

电沉积金属泡沫内的渗透流动特性

陈康^{1,2}, 陈鹏飞², 李文升^{1,3}, 谢向东¹, 郭烈锦¹, 赵亮¹, 彭怀午²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司太阳能利用工程技术研究所, 710065, 西安;

3. 中国石油天然气集团公司管材研究所石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室, 710077, 西安)

摘要: 为了探究电沉积法制备金属泡沫微观孔胞结构对渗透特性的内在作用机理, 针对不同结构与材料的金属泡沫完成了空气渗透流动实验。采用基于正五边形宽骨架结构的正十二面体的金属泡沫孔胞模型, 建立了金属泡沫半经验渗透模型; 分析了金属泡沫内流动阻力的变化规律, 获得了包括孔隙率和孔密度等不同微观结构参数下金属泡沫内流体渗透特性。研究表明: 小流速范围内, 金属泡沫内流体流动为 Darcy 流态, 受黏性作用影响; 大流速范围内, 金属泡沫内流体流动为 Forheimer 流态, 受惯性作用影响。电沉积金属泡沫内阻力因子的常数项为 0.099 5, 较粉末烧结金属泡沫内阻力因子的常数项明显增大。提出了基于孔隙率与孔密度的金属泡沫水力直径修正计算模型, 与正五边形宽骨架模型预测结果相比误差在 $\pm 5\%$ 以内; 获得了单位长度压差的 Darcy-Forheimer 型预测公式, 预测值与实验值的最大误差在 $\pm 15\%$ 以内, 并提出了以孔隙率和水力直径为变量的金属泡沫渗透率 K 和惯性系数 F 的预测公式。

关键词: 金属泡沫; 渗透率; 惯性系数; 孔胞结构

中图分类号: O359 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202005012 **文章编号:** 0253-987X(2020)05-0087-08



OSID 码

Permeation Characteristics of Electrodeposited Metal Foam

CHEN Kang^{1,2}, CHEN Pengfei², LI Wengsheng^{1,3}, XIE Xiangdong¹,
GUO Liejin¹, ZHAO Liang¹, PENG Huaiwu²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Institute of Solar Engineering Technology, PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China;

3. State Key Laboratory of Performance and Structural Safety for Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials,
Tubular Goods Research Institute of China National Petroleum Corporation, Xi'an 710077, China)

Abstract: To explore the affecting mechanism of permeation characteristics of electrodeposited metal foam, experimental study was conducted for different foam structures and foam materials. Based on the fat pentagon-frame dodecahedron pore model, a semi-empirical permeation model of metal foam was developed. The variation of flow resistance in metal foam was analyzed, and the permeation characteristics of fluid in metal foam with different pore densities and porosities were obtained. The results show that the flow pattern of penetration is Darcy flow at small velocity, which is dominated by viscous effect, and the flow pattern is Forheimer flow at large velocity, which is dominated by inertial effect. The constant term in the friction factor correlation of electrodeposited metal foam was 0.099 5, much larger than that of the constant of powder

sintered metal foam. The modified model of hydraulic diameter was proposed with a maximum $\pm 5\%$ deviation. A new Darcy-Forchheimer correlation of differential pressure per unit length was proposed with a maximum $\pm 15\%$ deviation, and the permeability K and inertial coefficient F were predicted via porosity and hydraulic diameter to reflect the flow mechanism in metal foam.

Keywords: metal foam; permeability; inertia coefficient; foam structure

金属泡沫凭借独特的微观结构,具备以下特点:①孔隙率高, ϵ 大于85%;②密度低;③比表面积大,约为2 000~10 000 m^2/m^3 ;④导热系数高;⑤流道复杂;⑥孔胞结构可控;⑦机械加工性能优良。近年来金属泡沫被广泛应用于强化传热、油气水分离、催化反应、消减噪声等工程领域,特别在空气深度冷却技术中,应用金属泡沫材料的换热器可以满足飞行器轻质、紧凑、高效的工作要求^[1]。

Xu等分别采用热平衡模型与非热平衡模型研究了金属泡沫内流动与传热规律,发现对于完全填充金属泡沫的流动区域,热平衡模型适用于金属泡沫孔隙率或流固介质导热系数较大的工况^[2]。Chen等将金属泡沫层包覆在圆管管束外,研究了金属泡沫作为一种新型翅片形式对流动与换热特性的影响规律^[3]。Yang等探索了矩形通道内金属泡沫翅片填充相变材料的储热性能,发现金属泡沫翅片可以提升储能温度、缩短相变材料的相变时长^[4];管束间金属泡沫翅片填充相变材料可以缩短相变时长,达到无金属泡沫填充管束的88.548%^[5]。在微通道强化传热领域,Xu等研究了多孔介质内渗透流动与微通道内边界滑移的耦合作用^[6];对于微通道内部分填充金属泡沫,考虑多孔介质与微通道纯流体区域的复杂工况,Xu等获得了考虑双滑移效应的流动与传热解析解,分析了流动惯性作用、速度与热边界层滑移效应、流固非热平衡效应对热传递过程的影响机理^[7-8]。

