

文章编号: 0253-4339(2021) 03-0066-07
doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2021.03.066

一种泡沫金属通道两相压降新型关联式

刘 禹 李 雪 王世学 朱 禹

(天津大学机械工程学院 天津 300350)

摘 要 泡沫金属填充于换热器通道内能有效提高换热器两相传热性能,具有较好的应用前景,但要求对泡沫金属通道内两相压降能够进行准确的预测,以满足工程应用中设备和系统的设计要求。本文使用了 6 篇文献的泡沫金属通道内两相压降实验数据,实验条件包括:泡沫金属 PPI 为 5~40,孔隙率为 0.87~95;通道水力直径为 4.36~13.8 mm;质流密度为 0~350 kg/(m²·s);干度为 0~0.8。分析了两相流因子和 Lockhart-Martinelli 参数的分布规律,发现两相流因子随泡沫金属孔径与通道水力直径之比减小而增大,随干度的增大而增大;当径比从 0.179 变为 0.31 时,两相流因子提升了 1.37~1.52 倍;当干度从 0 变为 0.8 时,两相流因子最大提升了 3.41 倍。同时基于 Lockhart-Martinelli 关联式开发了一种新型泡沫金属通道两相压降预测关联式,结果表明:新的关联式的预测值与实验数据的绝对平均误差为 22%,该关联式能准确预测泡沫金属通道的两相压降。

关键词 泡沫金属;两相压降;预测关联式

中图分类号:TB61⁺1;TK124

文献标识码: A

A New Two-Phase Pressure Drop Correlation for Metal Foam Channels

Liu Yu Li Xue Wang Shixue Zhu Yu

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300350, China)

Abstract The metal foam used for filling a heat exchanger channel can effectively improve two-phase heat transfer performance and has good application prospects. Accurate prediction of the two-phase pressure drops in the metal foam channel is required for equipment and system designs in engineering applications. It is necessary to develop a suitable method for predicting the two-phase pressure drop in metal foam channels under a wide range of conditions. The two-phase pressure drop experimental data in the metal foam channels of six references were used. The experimental conditions included metal foam pores per inch (PPI) of 5–40, porosity of 0.87–95, channel hydraulic diameter of 4.36–13.8 mm, mass flux of 0–350 kg/(m²·s), and quality of 0–0.8. The distribution of the two-phase multiplier and the Lockhart-Martinelli parameter was analyzed, and it was found that the two-phase multiplier increased with a decrease in the ratio of the metal foam pore diameter to the channel hydraulic diameter and increased with an increase in the quality; when the diameter ratio changes from 0.31 to 0.179, the two-phase multiplier increases by 1.37 to 1.52; and when the quality changes from 0 to 0.8, the two-phase multiplier increases by a factor of 3.41. A new correlation was developed based on the Lockhart-Martinelli correlation. The results show that the absolute average error between the predicted values and experimental data is 22%, which indicates that the new correlation can provide an accurate prediction.

Keywords metal foam; two-phase pressure drop; predictive correlation

泡沫金属具有高孔隙率(可达 0.98)、大比面积(可达 1 000 m²/m³)、高热导率等特点,被广泛应用于散热器通道中,在传热领域内具有良好发展前景^[1-2]。D. W. Kim 等^[3-7]研究表明,泡沫金属能有效地提高散热器通道内两相沸腾流动的换热效果,但泡沫金属的多孔结构会导致流动压降产生复杂的变化。为了更好地进行散热系统设计,指导泵的选型和保护相关部件,需要对泡沫金属通道内两相流动压降

进行预测的准确方法。

近年来,许多学者对填充泡沫金属通道内两相流动的压降特性进行了研究。F. Topin 等^[8-9]研究了填充泡沫镍矩形通道内绝热两相的压降规律,发现泡沫金属孔径和气体干度对压降变化有很大影响,并使用已有关联式对两相压降进行了预测,误差在±25%以内。J. N. Tourvieille 等^[10]研究了填充泡沫镍铬合金微小通道内两相绝热流动的压降规

基金项目: 国家自然科学基金(51876138)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51876138).)

