

# 窄通道内流动沸腾强化换热研究进展

顾晟杰<sup>1</sup>, 陶乐仁<sup>1,2</sup>, 金程<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

**摘要:**窄通道具有结构紧凑、传热效率高等优点。随着科技发展,窄通道已经成为强化换热的常用结构形式之一,被广泛应用于各种换热设备。由于窄通道内间隙内气泡的尺寸受限,气泡在发展过程中会受到挤压而发生变形,带走大量的潜热,引起汽液界面的扰动,换热性能较常规通道有很大区别。本文综述了窄通道内的主要流型及转变准则;介绍了几何与工况参数变化对窄通道内换热效果影响的传热实验研究;分析了窄通道中传热机理以及两相摩擦压降机理,并对关联式进行了总结与评述;对窄通道内强化换热的机理与进一步强化换热的方法进行归纳总结;结合目前实验与理论研究总结了现存问题,为窄通道内流动沸腾强化换热的进一步研究提供了参考。

**关键词:**窄通道;流动沸腾;两相流;传热

中图分类号:TK124

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.04.001

[引用本文格式]顾晟杰,陶乐仁,金程.窄通道内流动沸腾强化换热研究进展[J].热能动力工程,2024,39(4):1-11. GU Sheng-jie, TAO Le-ren, JIN Cheng. Research progress of flow-boiling-enhanced heat transfer in narrow channels[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(4): 1-11.

## Research Progress of Flow-boiling-enhanced Heat Transfer in Narrow Channels

GU Sheng-jie<sup>1</sup>, TAO Le-ren<sup>1,2</sup>, JIN Cheng<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power and Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200093)

**Abstract:** The narrow channels have the advantages of compact structure and high heat transfer efficiency. With the development of technology, narrow channels have become one of the common structures to enhance heat exchange and are widely used in various heat exchange equipment. Due to the restriction of vapor bubble size caused by narrow channel gap, the vapor bubble will be deformed caused by squeezing during the development process, taking away a large amount of latent heat and causing disturbance at the vapor-liquid interface. The heat transfer performance is very different from that of conventional channels. In this paper, the main flow patterns and transformation criteria in narrow channels are reviewed; the experimental study on the effects of geometry and operating parameters on heat transfer in narrow channels is introduced; the heat transfer mechanism and the two-phase friction pressure drop mechanism in narrow channels are analyzed, and the correlations are summarized and commented; the mechanism of enhanced heat transfer in narrow channels and methods for further enhanced heat transfer are summarized; the existing problems are proposed in relation to the current experimental and theoretical studies, providing a reference for further research on enhanced heat transfer by flow boiling in narrow channels.

**Key words:** narrow channel, flow boiling, two-phase flow, heat transfer

收稿日期:2023-05-09; 修订日期:2023-07-25

基金项目:上海市动力工程多相流动与传热重点实验室研究项目(2019KJFZ201)

Fund-supported Project: Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power and Engineering Research Project (2019KJFZ201)

作者简介:顾晟杰(1999-),男,上海理工大学硕士研究生.

## 引言

两相流动广泛存在于各种工业过程中,与人类生活息息相关。窄通道具有结构紧凑、传热效率高等优点。随科技发展,窄通道已经成为强化换热的常用结构形式之一<sup>[1]</sup>,被广泛应用于各种换热设备。由于窄缝通道内间隙内气泡的尺寸受限,气泡在发展过程中会受到挤压而变形,带走大量的潜热并引起汽液界面的扰动,换热性能较常规通道有很大不同<sup>[2]</sup>。Johnston 等人<sup>[3]</sup>通过实验表明,水平环状窄通道内的沸腾换热系数较一般沸腾换热提高了230%,杜建通<sup>[4]</sup>对竖直窄矩形通道内的沸腾换热进行实验,得出其换热系数较一般沸腾换热最高可提高约6倍。综上所述,窄通道强化换热效果显著,是一种既经济又有效的强化沸腾换热方法。

本文主要通过对窄通道内流型转变及气泡行为研究、换热特性实验研究、传热与压降机理及关联式的研究、进一步强化换热的方法4个方面,对窄通道内流动沸腾强化换热的研究进行了综述。未来的研究中,在实验研究方面需要更多地改变实验工况以模拟更加真实的应用环境;在关联式方面需要不断修正和拓展关联式的工况适用范围,包括不同的加热条件、不同的几何条件等;在换热机理研究方面需要结合可视测量技术与模拟仿真方法从以下几方面作进一步探究,包括对液膜收缩破裂导致的液膜尺度与温度变化、气泡生成与脱离对流场的扰动过程、表面结构对汽化核心密度的影响、表面结构对薄液膜分布以及对局部传热系数的影响,以完善换热特性的机理研究。

### 1 流型转变及气泡行为研究

流道内气液两相介质的相分布特征可以用流型来描述,其对于气液两相间及壁面间的质量、动量和能量传递有重要影响。不同的流型对应不同的传热机理。确定特定条件下流型的特征及其向其他流型转换的条件是研究两相流动系统压降、传热及传质特性的基础。

Chen 等人<sup>[5]</sup>对竖直上升小通道内气液两相流动进行了实验研究,观察得到了通道内几种不同的流型,包括泡状流、弹状流、搅混流和环状流,如图1

所示。Xu 等人<sup>[6]</sup>分别对窄缝宽度为0.3、0.6和1.0 mm的竖直矩形小通道进行了两相流动研究,发现窄缝为0.3 mm的通道内的流型较其他两种通道差别较大,未出现泡状流。上述研究给出了受限空间内的流型,并表明了通道的尺寸对流型有着较大的影响。

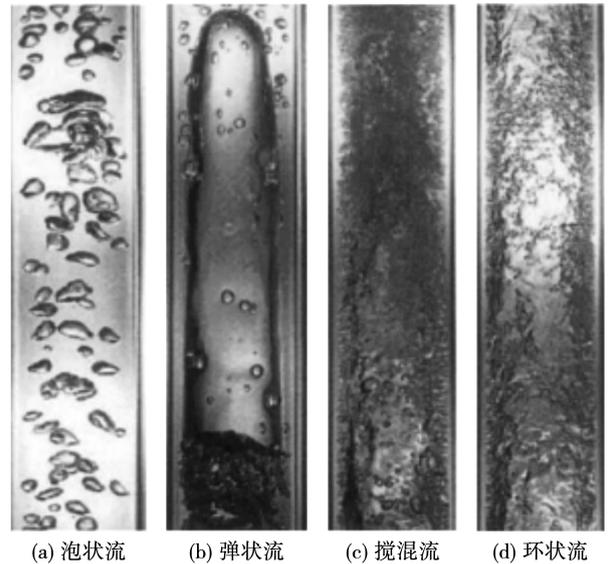


图1 竖直流道向上流动基本流型<sup>[5]</sup>  
Fig. 1 Basic flow pattern of upward flow in vertical channels<sup>[5]</sup>