基于对矩形通道和圆管内填充金属泡沫的流动阻力实验结果分析,大量学者对不同加工制备方法得到的金属泡沫的阻力因子进行了研究^[8-10],不同制备工艺下金属泡沫的渗透阻力因子随雷诺数变化总体符合反比例函数曲线,但流动阻力相差较大;相同制备工艺下的金属泡沫流动阻力也有所差别。

由于金属泡沫内部的微观几何结构比较复杂,金属骨架通过在空间中多段相连构成孔胞单元。因此,为了研究泡沫金属内部的热传导和流动现象,以上金属泡沫的应用研究中,从宏观角度将金属泡沫简化为一种大尺度下各相均匀的多孔介质。多孔介质的有效导热系数、渗透率等宏观参数通过对金属

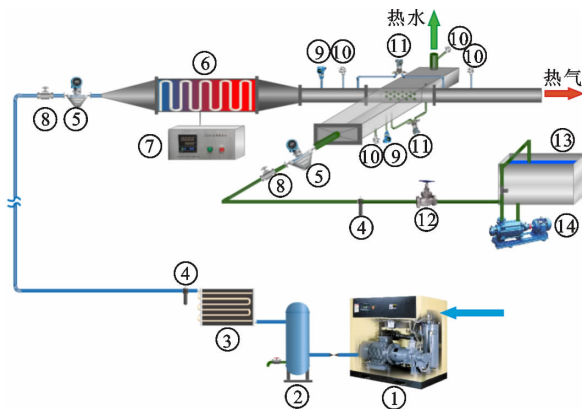
泡沫微观孔隙尺度的孔胞结构进行建模分析获得。目前金属泡沫孔胞结构的理想模型有很多种,例如平行圆柱结构^[9]、正六面体结构^[10-11]、正五边形组成的正十二面体金属泡沫孔胞结构^[12]等规则几何体孔胞结构。简化的孔胞模型适用范围和精度受孔隙率和孔密度的影响较大,而Calmidi基于正十二面体金属泡沫孔胞结构模型获得了以金属泡沫结构参数为变量的金属泡沫渗透率和惯性系数^[13],可适用于较大孔隙率范围的金属泡沫,是目前认可度比较高的孔胞结构简化模型。

金属泡沫的微观结构参数与物理特性是金属泡沫工程应用研究的基础,因此本文通过实验与数值建模分析对比金属泡沫的渗透阻力特性,同时基于微观孔胞结构模型,得到以金属泡沫孔胞结构参数为变量的金属泡沫内渗透特性参数,为金属泡沫在强化传热领域的延伸应用提供一定的参考。

1 实验系统与实验样件

1.1 实验系统

本文的实验工作是在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室空气深度预冷实验平台上进行的。图1为实验平台系统示意图。



1—双螺杆式空气压缩机;2—稳压罐;3—干燥器;4—过滤器;
5—质量流量计;6—空气加热器;7—PID控制器;8—调节阀;
9—压力传感器;10—热电偶;11—压差传感器;12—控制阀;
13—水箱;14—离心水泵。

图1 实验平台系统示意图

实验以空气作为工作介质。空气由螺杆式空气

压缩机提供,压缩机内的稳压罐稳定系统气体压力,空气由高准质量流量计 F010 计量,电加热器可以控制空气的温度。通道入口布置罗斯蒙特微压力传感器和 Honeywell 微差压传感器,分别测量入口压力和进出口压差;通道入口和出口分别布置了 3×3 的 T 型 Omega 热电偶测量温度,实验段尺寸为 $140\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 18\text{ mm}$,测试金属泡沫尺寸为 $40\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 18\text{ mm}$,图 2 给出了金属泡沫示意图。实验段外壳由耐高温、低导热率 PC 板制成。

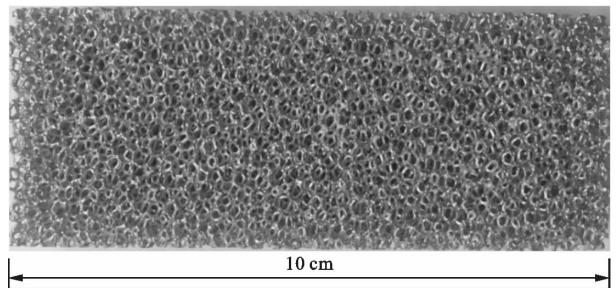


图 2 金属泡沫示意图

空气质量流量 m_{air} 的范围为 $6\sim 130\text{ kg/h}$;空气温度 T 的范围为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 实验样件