收稿日期:2020-09-30;修回日期:2020-11-24

律,并提出了对应的压降预测关联式,误差在±15%以内。Ji Xianbin 等^[11]研究了填充泡沫铜矩形通道内水过冷流动沸腾的压降规律,发现干度增大和孔径减小会增大压降,并以空通道内的关联式为基础,提出了适用于泡沫金属通道的关联式,误差在±15%以内。孙硕等^[12]对填充泡沫金属圆管内 R410A 制冷剂的饱和沸腾流动压降进行了研究,提出的预测关联式误差为±30%。Hu Haitao 等^[13-14]以此为基础,进一步研究了含油 R410A 的压降规律,引入无量纲项孔径与通道直径之比提出新型关联式,误差在±30%内。

这些预测方法都是根据自身实验工况提出的,对其它文献的预测可能会产生偏差。为了能在更广的实验条件和结构范围内,本文对泡沫金属通道内两相流动压降进行预测,拟采用已有文献的实验数据,使用合适的模型分析各参数对压降变化规律的影响,提出一种新型压降预测关联式。

1 已有关联式和数据调研分析

本文对相关文献的参数总结见表 1 和表 2。实验条件包括:泡沫金属 PPI(pores pre inch)为 5~40,孔隙率为 0.87~95;金属材料为铜、镍和镍铬合金(由于泡沫金属单相压降预测关联式的条件限制,PPI 大于 45 的实验数据没有被采用);文献所用泡沫金属均通过电化学沉积法制得,并通过焊接的方式被填充固定至通道内;实验形式均为使用泵力推动流体在泡沫金属通道内绝热或受热流动;质流密度范围在 0~350 kg/(m²·s);流动方向均为水平流动;通道水力直径范围为 4.36~13.8 mm。

以文献[8]和[13]为例,图 1 中的(a)和(b)给出了部分文献关联式对其它文献数据的预测结果。文献[8]中的关联式对文献[9,11-14]数据预测的误差绝对值分别在 71.88%,3 162.09%,69.98%,51.94%,53.56%以内;文献[13]关联式对文献[9,11-14]数据预测的误差绝对值分别在 228.56%,49.5%,20.63%,55.4%,51.95%以内。

可见同一种预测方法对不同文献的实验条件进行两相压力梯度的计算,与实际实验结果相比会有很大差异。这可能是因为填充泡沫金属通道结构,流动状态和干度范围等条件不同所导致。

2 拟合理论基础及关联式分析

在两相压力梯度模型理论中,分相模型认为气液两相各自独立,以不同流速分开流动^[15],它更加贴合实际的两相流动情况。在空通道两相流动压力梯度

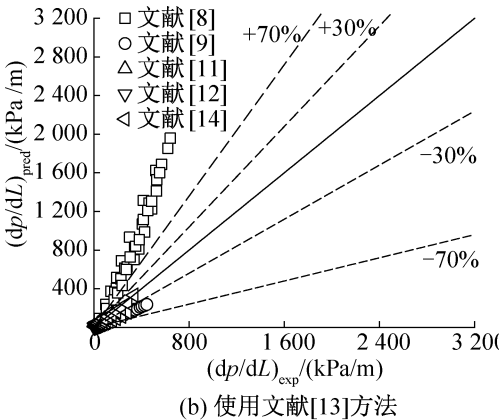
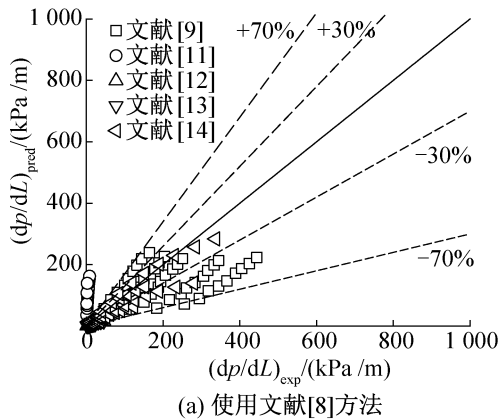


