

文章编号:0253-4339(2013)02-0015-09

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.02.015

混合工质管内流动沸腾传热研究进展

陈东升 石玉美

(上海交通大学机动学院制冷与低温所 上海 200240)

摘要 混合物流动沸腾传热是一种非常重要的传热方式,在现代工业中有着大量应用。在总结了对单工质和混合物管内流动沸腾传热相关理论和研究成果的基础上,对相关传热预估关联式进行了介绍,指出了现有研究的不足,例如:不适用于低温流体,关联式的适用性和精度不足。为进一步的研究指明了方向。

关键词 流动沸腾;混合工质;传热;综述

中图分类号:TL331;TQ021.3

文献标识码:A

A Study on Flow Boiling Heat Transfer of Mixtures in Channels

Chen Dongsheng Shi Yumei

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract Flow boiling phenomena of fluidic mixtures in channels exist widely in industry and is an important heat transfer method. This paper presents a state-of-the-art review on the theory development and achievements about flow boiling of mixtures in channels. And some correlations for prediction of the heat transfer coefficient in flow boiling of pure fluid or mixtures are introduced. The deficiencies on the present studies about flow boiling of mixtures are discussed, for example most of the correlations are not applicable for cryogenic fluids, the prediction precision and applicability of them are not satisfactory yet. Further study of heat transfer correlations on flow boiling is also discussed.

Keywords flow boiling; mixtures; heat transfer; review

流体在管内流动时受到管壁加热或通过管壁吸收外部热量而发生汽化的现象,被称为管内流动沸腾。由于流动沸腾的传热系数通常比同条件下的池沸腾传热高很多,在现代工业中有着大量应用,例如在制冷或空调设备的蒸发器、各类型的汽化器、低温液化设备的换热器等。

而近十几年对于混合物的流动沸腾传热研究正受到越来越多的关注。这主要是由于在制冷工业,已有研究表明氟利昂等类型的工质,如 CFC 和 HCFC 等,会对环境造成很大破坏,如造成臭氧层空洞、温室效应等,因此寻找替代工质成了一项重大课题,除了一些天然工质,如 CO₂ 和 NH₃ 外,各种对环境友好的制冷剂混合物也正被考虑用于替代传统的纯制冷剂,这极大地提高了人们对混合物工质研究的兴趣。另外,相比于单一制冷剂,使用制冷剂混合物的优势还包括性能效率提高,可以更好的匹配产品的热负荷,更安全等。

在经过了多年对许多纯工质和混合工质大量的流动沸腾实验测试和理论研究后,人们对单工质和混

合工质的流动沸腾传热特性有了一定认识,也总结出了许多的经验和半经验公式。但由于两相流动自身的不稳定性、与相变换热相结合后的流动传热的复杂性,以及混合工质多种组分之间的相互传质和物性变化等,都极大地影响了人们对流动沸腾传热的研究和认识。

下面通过对以往的纯工质、混合工质的流动沸腾传热研究和理论进行分析总结,希望找寻现有研究的不足和盲点,为未来进一步研究流动沸腾传热理论寻找方向和突破口。

1 单工质管内流动沸腾

1.1 流动沸腾综述

管内或通道内的流动沸腾是一种带有相变的非常复杂的传热过程。一般来说,管内流动沸腾可以根据两相流型和主要传热机理进行分类。当流体沿管道流动沸腾时气、液相的流速都逐渐增大,并且两相间的速度差也變得越来越大。两相流的流型是由两相流的空泡率、重力、表面张力以及气液相间的剪切

力所确定的。例如对于水平流动,随着流体干度增加、流速增大,一般可以见到泡状流、气塞状流、弹状流、分层流、波状流、环状流、雾状流等多种细分流型。而两相流型又可统一分为四类,分别是离散、间歇、分离和环状流。可以看出,泡状流与雾状流是离散流,而气塞状流和弹状流则属于间歇流,分层流与波状流可以归类为分类流型。

随着流动沸腾流型的变化,其主要传热机理也在发生很大的变化。1966 年 Chen^[1] 首先从理论上对饱和流动沸腾传热机理进行了系统分析,认为流动沸腾是核态沸腾和对流蒸发相结合的一种传热方式。单纯的核态沸腾是一种池沸腾,其发生区间是从核态沸腾起始点到最大热流密度处。在此区间内,气泡在受热表面产生,并增长变大,最后脱离壁面并在液相中一起运动。核态沸腾传热主要受到表面条件(形状、粗糙度等)、热流密度和壁面过热度的影响,但对质量流量与气相干度不敏感。而纯对流蒸发则是通过壁面上的液膜进行传热,并在气液相界面上进行蒸发,但在此过程中没有气泡生成的一种传热过程。对流蒸发主要受到气、液相流速的影响,而气、液相流速是由质量流速与气相干度确定的。可以看出,在工质流动沸腾中,如果热流密度或壁面过热度没有达到核态沸腾起始点,那么流动沸腾中将只发生对流蒸发,其传热效率将与热流密度无关。Chen 的流动沸腾传热理论的提出,为此后流动沸腾传热的理论研究奠定了基础。许多研究者根据这一理论对管内工质的流动沸腾传热现象进行研究,取得了很大的研究成果,并提出了多种经验关联式,用于计算流动沸腾传热的传热效率,详见 1.2。

