

池沸腾临界热流密度关系式分析研究

董安琪¹, 方贤德¹, 黄永宽²

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016; 2. 中航工业洪都 650 所, 江西 南昌 330024)

摘要:关于 CHF(池沸腾临界热流密度)的计算,人们提出了很多关系式。工程设计中需要知道这些关系式的适用性,新的计算模型研究也需要对已有计算方法进行分析。已有的关系式评价分析所涉及的实验数据和关系式数量很局限,造成评价结果之间差别很大。本文从 27 篇文献中共收集了 468 组数据,并用这些数据对常用的 20 个 CHF 公式的准确性及适用范围做了比较,筛选出与实验数据吻合较好的公式。结果表明,表现最好的是 El-Genk - Guo 公式,其平均绝对误差为 26.2%,所以需要研究出更为准确的公式。此外,本文对影响公式准确度的因素进行了分析,为相关设备合理设计提供了参考。

关键词:池沸腾; 临界热流密度; 传热; 关系式

中图分类号: TK121 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.07.002

符号说明

- q ——临界热流密度/ $W \cdot m^{-2}$;
- ρ ——密度/ $kg \cdot m^{-3}$;
- h_{lg} ——汽化潜热/ $J \cdot kg^{-1}$;
- g ——重力加速度/ $m \cdot s^{-2}$;
- σ ——表面张力/ $N \cdot m^{-2}$;
- β ——接触角/ $(^\circ)$;
- θ ——方位角/ $(^\circ)$;
- p_{cri} ——临界压力/Pa;
- p_r ——相对压力 $p_r = p/p_{cri}$;
- MAD——平均绝对误差/%;
- MRD——平均相对误差/%;
- SD——标准差/%;
- RD——相对误差/%;
- 下标:
- l——液体;
- g——气体;
- pred——预测值;
- exp——实验值;
- CHF——临界热流密度;

CHF Z——Zuber 公式计算值。

引言

池沸腾临界热流密度的研究是沸腾传热领域的一个重要课题,其准确计算对于提高能源利用率,防止设备发生烧毁,设计锅炉、蒸发器等传热设备具有重要意义。

现有的临界热流密度关系式很多,基于工质和实验范围多种多样。这些公式对临界热流密度计算的适应性如何,虽然人们已经进行了一些研究,但涉及的公式及实验数据的广度和深度很局限,造成评价结果之间差别较大,甚至相互矛盾。

Guan 等以己烷、戊烷和 FC-72 为实验工质^[1],研究了不同压力和过热度条件下的水平表面池沸腾临界热流密度,实验系统压力分别为 150、300 和 450 kPa。他们将实验结果与文献 [2~6] 中的公式进行比较分析,发现这些公式都不能很好地满足预测要求,于是运用其实验数据提出了新公式^[1]; Liao 等以水为工质^[7],在标准大气压下通过改变加热面方位角进行临界热流密度的实验研究,运用实验数据对文献 [8~13] 中的公式进行分析评价。他们发现 Brusstar-Merte 即式 [11] 的预测效果最好,Chang-You 即式 [12] 紧随其后,其余公式表现差强人意; Kim 和 Suh 实验研究了用水平铜表面加热的饱和水在标准大气压下的沸腾传热临界热流密度^[14]。用实验数据对文献 [8~11] 中的公式进行评价,结果表明,El-Genk - Guo 公式的跟随性较好^[9],但没有一个公式能有效地预测不同实验条件下的临界热流密度; Howard 和 Mudawar 用水、氨等工质在标准大

收稿日期: 2015-09-15; 修订日期: 2015-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51576099)

作者简介: 董安琪(1992-),女,山东巨野人,南京航空航天大学硕士研究生。

通讯作者: 方贤德(1954-),男,安徽寿县人,南京航空航天大学教授。

气压下的池沸腾临界热流密度数据对文献 [4, 8 ~ 11] 中公式的准确度进行评价^[15], 发现 Brusstar-Merte 公式 [11] 误差最小。

综上所述, 现有的池沸腾临界热流密度关系式对临界热流密度计算的适应性需要进一步研究, 对影响计算准确度的因素需要进一步分析, 以便找出预测精度较好的公式, 避免使用的盲目性, 同时为提出适用性更广的公式提供参考。围绕这一问题, 本文对池沸腾临界热流密度的实验数据进行了广泛搜集, 将其与常用的临界热流密度关系式进行比较, 同时对影响公式准确度的因素加以分析。

1 临界热流密度实验数据

本文从 27 篇已发表的文献中收集到 468 组池沸腾临界热流密度的实验数据, 所有数据在文献中都是以图表的形式给出的。以此对 20 个常用临界热流密度模型的准确性及适用范围做了系统评价, 这 468 个实验数据点的统计结果如表 1 所示:

- (1) 对比压力范围为 0.000 7 ~ 0.98;
- (2) 有 303 个数据点来自水平加热面, 61 个来自垂直加热面, 其余方位角均已知;
- (3) 实验数据包含水、氨、液氮、氢、乙醇、戊烷等 9 种制冷剂, 其中水、氨和液氮分别占 54.5%、17.1% 和 9.2%。

表 1 池沸腾临界热流密度实验数据统计表

Tab.1 Statistical table of the test data of the pool boiling critical heat flux density

文献作者	加热材料/方位角 (°)/接触角 (°)	工质类型/相对压力	数据点数
Wang 和 Dhir ^[23]	铜/垂直/18	水/0.004 6	1
Liaw 和 Dhir ^[24]	铜/垂直/10 ~ 110	水/0.004 4	6
Ramilison 和 Lienhard ^[25]	铜/水平/30 ~ 50	R - 113/0.028 9	3
Deev 等 ^[26]	铜/水平、垂直/20	氨/0.44; 0.98	18
Abuaf 和 Staub ^[27]	铜/水平/5	R - 113/0.001 6 ~ 0.029 9	9
Lienhard 和 Dhir ^[4]	铜/水平/45	水/0.000 7 ~ 0.0019	6
Bonilla 和 Perry ^[28]	铬/水平/65	水/0.000 7 ~ 0.004 6	5
Sakuria 和 Shiotsu ^[29]	铂/水平、垂直/45	水/0.000 9 ~ 0.004 6	8
Liao 等 ^[7]	a/0 ~ 180/0 ~ 55	水/0.004 6	23
Saeidi 和 Alemrajabi ^[30]	a/水平/16 ~ 81	水/0.003 6	22
Hahne 和 Diesselhorst ^[31]	铂、镍铬合金/水平/24 ~ 52	水/0.004 5	30
Ahn 等 ^[32]	锆合金 - 4/水平/0 ~ 50	水/0.004 6	34
Bailey 等 ^[22]	铜/水平/0	水/0.000 9 ~ 0.013 6、甲醇/0.002 4 ~ 0.061 6、 戊烷/0.074 3 ~ 0.021 8	22
Sakashita 和 Ono ^[6]	铜/0 ~ 90/a	水/0.004 6、乙醇/0.016 5	17
Jergel 和 Stevenson ^[33]	铜/0 ~ 180/a	氨/0.445 5	4
Vishnev 等 ^[8]	铜/30 ~ 150/a	氨/0.445 5	6
Beduz 等 ^[34]	铜/90 ~ 180/a	氮/0.029 8	29
Nishio 和 Chandratilleke ^[35]	铜/45/a	氨/0.445 5	1
Guo 和 El-Gank ^[36]	铜/90 ~ 180/a	水/0.004 6	10
Yang 等 ^[37]	铜/30 ~ 180/a	水/0.004 6	10
Mudawar 等 ^[38]	铜/15 ~ 75/a	水/0.004 6	12
Guan 等 ^[1]	黄铜/水平/a	戊烷/0.04 ~ 0.13、己烷/0.05 ~ 0.15	12
Ono 和 Sakashita ^[39]	镍铬合金/水平/a	水/0.04 ~ 0.32	27
Tatsumoto 等 ^[40]	锰铜/水平/a	氨/0.089 5 ~ 0.855 9	13
Kwark 等 ^[41]	铜/水平/0 ~ 180/a	水/0.000 9 ~ 0.009 1、乙醇/0.003 0 ~ 0.030 9	40
Bewilogua 等 ^[42]	铜/水平/垂直/20	氮/0.031 4 ~ 0.647 2、氢/0.080 0 ~ 0.950 6、氨/ 0.022 2 ~ 0.927 0	88
Kim 等 ^[43]	铜/90 ~ 180/a	水/0.004 6	12

注: a—缺少数据

2 临界热流密度关系式

本文共评价了 20 个常用的临界热流密度关系式,具体是: Guan 等, Zuber, Kirichenko - Cherniakov, Lienhard - Dhir, Kandlikar, Sakashita - Ono, Liao 等, Vishnev, El-Genk - Guo, Chang - You, Brusstar - Merte, Arik - Bar-Cohen, El-Genk - Bostanci, Chang - Snyder, Chang, Theofanous - Dinh, Haramura - Katto, Kutateladze, Rohsenow - Griffith 和 Bailey 等模型^[1-13, 16-22]。

从现有的池沸腾临界热流密度关系式的形式

来看,一部分作者仅通过重新改写 Zuber 公式的常数来获得^[2],例如 Lienhard - Dhir 和 Bailey 等^[4, 22]公式。绝大多数作者除了重新改写 Zuber 公式的常数^[2],还附加了加热面方位角、接触角、流体粘度等修正项,例如 Sakashita - Ono, Vishnev 等, El-Genk - Guo 以及 Chang - You^[6, 8-10]等公式。

限于篇幅,本文仅列出了对整个数据库预测精度较高的前 8 个公式的具体形式,如表 2 所示。其它公式的具体形式请参考文献 [1 ~ 4, 6] 和文献 [16 ~ 22]。