对于金属泡沫微观结构,形态参数主要包括了孔径、丝径、孔隙率和孔密度。孔隙率采用排水称重法测量,其他参数采用电子显微镜测量。由于金属泡沫制备方法不同,相同形态参数下的物理特性有所不同。本文对 7 组不同孔胞结构参数的金属泡沫样件的流动特性进行了实验研究。实验中所使用的金属泡沫材料的物理特性见表 1。

表 1 金属泡沫材料物理特性

样件编号	孔密度 P/mm^{-1}	孔隙率 ϵ	金属材料
1	1.27	0.906 ± 0.02	镍
2	2.54	0.846 ± 0.02	镍
3	2.54	0.917 ± 0.02	镍
4	2.54	0.944 ± 0.02	镍
5	3.81	0.914 ± 0.02	镍
6	5.08	0.932 ± 0.02	镍
7	2.54	0.871 ± 0.02	铜

2 实验结果及讨论

本文对电沉积法制备的金属泡沫微观结构参数进行了测量,深入分析了其流体渗透特性,并建立了更符合金属泡沫孔胞结构的数学模型,得到了相关特性参数。

2.1 金属泡沫阻力特性分析

空气在金属泡沫中的流动阻力主要表现在多孔介质的黏性作用与流动的惯性作用。Darcy 渗透模型为

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{K}u \tag{1}$$

式中: u 为金属泡沫样件入口空气流速; Δp 为金属泡沫样件的流动阻力; L 为金属泡沫样件沿流动方向的长度; μ 为空气的动力黏度; K 为金属泡沫渗透率。单位长度压差 $\Delta p/L$ 与空气流速为线性关系,与金属泡沫渗透率成反比。这种仅考虑多孔介质中流体黏性作用的模型明显与金属泡沫中的流动阻力特性不相符合。因此,将表征高速流动时的速度二次项的 Forchheimer 项引入 Darcy 方程中,即多孔介质渗透流动模型中经典的 Darcy-Forchheimer 方程,表达式为

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{K}u + \frac{F\rho}{\sqrt{K}}u^2 \tag{2}$$

式中: F 为金属泡沫的无量纲惯性系数; ρ 为空气密度。考虑了金属泡沫中的惯性作用,流速越快,金属泡沫中的惯性作用越显著。图 3 给出了单位长度下压差随空气流速的变化,从图 3 中可以看出,随着流速的增大,单位长度压差也明显增大。

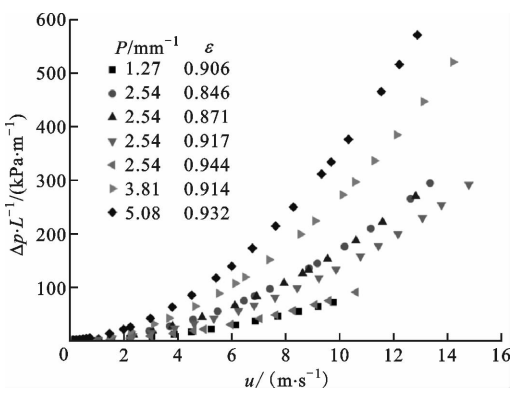


图 3 单位长度压差随空气流速的变化

同时,孔隙率与孔密度作为金属泡沫最重要的两个微观结构形态参数,对单位长度压差的影响也十分明显。对于金属泡沫 2、3、4、7,孔密度均为 2.54 mm^{-1} ,单位长度压差随着孔隙率的增大而减小。这主要是由于较大孔隙率的金属泡沫具有较大的孔径和较小的流体固体接触面积,因此耗损的泵功也相对较小。对于金属泡沫 1、3、5、6,孔密度从 1.27 mm^{-1} 逐渐增大到 5.08 mm^{-1} ,单位长度压差相应急剧增大,这主要是由于孔密度的增大导致相同长度内更多的泡沫骨架和更复杂的微观结构,会

引起空气流动更大的扰动和摩擦阻力。

图4给出了在较宽空气流速范围内的金属泡沫单位长度压差的二次项特性。根据 Darcy 方程式(1)和 Darcy-Forchheimer 方程式(2),不同流型下的渗透率 K 和惯性系数 F 可以由拟合曲线得到。

