

文章编号: 0253-4339(2012)06-0038-08

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.06.038

添加表面活性剂的沸腾换热强化研究进展

胡自成 王 谦 李昌烽 宋新南 王迎慧

(江苏大学能源与动力工程学院 镇江 212013)

摘 要 从沸腾换热特性及其影响因素、沸腾汽泡行为和沸腾换热关联式等方面综述了添加表面活性剂的沸腾换热强化研究现状。现有研究指出界面吸附、分子结构、粘度、溶解特性等因素对表面活性剂溶液沸腾换热的作用机制与表面活性剂种类和溶液浓度密切相关,但是蒸汽携带活性剂、非离子活性剂浊点、加热方法、系统压力、参数耦合等因素对表面活性剂溶液沸腾换热的影响规律的研究还需深入开展。在沸腾汽泡行为方面,表面活性剂溶液沸腾汽泡行为与水存在较大差异且与活性剂种类有关,表面活性剂溶液沸腾汽泡行为的理论研究还需加强。此外,现有文献建立的表面活性剂溶液沸腾换热模型及关联式存在验证所用的实验数据较少、模型参数难以确定等不足。最后,在总结现有研究进展的基础上对表面活性剂溶液沸腾换热的后续研究工作提出了建议。

关键词 工程热物理; 沸腾换热强化; 表面活性剂; 综述; 换热关联式

中图分类号: TB61+1; TQ051.5

文献标识码: A

Review on Boiling Heat Transfer Enhancement of Surfactant Solutions

Hu Zicheng Wang Qian Li Changfeng Song Xinnan Wang Yinghui

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China)

Abstract A detailed review on boiling heat transfer enhancement by surfactant additives are presented in this paper to show the characteristics, bubble behaviors and correlations of boiling heat transfer of surfactant solutions. The results point out that the effects of interfacial adsorption, molecular structures, viscosity and soluble characteristics on boiling heat transfer of surfactant solutions are related to the surfactant ionic natures and concentrations of surfactant solutions in present literature. However, the influences of steam carrying, cloud point, heating method, boiling pressure and parameter coupling on boiling heat transfer of surfactant solutions are not well understood at present. In the aspect of bubble behaviors, the existing literatures show that the bubble behaviors of surfactant solutions are quite different from that of water and more emphasis should be put on the theoretical study. In addition, the boiling heat transfer correlations of surfactant solutions in the open papers exist the deficiency of less experimental data for verification and model parameters difficult to be determined. At last, some aspects that need to be investigated further and some new ideas in these fields are presented.

Keywords Engineering thermophysics; Boiling heat transfer enhancement; Surfactants; Review; Heat transfer correlation

沸腾换热是制冷、化工等传统工业部门和航空航天、微电子冷却等新领域中广为应用的高强度换热方式。近年来,能源紧缺和节能减排的紧迫性要求尽可能提高换热设备的传热效率,添加表面活性剂(以下简称活性剂)的沸腾换热强化技术也因此成为研究热点,它是在溶液中添加少量活性剂,活性剂溶液在沸腾系统内无宏观流动(池沸腾)或通过外力及汽液密度差实现流动(流动沸腾)的沸腾换热强化方法,其文献可追溯至1939年^[1-2]。

近几十年来,国内外众多课题组,如国外的Hetsroni课题组^[3-13]、Manglik课题组^[14-20]、Inoue课题组^[21-23]和Jeong课题组^[24-26]等,国内的Yang课题组^[27-32]、刘天庆课题组^[33-35]、王补宣课题组^[36]、徐进良课题组^[37]、郭烈锦课题组^[38]、郑平课题组^[39]和作

者所在课题组^[40-45]等,都对添加活性剂的沸腾换热强化进行了研究,发现活性剂强化沸腾换热特性受到活性剂种类、活性剂溶液物性和沸腾工况等众多因素的影响。但是,溶液中添加活性剂后,活性剂会在气、液、固三相组成的各种界面上产生吸附,导致溶液物理化学性质和界面特性发生改变,加上沸腾换热本身的多样性、复杂性和随机性,添加活性剂的沸腾换热强化机理至今尚未认识清楚。

文献[1-2, 29, 46]等综述了活性剂溶液沸腾换热研究进展,但其引用的最近文献为2006年,而且对活性剂溶液物性及分子结构对沸腾换热的影响、单个汽泡行为、沸腾换热关联式等方面探讨得不够深入。作者从活性剂溶液沸腾换热特性及其影响因素、沸腾汽泡行为、沸腾换热关联式等角度全