图 1 已有关联式预测误差

Fig.1 Distribution of prediction error of existing correlation

预测中,Lockhart-Martinelli 模型^[16]是分相模型中被普遍使用的一种拟合方法,许多现有关联式都是据此模型作为基础开发得到的,因此本文将开发一种基于 Lockhart-Martinelli 型关联式进行预测的方法,按照如下方法计算:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{tp} = \varphi_{tp,l}^2 \left(\frac{dp}{dL}\right)_l \tag{1}$$

$$X = \left[\left(\frac{dp}{dL}\right)_{l,o} / \left(\frac{dp}{dL}\right)_{g,o} \right]^{1/2} \tag{2}$$

式中:(dp/dL)_{tp}为预测的两相压力梯度,Pa/m;(dp/dL)_l为假设通道内全是液相,理论计算得到的单相压力梯度,Pa/m;φ²_{tp,l}为两相流因子;X为 Lockhart-Martinelli 参数;(dp/dL)_{l,o}和(dp/dL)_{g,o}为单独按照气液质流密度计算的两相压力梯度,Pa/m。其中,两相流因子 φ²_{tp,l}计算方法:

$$\varphi_{tp,l}^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dL}\right)_{tp,exp}}{\left(\frac{dp}{dL}\right)_l} \tag{3}$$

式中:(dp/dL)_{tp,exp}是实验测得的两相压力梯度,Pa/m。

表 1 泡沫金属及通道结构参数
Tab.1 Metal foam and channel structure parameters

年份作者	金属 组分	孔隙率 ε	孔密度 PPI	孔径 d_p/mm	比面积 $S_p/(\text{m}^2/\text{m}^3)$	通道 截面	流动 方向	通道 长度 L/mm	水力 直径 d_h/mm	加热 方式
2006 F. Topin 等 ^[8]	Ni	0.87	40	0.5	—	矩形	水平	250	9.09	绝热 两相
2010 J. P. Bonnet 等 ^[9]	Ni-Cr	0.88	17~23	1.84	1 658	矩形	水平	250	9.09	绝热 两相
2012 Ji Xiaobing 等 ^[11]	Cu	0.88	30	2.762	—	矩形	水平	52	4.36	过冷 沸腾
2012 孙硕等 ^[12]	Cu	0.95	5 10	4.29 2.47	458 916	圆形	水平	200	13.8	饱和 沸腾
2013 Hu Haitao 等 ^[13]	Cu	0.95	5 10	4.29 2.47	458 916	圆形	水平	200	13.8	饱和 沸腾
2014 Hu Haitao 等 ^[14]	Cu	0.95	5 10	4.29 2.47	458 916	圆形	水平	200	13.8	饱和 沸腾

表 2 实验条件及物性参数
Tab.2 Experimental conditions and physical parameters

年份作者	实验 工质	质流密度 $G/(\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$	热流密度 $q/(\text{W}/\text{cm}^2)$	进口 温度 $T_{\text{in}}/^\circ\text{C}$	气相 动力黏度 $\mu_g/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	液相 动力黏度 $\mu_l/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	气相 密度 $\rho_g/(\text{kg}/\text{m}^3)$	液相 密度 $\rho_l/(\text{kg}/\text{m}^3)$
2006 F. Topin 等 ^[8]	水/空气	0~300	绝热	20	0.000 018 205	0.001 001 6	1.189	998.21
2010 J. P. Bonnet 等 ^[9]	水/空气	0~350	绝热	20	0.000 012 820 5	0.001 001 6	1.189	998.21
2012 Ji Xiaobing 等 ^[11]	去离子水	30~90	0~125	80	0.000 012	0.000 277	0.597	958.4
2012 孙硕等 ^[12]	R410A	30~90	0.59~1.65	7	0.000 012 589	0.000 148 2	38.187	1 141.2
2013 Hu Haitao 等 ^[13]	R410A	30~90	0.62~1.86	7	0.000 012 589	0.000 148 2	38.187	1 141.2
2013 Hu Haitao 等 ^[14]	R410A	90~270	0.62~1.86	7	0.000 012 589	0.000 148 2	38.187	1 141.2

$(dp/dL)_l$ 、 $(dp/dL)_{l,o}$ 和 $(dp/dL)_{g,o}$ 按照泡沫金属通道内的单相压力梯度关联式进行计算,泡沫金属通道内的单相压力梯度预测已经非常成熟,有两种广泛使用的预测关联式。