通常,在流体管内流动沸腾达到干涸点以前,随着气相干度的增加,其传热效率一般是增大的。这主要是由于随着流动沸腾的进行,壁面上液膜的厚度不断变小,从而使得通过液膜的传热变得更有效率。而在流动沸腾后期管壁上出现部分干涸时,传热效率将开始下降。这是因为随着干度增加,被流体所湿润的壁面开始减少,即出现干涸,而液膜蒸发只发生在被流体所湿润的壁面上,同时液膜蒸发的传热效率比单相对流换热高很多,这就使得整体的传热效率下降。随着干度的进一步增加,管壁上液膜完全消失,此时流型变为雾状流,流体气相中夹带着液滴流动。液滴在辐射、与气相对流、与管壁碰撞、相互碰撞等多种传热机理的联合作用下继续蒸发。此时,传热效率将远低于核态沸腾或对流蒸发的效率,并随着干度的增加,不断下降,最终等于流体纯气相的对流传热效率。

1.2 单工质管内流动沸腾传热关联式的研究

对管内流动沸腾传热进行研究的一个最主要的目的是分析和预估其传热效率,为此国内外学者进行了大量的实验研究,并根据实验结果和理论分析总结出许多的计算关联式。这些关联式各有其表现形式,适用范围也不尽相同,特别是目前微通道流动沸腾传热技术研究的兴起,也出现了许多专门适用于微通道传热的计算关联式。对微通道感兴趣的读者可以查阅 Thome^[2] 的相关文献,下面对关联式的研究分析将不涉及微通道部分。

依据已有流动沸腾传热关联式的表达形式,Webb 和 Gupte^[3] 将其分为三种类型:叠加模型、渐进模型、增强模型。各模型的表现形式和典型关联式见表 1。

表 1 流动沸腾传热关联式分类

Tab. 1 Classification of general correlations for flow boiling

模型	方程形式	典型关联式
叠加	$h = h_{nb} + h_{ce}$	Chen(1966) ^[1] , Bennett and Chen(1980) ^[4] , Gungor and Winterton(1986) ^[5]
渐进	$h = [(h_{nb})^n + (h_{ce})^n]^{1/n}$	Liu and Winterton(1991) ^[6] , Steiner and Taborek(1992) ^[7] , Kattan et al.(1998c) ^[8] , Wattelet et al.(1994) ^[9]
增强	$h = E \cdot h_i$	Shah(1982) ^[10] , Gungor and Winterton(1987) ^[11] , Kandlikar(1990) ^[12]

叠加模型是对流动沸腾传热机理的一种简单延伸,它认为流动沸腾传热效率是等于两种传热机理——核态沸腾与对流蒸发各自对传热贡献的一种加和。Chen(1966), Bennett and Chen(1980), Gungor and Winterton(1986) 等拟合的公式都采用了这种叠加的概念。以 Gungor and Winterton(1986) 的公式

(1) 为例。该公式是基于水、制冷剂、乙烯乙二醇等工质的实验数据提出,这些实验包括了竖直向上和向下流动与水平流动等流向。

$$h_{TP} = Sh_{nb} + Fh_{ce} \quad (1)$$

$$S = 1 / (1 + 1.15 \times 10^{-6} E^2 Re_i^{1.17}) \quad (2)$$

$$E = 1 + 24000 B_o^{1.16} + 1.37 (1/X_{tt})^{0.86} \quad (3)$$

$$h_{ce} = 0.023(Re_l)^{0.8}(Pr_l)^{0.4} \frac{k_l}{d_h} \quad (4)$$

$$h_{nb} = 55 P_{red}^{0.12} (-0.4343 \ln(P_{red}))^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67} \quad (5)$$

公式(1)中, S 称为抑制因子, E 为增强因子, h_{nb} 、 h_{ce} 分别为核态沸腾换热系数与对流换热系数。大量的流动沸腾实验结果和理论分析都表明, 在流动沸腾传热中, 随着流体干度的升高, 核态沸腾传热不断减弱, 而对流蒸发传热却得到某种程度的增强, S 与 E 因子都是为了准确反映这一特征而特别引入的修正系数。公式(4)为 Dittus-Boelter 对流换热公式, 其中 Re 数采用本地液相流量计算。公式(5)是 Cooper (1984)^[13] 核态沸腾传热公式。在计算水平流动时, 如果 Froude 数小于 0.05 时, 认为发生了分层流动, 此时要对 E 和 S 因子进行修正, 将它们分别乘以 E_2 和 S_2 因子, 以表明分层流动对传热的影响。

$$E_2 = Fr_{lo}^{(0.1-2Fr_{lo})} \quad (6)$$

$$S_2 = Fr_{lo}^{0.5} \quad (7)$$

渐进模型则是采用对核态沸腾与对流蒸发各自对传热贡献的一个指数类型的加和形式, 如公式(8):

$$h = [(h_{nb})^n + (h_{ce})^n]^{1/n} \quad (8)$$

对于式(8)中指数 n 的取值, 目前还没有明确的理论进行限定。Liu and Winterton(1991)^[6] 公式中 $n = 2$, 而在 Steiner and Taborek (1992)^[7] 和 Kattan et al. (1998c)^[8] 的公式中 $n = 3$ 。Wattelet et al. (1994)^[9]。基于制冷剂 R12、R22、R134a 和 R410a 的实验数据所发展出的另一个渐进公式中 n 又被取为 2.5, 该公式可见式(9):

