

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.03.010

# 液滴撞击恒温多孔介质表面的数值模拟

刘毅诚, 李培超\*

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:**为探究多孔介质物性参数对液滴撞击动力学的影响,笔者基于恒温多孔材料的表面温度  $T_p$ 、孔隙度  $\Phi$ 、平均颗粒直径  $d_p$  以及接触角  $\theta$  等参数对液滴变形过程进行了数值研究。借助计算流体力学软件 FLUENT 进行数值模拟,基于局部热平衡(local thermal equilibrium, LTE)假设,观察液滴在宏观概化多孔介质模型中的铺展与渗透过程。研究发现:液滴的铺展和渗透之间是相互竞争的。恒温多孔介质的表面温度越高,液滴的渗透能力越强;孔隙率越大,液滴的渗透深度越大;平均颗粒直径越小,液滴的铺展半径越大;液滴的接触角越大,湿润性能则越差,铺展半径越小。

**关键词:**多孔介质;液滴;局部热平衡;铺展;渗透;FLUENT

中图分类号:TK124;O35;TH873 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)03-0059-07

## Numerical Simulation of Droplet Impacting on Thermostatic Porous Media Surface

LIU Yicheng, LI Peichao\*

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of physical parameters of porous media on droplet impact dynamics, the droplet deformation process was numerically investigated from surface temperature ( $T_p$ ), porosity ( $\Phi$ ), average particle diameter ( $d_p$ ) and contact angle ( $\theta$ ) of thermostatic porous materials. Numerical simulation was carried out with the help of computational fluid dynamics software FLUENT. Based on the assumption of local thermal equilibrium (LTE), the spreading and penetration processes of droplets in the macroscopic generalized porous media model were observed. It is found that droplet spreading and penetration are in competition with each other. The higher the surface temperature of thermostatic porous media is, the stronger the permeability of droplet is; the larger the porosity is, the larger the penetration depth of the droplet is; the smaller the average particle diameter is, the larger the droplet spreading radius is; the larger the contact angle of droplet is, the worse the wetting performance and the smaller the spreading radius are.

**Keywords:** porous media; droplet; LTE (Local Thermal Equilibrium); spreading; penetration; FLUENT

液滴撞击动力学问题在生产生活中应用广泛,如金属切削加工时需要进行喷雾射流冷却<sup>[1]</sup>、打印机喷墨打印<sup>[2]</sup>和内燃机燃料碰壁燃烧<sup>[3]</sup>等。多孔介质在生活中无处不在,我们对液滴在多孔材料表面铺展润湿<sup>[4]</sup>、渗流<sup>[5]</sup>和吸附<sup>[6]</sup>等行为的研究也广为关注。

Van Gaalen 等<sup>[7]</sup>对液滴在多孔介质表面渗透吸收进行了数值研究,基于 Darcy 定律用表面润滑理论和

毛细现象解释了多孔基底的吸液行为,并总结了钉扎与移动接触线对渗透速率以及渗透深度的影响。Li 等<sup>[8]</sup>对非连续湿润梯度表面液滴的自运输现象进行了数值分析,通过观察液滴在光滑和粗糙表面上毛管数和质心的变化,发现粗糙带对液滴铺展有显著的阻碍作用。Yuan 等<sup>[9]</sup>在研究表面纹理对湿润性的影响时,提出了一种二级分层结构可以显著提高表面材料

收稿日期:2022-01-11;修回日期:2022-03-06

基金项目:上海市自然科学基金(19ZR1421400)。

第一作者简介:刘毅诚(1997),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要研究方向为液滴多孔介质热流耦合。通信作者:李培超(1976),男,上海人,博士,副教授,主要研究方向为多场耦合力学、渗流力学和多孔介质传热传质基础理论和数值分析。E-mail:wiselee18@163.com

的疏水性,并通过数值模拟的方法分析了液滴韦伯数、撞击位置对液滴渗透、湿润的影响。Neyval C 等<sup>[10]</sup>通过数值模拟的方法,研究了雷诺数、达西数及韦伯数等7种无量纲数对液滴冲击多孔介质表面铺展与渗透行为的影响。张新铭等<sup>[11]</sup>通过数值模拟的方法对石墨泡沫的流动阻力进行了研究,提出了一种基于 Ergun 渗流方程的泡沫多孔材料模型,可以用来很好的描述石墨泡沫材料对渗流流体的压降作用。

