

# 微重力流动沸腾临界热流密度预测 经验关联式

刘斌<sup>1</sup> 袁博<sup>1</sup> 赵建福<sup>2,4</sup> 张永海<sup>1</sup> 魏进家<sup>1,3</sup> 杨扬<sup>5</sup>

(1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 西安 710049;

2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;

3. 西安交通大学动力工程多相国家重点实验室, 西安 710049;

4. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049;

5. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

**摘要** 本文总结了文献中微重力流动沸腾临界热流密度 (CHF) 研究的实验数据, 并构建了微重力流动沸腾 CHF 数据库。进一步地, 分析了流速、加热面长度和通道截面尺寸对微重力流动沸腾 CHF 与常重力对应条件下流动沸腾 CHF 的比值 ( $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$ ) 的影响规律。根据流速、加热面长度和通道截面尺寸对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响进行无量纲分析并提出了一个改进的微重力流动沸腾 CHF 预测关联式, 该关联式的预测结果与实验值吻合良好, 误差在  $\pm 12\%$  以内。

**关键词** 微重力; 流动沸腾; 临界热流密度; 经验关联式

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2020)10-2479-05

## An Empirical Correlation for Prediction of Critical Heat Flux of Flow Boiling in Microgravity

LIU Bin<sup>1</sup> YUAN Bo<sup>1</sup> ZHAO Jian-Fu<sup>2,4</sup> ZHANG Yong-Hai<sup>1</sup> WEI Jin-Jia<sup>1,3</sup> YANG Yang<sup>5</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. CAS Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

4. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, 19A Yuquan Rd, Beijing 100049, China;

5. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract** In the present study, the experimental data of the critical heat flux (CHF) of flow boiling in microgravity reported in literature was summarized. A database was established based on the flow boiling CHF experimental data in microgravity. Furthermore, the effects of flow velocity, heating surface length and channel cross-sectional size on the ratio of CHF of flow boiling in microgravity to that in normal gravity were dimensionlessly analyzed. An improved empirical correlation to predict the flow boiling CHF in microgravity was developed. The prediction results of the developed correlation were shown in good agreement with the experimental data within  $\pm 12\%$ .

**Key words** microgravity; flow boiling; critical heat flux; empirical correlation

## 0 引言

流动沸腾广泛应用于热管理系统, 能源动力系统和高功率电子设备的散热<sup>[1]</sup>。众所周知, 由于浮力的缺失, 微重力下的流动沸腾传热性能与常重力下存在明显不同<sup>[2]</sup>。因此, 研究微重力流动沸腾换热对于空间设备的热管理和电子器件散热具有重要意义。CHF 是决定核态沸腾传热上限的参数, 也是

两相传热系统设计的重要参数。然而, 由于微重力条件难以达到, 以及流动沸腾实验系统的复杂性, 关于微重力流动沸腾 CHF 的研究鲜有报道<sup>[3]</sup>。

Ohta<sup>[4]</sup> 首次报道了微重力流动沸腾 CHF 的测量, 但是由于缺乏壁温的测量, 该测量值并不准确。Ma 和 Chung<sup>[5]</sup> 测量了常/微重力下以铂电阻丝

**收稿日期:** 2020-04-27; **修订日期:** 2020-09-23

**基金项目:** 中国科协第四届青年人才托举工程 (No.2018QNRC001); 中欧载人航天合作空间应用合作项目 (No.TGMTYY00-RW-05-1.00); 国家自然科学基金资助项目 (No.51636006, No.51506169); 西安交通大学基本科研业务费 (No.xjj2017085, No.cxttd2017004)