表 2 池沸腾临界热流密度关系式

Tab. 2 Correlation formulae of the pool boiling critical heat flux density

参考文献	工质	关系式形式	公式序号
Kandlikar ^[5]	水	$q_{CHF}/q_{CHFZ} = 7.5 \left(\frac{1 + \cos\beta}{16} \right) \left[\frac{2}{\pi} + \frac{4}{\pi} (1 + \cos\beta)\cos\theta \right]^{0.5}$	(1)
Liao 等 ^[7]	水	$\frac{q_{CHF}}{q_{CHFZ}} = \left(-0.73 + \frac{1.73}{1 + 10^{-0.021 \times (185.4 - \theta)}} \right) \left[1 + \frac{55 - \beta}{100} \times (0.56 - 0.0013\theta) \right]$	(2)
Vishnev ^[8]	液氮	$q_{CHF}/q_{CHFZ} = (190 - \theta)^{0.5} / 190^{0.5}$	(3)
El-Genk - Guo ^[9]	水	$q_{CHF} = [0.034 + 0.0037(180 - \theta)^{0.656}] \rho_g^{1/2} h_{lg} [\sigma g(\rho_l - \rho_g)]^{0.25}$	(4)
Chang - You ^[10]	FC-72	$\frac{q_{CHF}}{q_{CHFZ}} = 1 - 0.00012\theta \tan(0.414\theta) - 0.122 \sin(0.318\theta)$	(5)
Brusstar - Merte ^[11]	R-113	$\frac{q_{CHF}}{q_{CHFZ}} = \begin{cases} 1.0 & 0 < \theta \leq 90^\circ \\ (\sin\theta)^{0.5} & 90^\circ < \theta < 180^\circ \end{cases}$	(6)
Arik - Bar-Cohen ^[12]	HFE-7100 FC-72	$q_{CHF}/q_{CHFZ} = 1 - 0.001117\theta + 7.79401 \times 10^{-6} \times \theta^2 - 1.37678 \times 10^{-7} \times \theta^3$	(7)
El-Genk - Bostanci ^[13]	FC-72	$q_{CHF}/q_{CHFZ} = [(1 - 0.00127\theta)^{-4} + (3.03 - 0.016\theta)^{-4}]^{-0.25}$	(8)

注: q_{CHFZ} 表示 Zuber 公式计算值^[2] $q_{CHFZ} = 0.131 \rho_g^{1/2} h_{lg} [\sigma g(\rho_l - \rho_g)]^{0.25}$ 。

3 临界热流密度关系式对实验数据的适用性评价

利用收集的 468 组池沸腾临界热流密度实验数据对这 20 个常用公式进行分析评价。引入平均绝对误差 MAD、平均相对误差 MRD 以及标准差 SD 分别来衡量公式的平均预测精度、离散方向以及离散程度。平均绝对误差小于 40% 的公式的误差结果如表 3 所示。

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |RD_i| \tag{9}$$

$$MRD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RD_i \tag{10}$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (RD_i - MRD)^2} \tag{11}$$

$$RD_i = \frac{y(i)_{pred} - y(i)_{exp}}{y(i)_{exp}} \tag{12}$$

从表 3 可以看出:

(1) 对于全部实验数据,有 8 个模型的 $MAD <$

30% 按照精度由高到低,依次为: El-Genk - Guo , Arik - Bar-Cohen ,Brusstar - Merte ,El-Genk - Bostanci ,Chang - You ,Liao 等 ,Vishnev 和 Kandlikar^[5,7-13] 模型。其中,预测结果最好的 El-Genk - Guo 模型^[9] , $MAD = 26.2\%$ 。前 5 个模型的 MRD 都小于零,即其预测值总体偏低;

(2) 预测效果排名前八的模型都是以 Zuber 公式 [2] 为基本形式,说明在诸多池沸腾 CHF 机理中,基于 Helmholtz 不稳定性的水动力学解释最贴近实际;

表 3 现有公式对实验数据的误差分布

Tab. 3 Distribution of the errors of the test data obtained by using the currently-available formulae

参考文献	$MAD/\%$	$MRD/\%$	$SD/\%$	MAD <30%
El-Genk - Guo ^[9]	26.2	-4.3	34.3	69.7
Arik - Bar-Cohen ^[12]	26.6	-10.1	31.8	62.4
Brusstar - Merte ^[11]	27.1	-7.1	34.9	64.9
El-Genk - Bostanci ^[13]	27.4	-11.3	32.3	60.3
Chang - You ^[10]	27.5	-14.1	32.5	60.0
Liao 等 ^[7]	28.2	9.6	40.6	66.4
Vishnev ^[8]	28.2	-14.2	31.1	57.7
Kandlikar ^[5]	29.3	7.9	41.0	65.7

(3) 这 8 个模型对 Zuber 公式的修正都与方位角有关^[2],说明在诸多因素中,加热面方位角是影响 CHF 的最主要的因素之一;