$$h_{TP} = [h_{nb}^{2.5} + [(1 + 1.925 X_{tt}^{-0.83}) h_{ce} R]^{2.5}]^{1/2.5} \quad (9)$$

$$R = 1.32 Fr_{lo}^{0.2}, Fr_{lo} < 0.25 \quad (10)$$

$$R = 1, Fr_{lo} \geq 0.25 \quad (11)$$

式(9)中 R 为修正因子, 用于考虑低质量流量下分层流动对换热的影响。而 h_{nb} 与 h_{ce} 则同样采用式(5)和式(4)进行计算。

增强模型是 1976 年由 Shah^[14] 以图表的形式提出, 并在 1982 年又将其进一步改进并公式化, 提出了相应的计算关联式。此后 Gungor and Winterton (1987)、Kandlikar (1990) 等都以该计算模型为基础提出了他们自己的计算关联式。以 Gungor and Winterton (1987) 公式为例, 见式(12):

$$h = E h_{ce} \quad (12)$$

$$E = 1 + 3000(B_o)^{0.86} +$$

$$1.12 \left[\frac{x}{1-x} \right]^{0.75} \left(\frac{\rho_L}{\rho_v} \right)^{0.41} \quad (13)$$

式(12)中 E 为修正因子, 用于对纯对流换热系数计算式进行修正, 其计算表达式(13)中引入了 Bo 沸腾准则数, 以表示核态沸腾传热对整个换热的影响。

周鑫等^[15] 人对于多个常见的流动沸腾传热关联式做了较详细的综述, 并总结了一些实验数据与计算关联式预估值间的比较结果。他们认为现有的各预估关联式在预估的准确性与通用性上仍然存在很多问题, 且大都是根据非低温流体的实验数据拟合得到, 对于低温类工质的流动沸腾传热预估偏差较大, 且即使是对一些新兴的流体工质, 如 CO_2 , 其预估值也有较大偏差。

可见, 虽然人们对单质流动沸腾传热已经研究了多年, 取得了很多研究成果, 得到了多种型式的传热预估关联式, 但这些成果仍然需要继续完善。

2 混合物管内流动沸腾

由于 CFC 类和 HCFCs 类制冷剂会对环境造成很大影响, 特别是会造成溴氧层空洞和温室效应, 人们一直在寻找合适的替代制冷剂, 特别是在《蒙特利尔议定书》提出以后, 更加剧了这种需要。被提出作为替代制冷剂的, 包括无氯类工质, 如 HFCs 类单工质, 和自然工质, 如 CO_2 等, 以及混合类制冷剂, 如 R134a/R143、R32/R143 等。其中, 由于混合工质在蒸发过程中存在温度滑移, 能更好的匹配换热器工作, 减少换热器的熵增, 从而能够提高循环的效率^[16-18], 而受到人们更多的关注, 引发了人们对混合工质流动沸腾传热研究的热情。

此外, 除了空调、热泵、制冷系统中存在混合物流动沸腾的应用外, 在其他工业中, 如化工工业、石油工业、生物医药工业、微电子机械系统等, 都有大量的应用。因而, 对混合物流动沸腾传热现象的研究是非常重要的。

2.1 混合物流动沸腾传热研究现状

过去的几十年里, 人们对混合物流动沸腾传热进行了大量的研究工作, 主要是混合物流动沸腾传热实验和相关传热关联式的研究。

1983 年 Radermacher 等人^[19] 对 R13b1/R152a 混合物进行了水平管内流动沸腾实验研究。他们测试的管道为长 2.7m, 内径 9mm 的不锈钢管。该实验中发现这种混合物的本地平均传热系数比单纯 R13b1 或 R152a 的低很多。此后, Rose 等人^[20] 也对 R13b1/R152a 混合物进行了一系列的实验研究。他们的实

验显示在 R13b1 含量在 0.07、0.22、0.36 和 0.64 等多种摩尔浓度下,都同样显现出混合物的传热效率是下降的。另外,他们还首次发现在环状流下混合物的壁面温度沿圆周是变化的。通常,在环状流时,热量是通过管壁上的液膜层传递的,当处于水平流动时,由于重力的影响底部的液膜厚度会比顶部的大。当流体为单工质时,这使得管道底部的热阻增大,在等热流密度的情况下会使得管道底部的壁温高于顶部壁温,也导致底部的传热效率低于顶部。而对于混合物,测试显示底部的壁温低于顶部。Rose 等推测这一现象是由于混合物的组分沿受管道的圆周不断变化所引起的。1989 年, Jung 等人^[21]对 R22、R114 和多种组分的 R22/R114 混合物进行了实验研究。实验管道为长 4m,内径为 9mm 的水平不锈钢管。实验结果指出无论对于单质或是混合物,当干度超过一个转变点时,核态沸腾将完全受到抑制,对流蒸发成为主要的传热机理。在此区域,混合物的传热效率比相同流动条件下的理想值低 36%,如图 1 所示。实验还显示环状流下管道底部和顶部的液体摩尔组分差达到 0.07。顶部和底部流体组分的变化很好地说明了混合物流动沸腾时管道壁温沿圆周变化的原因。而随着组合和温度的变化,混合物的物性参数也发生非线性的变化被认为是另外一个造成混合物流动沸腾传热效率下降的原因。此外, Jung 等人也推测随着组分变化流体的流型也可能发生变化,这也可能造成传热效率下降。