**作者简介:** 刘斌 (1992-), 男, 博士研究生, 主要从事不同重力水平下的沸腾传热强化及机理研究。 **通信作者:** 魏进家, 教授, E-mail: jjwei@mail.xjtu.edu.cn.

为加热器的流动沸腾 CHF。发现微重力下 CHF 远低于常重力下的 CHF，但是随着流速的提高，微重力下的 CHF 与常重力下的差别逐渐缩小。

鉴于微重力下的流动沸腾 CHF 难于测量，因此通过分析不同条件下重力对微重力与常重力流动沸腾 CHF 的比值 ( $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$ ) 的影响规律，即可通过常重力下的实验数据预测得到微重力下的 CHF 值。Zhang 等 [6] 测试了在不同重力条件下不同入口液体速度的单侧加热矩形通道中的流动沸腾 CHF。他们发现  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  随入口速度的增加而增加。当入口速度大于临界值 ( $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 时，重力水平的影响可以忽略不计 ( $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g} \geq 0.9$ )。而 Konishi 等 [7] 发现，在相同条件下，双侧加热的矩形通道中的流动沸腾传热性能优于单侧加热矩形通道，且在相同入口速度下，双侧加热矩形通道中的流动沸腾  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  值大于单侧加热矩形通道。Zhang 等 [8,9] 测量了微重力下单侧加热矩形通道中光滑表面和柱状微结构表面的过冷流动沸腾 CHF，并发现除了流速以外，加热面长度、通道截面尺寸和表面改性对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  也存在显著影响。Liu 等 [10] 提出了一种微重力流动沸腾 CHF 的地面近似实验方法，即微重力中的 CHF 可以通过常重力下加热面倾角为  $315^\circ$  和  $135^\circ$  时的 CHF 范围来近似，并通过落塔实验证明了该方法的正确性。

本文基于目前文献报道的微重力流动沸腾实验结果，建立了微重力流动沸腾 CHF 数据库，并通过无量纲分析研究了流速，加热面长度和通道高度对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  影响规律，建立了预测  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的经验关联式。

## 1 微重力流动沸腾 CHF 数据库

对于微重力沸腾传热而言， $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  是一个非常重要的参数，因为只需要找到影响  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的因素和对应的规律，就可以通过常重力下的地面实验的 CHF 值获得对应工况下微重力 CHF。Zhang 等 [6] 认为当微重力下流动沸腾 CHF 与对应条件下常重力下 CHF 的比值  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g} \geq 0.9$  时，重力对流动沸腾 CHF 的影响可以忽略 (本文依然使用这一结论作为流动沸腾 CHF 的重力无关判据)。为了获取实验条件对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响规律，本文总结了目前文献报道的微重力流动沸腾 CHF 实验数据 [4-10]。其中，Ohta 并没有获得精确的 CHF 实验数据，因此本文不予考虑。具有较为精确的微重力流动沸腾 CHF 实验数据的文献总结于表 1 中。

从表 1 可以总结出，目前为止报道微重力流动沸腾 CHF 的文献还很少，因此数据库中的数据点

表 1 关于微重力流动沸腾 CHF 文献的总结

Table 1 Summary of literature referring to the flow boiling CHF in microgravity

研究者	实验平台	重力水平	沸腾工质	加热器类型、尺寸及布置方式	实验工况
Ma 和 Chung [5]	落塔	$10^{-4}g$	FC-72	铂电阻丝 ( $D = 0.254 \text{ mm}$ , $L = 20 \text{ mm}$ ); 垂直于来流方向水平布置	$V = 0.078 \sim 0.3 \text{ m/s}$ ; $T_{in} = (30 \pm 2)^\circ\text{C}$ ; $P = (112 \pm 3) \text{ kPa}$
Zhang 等 [6]	抛物线飞机	$10^{-2} \sim 10^{-3}g$	FC-72	光滑铜表面, $L \times w \times H = 101.6 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ; 单侧加热水平向上布置	$P_{out} = 138 \sim 152 \text{ kPa}$ ; $\Delta T_{sub,out} = 2 \sim 23 \text{ K}$ ; $V = 0.14 \sim 1.5 \text{ m/s}$
Konishi 等 [7]	抛物线飞机	$10^{-2} \sim 10^{-3}g$	FC-72	光滑铜表面, $L \times w \times H = 114.6 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ; 双侧加热水平布置	$V = 0.1 \sim 1.9 \text{ m/s}$ ; $T_{in} = 56.5 \sim 64.7^\circ\text{C}$ ; $\Delta T_{sub,in} = 2.8 \sim 8.1 \text{ K}$ ; $P_{out} = 118.2 \sim 148.3 \text{ kPa}$
Zhang 等 [8]	落塔	$10^{-2}g$	FC-72	光滑硅表面, $L \times w \times H = 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ; 单侧加热水平向上布置	$V = 0.5 \text{ m/s}$ ; $T_{in} = (41 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ; $\Delta T_{sub,in} = (15 \pm 0.5) \text{ K}$ ; $P_{out} = 100 \text{ kPa}$
Zhang 等 [9]	落塔	$10^{-2}g$	FC-72	柱状微结构硅表面, $L \times w \times H = 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ; 单侧加热水平向上布置	$V = 0.5$ 和 $1.0 \text{ m/s}$ ; $T_{in} = (41 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ; $\Delta T_{sub,in} = (15 \pm 0.5) \text{ K}$ ; $P_{out} = 100 \text{ kPa}$
Liu 等 [10]	落塔	$10^{-2}g$	FC-72	光滑硅表面, $L$ 分别为 $10, 20$ 和 $40 \text{ mm}$ , $w = 10 \text{ mm}$ , $H$ 分别为 $3$ 和 $5 \text{ mm}$ ; 单侧加热水平向上布置	$V = 0.5$ 和 $1.0 \text{ m/s}$ ; $T_{in} = (41 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ; $\Delta T_{sub,in} = (15 \pm 0.5) \text{ K}$ ; $P_{out} = 100 \text{ kPa}$