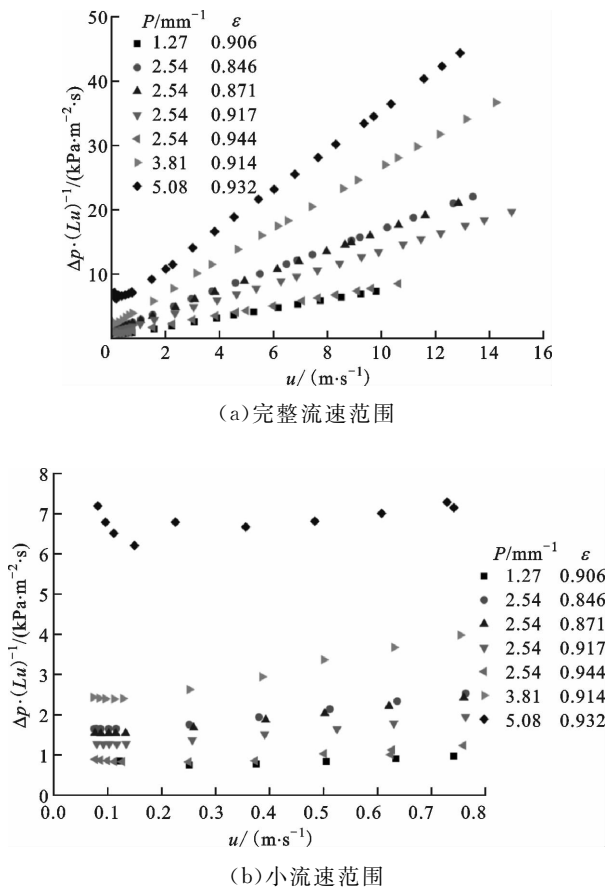


图4 不同流速范围内的单位长度压差梯度

但是 Darcy 流态仅在流体流速较小的工况下存在,为了识别 Darcy 流态与 Post-Darcy 流态之间的转换区域,对式(1)(2)的左右两侧除以空气流速 u ,可以得到单位长度压差梯度

$$\frac{\Delta p}{Lu} = \frac{\mu}{K} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta p}{Lu} = \frac{\mu}{K} + \frac{F\rho}{\sqrt{K}}u \quad (4)$$

对于 Darcy 流态,式(3)的右侧为常数,速度的二次项影响可以忽略;Darcy 流态的流体流动动能较小,流体附着在金属泡沫的骨架上,因此流动压降仅受到黏性力的影响,而惯性力和尾迹区域的影响几乎可以忽略。Darcy 流态下的流体流动属于稳定的层流。从图 4b 中可以看出,当空气在小流速区域内流动时,单位长度压差梯度几乎不变。对于孔密度 P 为 5.08 mm^{-1} 的金属泡沫,由于其流动阻力最

大,在较小流速时,其单位长度压差梯度出现了下降的变化趋势,这一区域的流动属于 Pre-Darcy 流态。目前对于 Pre-Darcy 流动的流动机理和边界划分还处于初步探索的阶段。

对于 Post-Darcy 流态,式(4)是关于空气流速 u 的线性关系,速度的二次项对压差的影响十分显著。图 4 为不同流速范围内的单位长度压差梯度,从图 4 中可以看出,在空气流速大于 1 m/s 时,单位长度压差梯度随空气流速线性增长。因此,空气流速 0.13 m/s 是本文使用金属泡沫的 Darcy 流态向 Post-Darcy 流态转换的边界。

Post-Darcy 流态根据流动特性的不同区分为 Forchheimer 流态和湍动流态。对于 Forchheimer 流态,流体流动的能量耗散主要包括黏性力和惯性力的综合影响。流体在金属骨架外形成了边界层。流动中运动能量的衰减主要是由于孔胞结构的收缩,即流动区域的减小和流动方向的改变,即环绕金属泡沫骨架的流动。但是 Forchheimer 流态下的流体流动仍然属于稳定的层流。湍动流态下的流体流动是非稳态和高度无序的,主要受到了非均匀的孔胞大小分布、接触面的粗糙程度、金属泡沫内的流体聚合与分离的综合影响。Rode 等认为金属泡沫内的湍动流态属于一种表象湍流,而非充分发展的湍流^[14]。Dukhan 通过对单位长度压差梯度的分析,认为对于相同的金属泡沫,在不同流态下的渗透率 K 和惯性系数 F 是不同的^[15]。因此应当根据不同流速工况,分别讨论金属泡沫的流动特性参数的影响。

2.2 金属泡沫内阻力因子

根据 Darcy 方程式(1)和 Darcy-Forchheimer 方程式(2),金属泡沫内的流动阻力可以无量纲化为阻力因子 f ,用于表征不同结构金属泡沫的流动特性。以 $\sqrt{K}$ 为特征长度的阻力因子 f_K 可以表达为

$$f_K = \left(\frac{\Delta p}{L} \right) \frac{\sqrt{K}}{\rho u^2} = \frac{1}{Re_K} + C \quad (5)$$