1995 年 Stephan^[22]对混合物流动沸腾传热机理进行了分析,解释了混合物流动沸腾传热效率低于单工质的原因,同时也指出 Steiner(1992)^[7]的渐进模型在预估流动沸腾传热效率时比 Chen(1966)和 Shah(1982)关联式的准确度高,而且也能适用于混合物的计算,不过在计算混合物时需要使用混合物的物性参数。Thome^[23]在 1996 对包括混合物在内新型制冷剂的沸腾研究进行了总结。他指出了混合物流动沸腾研究中的一些关键问题,如混合物的实验数据处理方法、沿管程流动沸腾过程中混合物焓值的等压计算方法,等压下干度和泡点温度的表示形式,混合物流动沸腾传热机理,非共沸混合物传热效率的预估方法等。同时,他也对混合制冷剂的预估计算方法提出了建议,具体可见 2.2 节。1997 年 Shin 等人^[24]研究了水平不锈钢管中纯制冷剂与混合制冷剂的流动沸腾传热。他们的实验管道长 5.9m,内径为 7.7mm,混合制冷剂包括 R32/R134a, R290/R600a, R32/R125 等。他们的研究表明在低干度下热流密度强烈地影响传热效率,而随着干度变大,影响变小。他们

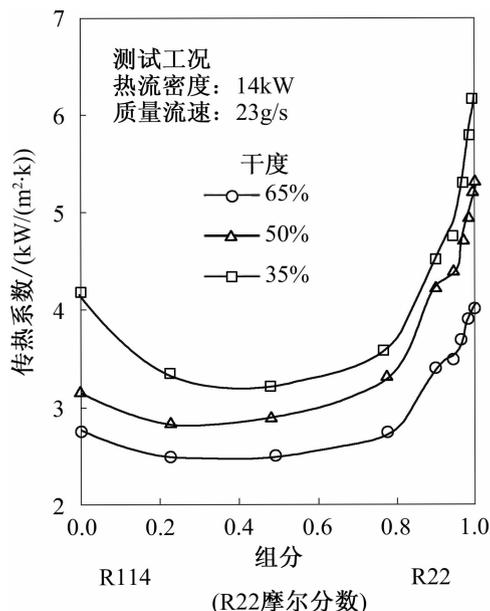


图 1 R22/R114 在不同干度下流动沸腾传热效率^[21]
Fig. 1 Flow boiling heat transfer coefficient of binary mixture R22/R114 mixture as a function of composition at various qualities

采用 Gungor and Winterton (1986, 1987) 关联式和 Thome-Shakil 混合物修正^[25]进行了预估计算,并和实验值进行了比较,发现预估值高估了换热系数。2000 年 Choi 等人^[26]对 R32/R134a、R32/R134a/R125 等混合工质水平管内的流动沸腾传热进行了实验研究,采用的实验管道为不锈钢管,长 5.9m,内径为 7.75mm。他们的实验表明压力对混合工质传热影响不大,但在低干度区域,对单工质的传热影响很大。而热流密度在低干度区域对传热影响明显,在高干度区域影响减弱。他们使用 Gungor and Winterton (1986, 1987) 关联式和 Jung(1989)^[27] 关联式,结合 Thome-Shakil 混合物修正做预估计算,与实验结果比较显示预估偏差在 30% 以上。他们根据实验结果提出了新的叠加模型和混合物修正因子计算式。新关联式的预估计算表明,拥有很好的准确度。2005 年 Mao-Yu Wen 等人^[28]对丙烷、丁烷的单质及混合物的流动沸腾传热与压降特性进行了测试。结果表明在等热流密度和质量流速下,丙烷、丁烷的单质及混合物传热效率比 R134a 分别高 1.66 ~ 1.96 倍、1.28 ~ 1.38 倍、1.57 ~ 1.88 倍,而摩擦压降却小很多。他们根据 Choi 的混合物计算模型提出了自己的预估计算模型,平均偏差为 11.5%。2009 年 Chiou 等人^[29]对 R22/R124 混合工质进行了实验,并用 Gungor and Winterton (1986)、Steiner(1992)、Shah(1982)、Kandlikar(1990)、Mikielewicz(1997)^[30]等预估关联式计算单工质,用 Jung(1989)^[27]和 Murata(2007)^[31]关联

式预估混合工质并和实验结果进行了比较。预估结果显示偏差较大,单质预估最准确的 Kandlikar (1990) 计算标准偏差为 38%, 混合物预估较准确是 Murata (2007), 偏差达 41%。作者提出了新的计算关联式, 用于计算单工质与混合物, 与实验结果的偏差为 26%。2010 年 Zou 等人^[32] 对水平管内 R170/R290 混合工质的流动沸腾传热进行了实验研究。实验管道为水平铜管, 长约 840mm, 内径 8mm。实验表明热流密度增加时, 混合工质传热效率下降, 在干度增加或质量流量增大时, 传热效率增加。压力对传热的影响不明显。相比于单工质, 混合工质在更高的质量流量和干度下才发生流型转变。作者使用 Gungor and Winterton (1986)、Liu and Winterton (1991)、Shah (1982)、Kandlikar (1990)、Kew and Comwell (1997)^[33] 等关联式对 R290、R170 单工质预估计算, 用 Jung (1989) 和 Niederkrüger^[34] 关联式计算 R170/R290 混合工质, 结果表明 Liu and Winterton (1991) 计算单工质偏差最小, 为 14.44%, 两种混合物关联式偏差分别为 68.9% 和 34.99%, 偏差都较大。Zou 通过向 Liu and Winterton (1991) 关联式引入混合物因子的方式, 提出了自己的计算公式, 对 R170/R290 混合工质预估的准确度可达 15.97%。