(4) El-Genk - Guo 和 Arik - Bar-Cohen 公式的 MAD 都在 27% 以内^[9,12],在应用范围上均没有限制,使用范围较广,形式较为简单明了,推荐使用。

总体预测性能最好的前 2 个模型的误差分析示于图 1 和图 2。从图中可见,二者的预测性能极为相似,预测误差随 q_{CHF} 的分布比较均匀。

表 4 分析了前 8 个模型对于不同制冷剂对池沸腾临界热流密度预测结果的影响。综合来看,El-Genk - Guo 模型对各制冷剂的预测效果相对较稳定^[9], MAD 都在 30% 以内。此外,不同模型对于不同制冷剂的预测精度不同。例如,文献 [7] 中模型对于氦的 MAD 最大,为 40.7%,而对于氮、氢、水的 MAD 最小,分别为 5.2%、19.3% 和 25.9%。需要

说明的是,池沸腾临界热流密度关系式都是在有限实验数据的基础上提出的,有其相应的适用条件和范围局限性,因而不适宜推广和扩展。在大量实验数据验证时的较大误差并不能否定关系式在特定条件下的适用性。

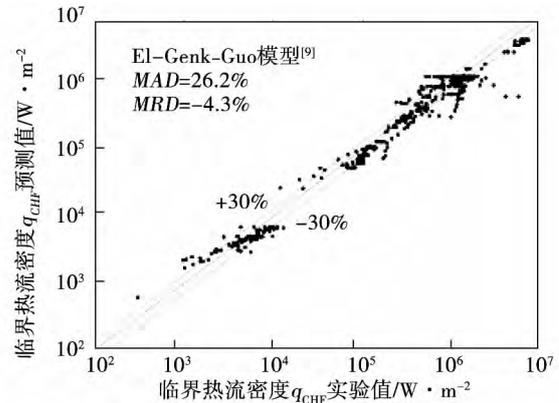


图 1 El-Genk - Guo 模型的 CHF 预测值与实验值比较

Fig. 1 Comparison of the value of the critical heat flux density predicted by using the El-Genk - Guo model with the test value

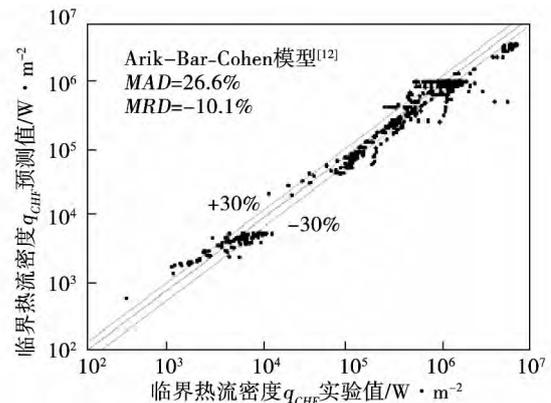


图 2 Arik - Bar-Cohen 模型的 CHF 预测值与实验值比较

Fig. 2 Comparison of the value of the critical heat flux density predicted by using the Arik - Bar-Cohen model with the test value

表 5 给出了前 8 个模型对于不同加热面方位角对 CHF 预测结果的影响。从中可见,当加热面处于水平位置时,除文献 [5] 中模型预测效果较差外,各模型 MAD 都在 26% 左右。当加热面竖直放置时,

除 Liao 等模型预测效果较差外^[7],各模型预测效果相当, MAD 都在 25% 左右。当方位角在 0° ~ 90° 范围内变化时, Brusstar - Merte 模型能更好地跟随

q_{CHF} 随方位角的变化趋势^[11]。当 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时, 各模型预测效果普遍较差, 表现最好的是文献 [12、9] 中的模型, 其 MAD 为 29.0%。

表 4 最佳的 8 个模型对不同制冷剂实验数据的预测结果(%)

Tab.4 Test data of various refrigerants predicted by using the eight optimum models (%)

模型	水		氨		液氮		氩		其它制冷剂	
	MAD	MRD	MAD	MRD	MAD	MRD	MAD	MRD	MAD	MRD
Kandlikar ^[5]	32.5	8.7	29.4	4.9	12.0	12.0	25.6	23.3	21.4	-17.8
Liao 等 ^[7]	25.9	6.8	40.7	22.6	5.2	0.2	19.3	10.4	25.5	-24.1
Vishnev ^[8]	29.4	-13.9	29.1	-9.5	27.2	-26.9	23.8	-9.0	25.5	-15.8
El-Genk - Guo ^[9]	28.5	-3.9	28.7	0.4	18.3	-16.7	20.8	1.2	22.1	-6.5
Chang - You ^[10]	28.6	-12.1	30.0	-1.7	22.5	-22.5	23.8	-9.0	25.4	-14.7
Brusstar - Merte ^[11]	27.2	-9.0	35.3	6.8	16.8	-11.2	23.8	-9.0	25.2	-14.0
Arik - Bar-Cohen ^[12]	27.2	-10.7	30.3	-0.7	20.6	-19.8	23.8	-9.0	25.3	-14.8
El-Genk - Bostanci ^[13]	28.3	-12.0	30.1	-1.2	22.7	-22.6	23.9	-9.2	25.4	-15.1