一种是 Moreira 等^[17]提供的方法,这个单相计算关联式在 PPI 为 8~45, ε 为 0.76~0.94 的条件下可以使用。

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_s = 1.275 \times 10^9 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu u}{\varepsilon^3 d_p^{-0.05}} + 1.89 \times 10^4 \frac{(1-\varepsilon) \rho u^2}{\varepsilon^3 d_p^{-0.25}} \tag{4}$$

式中： $(dp/dL)_s$ 为泡沫金属通道内单相压力梯度；Pa/m； L 为通道长度，m。

另一种是 Calmidi^[18] 所得到的单相压力梯度关联式，这个单相计算关联式在 PPI 为 5~40， ε 为 0.91~0.97 的条件下可以使用。

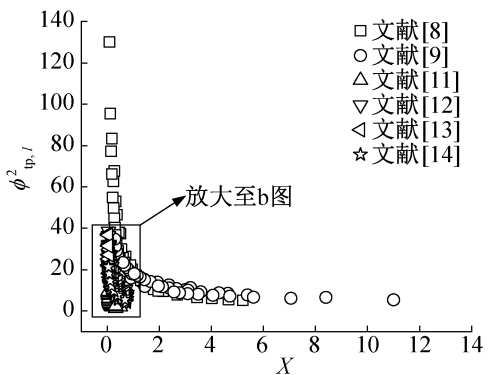
$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_s = \frac{\mu}{K} u + \frac{\rho f}{\sqrt{K}} u^2 \tag{5}$$

式中： K 为渗透率， m^{-2} ； f 为惯性系数，m。
Moreira 和 Calmidi 关联式的孔隙率适用范围分别是 0.76~94 和 0.91~0.97，而文献[8]所使用的泡沫金属孔隙率为 0.87，不在 Calmidi 关联式的适用范围内。因此本文采用(4)式计算单相压力梯度。

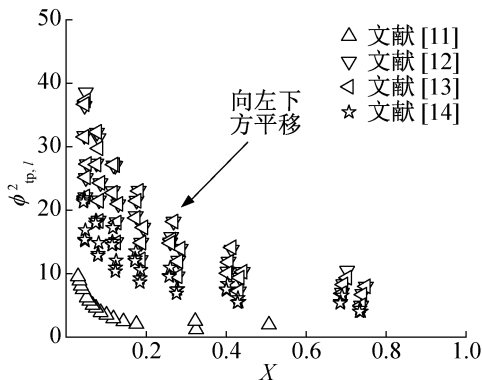
3 拟合分析

3.1 $\phi_{tp,l}^2$ - X 图形规律分析

图 2 给出了两相流因子 $\phi_{tp,l}^2$ 随 Lockhart-Martinelli 参数 X 的变化规律， $\phi_{tp,l}^2$ 值在 0~150 之间，并且随 X 的增大而逐渐减小。



(a) 整体分布情况



(b) 其中[11-14]文献数据分布情况

图 2 $\phi_{tp,l}^2$ - X 分布规律

Fig.2 Distribution of $\phi_{tp,l}^2$ - X

图 2(a) 是所有文献实验数据得到的 $\phi_{tp,l}^2$ - X 分布规律，可以看出，文献[8]和[9]的图形重合度很高，但文献[9]的 $\phi_{tp,l}^2$ 递减速度远小于文献[8]。

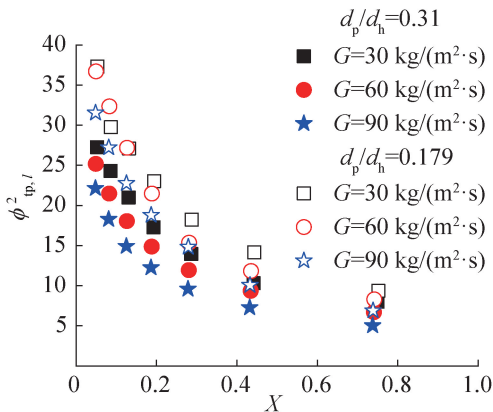
图 2(b) 是文献[11~14]的 $\phi_{tp,l}^2$ - X 图放大后的分布规律，这些文献的 $\phi_{tp,l}^2$ 随 X 的变化趋势几乎一致，但这些文献的 $\phi_{tp,l}^2$ 图形向左下方发生整体平移。

