

常重力及微重力下液氢膜态沸腾换热预测

王磊¹, 朱康¹, 马原¹, 谢福寿¹, 厉彦忠^{1,2}
(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院 制冷与低温工程系, 西安 710049;
2. 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 北京 100028)

摘 要: 以液氢膜态沸腾换热为对象,收集并分析文献中涉及液氢膜态沸腾换热的实验数据。通过充分的对比研究,考核 3 种典型关系式针对液氢膜态沸腾换热预测的适用性与预测精度,建立可预测微重力下液氢膜态沸腾换热热流密度的数学关系式。研究发现:在地面重力下,加热面几何结构、朝向似乎不会对沸腾换热热流密度产生明显影响,均可采用 Breen & Westwater 公式预测其传热系数;而重力水平会对膜态沸腾换热产生较大影响,且不同重力下换热热流密度之比与重力比之间满足幂指数的关系;依据该关系式可以求解微重力下液氢的膜态沸腾换热热流密度,预测误差控制在 15% 以内。

关 键 词: 运载火箭; 低温燃料; 膜态沸腾; 经验公式; 微重力

中图分类号: V434 **文献标志码:** A

Heat transfer prediction on film boiling of liquid hydrogen under normal gravity and microgravity environments

WANG Lei¹, ZHU Kang¹, MA Yuan¹, XIE Fushou¹, LI Yanzhong^{1,2}
(1. Institute of Refrigerating and Cryogenic Engineering,
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: The film boiling heat transfer of liquid hydrogen was investigated, and the associated film boiling heat transfer experimental data in literatures were selected and analyzed. To validate the applicability and the predictive accuracy of three typical correlations for calculating heat transfer coefficient of film boiling events, a series of comparative studies were conducted. Moreover, a mathematical correlation was proposed to predict the film boiling heat flux of liquid hydrogen under microgravity. It was concluded that under the normal gravity condition, the heater geometries and their directions cannot significantly influence the film boiling heat flux of liquid hydrogen, and Breen & Westwater correlation was recommended to predict the heat transfer coefficient. Analysis of the experimental data shows that gravity has a significant influence on the film boiling heat transfer, and a power law correlation could be obtained to link the heat flux under different gravity conditions. In addition, a comparative study shows the proposed power law correlation allows to get the film boiling heat flux under any gravity condition as long as the heat flux under a similar reference condition has been known, and the predictive deviation is within 15%.

收稿日期: 2015-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(51406142); 航天低温推进剂技术国家重点实验室基金(SKLTSCP1407); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2015JQ5133); 陕西省博士后科研项目

作者简介: 王磊(1985—),男,副教授,博士后,主要从事低温两相流与沸腾传热方面研究。

引用格式: 王磊,朱康,马原,等. 常重力及微重力下液氢膜态沸腾换热预测[J]. 航空动力学报,2017,32(8):1835-1843. WANG Lei, ZHU Kang, MA Yuan, et al. Heat transfer prediction on film boiling of liquid hydrogen under normal gravity and microgravity environments[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 1835-1843.

Key words: launch vehicle; cryogenic fuel; film boiling; empirical correlation; microgravity

作为一种优异的航天燃料,低温液氢在航天领域的应用已超过 50 年,并将继续服务于人类的航天事业。此外,世界各大国均投入大量资源开发液氢的相关技术,以期实现液氢作为清洁能源的大规模应用。例如,日本于 20 世纪 90 年代制定的未来能源战略中提到,氢能占本国能源的比例将在 2035 年达到 20%,2050 年达到 40%^[1]。日本川崎重工计划于 2017 年下水世界首艘液氢运输船,相关工作正在稳步推进^[2]。也有学者关注到了液氢的低温特性,指出可利用液氢作为大型超导磁体的冷却剂服务于超导输电,或用于散列中子源的冷中子慢化剂^[3]。在液氢生产、转运、储备、消费的整个产业链中,经常发生氢的沸腾传热与两相流现象。若能获得相关流动、传热规律,并构建预测公式开展液氢沸腾换热的定量研究,则有助于更加安全、经济地使用液氢。然而,由于液氢获得的高成本性与使用的高危险性,液氢沸腾传热的实验数据相当有限。我国航天工程界也主要基于实际操作中获得的经验开展相关设计工作。为了促进液氢规模化、产业化、专业化使用,有必要就液氢的沸腾过程开展深入研究,构建可满足设计精度要求的换热预测公式。

在液氢的转运环节,往往需要先对接收系统开展充分预冷,从而确保后期液氢的顺利传输,避免因过量沸腾而引起的系统压力过高。伴随着接收体金属壁温的降低,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液氢预冷中居于支配地位。当金属壁温由室温 288 K 降至饱和温度时,膜态沸腾温降约占预冷总温降的 95.5%^[4]。由此可见,膜态沸腾换热的准确预测对液氢系统设计与运行的重要意义。此外,推进剂空间加注技术可有效降低航天发射对火箭运载能力的依赖,使大型空间探测成为可能^[5]。不难想象,空间加注也涉及对目标贮箱的预冷降温过程,而掌握液氢在微重力下的沸腾传热特性将有助于空间加注方案的设计。