其他, 还有很多关于混合物流动沸腾传热的研究, 包括对二元或三元制冷剂混合工质^[35] 和氨/水^[36] 等, 这里不再一一列举。从以往这些混合物流动沸腾传热研究可以看出, 相比于单工质, 混合物的流动沸腾传热效率是下降的, 且由于混合物各组分间传质、随沸腾温度升高及物性变化等因素的影响, 传热机理变得更为复杂, 以往为计算单工质传热的关联式以及不能适用于混合工质的预估计算, 而专门为混合工质提出的计算关联式的普遍适用性较弱, 多数学者都对各自所研究的混合工质提出了新的关联式, 以提高计算精度。另外研究对象大部分都集中在各种混合制冷剂上, 其他如碳氢类混合物的研究较少, 且研究流体大多为常温工质, 低温型流体如 LNG (液化天然气)、LPG (液化石油气) 等多组分混合流体的研究则极少见到。

2.2 混合物流动沸腾传热预估关联式研究

同研究单工质流动沸腾传热一样, 研究混合物流动沸腾传热的主要一个目的是得到可用的传热预估关联式。由于许多因素的影响, 如混合物组成对气泡生成的影响^[37]、混合物组分变化造成物性参数的变化^[38]、液相组分变化引起的泡点温度升高、蒸发机理变化等都使得混合物流动沸腾传热特性与单工质有很大不同, 且传热效率一般是低于单工质的。在经过

大量的实验和理论研究后, 研究者们通过对用于单工质的关联式进行修正, 提出了一些可以用于预估混合物流动沸腾传热效率的关联式。

Bennett and Chen (1980)^[39] 通过对 Chen (1966) 关联式进行修正, 提出了用于预估混合物的关联式, 如下式所示

$$h_{\text{mix}} = h_{\text{mnb}} S_{\text{mix}} + h_{\text{ce}} F_{\text{mix}} \quad (14)$$

它与 Chen (1966) 关联式型式相同, 不过核态沸腾系数 h_{mnb} 抑制因子 S_{mix} 和增强因子 F_{mix} 都针对混合物的特性进行了修正。而对流蒸发系数 h_{ce} 则保持与 Chen (1966) 相同。

1981 年 Mishra 等人以沸腾数 Bo 和对流蒸发系数 h_{ce} 为基础的计算关联式, 如式 (15) 所示:

$$h_{\text{mix}} = C h_{\text{ce}} (1/X_{\text{II}})^m Bo^n \quad (15)$$

式中: C 、 m 、 n 为经验常数, 随总组分不同而变化, 属于一种专用型式。

1982 年 Sardesai 等人^[40] 研究表明混合物传热效率下降, 不仅是由于质扩散阻力抑制了核态沸腾, 而且气相热阻的存在也是一个原因。Murata 和 Hashizume 的研究^[41-42] 表明在核态沸腾区域混合物的传热效率比单工质要低很多, 而在对流蒸发区域两者相差不多。同期, Jung 等人^[21, 27] 对 R22/R114 和 R12/R125a 的研究也得到了同样的结论, 认为质扩散阻力对传热的影响在对流区域是比较小的。同时, Jung 将 Bennett and Chen (1980) 式与他们的实验数据进行了比较, 发现发现偏差超过 40%, 预估精度不够准确。他们提出了一个新的可以用于单工质和混合物的计算关联式, 如下所示

$$h_{\text{mix}} = \frac{S}{C_{\text{UN}}} h_{\text{UN}} + C_{\text{me}} F h_{\text{ce}} \quad (16)$$

式中: h_{UN} 为混合池沸腾传热效率, 如式 (17) 所示; S 、 F 为抑制因子和增强因子; C_{me} 是考虑对流蒸发区传质阻力而引入的修正因子。注意式 (17) 中理想池沸腾效率根据 Stephan and Abdelsalam 池沸腾公式^[43] 计算。 C_{UN} 为池沸腾混合物修正因子。

$$h_{\text{UN}} = \frac{1}{C_{\text{UN}}} \frac{h_1 h_2}{X_1 h_1 + X_2 h_2} \quad (17)$$

Jung 将式 (16) 与大量的 R22、R12、R152a、R114 单工质和 R22/R114、R12/R125a 混合工质的实验数据进行了比较, 其平均偏差在 10% 左右。该式在此后也得到了许多学者的认可, 用于与他们自己的实验数据进行对照。

1996 年, Thome^[23] 在对制冷工质沸腾研究进行总结时提出, 在预估非共沸混合物流动沸腾传热效率时可以采用通用的准确的单工质计算关联式, 同时在

关联式中引入混合物修正因子 F_c , 如式(18)所示, 表示由于混合物扩散造成的影响。他还指出流动沸腾中物性的非线性变化造成的传热影响是在计算沸腾关联式时采用本地混合物物性为参数来表示的, 并以 Gungor and Winterton (1986, 1987) 关联式为例进行了说明。

$$F_c = \left[1 + \left(\frac{h_l}{q} \right) (T_{\text{dew}} - T_{\text{bub}}) \left[1 - \exp\left(- \frac{Bq}{\rho_l h_{fg} \beta_L} \right) \right] \right]^{-1} \quad (18)$$