表 5 最佳的 8 个模型对不同方位角实验数据的预测结果(%)

Tab.5 Test data of various orientation angles predicted by using the eight optimum models (%)

模型	水平		0° < θ < 90°		竖直		90° < θ ≤ 180°	
	MAD	MRD	MAD	MRD	MAD	MRD	MAD	MRD
Kandlikar ^[5]	30.6	12.2	— ^b	—	25.1	-11.4	—	—
Liao 等 ^[7]	26.7	3.3	—	—	42.7	42.4	—	—
Vishnev ^[8]	26.8	-11.7	28.7	-0.6	26.0	-12.4	36.5	-34.3
El-Genk - Guo ^[9]	25.8	-1.8	27.9	10.1	24.5	-3.4	29.0	-23.8
Chang - You ^[10]	26.8	-11.7	25.0	5.8	23.9	4.0	35.4	-33.0
Brusstar - Merte ^[11]	26.8	-11.7	22.9	9.7	28.5	20.7	29.6	-20.5
Arik - Bar-Cohen ^[12]	26.8	-11.7	24.8	5.7	24.2	4.1	28.9	-24.7
El-Genk - Bostanci ^[13]	26.9	-11.9	25.3	4.5	24.2	4.5	33.8	-31.3

b—数据超出该公式规定的范围或不适用。

4 加热面方位角对临界热流密度的影响

分析加热面方位角对池沸腾临界热流密度的影响时,保持工质类型、系统压力、加热面材料大小等参数不变,考察临界热流密度随方位角的变化情况。

预测效果较好的这 5 个公式随方位角 θ 的变化情况如图 3 ~ 图 5 所示。图 3 的数据来自文献 [41] 图 4 的数据来自文献 [8] 图 5 的数据来自文献 [34]。

从图 3 ~ 图 5 可以看出以下几点:

(1) 对于池沸腾传热,临界热流密度随加热面方位角的变化而变化。当方位角小于某一角度时,临界热流密度随方位角的增大而缓慢减小。此时,这种影响可以忽略不计;当方位角大于某一角度时,临界热流密度值迅速降低,并且减小的幅度越来越大。这种现象产生的主要原因是,方位角越大,气泡越难从加热壁面上的活化穴中自由脱离。逐渐堆积的气泡降低了传热效率,使系统过早达到沸腾临界点;

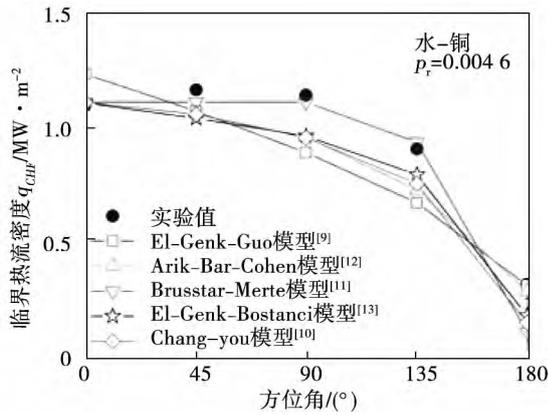


图 3 方位角对池沸腾 CHF 的影响: 公式预测值与文献 [41] 的实验值比较

Fig. 3 Effect of the orientation angle on the pool boiling critical heat flux density: Comparison of the value predicted by using the formulae with the test value obtained in the literature No. 41

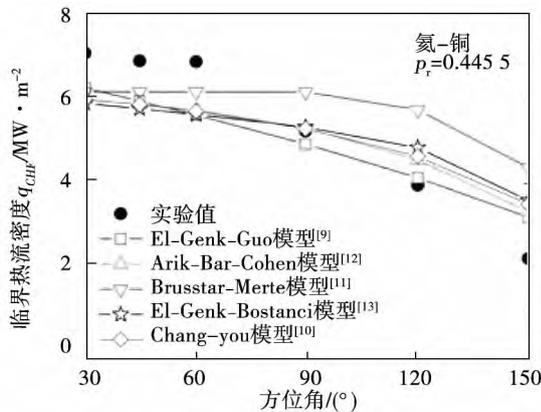


图 4 方位角对池沸腾 CHF 的影响: 公式预测值与文献 [8] 的实验值比较

Fig. 4 Effect of the orientation angle on the pool boiling critical heat flux density: Comparison of the value predicted by using the formulae with the test value in the literature No. 8

(2) 总的来说,前 5 个最好模型对于加热面方位角都有较好的跟随能力。从临界热流密度随方位角的变化趋势上来看,El-Genk-Guo 和 Brusstar-Merte 公式的跟随性较好^[9,11],误差也相对较小;