许多学者也对流型转变的准则进行了理论及实验研究,其中对竖直圆管内两相流型的转变研究较多。对于泡状流到弹状流的转变,Taitel 等人<sup>[7]</sup>认为,两相流动过程中小气泡间的碰撞和合并形成泰勒气弹,导致流型由泡状流转变为弹状流。当截面含气率为0.1时,气泡间的碰撞频率较低,并随着截面含气率的增大频率迅速增加;当含气率大于0.3时,泡状流很不稳定并发生转变,因此把含气率为0.3作为流型转变的极限值。对于弹状流到搅混流的转变,Kaichiro 等人<sup>[8]</sup>认为,弹状流是在弹单元平均含气率大于气弹段含气率的条件下会向搅混流转变;Brauner 等人<sup>[9]</sup>认为液弹中含气率达到0.52时会导致流型转变。对搅混流到环状流的转变,Taitel 等人<sup>[7]</sup>根据气芯中夹带液滴的受力平衡分析,得到搅混流向环状流转变的判别准则。现有的流型转换准则大都是基于绝热条件下以空气-水为工质的,没有考虑在加热条件下流动沸腾传热传质与绝热情况下两相流动的不同,对于窄通道内流动沸腾的情

况,气泡在运动过程中被持续加热,体积增大,气泡的运动速度也随之增大。常威<sup>[10]</sup>通过实验得出,窄通道内流动沸腾状态下发生流型转变的截面含气率较绝热条件下更高,泡状流向弹状流转变时截面含气率为0.7,向环状流转变时截面含气率为0.9,即流动沸腾条件下流型转变将会被推迟,窄通道内流动沸腾状态下流型转变准则有待进一步研究。

由于工程上对参数测量的手段技术有限,确定流型更为直观常用的方式是采用流型图。许多研究者<sup>[6,11-15]</sup>通过改变热工水力参数进行实验研究,将流型转换为不同参数坐标下的流型区域图以区分不同流型,以气体和液体表观速度( $J_f \sim J_g$ )为坐标的流型区域图最为常用,如图2所示,但表观速度无法反映出表面张力、水力直径等参数对流型的影响。

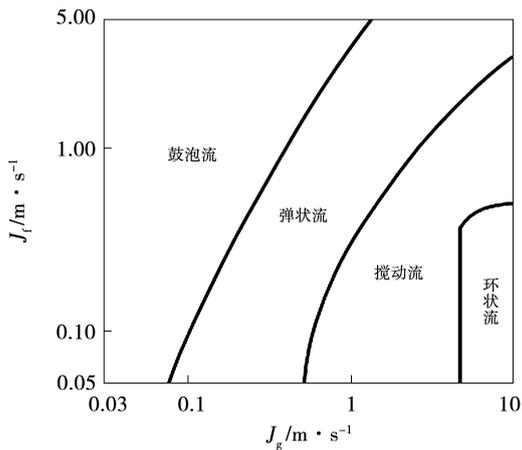


图2 ( $J_f \sim J_g$ ) 坐标下的流型区域图

Fig. 2 Diagram of flow pattern region in ( $J_f \sim J_g$ ) coordinates

气泡行为研究主要包括气泡速度、气泡尺寸、气泡运动规律、气泡脱离频率以及气泡脱离直径。王二利等人<sup>[16]</sup>对去离子水在窄缝宽度为1.2 mm的小通道中气泡生长特性进行了研究,得出减小质流密度和提高热流密度均会加快气泡的产生并提高气泡脱离直径的结论。郭昂等人<sup>[17]</sup>对常压下竖直窄缝通道过冷流动沸腾进行了实验研究,通过可视化实验发现,汽化核心密度只与壁面过热度有关,气泡脱离直径与壁面过热度、流体过冷度和质流密度有关。徐建军等人<sup>[18]</sup>采用高速摄影仪从宽面和窄面可视化观察了常压条件下矩形窄缝通道内气泡核化生长

和脱离规律<sup>[18]</sup>、滑移气泡的运动特征<sup>[19]</sup>和滑移气泡间的聚合特性<sup>[20]</sup>。Zhang等人<sup>[21]</sup>通过可视化流动沸腾实验,研究了矩形窄通道内气泡聚结现象及气泡滑动对聚结的影响,详细分析了气泡的聚并现象、聚并后气泡的速度和界面演化特征。此外,众多学者们对流动沸腾换热进行了大量的实验研究及分析,以得到气泡脱离频率以及气泡脱离直径的定量描述,并获得了许多半经验及经验关系式<sup>[22-27]</sup>,而有些公式中的系数并没有完全确定,还有待研究确定。

## 2 换热特性实验研究

换热特性的实验研究主要从宏观层面探究各参数对窄通道内流体流动与传热的影响规律。由于通道尺寸、压力、材料表面粗糙度和工质物性等参数会对流型、气泡行为和流动状态等产生影响,从而改变换热状态,许多研究者通过改变实验段尺寸与相关工况参数以模拟所需实际应用场景,来研究各水力热工参数对于换热特性的影响。

换热特性是流动沸腾问题研究的重要方面。单面电加热是窄通道研究实验中最常见加热方式,便于模拟均匀的热流密度。王际辉等人<sup>[28]</sup>研究表明,在较低干度下传热系数随着干度的增加而增加,干度较大时,传热系数保持不变直至传热恶化,质流密度的增加使传热系数有较大增加,进口温度的变化对传热系数几乎没有影响。Soupremanien等人<sup>[29]</sup>研究表明,宽高比变化对于传热有重要影响,在低热流密度区,宽高比较大时传热系数比较大,在高热流时则相反。黄理浩等人<sup>[30]</sup>在低压条件下改变入口过冷度、质流密度及加热功率,实验结果表明,这些参数对饱和沸腾起始点和过冷段长度有重要影响。在此基础上,许多研究人员开始改变实验条件以模拟更真实的加热环境。刘萌芳等人<sup>[31]</sup>建立单侧蒸汽加热竖直矩形窄通道可视化实验系统,研究蒸发冷凝条件下的流型特征及换热特性。郭新田<sup>[32]</sup>在实验中使用三面加热,模拟了工程上水冷散热器经常出现的三面加热组合型封闭截面加热通道,对矩形窄通道的沸腾传热特性进行了研究。肖友军等人<sup>[33]</sup>对摇摆条件下矩形通道内自然循环传热特性进行研究,结果表明,摇摆会降低强制循环的流量及加剧壁面附近扰动,两者对传热特性有相反的作用,