在研究液滴撞击动力学问题时,上述研究者多从液滴润滑理论和多孔材料渗透机理进行研究,考察液滴撞击动力学问题。笔者将在前人研究的基础上,考虑流动与传热之间的相互影响,从多孔介质表面温度、湿润性能和渗透性能等多个角度进行数值模拟,观察各参数对液滴撞击变形的影响,旨在能更好得了解液滴在多孔介质表的铺展与渗透机理。

## 1 数学模型

### 1.1 研究方法

笔者运用 CFD 软件 FLUENT 对液滴撞击多孔介质问题进行数值模拟实验。液滴撞击变形的过程中涉及到气液两相流相界面的捕捉问题,撞击后动力学过程又涉及到液体在多孔材料中渗透流动的问题以及内部热能传递的问题。在求解液滴渗流问题时,多孔介质宏观概化模型将很好的描述多孔材料对流体的黏性阻力和惯性阻力的作用;局部热平衡假设<sup>[12]</sup>可以用“有效热性能”来简化描述整个多孔区域(包括流体与固体)内的平均温度。

图 1 所示为液滴撞击多孔材料的物理模型,假设液滴在下落的过程中形态不变仍保持为球形,初始半径  $r_0 = 1 \text{ mm}$ ,在重力加速度  $g$  的作用下以一定的速度与多孔介质平板发生碰撞,撞击速度  $V_0 = 1 \text{ m/s}$ 。液滴碰壁模型是以坐标轴  $x$  轴为旋转对称中心,其正半轴为流体区域,负半轴为多孔区域。

### 1.2 控制方程

液滴在多孔材料表面铺展与内部渗透沿用了 2 套不同的控制方程,内部的流体除了受到压差力、重力和黏性剪切力外,还受多孔材料带来的黏性阻力与惯性阻力的影响,其控制方程如下:

流体区域:

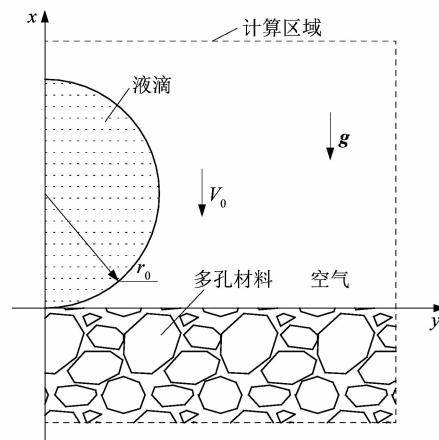


图 1 物理模型

Figure 1 Physical model

$$\nabla \cdot V = 0; \quad (1)$$

$$\rho_f(V \cdot \nabla)V = -\nabla pI + \rho_fg + \mu \nabla^2 V; \quad (2)$$

$$\rho_f c_{p,f} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} (V \cdot \nabla T) = k_f \nabla^2 T. \quad (3)$$

多孔区域:

$$\bar{\nabla} \cdot V_D = 0; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho_f}{\Phi^2} (V_D \cdot \bar{\nabla}) V_D &= -\bar{\nabla} p_D I + \rho_f g - \\ \left[ \frac{\mu}{K} + \frac{C}{2} \rho_f |V_D| \right] V_D + \mu_s \mu \bar{\nabla}^2 V_D; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} (\Phi \rho_f c_{p,f} + (1 - \Phi) \rho_s c_{p,s}) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} (V_D \cdot \bar{\nabla} T) &= \\ (\Phi k_f + (1 - \Phi) k_s) \bar{\nabla}^2 T. \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\nabla$  为梯度算子,  $V$  为流体速度,  $\rho_f$  为流体密度,  $p$  为流体压力,  $I$  为单位矩阵,  $g$  为重力加速度,  $\mu$  为流体动力黏度,  $c_{p,f}$  为流体的比热容,  $T$  为温度,  $t$  为时间,  $k_f$  为流体导热系数,  $\bar{\nabla}$  为宏观梯度算子<sup>[13]1589</sup>,  $V_D$  为达西速度,  $\Phi$  为多孔材料的孔隙度,  $p_D$  为达西压力,  $K$  为多孔材料的渗透率,  $C$  为惯性因子,  $\mu_r$  为相对黏度,  $\rho_s$  为多孔材料的密度,  $c_{p,s}$  为多孔材料的比热容,  $k_s$  为多孔材料的导热系数。