(3) 当方位角小于 90° 时,各公式的预测效果相对较好,但预测值普遍偏小。当方位角超过 90°,各公式的误差偏大,最大误差出现在方位角接近

180° 时。

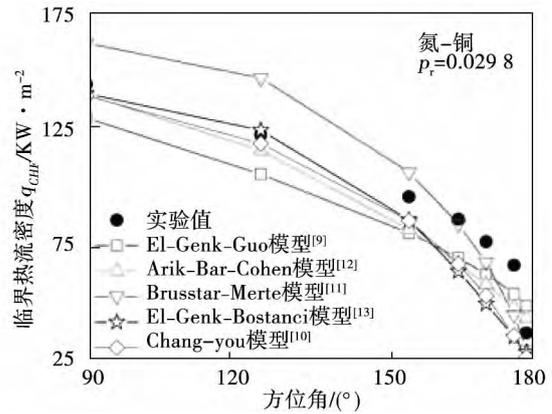


图 5 方位角对池沸腾 CHF 的影响: 公式预测值与文献 [34] 的实验值比较

Fig. 5 Effect of the orientation angle on the pool boiling critical heat flux density: Comparison of the value predicted by using the formulae with the test value obtained in the literature No. 34

5 结 论

本文从 27 篇公开发表的论文中收集了 468 组池沸腾临界热流密度的实验数据,用此对 20 个临界热流密度公式进行评价分析。

通过本文的评价分析,可以得出如下结论:

(1) 池沸腾临界热流密度模型都是在有限实验数据的基础上提出的,因而各有其局限性。模型的准确度和使用范围,需在大量实验和工业应用过程中不断提高和扩大;

(2) 许多研究者对各种模型进行了评价,但因其使用的数据库不同,评价结果各异。文献 [9] 中模型在多数评价中表现出较好的预测准确度,推荐在计算中优先选用;

(3) 预测效果最好的公式的 MAD 是 26.2%,说明池沸腾临界热流密度的计算仍缺乏令人满意的公式。当方位角接近 180° 时,各公式误差普遍较大,还需进一步研究;

(4) 排名前五的公式都是以 Zuber 公式为基本形式^[2]在其基础上加以修正,修正系数仅与方位角有关。说明在诸多因素中,加热面方位角的大小

是影响临界热流密度大小的最主要因素之一。其它因素(如工质类型、加热面材料、过热度、系统压力等)对临界热流密度的影响机理尚未可知,需进一步实验研究和理论分析;

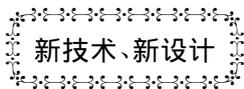
(5) 对于实际应用,在相同条件下预测效果较好的池沸腾临界热流密度关系式的基础上,合理有效地引入临界热流的影响因素,提出新的关系式,是有待解决的问题。

参考文献:

- [1] Guan C K, Klausner J F, Mei R. A new mechanistic model for pool boiling CHF on horizontal surfaces [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2011, 54(17): 3960–3966.
- [2] Zuber N. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer [M]. California Univ., Los Angeles, 1959.
- [3] Kirichenko Y A, Chernyakov P S. Determination of the first critical thermal flux on flat heaters [J]. *Eng. Phys*, 1971, 20(6): 699–703.
- [4] Lienhard J H, Dhir V K. Hydrodynamic prediction of peak pool-boiling heat fluxes from finite bodies [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1973, 95: 477–482.
- [5] Kandlikar S G. A theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation [J]. *Heat Transfer* 2001, 123(6): 1071–1079.
- [6] Sakashita H, Ono A. Boiling behaviors and critical heat flux on a horizontal plate in saturated pool boiling of water at high pressures [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer* 2009, 52(34): 744–750.
- [7] Liao L, Bao R, Liu Z H. Composite effects of orientation and contact angle on critical heat flux in pool boiling of water [J]. *Heat and Mass Transfer* 2008, 44(12): 1447–1453.
- [8] Vishnev L P. Effect of Orienting the hot surface with respect to the gravitational field on the critical Nucleate boiling of a liquid [J]. *Journal of Engineering Physics*, 1973, 24(1): 43–48.
- [9] El-Genk M S, Guo A. Transient boiling from inclined and downward-facing surfaces in a saturated pool [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1993, 6: 414–422.
- [10] Chang J Y, You S M. Heater orientation effects on pool boiling of micro-porous-enhanced surfaces in saturated FC-72 [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1996, 118: 937–943.
- [11] Brusstar M J, Merte H. Effects of buoyancy on the critical heat flux in forced convection [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1994, 8: 322–328.
- [12] Arik, Bar-Cohen. Ebullient cooling of integrated circuits by Novec fluid [C]. *Proceedings of the Pacific Rim Intersociety Electronics Packaging Conference, Kauai, Hawaii*: 2001: 13–18.
- [13] El-Genk M S, Bostanci H. Saturation boiling of HFE-7100 from a copper surface, simulating a microelectronic chip [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer* 2002, 46: 1840–1854.
- [14] Kim Y H, Suh K Y. One-dimensional critical heat flux concerning surface orientation and gap size effects [J]. *Nuclear Engineering and Design* 2003, 226(3): 277–292.
- [15] Howard A H, Mudawar I. Orientation effects on pool boiling critical heat flux (CHF) and modeling of CHF for near-vertical surfaces [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1999, 42(9): 1665–1688.
- [16] Chang Y P, Snyder N W. Heat transfer in saturated boiling [J]. *Chem. Eng. Progr.*, 1960, 56(30): 25–28.
- [17] Chang Y P. An analysis of the critical conditions and burnout in boiling heat transfer [J]. *USAEC Rep. TID-14004*, Washington, DC, 1961.
- [18] Theofanous T G, Dinh T N. High heat flux boiling and burnout as microphysical phenomena: Mounting evidence and opportunities [J]. *Multiphase Science and Technology* 2006, 18(3)??.
- [19] Haramura Y, Katto Y. New hydrodynamic model of critical heat flux applicable widely to both pool and forced convection boiling on submerged bodies in saturated liquids [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1983, 26(3): 389–399.
- [20] Kutateladze S S. A hydrodynamic theory of changes in boiling process under free convection [J]. *Izv. Akademia Nauk Otdelime Tekh Nauk*, 1951, 4: 529–336.
- [21] Rohsenow W M, Griffith P. Correlation of maximum heat transfer data for boiling of saturated liquid [R]. *Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, Division of Industrial Cooperation*, 1955.
- [22] Bailey W, Young E, Beduz C, et al. Pool boiling study on candidature of pentane, methanol and water for near room temperature cooling [C]. *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, THERM06* 2006: 599–603.
- [23] Wang C H, Dhir V K. Effect of surface wettability on active nucleation site density during pool boiling of water on a vertical surface [J]. *ASME J. Heat Transfer*, 1993, 115: 659–669.
- [24] Liaw S P, Dhir V K. Effect of surface wettability on transition boiling heat transfer from a vertical surface [C]. *Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference*, 1986, 4: 2031–2036.
- [25] Ramilison J M, Lienhard J H. Transition boiling heat transfer and film transition regime [J]. *Int. J. Heat Transfer*, 1987, 109(3): 746–752.
- [26] Deev V I, Keilin V E, Kovalev L A, et al. Nucleate and film pool boiling heat transfer to saturated liquid helium [J]. *Cryogenics*, 1977, 17: 557–562.
- [27] Abuaf N, Staub F W. Low pressure pool boiling and critical heat flux limits for R-133 [J]. *Am. Inst. Chem. Eng. Symp.* 1983, 225(79): 35–40.
- [28] Bonilla C F, Perry C W. Heat transmission to boiling binary liquid

- mixtures [J]. Transactions of American Society of Chemical Engineers ,1941 ,37: 685 - 705.
- [29] Sakurai A ,Shiotsu M. Temperature-controlled pool boiling heat transfer [J]. Proceedings of the Fifth International Heat Transfer Conference ,1974 ,4(3) : 81 - 85.
- [30] Saeidi D ,Alemrajabi A A. Experimental investigation of pool boiling heat transfer and critical heat flux of nanostructured surfaces [J]. Int. J. Heat Mass Transfer ,2013 ,60: 440 - 449.
- [31] Hahne E ,Diesselhorst T. Hydrodynamic and surface effects on the peak heat flux in pool boiling [C]. Proc. 6th Int. Heat Transfer Conference ,Toronto ,1978 ,1: 209 - 214.
- [32] Ahn H S ,Kim H ,Jo H J ,et al. Experimental study of critical heat flux enhancement during force convective flow boiling of nanofluid on a short heated surface [J]. Int. J. Multiphase Flow ,2010 ,36: 375 - 384.
- [33] Jergel M ,Stevenson R. Static heat transfer to liquid helium in open pools and narrow channels [J] ,Int. J. Heat Mass Transfer ,1971 ,14: 2099 - 2107.
- [34] Beduz C ,Scurlock R. G ,Sousa A J. Angular dependence of boiling heat transfer mechanisms in liquid nitrogen [J]. Advances in Cryogenic Engineering ,1988 ,33: 363 - 370.
- [35] Nishio S ,Chandratilleke G R. Steady-state pool boiling heat transfer to saturated liquid helium at atmospheric pressure [J]. JSME International Journal ,1989 ,32(2) : 639 - 645.
- [36] Guo Z ,El-Genk M S. An Experimental study of saturated pool boiling from downward facing and inclined surfaces [J] ,Int. J. Heat Mass Transfer ,1992 ,35: 2109 - 2117.
- [37] Yang S H ,Baek W P ,Chang S H. Poolboiling critical heat flux of water on small plates: Effects of surface orientation and size [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer ,1997 ,24: 1093 - 1102.
- [38] Mudawar I ,Howard A H ,Gersey C O. An analytical model for near-saturated pool boiling critical heat flux on vertical surfaces [J]. Int. J. Heat Mass Transfer ,1997 ,40: 2327 - 2339.
- [39] Ono A ,Sakashita H. Measurement of surface dryout near heating surface at high heat fluxes in subcooled pool boiling [J]. Int. J. Heat Mass Transfer ,2009 ,52(3 - 4) : 874 - 827.
- [40] Tatsumoto H ,Shirai Y ,Hata K ,et al. Forced convection heat transfer of subcooled liquid nitrogen in horizontal tube [C]. Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference-CEC ,Vol. 53. AIP Publishing ,2008 ,985(1) : 665 - 672.
- [41] Kwark S M ,Kumar R ,Moreno G et al. Poolboiling characteristics of low concentration nanofluids [J] ,Int. J. Heat Mass Transfer ,2010 ,53(5 - 6) : 972 - 981.
- [42] Bewilogua L ,Bewilogua L ,Vinzellberg H. Heat transfer in cryogenic liquids under pressure [J]. Cryogenics ,1975 ,15(3) : 121 - 125.
- [43] Kim H D ,Kim J ,Kim M H. Experimental studies on CHF characteristics of nano-fluids at pool boiling [J]. Int. J. Multiphase Flow ,2007 ,33: 691 - 706.