面综述活性剂溶液沸腾换热的国内外研究现状,并指出现有研究不足和进一步的研究工作。

1 沸腾换热特性及其影响因素

1.1 界面吸附对沸腾换热的影响

活性剂在汽、液、固三相组成的汽液、固液和汽固界面的吸附会导致溶液表面张力和润湿性能的改变,从而影响溶液沸腾换热特性。加入活性剂后溶液表面张力的变化及其对沸腾换热的影响一直是重点研究内容。Stroebe等^[47]和Morgan等^[48]发现水中加入活性剂后降低了溶液表面张力,认为表面张力的降低是活性剂强化沸腾换热的主因。文献[3-32, 36-45, 49-50]也都获得了类似结论。Jontz和Myers^[51]则发现活性剂Aerosol-22溶液表面张力和水基本一致,沸腾换热系数却提高了400%。Liu等^[33]研究10种活性剂溶液的池核沸腾换热,发现除BA-1, BA-2和BA-3活性剂外,其它活性剂对沸腾换热基本没有影响。作者等^[41,43]发现Triton X-100溶液表面张力虽比水低,但低热流密度下其沸腾换热系数低于水,Wang和Hartnett^[52]对活性剂Tween-80的研究也获得类似结论。此外,文献[14-15,17-18,44,53]指出,和静态表面张力相比,动态表面张力是影响活性剂溶液沸腾换热更为关键的参数,但是,动态表面张力和静态表面张力都不能合理解释活性剂溶液沸腾换热现象^[31]。对活性剂溶液,沸腾时间的长短和周期性也可能对溶液表面张力产生影响而改变溶液沸腾换热特性,作者等^[41]发现活性剂Triton X-100和Triton X-114水溶液经历6个沸腾周期(每个周期24h)后溶液静态表面张力几乎保持不变,而SDS水溶液静态表面张力从第5个周期开始下降,说明经历长时间周期性沸腾后活性剂SDS溶液沸腾换热特性会发生改变。

添加活性剂后溶液润湿性能的改变及其对沸腾换热的影响是另一研究重点。Zhang和Manglik^[14-15]测定了多种活性剂溶液的平衡接触角并研究了其对池核沸腾换热的影响,发现活性剂溶液浓度小于相应CMC时,平衡接触角随溶液浓度的增加而降低,活性剂溶液沸腾换热强化效果与活性剂种类有关;当活性剂溶液浓度大于相应CMC时,平衡接触角随溶液浓度的增加而基本不变,特定活性剂溶液沸腾换热强化效果与平衡接触角也基本无关。作者等^[44-45]亦研究了较宽浓度范围内平衡接触角对活性剂SDS、CTAB、Triton X-100和Triton X-114水溶液池核沸腾换热的影响规律,所得结论与Zhang和Manglik^[14-15]类似。此外,Melendez和

Reyes^[54]研究了不同沸腾表面上活性剂SLS和TTP水溶液的润湿性能和沸腾换热特性,认为SLS和TTP水溶液沸腾换热特性差异是其润湿性能不同导致的。还有其它文献[1-2, 12, 21, 36, 55-57]也指出活性剂溶液润湿性能对沸腾换热有很大影响。

活性剂溶液沸腾时,活性剂在汽固界面的吸附也会改变溶液润湿性能而引起沸腾换热特性的变化,但此方面研究较少。Sher等^[58]认为活性剂是难挥发性组分,可忽略活性剂在汽固界面的吸附而引起的汽固界面张力变化。作者等^[43]则发现活性剂溶液沸腾时蒸汽中携带有少量活性剂,但蒸汽携带活性剂是否影响汽固界面张力和活性剂溶液沸腾换热特性还有待研究。此外,活性剂界面吸附可能会导致沸腾系统内活性剂溶液浓度降低而影响沸腾换热特性,但这方面研究尚未见有公开报道。

1.2 粘度和溶解特性对沸腾换热的影响

活性剂的加入对溶液粘度也会产生一定影响,从而影响沸腾换热。和水相比,高分子活性剂溶液粘度会增加,从而导致气泡生长速度下降和沸腾换热出现恶化^[59]。对小分子活性剂Habon G, Hetsroni等^[13]发现低浓度下活性剂溶液粘度基本不变,高浓度时溶液粘度增加,活性剂溶液沸腾换热系数随溶液浓度的增加先增后降,认为沸腾换热系数随溶液浓度的变化规律与溶液粘度密切相关。作者等^[44]发现低热流密度下小分子非离子活性剂Triton X-100溶液沸腾换热出现恶化,分析后认为沸腾工况下Triton X-100溶液粘度升高是导致沸腾换热恶化的重要原因。

非离子活性剂的温度溶解特性可能会影响活性剂溶液沸腾换热,这是因为,大多数非离子活性剂溶液存在浊点且与溶液浓度有关^[60-62],沸腾时,非离子活性剂溶液浊点如果低于沸腾溶液温度,溶液中析出的活性剂分子可能会影响溶液物性和沸腾换热特性,但这些研究几乎未见报道。作者等^[44]虽测得非离子活性剂Triton X-100和Triton X-114水溶液的浊点温度低于活性剂溶液常压下的饱和沸腾温度,但析出的活性剂分子对沸腾换热的影响规律尚不清楚。

1.3 分子结构对沸腾换热的影响

活性剂分子结构决定其性能,活性剂溶液沸腾换热特性肯定与活性剂分子结构密切相关。Wasekar和Manglik^[17]分析了活性剂分子量和电离特性对核态沸腾换热的影响,发现对离子型活性剂