根据 Ergun 方程<sup>[14]</sup>可知,多孔材料的渗透率  $K$  和惯性因子  $C$  与孔隙度  $\Phi$  和平均颗粒直径  $d_p$  有关:

$$K = \frac{d_p^2}{150(1 - \Phi)} \frac{\Phi^3}{\Phi^3}; \quad (7)$$

$$C = \frac{3.15(1 - \Phi)}{d_p} \frac{1}{\Phi^3}. \quad (8)$$

### 1.3 边界条件

多孔材料的表面是流体区域与多孔区域的交界面,而恒温多孔材料的表面属于传热学第一类热边界条件 Dirichlet 边界,即:

$$T_p = T_0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = 0. \quad (10)$$

式中  $T_0$  为多孔材料的初始温度。

在该边界条件下,多孔材料的表面温度  $T_p$  为定值且不随时间  $t$  变化而变化。

## 2 模型验证

### 2.1 模拟实验验证

模拟结果如图 2 和图 3 所示。

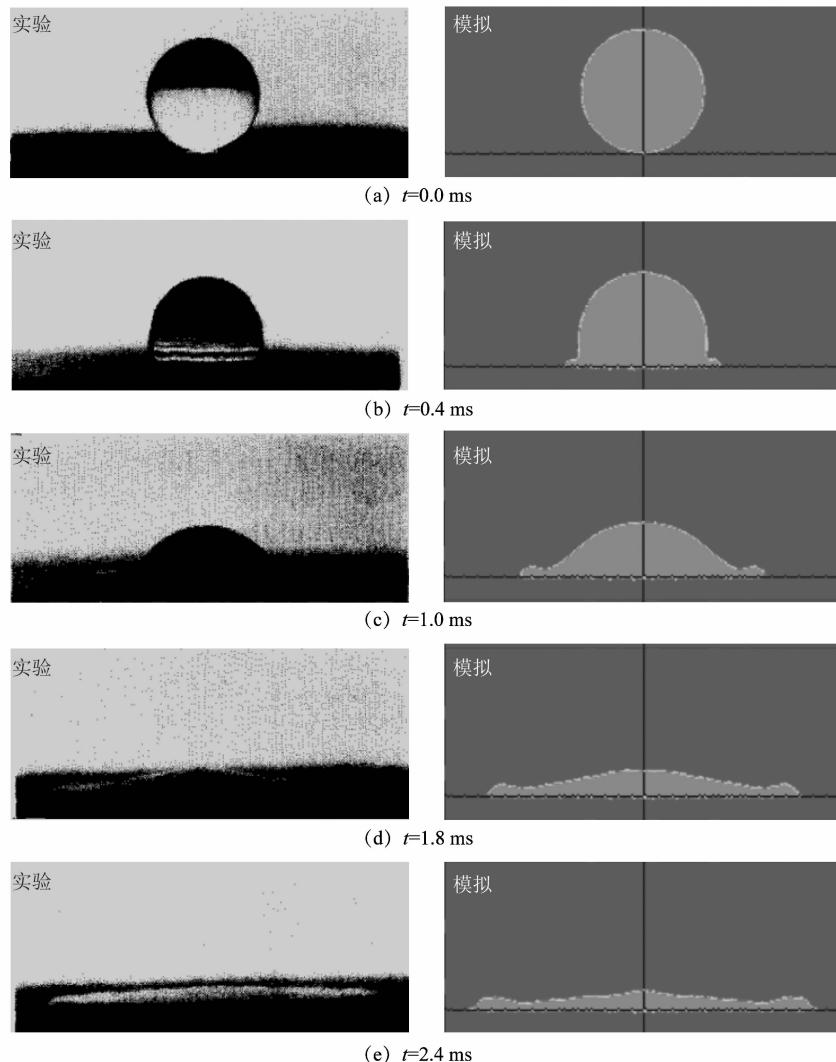


图 3 不同时间下实验和模拟液滴变形对比

Figure 3 Droplets deformation at different time in experiment and simulation

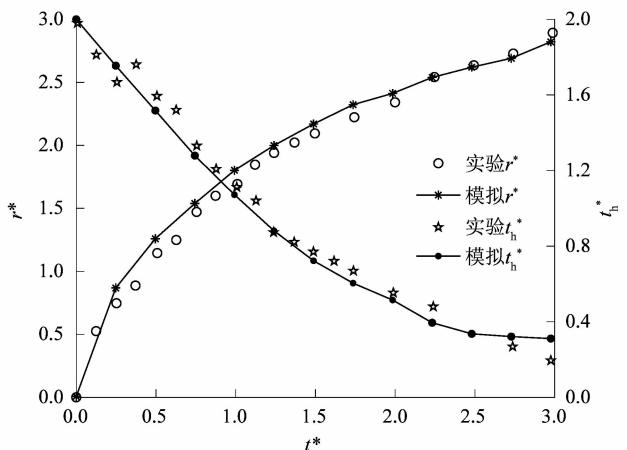


图 2  $r^*$  和  $t_h^*$  随  $t^*$  的变化

Figure 2 Change of  $r^*$  and  $t_h^*$  with  $t^*$

为验证多孔介质宏观概化模型的准确性, CHANDRA 将模拟仿真实验与 Chandra 的实验结果<sup>[15]2385</sup>进行了对比。其中, 正庚烷液滴的密度  $\rho = 667.5 \text{ kg/m}^3$ , 动力黏度  $\mu = 4.05 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 初始半径  $r_0 = 0.75 \text{ mm}$ , 初始速度  $V_0 = 0.93 \text{ m/s}$ , 初始温度  $T_{d0} = 295.15 \text{ K}$ ; 陶瓷的孔隙度  $\Phi = 0.25$ , 平均颗粒直径  $d_p = 7.5 \mu\text{m}$ ; 气液表面张力  $\sigma = 0.0201 \text{ N/m}$ , 接触角  $\theta = 45^\circ$ , 大气压强  $p_a = 0.101 \text{ MPa}$ , 环境温度  $T_a = 295.15 \text{ K}$ 。

图 2 中: 无量纲湿润半径  $r^* = r/r_0$ ; 无量纲液面高度  $t_h^* = t_h/r_0$ , 无量纲时间  $t^* = tV_0/r_0$ 。从模拟结果中我们可以发现, 液滴的  $r^*$ ,  $t_h^*$  随  $t^*$  的变化趋势与实验结果吻合良好。