低雷诺数下前者对传热影响占主导地位,高雷诺数下摇摆的影响可以忽略不计。通过实验模拟实际应用环境并改变几何与工况参数可以得到实验段窄缝宽度、进口温度、质流密度和热流密度等参数对传热的影响规律,但是需要从机理上作进一步的研究。

### 3 传热和压降机理与关联式研究

#### 3.1 传热机理与关联式

流动沸腾发展过程中,各区域的流型不同,对应的传热机理也有所区别,图3为以热流密度为纵坐标的流动沸腾区域分布。

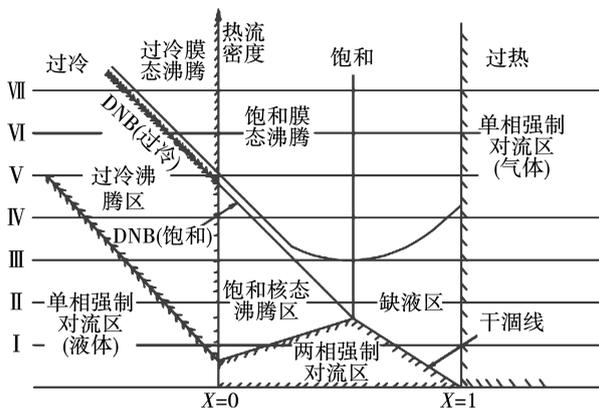


图3 以热流密度为纵坐标的流动沸腾区域分布

Fig. 3 Distribution of flow boiling regions with heat flux density as vertical coordinate

为揭示流动沸腾过程中的换热机理,研究者们进行了大量的研究。研究表明,窄通道内的流动沸腾传热机理可以分为核态沸腾主导机理<sup>[34]</sup>、对流蒸发主导机理和两者共同作用机理3类。核态沸腾以连续的气泡核化、生长和脱离为特征<sup>[35]</sup>,同时气泡底部与传热面之间存在一层微米厚度液层(微液膜),由此产生了核态沸腾的微膜蒸发机理<sup>[36]</sup>。对流蒸发的特征是热量先通过热传导和对流由壁面经薄液层传递到气液界面,然后由对流蒸发传递给主流流体<sup>[37]</sup>。传热预测关联式大多为传热叠加模型与无量纲数预测模型两类。传热叠加模型的主要形式为:

$$h_{tp} = Eh_c + Sh_n \quad (1)$$

式中: $E$ —对流换热增强因子; $S$ —核态沸腾抑制因子; $h_{tp}$ —两相沸腾传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $h_c$ —对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $h_n$ —核态沸腾传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

而无量纲预测模型侧重于核态沸腾对换热系数

影响的修正,利用无量纲数的组合对换热系数进行预测,常用的无量纲数有沸腾数  $Bo$ 、雷诺数  $Re$ 、韦伯数  $We$  等。

Chen<sup>[38]</sup>、Kandlikar<sup>[39]</sup>、Gungor 等人<sup>[40]</sup>、Bertsch 等人<sup>[42]</sup>与 Liu 等人<sup>[43]</sup>都基于传热叠加模型,根据实验数据,对对流传热增强因子  $E$ 、核态沸腾抑制因子  $S$ 、对流传热系数  $h_c$ 、核态沸腾传热系数  $h_n$  给出了不同的表达。其中,Chen<sup>[38]</sup>是第一个提出通过传热叠加模型对局部传热进行预测的,并通过实验验证了在低质流密度、低干度条件下,核态沸腾机理起着相对重要的作用;而在高质流密度、高干度条件下,核态沸腾被抑制,对流换热机理变得越来越重要。Kandlikar<sup>[39]</sup>将对流换热项与核态沸腾换热项都表示为对流传热系数  $h_{conv}$  的函数,以对流数  $Co$  是否大于 0.65 作为划分对流换热区及核态沸腾区的依据。在对流传热项与核态沸腾项中分别加入对流数  $Co$  与沸腾数  $Bo$  的幂次,其原因是 Kandlikar 将核态沸腾的机理与池沸腾机理相关联,幂次的形式与池沸腾的传热系数对热流密度的依赖性相一致,同时也反映出核态沸腾区对对流数  $Co$  的弱依赖。而在对流传热区域时, $Co$  的贡献则显著提升,所提出的相关性能够涵盖这两种情况。Gungor 等人<sup>[40]</sup>则是在对流传热增强因子  $E$  中引入了沸腾数  $Bo$ ,以表征在靠近壁面的边界层中产生蒸汽所引起的强迫对流传热机制的增强。但在 Liu 等人<sup>[41]</sup>的研究中并未发现其与  $Bo$  的相关性,因此在对流传热增强因子  $E$  中去除了  $Bo$ ,但加入了普朗特数  $Pr$  以表明流动沸腾边界层的作用。Bertsch 等人<sup>[42]</sup>在已有的预测良好的对流传热系数  $h_{conv}$ 、核态沸腾传热系数  $h_n$  关联式基础上,引入了限制数  $N_{conf}$ ,能够说明流体在沸腾流动过程中受狭缝限制所能达到的最大气泡尺寸,表征了狭缝中流动沸腾传热时表面张力和当量直径的影响。Lazarek<sup>[34]</sup>的关联式主要是以核态沸腾为主要机理建立的,其认为沸腾传热系数对热流密度有很强的依赖性,而蒸汽干度不影响流动沸腾换热,可能无法对产生间歇性干涸的流动沸腾状态产生较好的预测。Yu 等人<sup>[43]</sup>认为,小通道中的流动沸腾换热与大通道中有着明显区别,成核换热机制优于对流传热机制,小通道中的沸腾换热更依赖于热流密度,引入韦伯数  $We$  更能体现表面张力在对流沸腾换热中的重要作用而提高预测准确度。与

Bertsch 等人<sup>[43]</sup>类似,苏顺玉等人<sup>[44]</sup>考虑了狭缝中流动沸腾传热时表面张力和当量直径的影响,认为狭缝间隙对狭缝流动沸腾传热的影响比液体蒸发量的影响大,因此引入了限制数  $N_{\text{conf}}$ ,同时考虑了狭缝间隙和液体蒸发量对传热的影响。可以看出,无论是叠加模型还是无量纲模型,其中的各种参数对于两相沸腾换热的作用仍存在争议,对于窄通道内流动沸腾过程中的各种传热机理的影响因素尚不明确。且这些修正模型都有其自己适用的工况范围,通常对自身工况条件能准确预测,但是对于其他工况的预测效果都不同程度地存在一些问题,因此各种参数的实际意义还需从实验数据中得到验证。今后的研究需不断地修正和拓展关联式的工况适用范围,包括不同的加热条件、不同的几何条件等。此外,需结合可视测量技术与模拟仿真方法对液膜收缩破裂导致的液膜尺度与温度变化、气泡生成与脱离对流场的扰动过程进行研究,进一步完善换热特性的机理研究。

