

低温流体大空间膜态沸腾换热预测

王磊¹, 谢福寿¹, 朱康¹, 马原¹, 厉彦忠^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 100028, 北京)

摘要: 为了预测低温流体膜态池沸腾换热特性,研究了文献中涉及低温流体膜态池沸腾换热的实验数据,并根据加热面结构对数据进行了分类整理。以此为基础,与3种典型膜态沸腾换热模型(Bormley模型、Frederking模型和Breen & Westwater模型)的预测结果进行了对比分析,探讨了现有模型在预测不同结构加热面低温流体沸腾换热时的适用性与精度,实现了低温流体膜态沸腾换热的准确预测。研究发现,对于低温系统预冷过程,在分析膜态沸腾传热时可不考虑辐射热的影响,但必须考虑加热面结构的影响。对于水平管与球形加热面,可分别选用Bromley公式与Frederking公式预测沸腾传热系数;对于平板与丝状结构表面,分别修正了Frederking公式与Breen & Westwater公式,修正后两模型预测误差均小于15%。研究内容为低温换热系统的设计及运行提供了可靠的理论支持。

关键词: 低温流体;膜态沸腾;经验公式;运载火箭;传热

中图分类号: V434 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)04-0131-08

Improved Correlations of Film Boiling Heat Transfer for Pool Boiling of Cryogenic Fluid

WANG Lei¹, XIE Fushou¹, ZHU Kang¹, MA Yuan¹, LI Yanzhong^{1,2}

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

2. State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Beijing 100028, China)

Abstract: To predict the heat transfer characteristics of cryogenic fluid film pool boiling, the experimental data concerning film pool boiling of cryogenic fluid are summarized and classified according to heater geometries. Then three typical film boiling heat transfer correlations, which include Bormley model, Frederking model and Breen & Westwater model, are validated, and their applicability and predictive accuracy in analyzing the film boiling heat transfer on different heater geometries are comparatively discussed. Following the validation study and correlation modification, a series of correlations for the heaters with different geometries are obtained to accomplish accurate prediction of the heat transfer characteristics of cryogenic fluid film pool boiling. It is found that in the precooling process of cryogenic system, the radiation heat transfer can be ignored due to its tiny proportion to the total heat transfer, while the geometry effect ought to be taken into consideration; for the heat transfer cylinder tube and sphere heaters, Bromley's and Frederking's correlations are suggested. For the plate and wire heaters, it is

收稿日期: 2015-10-11。 作者简介: 王磊(1985—),男,讲师,博士后;厉彦忠(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51406142);航天低温推进剂技术国家重点实验室基金资助项目(SKLTSCP1407);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2016-01-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160104.1839.006.html>

necessary to modify Frederking's and Breen & Westwater's correlations in terms of experimental data, and the deviations from the modified correlations are lower than 15%.

Keywords: cryogenic fluid; film boiling; empirical correlation; launch vehicle; heat transfer

低温火箭在燃料加注前,往往需要对整个燃料系统开展充分的预冷,以确保加注过程的顺利进行。伴随着金属壁温的逐渐降低,金属表面依次经历膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾及单相液体对流换热。已有的研究表明,膜态沸腾换热在低温预冷中居于支配地位。在金属壁温由室温 288 K 降至流体饱和温度的过程中,膜态沸腾温降分别占液氢、液氮预冷总温降的 95.5%、83.3%^[1],对于液氧预冷,膜态沸腾温降占比也达到了 77.3%^[2]。由此可见,构建恰当的膜态沸腾换热公式,开展预冷过程的定量分析对于低温系统的设计与运行至关重要。

国内外学者已经就膜态沸腾换热开展了持续一个多世纪的研究,并采用水、制冷剂等常温流体进行了地面沸腾实验,获得了大量的实验数据。鉴于低温流体在现代工业、航天领域的重要意义,也有学者关注了低温流体的膜态沸腾换热规律。文献[3]发现 Bromley 公式在预测低温流体的膜态沸腾换热特性时具有较高精度。文献[4]发现对于采用球形、水平管、平板等结构的加热面,膜态沸腾换热规律间并无显著区别,均可采用 Frederking 公式预测其换热系数。文献[5]认为对于大尺度加热表面,加热器尺寸对换热强度的影响可以忽略。文献[6]指出当加热面温度较高时,辐射热的影响不能忽略。文献[7]研究了两种膜态沸腾换热模型的有效性,发现 Bromley 公式针对丝状加热器的换热系数预测结果偏低,而 Breen & Westwater 公式预测精度相对较好。文献[8]研究了球形表面结构的膜态沸腾换热规律,并推导了该结构对应的换热系数预测公式。文献[9]以铜平板液氮沸腾为对象,研究了加热方位角对沸腾换热的影响,结果发现方位角对临界热流密度、最小膜态沸腾热流影响较大。文献[10]获得了光滑铜表面与泡沫铜表面热流密度随表面过热度的对应曲线。文献[11]搭建了液氮池沸腾实验平台,测试了不同热流下液氮核态沸腾的气泡行为与传热性能,但对膜态沸腾换热未作详细介绍。