## 2.2 网格独立性研究

在进行流体仿真模拟实验时, 常用库朗数 *Courant* 来衡量时间步长  $\Delta t$  与网格尺寸  $\Delta x$  的关系:

$$\text{Courant} = V\Delta t/\Delta x. \quad (11)$$

较小的 *Courant* 能够增加计算收敛的稳定性, 从而保证了求解的精度; 较大的 *Courant* 能够加快计算收敛的速度, 从而降低计算的成本。在保证计算求解的精度的基础上, 考虑问题的复杂程度与计算成本, 在满足  $0.05 < \text{Courant} < 0.20$  的条件下进行网格独立性研究。

选取正庚烷液滴撞击陶瓷实验<sup>[15]2385</sup>中湿润半径  $r$  在  $t = 2.4 \text{ ms}$  时的结果, 对不同网格精度下的模拟结果进行误差分析, 结果如图 4 所示。

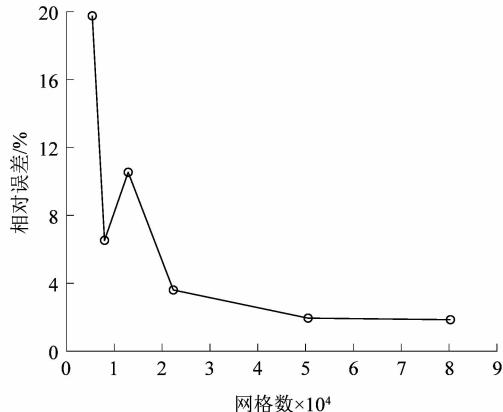


图 4 网格独立性

Figure 4 Independence of grid

从模拟结果中可以发现, 随着网格数量的增加, 液滴湿润半径  $r$  的相对误差不断减小并趋于稳定, 在保证精度的基础上为了节约计算成本, 最终确定网格数为 50 000。

## 3 参数分析

在模拟液滴撞击热多孔介质的实验中, 所选用的材料为水、空气和多孔铝板, 它们的物性参数如表 1 所示。

表 1 常温下水、空气和多孔铝板的物性参数

Table 1 Physical parameters of water, air and porous aluminum plate at room temperature

材料 名称	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比热容 $c_p/(J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热导率 $k/(W \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	动力黏度 $\mu/(\text{mPa} \cdot \text{s})$
水	998.200	4 182.00	0.600 0	1.003 0
空气	1.225	1 006.43	0.024 2	0.017 9
多孔铝板	2 719.000	871.00	202.400 0	

此外,  $T_{d0} = 293.15 \text{ K}$ ,  $T_a = 293.15 \text{ K}$ , 表面张力  $\sigma = 0.0728 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 45^\circ$ ,  $\Phi = 0.4$ ,  $d_p = 100 \mu\text{m}$ ,  $T_p = 323.15 \text{ K}$ , 多孔材料表面粗糙度  $R_a = 10 \mu\text{m}$ 。