### 3.2 两相摩擦压降与关联式

由于流道的特殊性,窄通道所导致的流动损失会比常规通道更大,一旦开始沸腾,就会在受热面上产生大量气泡,使得摩擦系数大大提高。驱动压力一定的情况下,流量的下降可能会导致临界热流密度(CHF)的提前出现<sup>[45]</sup>,因此对窄通道内压降的研究及预测具有重要意义。研究者们通过两相流动沸腾压降特性的实验研究发现,流动沸腾的压降随着质流密度、热流密度和入口干度增加而增大,随着窄缝间隙的增大而减小<sup>[46]</sup>,随饱和压力的增加而减小<sup>[47]</sup>。两相摩擦压降的经典计算模型是由 Lockhart<sup>[48]</sup>提出的分相流模型。Lee 等人<sup>[49]</sup>指出常规的 Lockhart-Martinelli 关系式不能准确预测窄通道内的两相流动压降。Lockhart-Martinelli 关系式如下:

$$\left(\frac{dp}{dl}\right)_{\text{tp}} = \Phi^2 \left(\frac{dp}{dl}\right)_1 \quad (2)$$

式中: $p$ —压强,Pa; $l$ —流动方向长度,m; $\Phi$ —摩擦因子;下标 $\text{tp}$ —两相;下标 $1$ —液相。

摩擦因子  $\Phi$  通常用下式计算:

$$\Phi^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (3)$$

式中: $X$ —Martinelli 数; $C$ —计算式系数。

以后提出的经验关系式大都建立在此模型的基础

上,大部分研究对摩擦因子计算式中系数  $C$  进行修正,也有少部分研究直接对摩擦因子进行修正。

Chisholm (1967)<sup>[50]</sup> 和 Chisholm (1973)<sup>[51]</sup> 被称为 Chisholm  $C$  系数法和 Chisholm  $B$  系数法,是基于常规通道建立的两相摩擦压降预测关联式。Chisholm 认为 Lockhart 和 Martinelli 等人没有正确的考虑质流密度对摩擦压降梯度的影响,因此,其提出并发展了一种考虑了质流密度影响的摩擦因子计算方法。Chisholm  $C$  系数法解决了均相模型<sup>[52]</sup>中的一些不足,考虑了相之间的界面剪切力。由于窄矩形通道内气泡的生长受间隙尺寸的限制,气泡易扭曲变形,流型也易过渡为弹状流、块状流甚至环状流。因此,两相间的滑移速度较显著,相间界面摩擦引起的耗散也不容忽视。对于常规通道,Chisholm  $C$  系数的取值范围为 5 ~ 20,这取决于液体和气体流动是层流还是湍流。Chisholm  $B$  系数法在  $C$  系数法的基础上发展而来, $B$  系数方法直接计算全液相摩擦因子,因此在使用上更为简便。然而  $C$  系数与  $B$  系数的确定并未考虑窄缝尺寸的影响。在 Mishima 等人<sup>[52]</sup>的研究中发现, $C$  系数随着窄缝尺寸的减小而减小,因此对  $C$  系数从窄缝尺寸上进行了修正,得出的关联式与竖直、水平的圆管与矩形通道相关性均良好。Zhang 等人<sup>[53]</sup>通过神经网络方法研究发现,限制数  $N_{\text{conf}}$  与泰勒不稳定性的波长成比例,其可以很好地表征流道尺寸对气泡运动的限制作用,对于泡状流型的计算较合适。Lee 等人<sup>[54]</sup>认为,液相和气相都是层流状态时,表面张力的作用更强,对气液相各自为层流和湍流状态时提出了不同的预测关联式。文献[49]和文献[55]对于  $C$  系数采用了相类似的处理方式,由于在段塞流区域和环状流区域传热传质和气液相的破碎、堆积受到表面张力等因素的影响较大,把  $C$  做为综合反应质流密度、窄缝尺寸、表面张力等影响因素的无量纲函数。文献[56]中的关系式基于已发表的 18 篇文献数据总结得出,关系式涵盖的数据点多、实验参数范围大,在数据的统计分析中发现,系数  $C$  受到雷诺数的影响大,因此在提出的预测关联式中引入了气液相雷诺数之比。潘良明等人<sup>[46]</sup>综合了无量纲方法及提出的限制数  $N_{\text{conf}}$ ,以此对  $C$  系数进行修正,但实验工况的不同使得关联式无法准确预测所有工况,

其中有很多待定系数还要依据更多的实验数据进行确定。目前,大部分关于两相摩擦压降研究及关联式研究大都是在光滑表面,今后需要着重研究表面粗糙程度及通道表面结构对两相摩擦压降的影响,进而开发新的压降预测关联式,为工业领域换热设备的设计优化提供依据。

### 4 强化换热方法

窄通道内流动沸腾的强化换热原因与机理主要包括几个方面:变形气泡底部的微液膜蒸发<sup>[57,58]</sup>、气泡扰动机理<sup>[59]</sup>和诱发二次流<sup>[60]</sup>。微液膜蒸发模型如图4所示,窄通道内的气泡在受壁面挤压而严重变形的过程中,底部微液膜厚度减薄,因而传热热阻大大减小。同时,液膜与加热表面间的接触面积和接触时间也增大,使液膜蒸发率增大<sup>[61]</sup>。

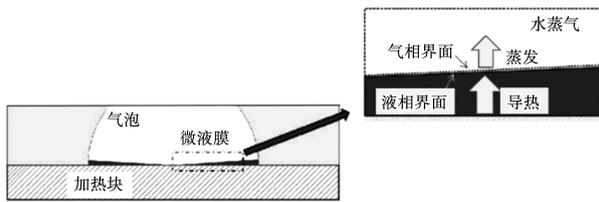


图4 微液膜蒸发模型

Fig. 4 Micro-liquid film evaporation model

窄缝对气泡形状的限制作用增加了气液界面的体积浓度,气泡的脱离频率增加强化了对加热壁面附近流体的扰动,导致沸腾换热强化<sup>[59]</sup>。此外,对于有尖角或特殊形状的通道结构可以起到人工汽化核心的作用,并可以诱发二次流,从而进一步强化换热<sup>[60, 62]</sup>。