综上可知,国内外学者已就低温流体膜态沸腾换热开展了持续多年的研究,并构建了多套可预测膜态沸腾换热系数的经验公式。然而,由于沸腾过程自身的复杂性,现有的预测公式往往仅在特定工况范围内适用,不同模型预测结果间往往存在较大

误差,此外加热面结构会对膜态沸腾的气膜厚度及稳定性产生影响,进而影响换热强度。因此,很难构建单一的经验公式来准确预测各种加热面对应的沸腾换热系数,且现有预测公式针对各种加热面结构的适用性尚未得到确认。本文收集了文献中涉及低温流体膜态沸腾换热的实验数据,通过充分的对比研究考核了 3 种典型换热模型——Bromley 公式、Frederking 公式、Breen & Westwater 公式针对不同结构加热面换热预测的有效性,并利用实验数据修正预测公式,从而为低温换热系统的设计及运行提供可靠的数学工具支持。

1 沸腾曲线

图 1 展示了典型的流体沸腾曲线,横坐标 ΔT 为壁面过热度,纵坐标 q 为换热热流。由图可知,3 个临界点(核态沸腾起始点,临界热流密度点,膜态沸腾起始点)将整个沸腾曲线分为 4 个区间:单相液体自然对流、核态沸腾、过渡沸腾、膜态沸腾。在膜态沸腾区,气膜将整个加热面所覆盖,阻止了液体与加热面接触。相对于液体直接接触加热面的核态沸腾区,膜态沸腾换热强度受到抑制,且换热强度主要受气膜厚度及稳定性的影响。此外,相对于流体饱和温度,处于膜态沸腾区的加热面温度往往较高。因此,在开展膜态沸腾传热研究时,通常也要考虑加热面与气液界面间的辐射换热。

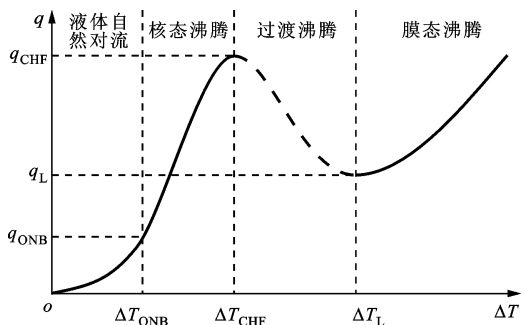


图 1 典型的流体沸腾曲线

2 膜态沸腾换热模型

2.1 Bromley 公式^[12]

Bromley 以水平圆管为加热源,推导了可预测膜态沸腾换热系数的经验公式,具体形式如下

$$Nu = C(Ra')^m \quad (1)$$

$$Nu = \frac{\alpha_{co} D}{\lambda_v} \quad (2)$$

$$Ra' = \frac{D^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g \left(\frac{c_p \mu}{\lambda} \right)_v h'_{fg} \left(\frac{a}{g} \right)}{\mu_v^2} \quad (3)$$

$$h'_{fg} = 0.4 + \frac{h_{fg}}{c_{pv} \Delta T} \quad (4)$$

式中: α_{co} 为对流换热系数; D 为换热面的特征长度,对于圆管换热面取管外径; λ_v 、 ρ_l 、 ρ_v 、 μ_v 、 c_{pv} 分别表示气相导热系数、液相密度、气相密度、气相动力黏性系数、气相比热容; h_{fg} 为汽化潜热; a 与 g 分别为研究对象所处位置的重力加速度及地面重力加速度。确定物性时低温流体的定性温度取加热面与流体饱和温度的平均值。

对于式(1)中的系数,与液氮膜态沸腾实验数据对比后,Bromley给出了 $C=0.62$, $m=1/4$ 。

2.2 Frederking 公式^[4]

Frederking分析了球形加热器表面的沸腾实验数据,推导了与Bromley公式相似的膜态沸腾换热公式。其中,式(3)中修正汽化潜热项采用如下关系式代替

$$h'_{fg} = 0.5 + \frac{h_{fg}}{c_{pv} \Delta T} \quad (5)$$

对应地,式(1)的系数 $C=0.15$, $m=1/3$ 。

2.3 Breen & Westwater 公式^[13]

Breen & Westwater基于Taylor不稳定原理推导了如下可预示膜态沸腾换热系数的经验公式。相对于其他模型,该模型考虑了表面张力对膜态沸腾传热特性的影响

$$\alpha_{co} \left(\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right)^{1/8} \left(\frac{\mu_l \Delta T}{\lambda_l^3 \rho_l g h'_{fg}} \right)^{1/4} = a + b \left(\frac{\sigma}{g D^2 (\rho_l - \rho_v)} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$h'_{fg} = \frac{(h_{fg} + 0.34 c_{pl} \Delta T)^2}{h_{fg}} \quad (7)$$

式中: $a=0.37$, $b=0.28$; σ 为表面张力; μ_l 、 λ_l 、 c_{pl} 分别为液相动力黏性系数、导热系数与比热容。

3 预测公式有效性研究

3.1 辐射热影响

在分析膜态沸腾换热时,Bromley考虑了辐射热的影响^[12],指出膜态沸腾阶段的总换热系数 α 由气体对流换热 α_{co} 与辐射换热 α_r 两部分构成

$$\alpha = \alpha_{co} + \frac{3}{4} \alpha_r \quad (8)$$

$$\alpha_r = C_r \left(\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_l} - 1 \right)^{-1} \frac{T_w - T_{sat}}{\Delta T} \quad (9)$$

