

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.02.003

液滴撞击热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:为了探究液滴撞击热多孔介质表面的热流耦合问题,笔者建立了三角锯齿模型来表征多孔材料的表面粗糙度,运用二维轴对称模型来简化三维问题的计算。运用流体体积法(volume of fluid, VOF)来追踪液滴变形过程中两相界面的变化,运用 RNG k-epsilon 模型来计算湍流的影响。研究表明:液滴的 We 数越大,润湿能力越强,多孔材料的降温效果也越好;多孔材料表面温度 T_p 越高,液滴的渗透能力越强,多孔材料的降温效果也越好;液滴比热容 c_p 越小,液滴的渗透能力越强,但对多孔材料的降温效果越差;多孔材料表面粗糙度 R_a 越大,液滴润湿能力越差,但对多孔材料的降温效果增加。该研究成果对多孔介质表面湿润、渗流及传热有一定的参考意义。

关键词:液滴;多孔介质;热流耦合;流体体积法;RNG k-epsilon 模型;渗透

中图分类号:TK124;O35 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)02-0013-08

Numerical Simulation of Droplet Impacting on Hot 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 study the fluid-thermal coupling problem of droplet impacting on hot porous media surface, a triangular sawtooth model was established to characterize the surface roughness of porous materials. A two-dimensional axisymmetric model was used to simplify the calculation of three-dimensional problems. Volume of fluid (VOF) method was used to track the change of two-phase interface during the droplet deformation, and RNG k-epsilon model was used to calculate the effect of turbulence. The results show that the larger We number of droplet, the stronger the wetting ability and the better the cooling effect of porous materials; the higher the surface temperature of porous material T_p is, the more permeable the droplet is and the better the cooling effect of porous material is. The smaller the specific heat capacity c_p of droplet is, the more permeable the droplet is, but the worse the cooling effect on porous material is. The larger the surface roughness R_a of porous materials is, the worse the wetting ability of droplets is, but the cooling effect of porous materials is increased. The research results have some reference significance for the surface wetting, permeation and heat transfer of porous media.

Keywords: droplet; porous media; fluid-thermal coupling; VOF (Volume of Fluid); RNG k-epsilon model; permeation

液滴在生产生活中应用广泛:农作物灌溉^[1]、农业喷洒^[2]、喷墨打印^[3]和内燃机燃烧^[4],单液滴的微观分子动力学^[5]以及明渠河道的宏观流动^[6]。人们

对液滴运动和动力学问题进行了研究。研究早期, Worthington^[7]实验观察并手绘记录了水银和牛奶等液滴垂直撞击平板变形的过程。Chandra 等^[8]实验研究

收稿日期:2021-12-17;修回日期:2022-02-21

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

了正庚烷液滴撞击热不锈钢和陶瓷表面的变形和铺展情况,分析了不同壁面温度对铺展因子的影响。

随着有限元软件的发展,数值模拟的方法也为液滴的研究带来了巨大的便利。李燕^[9]结合实验和数值模拟研究了液滴撞击热固体平面的变形过程,分析了壁面温度、液滴大小和撞击速度对换热和蒸发过程的影响。付放达等^[10]和邓辉良等^[11]分别从液滴湿润性和多孔介质表面粗糙度2个因素对液滴撞击动力学问题进行了研究,引用了动态接触角模型来提高对自由界面的追踪精度,提出了锯齿状凹凸槽模型来模拟表面粗糙度对液滴铺展和渗吸^[12]行为的影响。Teodori等^[13]在实验和数值模拟液滴冷却过程中,发现了表面非均匀冷却的现象。

液滴撞击热多孔介质是一个多物理场耦合^[14]的问题,上述实验和数值模拟研究多关注流场本身的变化和温度场对流场的影响,对传热流动耦合机理研究相对较少。笔者在前人研究的基础上,结合流体力学和传热学相关的知识,用数值模拟的方法来对液滴撞击热多孔介质变形和传热问题进行研究,旨在更好地认识液滴多孔介质热流耦合机理。