早期学者主要采用水、制冷剂等开展沸腾实验,并推导了一系列适用于常温工况的沸腾换热公式。也有学者利用有限的低温实验数据对相关公式开展了对比研究,通过对模型的修正来获得适用于低温流体换热预测的经验公式。Seader

等人^[6]对涉及低温流体沸腾传热的实验数据、预测公式进行了总结分析。Shirai 等人^[7]将平板加热器浸于液氢中,通过电加热来研究液氢沸腾换热规律。Tatsumoto 等人^[8]研究了水平放置加热丝表面的液氢池沸腾规律,同时关注了压力对沸腾传热的影响。Sakurai 等人^[9]实验测试了液氮在不同工况下的膜态沸腾换热特征。Sauer 与 Ragsdell^[10]介绍了饱和液氮在平板加热面上的膜态沸腾换热情况,指出当加热面温度较高时,辐射热的影响不能忽略。Kida 等人^[11]也关注了加热丝上的沸腾现象。通过比较发现,Bromley 公式针对丝状加热器预测结果偏低,而 Breen & Westwater 公式预测精度相对较好。Hendricks 与 Baumeister^[12]研究了球形加热器上的膜态沸腾换热规律。美国 NASA 在 20 世纪五、六十年代开展了液氢沸腾实验研究,通过对比实验数据与 8 种模型预测值发现,Breen & Westwater 公式预测精度相对较好,但加热器结构的影响未作深入分析^[13]。鉴于低温流体在空间活动中的重要价值,也有学者关注了重力对沸腾传热性能的影响。Graham 等人^[14]研究了重力水平对液氢沸腾换热的影响,指出重力对核态沸腾的影响较小,但对膜态沸腾换热具有显著影响。Merte^[4]通过落塔实验研究了重力对低温液氮、液氢沸腾传热性能的影响。作为一种磁性流体,液氢在强磁场下可抵消重力影响。为此,Garcia^[15]通过实验手段研究了磁场作用下的液氢沸腾现象,从而揭示了微重力下的液氢沸腾规律。也有学者以常温流体为媒介,开展了不同重力下沸腾换热的对比研究。Straub^[16]指出不同重力对应的沸腾传热系数与重力比间满足幂指数关系。Chung^[17]采用 FC-72 为工作流体,通过落塔实验测试了微重力沸腾传热系数。对比发现,微重力沸腾换热相对于常重力换热强度有所降低。赵建福等人^[18-19]利用我国返回式卫星开展了微重力沸腾换热实验,结果发现核态沸腾区换热有所增强,而在过渡区换热降低约 20%~40%。Raj 等人^[20-21]分析了源自不同实验平台的沸腾实验数据,建立了不同重力下热流间的数学关系,相关研究针对核态沸腾,未涉及膜态沸腾换热。

综上所述,国内外学者已就低温流体沸腾换热开展了持续多年的研究,关于液氢膜态沸腾及

微重力沸腾换热的研究也有文献报道。然而,由于液氢物性的特殊性及实验系统的复杂性,相关实验数据间往往存在较大偏差,所推荐的换热公式针对不同加热面结构的适用性尚未得到确认。此外,目前尚缺少适用于液氢微重力沸腾换热的预测公式。为此,本文以液氢膜态沸腾换热为对象,收集相关的实验数据;以此为依据,通过对比分析确定适用于不同结构加热面的液氢换热公式;考虑重力因素对膜态沸腾换热的影响,建立数学关系式实现液氢微重力沸腾换热的准确预测;讨论系统压力、重力水平对膜态沸腾传热的影响。

1 膜态沸腾换热公式

截止目前,研究人员已构建了多组适用于膜态沸腾换热预测的关系式,其中,适用于低温流体换热的关系式主要有 3 种: Bromley 公式、Frederking 公式、Breen & Westwater 公式。已有的研究表明:针对液氮池沸腾, Bromley 公式在水平管加热表面的预测精度较高^[22], Frederking 公式适用于球形加热器^[23],而 Breen & Westwater 公式预测丝状表面换热时精度最佳^[13]。

1.1 Bromley 公式

Bromley^[22]以水平圆管为加热源,推导了可预测膜态沸腾传热系数的经验公式,如下所示^[22]:

$$Nu = C(Ra')^m \tag{1}$$

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_v} \tag{2}$$

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

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

式中 Nu 为努塞尔数; Ra' 为瑞利数; α 为膜态沸腾传热系数; D 为特征长度,对圆管型换热面取管外径; ρ_l 为液相密度,计算中取饱和温度 T_{sat} 对应密度; λ_v , ρ_v , μ_v , c_{pv} 分别表示气相导热系数、气相密度、气相动力黏度及比定压热容。计算中定性温度取加热面与饱和温度平均值; a 与 g 分别为沸腾所处重力与地面重力; h_{fg} 为气化潜热; ΔT 为过热度。