注: 表中  $D$  表示铂电阻丝的直径;  $L$ ,  $w$  和  $H$  分别表示加热面长度, 加热面宽度和通道高度;  $V$ ,  $T$ ,  $P$  和  $\Delta T_{sub}$  分别表示流速、液体温度、压力和过冷度; in 和 out 分别代表进口和出口。

很少。各文献的微重力流动沸腾 CHF 数据点对比与图 1 中,值得注意的是, Zhang 等<sup>[8]</sup>虽然获得了光滑硅表面的 CHF 结果,但是该组工况后来被 Liu 等<sup>[10]</sup>重复并获得了更为精确的 CHF 值,因此, Zhang 等<sup>[8]</sup>的实验数据在后续的分析中并没有体现在图 1 中。

从图 1 的对比可以发现如下几点规律: 1) 从各文献自身数据的纵向对比来看,  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  随着流速的增大而增大, 这是因为流体惯性力和表面张力是微重力下主导气泡脱离的主要因素, 且由于微重力下的毛细长度  $L_c(L_c \equiv [\sigma/g(\rho_l-\rho_g)]^{0.5})$  远大于常重力下, 入口流速的越大, 就越容易克服气泡的表面张力对流动沸腾 CHF 的影响。2) 除了流速以外, 加热面长度和布置方式对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  存在显著影响, 例如, 随着加热面长度的不同, Liu 等<sup>[10]</sup>的  $V=0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的三组实验数据 L40V05H3、L20V05H3 和 L10V05H3 出现了明显的差异 (L40V05H3、L20V05H3 和 L10V05H3 分别表示  $L=40 \text{ mm}$ 、 $V=0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $H=3 \text{ mm}$ ;  $L=20 \text{ mm}$ 、 $V=0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $H=3 \text{ mm}$ ;  $L=10 \text{ mm}$ 、 $V=0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $H=3 \text{ mm}$  三组工况)。Konishi 等<sup>[7]</sup>的双侧加热试验结果与其他试验工况近乎一致的单侧加热试验结果也存在显著不同。3) 表面改性对微重力下的 CHF 影响显著, 如 Zhang 等<sup>[9]</sup>的柱状微结构表面的  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  明显低于相同条件下光滑硅表面的  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$ 。因此, 不同条件下的流动沸腾 CHF 的重力无关临界流速并不是固定不变的, 而是随着实验条件的改变而改变。

过无量纲分析提出了一套判断准则, 发现, 如果重力对沸腾 CHF 的影响可以忽略, 则必须满足三个条件:

$$\frac{Bo}{We^2} = \frac{(\rho_l - \rho_g)(\rho_l + \rho_g)^2 \sigma g}{\rho_l^2 \rho_g^2 V^4} \leq 0.09 \quad (1)$$

$$\frac{1}{Fr} = \frac{(\rho_l - \rho_g)gD_h}{\rho_l V^2} \leq 0.13 \quad (2)$$

$$We_{eL} = \frac{\rho_l \rho_g V^2 L}{(\rho_l + \rho_g)\sigma} \geq 2\pi \quad (3)$$