### 3.1 表面温度的影响

笔者通过改变恒温多孔材料的表面温度  $T_p$ , 来观察液滴铺展与渗透的变化趋势, 模拟结果如图 5 所示。

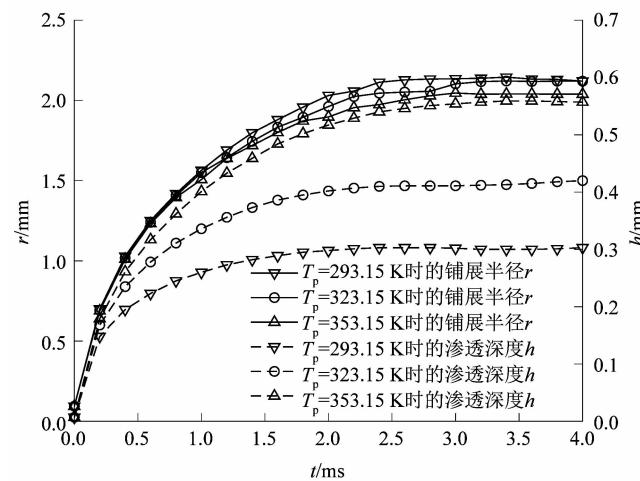


图 5 不同  $T_p$  下  $r$  和  $h$  随  $t$  的变化规律

Figure 5 Change rule of  $r$  and  $h$  with  $t$  for different  $T_p$

从图 5 中可以发现, 随着多孔材料表面温度  $T_p$  的升高, 液滴的渗透深度  $h$  增加, 而铺展半径  $r$  减小。在

对流传热的过程中,流体温度与壁面温度相差越大,则换热量越大。因此, $T_p$  越大,液滴在对流换热的过程中吸热升温也越高。由于液滴的动力黏度  $\mu$  会随着温度的升高而减小,与此同时,液滴流动时所受到的黏性剪切力和渗透时所受到的黏性阻力也将减小。液滴的铺展与渗透之间是相互竞争的,当多孔材料对液滴的阻力较小时,液滴撞击后所能达到的渗透深度  $h$  就越大,而铺展半径  $r$  则会相对减小。

### 3.2 孔隙度的影响

孔隙度  $\Phi$  表示多孔材料内部流体所占据的体积与整个多孔材料占据的总体积之比。笔者通过改变恒温多孔材料的  $\Phi$ ,来观察对液滴铺展与渗透的影响,结果如图 6~7 所示。

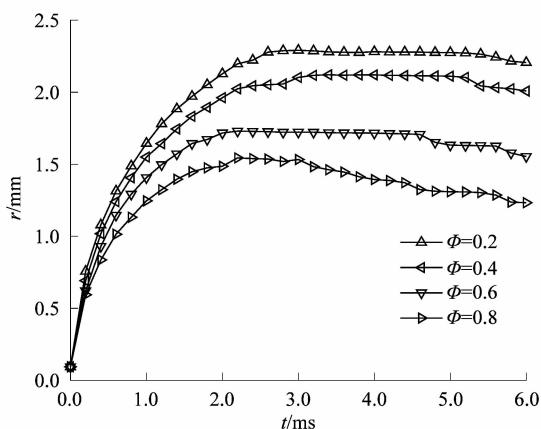


图 6 不同  $\Phi$  下  $r$  随  $t$  的变化

Figure 6 Change of  $r$  with  $t$  for different  $\Phi$

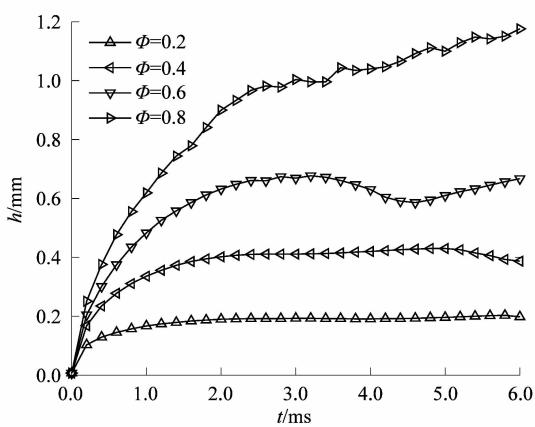


图 7 不同  $\Phi$  下  $h$  随  $t$  的变化

Figure 7 Change of  $h$  with  $t$  for different  $\Phi$

从图 6 和图 7 中可以发现,随着孔隙度  $\Phi$  的增加,液滴的铺展半径  $r$  逐渐减小,液滴的渗透深度  $h$  则不断增加。根据式(7)和(8)可知,当  $\Phi$  增加时,多孔材料的渗透率  $K$  不断减大,而惯性因子  $C$  不断减小;再由式(5)可以发现,随着  $K$  的增加,液滴渗透流动时所受到的阻力将不断减小。因此,多孔材料的孔隙率  $\Phi$  越大,其渗透率  $K$  也会增大,液滴的渗透深度  $h$  则越深。由于液滴铺展与渗透之间的竞争关系,液滴的铺展半径  $r$  随着渗透深度  $h$  的增加而减小。