Bromley 公式适用于处于层流的膜态沸腾换热预测,对于式(1)中的系数 C 和 m ,与液氮膜态沸腾的实验数据对比后 Bromley 建议取值为: $C = 0.62$, $m = 1/4$ 。

1.2 Frederking 公式

Frederking^[23]指出当膜态沸腾处于紊流时,传热系数与加热面结构无关。此时, α 是 Ra' 的 $1/3$ 次方的函数,预测公式与 Bromley 公式相似。其中, Ra' 的表达式(式(3))中,修正气化潜热项 h'_{fg} 采用如下关系式代替:

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

对应的,式(1)的系数取值为 $C = 0.15$, $m = 1/3$ 。
对于膜态沸腾换热,建议以 $Ra' = 5 \times 10^7$ 划分层流与紊流。

1.3 Breen & Westwater 公式

Breen & Westwater^[13]基于 Taylor 不稳定原理推导了如下的预测公式。相对于其他公式,该公式考虑了表面张力的影响。

$$\alpha \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/8} \left(\frac{\mu_l \Delta T}{\lambda_l^3 \rho_l g h'_{fg}} \right)^{1/4} = 0.37 + 0.28 \left[\frac{\sigma}{g D^2 (\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2} \tag{6}$$

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

式中 σ 为表面张力; μ_l , λ_l , c_{pl} 分别为液相动力黏度、导热系数与比定压热容。

2 常重力膜态沸腾换热

开展液氢沸腾实验面临诸多挑战,包括成本高、危险性大、测量困难等,因此,公开文献中涉及液氢沸腾实验的数据非常有限。本文检索到的数据来源包括:美国航空航天局(NASA)于 20 世纪六七十年代为支撑航天事业而开展的液氢在不同重力下的沸腾实验^[4,24];欧洲学者所开展的液氢常重力及微重力沸腾实验^[15];日本学者以超导输电为背景而进行的液氢常重力沸腾实验^[8]。这些实验数据考虑了加热面结构、压力、重力等因素的影响,从而为分析液氢沸腾换热规律提供了珍贵的数据支持。

图 1 展示了平板加热面上液氢膜态沸腾换热热流密度(q)实验值与上述 3 种公式预测值对比情况。其中,换热平板为圆形,加热面朝上,分析时特征长度取加热面直径。可以看出,在所考虑的两种压力工况下, Breen & Westwater 公式预测值与实验结果基本吻合,而其他两种模型预测结果明显偏低。图 1(a)中,大过冷度沸腾换热热流密度高于饱和沸腾对应结果;而在图 1(b)中,大过冷度工况的换热热流密度相对较低。因此,从图

中结果很难确定过冷度对液氢换热规律的影响。但无论何种工况,实验测量值与 Breen & Westwater 公式预测值间的吻合程度均表明,在开展液氢系统的初步设计时,似乎可忽略过冷度的影响。

图 2 展示了长×宽为 25.4 mm×558.8 mm 的矩形加热平板对应结果。其中,实验数据涵盖了多种加热面朝向、多组压力工况。计算时,特征长度取矩形加热面当量直径。可以看出,在更宽的压力(p)范围内,Breen & Westwater 公式仍具有较高的预测精度。并且发现,加热面朝向并不会显著改变沸腾换热热流密度(q),这与液氮实验所得结论不同。当采用液氮开展沸腾实验时,平板朝上的加热面对应换热热流密度高于平板朝下及竖直平板对应结果^[4]。图 2 所示结果表明在开展液氢的膜态沸腾换热预测时可不考虑加热面朝向的影响。

图 3 展示了常压下 3 种加热面结构对应液氢沸腾换热对比结果,3 种加热结构包括两种不同直径(d)的球形及一个加热面朝上的圆形平板。

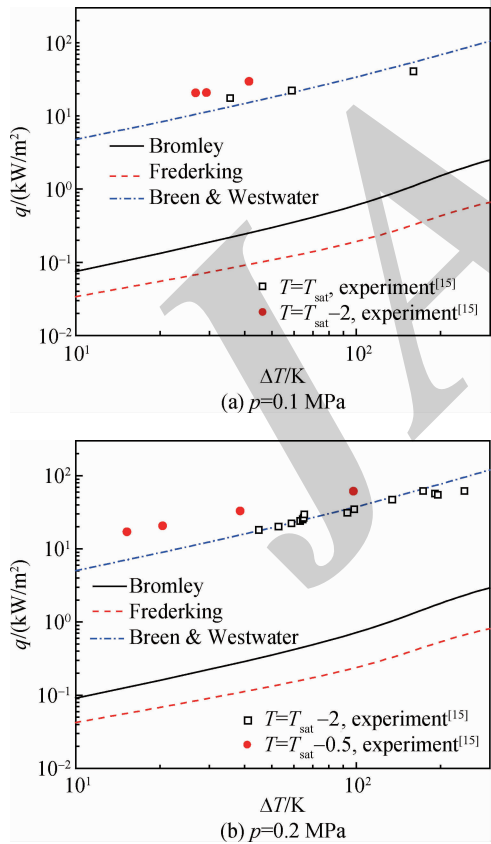


图 1 液氢膜态沸腾换热热流密度实验值与公式预测值对比(平板加热, $D=11.28\text{ mm}$)

