

文章编号:1006-2467(2021)09-1095-13

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.159

小通道内制冷剂两相流动摩擦压降关联式分析

刘勖诚¹, 谷波¹, 曾炜杰¹, 杜仲星¹, 田镇²

(1. 上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200240; 2. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要: 针对小通道内两相流动摩擦压降的关联式进行了全面分析, 描述关联式之间的继承发展关系, 并指出不同关联式之间的创新之处. 为了评估各种关联式在小通道中的通用性和精度, 建立了一个大型摩擦压降数据库, 此数据库在蒸发和冷凝/绝热工况下分别有 1 302 和 1 576 个数据点. 对 26 种关联式分工况进行评估分析, 并发现 Sempértegui-Tapia 和 Kim 关联式分别在蒸发工况、冷凝/绝热工况下具有最佳的预测能力, 最后提出了关于关联式改进的建议.

关键词: 两相流; 摩擦压降; 关联式; 评估

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

Analysis of Frictional Pressure Drop Correlations of Refrigerant Two-Phase Flow in Mini-Channel

LIU Xucheng¹, GU Bo¹, ZENG Weijie¹, DU Zhongxing¹, TIAN Zhen²

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper presents a comprehensive analysis of the frictional pressure drop correlations in two-phase flow in mini-channel, describes the relationship of inheritance and development between the correlations, and points out the innovation between different correlations. In order to evaluate the universality and precision of various correlations, it establishes a large frictional pressure drop database, which is specialized for mini-channels. This database includes 1 302 and 1 576 data points under evaporation and condensation/adiabatic conditions, respectively. Finally, it evaluates and analyzes 26 correlations under different conditions. The results show that the Sempértegui-Tapia and the Kim correlation have the best prediction ability under evaporation conditions and condensation/adiabatic conditions, respectively. This paper provides some advice on the improvement of correlation.

Key words: two-phase flow; frictional pressure drop; correlations; evaluation

近年来,紧凑型微通道换热器逐渐在市场中扮演重要的角色,伴随着换热器管径的减小,换热器的压降不断升高.管内两相流动的压降包括 4 个部分,重力压降、局部压降、摩擦压降和加速压降.在小通

道和微通道中,摩擦压降为总压降的主要部分.近 20 年来,小通道及微通道中两相流动的摩擦压降计算问题、通道及微通道中两相流动的摩擦压降计算问题逐渐成为研究热点,新的摩擦压降关联式不断

收稿日期:2020-06-01

基金项目:国家自然科学基金(51976114),中国博士后科学基金(2019M650084)资助项目

作者简介:刘勖诚(1997-),男,江西省吉安市人,硕士生,主要研究方向为换热器.

通信作者:谷波,男,教授,博士生导师,电话(Tel.):021-34206260; E-mail: gubo@sjtu.edu.cn.

出现. 文献[1]利用矩形多管小通道内水的沸腾压降实验, 建立了一个分相模型下的关联式, 取得了良好的预测效果. 文献[2]针对制冷剂 R22 在小通道中的沸腾流动压降特性进行了研究, 着重讨论了热流密度对于压降的影响. 文献[3]结合流型研究了 CO₂ 在水平小通道中的沸腾流动压降特性, 探究了多个参数对摩擦压降的影响. 文献[4]则对比了制冷剂 R1234ze(E)和 R134a 管内沸腾流动下的摩擦压降, 讨论了不同实验工况对二者的影响.

但在小管径下, 不同关联式的计算结果相差较大, 在换热器设计过程中, 如何选取合适的摩擦压降计算关联式仍然是一个问题. 文献[5]对管内两相流动摩擦压力损失进行了研究, 认为 Muller-Steinhagen(M-S)和 Heck 关联式的预测能力最好. 文献[6]使用空气-水在竖直下降管内流动的摩擦压降数据对多种关联式进行评估.

本文基于文献[7]对管道类型划分的标准, 将管道水力直径 $D_h > 3\text{ mm}$ 的管道划分为常规管道, $3\text{ mm} \geq D_h > 200\text{ }\mu\text{m}$ 管道划分为小型通道, $200\text{ }\mu\text{m} \geq D_h > 10\text{ }\mu\text{m}$ 的管道划分为微通道. 此外, 对近年来小通道内两相流动摩擦压降的计算方法进行罗列与叙述, 主要为均相模型和分相流动模型下的各种关联式. 从关联式比较评估的角度, 对 26 种关联式进行分析, 为换热器的分析和计算提供良好的参考.

1 均相模型关联式

1.1 基本模型

均相模型假设两相流体充分混合, 且以相同速度流动, 这样就可以将两相下的流体看作单相下的

流体进行摩擦压降计算, 所以这个模型也叫作无滑移模型. 如果能够准确地导出两相区的雷诺数, 单相流动摩擦压降公式就可以用来计算两相摩擦压降.

对于均相模型下的两相摩擦压降关联式, 采用以 Darcy-Weisbach 方程为基础的计算公式:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{tp},\text{F}} = f \frac{1}{D_h} \frac{G^2}{2\rho_{\text{tp}}}$$

(1)

式中: $(dp/dz)_{\text{tp},\text{F}}$ 为两相流摩擦压降 p 沿路程 z 的微分; f 为 Darcy 摩擦因子; G 为质流密度; ρ_{tp} 为两相密度. f 采用管内单相流动摩擦压降的计算方法, 采用文献[8]提出的通用型关联式, 其可在任意雷诺数下使用. ρ_{tp} 和 f 可由下式定义:

$$\rho_{\text{tp}} = \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l}\right)^{-1}$$

(2)

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{Re_{\text{tp}}} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1.5}} \right]^{1/12}$$
$$A = \left[2.457 \ln \left(\frac{1}{(7/Re_{\text{tp}})^{0.9}} + 0.27 \frac{Ra}{D_h} \right) \right]^{16}$$
$$B = \left(\frac{37\,530}{Re_{\text{tp}}} \right)^{16}$$

(3)

式中: ρ_g 和 ρ_l 分别为气相密度和液相密度; x 为干度; Re_{tp} 为两相雷诺数; Ra 为管道粗糙度. 式(3)中, Re_{tp} 由下式定义:

$$Re_{\text{tp}} = \frac{GD_h}{\mu_{\text{tp}}}$$

(4)

式中: μ_{tp} 为两相黏度. 均相模型中不同文献定义的两相黏度 μ_{tp} 如表 1 所示. 其中: μ_l 和 μ_g 为液相和气相黏度; p_r 为相对压力.