部分学者们研究了通道表面结构对窄通道内换热特性的影响,图5为常见的通道表面结构类型。Ishibashi 等人<sup>[63]</sup>对窄通道内光滑表面及滚花表面的换热特性进行了实验研究,结果表明,窄缝宽度减小使得光滑表面的换热系数增大,相同实验条件下滚花表面的换热有增强,同时证明了光滑表面存在最优窄缝宽度,但滚花表面的强化作用随着宽度减小而削弱,并未得出最优的滚花表面的窄缝宽度。Thonon 等人<sup>[64]</sup>研究了带翅片的垂直矩形窄通道内不同工质(R22、R113、R114和R134a)的成核沸腾和对流沸腾状态之间的转变准则,这两种沸腾状态之间的过渡取决于流动的特性,同时也取决于通道

的几何形状。对于紧凑型板式翅片式换热器,这种准则的建立具有重要意义。Watel 等人<sup>[65]</sup>研究了带有偏置翅片和穿孔翅片窄通道内丙烷的沸腾换热特性,分析了质流密度、压力和翅片几何形状对局部对流沸腾传热系数的影响,实验过程中流型主要为段塞流而不是环状流,可以参考 Carey<sup>[66]</sup>的研究结果对带有偏置翅片换热器的段塞流进行预测。Kim 等人<sup>[67]</sup>研究了 R113 在带偏置翅片窄通道内的沸腾换热特性,分析了流动沸腾和核态沸腾在局部换热中的权重,其结果与传热叠加模型有良好的一致性,拓宽了传热关联式的应用范围。类似地,Pulvirenti 等人<sup>[68]</sup>同样以传热叠加模型为基础研究了带翅片的垂直矩形窄通道的局部换热,考虑了对流沸腾及核态沸腾系数间的关系,并且证明了在高热负荷下通道内部几何形状几乎不影响两相换热,在低热负荷条件下带翅片的通道的换热性能优于无翅片通道。王皓显等人<sup>[69-70]</sup>对带波纹翅片窄通道内进行了模拟研究,分析了质流密度、热流密度和干度对波纹翅片传热特性的影响,并与平直翅片进行了对比,结果表明:波纹翅片传热性能优于平直翅片,在低干度下表现尤为明显;且随着干度增大,波纹翅片换热系数呈现先上升后下降的趋势,在干度 0.5 左右时达到最大值;随着干度增加,质流密度的增大对换热性能的提升越来越显著,热流密度增大对换热性能的提升效果越来越小。

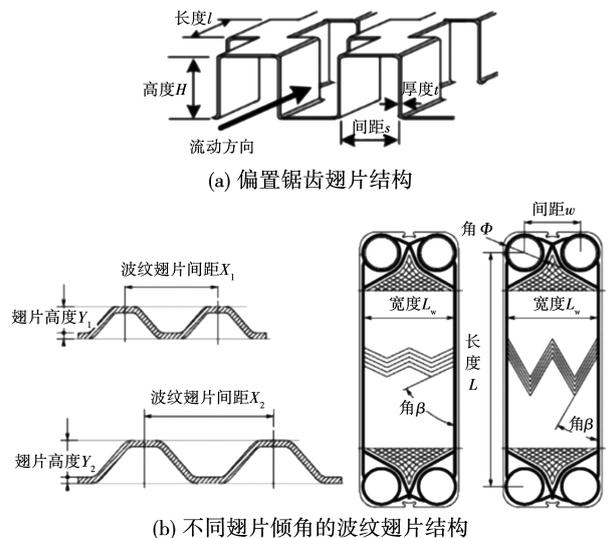


图5 通道表面结构

Fig. 5 Channel surface structures

翅片结构如今已广泛应用于紧凑型板式换热器中,上述研究分析了窄缝的宽度、翅片类型对换热的影响,并已有少部分学者对流型、传热机理进行研究并提出传热预测关联式,对完善板翅式换热器的优化设计具有重要的意义,但仍需要对于强化机理作进一步研究和分析。

有学者们对接触表面进行处理,通过改变接触表面的亲水、疏水性能对换热特性进行强化,不同的亲水、疏水性能会改变壁面的接触角,对气泡行为产生影响,从而改变传热。姜洪鹏等人<sup>[71]</sup>用激光烧蚀方法在抛光后的铜上制备出4种无需涂覆修饰即可获得超疏水、亲水性的规则微阵列结构表面。结果表明,疏水表面可削弱单相对流传热,大幅强化沸腾传热,最大传热系数提高了75.5%,超亲水表面可增强单相对流传热、小幅度提升流动沸腾传热。对比亲水表面与疏水表面的气泡生长过程发现:疏水表面尾端气泡容易汇聚,生长周期较长;而亲水表面没有发生明显地气泡汇聚行为,气泡生长周期较短。喻祖康等人<sup>[72]</sup>制备了接触角为 $0^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 的3种不同润湿性表面微通道,以R134a为工质进行了可视化流动沸腾实验,结果表明:在较低热流密度下,超亲水表面平均传热系数比普通光滑表面最大提高了约64%,而亲水表面平均传热系数比普通光滑表面最大提高了27%;在高热流密度下,超亲水表面传热系数比普通光滑表面最大提高了约80%,而亲水表面平均传热系数比普通光滑表面最大提高了约50%;超亲水表面可以大程度改善加热壁面的干涸现象。Kumar等人<sup>[73]</sup>通过丝网模板印刷技术在超亲水 $\text{SiO}_2$ 表面上刻印了疏水图案得到润湿异质性表面,相较普通亲水表面,核态沸腾所需过热度更低,气泡脱离频率更高,传热系数大幅增加。从上述研究发现,通过改变表面亲水疏水性可以改变气泡脱离频率、气泡汇聚运动,改变液膜厚度,改善壁面干涸现象,从而强化换热性能。

通过改变通道的结构及对接触表面进行处理以改变亲水、疏水特性都可以对换热性能进行强化,前者的研究相对较多,对后者的研究相对较少。今后对于强化换热方面的研究需要结合测量技术与模拟仿真方法,针对不同的通道结构和亲水疏水特性表面,从汽化核心密度的改变、液膜厚度变化、壁面湿

润特性、脱落气泡与壁面间的薄液膜分布等因素对当地传热系数的影响规律方面作进一步探究,以此寻找最优的表面结构,明确流动沸腾强化换热的机理。

## 5 结 语

本文分别从流型转变及气泡行为研究、换热特性实验研究、传热与压降机理与关联式研究和强化换热方法4个方面综述了窄通道内流动沸腾的实验与理论研究现状,得到以下结论:

(1) 窄通道内气泡易受挤压而聚集为弹状流,在高热流密度下会继而发展为环状流甚至干涸。随着窄缝宽度的减小,表面张力对流型的影响越显著;现有的流型转换准则大都是基于绝热条件下空气-水为工质的,没有考虑流动沸腾传热传质与绝热两项流动的差别,窄通道内流动沸腾状态下流型转变准则有待进一步研究;关于气泡脱离频率以及气泡脱离直径的半经验及经验关系式,部分系数由于工况不同并没有完全确定,还有待研究确定。需要进一步研究不同工况条件下窄通道内流型和流型转变准则以及气泡运动行为。

(2) 研究者们通过实验,模拟实际应用环境,并改变几何与工况参数,可以得到实验段窄缝宽度、进口温度、质流密度和热流密度等参数对传热的影响规律。在此基础上,需要结合测量技术与模拟仿真方法从核态沸腾机理、对流蒸发机理上做进一步的研究。

(3) 分析了窄通道中传热机理以及两相摩擦压降机理,对于窄通道内传热预测关联式及压降预测关联式,由于工况的不同,到目前均没有广泛接受的模型。需要在明确换热机理的基础上,进一步收集更多不同工况下、不同尺寸通道内的实验数据,来完善对换热系数及压降的预测工作,各种参数的实际意义仍有部分存在争议,还需从实验数据中得到验证,并且目前大部分关于两相摩擦压降研究及关联式研究大都是在光滑表面,需要针对不同的强化结构及粗糙表面开发新的压降预测关联式。

(4) 通过改变通道的结构及对接触表面进行处理以改变亲水、疏水特性都可以对换热性能进行强化,前者的研究相对较多,对后者的研究相对较

少。需要从汽化核心密度的改变、液膜厚度变化、壁面湿润特性、脱落气泡与壁面间的薄液膜分布对当地传热系数的影响规律等方面作进一步探究,以此寻找最优的表面结构,明确流动沸腾强化换热的机理。

## 参考文献:

- [1] 王增辉,贾斗南,刘瑞兰. 狭缝通道两相流强化换热研究综述[J]. 热能动力工程,2002,17(4):329-331.  
WANG Zeng-hui, JIA Dou-nan, LIU Rui-lan. A overview of the intensified heat exchange research of two-phase flows in a narrow-gap channel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2002, 17(4): 329-331.
- [2] 沈秀中,宫崎庆次,徐济盛. 在垂直环形窄缝通道中的沸腾传热特性研究[J]. 核科学与工程,2001,21(3):244-251.  
SHEN Xiu-zhong, MIYAZAKI Keiji, XU Ji-yun. A study on the flow boiling heat transfer characteristics in narrow inside heating annuli[J]. Nuclear Science and Engineering, 2001, 21(3): 244-251.
- [3] JOHNSTON B S, BANKOFF S G. Boiling heat transfer in a narrow eccentric annulus: Part III—A model of dry patch extent and temperature distribution[J]. Journal of Heat Transfer, 1986, 108(2): 433-440.
- [4] 杜建通. 饱和液氮在矩形窄通道内池沸腾传热的实验研究[D]. 西安:西安交通大学,1982.  
DU Jian-tong. Experimental study on the pool boiling heat transfer of saturated liquid nitrogen in a rectangular narrow channel[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1982.
- [5] CHEN L, TIAN Y S, KARAYIANNIS T G. The effect of tube diameter on vertical two-phase flow regimes in small tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(21/22): 4220-4230.
- [6] XU J L, CHENG P, ZHAO T S. Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(3): 411-432.
- [7] TAITEL Y, BARNEA D, DUKLER A E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes[J]. AIChE Journal, 1980, 26(3): 345-354.
- [8] KAICHIRO M, ISHII M. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984, 27(5): 723-737.
- [9] BRAUNER N, BARNEA D. Slug/churn transition in upward gas-liquid flow[J]. Chemical Engineering Science, 1986, 41(1): 159-163.
- [10] 常威. 矩形细通道内流动沸腾特性分析及实验研究[D]. 济南:山东大学,2012.  
CHANG Wei. Characteristic analysis and experimental study of flow boiling in rectangular mini channel[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [11] 杨雨辉,陶乐仁,黄理浩,等. 竖直矩形窄通道内水沸腾换热的流型研究[J]. 热能动力工程,2014,29(6):622-626.  
YANG Li-hui, TAO Le-ren, HUANG Li-hao, et al. Study of the water boiling heat exchange flow pattern in a vertical rectangular narrow channel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2014, 29(6): 622-626.
- [12] 周云龙,陈旭,郭新田,等. 三面加热窄矩形通道内气液两相流流型研究[J]. 原子能科学技术,2018,52(7):1262-1267.  
ZHOU Yun-long, CHEN Xu, GUO Xin-tian, et al. Study of gas-liquid two-phase flow patterns in a three-sided heated narrow rectangular channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(7): 1262-1267.
- [13] HUANG L, LI G, TAO L. Experimental investigation on the heat transfer characteristics and flow pattern in vertical narrow channels heated from one side[J]. Heat and Mass Transfer, 2016, 52(7): 1343-1357.
- [14] WANG J, HUANG Y, WANG Y. Photographic study on two-phase flow patterns of water in a single-side heated narrow rectangular channel[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(5): 605-613.
- [15] XU J. Experimental study on gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini gaps[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, 20(4): 422-428.
- [16] 王二利,罗小平,韩彦龙,等. 矩形微通道内两相流阻压降特性的可视化研究[J]. 低温与超导,2015,43(1):74-78.  
WANG Er-li, LUO Xiao-ping, HAN Yan-long, et al. Visualisation research of resistance characteristics on two-phase flow in rectangular microchannels[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2015, 43(1): 74-78.
- [17] 郭昂,杨立新. 竖直矩形窄缝通道过冷流动沸腾的实验研究[J]. 工程热物理学报,2014,35(9):1836-1839.  
GUO Ang, YANG Li-xin. Experimental investigation of subcooled flow boiling in vertical rectangular narrow channel[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(9): 1836-1839.
- [18] 徐建军,陈炳德,王小军. 竖直矩形窄缝通道内近壁气泡生长和脱离研究[J]. 原子能科学技术,2010,44(11):1349-1354.  
XU Jian-jun, CHEN Bing-de, WANG Xiao-jun. Study on bubble growth and departure near wall in vertical narrow rectangular channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(11): 1349-1354.
- [19] 徐建军,陈炳德,王小军. 竖直矩形窄缝通道内近壁滑移气泡运动特征研究[J]. 核动力工程,2011,32(2):59-62.  
XU Jian-jun, CHEN Bing-de, WANG Xiao-jun. Study on motive characteristic of sliding bubble near wall in a vertical narrow rec-