式中: C_r 为Stefan-Baltzman常数, $C_r=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ϵ_w 、 ϵ_l 分别为金属加热面、气液界面发射率,在近似计算中取 $\epsilon_l=1$; T_w 为加热面温度; T_{sat} 为饱和温度。

图2展示了不同 ϵ_w 下辐射换热系数随加热壁温变化的情况,其中流体取0.1 MPa下的饱和液氮。从图中可以看出,在加热器表面温度由饱和温度升至室温的过程中,辐射换热系数均小于0.5 W/(m²·K)。相对于气体对流换热系数100~400 W/(m²·K)^[5],辐射换热所占份额非常有限。因此,在开展低温系统预冷计算时,可忽略辐射热的影响。

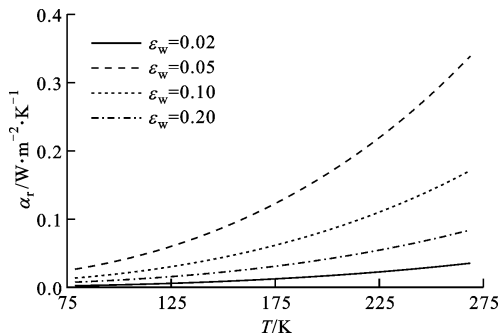


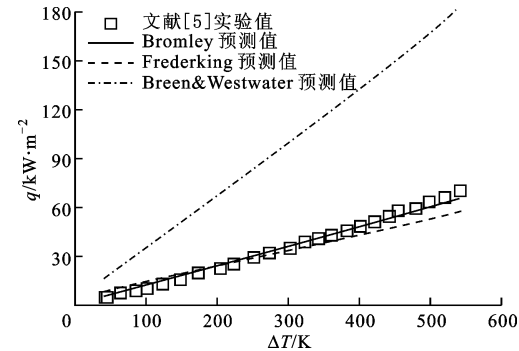
图2 辐射换热系数随加热壁温的变化规律

3.2 膜态沸腾换热预测值与实验值对比

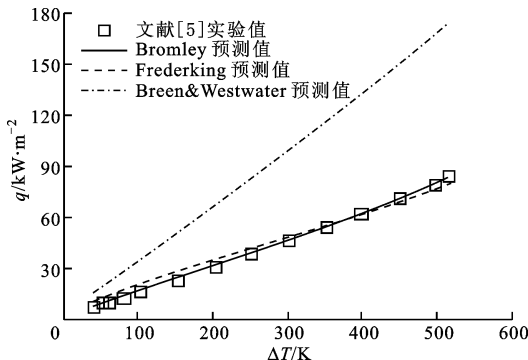
本文收集了文献中涉及液氮膜态池沸腾的实验数据。这些数据涵盖了多种加热表面及不同压力工况,为评价上述预测模型的适用范围及精度提供了充分的数据支持。图3~图6分别展示了水平圆管、球形、平板、丝状加热表面对应液氮膜态沸腾换热实验值与上述3种模型预测值的对比情况。由图3可知,针对水平管型加热表面,Bromley公式与Frederking公式均能较好地预测膜态沸腾换热系数,相对而言,Bromley公式在不同压力下的预测精度更高,而Breen & Westwater公式预测结果明显偏高。对于球形加热面,Frederking公式具有较高的预测精度,而其他两种公式预测结果偏低,见图4。

图5展示了平板加热表面对应实验值与预测值的对比情况。其中,图5a中竖直平板一侧为加热面,另一侧绝热;图5b中平板两侧同为加热面,图中所示结果为两侧加热面所测热流密度的平均值;图5c、图5d分别为加热面朝上、朝下两种工况对应结果。综合对比发现,Frederking公式可近似预测水平朝上加热面的膜态沸腾传热强度,而对于其他朝向的平板表面,3种模型预测值与实验值间均存在

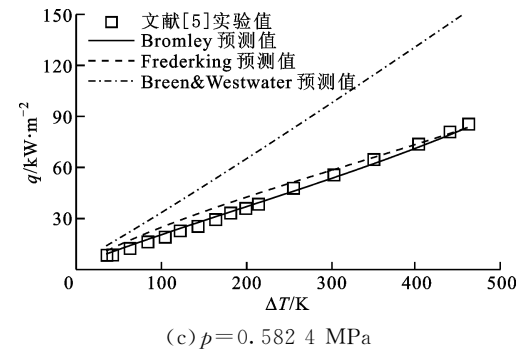
较大误差。相对而言,水平朝上加热面对应换热热流高于竖直加热面与水平朝下加热面对应结果。当加热面朝上时,浮力驱动气膜内气体以气泡的形式