表 1 均相模型关联式
Tab. 1 Correlations of homogeneous equilibrium model

文献编号	关联式	文献编号	关联式
[9]	$\frac{1}{\mu_{\text{tp}}} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_l}$	[12] ₄	$\mu_{\text{tp}} = \frac{1}{2} \left[\mu_l \frac{2\mu_l + \mu_g - 2(\mu_l - \mu_g)x}{2\mu_l + \mu_g + (\mu_l - \mu_g)x} + \mu_g \frac{2\mu_g + \mu_l - 2(\mu_g - \mu_l)(1-x)}{2\mu_g + \mu_l + (\mu_g - \mu_l)(1-x)} \right]$
[10]	$\mu_{\text{tp}} = \frac{2\mu_g + \mu_l - 2(\mu_g - \mu_l)(1-x)}{2\mu_g + \mu_l + (\mu_g - \mu_l)(1-x)}$	[13]	$\mu_{\text{tp}} = x\mu_g + (1-x)\mu_l$
[11]	$\mu_{\text{tp}} = \mu_l \left[(1-x) + x(\rho_l/\rho_g)^{0.5} \right]^{-1}$	[14]	$\mu_{\text{tp}} = \frac{x\rho_l\mu_g + (1-x)\rho_g\mu_l}{x\rho_l + (1-x)\rho_g}$
[12] ₁	$\mu_{\text{tp}} = \mu_l \frac{2\mu_l + \mu_g - 2(\mu_l - \mu_g)x}{2\mu_l + \mu_g + (\mu_l - \mu_g)x}$	[15]	$\omega = \frac{x\rho_l}{\rho_g + x(\rho_l - \rho_g)}$ $\mu_{\text{tp}} = \omega\mu_g + (1-\omega)(1+2.5\omega)\mu_l$
[12] ₂	$\mu_{\text{tp}} = \mu_g \frac{2\mu_g + \mu_l - 2(\mu_g - \mu_l)(1-x)}{2\mu_g + \mu_l + (\mu_g - \mu_l)(1-x)}$	[16]	$\mu_{\text{tp}} = \frac{\mu_l\mu_g}{\mu_g + x^{1.4}(\mu_l - \mu_g)}$
[12] ₃	$\mu_{\text{tp}} = \frac{1}{4} \left\{ (3x-1)\mu_g + (2-3x)\mu_l + \sqrt{[(3x-1)\mu_g + (2-3x)\mu_l]^2 + 8\mu_g\mu_l} \right\}$	[17]	$\mu_{\text{tp}} = C_\mu\mu_l(1-x) + \mu_gx, \quad C_\mu = 6.195 - 9.178p_r$

文献[18]提出,依据均相模型的定义,即两相充分混合,忽略两相之间的速度滑移,则均相模型可能只适用于两相混合程度较高的流型,例如气泡流、弥散流;随后,基于一个数据量为 3 908 的数据库对各模型进行比较分析,认为文献[13]和文献[12]₁ 的均相模型关联式具有准确预测小/微通道压降数据的能力。

文献[19]使用空气-水在小管径圆管中的实验数据,发现文献[14]的均相模型只有在小通道气泡流中具有良好的摩擦压降预测能力. 文献[20]提到均相模型只适用于高质流密度、高气泡空隙率的情况。

文献[21]使用 R134a 制冷剂在 231 μm × 713 μm 的矩形多管摩擦压降的数据,对 McAdams 关联式、Akers 关联式、Cicchitti 关联式、Dukler 关联式、Beattie 关联式、Lin 关联式进行比较评估,发现除了 Cicchitti 关联式,均相模型关联式均不同程度低估了压降数据,Cicchitti 关联式的平均相对偏差是最小的,但其没有正确地预测趋势。

文献[22]使用水-氮气在矩形小/微通道中的实验数据,对各种均相模型进行评估分析,结果发现 Beattie 关联式具有最好的预测能力,可能是因为 Beattie 关联式是专门针对气泡流和环状流而开发。

文献[23]提出,在 $x=1$ 时,Akers 关联式计算的 μ_{tp} 与 μ_g 不一致,Beattie 关联式在低干度下计算的 μ_{tp} 大于 μ_l ,这两个现象都是违反物理意义的. 所以文献[12]₄ 在建立关联式时,基于 ρ_{tp} 在 $x=0$ 和 $x=1$ 的连续性,提出了 μ_{tp} 也应在边界处具有连续性,即 $x=0, \mu_{tp}=\mu_l; x=1, \mu_{tp}=\mu_g$ 。

2 分相流动模型关联式

分相流动模型由文献[24]于 1949 年提出,该模型假设管中的两相流体分别占有一定的管道截面,分别以不同的流速流动. 此时,两相的压降采用单相的摩擦压降乘一个增强因子的形式,表达式如下:

(dp/dz)_{tp,F} = ϕ_l²(dp/dz)_{l,F} = ϕ_g²(dp/dz)_{g,F} (5)

(dp/dz)_{tp,F} = ϕ_{lo}²(dp/dz)_{lo,F} = ϕ_{go}²(dp/dz)_{go,F} (6)

式中:ϕ_l²和 ϕ_g²分别为仅有液相和气相流动时的增强因子;ϕ_{lo}²和 ϕ_{go}²分别为全液相和全气相流动时的增强因子;(dp/dz)_{l,F}和 (dp/dz)_{g,F}为仅有液相和气相流动摩擦压降沿路程的微分;(dp/dz)_{lo,F}和 (dp/dz)_{go,F}为全液相和全气相流动摩擦压降沿路程的微分. 增强因子的函数形式为研究的重点. 式(5)称为

单相增强模型,式(6)称为全相增强模型。

文献[25]在单相增强模型的基础上将增强因子 ϕ² 和 Martinelli 因子 X 两者建立了函数关系,计算过程如下所示:

ϕ_l² = 1 + C/X + 1/X² (7)

ϕ_g² = 1 + CX + X² (8)

X² = (dp/dz)_{l,F} / (dp/dz)_{g,F} (9)

(dp/dz)_{l,F} = f_l * 2G²(1-x)² / (D_h ρ_l)
(dp/dz)_{g,F} = f_g * 2G²x² / (D_h ρ_g) (10)

式中: f_l 和 f_g 分别为液相和气相摩擦因子,可由文献[8]计算; C 为 L-M 关联式参数,物理意义为气液相相互作用的剧烈程度,为流态函数. 不同流态下的 C 取值如表 2 所示. 其中,层流湍流的临界点可以粗略地以 $Re_j=2\,000$ ($j=l,g$) 为分界线,但是实际上层流和湍流之间有过渡态。

表 2 Chisholm 关联式中不同流态下的参数 C
Tab. 2 C parameters of Chisholm correlation in different flow regimes

液相流态	气相流态	C
湍流	湍流	20
层流	湍流	12
湍流	层流	10
层流	层流	5

2.1 单相增强模型关联式

在文献[25]提出关联式后,大量的研究人员对 Chisholm 关联式形式进行改进,主要是针对 L-M 关联式参数 C 进行各种形式的改进,改进结果如表 3 所示. 其中: P_H 和 P_F 分别为通道被加热周长和总周长; X 为 Martinelli 因子; X_u 为气液两相均为湍流下的 Martinelli 因子; α 为空泡份额; λ 为通道结构常数; Y 为 Chisholm 参数,一种物性参数; f_{int} 、 f_{tp} 、 f_{lo} 、 f_{go} 分别为相界面、两相、全液相、全气相摩擦因子; A 、 a 、 b 、 c 均为随流态变化的拟合参数; φ 为表征表面张力影响的一种无量纲数; j_l 为液相表面速度; We_c 为通道气芯的韦伯数; Re_H 为液膜雷诺数; Re_l 为液相雷诺数; Re_g 为气相雷诺数; Re_{lo} 为全液相雷诺数; N_{con} 为限制数; Sn 为全相苏拉特曼数; We_{lo} 为全液相韦伯数; We_{tp} 为两相韦伯数; $V_{\mu tp}$ 为无量纲两相黏度数; Re_{go} 为全气相雷诺数。

文献[26]使用水-空气在小管道中流动摩擦压降的实验数据,结合前人圆管和矩形管的数据,基于

文献[25]的模型,对 L-M 关联式参数 C 进行了修改,使其成为 D_h 的函数.此关联式能够良好地预测小管径内的流动摩擦压降.

文献[27]基于水在 2.98 mm 内径管道流动沸腾的摩擦压降数据,发现 Chisholm 关联式中 X^{-2} 项占主导,进而修正了 Chisholm 关联式在小管径中的表现.文献[28]基于 Chisholm 关联式,考虑了表面张力 σ 的影响,将 L-M 关联式参数 C 修正为 X 、全液相雷诺数 Re_{l0} 和限制数 N_{con} 的函数.