(刘 瑶 编辑)



新技术、新设计

26 型护卫舰将安装 CODLOG 推进装置

据《Warship Technology》2015 年 5 月刊报道 2015 年 3 月英国国防部确认 ,BAE Systems 已接受 26 型全球战斗护卫舰订货合同。

设计用来代替现有 23 型护卫舰 26 型护卫舰的长度将为 149 m 排水量约 6 000 t 将由 CODLOG(柴油机电力推进或燃气轮机联合) 推进装置驱动 续航力达 7 000 海里 ,最大航速至少 26 节 ,可容纳船员 208 人。

燃气轮机具有比质量和尺寸小、机组功率大、机动性和可靠性高、适于自动化、可以整机更换等优点 ,因而被广泛用于先进的护卫舰上。在 26 型护卫舰上 ,燃机用作为加速机组。

CODLOG 柴油机-电力装置用作 26 型护卫舰的巡航机组。柴-燃装置具有柴油机经济性高的特点 ,而柴油机-电力推进具有降低噪声的优点。

(吉桂明 摘译)

基于两相流的微通道冷却技术研究进展及展望 = **Research Progress and Prospects of Micro-channel Cooling Technology Based on Two-phase Flow** [刊, 汉] ZHOU Yun-long, SUN Zhen-guo (School of Energy and Power Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(7). -1 ~ 6

With the development of the science and technology, a relatively high temperature may gradually limit the power output of a large power component and the studies currently focus on the dimensions of the channels and structural optimization etc. In addition, the working media are relatively singular and the most majority of the phase change emerge in the form of boiling. The study of the cooling in micro-channels relating to non-phase change two-phase flows is relatively less. The flow patterns serve as the basis for probing into the behavior of a two-phase flow and may produce a direct influence on the heat and mass transfer characteristics. Upon the completion of a summing-up of the research results of researchers both at home and abroad, the authors have viewed the prospects of the micro-channel cooling technology in the actual applications of the PV batteries. One may attempt to apply the multi-phase flows in the cooling of the solar power cells, therefore enhancing its power generation efficiency. **Key words:** micro-channel, two-phase flow, flow pattern, cooling technology

池沸腾临界热流密度关系式分析研究 = **Analysis and Study of the Pool Boiling Critical Heat Flux Density Correlation Formula** [刊, 汉] DONG An-qi, FANG Xian-de (College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016), HUANG Yong-kuan (Hongdu No. 650 Research Institute, China Aviation Industry Corporation, Nanchang, China, Post Code: 330024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(7). -7 ~ 14

With respect to the calculation of the pool boiling critical heat flux density, a great many of correlation formulae were proposed. In the design of engineering projects, it is necessary to be aware of the adaptability of these correlation formulae and to analyze the currently-available calculation methods in the study of a new calculation model. The test data and the number of the correlation formulae involved in the evaluation and analysis of the currently available formulae are limited, leading to a great difference between the evaluation results. A total of 468 groups of data were collected from 27 literatures and used to compare the accuracy and applicable range of the commonly-used 20 critical heat flux density calculation formulae and the formulae in comparatively good agreement with the test data were sifted out. It has been found that El-Genk-Guo formula, which is the best of all, has an average absolute error of 26.2%. To this end, it is necessary to find out a more accurate formula. Moreover, the factors influencing the accuracy of the formulae were analyzed, thus offering reference for proper design of relevant equipment items. **Key words:** pool boiling, critical heat flux density, heat transfer, correlation formula

直接接触式蒸汽发生器传热性能分析 = **Analysis of the Heat Transfer Performance of a Direct Contact Type Steam Generator** [刊, 汉] HUANG Jun-wei (College of Electromechanical Engineering, Yunnan Agricultur-