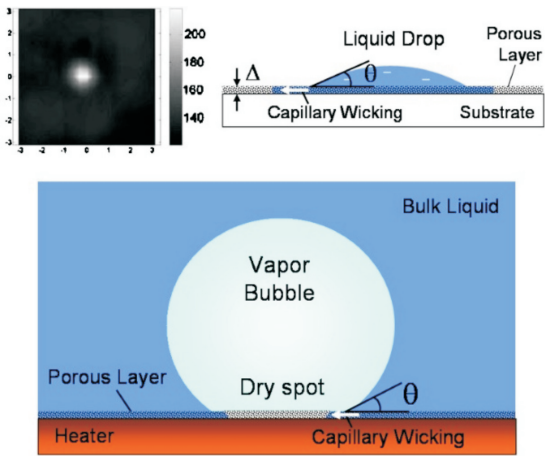


图 9 纳米颗粒沉积层的毛细作用对气泡底部干斑的影响<sup>[43]</sup>

Fig. 9 Capillary effects of nanoparticles deposition on dry spot under a vapor bubble<sup>[43]</sup>

3.3 纳米流体沸腾换热的理论和数值研究

由于纳米流体沸腾换热的复杂性，目前对纳米流体强化换热的理论和数值研究主要集中于纳米流体的单相对流或导热研究。对纳米流体强化沸腾换热的理论和数值模拟研究还很少，主要是通过修改传统流体的沸腾换热理论模型或数值模型中流体的物性参数来实现。如 Behroyan 等<sup>[44]</sup>、Mohammed 等<sup>[45]</sup>以及 Salehi 和 Hormozi 等<sup>[46]</sup>利用计算流体力学方法(CFD)将纳米流体处理成纯流体或者混合流体来研究纳米流体的沸腾换热性能。Abedini 等<sup>[47]</sup>采用有限体积法，将纳米流体处理成纯流体研究了水基  $\text{Al}_2\text{O}_3$  流体的沸腾换热性能。Wang 和 Wu<sup>[48]</sup>采用移动颗粒半隐式方法研究了纳米颗粒浓度对气泡脱离特性的影响。

4 结 语

纳米流体作为一种新型换热工质，与传统流体相比除了易于制备、高热导和良好的稳定性之外，也能

对沸腾换热起到强化作用，特别是纳米流体在低浓度下就能大幅提高沸腾换热的临界热流密度。纳米流体对沸腾换热的影响主要是通过流体中的纳米颗粒和沉积到加热表面上的纳米颗粒沉积层两方面产生的。流体中的纳米颗粒影响沸腾气泡的脱离特性、气泡的形态以及气泡之间的合并，从而影响沸腾气泡从加热表面带走的热量和临界热流密度下加热表面气膜的形成，最终会影响沸腾换热的换热系数和临界热流密度。而沉积在加热表面上的纳米颗粒会改变加热表面的润湿性、粗糙度和毛细作用，从而影响加热表面上的活化成核点密度、加热表面与流体之间的导热热阻、气泡脱离特性以及气泡底部干斑的生长，最终影响沸腾换热系数和临界热流密度。

但目前纳米流体沸腾换热的实验研究结果可重复性不高，导致不同研究者对同一纳米流体研究得到的实验结果不尽相同，甚至互相矛盾，这主要是以下原因引起的：① 由于纳米流体制备方法的不同或者即使采用同一种制备方法，往往会导致纳米颗粒在纳米流体内的团聚程度不一致，纳米颗粒在纳米流体内并不是单分散的。② 为了保持纳米流体的稳定性，常常需要改变流体的 pH 值、或修饰纳米颗粒表面或向纳米流体中添加分散剂，这为实验研究纳米流体对沸腾换热的影响带来了其他因素的影响。③ 即使同一纳米流体在沸腾换热过程中，纳米颗粒会随机沉积在加热面上，导致不同研究者在实验过程中得到的纳米颗粒沸腾沉积层也不尽一致，这增加了实验的不确定性，从而使得到的纳米流体对沸腾换热影响的结论互相矛盾。解决在实验研究纳米流体对沸腾换热的影响中出现的以上问题将能更清楚地揭示纳米流体影响沸腾换热的影响机理。另外，在实际应用方面，纳米流体强化沸腾换热的持久性较差。这是因为在沸腾换热过程中，纳米颗粒不断沉积到加热表面上，使流体中的纳米颗粒浓度不断减小，同时导致加热表面的导热热阻不断增大。

目前对纳米流体强化沸腾换热的研究手段大部分为实验研究。建立系统有效的纳米流体沸腾换热理论模型和纳米流体沸腾换热的数值模拟研究亟待开展,以指导纳米流体沸腾换热的实验研究和纳米流体强化沸腾换热的工程应用。