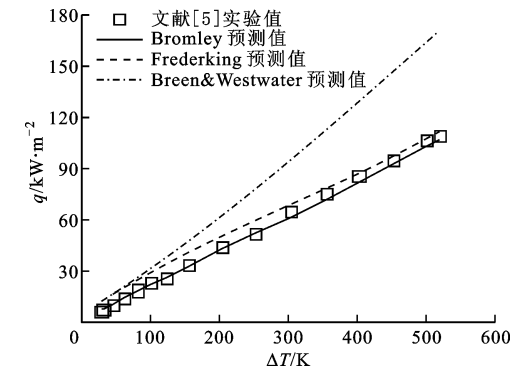
(a) $p=0.1013\text{ MPa}$



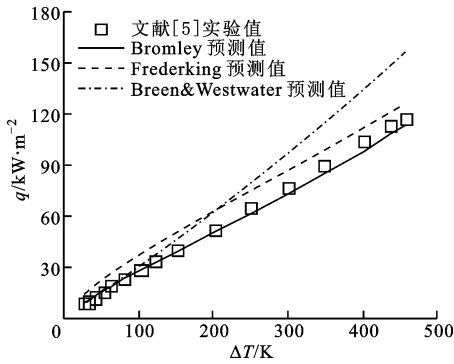
(b) $p=0.3022\text{ MPa}$



(c) $p=0.5824\text{ MPa}$



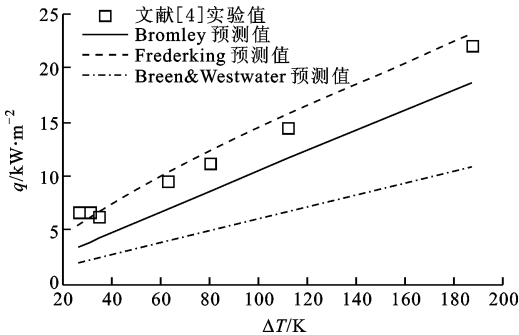
(d) $p=1.016\text{ MPa}$



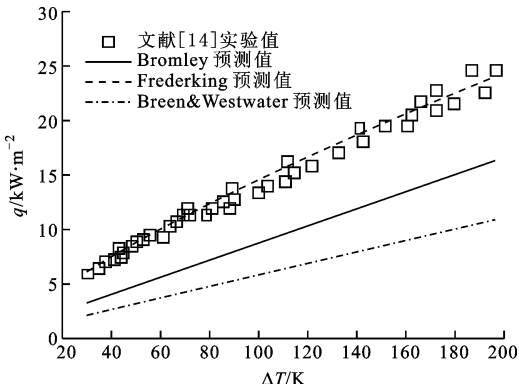
(e) $p=1.836\text{ MPa}$

图 3 水平管加热面膜态沸腾换热实验值与预测值对比

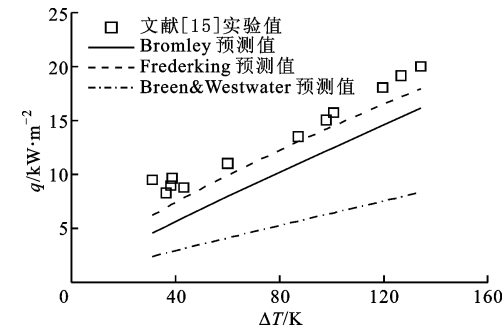
不断从表面脱落,从而对加热面的气膜产生扰动,促进了气膜层内气体对流换热;当加热面朝下时,加热面的存在阻止了气泡的脱落,气膜层相对增厚,气体对流换热强度被抑制,总传热系数降低;对于竖直放置的平板,气泡的脱落并不会对气膜层的厚度及形状产生明显扰动,因而气膜内的对流换热也相对较弱。图 6 展示了丝状加热表面对应结果。对于 4 种不同直径的丝状结构,Bromley 公式与 Frederking 公式预测结果偏低,而 Breen & Westwater 公式预测结果偏高。由此可见,上述 3 种公式不能精确预测丝状加热面、平板加热面的膜态沸腾换热系数。



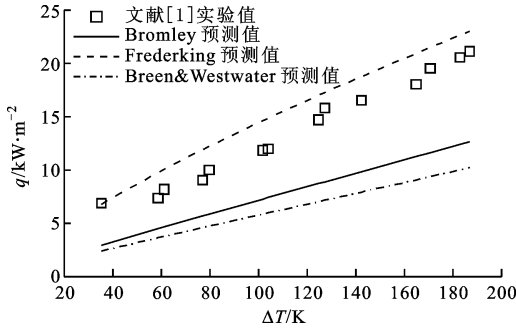
(a) $D=12.7\text{ mm}, p=0.1\text{ MPa}$



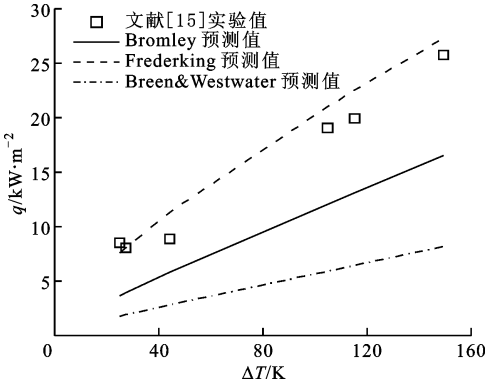
(b) $D=25.4\text{ mm}, p=0.1\text{ MPa}$