式中: Re_K 是以金属泡沫渗透率为特征长度的无量纲流动参数; $\sqrt{K}$ 为特征长度,用于表征金属泡沫的微观孔结构; C 为常数项。

$$Re_K = \frac{\rho u \sqrt{K}}{\mu} \quad (6)$$

图 5 给出了阻力因子 f_K 与 Re_K 的关系图。从图 5 中可以看出,在较小空气 Re_K 时,阻力因子 f_K 与 Re_K 成线性关系;随着 Re_K 的增大,空气流动进入 Forchheimer 流态,空气流速的二次项起到显著

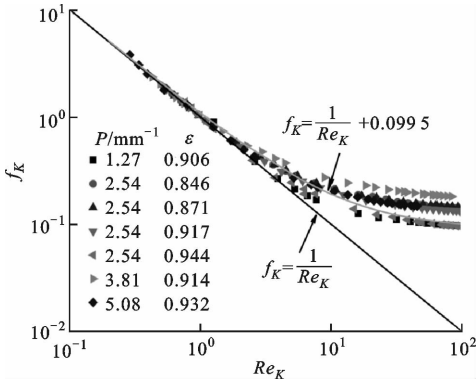


图 5 阻力因子 f_K 与 Re_K 的关系

作用。对于整体空气流速范围,阻力因子 f_K 与 Re_K 成指数变化关系,通过对实验数据的回归统计,得到本文实验所用的电化学沉积法制备金属泡沫的阻力因子 f_K 经验关联式为

$$f_K = \frac{1}{Re_K} + 0.0995 \quad (7)$$

很多学者对不同加工制备方法得到的金属泡沫的阻力因子进行了研究分析,对于式(5)中的 C 得到了不同的结果。其中 Kim 对电化学沉积法制备铝泡沫研究得到的 C 值为 0.105^[16], Beavers 和 Sparrow 得到的 C 值为 0.074^[17], Wang 对粉末烧结制备不锈钢泡沫得到的 C 值为 0.024^[18]。本文常数项为 0.0995,与 Kim^[16]的结果十分接近,主要是由于两种金属泡沫采用相同的制备工艺,而 Wang 采用的粉末烧结制备法得到的金属泡沫在孔胞结构与骨架连接面都有较大的差异,导致其流动阻力特性截然不同^[18]。

2.3 金属泡沫渗透特性参数分析

本文在 Darcy-Forchheimer 方程的基础上,基于正十二面体的金属泡沫孔胞模型,用于预测金属泡沫的渗透率 K 和惯性系数 F 。

根据 Ergun 对堆积床类多孔介质中阻力系数的定义^[19]

$$\frac{\Delta p}{L} = f \rho \frac{u^2}{\epsilon^2} \frac{1}{d_h} \quad (8)$$

式中: d_h 为水力直径。阻力因子 f 可以表达为

$$f = \frac{A}{Re} + B \quad (9)$$

Re 可以定义为以水力直径 d_h 为特征长度的无量纲流动参数

$$Re = u \rho \frac{d_h}{\epsilon} \quad (10)$$

根据 Dietrich 的定义^[20]可知,水利直径 d_h 的表达式为

$$d_h = 4 \frac{\epsilon}{a_{sf}} \quad (11)$$

式中 a_{sf} 为金属泡沫的比表面积。根据式(8)~(10),提出了单位长度压差的 Ergun 型关联式

$$\frac{\Delta p}{L} = A \frac{\mu}{\epsilon d_h^2} u + B \frac{\rho}{\epsilon^2 d_h} u^2 \quad (12)$$

从式(11)可以看出,单位长度压差的 Ergun 型并联式转换为了 Darcy-Forchheimer 型关联式。为了得到金属泡沫的比表面积, Huu 建立了正五边形的正十二面体孔胞结构^[21],根据杨肖虎等的研究发现,从电子显微镜下的图像可以得到金属泡沫骨架节点处的直径是骨架直径的 1.25 倍^[22]。因此,本文采用正五边形宽骨架结构的正十二面体孔胞结构,如图 6 所示,其中 d_f 为金属泡沫圆柱骨架的直径, d_p 为正五边形内切圆的直径, d_s 为正五边形的边长。

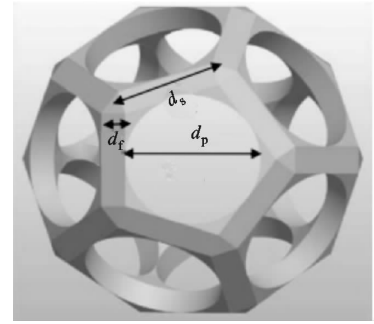


图 6 基于正五边形宽骨架结构的正十二面体模型^[20]

根据正五边形宽骨架结构的几何特性,可以得到其比表面积的表达式为

$$a_{sf} = \frac{1}{d_c} \left(12\pi c \left(1 - \frac{c}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} \right) / (\sqrt{5}\varphi \sqrt{3-\varphi}) + \sqrt{15} \left(1 - \frac{c}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{5} \right) / [2(3-\varphi)] \right) \quad (13)$$