SDS和SLES, 活性剂溶液沸腾换热系数之比与分子量比值成 -0.5 次方的指数关系, 对非离子型活性剂TritonX-100和TritonX-305则成 0 次方的指数关系。作者等^[43]发现动态表面张力基本相等时, 离子型活性剂SDS和CTAB溶液沸腾换热效果要优于非离子型活性剂Triton X-100和Triton X-114, 单独从EO基团数的角度无法解释活性剂溶液沸腾换热现象。刘等^[34-35]则基于神经网络技术建立模型找出活性剂分子结构对活性剂溶液沸腾换热的影响规律, 结果发现活性剂分子量和极性基团对沸腾换热强化效果影响最大。Zhang和Manglik^[15]研究指出含有EO基团的活性剂溶液在高浓度下更易出现换热恶化和沸腾滞后现象。此外, 文献[14, 30, 35, 63]也指出活性剂分子结构参数对活性剂溶液沸腾换热有很大影响。

1.4 溶液浓度和热流密度对沸腾换热的影响

众多文献报道了活性剂溶液浓度对沸腾换热的影响规律。Hetsroni等^[7]发现低浓度下活性剂溶液沸腾换热强化效果要优于高浓度, 存在最佳活性剂溶液浓度使沸腾换热强化效果最佳, 此外, 活性剂溶液浓度对始沸点基本不产生影响。Wasekar和Manglik^[17]则明确指出活性剂溶液浓度在其CMC及其附近时沸腾换热强化效果最佳。Hetsroni等^[11]则发现环保型活性剂Alkyl (8-16) 溶液饱和沸腾曲线形状与溶液浓度有关, 没有观察到沸腾滞后现象, 同时发现溶液浓度越高沸腾表面平均壁温越低。在数值计算研究方面, 基于恒壁温假设, Wasekar和Manglik^[16]发现池核沸腾换热条件下浓度梯度和温度梯度及两者综合作用导致的Marangoni对流效应非常显著。对混合物溶液, Inoue等^[21]研究了乙醇-水混合物中添加活性剂的核态沸腾换热, 发现当乙醇质量分数大于等于 0.7 时, 活性剂对沸腾换热几乎没有影响, 当乙醇质量分数小于等于 0.5 时, 添加活性剂后沸腾换热得到强化, 起始沸腾区强化效果更好。对过冷沸腾换热, Hetsroni等^[12]发现Habon G降解液的沸腾换热亦有一定程度强化, 但其沸腾曲线出现了沸腾滞后现象。最近研究结果也表明, 活性剂溶液在微通道内的流动沸腾^[39]、受限空间内的池沸腾^[3-4]、相变喷雾冷却^[64]等场合的沸腾换热强化效果也与溶液浓度密切相关。

热流密度是众所周知的沸腾换热关键影响参数, 活性剂溶液沸腾换热也不例外。基本上所有活性剂溶液沸腾换热的文献都提及了热流密度对沸腾换热的影响, 如Zhang和Manglik^[59]发现活性剂强化

沸腾换热效果除与溶液浓度有关, 还与热流密度密切相关。现有研究基本一致的结论是: 活性剂溶液一定时, 热流密度越高, 沸腾换热系数越大。

从活性剂溶液沸腾换热特性及其影响因素的研究现状可以看出, 活性剂溶液沸腾换热影响因素众多, 已有研究取得了丰富成果, 有些影响因素对沸腾换热的影响规律在一定程度上与常规工质类似, 可以借鉴已有文献的结论^[65-67]。但是, 目前仍有很多影响因素, 如界面吸附引起的活性剂溶液浓度变化、蒸汽携带活性剂、非离子活性剂浊点、加热方法、系统压力等, 对沸腾换热的影响规律尚不清楚; 另一方面, 活性剂溶液沸腾换热是众多影响参数耦合作用的结果, 但已有文献对参数耦合影响活性剂溶液沸腾换热的研究还很少; 此外, 现有文献测定的活性剂溶液物性参数并没有准确反映沸腾工况的高温性和非平衡特性^[68], 现有文献结论的适用性也因此受到限制。

2 沸腾汽泡行为

认知活性剂溶液沸腾汽泡行为是揭示其沸腾换热机理的关键。对活性剂溶液沸腾时的群体汽泡行为, 众多文献对此进行了较深入的研究。Hetsroni等^[12]发现和水相比, 活性剂Habon G溶液中汽泡生长和破灭速度更快, 产生的汽泡数量更多, 尺寸更小, 更不易聚合和更有序地出现在沸腾表面上, 同时指出沸腾汽泡行为主要受到溶液浓度、温度和热流密度的影响。Wasekar和Manglik^[17]除观察到与Hetsroni等^[12]的类似现象外, 还发现自由液面形成了泡沫层且泡沫层的厚度随热流密度的增加而加厚。Shah和Darby^[69]也观察到自由液面泡沫层的存在且认为泡沫层是活性剂强化沸腾换热的重要原因。Zhang和Manglik^[59]发现高分子活性剂HEC-QP300溶液的沸腾汽泡行为基本上与Hetsroni等^[12], Wasekar和Manglik^[17]的低分子活性剂汽泡行为类似; 但他们发现高分子活性剂溶液浓度低于CMC时, 热流密度越高, 汽泡聚合的趋势越低, 溶液浓度大于CMC时, 水平圆柱体加热表面下部产生的汽泡会沿圆柱体滑移并在滑移过程中会聚合成大的汽泡, 然后脱离, 同时加热表面上会形成许多小的液体斑块, 斑块下面没有汽泡形成, 这与低分子活性剂汽泡行为截然相反, 他们认为产生相异现象的原因是较高浓度下高分子活性剂溶液粘度的增加抑制了汽泡核化过程和汽泡生长过程。对于混合物溶液中的群体汽泡行为, Inoue等^[21]观察了乙醇-水混合物中添加活性剂后形成的溶液在铂丝上