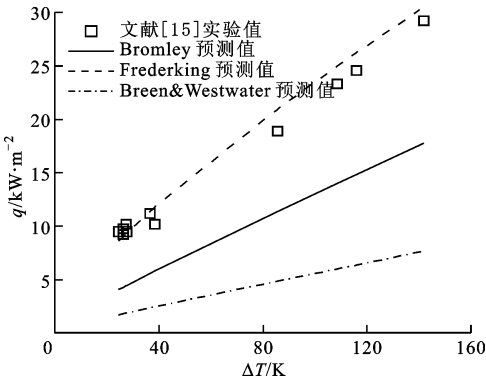
(c) $D=6.35\text{ mm}$, $p=0.1\text{ MPa}$



(d) $D=57.15\text{ mm}$, $p=0.1\text{ MPa}$



(e) $D=25.4\text{ mm}$, $p=0.3\text{ MPa}$

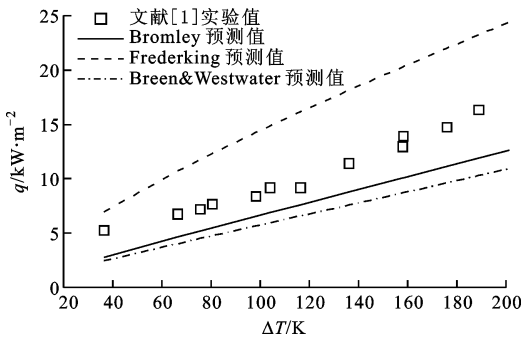


(f) $D=25.4\text{ mm}$, $p=0.5\text{ MPa}$

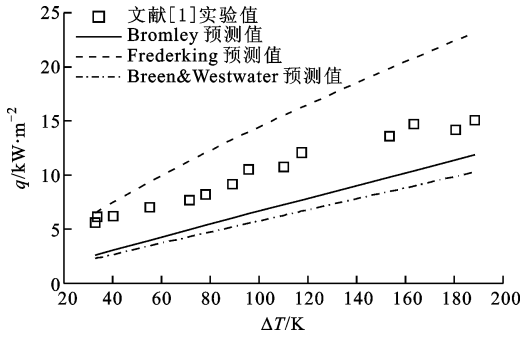
图 4 球型加热面膜态沸腾换热实验值与预测值对比

4 预测公式修正

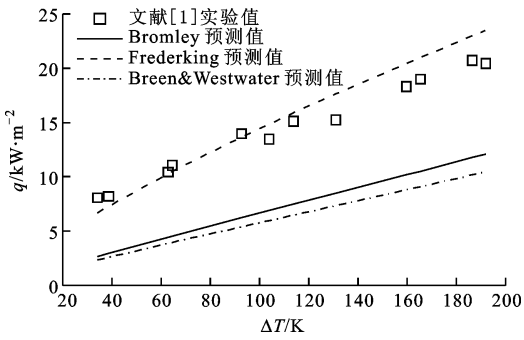
如前所述,上述 3 种换热模型在预测不同角度



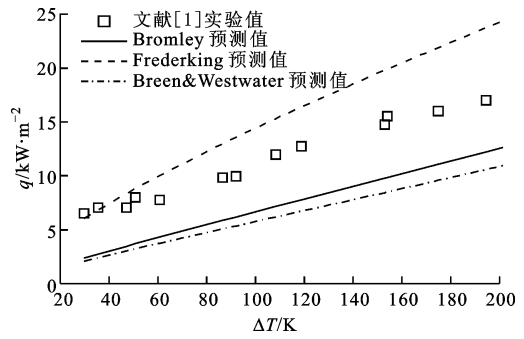
(a) 竖直板单侧加热



(b) 竖直板两侧加热



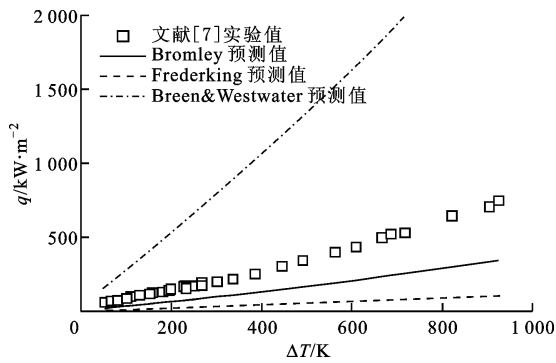
(c) 水平板热面朝上



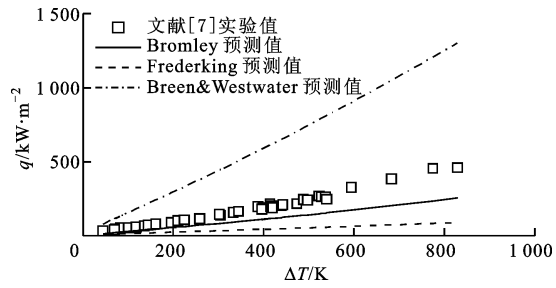
(d) 水平板热面朝下

图 5 平板加热面膜态沸腾换热实验值与预测值对比

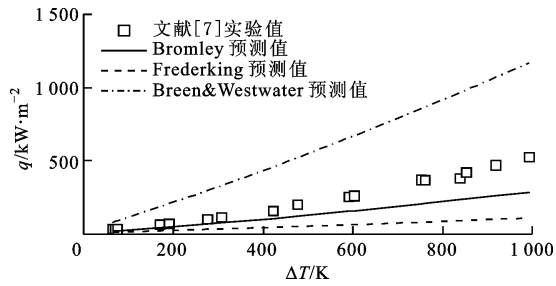
平板、丝状加热面对应的换热系数时存在明显偏差。为此,本文以实验数据为依据,对相关预测模型进行修正。有学者指出, Frederking 公式可预测竖直面、水平管、球形加热面对应的膜态沸腾传热系数^[4]。



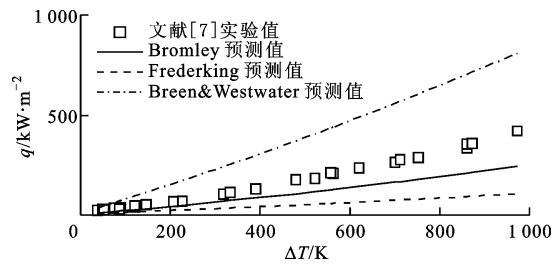
(a) $D=0.1\text{ mm}$



(b) $D=0.2\text{ mm}$



(c) $D=0.3\text{ mm}$



(d) $D=0.5\text{ mm}$