图 2 的规律变化并不相同，这可能是因为实验条件、泡沫金属和通道结构、流动状态等不同，需要对影响 $\phi_{tp,l}^2$ - X 图形规律参数（气体干度 x 、工质流速 u 、泡沫金属孔径与通道水力直径之比 d_p/d_h ）进行分析。

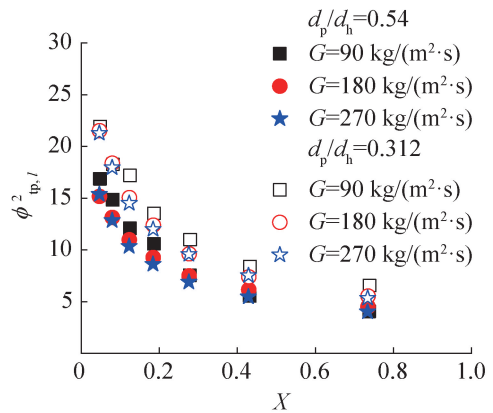
3.2 各参数对压降规律的影响

3.2.1 孔径与通道水力直径比的影响

根据文献[13]和[14]，图 3 给出泡沫金属与通道水力直径之比 d_p/d_h （以下简称径比）对 $\phi_{tp,l}^2$ - X 分布规律的影响情况。图 3 是依照文献[13]和[14]的实验数据，在三组不同质流密度 G 条件下，改变径比 d_p/d_h 得到的 $\phi_{tp,l}^2$ - X 分布规律。



(a) 文献[13]-不同质流密度条件下径比的影响



(b) 文献[14]-不同质流密度条件下径比的影响

图 3 径比对图形的影响

Fig.3 Effect of d_p/d_h on the pattern of $d_{tp,l}^2$ - X

从图 3 可见,在同一质流密度条件下,两相流因子 $\phi_{p,l}^2$ 会随径比 d_p/d_h 的减小而增大,使图形有较大幅度的上移($\phi_{p,l}^2$ 在同一质流密度条件下的增量最大约为 10)。

在 X 小于 0.4 的范围内,当径比 d_p/d_h 由 0.179 变化到 0.312 和由 0.312 变化到 0.54 时,随质流密度 G 增大,两相流因子 $\phi_{p,l}^2$ 的下降幅度逐渐减小;而在 X 大于 0.4 的范围内,两相流因子 $\phi_{p,l}^2$ 的下降幅度十分相近,几乎没有变化。

当径比较小时,通道内泡沫金属的孔径很小。当 X 值变小后,气相作用明显增大,流体流动更混乱,导致 $\phi_{p,l}^2$ 因为 G 增大而产生相对较大的减小。

3.2.2 干度的影响

以文献[13]和[14]为例,图 4 给出了气体干度对 $\phi_{p,l}^2$ - X 分布规律的影响情况。图 4 是按照文献[13]和[14]的实验数据,在不同 PPI 条件下,改变气体干度 x 得到的 $\phi_{p,l}^2$ - X 分布规律。

此外,从图 4 可以看出,当 PPI 由 5 变化到 10 时,在气体干度较大的范围度范围内($x < 0.4$),PPI 的增大几乎不改变两相流因子 $\phi_{p,l}^2$ 的大小。

经过分析,认为泡沫金属孔径与通道水力直径之比和干度都会对 $\phi_{p,l}^2$ - X 的变化规律产生比较大的影响。

3.3 关联式形式

通过对图 2 中图形分布的分析和 $\phi_{p,l}^2$ - X 关联形式的选取,认为下式最符合每篇文献的 $\phi_{p,l}^2$ - X 图形分布:

$$\phi_{p,l}^2 = 1 + \frac{C}{X}$$

(6)