### 3.3 平均颗粒直径的影响

生活中常见的多孔材料是由若干大小不同的颗粒物聚合形成,而颗粒物的大小疏密则影响着多孔材料的渗透吸收性能。笔者通过改变恒温多孔材料的平均颗粒直径  $d_p$  来观察其对液滴撞击后铺展与渗透行为的影响,结果如图 8 所示。

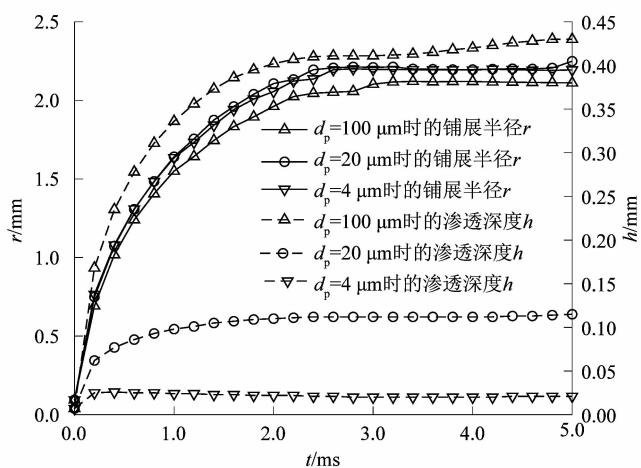


图 8 不同  $d_p$  下  $r$  和  $h$  随  $t$  的变化

Figure 8 Change of  $r$  and  $h$  with  $t$  for different  $d_p$

从图 8 中可以发现,随着  $d_p$  的增加,液滴的渗透深度  $h$  不断增大,而铺展半径  $r$  不断减小。由式(7)和(8)中可知,当  $d_p$  减小时,多孔材料的渗透率  $K$  迅速减小,惯性因子  $C$  则不断增大。根据式(5)可知,渗透率  $K$  减小,流体渗透进入多孔材料内部所受到的阻力将不断增大。因此,多孔材料的  $d_p$  越小,液滴的渗透深度  $h$  越小,而铺展半径  $r$  则越大。

### 3.4 接触角的影响

接触角  $\theta$  可以用来衡量液体在固体表面的铺展润湿能力,根据杨氏方程:

$$\sigma_{sg} - \sigma_{sl} = \sigma_{gl} \cos \theta \quad (12)$$

式中: $\sigma_{sg}$ ,  $\sigma_{sl}$  和  $\sigma_{gl}$  分别为气-固、液-固和气-液表面张力。

当  $\theta > 90^\circ$  时, 固体表面表现为疏水状态。本研究通过改变接触角  $\theta$  的大小, 来观察液滴在恒温多孔材料表面的铺展与渗透变化规律, 结果如图 9 和图 10 所示。