图6 丝状加热面膜态沸腾换热实验值与预测值对比

上述对比结果表明, Frederking 公式适用于水平管加热面、球形加热面及水平朝上加面对应的膜态沸腾换热预测。为了实现公式的统一性, 本文仍以 Frederking 公式为基础, 根据实验数据修正式(1)中系数 C 、 n , 以期实现对其他朝向平板换热系数的准确预测。图7展示了竖直平板上沸腾换热实验数据对应 $\lg Nu$ 随 $\lg Ra'$ 变化的曲线, 并采用最小二乘法拟合了二者的线性关系曲线。同理, 也对水平朝上、

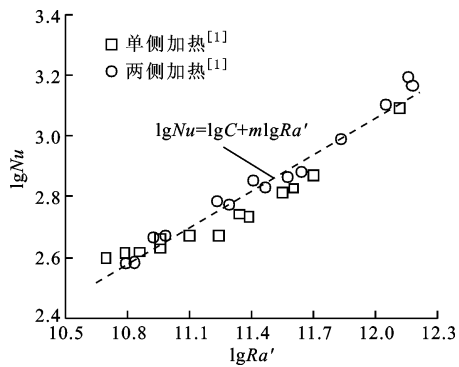
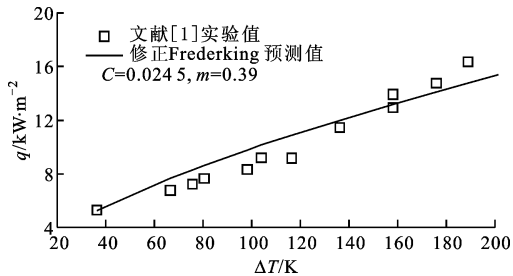


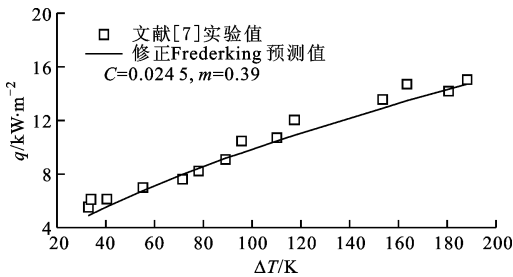
图7 竖直平板加热表面膜态沸腾 Nu 随 Ra' 的变化关系

水平朝下加热平板的换热系数开展了对比分析。图8展示了修正 Frederking 公式预测值与实验值对比情况。对比图8、图5可以看出, 修正后公式预测结果与实验值基本吻合。有学者指出, Breen & Westwater 公式针对丝状结构对应膜态沸腾换热系数具有较好的预测精度^[7]。本文也曾尝试以 Bromley 公式为基础修正丝状加热表面的预测公式, 然而丝状加热器对应数据的 $\lg Nu$ 与 $\lg Ra'$ 间并不存在明显的线性关系。基于此, 本文以式(6)为基础修正预测模型, 并通过分析实验数据获得了系数 a 、 b 的取值。图9展示了修正 Breen & Westwater 公式预测值与实验结果的对比情况, 同样可以看出, 修正公式预测值与实验结果基本吻合。

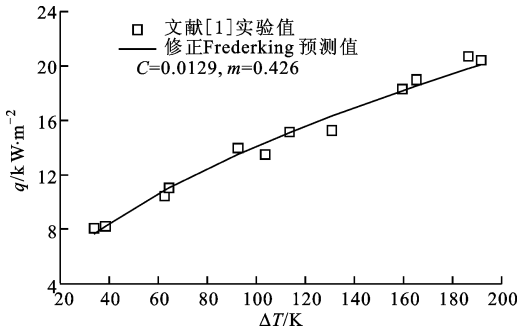
图10、图11分别展示了修正 Frederking 公式、修正 Breen & Westwater 公式针对平板加热面、丝状加热面沸腾换热系数预测值与实验值的误差分析。可以看出, 二者预测误差均控制在 $\pm 15\%$ 以内, 表明修