式中: C 是经验拟合系数。

图 5 所示为各文献实验数据计算出的 $\phi_{p,l}^2$ - X 分布与其对应最佳拟合曲线的对应情况。每条曲线对应的最佳 C 值于图中给出。

表 4 所示为各文献物性以及径比的对应情况。可以看到,各文献的所使用的工质不尽相同,可能是因为物性变化导致了曲线的形状发生了改变,但这是在不同实验条件和通道结构下进行的,物性比对曲线的影响程度还不能很好的确定,未来需要寻找相同工况不同工质的实验文献数据进行拓展。

此外,文献[12-14]采用的工质相同,从 C 值与径比的关系以及图形分布可以看出,当 d_p/d_h 减小, C 值会增大,曲线的凹陷程度减小, $\phi_{p,l}^2$ 的增长程度更大,产生更大的两相压力梯度,这印证了 3.2.1 节的分析。

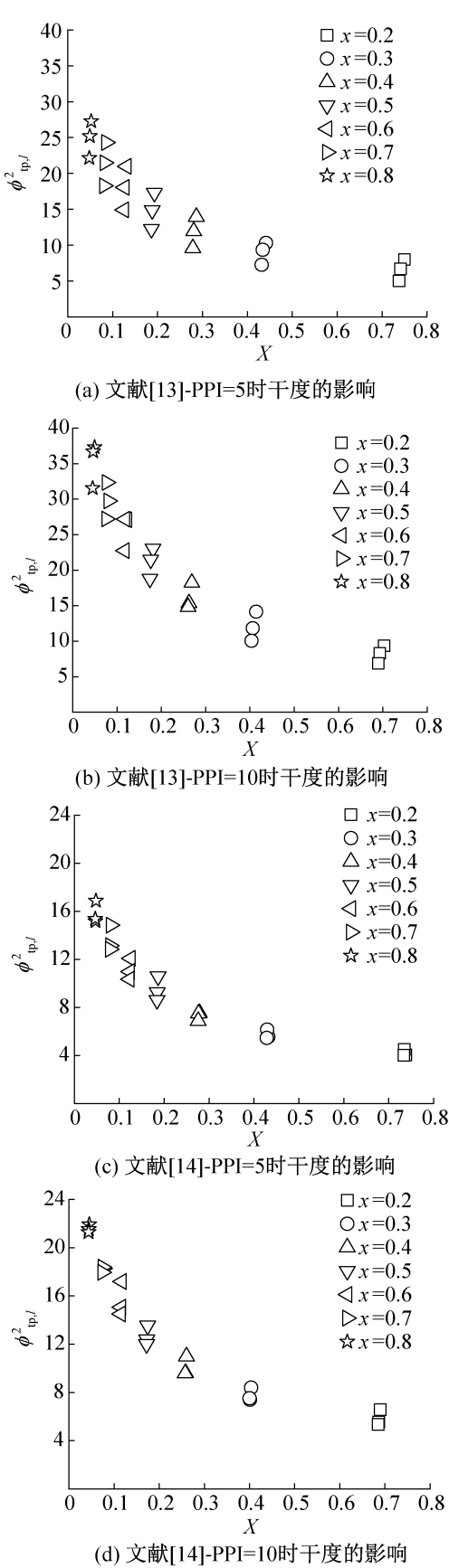


图 4 干度对图形的影响
Fig.4 Effect of quality on the pattern of $\phi_{p,l}^2$ - X

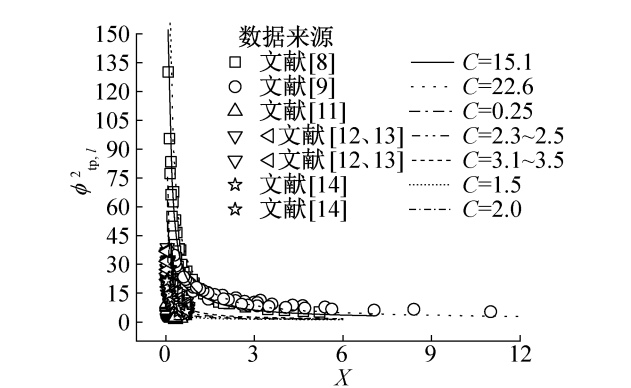


图 5 系数 C 对拟合曲线的影响

Fig.5 Influence of coefficient C on fitting curve

3.4 经验系数拟合

对前面得出的影响图形变化规律的参数,使用最

小二乘法进行线性回归拟合,形式如下所示:

$$C = C_1 x^{C_2} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{C_3} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{C_4} f(D) \tag{7}$$

$$f(D) = e^{C_5 \left(\frac{d_p}{d_h} \right)^{C_6}} \tag{8}$$

式中; $f(D)$ 为关于泡沫金属直径与通道水力直径比的函数,表征不同结构的填充泡沫金属通道对两相流动压力梯度的影响,其中 D 为径比; $C_1 \sim C_6$ 是 C 的拟合系数,分别为0.093 4、-0.344、3.033、1.181、0.44、-1.71。

通过式(1)~(7)对所有文献的实验数据进行预测,图 6 所示为使用新型关联式的两相压力梯度预测结果(误差绝对值远大于 28%的数据没有在图中给出)。有超过 80%的数据误差绝对值在 28%以内,所有实验数据的平均绝对误差的 MAE 约为 22%。

表 3 各文献最佳经验系数选取

Tab.3 Selection of the best experience coefficient in different literatures

年份及作者	实验工质	液气动力黏度比 μ_l/μ_g	气液密度比 ρ_g/ρ_l	最佳 C 值
2006 F. Topin 等 ^[8]	水/空气	55.03	0.001 2	15.1
2010 J. P. Bonnet 等 ^[9]	水/空气			22.6
2012 Ji Xiaobing 等 ^[11]	去离子水	23.088	0.000 61	0.25
2012 孙硕等 ^[12]	R410A	11.77	0.033	2.5($d_p/d_h=0.311$) 3.5($d_p/d_h=0.179$)
2013 Hu Haitao 等 ^[13]	R410A	11.77	0.033	2.3($d_p/d_h=0.311$) 3.1($d_p/d_h=0.179$)
2013 Hu Haitao 等 ^[14]	R410A	11.77	0.033	1.5($d_p/d_h=0.543$) 2.0($d_p/d_h=0.312$)

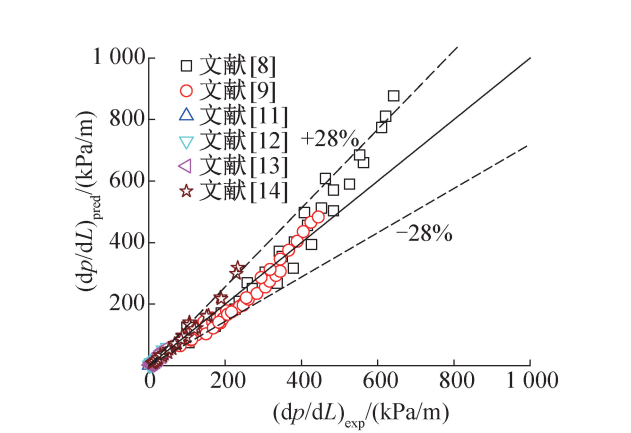


图 6 新关联式预测误差

Fig.6 Prediction error of the new correlation

4 结论

本文采用了 6 篇文献的 233 组两相压力梯度实验数据,分析了两相流因子和 Lockhart-Martinelli 参数的分布规律,发现两相流因子随泡沫金属孔径与通道水力直径之比减小而增大,随干度的增大而增大;当径比从 0.179 变为 0.31 时,两相流因子提升了 1.37~1.52 倍;当干度从 0 变为 0.8 时,两相流因子最大提升了 3.41 倍。

开发了一种 Lockhart-Martinelli 型两相压力梯度预测关联式见式(7)、式(8),该预测关联式适用的参数范围包括:泡沫金属 PPI 为 5~40,孔隙率为 0.87~95,通道水力直径为 4.36~13.8 mm;质流密度为 0~350 kg/(m²·s)。

关联式经验系数只用无量纲参数进行计算,预测结果为,超过 80%的数据预测误差绝对在 28%以内,平均绝对误差 MAE 值约为 22%。

本文受天津市自然科学基金(17JCYBJC21100)项目资助。(The project was supported by Tianjin Municipal Natural Science Foundation (No. 17JCYBJC21100).)