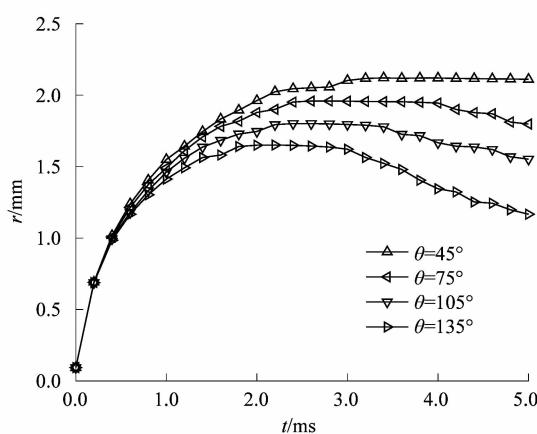


图 9 不同  $\theta$  下  $r$  随  $t$  的变化

Figure 9 Change of  $r$  with  $t$  for different  $\theta$

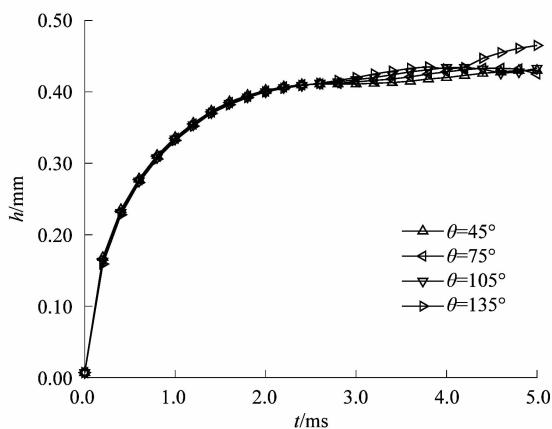


图 10 不同  $\theta$  下  $h$  随  $t$  的变化

Figure 10 Change of  $h$  with  $t$  for different  $\theta$

从图 9 和图 10 可知, 接触角  $\theta$  越大, 液滴的铺展半径  $r$  越小, 而渗透深度  $h$  则越深。随着  $\theta$  的增大, 液滴在多孔材料表面湿润性能变差, 达到最大铺展半径所用的时间也越短。在表面张力的作用下, 液滴回缩后在撞击中心处聚集, 底部液滴所受到的压差力也不断增加, 促使渗透深度  $h$  进一步增大。液滴变形时储

藏的表面能随着收缩又转变为液滴的动能, 而随着  $\theta$  的增大, 液滴的动能也越大。当  $\theta = 135^\circ$  时, 液滴收缩后有了回弹的趋势。

#### 4 结论

笔者基于液滴润滑理论和多孔介质渗流理论, 借助计算流体力学软件 FLUENT 对液滴撞击恒温多孔介质变形的过程进行了数值模拟研究, 其主要结论如下:

- 1) 恒温多孔材料的表面温度  $T_p$  越高, 液滴撞击时吸热升温越快, 多孔材料对液滴的阻力也就越小; 因此,  $T_p$  越大, 液滴的渗透深度  $h$  越大, 而铺展半径  $r$  越小。
- 2) 恒温多孔材料的孔隙率  $\Phi$  越大, 其渗透率  $K$  也越大, 液滴所能达到的渗透深度  $h$  增加, 而铺展半径  $r$  则会随着  $h$  的增加而减小。
- 3) 恒温多孔材料的平均颗粒直径  $d_p$  越小, 其渗透率  $K$  也越小, 渗透性能越差; 因此,  $d_p$  越小, 液滴的铺展半径  $r$  越大, 渗透深度  $h$  越小。
- 4) 随着接触角  $\theta$  的增加, 液滴在恒温多孔材料表面的湿润性能变差, 铺展半径  $r$  不断减小, 而渗透深度  $h$  则会相对增加。

#### 参考文献:

- [1] 梅国晖, 孟红记, 武荣阳, 等. 高温表面喷雾冷却传热系数的理论分析 [J]. 冶金能源, 2004, 23(6): 18–22.
- [2] 周振君, 丁湘, 郭瑞松, 等. 陶瓷喷墨打印成型技术进展 [J]. 硅酸盐通报, 2000(6): 37–41.
- [3] MOREIRA A L N, MOITA A S, PANAO M R. Advances and challenges in explaining fuel spray impingement: how much of single droplet impact research is useful? [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36(5): 554–580.
- [4] FU F D, LI P C, WANG K Y, et al. Numerical simulation of sessile droplet spreading and penetration on porous substrates [J]. Langmuir, 2019, 35(8): 2917–2924.
- [5] 李培超, 孔祥言, 卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型 [J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2003(4): 419–426.
- [6] SHEN W J, LI X Z, MA T R, et al. High-pressure methane adsorption behavior on deep shales: experiments and modeling [J]. Physics of Fluids, 2021, 33(6): 063103.
- [7] VAN GAALEN R T, DIDDENS C, SIREGAR D P, et al. Absorption of surfactant-laden droplets into porous media: a numerical study [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 597: 149–159.
- [8] LI W B, LU J C, TRYGGVASON G, et al. Numerical study of droplet motion on discontinuous wetting gradient surface with rough strip [J].