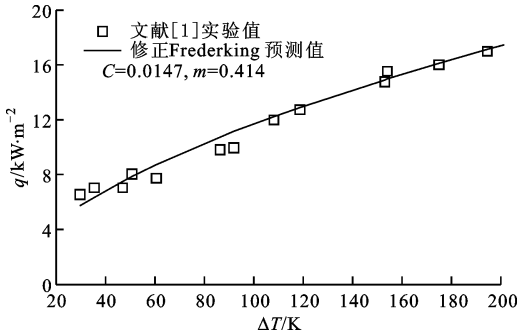
(a) 竖直板单侧加热



(b) 竖直板两侧加热



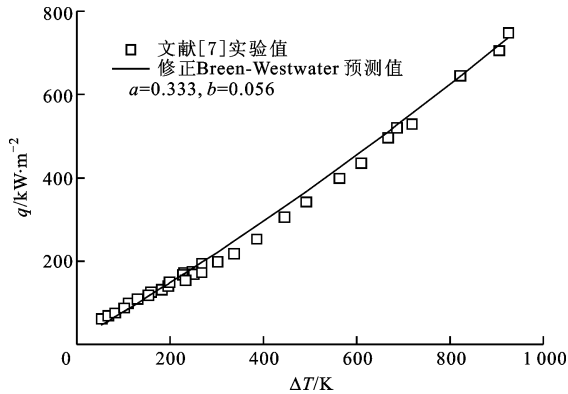
(c)水平板热面朝上



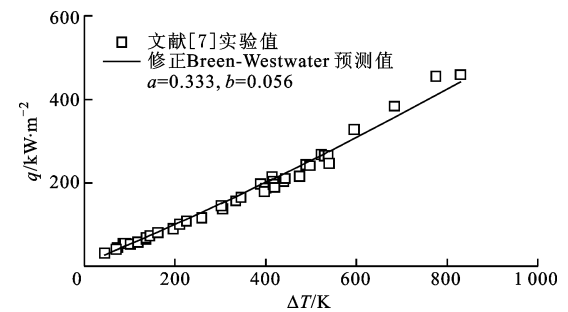
(d)水平板热面朝下

图 8 平板加热面修正 Frederking 公式预测值与实验值对比

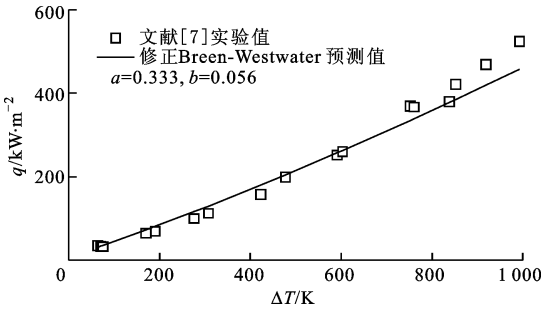
正模型在开展相关研究时具有较高的预测精度。
表 1 总结了经本文研究确认或修正后的适用于不同结构加热面膜态沸腾换热系数的预测公式。水