参考文献

- [1] 钱维扬, 潘阳, 彭招. 金属多孔介质泡沫自然对流换热实验研究[J]. 制冷学报, 2017, 38(2): 17–21. (QIAN Weiyang, PAN Yang, PENG Zhao. Experimental investigation on natural convection heat transfer of porous media metal foam[J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(2): 17–21.)
- [2] 杨宪宁, 谢永奇, 余建祖, 等. 泡沫铜相变材料在运血车中的储能应用研究[J]. 制冷学报, 2011(2): 58–62. (YANG Xianning, XIE Yongqi, YU Zujian, et al. The application research of energy storage on copper foam phase-change material in blood transportation vehicle[J]. *Journal of Refrigeration*, 2011(2): 58–62.)
- [3] KIM D W. Convection and flow boiling in micro-gaps and porous foam coolers[D]. Maryland: University of Maryland, 2007.
- [4] LI H Y, LEONG K C. Experimental and numerical study of single and two-phase flow and heat transfer in aluminum foams[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(23/24): 4904–4912.
- [5] MANCIN S, DIANI A, DORETTI L, et al. R134a and R1234ze(E) liquid and flow boiling heat transfer in a high porosity copper foam[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 74: 77–87.
- [6] DIANI A, MANCIN S, DORETTI L, et al. Low-GWP refrigerants flow boiling heat transfer in a 5 PPI copper foam[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 76: 111–121.
- [7] ABADI G B, MOON C, KIM K C. Flow boiling visualization and heat transfer in metal-foam-filled mini tubes-part I: flow pattern map and experimental data[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 98: 857–867.
- [8] TOPIN F, BONNET J P, MADANI B, et al. Experimental analysis of multiphase flow in metallic foam: flow laws, heat transfer and convective boiling[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2006, 8(9): 890–899.
- [9] BONNET J P, TOPIN F, VICENTE J, et al. Cocurrent gas-liquid flow in metal foam: an experimental investigation of pressure gradient[J]. *Journal of Porous Media*, 2010, 13(6): 497–510.
- [10] TOURVIEILLE J N, PHILIPPE R, BELLEFON C. Milli-channel with metal foams under an applied gas-liquid periodic flow: external mass transfer performance and pressure drop[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 267(1): 332–346.
- [11] JI Xianbing, XU Jinliang. Experimental study on the two-phase pressure drop in copper foams[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2011, 48(1): 153–164.
- [12] 孙硕, 胡海涛, 丁国良, 等. 泡沫金属对圆管内 R410A 流动沸腾压降特性的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(11): 3428–3433. (SUN Shuo, HU Haitao, DING Guoliang, et al. Influence of metal foams on two-phase pressure drop of R410A flow boiling in circular tubes[J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(11): 3428–3433.
- [13] HU Haitao, ZHU Yu, DING Guoliang, et al. Effect of oil on two-phase pressure drop of refrigerant flow boiling inside circular tubes filled with metal foam[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(2): 516–526.
- [14] HU Haitao, ZHU Yu, DING Guoliang, et al. Effect of tube diameter on pressure drop characteristics of refrigerant-oil mixture flow boiling inside metal-foam filled tubes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 62(2): 433–443.
- [15] COLLIER J G, THOME J R. Convective boiling and condensation[M]. 3rd ed. USA: Clarendon Press Oxford, 2001.
- [16] LOCKHART R W, MARTINELLI R C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes[J]. *Chemical Engineering Progress*, 1945: 39–48.
- [17] WANG Hui, GUO Liejin. Experimental investigation on pressure drop and heat transfer in metal foam filled tubes under convective boundary condition[J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 155: 438–448.
- [18] CALMIDI V V. Transport phenomena in high porosity fibrous metal foams[D]. Colorado: University of Colorado, 1998.

通信作者简介

朱禹,男,副教授,天津大学机械工程学院,18502694825, E-mail: zhuyu@tju.edu.cn。研究方向:泡沫金属内的传热传质。

About the corresponding author

Zhu Yu, male, associate professor, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, +86 18502695825, E-mail: zhuyu@tju.edu.cn. Research fields: heat and mass transfer in metal foams.