文献[29-30]建立了一个大型绝热/冷凝的小/微通道压降数据的数据库,此数据库包含了 7 115 个数据,将这些数据依据气液相流态,划分为 4 个区域,之后应用 Re_{l0} 和苏拉特曼数 Su_{go} 对 L-M 关联式参数 C 进行修改.基于沸腾下的小/微通道压降数据的数据库,使用沸腾数 Bo 和韦伯数 We ,对绝热/冷凝下的摩擦压降计算公式进行沸腾下的修正.最后提出由于液滴的夹带作用,蒸发和冷凝工况下的摩擦压降关联式应有所不同.

文献[31]利用多种工质在多管中的冷凝压降数据,对参数 C 进行拟合,之后将 p_r 和物性修正项 (ρ_l/ρ_g) 加入参数 C 中,用以表示不同制冷剂与不同饱和温度下的物性影响.文献[32]认为邦德数 Bd 和弗劳德数 Fr 为 C 的函数, Fr 为中间参数 n 的函数,并分工况多次拟合参数 C 和 n ,最终获得关联式.

文献[33]使用丙烷在常规通道内的冷凝数据,对参数 C 修改时加入了两相滑移比率 S_r 的影响.文献[34]考虑了肋结构存在的影响,使用 R134a 制冷剂在多管小通道内绝热压降的数据对参数 C 进行拟合,采用 x 、 p_r 、 Re_{tp} 和两相韦伯数 We_{tp} 对参数 C 进行改进.文献[35-36]则考虑到单管实验和多口管实验的差异,即多口管流动不稳定性的影响,进而针对单管和多口管分别建立了关联式.关联式加入了新的无量纲数两相黏度数 $V_{\mu tp}$ 的影响,并依据 $Re_j(j=$

1,g)对小通道/微通道压降数据库进行流态上的划分,取得了良好的拟合结果.

2.2 全相增强模型关联式

文献[37]提出一种“ B -系数”的全相增强型模型之后,研究者在此公式基础上的改进显得更加多样化(见表 3).文献[38]认为 Friedel 关联式在在高 p_r 和小管径下的预测能力差,因此使用 p_r 替换部分 Martinelli 因子 X ,同时考虑到原关联式中无量纲数 We 及 Fr 影响较小,最后选择使用 x 和 p_r 来开发 ϕ_{lo}^2 的函数.

文献[39]在文献[38]的关联式基础上,考虑了多种无量纲数代表的物理意义,引入 3 种无量纲数 Bd 、 We 和 Fr 对小通道绝热压降数据进行拟合,修正后的关联式强调了小通道中 σ 的影响.

文献[40]建立了一个包含 2 622 个数据点的流动沸腾压降数据,此数据库涵盖了宽广的条件范围,比较后发现 Muller-Steinhagen 的关联式在小通道范围内预测能力较差,并引入拉普拉斯数 La 对原关联式在小通道范围内进行修正.

文献[41]针对丙酮在三角形微通道中的沸腾摩擦压降进行实验,并使用质流密度对文献[42]的“ B -系数”进行进一步的修正.文献[43]测试了冷凝工况下矩形截面多口小通道中多种制冷剂的压降特性,并开发了新的全相增强关联式,其平均相对偏差为 9.6%.文献[44]研究了绝热工况下工质种类、管道截面和水力直径对摩擦压降的影响,首次将全气相雷诺数 Re_{go} 加入了 Muller-Steinhagen 关联式^[45]中,使得原公式中的线性项能在不同的制冷剂下进行拟合.文献[46]在 0.15 mm×0.25 mm 的矩形多口微通道中对去离子水进行压降研究实验,利用获得的高质流密度数据点,对 Friedel 关联式中的 Fr 进行替换,创新性地将两相摩擦因子比 (f_l/f_g) 加入关联式中.

表 3 分相模型关联式和经验关联式
Tab. 3 Separate flow correlations and empirical correlations

文献编号	关联式	实验信息等
[18]	$f_{tp} = 0.019\,6We_c^{-0.372}Re_l^{0.318}$	适用于小通道和常规通道,流型为环状流, $D_h=0.517\sim31.7$ mm,工质为水、R134a、R245fa 及多种二元混合物, $G=39.4\sim3\,498$ kg/(s·m ²), $x=0.01\sim0.97$;平均相对偏差为 13.1%,几乎所有数据涵盖在±30%的误差带中;工况为绝热
[26]	$C=21[1-\exp(-0.319D_h)]$	基于文献[25]修正;圆形和矩形光滑管,小通道和常规通道,二元工质,水平流动和竖直流动;大部分数据误差在±12%之内;工况为绝热; D_h 单位为 mm

(续表)