沸腾时的汽泡行为,发现在乙醇的整个质量分数范围内汽泡都很难合并。至于非离子活性剂浊点对汽泡行为的影响,作者等^[41]发现非离子活性剂Triton X-100和Triton X-114水溶液沸腾时因溶液温度高于其浊点,活性剂溶液变浑浊致使汽泡行为难于观测。

在单个汽泡行为方面,Hetsroni等^[8]对600mg/kg的活性剂Alkyl(8-16)水溶液在水平不锈钢金属箔加热表面上的饱和沸腾单个汽泡行为进行了比较深入的定量和定性研究,发现汽泡形状在垂直于加热表面的方向上不对称,在平行于加热表面的方向上对称,对水而言,汽泡的卵形颈部清晰可见,对活性剂溶液则只能看到聚集的小汽泡不断上升;热流密度为10 kW/m²和汽泡生长时间在1~10ms范围内时,活性剂溶液沸腾时的汽泡形状、生长周期、体积等参数和水相比没有多大区别,但当汽泡生长时间大于10ms时,活性剂溶液沸腾时汽泡体积增长速率要小于水;热流密度为50kW/m²时,和水相比,活性剂溶液中单个汽泡的生长周期更短、体积增长速率更小且脱离直径随热流密度的增加而降低。Hetsroni等^[13]还对单个汽泡的生长过程进行了研究,发现沸腾时活性剂溶液中单个汽泡从形成到脱离用时是水的两倍多,同时发现活性剂溶液中汽泡形状更趋于球形,主汽泡脱离时会有大量次生汽泡产生。Wu等^[28]分析了活性剂溶液在单个核化点的汽泡行为,认为仅从表面张力的角度无法解释汽泡行为特性。

在沸腾汽泡行为的理论研究方面,Wu等^[70]对活性剂SDS、Aerosol-22、DTMAC和Triton X-100水溶液的汽泡生长周期、等待时间、生长速率、脱离直径和起始沸腾过热度的实验结果和常规工质理论计算模型的计算结果进行了比较,发现当考虑表面张力和接触角的变化时,SDS溶液的实验值与计算值较吻合;Aerosol-22溶液起始沸腾过热度的实验值与计算值的变化趋势一致,但理论模型的计算值偏高;DTMAC和Triton X-100溶液起始沸腾过热度的实验值随溶液浓度的增加而基本不变,而计算值则是随溶液浓度的增加而降低;对汽泡等待时间,Aerosol-22、DTMAC和Triton X-100的实验值和计算值存在较大偏差。

此外,文献[3-5, 9-10,20,71-74]也对活性剂溶液沸腾汽泡行为进行了研究。从上分析可知,相对于群体性汽泡和单个汽泡行为的研究,活性剂溶液沸腾汽泡行为的理论研究相对较少。

3 沸腾换热关联式

研究活性剂溶液沸腾换热的最终目的是对沸腾换热进行定量计算,建立反映活性剂溶液沸腾换热机理的沸腾换热关联式也因此成为众多学者的研究重点。

Wen和Wang^[36]通过考虑活性剂溶液在加热表面的润湿性,对Mikic-Rohsenow池核沸腾换热关联式进行了修正,修正后的换热关联式如下:

$$q = B[\Phi(t_w - t_s)]^{m+1} C(1 - \cos \theta) \mu_l h_{fg} \left[\frac{\sigma}{\rho_l - \rho_v} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\Phi^{m+1} = \left(\frac{\lambda_l^{1/2} \rho_l^{1/8} c_{pl}^{19/8} h_{fg}^{m-23/8} \rho_v^{m-15/8}}{\mu_l (\rho_l - \rho_v)^{9/8} \sigma^{m-1/8} t_s^{m-15/8}} \right) \quad (2)$$

$$B = A_1^{3/2} A_2^{1/2} \left(\frac{2}{\pi^{1/2} g^{9/8}} \right) \quad (3)$$

式(1)~(3)中: c_{pl} —饱和液体的定压比热容, J/(kg·K); h_{fg} —汽化潜热, J/kg; g —重力加速度, m/s²; q —热流密度, W/m²; t_w , t_s , $\Delta t = t_w - t_s$ —分别为沸腾表面温度,液体饱和温度和壁面过热度, K; θ —活性剂溶液在沸腾表面的接触角, (°); μ_l —饱和液体的动力粘度, kg/(m·s); ρ_l , ρ_v —饱和液体和饱和蒸汽的密度, kg/m³; σ —液体-蒸汽界面的表面张力, N/m; A_1 , A_2 , C , m —实验经验常数,分别取为 1.5×10^{-4} 、0.6、 5×10^5 和6。

计算表明,修正后的换热关联式的计算值与实验值吻合较好。值得说明的是,计算中活性剂溶液表面张力和接触角值取自文献[28],且均为室温下的测定值;此外,验证修正后的换热关联式所用实验数据仅有SDS和Triton X-100的少量实验数据。