- Physics of Fluids, 2021, 33:012111.
- [9] YUAN Z C, MATSUMOTO M, KUROSE R. Numerical study of droplet impingement on surfaces with hierarchical structures [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2022, 147:103908.
- [10] REIS N C, Jr, GRIFFITHS R F, SANTOS J M. Parametric study of liquid droplets impinging on porous surfaces [J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32(3):341–361.
- [11] 张新铭, 凌娅, 王济平, 等. 基于 Ergun 方程的石墨泡沫内流动阻力研究[J]. 炭素技术, 2011, 30(5):17–20.
- [12] LI P C, ZHONG J L, WANG K Y, et al. Analysis of thermally developing forced convection heat transfer in a porous medium under local thermal non-equilibrium condition: a circular tube with asymmetric entrance temperature [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer Part C, 2018, 127:880–889.
- [13] HSU C T, CHENG P. Thermal dispersion in a porous medium [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1990, 33(8):1587–1597.
- [14] ERGUN S. Fluid flow through packed columns [J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2):89–94.
- [15] CHANDRA S, AVEDISIAN C T. Observations of droplet impingement on a ceramic porous surface [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, 35(10):2377–2388.

=====

### (上接第 53 页)

- [6] 杜红春, 张祺. 钛合金切削加工参数优化数学模型及工艺参数分析研究[J]. 机电工程, 2020, 37(11):1280–1287.
- [7] 汪豪杰, 杨芳, 郭志猛, 等. 3D 打印钛及钛合金的发展现状及挑战[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(2):709–716.
- [8] ZHONG C L, LIU J N, ZHAO T, et al. Laser metal deposition of Ti6Al4V: a brief review [J]. Applied Sciences, 2020, 10(3):764.
- [9] 任朝晖, 刘振, 张小双, 等. 超声微锻造辅助激光熔丝增材制造数

值模拟研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(11):1590–1594.

- [10] 果春焕, 严家印, 王泽昌, 等. 金属激光熔丝增材制造工艺的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(16):5–10.
- [11] 张欣雨, 毛小南, 王可, 等. 典型  $\alpha + \beta$  钛合金组织对静态和动态性能的影响 [J]. 材料导报, 2021, 35(1):1162–1167.
- [12] 汪汀. 船用钛及钛合金的焊接问题及对策 [J]. 舰船科学技术, 2011, 33(6):113–116.

=====

### (上接第 58 页)

- [3] 张文欣, 周晓红, 陈宏举. 海底管道砂沉积模拟研究 [J]. 石油化工高等学校学报, 2016, 29(1):86–92.
- [4] NTOW O T, YUNUS I A. Eulerian-eulerian simulation of particle-liquid slurry flow in horizontal pipe [J]. Journal of Petroleum Engineering, 2016, 2016:1–10.
- [5] 徐鹏飞, 程晨, 程红霞, 等. 海底水力输矿管固液两相流的数值模拟 [J]. 船舶工程, 2020, 42(11):137–141.
- [6] 马光飞, 季健康, 丁鹏, 等. 不同颗粒属性下旋流阀固液两相管道流动特性 [J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(12):1245–1250.
- [7] 孙贤, 刘德俊, 王文武, 等. 弯管体系内浆液流动分析 [J]. 化学工程, 2019, 47(6):58–63.
- [8] 曹斌, 邹燚, 夏建新. 不同粒度颗粒在非恒定管流中跟随性试验 [J]. 水科学进展, 2017, 28(3):356–363.
- [9] 寇子超. 长距离浆体管道输送中的沿程阻力研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016:61.
- [10] 吴优, 秦德庆, 夏建新. 浆体长距离管道输送全过程压力变化分析 [J]. 矿冶工程, 2016, 36(1):15–19.

[11] 牛骏, 石在虹, 柯文奇. 煤层气井筒煤粉运移规律研究 [J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2020, 35(3):385–390.

- [12] 张好林, 李根生, 黄中伟, 等. 水平井冲砂洗井流体流速研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(12):177–181.
- [13] 袁显宝, 刘超, 谭伟, 等. 临界  $\text{CO}_2$  传输中水合物对弯管冲蚀规律分析 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18):7519–7525.
- [14] 谢重, 齐欢, 杨杰. 液动压悬浮抛光固液两相流 CFD 数值模拟及 PIV 验证 [J]. 机电工程, 2020, 37(4):389–393.
- [15] 李安, 曹书荣, 刘宏波, 等. 浆体管道输送临界流速的研究 [J]. 矿冶工程, 2016, 36(1):26–29.
- [16] 张自超, 王福军, 陈鑫, 等. 低浓度固液两相流相间阻力修正模型研究 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(12):92–98.
- [17] SINGH J P, KUMAR S, MOHAPATRA S K. Modelling of two phase solid-liquid flow in horizontal pipe using computational fluid dynamics technique [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(31):20133–20137.
- [18] 黄思杰, 邵春雷. 熔盐泵内颗粒属性对固液两相流动的影响 [J]. 轻工机械, 2016, 34(5):1–6.