文献编号	关联式	实验信息等
[27]	$X=18.65\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5}\left(\frac{1-x}{x}\right)\frac{Re_g^{0.1}}{Re_l^{0.5}}$ $\varphi_l^2=X^{-1.9}$	基于文献[25]修正;圆形小通道, $D_h=2.98\text{ mm}$,工质为水,流态为液相层流-气相湍流, $G=50\sim 200\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,压力范围为 200 kPa;平均相对偏差为 7%;工况为蒸发
[28]	$C=0.227\left(Re_{lo}\right)^{0.452}X^{-0.320}\left(N_{con}\right)^{-0.820}$ $N_{con}=\frac{1}{D_h}\left[\frac{\sigma}{g\left(\rho_l-\rho_g\right)}\right]^{0.5}$	基于文献[25]修正;圆形微通道/小通道, $D_h=0.244\sim 0.792\text{ mm}$,工质为 R134a, $G=140\sim 950\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$;平均相对偏差为 8.1%;工况为蒸发
[29]	$C=\begin{cases} 0.39Re_{lo}^{0.03}Su_{go}^{0.10}\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0.35} & Re_l\geqslant 2\,000,\,Re_g\geqslant 2\,000 \\ 8.7\times 10^{-4}Re_{lo}^{0.17}Su_{go}^{0.50}\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0.14} & Re_l\geqslant 2\,000,\,Re_g<2\,000 \\ 1.5\times 10^{-3}Re_{lo}^{0.59}Su_{go}^{0.19}\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0.36} & Re_l<2\,000,\,Re_g\geqslant 2\,000 \\ 3.5\times 10^{-5}Re_{lo}^{0.44}Su_{go}^{0.50}\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0.48} & Re_l<2\,000,\,Re_g<2\,000 \end{cases}$	基于文献[25]修正;包括了多种工质、管道截面类型和广阔的工况范围, $D_h=0.069\,5\sim 6.22\text{ mm}$,应用于冷凝或绝热工况;总体平均相对偏差为 23.3%;基于 7 115 个绝热/冷凝的小/微通道压降数据的数据库而开发
[30]	$C=\begin{cases} C_{\text{non-bo}}\left[1+60We_{lo}^{0.32}\left(Bo\frac{P_H}{P_F}\right)^{0.78}\right] & Re_l\geqslant 2\,000 \\ C_{\text{non-bo}}\left[1+530We_{lo}^{0.52}\left(Bo\frac{P_H}{P_F}\right)^{1.09}\right] & Re_l<2\,000 \end{cases}$	基于文献[29]修正;包括了多种工质、管道截面类型和广阔的工况范围, $D_h=0.349\sim 5.35\text{ mm}$,应用在蒸发工况;平均相对偏差为 17.2%;基于 2 378 个蒸发的小/微通道压降数据的数据库而开发; $C_{\text{non-bo}}$ 使用 Kim 关联式计算
[31]	$C=4.646\,8\times 10^{-6}p_r^{5.586\,6}Re_l^{0.438\,7}\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{5.718\,9}X^{-0.424\,3}$	基于文献[25]修正;多管矩形小通道, $D_h=1.16\text{ mm}$,工质为 R1234yf、R134a 和 R32, $Re_l=528\sim 8\,200$, p_r 为 0.182~0.603;平均相对偏差为 8.32%;工况为冷凝
[32]	$\phi_g^2=1+CX_{\text{tt}}^n+X_{\text{tt}}^2\quad n=2-1.5\exp(-0.025Fr)$ $C=21\left[1-\exp(-0.28Bd^{0.5})\right]\left[2-1.9\exp(-0.016Fr^{1.4})\right]$	基于文献[25]修正;4.35 mm 内径光滑单管,工质为 R1234ze(E)、R32、R410A、二甲醚和 R1234ze(E)/R32 混合物, $G=147\sim 403\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, $x=0.006\,5\sim 0.972\,4$;平均相对偏差为 9.51%;工况为冷凝
[33]	$C=20Re_l^{-0.15}S_r^{1.15}Bd^{-0.2}$ $S_r=\frac{\rho_l}{\rho_g}\frac{x}{1-x}\frac{1-\alpha}{\alpha}$	基于文献[25]修正;管道为光滑单管,内径为 7.75 和 14.45 mm,工质为 R290, $G=150\sim 450\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, $p_r=0.25\sim 0.95$;平均相对偏差为 19%;工况为冷凝
[34]	$\phi_l^2=1+\frac{C}{X_{\text{tt}}}+\frac{1}{X_{\text{tt}}^2}$ $C=\lambda x^{0.35}(1-x)^{0.25}\rho_r^{0.31}Re_{\text{tp}}^{0.09}We_{\text{tp}}^{0.09}$	基于文献[25]修正;管道为多管小通道, $D_h=0.64\text{ mm}$ 和 0.81 mm, $G=50\sim 200\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, $x=0.1\sim 0.9$;平均相对偏差为 17.4%;工况为绝热
[35-36]	$C=aRe_{\text{tp}}^b x^c V_{\mu_{\text{tp}}}^d$	基于文献[25]修正;管道为多口管/单管小通道及微通道;单管关联式平均相对偏差为 17.4%;多口管关联式平均相对偏差为 18.9%
[38]	$\phi_{lo}^2=(1-x)^2+2.87x^2p_r^{-1}+1.68x^{0.8}(1-x)^{0.25}p_r^{-1.64}$	基于文献[49]修正;小通道和常规通道,工质为 R134a、R22、R404A, $G=20\sim 1\,000\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,饱和温度 $T_s=20\sim 65\text{ }^\circ\text{C}$, $x=0.2\sim 0.89$;85%的数据在±20%的误差带中,平均相对偏差为 11.5%;工况为绝热
[39]	$\phi_{lo}^2=(1-x)^2+2.87x^2p_r^{-1}+1.54Bd^{0.19}\left(\frac{\rho_l-\rho_g}{\rho_{\text{tp}}}\right)^{0.81}$	基于文献[38]修正;小通道,工质为 12 种常见制冷剂,质流密度范围为 140~2 000 $\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,适用范围为 $Bd\geqslant 0.1$ 且 $BdRe_l^{0.5}\leqslant 200$;81.7%的数据在±30%的误差带中;工况为绝热

(续表)

文献编号	关联式	实验信息等
[40]	$\phi_{\text{lo}}^2 = \phi_{\text{lo},\text{M-S}}^2 [1 + 1.54 (1 - x)^{0.5} La^{1.47}]$ $La = \sqrt{\sigma / [g (\rho_l - \rho_g)]}$	基于文献[45]修正;小通道和常规通道,工质为 15 种常见制冷剂, $G=25.4\sim 1\,150\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,热流密度 $q=0.6\sim 150\text{ kW}/\text{m}^2$;平均相对偏差为 25.5%;工况为蒸发
[41]	$\phi_{\text{lo}}^2 = 1 + (\Gamma^2 - 1) [Bx^{0.5} (1 - x)^{0.5} + x]$ $\Gamma = \sqrt{(\mu_g/\mu_l)/(\rho_l/\rho_g)} \quad B = 169.625\,8G^{-0.574\,7}$	基于文献[42]修正;三角形光滑多口微通道,工质为丙酮, $G=65.52\sim 289.61\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, $q=141.92\sim 481.08\text{ kW}/\text{m}^2$,工况为蒸发;平均相对偏差为 12.56%
[43]	$\phi_{\text{go}}^2 = \left\{ x^{1.8} + (1 - x)^{1.8} \frac{f_{\text{lo}}}{\rho_l f_{\text{go}}} + 0.65x^{0.68} (1 - x)^{0.43} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{1.25} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.75} \right\}$	基于文献[47]修正;适用于矩形截面小通道,工质为 R134a、R32、R1234ze(E) 和 R410A, $G=100\sim 400\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, $T_s=40\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$,工况为冷凝;平均相对偏差为 9.6%
[44]	$\varphi_{\text{lo}}^2 = [1 + \omega (Y^2 - 1) x] (1 - x)^{1/2.31} + Y^2 x^{2.31}$ $\omega = 3.01 \exp(-0.004\,64 Re_{\text{go}}/1\,000)$	基于文献[44]修正;所用的管道为圆形、方形和三角形单管小通道,工质为 R134a、R1234ze(E)、R1234yf 和 R600a, $G=100\sim 1\,600\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, $x=0.05\sim 0.95$,工况为冷凝;平均相对偏差为 10.2%
[46]	$\phi_{\text{lo}}^2 = E + 0.5 H x^{0.22} (1 - x)^{0.784} We_{\text{tp}}^{0.35} (f_l/f_g)^{-0.56}$ $E = (1 - x^2) + x^2 Y^2$ $H = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.91} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.7}$	基于文献[49]修正;所用管道为矩形多口微通道,工质为去离子水, $G=47\sim 1\,267.80\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, $q=5.38\sim 116.89\text{ kW}/\text{m}^2$,工况为蒸发;平均相对偏差为 12.23%
[47]	$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{\text{tp},\text{F}} = f_{\text{int}} \frac{1}{D_h} \frac{G^2 x^2}{2\rho_g \alpha^{2.5}}$ $\frac{f_{\text{int}}}{f_l} = AX^a Re_l^b \varphi^c \quad \varphi = \frac{j_l \mu_l}{\sigma}$	基于文献[48]修正;小通道和常规通道, $D_h=0.5\sim 4.91\text{ mm}$,工质为 R134a, $G=150\sim 750\text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, $x=0\sim 1$,82%的数据在 $\pm 20\%$ 的误差带中;工况为冷凝

3 经验关联式

除了以上提到的均相和分相模型,还有一些研究者提出了新的公式形式. 文献[47]开发了一个适用于 R134a 制冷剂冷凝工况下小通道中所有流型的经验关联式,其基于文献[48],加入了表征表面张力 σ 的无量纲数 φ 以描述小通道中表面张力的主导趋势.

文献[18]利用所建立的绝热流动压降数据库,针对环状流,建立了一种新的经验型关联式. 此外,使用无量纲数分析方法,发现在小通道环状流中,液膜雷诺数 Re_{lf} 和气芯韦伯数 We_c 占主导作用,进而拟合出 f .