## 参考文献 References

- [1] Choi S U S, Eastman J A. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles [R]. United States: Argonne National Laboratory, 1995.
- [2] Sarafraz M M, Pourmehran O, Nikkhah V, et al. *Journal of Mechanical Science & Technology* [J], 2018, 32(5): 2309–2315.
- [3] Bang I C, Buongiorno J, Hu L W, et al. *Journal of Power and Energy Systems* [J], 2008, 2(1): 340–351.
- [4] Kole M, Dey T K. *Applied Thermal Engineering* [J], 2013, 50(1): 763–770.
- [5] Alawi O A, Sidik N A C, Mohammed H A, et al. *International Communications in Heat and Mass Transfer* [J], 2014, 56: 50–62.
- [6] Delavari V, Hashemabadi S H. *Applied Thermal Engineering* [J], 2014, 73(1): 380–390.
- [7] Eastman J A, Choi S U S, Li S, et al. *Applied Physics Letters* [J], 2001, 78(6): 718–720.
- [8] Liu M S, Lin M C C, Tsai C Y, et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [J], 2006, 49(17–18): 3028–3033.
- [9] Hong K S, Hong T K, Yang H S. *Applied Physics Letters* [J], 2006, 88(3): 031901.
- [10] Xuan Y, Li Q. *International Journal of Heat and Fluid Flow* [J], 2000, 21(1): 58–64.
- [11] Babita, Sharma S K, Gupta S M. *Experimental Thermal & Fluid Science* [J], 2016, 79: 202–212.
- [12] Moreira T A, Nascimento F J D, Ribatski G. *Experimental Thermal & Fluid Science* [J], 2017, 89: 72–89.
- [13] Li X, Zhu D, Wang X. *Journal of Colloid and Interface Science* [J], 2007, 310(2): 456–463.
- [14] Murshed S M S, Leong K C, Yang C. *International Journal of Thermal Sciences* [J], 2005, 44(4): 367–373.
- [15] Yu Q, Kim Y J, Ma H. *Applied Physics Letters* [J], 2006, 88(23): 231503.
- [16] Yang Xuefei (杨雪飞), Liu Zhenhua (刘振华). *CIESC Journal (化工学报)* [J], 2010, 61(11): 2902–2905.
- [17] Xuan Y, Roetzel W. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [J], 2000, 43(19): 3701–3707.
- [18] Jang S P, Choi S U S. *Applied Physics Letters* [J], 2004, 84(21): 4316–4318.
- [19] Einstein A. *Annals of Physics* [J], 1906, 19: 289–306.
- [20] Brinkman H C. *The Journal of Chemical Physics* [J], 1952, 20(4): 571.
- [21] Vafaei S, Purkayastha A, Jain A, et al. *Nanotechnology* [J], 2009, 20(18): 185702.
- [22] Soltani S, Elemad S G, Thibault J. *Heat and Mass Transfer* [J], 2009, 45(12): 1555–1560.
- [23] Wen D, Ding Y. *Journal of Nanoparticle Research* [J], 2005, 7(2–3): 265–274.
- [24] Kim S J, Bang I C, Buongiorno J, et al. *Applied Physics Letters* [J], 2006, 89(15): 153107.
- [25] Li X, Yuan Y, Tu J. *International Journal of Heat & Mass Transfer* [J], 2015, 91: 467–476.
- [26] Narayan G P, Anoop K B, Das S K. *Journal of Applied Physics* [J], 2007, 102(7): 074317.
- [27] Wang Y, Su G H. *Experimental Thermal & Fluid Science* [J], 2016, 77: 116–123.
- [28] Manetti L L, Stephen M T, Beck P A, et al. *Experimental Thermal & Fluid Science* [J], 2017, 87: 191–200.
- [29] Vafaei S. *Powder Technology* [J], 2015, 277: 181–192.
- [30] Quan X, Wang D, Cheng P. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [J], 2017, 108: 32–40.
- [31] Tu J P, Dinh N, Theofanous T. *Proceedings of 6<sup>th</sup> International Symposium on Heat Transfer* [C]. Beijing: 2004.
- [32] Xu L, Xu J. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [J], 2012, 55(21–22): 5673–5686.
- [33] Wen D. *International Journal of Heat & Mass Transfer* [J], 2008, 51(19): 4958–4965.
- [34] Li Qiming (李启明), Wang Buxuan (王补宣), Duan Yuanyuan (段远源). *CIESC Journal (化工学报)* [J], 2011, 62(11): 2987–2992.
- [35] Hu Y, Li H, He Y, et al. *International Journal of Heat & Mass Transfer* [J], 2016, 96: 565–572.
- [36] Moreno G, Oldenburg S J, You S M, et al. *ASME Heat Transfer Summer Conference* [C]. San Francisco, California, USA: ASME, 2005: 625–632.
- [37] You S M, Kim J H, Kim K H. *Applied Physics Letters* [J], 2003, 83(16): 3374–3376.
- [38] Lee J H, Lee T, Jeong Y H. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [J], 2012, 55(9–10): 2656–2663.
- [39] Kumar R, Milanova D. *Applied Physics Letters* [J], 2009, 94(7): 073107.
- [40] Kim S J, Bang I C, Buongiorno J, et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [J], 2007, 50(19–20): 4105–4116.
- [41] Zhang F, Jacobi A M. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects* [J], 2016, 506: 438–444.
- [42] Park S D, Won Lee S, Kang S, et al. *Applied Physics Letters* [J], 2010, 97(2): 023103.
- [43] Kim H D, Kim M H. *Applied Physics Letters* [J], 2007, 91(1): 014104.
- [44] Behroyan I, Ganesan P, He S, et al. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* [J], 2018, 73(1): 55–74.
- [45] Mohammed H I, Giddings D, Walker G S. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [J], 2018, 125: 218–228.
- [46] Salehi H, Hormozi F. *Heat and Mass Transfer* [J], 2018, 54(3): 773–784.
- [47] Abedini E, Behzadmehr A, Sarvari S M H, et al. *International Journal of Thermal Sciences* [J], 2013, 64: 232–239.
- [48] Wang Y, Wu J M. *Progress in Nuclear Energy* [J], 2015, 85: 130–139.