Fig. 1 Comparison of heat flux between experimental data and predicted results for film boiling of liquid hydrogen (flat plate heater, $D=11.28\text{ mm}$)

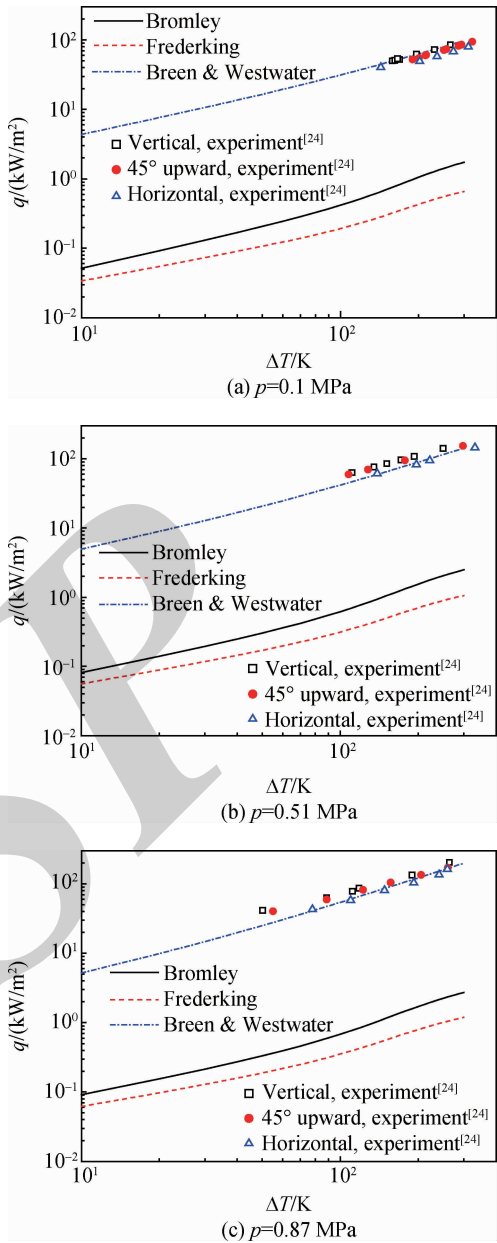


图 2 不同压力下液氢膜态沸腾换热热流密度实验值与预测值对比(平板加热)

Fig. 2 Comparison of heat flux between experimental data and predicted results for film boiling of liquid hydrogen under different pressures (flat plate heater)

对于球形加热面,计算时特征长度取球直径。对比结果表明,虽然 Breen & Westwater 公式针对球形加热面的预测结果略低于实验测量值,但相对而言,其预测精度仍远高于其他两种预测公式。图 3(c)同样表明,加热面朝向并不会显著改变液氢膜态沸腾换热热流密度,与图 2 所示规律一致。