4 关联式比较评估

4.1 关联式精度和通用性评估

为了横向比较各种关联式,确定在不同条件下关联式的通用性和精度,大量研究者做了相关的研

究. 但现有文献主要集中在常规尺寸管道,关注小通道的相对较少. 文献[50]建立了一个 2 092 个数据的摩擦压降数据库,发现 M-S 关联式预测准确性较高,但是其数据库包含了较多常规管道或空气-水二元混合物数据. 文献[40]使用蒸发摩擦压降数据库对多种关联式进行比较,发现 Cacallini 关联式和 Friedel 关联式在小通道中具有最好的预测能力. 文献[51]分工况对多种关联式进行比较分析,发现在冷凝和绝热工况下 M-S 关联式、Akers 关联式、Beattie 关联式、Sun 关联式具有较高的准确性;Mishima 关联式则在蒸发工况下具有更佳的预测能力. 文献[23]发现在 $D_h\leqslant 3\text{ mm}$ 下 Kim 关联式和 M-S 关联式的预测最准确.

为了比较各种关联式的通用性和精度,针对制冷剂建立了一个大型的小通道内两相流动摩擦压降数据库. 考虑到在蒸发工况下,工质两相流动存在液滴夹带现象,而冷凝工况和绝热工况下此现象不存在^[30],因此有必要分工况对关联式进行评估. 通过

对文献中的插图进行采点,从 30 篇文献中收集了大量的摩擦压降数据.考虑到不同实验设备的差异,对数据进一步处理,排除了多口管流量分配不均、流动不稳定性和入口段效应的影响,并剔除了部分无效数据.最终用于蒸发压降数据点数量为 1 302,用于冷凝/绝热压降的数据点数量为 1 576,数据库数据来源为 20 篇公开文献.蒸发压降数据库和冷凝/绝热数据库数据来源如表 4 所示.

使用蒸发压降数据库和冷凝/绝热数据库对所涉及的 26 个关联式分别进行评估计算,各种关联式在不同工况下的预测表现如表 5 所示.关联式评价指标为平均相对偏差(MAE)和关联式数据落入±30% 误差带的百分比 θ_{30} .前者越小,后者越大,说明关联式的预测精度和通用性越好.其定义如下:

$$MAE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|(dp/dz)_{i,e} - (dp/dz)_{i,p}|}{(dp/dz)_{i,e}} \quad (11)$$

$$\theta_{30} = \frac{M_{\pm 30\%}}{M} \quad (12)$$

式中: M 为数据库总量; $M_{\pm 30\%}$ 为偏差在±30% 之内的数据比例; $(dp/dz)_{i,e}$ 、 $(dp/dz)_{i,p}$ 分别为第 i 个摩

擦压降实验值和第 i 个关联式预测值.

由表 5 可知,在蒸发工况下预测性能最好的是文献[44]提出的全相增强型关联式,MAE 达到了 25.65%;在冷凝/绝热工况下预测性能最好的是 Kim 关联式,MAE 达到了 24.68%.不同的关联式预测值和实验值的比较情况如图 1 所示.其中: $(dp/dz)_e$ 为两相流摩擦压降关联式实验值; $(dp/dz)_p$ 为两相流摩擦压降关联式预测值.

均相模型关联式整体在各种工况下的预测能力普遍比较稳定,大部分均相模型关联式在蒸发工况的 MAE=40%~50%,在冷凝/绝热工况的 MAE=30%~40%.但是由于其公式形式难以体现更多的物理意义,所以难以在其基础上进一步改进以提高其预测能力.

在全相增强模型关联式中,M-S 关联式原本应用范围为常规管道,但是现在发现其应用在小通道中依然有良好的预测能力,基于此关联式改进的 Sempértégui-Tapia 关联式在蒸发工况下能够达到 25.65%的预测偏差.此模型的其他关联式也有不错的预测能力,例如 Zhang 关联式在冷凝和绝热工况

表 4 蒸发、冷凝和绝热工况摩擦压降数据库
Tab. 4 Frictional pressure drop database under evaporation condensation and adiabatic conditions

文献编号	工况	D_h/mm	工质	$G/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	x	管道类型	数据量
[3]	蒸发工况	1.5	R744	300~600	0.02~0.98	水平圆管	265
[52]	蒸发工况	1.7	R290	100~500	0.09~1.00	垂直圆管	64
[53]	蒸发工况	1.224、1.7	R717	100~500	0.05~0.98	垂直圆管	238
[54]	蒸发工况	1.42	R744	300~600	0.04~1.00	水平圆管	276
[55]	蒸发工况	2.6	R600a、R134a	240~440	0.10~0.77	水平圆管	21
[56-57]	蒸发工况	2.32	R134a、R245fa	200~500	0.21~0.99	水平圆管	100
[58]	蒸发工况	1.0、2.2	R32	200~400	0.04~0.92	水平矩管	79
[59]	蒸发工况	0.68	R134a	600~1 400	0.11~0.21	水平矩形管	83
[60]	蒸发工况	2	R32	100~400	0.02~0.90	水平圆管	69
[61]	蒸发工况	1.6	R134a、R1234yf	400~500	0.07~0.52	垂直圆管	78
[62]	蒸发工况	0.83、1.22、1.70	R134a	100~400	0.04~0.36	垂直圆管	29
[17]	冷凝/绝热工况	0.529	R744	200~1 400	0.00~1.00	圆管	304
[44]	冷凝/绝热工况	1.1	R134a、1234yf、 R1234ze(E)、R600a	100~1 200	0.03~0.97	圆管	330
[63]	冷凝/绝热工况	0.762	R134a、1234ze(E)	200~800	0.10~0.96	圆管	100
[64]	冷凝/绝热工况	0.952、1.152	R152a	200~800	0.11~0.90	圆形和矩形管	76
[65]	冷凝/绝热工况	0.509、0.79	R134a、245fa	350~2 000	0.00~0.92	圆管	305
[66]	冷凝/绝热工况	0.96、2.00、1.23	R134a、1234yf	200~800	0.10~1.00	圆管	265
[67]	冷凝/绝热工况	0.96	R290	200~800	0.10~0.96	圆管	48
[68]	冷凝/绝热工况	1.152、0.952、1.304	R32、R22、R152a	200~600	0.08~0.92	圆形和方形管	148