式中:黄金比例 $\varphi = (5^{1/2} + 1)/2$; d_c 为金属泡沫的孔胞直径; c 为骨架直径 d_f 与骨架长度 d_s 的比值,可以由下式得到

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{5}\pi}{\varphi^4} c^2 \left(1 - \frac{c}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} \right) + \frac{2\sqrt{10}\pi}{12\varphi^4} c^3 + \\ & \left(\frac{12c}{\sqrt{5}\varphi^4} \right) \left(\frac{5\varphi}{4\sqrt{3-\varphi}} - \frac{\pi}{4} \frac{\varphi^2}{3-\varphi} \right) \left(1 - \frac{c}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} \right)^2 + \\ & 40 \frac{\sin^2(\pi/5)\varphi^2(1-(c/2)\sqrt{2/3})^3}{32\sqrt{3}(3-\varphi)\sqrt{5}\varphi^4} \cdot \\ & \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{\sin^2(\pi/5)\varphi^2}{9-3\varphi}} - (1-\epsilon) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

孔胞直径 d_c 与孔密度 P 的几何关系为

$$d_c = \frac{0.0254\varphi^2}{P} \tan\left(\frac{\pi}{5}\right) \quad (15)$$

Huu 在对金属泡沫微观结构的图像分析中发现,在孔隙率小于 0.9 时,金属泡沫骨架节点处为圆形,而在孔隙率大于 0.9 时,金属泡沫骨架节点处为三角形^[21]。因此,随着孔隙率的增大,骨架直径与骨架长度的比值 c 和比表面积是不连续的。本文引入了金属泡沫形状参数 G ,它的定义为

$$G = 1 - \exp\left(-\frac{1-\varepsilon}{0.04}\right) \quad (16)$$

综合上述式(12)~(16)可以得到金属泡沫孔胞单元的水力直径

$$d_h = \frac{0.0698}{P} \frac{\varepsilon}{G} = \frac{0.0698}{P} \frac{\varepsilon}{1 - \exp\left(-\frac{1-\varepsilon}{0.04}\right)} \quad (17)$$

针对孔隙率对金属泡沫骨架节点形状的影响,本文比较了基于正五边形宽骨架模型和 Dietrich 模型^[20]的 d_h 和修正水力直径 d_h 。如图 7 所示,修正水力直径 d_h 与基于正五边形宽骨架结构模型的水力直径 d_h 的误差在 $\pm 5\%$ 以内,可以更简洁的根据金属泡沫的孔隙率与孔密度两个微观结构参数确定水力直径。

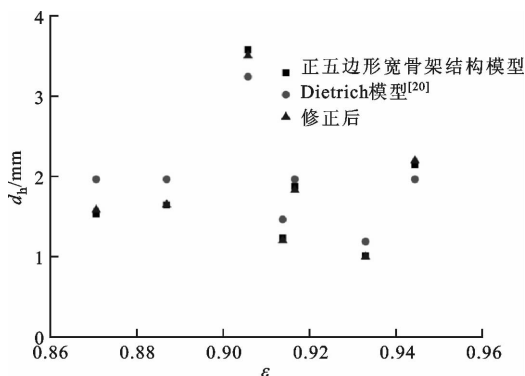


图7 基于正五边形宽骨架结构模型和 Dietrich 模型^[20]的 d_h 和修正水力直径 d_h 的对比结果

根据式(11)和式(17),对实验数据进行线性回归拟合,可以得到式(12)中常数 A 、 B 分别为 326 和 1.43,即以金属泡沫孔胞单元的水力直径 d_h 为特征长度的单位长度压差预测模型为

$$\frac{\Delta p}{L} = 326 \frac{\mu}{\varepsilon d_h^2} u + 1.43 \frac{\rho}{\varepsilon^2 d_h} u^2 \quad (18)$$

图 8 为单位长度压差的模型预测误差,从图 8 中可以看出,所有金属泡沫实验点的最大误差在 $\pm 15\%$ 以内。基于陶瓷泡沫的 Dietrich 预测模型^[20]的预测值与实验值相对误差也在 $\pm 40\%$ 以上。