图 4 展示了不同压力(p)下丝状加热面的对比结果,计算时特征长度取加热丝直径,为 1.2 mm。可以看出,Breen & Westwater 公式针对丝

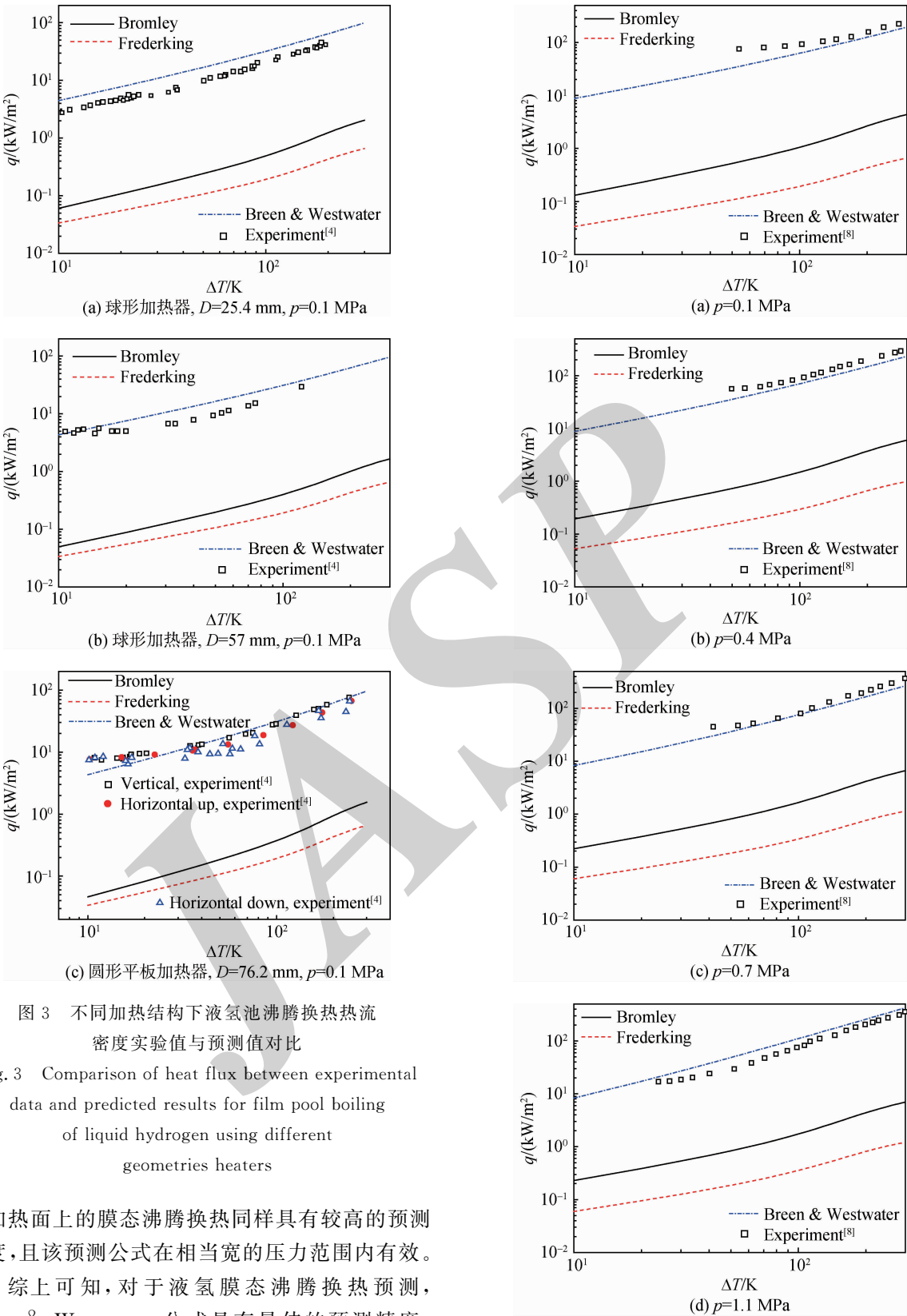


图 3 不同加热结构下液氢池沸腾换热热流密度实验值与预测值对比

Fig. 3 Comparison of heat flux between experimental data and predicted results for film pool boiling of liquid hydrogen using different geometries heaters

状加热面上的膜态沸腾换热同样具有较高的预测精度,且该预测公式在相当宽的压力范围内有效。

综上可知,对于液氢膜态沸腾换热预测,Breen & Westwater 公式具有最佳的预测精度,完全可用于指导液氢换热系统的设计。此外,Breen & Westwater 公式的适用性并不受加热面结构的影响,对于不同朝向的平板、球面、丝状加热器结构,该公式预测值在相当宽的压力范围内均与实验值吻合较好。

图 4 液氢膜态沸腾换热热流密度实验值与预测值对比(丝状加热器, $T=T_{sat}$)

Fig. 4 Comparison of heat flux between experimental data and predicted results for film boiling of liquid hydrogen (wire heater, $T=T_{sat}$)

3 微重力膜态沸腾换热

有学者指出,不同重力下沸腾换热热流密度比与重力比之间满足幂指数的关系^[16]

$$\frac{q_a}{q_g} = \left(\frac{a}{g}\right)^n \tag{8}$$

式中 n 可由下式确定:

$$n = \frac{\lg(q_a/q_g)}{\lg(a/g)} \tag{9}$$

式中 q_a 与 q_g 分别为 a, g 重力水平所对应沸腾换热热流密度。可以看出,若能确定 n ,则根据地面重力换热热流密度,通过式(8)即可获得任意重力对应的换热热流密度。

20 世纪 70 年代初,受 NASA 委托,Merte 通过地面落塔实验平台测试了不同重力下液氢的沸腾换热特性^[4],所得结果为确定式(8)中幂指数的取值提供了宝贵的数据支持。分析不同重力下液氢实验数据,可得如图 5 所示的 $n-\Delta T$ 关系。可以看出, n 的取值与压力、重力、壁面过热度等并无明显关系,大部分数据落在 $n=0.1\sim 0.3$ 区间,近似计算时可取平均值 $n=0.2$ 。

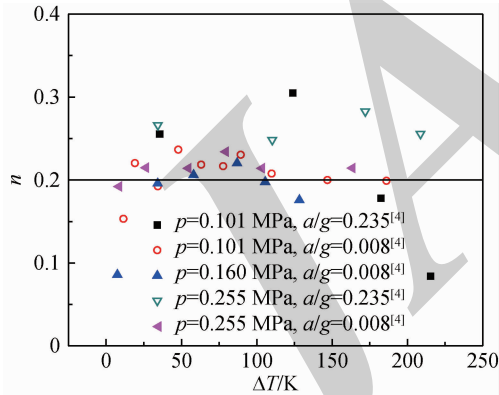


图 5 式(8)中指数 n 随壁面过热度变化关系
Fig. 5 Variation of exponent n in correlation (8) with wall superheating