- tangular channel [J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(2): 59-62.
- [20] 徐建军, 陈炳德, 王小军. 竖直矩形窄缝通道滑移气泡聚合作用可视化实验研究 [J]. 原子能科学技术, 2011, 45(5): 548-553.  
XU Jian-jun, CHEN Bing-de, WANG Xiao-jun. Experimental visualisation coalesced interaction of sliding bubble near wall in vertical narrow rectangular channel [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(5): 548-553.
- [21] ZHANG L, LIU L, LIU H, et al. Experimental investigation on sliding bubble coalescence of subcooled flow boiling in rectangular narrow channel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 165: 120681.
- [22] UNAL H, DIAMETER M B. Maximum bubble-growth time and bubble growth rate during the subcooled nucleate flow boiling of water up to 17.7 MN/m<sup>2</sup> [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, 19(6): 643-649.
- [23] BASU N, WARRIER G R, DHIR V K. Wall heat flux partitioning during subcooled flow boiling: Part I—Model development [J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(2): 131-140.
- [24] BASU N, WARRIER G R, DHIR V K. Wall heat flux partitioning during subcooled flow boiling: Part II—Model validation [J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(2): 141-148.
- [25] TU J, YEOH G. On numerical modelling of low-pressure subcooled boiling flows [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(6): 1197-1209.
- [26] KIRICHENKO I A, DOLGOI M, LEVCHENKO N, et al. A study of the boiling of cryogenic liquids [J]. Heat Transfer-Soviet Research, 1976, 8(4): 63-72.
- [27] KIRICHENKO Y A, SLOBOZHANIN L, SHCHERBAKOVA N. Analysis of quasi-static conditions of boiling onset and bubble departure [J]. Cryogenics, 1983, 23(2): 110-112.
- [28] 王际辉, 唐大伟, 颜晓红. 矩形微槽内水的流动沸腾换热及可视化实验研究 [J]. 中国科学院大学学报, 2007, 24(1): 34-38.  
WANG Ji-hui, TANG Da-wei, YAN Xiao-hong. An experimental study on flow boiling heat transfer and its visualisation of water in a rectangular micro-groove horizontally laid [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2007, 24(1): 34-38.
- [29] SOUPREMANIEN U, PERSON S L, FAVRE-MARINET M, et al. Influence of the aspect ratio on boiling flows in rectangular mini-channels [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(5): 797-809.
- [30] 黄理浩, 陶乐仁, 芮胜军, 等. 垂直矩形窄通道流动沸腾换热特性实验研究 [J]. 热能动力工程, 2013, 28(1): 53-56.  
HUANG Li-hao, TAO Le-ren, RUI Sheng-jun, et al. Experimental Study of the boiling heat transfer characteristics of a flow in a vertical rectangular narrow channel [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013, 28(1): 53-56.
- [31] 刘萌芽, 黄理浩, 陶乐仁, 等. 蒸汽加热竖直矩形窄通道流动沸腾换热的研究 [J]. 低温与超导, 2020, 48(1): 90-94.  
LIU Meng-fang, HUANG Li-hao, TAO Le-ren, et al. Research on flow boiling heat transfer in vertical rectangular narrow channel by steam heating [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2020, 48(1): 90-94.
- [32] 郭新田. 三面加热窄矩形通道内汽水两相流动及沸腾传热特性的研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.  
GUO Xin-tian. Study on characteristics of steam-water two-phase flow and boiling heat transfer in three-side heated narrow rectangular channel [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2019.
- [33] 肖友军, 孙立成, 高璞珍. 摇摆状态下窄通道流动沸腾换热特性研究 [J]. 热能动力工程, 2013, 28(6): 585-589.  
XIAO You-jun, SUN Li-cheng, GAO Pu-zhen. Study on boiling heat exchange characteristics of a flow in a narrow channel under the rolling condition [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013, 28(6): 585-589.
- [34] LAZAREK G, BLACK S. Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube with R-113 [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1982, 25(7): 945-960.
- [35] 毕景良, 柯道友, 林曦鹏. 核态沸腾中汽泡动力学及传热机理分析 [J]. 工程热物理学报, 2012, 33(7): 1233-1236.  
BI Jing-liang, KE Dao-you, LIN Xi-peng. Bubble dynamics and heat transfer under a single bubble during nucleate pool boiling [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(7): 1233-1236.
- [36] VOUTSINOS C, JUDD R. Laser interferometric investigation of the microlayer evaporation phenomenon [J]. Journal of Heat Transfer, 1975, 97(1): 88-92.
- [37] SUN L, MISHIMA K. An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(23/24): 5323-5329.
- [38] CHEN J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1966, 5(3): 322-329.
- [39] KANDLIKAR S G. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes [J]. Journal of Heat Transfer, 1990, 112(1): 219-228.
- [40] GUNGOR K E, WINTERTON R. A general correlation for flow boiling in tubes and annuli [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1986, 29(3): 351-358.
- [41] LIU Z, WINTERTON R. A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate

- pool boiling equation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, 34(11): 2759 – 2766.
- [42] BERTSCH S S, GROLL E A, GARIMELLA S V. A composite heat transfer correlation for saturated flow boiling in small channels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(7/8): 2110 – 2118.
- [43] YU W, FRANCE D, WAMBSGANSS M, et al. Two-phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, 28(6): 927 – 941.
- [44] 苏顺玉, 黄素逸, 王晓墨. 环形狭缝中沸腾传热特性的研究 [J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(3): 442 – 444.  
SU Shun-yu, HUANG Su-yi, WANG Xiao-mo. Investigation on the characteristics of boiling heat transfer through narrow annular channels [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(3): 442 – 444.
- [45] KURETA M, AKIMOTO H. Critical heat flux correlation for subcooled boiling flow in narrow channels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(20): 4107 – 4115.
- [46] 潘良明, 陈德奇, 袁德文. 竖直矩形窄缝内流动沸腾压降实验与模型研究 [J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(2): 255 – 258.  
PAN Liang-ming, CHEN De-qi, YUAN De-wen. Experimental and theoretical investigation of pressure drop of flow boiling at vertical narrow rectangular channel [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(2): 255 – 258.
- [47] 孙汝雷, 张大林, 周健成, 等. 窄矩形通道两相流动沸腾压降特性实验研究 [J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(9): 1537 – 1549.  
SUN Ru-lei, ZHANG Da-lin, ZHOU Jian-cheng, et al. Experimental study on two-phase flow boiling pressure drop characteristics in narrow rectangular channel [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(9): 1537 – 1549.
- [48] LOCKHART R W, MARTINELLI R C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1949, 45(1): 39 – 48.
- [49] LEE H J, LEE S Y. Pressure drop correlations for two-phase flow within horizontal rectangular channels with small heights [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27(5): 783 – 796.
- [50] CHISHOLM D. A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1967, 10(12): 1767 – 1778.
- [51] CHISHOLM D. Pressure gradients due to friction during the flow of evaporating two-phase mixtures in smooth tubes and channels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1973, 16(2): 347 – 358.
- [52] MISHIMA K, HIBIKI T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, 22(4): 703 – 712.
- [53] ZHANG W, HIBIKI T, MISHIMA K. Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in mini-channel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(1/3): 453 – 465.
- [54] LEE J, MUDAWAR I. Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications, Part I - Pressure drop characteristics [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(5): 928 – 940.
- [55] SUN L, MISHIMA K. Evaluation analysis of prediction methods for two-phase flow pressure drop in mini-channels [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, 35(1): 47 – 54.
- [56] MCADAMS W, WOODS W, BRYAN R. Vaporization inside horizontal tubes-II-Benzene-oil mixtures [J]. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1942, 64(3): 193 – 199.
- [57] SNYDER N R, EDWARDS D K. Summary of conference on bubble dynamics and boiling heat transfer [J]. *JPL Memo*, 1956, 20: 20 – 137.
- [58] 高 刚, 吴洪涛, 黄素逸, 等. 套管式蒸汽发生器沸腾传热实验研究 [J]. *核动力工程*, 1996, 17(4): 332 – 336.  
GAO Gang, WU Hong-tao, HUANG Su-yi, et al. Experimental study of boiling heat transfer in a cased steam generator [J]. *Nuclear Power Engineering*, 1996, 17(4): 332 – 336.
- [59] 潘良明. 垂直矩形窄缝流动过冷沸腾时的汽泡行为和换热 [D]. 重庆: 重庆大学, 2002.  
PAN Liang-ming. Vapour bubble behaviour and heat transfer in supercooled boiling of vertical rectangular narrow slit flow [D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [60] 孙淑凤, 吴裕远. 液氮在狭缝通道内受迫流动沸腾换热的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2001, 35(5): 450 – 454.  
SUN Shu-feng, WU Yu-yuan. Experimental studies on the boiling heat transfer performance of a forced liquid nitrogen flow in narrow channel [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2001, 35(5): 450 – 454.
- [61] 张 瑞, 焦安军. 弦月形狭缝通道内液氮受迫流动沸腾传热强化的研究 [J]. *低温工程*, 2001(5): 42 – 48.  
ZHANG Rui, JIAO An-jun. Study on boiling heat transfer enhancement of forced liquid nitrogen flow in lunate narrow channel [J]. *Cryogenics*, 2001(5): 42 – 48.
- [62] WARRIER G R, DHIR V K, MOMODA L A. Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26(1): 53 – 64.
- [63] ISHIBASHI E, LIU Z H, CHIRIFU T, et al. Pool boiling heat transfer characteristics of the surface-worked heat transfer tubes in narrow spaces under reduced pressure conditions [J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 1994, 59(557): 198 – 203.
- [64] THONON B, FELDMAN A, MARGAT L, et al. Transition from

- nucleate boiling to convective boiling in compact heat exchangers [J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20(8): 592 - 597.
- [65] WATEL B, THONON B. An experimental study of convective boiling in a compact serrated plate-fin heat exchanger [J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2002, 9(1): 1 - 15.
- [66] CAREY V. Surface tension effects on convective boiling heat transfer in compact heat exchangers with offset strip fins [J]. Journal of Heat Transfer, 1985, 107(4): 970 - 974.
- [67] KIM B, SOHN B. An experimental study of flow boiling in a rectangular channel with offset strip fins [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006, 27(3): 514 - 521.
- [68] PULVIRENTI B, MATALONE A, BARUCCA U. Boiling heat transfer in narrow channels with offset strip fins: Application to electronic chipsets cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(14/15): 2138 - 2145.
- [69] 师艳平, 王皓显, 李剑锐, 等. 波纹翅片通道内液化天然气流动沸腾换热特性分析[J]. 制冷技术, 2018, 38(2): 27 - 32.  
SHI Yan-ping, WANG Hao-xian, LI Jian-rui, et al. Analysis of heat transfer characteristics of liquefied natural gas flow boiling in a corrugated-fin channel [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2018, 38(2): 27 - 32.
- [70] 王皓显, 李剑锐, 胡海涛, 等. 纵荡对板式换热器通道内液化天然气流动沸腾换热特性的影响分析[J]. 化工学报, 2018, 69(2): 101 - 108.  
WANG Hao-xian, LI Jian-rui, HU Hai-tao, et al. Analysis of influence of surging on heat transfer characteristics of liquefied natural gas flow boiling in channel of plate-fin heat exchanger [J]. CIESC Journal, 2018, 69(2): 101 - 108.
- [71] 姜洪鹏, 白敏丽, 高栋栋, 等. 超疏水/亲水性结构表面流动沸腾传热实验研究[J]. 化工学报, 2021, 72(8): 4093 - 4103.  
JIANG Hong-peng, BAI Min-li, GAO Dong-dong, et al. Experimental study on flow boiling heat transfer on superhydrophobic/hydrophilic structure surface [J]. CIESC Journal, 2021, 72(8): 4093 - 4103.
- [72] 喻祖康, 舒碧芬, 黄妍, 等. 基于表面亲水改性的微通道高热流流动沸腾换热性能优化[J]. 热能动力工程, 2020, 35(12): 94 - 100.  
YU Zu-kang, SHU Bi-fen, HUANG Yan, et al. Optimization of flow boiling heat transfer performance in micro-channel under high heat flux based on surface hydrophilic modification [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(12): 94 - 100.
- [73] KUMAR C S, CHANG Y W, CHEN P H. Effect of heterogeneous wettable structures on pool boiling performance of cylindrical copper surfaces [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 1184 - 1193.

(姜雪梅 编辑)



## 越捷航空公司计划购买 40 台罗尔斯·罗伊斯公司的 Trent 7000 发动机

据报道,罗尔斯·罗伊斯公司于2024年2月22日宣布,越捷航空公司承诺购买20架以Trent 7000为动力的A330neo飞机,这将补充该航空公司现有的7架以Trent 7000为动力的A330ceo宽体飞机。

越捷航空首席执行官 Dinh Viet Phuong 表示:“在最新一代空客 A330neo 飞机上安装现代 Trent 7000 发动机有助于越捷航空公司达到新的技术高度,改善我们的航班质量,提高我们运营的可靠性和效率。具体而言,最新一代高效的罗尔斯·罗伊斯发动机的加入将为越捷航空公司到 2050 年实现净零排放的 ESG 计划做出重大贡献。”

(孙嘉忆摘译自 <https://www.rolls-royce.com>)