其中,  $Bo$  是 Bond 数 ( $Bo \equiv g(\rho_l - \rho_g)D_h^2 / \sigma$ ),  $We$  为 Weber 数 ( $We \equiv \rho_l V^2 D_h / \sigma$ ),  $We_{eL}$  是基于加热表面长度的 Weber 数,  $Fr$  是 Froude 数。根据该准则, 可以获得临界流速和加热表面长度之间的关系。从式 (1)~(3) 可以计算得到, Zhang 等<sup>[6]</sup>的临界流速约为  $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 而 Liu 等<sup>[6]</sup> $L=10、20$  和  $40 \text{ mm}$  的临界流速分别计算为  $0.84、0.71$  和  $0.71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。但是, 从图 1 可以看出, 当流速仅为  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, L20V05H03 和 L10H05H03 的  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  就已经大于  $0.9$ , 明显小于该准则计算的临界流速。这说明当加热面长度较短时, 该准则存在较大误差。这进一步说明, 还需要对影响微重力流动沸腾 CHF 的影响因素做更为深入的研究, 以更精确地预测各种条件下微重力流动沸腾 CHF 和找出重力无关的临界流速。

## 2 预测关联式的拟合

从前面的分析发现, 在预测微重力流动沸腾 CHF 时, 有必要同时考虑流速、加热面长度、通道横截面尺寸和表面改性的影响。为此, Zhang 等<sup>[9]</sup>建立了一个预测  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的经验关联式, 如式 (4) 所示:

$$q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g} = 0.179We^{0.325}Ch^{0.196}Sf^{2.568} + K \quad (4)$$

其中,  $Ch$  和  $Sf$  分别为无量纲通道数和表面数, 分别表征通道及表面的几何尺寸和表面改性对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响。  $K$  是在  $V=0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 即池沸腾的  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  值。  $Ch$ 、 $Sf$  和  $K$  的表达式分别为:

$$Ch = \frac{p_h}{p_w} \frac{1}{Eo} \frac{L}{L_c} = \frac{p_h L}{p_w h^2 \sqrt{g(\rho_l - \rho_g)} / \sigma} \quad (5)$$

$$Sf = q_{CHF(SS-1g)} / q_{CHF(m-1g)} \quad (6)$$

$$K = 0.40Ch^{0.05}Sf^{-0.64} \quad (7)$$

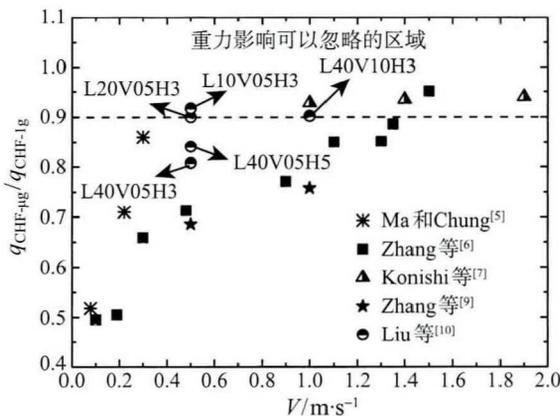


图 1 同实验条件下流速对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响

Fig. 1 Influence of flow velocity on  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  under different experimental conditions

为了寻找不同条件下的流动沸腾 CHF 的重力无关临界流速与实验条件的关系, Zhang 等<sup>[11]</sup>通

其中,  $p_h/p_w$  和  $L/L_c$  来分别表征通道截面和加热面长度对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响 ( $p_h$  和  $p_w$  分别代表通道横截面的加热周长和润湿周长)。  $Eo \equiv g(\rho_l - \rho_g)h^2/\sigma$  为表征通道垂直于重力方向的高度对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响的无量纲数。但是, 由于数据十分有限, Zhang 等<sup>[9]</sup> 对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响因子及影响因素的描述不够准确。比如, 目前微结构表面在微重力下的流动沸腾 CHF 数据库中仅涉及两种表面: 光滑表面和柱状微结构表面, 无法通过拟合获得一个十分准确的关系式。此外, 流速、通道尺寸、加热面长度等对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响程度并不一致, 因此, 该公式还存在很大的局限性。分别考虑  $We$ 、 $p_h/p_w$ 、 $Eo$  和  $L/L_c$  对光滑表面单侧加热流动沸腾  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响, Liu 等<sup>[12]</sup> 改进了 Zhang 等<sup>[9]</sup> 提出的关联式, 其表达式为:

$$\frac{q_{CHF-\mu g}}{q_{CHF-1g}} = 0.473We^{0.299} \left(\frac{p_h}{p_w}\right)^{0.155} Eo^{-0.04} \left(\frac{L}{L_c}\right)^{-0.153} + 0.40Ch^{0.05} \quad (8)$$