Sher和Hetsroni^[58]也对经典的Rohsenow池核沸腾换热关联式修正后获得新的活性剂溶液池核沸腾换热关联式,关联式的形式如下:

$$\frac{c_{pl}(t_w - t_s)}{h_{fg}} = C Pr_l^s \left[\frac{q \sqrt{\sigma_{lg}}}{\mu_l h_{fg} \sqrt{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^r \theta \quad (4)$$

式中,下标 lg 表示气液界面, C 为常数,其它符号的含义同式(1)~(3)。式(4)的计算结果和他们课题组的实验结果^[13]吻合较好。但是,式(4)中汽液界面张力 σ_{lg} 和固液界面接触角 θ 不是实际测定值,而是理论计算值。此外,检验式(4)时并未对其它课题组的实验结果进行对比,其通用性值得商

榷。

Wu等^[28]则发现活性剂溶液相对于水的沸腾换热强化效果可用沸腾表面上气泡占据表面积的百分比来定量关联, 获得的沸腾换热关联式如下:

$$\frac{(h-h_w)}{h_w} = 1.03 \left[\frac{(A-A_w)}{A_w} \right]^{1.23} \quad (5)$$

式中: h 、 h_w 分别为活性剂溶液和水的沸腾换热系数; A 、 A_w 分别为活性剂溶液和水沸腾时沸腾表面上气泡所占据的面积。式(5)的回归系数仅为0.727, 而且应该注意, 气泡占据的面积是统计平均值。

邱等^[77]则以Chen的双机理模型为基础, 建立的添加剂稀溶液的流动沸腾换热关联式为:

$$h_{tp} = Fh_l + Sh_p \quad (6)$$

式中: h_{tp} —流动沸腾传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_l —液相对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_p —核态沸腾传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; F —自然对流增强因子, 无因次量, 为Martineli参数(X_{tt})的函数; S —核态沸腾抑制因子, 无因次量。

式(6)中 h_l 由Dittus-Boettler方程计算, h_p 由Foster计算式进行计算, F 和 S 因子的模型方程由实验数据回归获得。实验值与式(6)的计算值的相对误差在15%左右。但应注意, 此关联式针对的是活性剂溶液流动沸腾换热。

刘等^[34-35]认为添加剂的沸腾换热强化效果取决于添加剂分子结构, 基于神经网络技术提出了一个复杂的沸腾换热强化效果反向传播神经网络评价模型, 发现此模型对多种添加剂的强化沸腾换热实验结果的预测精度高达90%, 分析后得出添加剂的分子量和极性基团对沸腾换热强化效果的影响最大。此外, Hetsroni等^[12]、Zhang和Manglik^[59]等也在实验研究的基础上提出了活性剂溶液沸腾换热模型, 但都未建立相应的沸腾换热关联式。

4 结语

从沸腾换热特性及其影响因素、沸腾气泡行为和沸腾换热关联式等三个方面综述了活性剂溶液沸腾换热研究进展, 已有研究取得了很多成果并将对后续研究起到重要的指导作用。但是, 活性剂种类及性质的多样性和沸腾换热的复杂性使活性剂强化沸腾换热机理至今尚未被认知, 活性剂强化沸腾换热技术的应用还有很多工作值得开展, 具体而言, 后续研究有待在以下几个方面进行。

1) 在前人研究基础上, 准确确定沸腾工况下活性剂溶液物性参数, 拓宽工质种类, 溶液浓度,

工况参数等实验范围, 系统、全面研究各影响因素, 尤其是目前尚未研究或研究不够的影响因素如蒸汽携带活性剂、非离子活性剂浊点、汽固界面吸附、系统压力等对活性剂溶液沸腾换热的作用机制等研究工作需继续加强。

2) 对众多影响参数进行科学分类, 分类考察各影响参数及参数耦合对活性剂溶液沸腾换热的影响规律, 构建活性剂溶液沸腾换热影响参数主次关系识别体系的研究工作有待开展。

3) 活性剂溶液沸腾气泡行为的定性和定量研究, 尤其是理论上准确预测不同活性剂溶液沸腾气泡行为的研究需深入开展。

4) 准确判断活性剂溶液沸腾换热机理, 采集足够数量且可信的实验数据, 建立准确度高、通用性好的活性剂溶液沸腾换热关联式是要进一步完成的工作。

5) 活性剂强化沸腾换热应用中的活性剂回收及循环利用技术、环境友好型活性剂的选择及其强化沸腾换热特性的研究工作尚待开展。

本文受江苏省动力工程优势学科项目和江苏大学研究生创新基金项目(CX08B_04X)资助。(The project was supported by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions and the Graduate Innovation Foundation of Jiangsu University (No.CX08B_04X).)