图 6 展示了依据式(8)所得微重力下液氢膜态沸腾换热热流密度预测值与实验值对比情况。对比结果涵盖了多种压力工况,两种微重力水平。其中,参考值取常重力对应实验数据, $n=0.2$ 。可以看出,虽然图 5 中 n 的取值在 $0.1\sim 0.3$ 间离散分布,但采用 $n=0.2$ 的式(8)针对 3 种不同压力工况的预测值与实验值均吻合较好。图 7 展示了当系数 $n=0.2$ 时式(8)的预测结果误差分析。可以看出,大部分预测值的误差小于 15%。

图 5 所示结果似乎表明幂指数 n 的取值并不

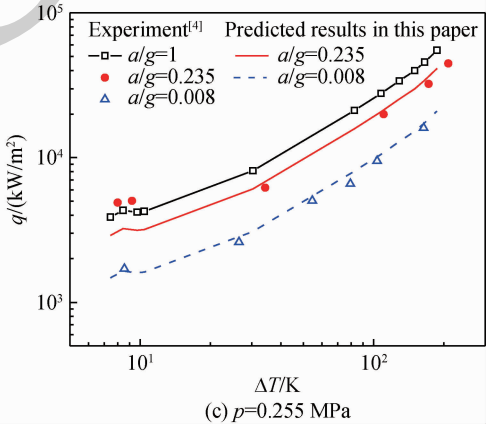
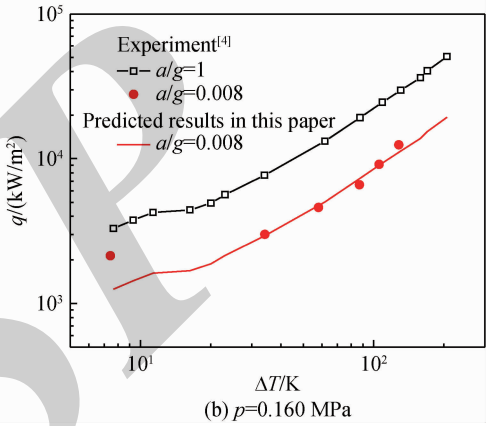
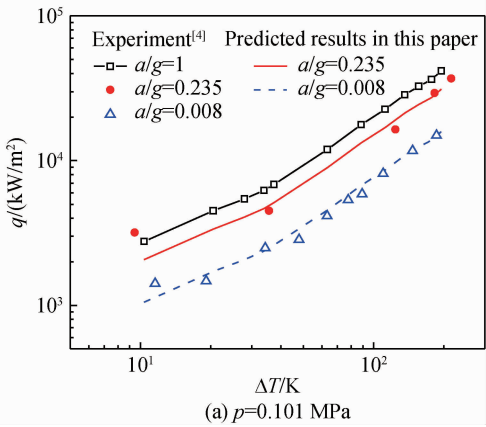


图 6 不同压力下微重力液氢膜态沸腾换热热流密度实验值与值对比

Fig. 6 Comparison of heat fluxes between experimental data and predicted results for microgravity film boiling of liquid hydrogen under different pressures

会显著影响式(8)的预测精度。为此,本文也分析了幂指数 n 对式(8)预测精度的影响。图 8(a)、图 8(b)分别展示了 $n=0.1, n=0.3$ 对应式(8)的预测值误差分析。可以看出,当 $n=0.1$,预测值相对于实验值偏低,最大误差可达 40%;当 $n=0.3$ 时,预测值明显偏高,最大误差超过 30%。与

图 7 对比发现,当 $n=0.2$ 时,式(8)预测精度相对最高。因此,在开展液氢的微重力膜态沸腾换热预测时,建议采用幂指数 $n=0.2$ 的式(8)。

4 影响因素

图 9(a)、图 9(b)分别展示了系统压力、重力水平对液氢膜态沸腾换热的影响,相关结果由 Breen & Westwater 公式(式(6)及式(8))计算所得,图中 T_1 为液相温度。可以看出,系统压力越大,膜态沸腾换热热流密度相应增大,但这种影响并不明显。与之相对,重力会对沸腾传热产生显著影响。当重力由地面常重力降至 $10^{-4}g$ 时,对应的膜态沸腾换热热流密度降低 10 倍左右。这主要是由于当沸腾换热处于膜态沸腾区时,加热面被一层稳定的气膜所覆盖,阻止了液体与壁面的接触。此时,气液相变存在于气液界面处,而相变所需热量必须首先通过气膜。因此,加热面与气液相界面间的换热决定了膜态沸腾的换热热流密度。Bromley 在推导膜态沸腾换热公式时假设加热面与气液界面的换热主要取决于沿气膜厚度的导热^[22]