式(18)是 Thome^[44] 提出的混合物池沸腾计算公式。在用于计算流动沸腾时, 该式作为混合物因子引入到计算关联式中。以 Gungor and Winterton (1987) 为例, 可在增强因子 E 的计算式(13)中引入 F_c , 表示混合物的影响。如式(19):

$$E = 1 + 3000 (F_c B_o)^{0.86} + 1.12 \left[\frac{x}{1-x} \right]^{0.75} \left(\frac{\rho_L}{\rho_v} \right)^{0.41} \quad (19)$$

这种混合物流动沸腾计算方式也得到很多学者的使用。不过, 由于选择合适的单质计算关联式和池沸腾混合物计算式 F_c 的方式很多, 各式相结合后计算差别也较大, 在对流体的计算适用性上, 仍然缺乏统一的结论。

一些学者也根据这一预估关联式计算原则, 提出了一些改进的新型式。如 Choi (2000) 等^[26] 提出了一个新的叠加模型, 该模型中采用 Stephan and Abdelsalam 池沸腾公式计算核态沸腾传热系数 h_{nb} , 并引入简化型式的混合物因子 F_c , 考虑混合物的影响, 如下式所示。

$$h_{tp} = h_{nb} S F_c + F h_{ce} \quad (20)$$

$$F_c = 1 / \left(1 + C_m \left[c_p (T_{\text{dew}} - T_{\text{bub}}) / h_{fg} \right] \right) \quad (21)$$

式中: C_m 是经验常数, 由实验数据得出。使用这种预估关联式, 他们对自己的实验数据预估准确度达到 13.2%。此后 2005 年 Mao-Yu Wen 等人也使用这种方法关联出适用于丙烷、丁烷的单质及混合物的关联式, 预估准确度在 11.5% 以内。2010 年 X. Zou 和 M. Q. Gong 等人在研究 R290/R152a^[45] 和 R170/R290^[32] 混合物时使用了另一种修正混合物因子型式, 如式(22)所示, 该式考虑了压力的影响。

$$F_c = \left\{ 1 + \frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}} |y-x| c_1 \left(\frac{P}{10^5} \right)^{c_2} \left[1 + C_3 \exp\left(- \frac{q}{3 \times 10^5} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (22)$$

式中: C_1, C_2, C_3 都为经验常数, 根据实验数据得出。值得注意的是, 对于这两种混合物, 作者分别使

用了加和模型和渐进模型作为预估计算关联式, 对应的偏差分别为 10.41% 与 16%。

1998 年 Kandlikar^[46] 回顾了以往混合物预估关联式, 在分析评估了气泡生长过程与相界面浓度等因素后, 提出了一种新的预估关联式。他根据质扩散对传热影响的程度, 用挥发参数 V_1 将混合物计算分为 3 个区: 近共沸区、中等扩散影响抑制区和重度扩散影响抑制区, 每个区域都有独立的计算关联式。Kandlikar 使用该计算关联式预估了超过 2500 个实验点, 结果显示平均偏差在 8.3% ~ 13.3% 之间, 且能很好地符合 R12/R22, R22/R114, R22/R152a 和 R132a/R123 等混合工质的传热情况。而且该公式的评估覆盖了电加热的不锈钢管与流体加热的铜管, 适用面较广。

另外, 由于流动沸腾预估关联式多数是基于竖直管道的实验数据得到, 在用于水平流动的计算时偏差较大, 特别是在高干度区域。为此, Kattan 和 Thome^[8, 47-48] 提出了一个专门计算水平流动沸腾的计算模型。该模型基于流型的判断, 将气相与液相传热分开计算, 气相采用单纯对流计算公式, 而液相沸腾则采用渐进模型。其关联式基本型式如下:

$$h_{tp} = \frac{\theta_{\text{dry}} h_v + (2\pi - \theta_{\text{dry}}) h_{\text{wet}}}{2\pi} \quad (23)$$

$$h_{\text{wet}} = (h_{nb}^3 + h_{ce}^3)^{1/3} \quad (24)$$

式(23)中池沸腾系数 h_{nb} 采用 Copper (1984) 池沸腾公式^[13] 计算, 并在计算混合物时, 采用式(18)对 h_{nb} 进行修正。Kattan 使用该模型对 5 种不同制冷剂, 包括混合工质, 总共超过 1100 个实验点进行计算时, 显示了良好的预估准确度, 平均偏差为 13.3%。由于该模型考虑了流型和流体流动分层等因素, 在计算高干度区域 ($x > 85\%$) 和层流流动时, 比其他模型的适用性更好, 也更准确。

总的来说, 和单工质预估模型相比, 适用于混合物的计算模型还很少。已经提出的模型多数是研究者根据自己的实验数据, 通过对单工质的预估关联式进行修正得到的, 它们的适用性和准确度仍然有待验证和提高。而且, 由于多数研究是针对二元混合制冷剂的, 关于烷烃类混合物、低温混合物 (LNG、LPG 等)、多组分混合物 (三元及以上) 的研究仍然很少, 已有关联式在预估计算这些混合流体的流动沸腾传热时的准确程度仍需验证。