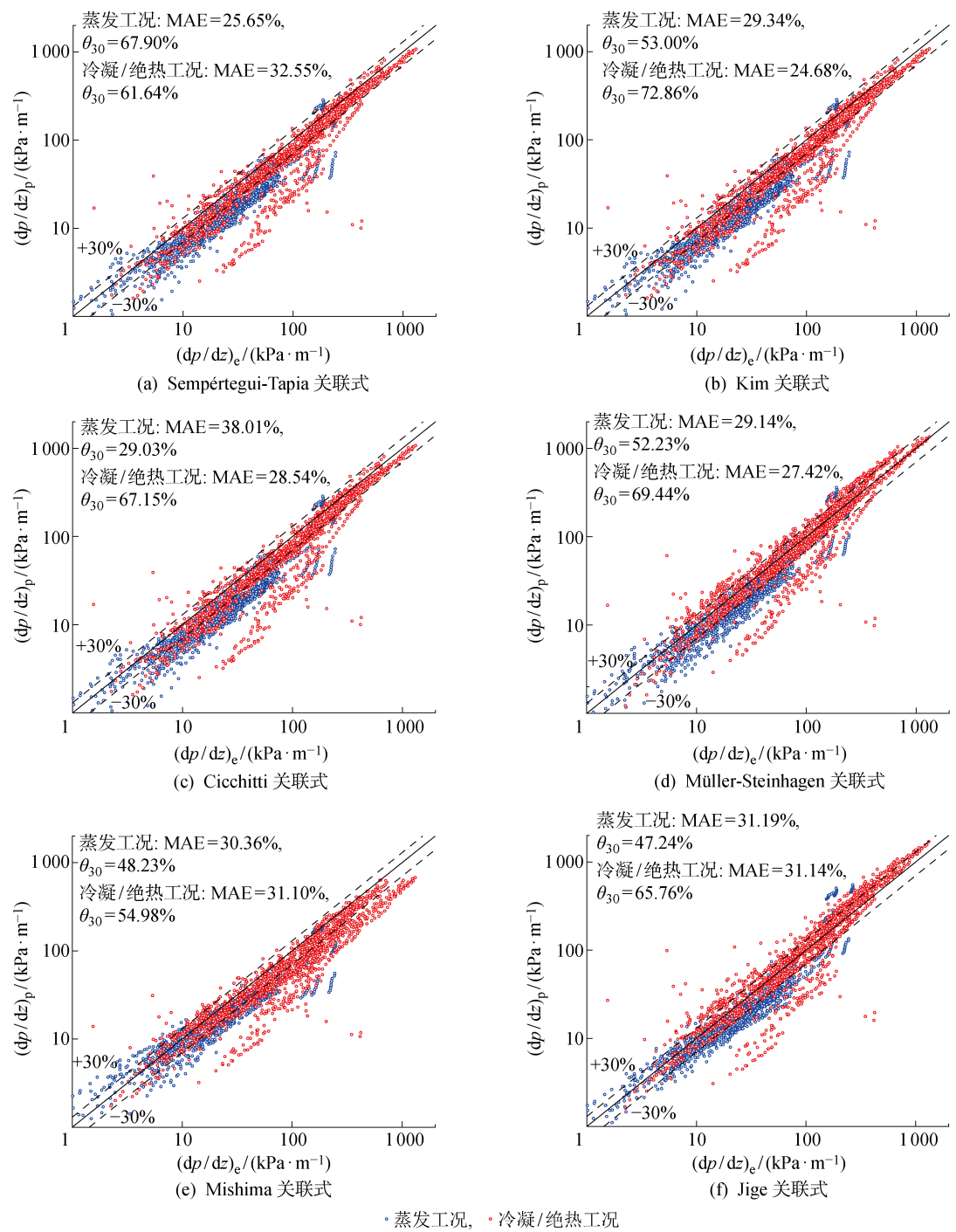


图 1 摩擦压降关联式预测值与实验值比较结果

Fig. 1 Comparison results of prediction and experimental data of frictional pressure drop correlations

有 29.47% 的预测精度. 整体而言, 这种模型具有良好的预测稳定性和改进潜力. 值得注意的是, Jige 关联式从 Friedel 关联式改进而来的, 而且其关联式形式中并未包含 Bd 、 We 等无量纲数. 单相增强模型关联式普遍具有多个无量纲数, 但是一旦工况范围有所增大, 部分关联式预测能力则明显不足, 说明从无量纲数的角度分析两相流动摩擦压降机理得到的

关联式, 并不一定能够在多种实验工况下得到满意的验证.

由表 5 可知, 以文献[24]为基础的的单相增强型模型中, Mishima 关联式以及 Kim 关联式具有良好的预测能力, Kim 关联式在蒸发、冷凝和绝热工况分别具有 29.34% 和 24.68% 的预测精度. 但是部分单相增强型关联式则预测偏差较大, 例如

表 5 关联式预测值与实验值比较

Tab. 5 Comparison results of predictive data and experimental data

模型	关联式	蒸发工况		冷凝/绝热工况	
		MAE/%	$\theta_{30}/\%$	MAE/%	$\theta_{30}/\%$
均相	文献[9]	47.41	13.44	37.00	37.73
	文献[12] ₁	39.04	26.96	29.53	61.45
	文献[12] ₂	43.36	20.12	34.05	48.83
	文献[12] ₃	40.32	25.50	31.30	56.18
	文献[12] ₄	40.69	24.42	31.45	56.31
	文献[13]	38.01	29.03	28.54	67.15
	文献[15]	44.55	17.59	34.26	48.45
	文献[17]	47.02	36.25	56.22	58.97
单相增强型	文献[26]	30.36	48.23	31.10	54.98
	文献[27]	79.73	0	74.15	0.70
	文献[28]	56.40	35.79	52.69	38.24
	文献[29]	29.34	53.00	24.68	72.86
	文献[31]	41.01	32.10	35.65	44.77
	文献[32]	42.95	29.95	69.57	43.56
	文献[33]	61.42	47.31	132.95	7.86
	文献[34]	94.30	26.50	228.11	12.62
	文献[35-36]	53.88	33.33	125.56	15.61
全相增强型	文献[38]	37.83	39.65	29.47	69.61
	文献[39]	29.82	61.62	37.39	52.44
	文献[40]	98.00	10.29	161.31	5.64
	文献[41]	61.47	12.44	69.91	5.90
	文献[43]	31.19	47.24	31.14	65.76
	文献[44]	25.65	67.90	32.55	61.64
	文献[45]	29.14	52.23	27.42	69.44
	文献[46]	99.20	26.42	129.83	21.05
	文献[49]	37.85	36.02	38.35	41.92

Macdonald 关联式、Rahman 关联式和 Li 关联式,其平均相对偏差 MAE 达到了 100%甚至 200%。这说明这 3 种关联式拟合的两相相互作用导致的压降部分,即参数 C 偏差较大。使用多种无量纲数拟合参数 C 的方法可能导致关联式通用性较差,跳出了原有的拟合数据库便会出现较大的偏差。

4.2 关联式公式形式评估

在所提及的摩擦压降模型中,均相模型近 20 年来的研究相对较少,主要有两个难点:① 从 f 导出 Re_{tp} ,进而导出 μ_{tp} , $f=0.03\sim0.043$ 时,对应 3 个 Re_{tp} 的值,如图 2 所示。文献[17]则假设所有的实验数据均在湍流区,避开该问题再拟合数据。② 保持边界条件下提出具有物理意义的关联式形式。特别

是将 σ 的影响加入 μ_{tp} 的计算关联式中,现有的均相模型关联式均没有体现 σ 的影响。

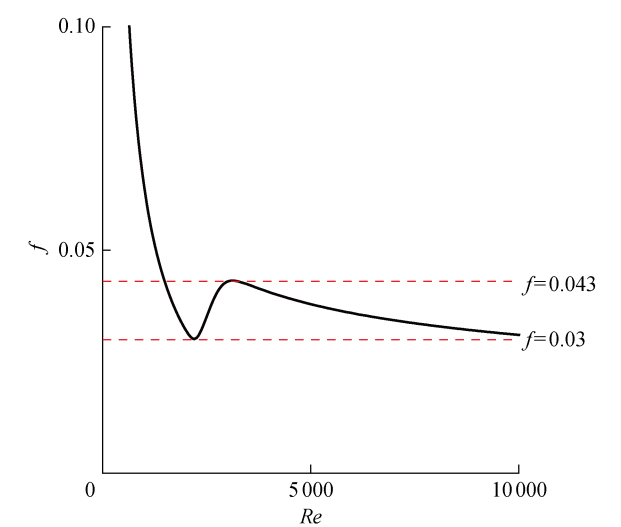


图 2 当 $Ra/D_h=0.001$ 时单相流动下 f 与 Re 的变化曲线

Fig. 2 f versus Re in single-phase flow at $Ra/D_h=0.001$

在单相增强型模型中,研究者主要针对两相相互作用的压降项,即参数 C 进行拟合,拟合所用的参数为多种无量纲数。但前文对各种关联式的通用型和精度进行验证、分析和比较后发现,这种方法可能通用性较差,在多种工况和设备条件下难以取得良好的预测效果。相比而言,从压降随干度变化曲线出发构建的全相增强型关联式则具有相对较好的预测稳定性。表 5 中有 6 种全相增强型关联式的预测偏差 MAE 在 40%以下。因此,本文推荐以全相增强型模型为基础开发通用型的摩擦压降关联式。