参考文献

- [1] Cheng L, Mewes D, Luke A. Boiling phenomena with surfactants and polymeric additive: A state-of-the art review[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2007, 50(13-14): 2744-2771.
- [2] Manglik R M. On the advancements in boiling, two-phase flow heat transfer, and interfacial phenomena-Preface[J]. J. Heat Transfer, 2006, 128(12): 1237-1242.
- [3] Hetsroni G, Mosyak A, Rozenblit R, et al. Natural convection boiling of water and surfactant solutions having negligible environmental impact in vertical confined space[J]. Int. J. Multiphase Flow, 2009, 35(1): 20-33.
- [4] Hetsroni G. Boiling of water and surfactants in confined space[C]//ASME conference proceedings of the 9th biennial conference on engineering systems design and analysis. Haifa, Israel:2008:185-192.
- [5] Hetsroni G, Gurevich M, Mosyak A, et al. Effect of surfactant concentration on saturated flow boiling in vertical narrow annular channels[J]. Int. J. Multiphase Flow, 2007, 33(11): 1141-1152.
- [6] Hetsroni G, Mosyak A, Pogrebnyak E, et al. Natural

- convection boiling of water and surfactants in narrow horizontal annular channels[J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 2007, 33 (5): 469-483.
- [7] Hetsroni G, Gurevich M, Mosyak A, et al. The effect of surfactants on boiling heat transfer[J]. *J. Enhanced Heat Transfer*, 2006, 13 (2): 185-195.
- [8] Hetsroni G, Mosyak A, Pogrebnyak E, et al. Bubble growth in saturated pool boiling in water and surfactant solution[J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 2006, 32 (2): 159-182.
- [9] Klein D, Hetsroni G, Mosyak A. Heat transfer characteristics of water and APG surfactant solution in a micro-channel heat sink[J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 2005, 31 (4): 393-415.
- [10] Hetsroni G, Gurevich M, Mosyak A, et al. Boiling enhancement with environmentally acceptable surfactants [J]. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2004, 25 (5): 841- 848.
- [11] Hetsroni G, Zakin J L, Gurevich M, et al. Saturated flow boiling heat transfer of environmentally acceptable surfactants[J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 2004, 30 (7-8): 717-734.
- [12] Hetsroni G, Gurevich M, Mosyak A, et al. Subcooled boiling of surfactant solutions[J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 2002, 28 (3): 347-361.
- [13] Hetsroni G, Zakin J L, Lin Z, et al. The effect of surfactants on bubble growth, wall thermal patterns and heat transfer in pool boiling[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, 44 (2): 485-497.
- [14] Zhang J T, Manglik R M. Additive adsorption and interfacial characteristics of nucleate pool boiling in aqueous surfactant solutions[J]. *J. Heat Transfer*, 2005, 127 (7): 684-691.
- [15] Zhang J T, Manglik R M. Effect of ethoxylation and molecular weight of cationic surfactants on nucleate boiling in aqueous solutions[J]. *J. Heat Transfer*, 2004, 126 (1): 34-42.
- [16] Wasekar V M, Manglik R M. Short-time-transient surfactant dynamics and Marangoni convection around boiling nuclei[J]. *J. Heat Transfer*, 2003, 125 (5): 858-866.
- [17] Wasekar V M, Manglik R M. The influence of additive molecular weight and ionic nature on the pool boiling performance of aqueous surfactant solutions[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, 45 (3): 483-493.
- [18] Manglik R M, Wasekar V M, Zhang J T. Dynamic and equilibrium surface tension of aqueous surfactant and polymeric solutions[J]. *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, 2001, 25 (1-2): 55-64.
- [19] Wasekar V M, Manglik R M. Pool boiling heat transfer in aqueous solutions of an anionic surfactant[J]. *J. Heat Transfer*, 2000, 122 (4): 708-715.
- [20] Zhang J T, Manglik R M. Visualization of ebullient dynamics in surfactant solutions[J]. *J. Heat Transfer*, 2003, 125 (4): 547.
- [21] Inoue T, Teruya Y, Monde M. Enhancement of pool boiling heat transfer in water and ethanol/water mixtures with surface-active agent[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, 47 (25): 5555-5563.
- [22] Inoue T, Teruya Y, Ishii M, et al. Enhancement of pool boiling heat transfer in water and ethanol/water mixtures (effect of surface-active agent) [J]. *Heat transfer-Asian Research*, 2004, 33 (4): 229-244.
- [23] Inoue T, Monde M, Kuwahara T, et. al. Enhancement of nucleate pool boiling heat transfer in ammonia/water mixtures (Effect of surface-active agent) [J]. *Heat Transfer-Asian Research*, 2011, 40 (1): 89-98.
- [24] Jeong Y H, Chang W J, Chang S H. Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nano-fluids[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2008, 51 (11-12): 3025-3031.
- [25] Jeong Y H, Sarwar M S, Chang S H. Flow boiling CHF enhancement with surfactant solutions under atmospheric pressure[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2008, 51 (7-8): 1913-1919.
- [26] Lee J, Jeong Y H, Chang S H. CHF enhancement in flow boiling system with TSP and boric acid solutions under atmospheric pressure[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240 (10): 3594-3600.
- [27] Tzan Y L, Yang Y M. Experimental study of surfactant effects on pool boiling heat transfer[J]. *J. Heat Transfer*, 1990, 112 (1): 207-212.
- [28] Wu W T, Yang Y M, Maa J R. Enhancement of nucleate boiling heat transfer and depression of surface tension by surfactant additives[J]. *J. Heat Transfer*, 1995, 117 (2): 526-529.
- [29] Yang Y M. Boiling heat transfer enhancement by surfactant additives[J]. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 2004, 35 (5): 495-508.
- [30] Yang Y M, Lin C Y, Liu M H, et al. Lower limit of the possible nucleate pool-boiling enhancement by surfactant addition to water[J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2002, 9 (3-4): 153-160.
- [31] Wu W T, Yang Y M, Maa J R. Nucleate pool boiling enhancement by means of surfactant additives[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1998, 18 (3): 195-209.
- [32] Yang Y M, Maa J R. On the criteria of nucleate pool boiling enhancement by surfactant addition to water[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2001, 79 (4): 409-416.
- [33] Liu T, Cai Z, Lin J. Enhancement of nucleate boiling heat transfer with additives[M]//*Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation*. New York: Hemisphere, 1990: 417-424.
- [34] 刘天庆, 蔡振业, 林纪方. 添加剂强化沸腾传热性