本文基于正五边形宽骨架结构的正十二面体孔胞单元模型,可以更为精确地预测金属泡沫流动渗透特性。

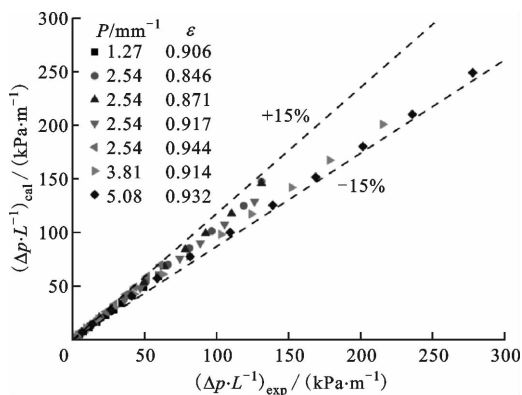


图8 单位长度压差的模型预测误差

由式(12)可以看出,单位长度压差的预测公式为 Darcy-Forchheimer 型速度的二次式。由 Darcy-Forchheimer 方程式(2)和式(18)可以得到金属泡沫的渗透率 K 和惯性系数 F

$$K = \frac{\varepsilon d_h^2}{326} \quad (19)$$

$$F = \sqrt{326} \times 1.43 \varepsilon^{-3/2} \quad (20)$$

3 实验测量的不确定度分析

本文实验中所有数据均为间接被测量,压力、压差和流量传感器输出信号为 4~20 mA 电流,通过 250 Ω 的标准电阻电流信号转换为 1~5 V 的电压信号;温度信号输出为毫伏电压信号。间接被测量的不确定度受到多个直接测量的物理量误差影响,假设共有 n 个,且各分量彼此独立,则间接被测量的不确定度可以表示为

$$\delta U = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial U}{\partial x_i} \delta x_i\right)^2} \quad (21)$$

式中: U 为间接测量物理量; δU 为间接测量物理量的不确定度; δx_i 为各直接测量值 x_i 的不确定度。

本文实验中,空气流量测量精度等级为 0.5 级,量程范围是 0~100 kg/h,最大不确定度为 2.41%。空气压力测量精度为 0.1 级,量程范围为 0~6 220 Pa,根据最小测量值确定的最大不确定度为 1.56%。空气压差测量精度为 0.037 5 级,量程范围为 0~6 kPa,根据最小测量值确定的最大不确定度为 0.57%。

4 结 论

本文通过实验研究的方法得到了矩形通道内金

属泡沫的流动阻力特性,给出了孔隙率与孔密度对金属泡沫内流动阻力的影响规律,拟合了电沉积法制金属泡沫的阻力因子关联式,对比不同加工工艺的金属泡沫流动阻力特性,发现随着制备工艺的成熟与标准化,电沉积法制金属泡沫的阻力特性较为稳定,但不同材料的金属泡沫仍需要进行阻力因子校正。

本文分析了金属泡沫内渗透流动的流态分布与转换,由于金属泡沫高渗透率的特性,使得渗透流态主要分布在 Darcy 流态与 Forchheimer 流态,并确定了两种流态的转换边界。

本文基于正五边形宽骨架结构的正十二面体孔胞单元模型,得到了金属泡沫孔胞单元的水力直径和比表面积,根据孔胞单元模型与实验数据,获得了单位长度压差的预测公式,并将预测值与实验值进行对比,相对误差在 $\pm 15\%$ 以内。与之前学者们提出的不同预测模型对比发现,本文提出的预测模型更适用于金属泡沫类型的多孔介质。在孔胞模型的基础上,得到了以孔隙率和水力直径为变量的金属泡沫渗透率 K 和惯性系数 F 。

参考文献:

- [1] 陈康,郭烈锦,赵亮,等. 包覆金属泡沫管束流动与传热特性实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(4): 770-774.
CHEN Kang, GUO Liejin, ZHAO Liang, et al. Experimental investigation of fluid flow and heat-transfer properties of metallic foam tube-bundle [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(4): 770-774.
- [2] XU Huijin, GONG Liang, ZHAO Changying, et al. Analytical considerations of local thermal non-equilibrium conditions for thermal transport in metal foams [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 95: 73-87.
- [3] CHEN Kang, GUO Liejin, XIE Xiangdong, et al. Experimental investigation on enhanced thermal performance of staggered tube bundles wrapped with metallic foam [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 459-468.
- [4] YANG Xiaohu, NIU Zhaoyang, BAI Qingsong, et al. Experimental study on the solidification process of fluid saturated in fin-foam composites for cold storage [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 161: 114-163.
- [5] YANG Xiaohu, YU Jiabang, GUO Zengyu, et al. Role of porous metal foam on the heat transfer enhancement for a thermal energy storage tube [J]. Applied Energy, 2019, 239: 142-156.
- [6] XU Huijin, ZHAO Changying, XU Zhiguo. Analytical considerations of slip flow and heat transfer through microfoams in mini/microchannels with asymmetric wall heat fluxes [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 15-26.
- [7] XU Huijin, ZHAO Changying, VAFI K. Analysis of double slip model for a partially filled porous microchannel: an exact solution [J]. European Journal of Mechanics: B Fluids, 2018, 68: 1-9.
- [8] XU Huijin. Thermal transport in microchannels partially filled with micro-porous media involving flow inertia, flow/thermal slips, thermal non-equilibrium and thermal asymmetry [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 110: 104404.
- [9] DUKHAN N, QUINONES-RAMOS P D, CRUZ-RUIZ E, et al. One-dimensional heat transfer analysis in open-cell 10-ppi metal foam [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(25/26): 5112-5120.
- [10] DU PLESSIS P, MONTILLET A, COMITI J, et al. Pressure drop prediction for flow through high porosity metallic foams [J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(21): 3545-3553.
- [11] FOURIE J G, DU PLESSIS J P. Pressure drop modeling in cellular metallic foams [J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(14): 2781-2789.
- [12] LU T, STONE H, ASHBY M. Heat transfer in open-cell metal foams [J]. Acta Materialia, 1998, 46(10): 3619-3635.
- [13] CALMIDI V V, MAHAJAN R L. Forced convection in high porosity metal foams [J]. Journal of Heat Transfer, 2000, 122(3): 557-565.
- [14] RODE S, MIDOUX N, LATIFI M A, et al. Hydrodynamics of liquid flow in packed beds: an experimental study using electrochemical shear rate sensors [J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(6): 889-900.
- [15] DUKHAN N, BAĞCI Ö, ÖZDEMİR M. Metal foam hydrodynamics: flow regimes from pre-Darcy to turbulent [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 114-123.
- [16] PAEK J, KANG B, KIM S, et al. Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials [J]. International Journal of Thermophysics, 2000, 21(2): 453-464.
- [17] BEAVERS G S, SPARROW E M. Non-Darcy flow through fibrous porous media [J]. Journal of Applied