全相增强型关联式主要是从 M-S 关联式及 Friedel 关联式中改进,M-S 关联式的改进工作可以沿着 Sempértegui-Tapia 关联式的改进方式继续深入,即对每一组工况的摩擦压降数据的低干度($x<0.7$)区域进行线性拟合,改进线性拟合后的斜率拟合项以继续提高拟合精度。

另外,所提到的预测能力较好的关联式在开发时使用的数据库数据量较大,Kim 关联式使用的数据量为 7 115,M-S 关联式使用的数据量为 9 300,Sempértegui-Tapia 关联式使用的数据量为 1 468。因此,开发关联式应尽量扩大数据库的数据量,以提高拟合后关联式的通用性。

除了以上的通用型关联式形式,近年来还有一些关联式与流型结合起来,具有较强的创新性,例如文献[18,69]。但是这些关联式使用的数据库相对有限,同时由于数据的不完整和工况的多样性,难以通过其他研究者的数据对其进行验证。

5 结论

对近年来小通道内两相流动摩擦压降关联式的发展情况进行了综合介绍,包括了均相模型、单相增强模型、全相增强模型和经验型模型.通过建立大型的摩擦压降数据库,对26个关联式进行了横向评估与分析,得出以下结论.

(1) 近几十年来,新的摩擦压降关联式不断地被提出,针对小通道和微通道的关联式类型主要是单相与全相模型关联式.经验型关联式和均相模型关联式较少.

(2) 通过建立数据库对26个关联式进行评估,发现在蒸发工况下预测性能最好的是 Sempértegui-Tapia 关联式,在冷凝/绝热工况下预测性能最好的是 Kim 关联式,综合考虑工况下, Kim 关联式预测能力最好.

(3) 在小通道中,全相增强型关联式相比于单相增强模型关联式具有更好的预测能力,在全相增强模型基础上开发的新关联式适用性更好.

参考文献:

[1] 颜晓虹,唐大伟,王际辉.矩形微槽内水的流动沸腾压降特性实验研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(5): 88-90.
YAN Xiaohong, TANG Dawei, WANG Jihui. An experimental investigation of the pressure drop of water in a horizontal rectangle micro-groove[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2007, 35(5): 88-90.

[2] 谢鸣宇,罗小平,胡丽琴.微通道内 R22 制冷剂流动沸腾的压降特性[J]. *化学工程*, 2016, 44(1): 38-42.
XIE Mingyu, LUO Xiaoping, HU Liqin. Pressure drop of flow boiling R22 in microchannels[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2016, 44(1): 38-42.

[3] 姜林林,柳建华,张良,等.水平微细管内 CO₂ 流动沸腾压降特性[J]. *化工学报*, 2017, 68(12): 76-84.
JIANG Linlin, LIU Jianhua, ZHANG Liang, *et al.* Flow boiling pressure drop characteristics of CO₂ in horizontal micro tube[J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(12): 76-84.

[4] 邱金友,张华,余晓明,等. R1234ze(E) 在水平圆管内流动沸腾换热过程中摩擦压降特性实验研究[J]. *制冷学报*, 2016, 37(1): 32-37.
QIU Jinyou, ZHANG Hua, YU Xiaoming, *et al.* Investigation of frictional pressure drop during flow boiling of R1234ze(E) in horizontal tube[J]. *Journal*

of Refrigeration, 2016, 37(1): 32-37.

[5] 许玉,方贤德,张宏刚,等.管内两相流摩擦压力损失计算研究进展[J]. *流体机械*, 2012, 40(5): 34-40.
XU Yu, FANG Xiande, ZHANG Honggang, *et al.* Research progress of frictional pressure drop calculations for two-phase flow in pipes[J]. *Fluid Machinery*, 2012, 40(5): 34-40.

[6] 姚超,李会雄,薛玉卿,等.垂直下降管内两相流摩擦压降计算关联式评价[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(3): 545-550.
YAO Chao, LI Huixiong, XUE Yuqing, *et al.* Evaluation of frictional pressure drop correlations for two-phase flow in vertical downward tubes[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(3): 545-550.

[7] KANDLIKAR S G, GRANDE W J. Evolution of microchannel flow passages: Thermohydraulic performance and fabrication technology[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2003, 24(1): 3-17.

[8] CHURCHILL S W. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes[J]. *Chemical Engineering (New York)*, 1977, 84(24): 91-92.

[9] MCADAMS W H. Vaporization inside horizontal tubes—II: Benzene oil mixtures[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1942, 64: 193-200.

[10] AWAD M M, MUZYCHKA Y S. Bounds on two-phase frictional pressure gradient in minichannels and microchannels[C]// *Proceedings of ASME 4th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. Limerick, Ireland: Nanotechnology Institute, 2006: 1137-1145.

[11] AKERS W W, DEANS H A, CROSSER O K. Condensing heat transfer within horizontal tubes[J]. *Chemical Engineering Progress*, 1958, 54(10): 4300403.

[12] AWAD M M, MUZYCHKA Y S. Effective property models for homogeneous two-phase flows[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2008, 33(1): 106-113.

[13] CICCHITTI A, LOMBARDI C, SILVESTRI M, *et al.* Two-phase cooling experiments: Pressure drop, heat transfer and burnout measurements[R]. Milan, Italy: Centro Informazioni Studi Esperienze, 1959.

[14] DUKLER A E, WICKS M, CLEVELAND R G. Frictional pressure drop in two-phase flow: A. A comparison of existing correlations for pressure loss and holdup[J]. *AIChE Journal*, 1964, 10(1): 38-43.