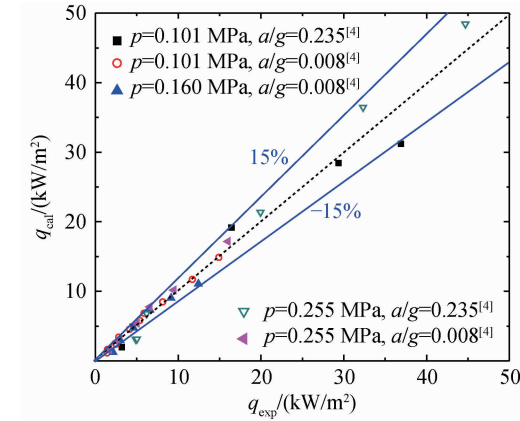


图 7 式(8)误差分析($n=0.2$)
Fig. 7 Deviation analysis of correlation (8) ($n=0.2$)

$$\gamma = \frac{\lambda_v}{\delta_v} \tag{10}$$

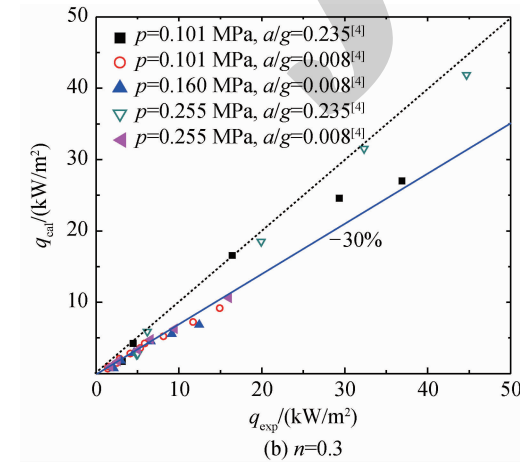
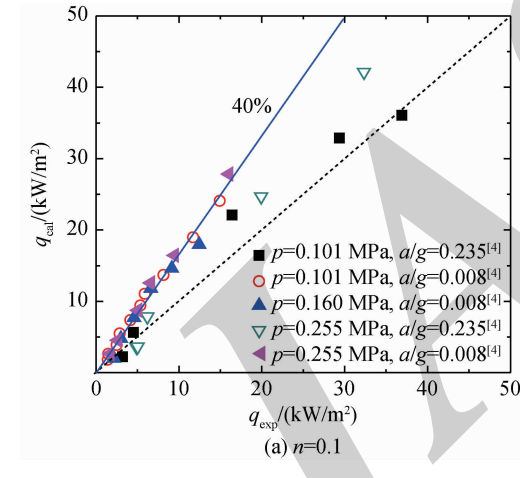


图 8 式(8)不同 n 取值对预测误差的影响
Fig. 8 Influence of n on deviation of predicted results by correlation (8)

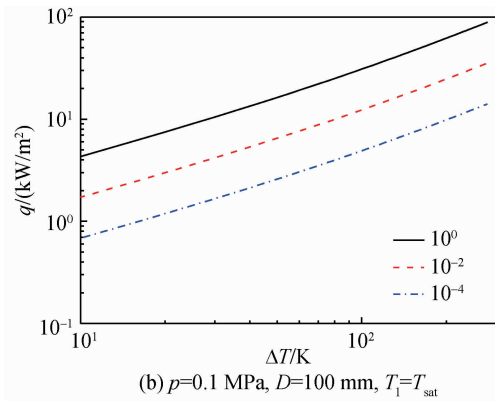
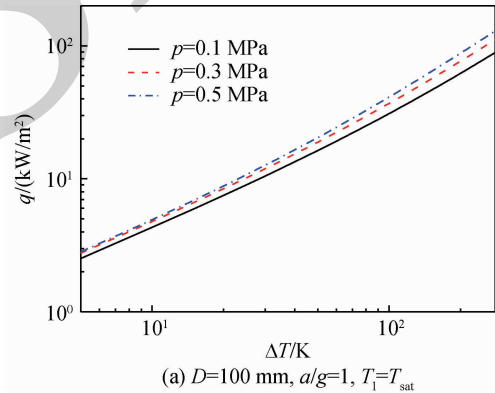


图 9 Breen & Westwater 公式预测不同压力、不同重力下液氢膜态沸腾换热热流密度
Fig. 9 Heat flux for film boiling of liquid hydrogen under different pressures and gravities based on Breen & Westwater correlation

式中 δ_v 为气膜厚度。压力对膜态沸腾换热的影响主要是通过改变气膜层的物性来实现。压力越高, 气体密度越大, 导热系数相应增大, 因此传热系数随之增强。重力对沸腾换热的影响主要是通过改变气膜层的厚度来实现。式(11)给出了平板加热面对应膜态沸腾气膜厚度的关系式^[25], 其中, β_v 为气膜热扩散系数。可以看出, 重力越小, 气膜层越厚, 在气膜两侧温差一定的情况下, 传热系数也越低。

$$\delta_v = \left[\frac{8\pi\mu_v\beta_v}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/3} \left(\frac{a}{g} \right)^{-1/3} = \left[\frac{8\pi\mu_v\beta_v}{(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/3} \left(\frac{1}{a} \right)^{1/3} \quad (11)$$

图 9(a) 表明, 在运载火箭燃料箱的工作压力范围内, 可不考虑压力对膜态沸腾换热的影响。而图 9(b) 表明, 在开展液氢的空间加注时, 由于膜态沸腾换热热流密度显著降低, 预冷所需时间也会相应延长, 相关设计必须考虑重力对沸腾传热的影响。

5 结 论

本文采用实验数据对比验证了液氢膜态沸腾换热预测公式, 得到了如下结论:

1) 当液氢系统处于地面常重力时, 推荐采用 Breen & Westwater 公式预测其膜态沸腾传热系数。该公式在运载火箭燃料箱的工作压力范围内均具有较好的适用性, 且加热面几何结构、朝向并不会显著影响公式的预测精度。

2) 不同重力对应的膜态沸腾换热热流密度之比与重力比之间可由幂指数关系来描述。对于液氢膜态沸腾换热来说, 推荐采用幂指数 $n=0.2$ 的式(8)预测微重力下的沸腾换热热流密度; 该公式预测误差小于 15%。

3) 系统压力并不会对液氢的膜态沸腾换热热流密度产生明显影响, 而重力则会显著影响沸腾传热系数。随着重力的降低, 气膜层厚度增大, 导致传热系数相应降低。

参考文献:

- [1] KAMIYA S, NISHIMURA M, HARADA E. Study on introduction of CO₂ free energy to Japan with liquid hydrogen[J]. Physics Procedia, 2015, 67: 11-19.
- [2] Green Car Congress. Kawasaki heavy to build first ocean-going liquid hydrogen tanker with demo in 2017[EB/OL]. [2015-12-11]. <http://www.greencarcongress.com/2013/09/20130928-khi.html>.
- [3] TATSUMOTO H, SHIRAI Y, SHIOTSU M, et al. Forced

convection heat transfer of saturated liquid hydrogen in vertically-mounted heated pipes[J]. AIP Conference Proceedings, 2014, 1573(1): 44-51.

- [4] MERTE H. Incipient and steady boiling of liquid nitrogen and liquid hydrogen under reduced gravity[R]. Huntsville: Marshall Space Flight Center Contract NAS-8-20228, 1970.
- [5] 马原, 厉彦忠, 王磊, 等. 低温推进剂在轨加注方案研究[R]. 北京: 中国航天第七专业信息网 2014 年度学术交流会, 2014.
- [6] SEADER J D, MILLER W S, KALVINSKAS L A. Boiling heat transfer for cryogenics[R]. NASA CR-243, 1965.
- [7] SHIRAI Y, TATSUMOTO H, SHIOTSU M, et al. Boiling heat transfer from a horizontal flat plate in a pool of liquid hydrogen[J]. Cryogenics, 2010, 50(6/7): 410-416.
- [8] TATSUMOTO H, SHIRAI Y, SHIOTSU M, et al. Heat transfer characteristics of a horizontal wire in pools of liquid and supercritical hydrogen[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2015, 28(3): 1185-1188.
- [9] 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.
- [10] SAUER H J, RAGSDALL K M. Film pool boiling of nitrogen from flat surfaces[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1971, 16: 412-415.
- [11] 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.
- [12] HENDRICKS R C, BAUMEISTER K J. Film boiling from submerged spheres[R]. Cleveland: Lewis Research Center TN D-5124, 1969.
- [13] BRENTARI E G, GIARRATANO P J, SMITH R V. Boiling heat transfer for oxygen, nitrogen, hydrogen, and helium[R]. Washington DC: National Bureau of Standards No. 317, 1965.
- [14] GRAHAM R W, HENDRICKS R C, EHLERS R C. An experimental study of the pool heating of liquid hydrogen in the subcritical and supercritical pressure regimes over a range of accelerations[R]. Cleveland: Lewis Research Center TM X-52039, 1964.
- [15] GARCIA S. Boiling in liquid hydrogen under gravity compensated with a magnetic field[D]. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2012.
- [16] STRAUB J. Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity[J]. Advances in Heat Transfer, 2001, 35: 57-172.
- [17] CHUNG J N. Bubble dynamics, two-phase flow, and boiling heat transfer in microgravity[R]. Cleveland: Lewis Research Center, NAG3-1387, 1998.
- [18] ZHAO J F, LI J, YAN N, et al. Transition to film boiling in microgravity: influence of subcooling[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(7): 198-201.
- [19] ZHAO J F. Two-phase flow and pool boiling heat transfer in microgravity[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(2): 135-143.

[20] RAJ R,KIM J,MCQILLEN J. On the scaling of pool boiling heat flux with gravity and heater size[J]. Journal of Heat Transfer,2012,134(1):011502. 1-011502. 13.

[21] RAJ R,KIM J,MCQUILLEN J. Pool boiling heat transfer on the international space station:experimental results and model verification[J]. Journal of Heat Transfer,2012,134(10):101504. 1-101504. 14.

[22] BROMLEY L A. Heat transfer in stable film boiling[R]. Oak Ridge: Atomic Energy Commission, Technical Information Division-2295,1949.

[23] 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.

[24] CLASS C R,DEHAAN J R,PICCONE M, et al. Boiling heat transfer to liquid hydrogen from flat surfaces[J]. Advances in Cryogenic Engineering,1960,5:254-261.

[25] LEWIS E W. Boiling of liquid nitrogen in reduced gravity fields with subcooling[D]. Ann Arbor, US: University of Michigan,1967.

(编辑:陈 越)