式(8)充分考虑了各个因素对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响, 并根据 Liu 等<sup>[10]</sup> 提出的微重力流动沸腾 CHF 地面近似实验方法, 对微重力下实验数据进行了大量的扩充, 从而使该关联式的预测更为精准。但是, 式(8)中的  $K$  依然与  $Ch$  有关, 且指数 0.05 为一假设的值, 目前尚无直接的流动沸腾实验数据作为支撑。因此, 有必要进一步对式(8)进行改进, 以增强关联式的科学性。

根据 Zhang 等<sup>[9]</sup> 对大量池沸腾实验结果的总结, 池沸腾的  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的值在 0.31~0.53 之间, 平均值为 0.4。虽然微重力下沸腾池受限程度对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响规律尚无文献报导, 但是可以根据相关文献进行推测。Zhang 等<sup>[6]</sup> 微重力流动沸腾实验的通道高度仅为 5 mm, 而加热表面长度为 101.6 mm, 在接近 CHF 时, 加热表面下游的气泡合并非常剧烈, 因此沸腾状态受限程度很高。Ma 和 Chung<sup>[5]</sup> 微重力流动沸腾实验所用的通道高度 20 mm, 铂电阻丝加热器直径仅为 0.245 mm, 且垂直于来流方向水平布置于通道正中央, 因此其沸腾不受限通道限制。Ma 和 Chung<sup>[5]</sup> 实验的最低流速为 0.078 m·s<sup>-1</sup>, 而 Zhang 等<sup>[6]</sup> 的最低流速为 0.1 m·s<sup>-1</sup>, 这两者均非常接近池沸腾状态。通过对这两组实验结果的拟合可以推测出(如图 2 所示), Zhang 等<sup>[6]</sup> 的受限条件下  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  值在  $V=0.0$  m·s<sup>-1</sup> 时为 0.372, Ma 和 Chung<sup>[5]</sup> 的不受限条件下

$q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  值则为 0.393, 由此可见受限程度对  $V=0.0$  m·s<sup>-1</sup> 时  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响不大, 且两种情况下  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}|_{V=0}$  均与 0.400 非常接近, 因此本文中  $K$  取 0.400 是合理的。

值得注意的是, Baldassari 和 Marengo<sup>[2]</sup> 指出, 当重力趋于零或通道直径趋于零时, 通道高度(或者  $Eo$  数)对流沸腾传热中起着重要作用。然而, 目前的数据库中的通道高度范围非常狭窄(3~5 mm), 且式(8)中  $Eo$  的指数仅为 -0.05, 说明其对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响很小。因此, 本文并没有考虑通道高度对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响。

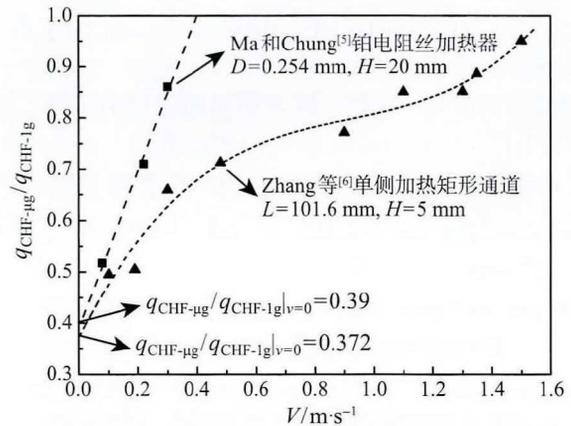


图 2 受限/不受限条件对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响  
Fig. 2 Effect of confined/unconfined conditions on  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$

根据表 1 所述的数据库中平板加热器的实验结果(Ma 和 Chung<sup>[5]</sup> 使用丝线加热器, 其实验规律与平板加热器存在较大差距, 因此本文不做考虑)以及 Liu 等<sup>[12]</sup> 的地面近似实验结果, 本文采用多元线性回归方法对式(8)的关联式进行了进一步的改进。改进后的关联式:

$$q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g} = 0.566We^{0.274} \left(\frac{p_h}{p_w}\right)^{0.237} \left(\frac{L}{L_c}\right)^{-0.108} + 0.400 \quad (9)$$