- 能的综合评价及预测[J]. 大连理工大学学报, 1995, 35(2): 145-150. (Liu Tianqing, Cai Zhenye, Lin Jifang. Comprehensive evaluation and prediction about enhancement of boiling heat transfer with additives[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1995, 35(2): 145-150.)
- [35] Liu T, Sun X, Li X, et al. Neural network analysis of boiling heat transfer enhancement using additives[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2002, 45(25): 5083-5089.
- [36] Wen D S, Wang B X. Effects of surface wettability on nucleate pool boiling heat transfer for surfactant solutions[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2002, 45(8): 1739-1747.
- [37] 纪献兵, 徐进良. 表面活性剂对池沸腾换热的影响[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(12): 2049-2052. (Ji Xianbing, Xu Jinliang. Effect of surfactant additive on pool boiling heat transfer[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(12): 2049-2052.)
- [38] 王晔春, 彭晓峰, 郭烈锦. 表面活性剂强化双组分混合工质沸腾换热实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(10): 1708-1711. (Wang Yechun, Peng Xiaofeng, Guo Liejin. Pool boiling heat transfer enhancement in binary mixtures by surfactant additives[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(10): 1708-1711.)
- [39] Chen G, Quan X, Cheng P. Effects of surfactant additive on flow boiling over a microheater under pulse heating[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2010, 53(7-8): 1586-1590.
- [40] Hu Zicheng, Gu Jiaqiang, Song Xinnan, et al. Pool boiling heat transfer of aqueous surfactant solutions[C]//The 2nd International Conference on Energy and Environment Technology. Changsha, China, 2011:841-844.
- [41] 宋新南, 顾加强, 胡自成, 等. 表面活性剂水溶液池核沸腾换热试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 184-188. (Song Xinnan, Gu Jiaqiang, Hu Zicheng, et al. An experiment on nucleate pool boiling heat transfer of aqueous surfactant solutions [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science), 2010, 31(2): 184-188.)
- [42] 胡自成, 顾加强, 宋新南, 等. 表面活性剂水溶液池核沸腾换热实验研究[C]//中国工程热物理学会传热传质年会议文集. 上海, 2010.
- [43] 胡自成, 顾加强, 宋新南, 等. 表面活性剂水溶液池核沸腾换热强化特性[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 404-409. (Hu Zicheng, Gu Jiaqiang, Song Xinnan, et al. Pool boiling heat transfer with the addition of surfactants[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science), 2011, 32(4): 404-409.)
- [44] 胡自成, 王谦, 宋新南, 等. 表面活性剂水溶液池沸腾换热特性[C]//中国工程热物理学会传热传质年会议文集. 西安, 2011.
- [45] 胡自成, 王谦, 李昌烽, 等. 表面活性剂水溶液池核沸腾换热特征[C]//中国工程热物理学会多相流年会议文集. 乌鲁木齐, 2011.
- [46] V M Wasekar, R M Manglik. A review of enhanced heat transfer in nucleate pool boiling of aqueous surfactant and polymeric solutions[J]. J. Enhanc. Heat Transfer, 1999, 6(2-4): 135-150.
- [47] Stroebe G W, Baker E M, Badger W L. Boiling-film heat transfer coefficients in a long-tube vertical evaporator[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1939, 31(2): 200-206.
- [48] Morgan A I, Bromley L A, Wilke C R. Effect of surface tension on heat transfer in boiling[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1949, 41(12): 2767-2769.
- [49] Johansson M, Leifer I, Vamling L, et al. Falling film hydrodynamics of black liquor under evaporative conditions [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2009, 52(11-12): 2769-2778.
- [50] Quinn G, Cetegen B M. Effect of surfactant addition on boiling heat transfer in a liquid film flowing in a diverging open channel[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2010, 53(1-3): 245-253.
- [51] Jontz P D, Myers J E. The effect of dynamic surface tension on nucleate boiling coefficient[J]. AIChE Journal, 1960, 6(1): 34-38.
- [52] Wang T A T, Hartnett J P. Pool boiling of heat transfer from a horizontal wire to aqueous surfactant solutions[C]//Proceedings of 10th International Heat Transfer Conference, Brighton, 1994:177-182.
- [53] Iliev T, Dushkin C D. Dynamic surface tension of micellar solutions studied by the maximum bubble pressure method[J]. Colloid Polym Science, 1992, 270(4): 370-376.
- [54] Melendez E, Reyes R. Interfacial energies of aqueous mixtures and porous coverings for enhancing pool boiling heat transfer[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(8): 796-803.
- [55] Qiao Y M, Chandra S. Experiments on adding a surfactant to water droplets boiling on a hot surface[C]//Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1997, 453(1959): 673-689.
- [56] 马淑云, 侯玲. 添加剂对乙二醇二元、三元混合物沸腾传热的强化[J]. 化工技术与开发, 2004, 33(1): 30-32. (Ma Shuyun, Hou Ling. Intensifying boiling heat transfer of glycol dibasic and tribasic by mixtures additives[J]. Technology and Development of Chemical Industry, 2004, 33(1): 30-32.)
- [57] Qiao Y M, Chandra S. Spray cooling enhancement by addition of surfactant[J]. J. Heat Transfer, 1998, 120(1): 92-98.
- [58] Sher I, Hetsroni G. An analytical model for nucleate pool boiling with surfactant additives[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(4): 699-706.