3 总结

通过以上对单工质和混合物管内流动沸腾传热研究的总结, 我们可以知道经过人们长期对管内流动

沸腾传热的研究,对其沸腾传热机理已经有了较为深入的理解,并且也提出了一些的传热预估关联式,但仍然存在很多不足,特别是在混合物流动沸腾传热研究上,具体有以下几个方面:

1)对单工质和混合物流动沸腾的研究主要集中在制冷剂和常温流体方面,对低温流体的研究仍然不足,特别是对于碳氢类混合物和 LNG、LPG 等低温混合物的研究很少,这对相关工业的发展很不利。

2)虽然已经提出了一些用于单工质流动沸腾传热的预估关联式,但它们的适用性和准确度仍然不足,还没有任何一种关联式能较为准确的预估大多数的工业用流体的流动沸腾传热。

3)已有的混合物流动沸腾传热关联式多数是根据混合物实验结果,通过借鉴混合物池沸腾研究成果对单工质预估关联式进行修正得到的。它们的准确性严重依赖于验证数据来源、单工质预估关联式的适用性和准确度以及池沸腾关联式的准确度等因素。

综上所述,虽然许多学者已经将研究重点转移到微小尺度的流动沸腾传热研究上,但常规尺度的流动沸腾传热研究仍然存在很多不足,特别是在混合物传热研究方面,仍有许多问题待人们进一步研究。

参考文献

[1] Chen J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow[J]. *IandEC Process Design and Development*, 1966, 5 (3): 322-329.

[2] Thome J R. Boiling in microchannels: A review of experiment and theory[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2004, 25 (2): 128-139.

[3] Webb R L, Gupte N S. Critical review of correlations for convective vaporization in tubes and tube banks[J]. *Heat Transfer Engineering*, 1992, 13 (3): 58-81.

[4] Bennett D L, Chen J C. Forced convective boiling in vertical tubes for saturated pure components and binary mixtures [J]. *AICHE Journal*, 1980, 26 (3): 454-461.

[5] Gungor K E, Winterton R H S. A general correlation for flow boiling in tubes and annuli[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1986, 29 (3): 351-358.

[6] Liu Z, Winterton R H S. 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.

[7] Steiner D, Taborek J. Flow boiling heat transfer in vertical tubes correlated by an asymptotic model[J]. *Heat Transfer Engineering*, 1992, 13 (2): 43-69.

[8] Kattan N, Thome J R, Favrat D. Flow boiling in horizontal tubes: Part 3 - Development of a new heat transfer model

based on flow pattern[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1998, 120 (1): 156-165.

[9] Wattleet J P. Heat transfer flow regimes of refrigerants in a horizontal-tube evaporator[D]. 9522196, United States — Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign 1994.

[10] Shah M M. Chart correlation for saturated boiling heat transfer: Equations and further study [J]. *ASHRAE Trans*, 1982, 88(1): 185-196.

[11] Gungor K E, Winterton R H S. Simplified general correlation for saturated flow boiling and comparisons of correlations with data [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1987, 65 (2): 148-156.

[12] Kandlikar S G. 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.

[13] Cooper M G. SATURATION NUCLEATE POOL BOILING -A SIMPLE CORRELATION[J]. In Leeds, Engl, 1984: 785-793.

[14] Shah M M. NEW CORRELATION FOR HEAT TRANSFER DURING BOILING FLOW THROUGH PIPES [J]. *ASHRAE Transactions*, 1976, 82 :66-86.

[15] 周鑫, 公茂琼, 吴剑锋. 低温工质流动沸腾传热关联式研究综述 [J]. *制冷学报*, 2008, 29 (2): 1-7. (Zhou Xing, Gong Maoqiong, Wu Jianfeng. Review on Flow Boiling Heat Transfer Correlations of Cryogenic Fluids [J]. *Journal of Refrigeration*, 2008, 29 (2): 1-7.)

[16] Vorster P P J, Meyer J P. Wet compression versus dry compression in heat pumps working with pure refrigerants or non-azeotropic binary mixtures for different heating applications [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2000, 23 (4): 292-311.

[17] Kruse H. The advantages non-azeotropic refrigerant mixtures for heat pump application [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1981, 4 (3): 119-125.

[18] Didion D A, Bivens D B. Role of refrigerant mixtures as alternatives to CFCs [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1990, 13 (3): 163-175.

[19] Radermacher R, Ross H, Didion D. Experimental determination of forced convection evaporative heat transfer coefficients for non-azeotropic refrigerant mixtures [J]. *ASME Nat. Heat Transfer Conf.*, 1983, 54.

[20] Ross H, Radermacher R, di Marzo M, et al. Horizontal flow boiling of pure and mixed refrigerants [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1987, 30 (5): 979-992.