- Mechanics, 1969, 36(4): 711-714.
- [18] 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.
- [19] ERGUN S. Fluid flow through packed columns [J]. Chem Eng Prog, 1952, 48(2): 89-94.
- [20] DIETRICH B, SCHABEL W, KIND M, et al. Pressure drop measurements of ceramic sponges; determining the hydraulic diameter [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(16): 3633-3640.
- [21] HUU T T, LACROIX M, HUU C P, et al. Towards a more realistic modeling of solid foam; use of the pentagonal dodecahedron geometry [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(24): 5131-5142.
- [22] 杨肖虎, 邝九杰, 白佳希, 等. 高孔隙率通孔金属泡沫有效导热系数的实验和理论研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 79-84.
- YANG Xiaohu, KUANG Jiuji, BAI Jiaxi, et al. Experimental and analytic investigations for effective thermal conductivity in high porosity metallic foams [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 79-84.

(编辑 武红江)

(上接第 16 页)

- HOU Juncai, LI Chao, JIA Weidong, et al. Effects of negative DC electric fields on CH_4/air premixed flame at different initial pressures [J]. CIESC Journal, 2017, 69(4): 1602-1610.
- [14] SHEBEKO Y N. Effect of an ac electric field on normal combustion rate of organic compounds in air [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 1982, 18(4): 427-429.
- [15] BISETTI F, EL MORSLI M. Kinetic parameters, collision rates, energy exchanges and transport coefficients of non-thermal electrons in premixed flames at sub-breakdown electric field strengths [J]. Combustion Theory and Modelling, 2014, 18(1): 148-184.
- [16] STARIKOVSKII A Y. Plasma supported combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2405-2417.
- [17] 蒋德明, 陈长佑, 杨嘉林, 等. 高等车用内燃机原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 59-65.
- [18] 殷燕. 氧气、氮气及其混合气体直流放电的蒙特卡罗模拟 [D]. 保定: 河北大学, 2003: 28-29.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 77 页)

- [18] 卓蒙蒙, 张晓光, 姬程鹏, 等. 基于小波降噪与分形理论的滚动轴承故障诊断 [J]. 轴承, 2011, 6: 35-37.
- ZHUO Mengmeng, ZHANG Xiaoguang, JI Chengpeng, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on wavelet de-noising and fractal theory [J]. Bearing, 2011, 6: 35-37.
- [19] 夏均忠, 于明奇, 白云川, 等. 基于改进信息图与MOMEDA的滚动轴承故障特征提取 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(4): 26-32.
- XIA Junzhong, YU Mingqi, BAI Yunchuan, et al. Fault feature extraction of rolling bearing based on improved information graph and MOMEDA [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(4): 26-32.
- [20] WANG Zhijian, WANG Junyuan, ZHAO Zhifang, et al. A novel method for multi-fault feature extraction of a gearbox under strong background noise [J]. Entropy, 2018, 20(1): 10-26.
- [21] 唐贵基, 王晓龙. 参数优化变分模态分解方法在滚动轴承早期故障诊断中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5): 73-81.
- TANG Guiji, WANG Xiaolong. Parameter optimized variational mode decomposition method with application to incipient fault diagnosis of rolling bearing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(5): 73-81.

(编辑 武红江)