- [59] Zhang J, Manglik R M. Nucleate pool boiling of aqueous polymer solutions on a cylindrical heater[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2005, 125 (2-3): 185-196.
- [60] Holmberg K, Jönsson B, Kronberg B, et al. 水溶液中的表面活性剂和聚合物[M]. 韩丙勇, 张学军译. 北京: 化学工业出版社, 2005:41-42.
- [61] Wang Z, Xu J H, Zhang W, et al. Cloud point of nonionic surfactant Triton X-45 in aqueous solution[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, 61 (1): 118-122.
- [62] Halide Akbaş, Çiğdem Batıgöç. Spectrometric studies on the cloud points of Triton X-405[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2009, 279 (2): 115-119.
- [63] Wasekar V M. Heat transfer in nucleate pool boiling of aqueous SDS and triton X-100 solutions[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2009, 45 (11): 1409-1414.
- [64] Tao Y, Huai X, Wang L, et al. Experimental characterization of heat transfer in non-boiling spray cooling with two nozzles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31 (10): 1790-1797.
- [65] 林瑞泰. 沸腾换热[M]. 北京: 科学出版社, 1988:392-400.
- [66] Dhir V K. Boiling heat transfer[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1998, 30: 365-401.
- [67] Cheng L, Mewes D. Review of two-phase flow and flow boiling of mixtures in small and mini channels[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2006, 32 (2): 183-207.
- [68] 胡自成, 王谦, 宋新南, 等. 表面活性剂水溶液沸腾换热溶液物性研究进展[J]. *化工进展*, 2011, 30 (8): 1658-1663. (Hu Zicheng, Wang Qian, Song Xinnan, et al. Research progress of physical properties of surfactant solutions[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30 (8): 1658-1663.)
- [69] Shah B H, Darby R. The effect of surfactant on evaporative heat transfer in vertical film flow[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1973, 16 (10): 1889-1903.
- [70] Wu W T, Yang Y M, Maa J R. Technical Note Pool boiling incipience and vapor bubble growth dynamics in surfactant solutions[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1999, 42 (13): 2483-2488.
- [71] Rozenblit R, Gurevich M, Lengel Y, et al. Flow patterns and heat transfer in vertical upward air-water flow with surfactant[J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 2006, 32 (8): 889-901.
- [72] Frost W, Kippenhan C J. Bubble growth and heat transfer mechanisms in the forced convection boiling of water containing a surface active agent[J]. *J. Heat Transfer*, 1967, 10 (7): 931-949.
- [73] Ammerman C N, You S M. Determination of boiling enhancement mechanism caused by surfactant addition to water[J]. *J. Heat Transfer*, 1996, 118 (2): 429-435.
- [74] Podsushnyy A M, Minayev A N, Statsenko V N, et al. Effect of surfactants and of scale formation on boiling heat transfer to sea water[J]. *Heat Transfer-Soviet Research*, 1980, 12 (2): 113-114.
- [75] 张小艳, 张兴群, 陈蕴光, 等. 混合制冷剂在微肋管内流动沸腾的换热关系式[J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41 (11): 1279-1283. (Zhang Xiaoyan, Zhang Xingqun, Chen Yunguang, et al. Boiling heat transfer correlations for refrigerant mixtures flowing inside micro-fin tubes[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41 (11): 1279-1283.)
- [76] Francisco T, Manel V, Mahmoud B, et al. Pool boiling of ammonia/water and its pure components: Comparison of experimental data in the literature with the predictions of standard correlations[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2007, 30 (5): 778-788.
- [77] 邱运仁, 陈卫萍, 思勤. 添加剂稀溶液的流动沸腾传热模型[J]. *中南工业大学学报(自然科学版)*, 2000, 31 (5): 433-436. (Qiu Yunren, Chen Weiping, Si Qin. Models on flow boiling heat transfer of additive dilutes[J]. *Journal of Central South University of Technology (Natural Science)*, 2000, 31 (5): 433-436.)

作者简介

胡自成, 男(1976-), 在读博士, 讲师, 江苏大学能源与动力工程学院, 0511-88780215, E-mail: hzc501@163.com. 研究方向: 建筑节能与空调技术研究, 流动与强化传热研究。现在进行的研究项目有: 国家自然科学基金项目和江苏省自然科学基金。

About the author

Hu Zicheng (1976-), male, Doctor candidate, lecturer, School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, (0511) 88780215, E-mail: hzc501@163.com. Research fields: Building energy saving and air-conditioning technology, flow and heat transfer enhancement. The author takes on project supported by the National Natural Science Foundation of China, Natural Science Foundation of Jiangsu Province.