图 3 比较了式(9)的预测结果与实验值的比较。可以发现, 计算结果与实验数据非常吻合, 偏差在  $\pm 12\%$  以内。从式(9)可以发现,  $We$ 、 $p_h/p_w$  和  $L/L_c$  对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  有显著影响, 这表明在微重力流动沸腾应用中, 流速、通道截面尺寸和加热表面长度的影响需要谨慎地考虑。在本研究中为拟合经验关联式涵盖的实验数据范围为: 实验工质为 FC-72;  $V = 0.2 \sim 1.9$  m·s<sup>-1</sup>;  $L = 10 \sim 114.6$  mm; 过冷度  $\Delta T_{sub} = 3 \sim 15$  K;  $H = 3 \sim 5$  mm。

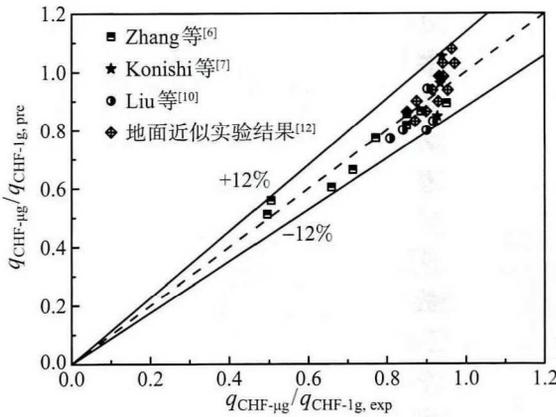


图 3 式 (5) 对  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  预测值与实验的对比  
Fig. 3 Comparison of the predicted  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  value of Eq. (5) with the experimental data

### 3 结 论

本文总结了文献中微重力流动沸腾 CHF 的实验结果, 建立了微重力流动沸腾 CHF 数据库。进一步地, 本文引入  $We$ ,  $p_h/p_w$  和  $L_c$  这三个无量纲特征数, 分析了流速、加热面长度和通道截面尺寸对流动沸腾  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的影响, 并提出了一个改进的  $q_{CHF-\mu g}/q_{CHF-1g}$  的预测经验关联式, 该关联式的预测结果与文献值吻合良好, 误差在  $\pm 12\%$  以内。

### 参 考 文 献

- [1] Mudawar I. Assessment of High-Heat-Flux Thermal Management Schemes [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001, 24(2): 122-141
- [2] Baldassari C, Marengo M. Flow Boiling in Microchannels and Microgravity [J]. Progress in Energy and Combustion

Science, 2013, 39(1): 1-36

- [3] Konishi C, Mudawar I. Review of Flow Boiling and Critical Heat Flux in Microgravity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 80: 469-493
- [4] Ohta H. Experiments on Microgravity Boiling Heat Transfer by Using Transparent Heaters [J]. Nucleate Engineering Design, 1997, 175: 167-180
- [5] MA Y, Chung J N. An Experimental Study of Critical Heat Flux (CHF) in Microgravity Forced-Convection Boiling [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27: 1753-1767
- [6] ZHANG H, Mudawar I, Hasan M M. Flow Boiling CHF in Microgravity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(15): 3107-3118
- [7] Konishi C, Lee H, Mudawar I, et al. Flow Boiling in Microgravity: Part 1 - Interfacial Behavior and Experimental Heat Transfer Results [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 81: 705-720
- [8] ZHANG Y H, LIU B, Zhao J F, et al. Experimental Study of Subcooled Flow Boiling Heat Transfer on a Smooth Surface in Short-Term Microgravity [J]. Microgravity Science Technology, 2018, 30(5): 793-805
- [9] ZHANG Y H, LIU B, Zhao J F, et al. Experimental Study of Subcooled Flow Boiling Heat Transfer on Micro-Pin-Finned Surfaces in Short-Term Microgravity [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 97: 417-430
- [10] LIU B, YUAN B, XU P Z, et al. A Method for Approximating the CHF of Subcooled Flow Boiling in Microgravity by Ground Tests [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 122: 103161
- [11] ZHANG H, Mudawar I, Hasan M M. Application of Flow Boiling for Thermal Management of Electronics in Microgravity and Reduced-Gravity Space Systems [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2009, 32(2): 466-477
- [12] LIU B, YUAN B, ZHOU J, et al. Analysis of the Critical Heat Flux of Subcooled Flow Boiling in Microgravity [J/OL]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, DOI:10.1016/j.expthermflusci.2020110238