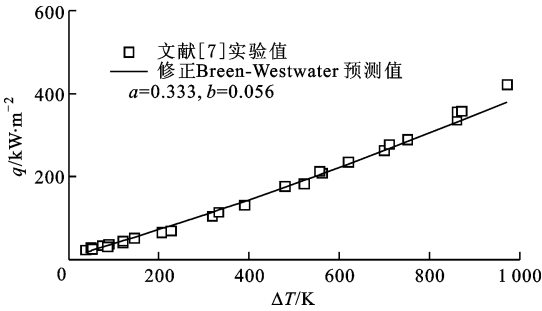
(a) $D=0.1\text{ mm}$



(b) $D=0.2\text{ mm}$



(c) $D=0.3\text{ mm}$



(d) $D=0.5\text{ mm}$

图 9 丝状加热面修正 Breen & Westwater 公式预测值与实验值对比

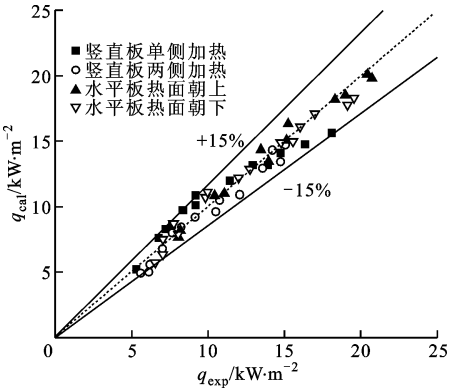


图 10 平板加热面修正 Frederking 公式预测结果误差分析

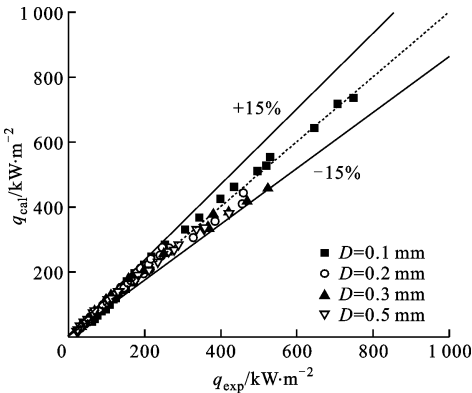


图 11 丝状加热面修正 Breen & Westwater 公式预测结果误差分析

表 1 不同结构加热表面膜态沸腾换热系数预测公式

加热结构	模型	预测公式	系数取值
水平管	Bromley	$\frac{\alpha_{co} D}{\lambda_v} = C \left[\frac{D^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g \left(\frac{c_{pl} \mu}{\lambda} \right)_v \left(0.4 + \frac{h_{fg}}{c_{pv} \Delta T} \right) \left(\frac{a}{g} \right)}{\mu_v^2} \right]^m$	$C = 0.62, m = 1/4$
球形	Frederking	$\frac{\alpha_{co} D}{\lambda_v} = C \left[\frac{D^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g \left(\frac{c_{pl} \mu}{\lambda} \right)_v \left(0.5 + \frac{h_{fg}}{c_{pv} \Delta T} \right) \left(\frac{a}{g} \right)}{\mu_v^2} \right]^m$	$C = 0.15, m = 1/3$
平板朝上			$C = 0.0129, m = 0.426$
平板朝下			$C = 0.0147, m = 0.414$
竖直平板			$C = 0.0245, m = 0.39$
丝状	Breen & Westwater	$\alpha_{co} \left(\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right)^{1/8} \left(\frac{\mu_l \Delta T}{\lambda^3 \rho_l g h'_{fg}} \right)^{1/4} = a + b \left(\frac{\sigma}{g D^2 (\rho_l - \rho_v)} \right)^{1/2}$ $h'_{fg} = \frac{(h_{fg} + 0.34 c_{pl} \Delta T)^2}{h_{fg}}$	$a = 0.333, b = 0.056$

平管加热面可选用 Bromley 公式;丝状表面换热系数采用修正 Breen & Westwater 公式;球形或平板加热面则推荐采用 Frederking 或修正 Frederking 公式。

5 结 论

(1)换热面形状、朝向会对膜态沸腾换热规律产生影响,相对而言,平板朝上结构的换热强度高于平板朝下及竖直平板对应结果。

(2)液氮膜态沸腾中,加热面与气液界面间的辐射换热系数小于 0.5 W/(m² · K),远低于气体对流项 100~500 W/(m² · K)的水平;对于典型的低温系统预冷过程,在分析膜态沸腾传热时可忽略辐射热的影响。

(3)开展低温流体膜态沸腾传热预测时应考虑加热结构的影响,水平管外表面的换热系数可采用 Bromley 公式,球型及平板加热面采用 Frederking 公式或其修正公式,丝状加热面采用修正 Breen & Westwater 公式,具体选用依据如表 1 所示。

本文工作有利于研究人员理解加热结构对膜态沸腾传热规律的影响,所验证或修正公式为开展低温换热系统的设计提供了可信的数学工具支持。

参考文献:

[1] MERTE H. Incipient and steady boiling of liquid nitrogen and liquid hydrogen under reduced gravity, ORA Project-07461, No. 7 [R]. Ann Arbor, USA: The University of Michigan, 1970.

[2] 王磊, 厉彦忠, 李翠, 等. 火箭发动机液氢预冷回路非稳态传热特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(5): 120-124.

WANG Lei, LI Yanzhong, LI Cui, et al. Study on un-

steady heat transfer characteristics of liquid hydrogen precooling loop of rocket engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(5): 120-124.

[3] SEADER J D, MILLER W S, KALVINSKAS L A. Boiling heat transfer for cryogenics, NASA CR-243 [R]. Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration, 1965.

[4] MERTE H, CLARK J A. Boiling heat transfer with cryogenic fluids at standard, fractional, and near-zero gravity [J]. Journal of Heat Transfer, 1964, 86(3): 351-358.

[5] SAKURAI A, SHIOTSU M, HATA K. Correlations for subcooled pool film boiling heat transfer from large surfaces with different configurations [J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 120(2/3): 271-280.

[6] SAUER H J, RAGSDALL K M. Film pool boiling of nitrogen from flat surfaces [J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1971, 16: 412-415.

[7] KIDA M, KIKUCHI Y, TAKAHASHI O, et al. Pool-boiling heat transfer in liquid nitrogen [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1981, 18(7): 501-513.

[8] HENDRICKS R C, BAUMEISTER K J. Film boiling from submerged spheres, NASA TN D-5124 [R]. Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration, 1969.

[9] 许建俊, 华泽钊, 刘宝林, 等. 饱和液氮中临界热流密度和最小膜态沸腾热流密度的实验研究 [J]. 低温工程, 1998(6): 23-27, 34.

XU Jianjun, HUA Zezhao, LIU Baolin, et al. The experimental study on critical heat flux density and minimum boiling heat flux density of saturated liquid nitrogen [J]. Cryogenic Engineering, 1998(6): 23-27, 34.

(下转第 158 页)