[15] BEATTIE D R H, WHALLEY P B. A simple two-

- phase frictional pressure drop calculation method[J]. **International Journal of Multiphase Flow**, 1982, 8(1): 83-87.
- [16] LIN S, KWOK C C K, LI R Y, *et al.* Local frictional pressure drop during vaporization of R-12 through capillary tubes[J]. **International Journal of Multiphase Flow**, 1991, 17(1): 95-102.
- [17] DUCOULOMBIER M, COLASSON S, BONJOUR J, *et al.* Carbon dioxide flow boiling in a single microchannel—Part I: Pressure drops[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2011, 35(4): 581-596.
- [18] CIONCOLINI A, THOME J R, LOMBARDI C. Unified macro-to-microscale method to predict two-phase frictional pressure drops of annular flows[J]. **International Journal of Multiphase Flow**, 2009, 35(12): 1138-1148.
- [19] VENKATESAN M, DAS S K, BALAKRISHNAN A R. Effect of diameter on two-phase pressure drop in narrow tubes[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2011, 35(3): 531-541.
- [20] SARDESHPANDE M V, RANADE V V. Two-phase flow boiling in small channels: A brief review[J]. **Sadhana**, 2013, 38(6): 1083-1126.
- [21] 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.
- [22] CHOI C, KIM M. Flow pattern based correlations of two-phase pressure drop in rectangular microchannels[J]. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 2011, 32(6): 1199-1207.
- [23] YUN J H, JEONG J H. A review of prediction methods for two-phase pressure loss in mini/micro-channels[J]. **International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration**, 2016, 24(1): 1630002.
- [24] LOCKHART R, MARTINELLI R. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes[J]. **Chemical Engineering Progress**, 1949, 45: 39-48.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] YU W, FRANCE D M, WAMBSGANSS M W, *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.
- [28] HWANG Y W, KIM M S. The pressure drop in microtubes and the correlation development[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2006, 49(11/12): 1804-1812.
- [29] KIM S M, MUDAWAR I. Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for adiabatic and condensing mini/micro-channel flows[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2012, 55(11/12): 3246-3261.
- [30] KIM S M, MUDAWAR I. Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for mini/micro-channel saturated flow boiling[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2013, 58(1/2): 718-734.
- [31] LÓPEZ-BELCHÍ A, ILLÁN-GÓMEZ F, VERA-GARCÍA F, *et al.* Experimental condensing two-phase frictional pressure drop inside mini-channels. Comparisons and new model development[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2014, 75: 581-591.
- [32] HOSSAIN M A, AFROZ H M M, MIYARA A. Two-phase frictional multiplier correlation for the prediction of condensation pressure drop inside smooth horizontal tube[J]. **Procedia Engineering**, 2015, 105: 64-72.
- [33] MACDONALD M, GARIMELLA S. Hydrocarbon condensation in horizontal smooth tubes: Part II—Heat transfer coefficient and pressure drop modeling[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2016, 93: 1248-1261.
- [34] RAHMAN M M, KARIYA K, MIYARA A. Comparison and development of new correlation for adiabatic two-phase pressure drop of refrigerant flowing inside a multiport minichannel with and without fins[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2017, 82: 119-129.
- [35] LI X J, HIBIKI T. Frictional pressure drop correlation for two-phase flows in mini and micro multi-channels[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2017, 116: 316-328.
- [36] LI X J, HIBIKI T. Frictional pressure drop correlation for two-phase flows in mini and micro multi-channels[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2017, 116: 316-328.
- [37] 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.
- [38] ZHANG M, WEBB R L. Correlation of two-phase friction for refrigerants in small-diameter tubes[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2001, 25(3/4): 131-139.
- [39] LI W, WU Z. Generalized adiabatic pressure drop correlations in evaporative micro/mini-channels[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2011, 35(6): 866-872.
- [40] YU X, XIA D F. A new correlation of two-phase frictional pressure drop for evaporating flow in pipes[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2012, 35(7): 2039-2050.
- [41] GAN Y H, XU J L, YAN Y Y. An experimental study of two-phase pressure drop of acetone in triangular silicon micro-channels[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2015, 80: 76-86.
- [42] CHISHOLM D. Two-phase flow in pipelines and heat exchangers[M]. London, UK: Institution of Chemical Engineers, 1982.
- [43] JIGE D, INOUE N, KOYAMA S. Condensation of refrigerants in a multiport tube with rectangular minichannels[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2016, 67: 202-213.
- [44] SEMPÉRTEGUI-TAPIA D F, RIBATSKI G. Two-phase frictional pressure drop in horizontal micro-scale channels: Experimental data analysis and prediction method development[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2017, 79: 143-163.
- [45] MÜLLER-STEINHAGEN H, HECK K. A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes[J]. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, 1986, 20(6): 297-308.
- [46] PAN L M, YAN R G, HUANG H J, *et al.* Experimental study on the flow boiling pressure drop characteristics in parallel multiple microchannels[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2018, 116: 642-654.
- [47] GARIMELLA S, AGARWAL A, KILLION J D. Condensation pressure drop in circular microchannels[J]. **Heat Transfer Engineering**, 2005, 26(3): 28-35.
- [48] GARIMELLA S, AGARWAL A, COLEMAN J W. Two-phase pressure drops in the annular flow regime in circular microchannels[C]// **21st IIR International Congress of Refrigeration**. Washington DC, USA: International Institute of Refrigeration, 2003: 12-22.
- [49] WAMBSGANSS M W, JENDRZEJCZYK J A, FRANCE D M, *et al.* Frictional pressure gradients in two-phase flow in a small horizontal rectangular channel[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 1992, 5(1): 40-56.
- [50] SUN L C, MISHIMA K. Evaluation analysis of prediction methods for two-phase flow pressure drop in mini-channels[J]. **International Journal of Multiphase Flow**, 2009, 35(1): 47-54.
- [51] KIM S M, MUDAWAR I. Review of databases and predictive methods for pressure drop in adiabatic, condensing and boiling mini/micro-channel flows[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2014, 77: 74-97.
- [52] MAQBOOL M H, PALM B, KHODABANDEH R. Investigation of two phase heat transfer and pressure drop of propane in a vertical circular minichannel[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2013, 46: 120-130.
- [53] MAQBOOL M H, PALM B, KHODABANDEH R. Flow boiling of ammonia in vertical small diameter tubes: Two phase frictional pressure drop results and assessment of prediction methods[J]. **International Journal of Thermal Sciences**, 2012, 54: 1-12.
- [54] WU J, KOETTIG T, FRANKE C, *et al.* Investigation of heat transfer and pressure drop of CO₂ two-phase flow in a horizontal minichannel[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2011, 54(9/10): 2154-2162.
- [55] COPETTI J B, MACAGNAN M H, ZINANI F. Experimental study on R-600a boiling in 2.6 mm tube[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2013, 36(2): 325-334.
- [56] TIBIRIÇÁ C B, DA SILVA S J, RIBATSKI G. Experimental investigation of flow boiling pressure drop of R134A in a microscale horizontal smooth tube[J]. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, 2011, 3(1): 011006.
- [57] TIBIRIÇÁ C B, RIBATSKI G. Two-phase frictional pressure drop and flow boiling heat transfer for R245fa in a 2.32-mm tube[J]. **Heat Transfer Engineering**, 2011, 32(13/14): 1139-1149.
- [58] JIGE D, SAGAWA K, INOUE N. Effect of tube diameter on boiling heat transfer and flow characteristic of refrigerant R32 in horizontal small-diameter tubes[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2017, 76: 206-218.
- [59] KEEPAIBOON C, THIANGTHAM P, MAHIAN O, *et al.* Pressure drop characteristics of R134a during flow boiling in a single rectangular micro-channel

- [J]. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2016, 71: 245-253.
- [60] 黄秀杰. R32 在微细通道内流动沸腾特性的实验及数值研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- HUANG Xiujie. Experimental and numerical investigation on R32 flow boiling characteristics in microchannels[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [61] ANWAR Z, PALM B, KHODABANDEH R. Flow boiling heat transfer, pressure drop and dryout characteristics of R1234yf: Experimental results and predictions[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2015, 66: 137-149.
- [62] OWHAIB W. Experimental heat transfer, pressure drop, and flow visualization of R-134a in vertical mini/micro tubes[D]. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2007.
- [63] DEL COL D, BORTOLATO M, AZZOLIN M, *et al.* Condensation heat transfer and two-phase frictional pressure drop in a single minichannel with R1234ze(E) and other refrigerants[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2015, 50: 87-103.
- [64] LIU N, LI J M, SUN J, *et al.* Heat transfer and pressure drop during condensation of R152a in circular and square microchannels[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2013, 47: 60-67.
- [65] REVELLIN R, THOME J R. Adiabatic two-phase frictional pressure drops in microchannels[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2007, 31(7): 673-685.
- [66] DEL COL D, BISETTO A, BORTOLATO M, *et al.* Experiments and updated model for two phase frictional pressure drop inside minichannels[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2013, 67: 326-337.
- [67] DEL COL D, BORTOLATO M, BORTOLIN S. Comprehensive experimental investigation of two-phase heat transfer and pressure drop with propane in a minichannel[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2014, 47: 66-84.
- [68] LIU N, LI J M. Experimental study on pressure drop of R32, R152a and R22 during condensation in horizontal minichannels [J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2016, 71: 14-24.
- [69] ZHU Y, WU X M, ZHAO R. R32 flow boiling in horizontal mini channels: Part II. Flow-pattern based prediction methods for heat transfer and pressure drop [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2017, 115: 1233-1244.

(本文编辑:石易文)