[21] Jung D S, McLinden M, Radermacher R, et al. Horizontal flow boiling heat transfer experiments with a mixture of R22/R114 [J]. *International Journal of Heat and Mass*

- Transfer, 1989, 32 (1): 131-145.
- [22] Stephan K. Two-phase heat exchange for new refrigerants and their mixtures [J]. International Journal of Refrigeration, 1995, 18 (3): 198-209.
- [23] Thome J R. Boiling of new refrigerants: A state-of-the-art review [J]. Ebullition de nouveaux frigorigènes état de la technique, 1996, 19 (7): 435-457.
- [24] Shin J Y, Kim M S, Ro S T. Experimental study on forced convective boiling heat transfer of pure refrigerants and refrigerant mixtures in a horizontal tube [J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20 (4): 267-275.
- [25] Collier J G, Thome J R. Convective Boiling and Condensation [M]. Oxford University Press: Oxford, 1994.
- [26] Choi T Y, Kim Y J, Kim M S, et al. Evaporation heat transfer of R-32, R-134a, R-32/134a, and R-32/125/134a inside a horizontal smooth tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43 (19): 3651-3660.
- [27] Jung D S, McLinden M, Radermacher R, et al. A study of flow boiling heat transfer with refrigerant mixtures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32 (9): 1751-1764.
- [28] Wen M Y, Ho C Y. Evaporation heat transfer and pressure drop characteristics of R-290 (propane), R-600 (butane), and a mixture of R-290/R-600 in the three-lines serpentine small-tube bank [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25 (17/18): 2921-2936.
- [29] Chiou C B, Lu D C, Liao C Y, et al. Experimental study of forced convective boiling for non-azeotropic refrigerant mixtures R-22/R-124 in horizontal smooth tube [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29 (8/9): 1864-1871.
- [30] Mikielwicz D, Mikielwicz J, Tesmar J. Improved semi-empirical method for determination of heat transfer coefficient in flow boiling in conventional and small diameter tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50 (19/20): 3949-3956.
- [31] Murata K, Hashizume K. Investigation on forced convection boiling of nonazeotropic refrigerant mixtures [J]. Heat Transfer -Japanese Research, 1990, 19 (2): 95-109.
- [32] Zou X, Gong M Q, Chen G F, et al. Experimental study on saturated flow boiling heat transfer of R170/R290 mixtures in a horizontal tube [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33 (2): 371-380.
- [33] Kew P A, Cornwell K. Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels [J]. Applied Thermal Engineering, 1997, 17 (8/9/10): 705-715.
- [34] Niederkrüger M, Steiner D, Schlünder E U. Horizontal flow boiling experiments of saturated pure components and mixtures of R846-R12 at high pressures [J]. International Journal of Refrigeration, 1992, 15 (1): 48-58.
- [35] Sami S M, Comeau J D. Influence of thermophysical properties on two-phase flow convective boiling of refrigerant mixtures [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22 (14): 1535-1548.
- [36] Rivera W, Best R. Boiling heat transfer coefficients inside a vertical smooth tube for water/ammonia and ammonia/lithium nitrate mixtures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42 (5): 905-921.
- [37] Shock R A W. Nucleate boiling in binary mixtures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1977, 20 (6): 701-709.
- [38] Stephen K, Preusser P. Heat transfer and critical heat flux in pool boiling of binary and ternary mixtures [J]. Ger Chem Eng, 1979, 2 (3): 161-169.
- [39] Bennett D L, Chen J C. Forced convective boiling in vertical tubes for saturated pure components and binary mixtures [J]. AIChE J., 1980, 26 (3): 454-461.
- [40] Sardesai R G, Shock R A W, Butterworth D. Heat and mass transfer in multicomponent condensation and boiling [J]. Heat Transfer Engineering, 1982, 3 (3/4): 104-114.
- [41] Murata K, Hashizume K. Forced convective boiling of non-azeotropic refrigerant mixtures inside tubes [J]. Transactions -ASME: Journal of Heat Transfer, 1993, 115 (3): 680-689.
- [42] Murata K, Hashizume K. Forced convection boiling of non-azeotropic mixtures [J]. Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 1988, 54 (506): 2856-2863.
- [43] Stephan K, Abdelsalam M. Heat-transfer correlations for natural convection boiling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1980, 23 (1): 73-87.
- [44] Thome J R. Prediction of the mixture effect on boiling in vertical thermosiphon reboilers [J]. Heat Transfer Engineering, 1989, 10 (2): 29-38.
- [45] Zou X, Gong M, Chen G, et al. Experimental study on saturated flow boiling heat transfer of R290/R152a binary mixtures in a horizontal tube [J]. Frontiers of Energy and Power Engineering in China, 2010, 4 (4): 527-534.
- [46] Kandlikar S G. Boiling heat transfer with binary mixtures: Part II -Flow boiling in plain tubes [J]. Journal of Heat Transfer, 1998, 120 (2): 388-394.
- [47] Kattan N, Thome J R, Favrat D. Flow boiling in horizontal tubes: Part I - Development of a diabatic two-phase flow pattern map [J]. Journal of Heat Transfer, 1998, 120 (1): 140-146.
- [48] Kattan N, Thome J R, Favrat D. Flow boiling in horizontal tubes: Part 2 - New heat transfer data for five refrigerants

[J]. Journal of Heat Transfer, 1998, 120 (1): 148-155.

通信作者简介

陈东升,男(1976-),博士研究生,上海交通大学机动学院制冷所,15021957610,E-mail:chdongsh@126.com。研究方向:多相流传热、制冷与低温技术,LNG 液化技术。现在进行的项目有:LNG 管内流动沸腾特性研究。

About the corresponding author

Chen Dongsheng(1976-), male, Ph. D, Shanghai Jiao Tong University, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai, China, 15021957610, E-mail: chdongsh@126.com. Research fields: multiphase flow and heat transfer, refrigeration and cryogenics technology, natural gas liquefaction technology. The author takes on project: study on the flow boiling heat transfer of LNG in tubes.