1 数学模型

1.1 问题描述

液滴撞击热多孔介质的变形问题是液滴多孔介质热流耦合问题。液滴的温度 T_d 与环境温度 T_a 相同,多孔介质表面温度 T_p 高于液滴温度。液滴撞击变形后,底部液滴会渗透浸入多孔材料内部,表层液滴则会在多孔材料表面进行铺展润湿。在铺展和渗透的过程中液滴会吸收多孔材料大量的热量,这会使液滴的热物理性质发生变化,进而影响液滴撞击后动力学行为,而液滴和多孔介质物性参数的变化都会对变形传热结果造成影响。

为了更好地研究液滴撞击变形机理,笔者选用了二维轴对称模型来模拟三维液滴的变形过程。图1为液滴撞击热多孔介质的物理模型,记 x 轴竖直朝上为轴向坐标轴,记 y 轴水平朝右为径向坐标轴。笔者主要研究液滴撞击后的动力学行为,忽略了液滴在下落过程中的形态变化。假定液滴撞击变形前始终保持为

圆球形,初始半径为 r_0 ,初始速度为 V_0 ,在重力的作用下垂直撞击多孔介质平板。

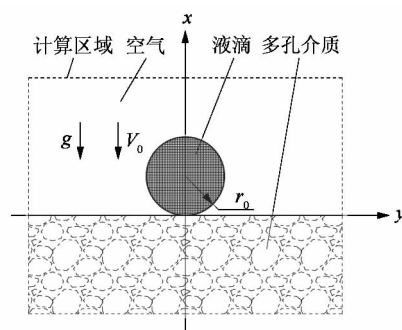


图1 物理模型

Figure 1 Physical model

1.2 模型建立

液滴撞击多孔介质平板后会对其表面进行铺展润湿,与此同时,液滴也会浸入到多孔介质内部进行渗透流动。图2为液滴变形示意图,把气液固三相接触线的最前端距 x 轴的水平距离记为液滴的湿润半径 r ,即铺展半径;把液滴在多孔介质内渗透的最深处距 y 轴的竖直距离记为液滴的渗透深度 h ;把未浸入多孔介质的液面最高处距 y 轴的竖直距离记为液滴的液面高度 h_1 。

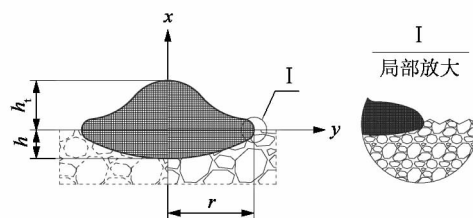


图2 液滴变形

Figure 2 Droplet deformation

多孔材料内部孔隙的分布是不规则的,其表面同样也是凹凸不平的。笔者提出了一种三角锯齿模型来表征多孔材料的表面粗糙度,如图3所示, a 为间距特征参数,表示轮廓峰和相邻的轮廓谷之间的水平距离; b 为高度特征参数,表示轮廓峰顶线和谷底线之间的竖直距离。而粗糙度 R_a ^[15]表示在一定长度 l 上,轮廓偏离中心线绝对值的算术平均,即为:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |x| dy. \quad (1)$$

在三角锯齿模型中 $R_a = \frac{b}{2}$ 。为了保证计算网格的质量,三角锯齿的顶角不小于 90° ,即 $b \leq a$ 。

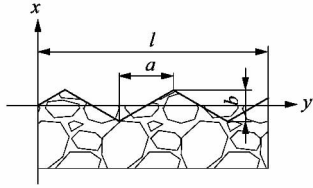


图3 三角锯齿模型

Figure 3 Triangular sawtooth model

1.3 控制方程

液滴在多孔材料表面和内部流动有着不同的控制方程。浸入到多孔材料内部的液滴除了受到压差力、重力和黏性剪切力的作用,还会受到多孔材料对其施加的惯性阻力和黏性阻力的作用。其中,多孔材料表面流体区域和内部多孔区域的控制方程分别如下:

1) 流体区域

$$\nabla \cdot V = 0; \quad (2)$$

$$\rho_f (V \cdot \nabla) V = -\nabla p I + \rho_f g + \mu \nabla^2 V; \quad (3)$$

$$\rho_f c_{p,f} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} (V \cdot \nabla T) = k_f \nabla^2 T. \quad (4)$$

2) 多孔区域

$$\bar{\nabla} \cdot V = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\rho_f}{\Phi^2} (V_D \cdot \bar{\nabla}) V_D = -\bar{\nabla} p_D I + \rho_f g - \left[\frac{\mu}{K} + \frac{C}{2} \rho_f |V_D| \right] \cdot V_D + \mu_r \bar{\nabla}^2 V_D; \quad (6)$$

$$(\Phi \rho_f c_{p,f} + (1 - \Phi) \rho_s c_{p,s}) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} (V_D \cdot \bar{\nabla} T) = (\Phi k_f + (1 - \Phi) k_s) \bar{\nabla}^2 T. \quad (7)$$

式中: V 为流体速度, ρ_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, μ 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^[16], V_D 为达西速度, Φ 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, μ_r 为相对黏度, ρ_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。

在液滴撞击热多孔材料的问题中,流场与温度场之间是相互耦合的。冷液滴流过热多孔介质时会带走

一部分的热量,液滴受热后又会改变自身的热物理性能,从而影响到自身的运动性能。笔者运用的多孔介质模型是一种宏观概化模型,整体去描述多孔材料对运动流体的一种压降作用。其中,达西速度 V_D 是一种宏观概化速度,是多孔区域内部微观流速的总平均。多孔介质模型是建立在局部热平衡的假设上进行的,基于能量守恒以及应用混合原则,用一个方程来表示整个多孔介质的平均温度。

1.4 两相流界面追踪法

在研究液滴撞击多孔壁面问题时,需要通过相界面追踪法来确定液滴变形过程中气液两相界面的运动变化。流体体积法是一种常用的相界面追踪方法,其所用的 VOF 模型是基于欧拉法来处理多相流问题,通过各相流体的体积分数加权计算出控制体的动量,并在相界面连续且光滑的假设上进行几何重构,最终完成界面追踪。

在液滴撞击多孔介质的问题中,把液滴看作需要被追踪的区域,定义控制体单元内液体的体积分数为 α ,满足:

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \text{气相;} \\ 0 \sim 1, & \text{相界面所处位置;} \\ 1, & \text{液相。} \end{cases} \quad (8)$$

体积分数 α 的连续性方程为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + (V \cdot \nabla) \alpha = 0. \quad (9)$$

在求解 VOF 方程的过程中,为了保持相界面的锐利,需要用到分段线性界面重构法 (piecewise linear interface construction, PLIC)。PLIC 法通过求解体积分数 α 的梯度来确定相界面的法向量,再用直线来近似替代相界面完成重构。

2 模型验证

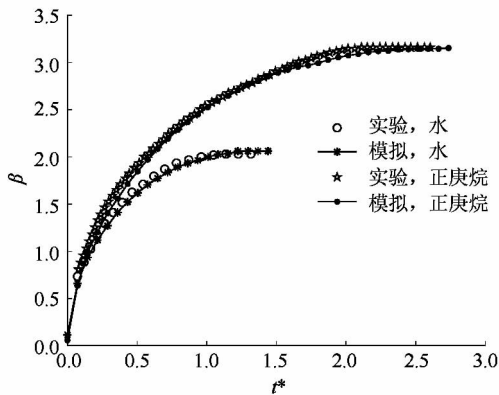
该模型考虑流场与温度场之间的相互影响,通过与 Lipson 的实验^[17]进行对比。实验中选用的材料是水和正庚烷 2 种液滴撞击多孔不锈钢板,他们的物性参数如表 1 所示。

此外,液滴 $r_0 = 1.25 \text{ mm}$, $V_0 = 0.9 \text{ m/s}$; 多孔不锈钢板 $R_a = 4.7 \text{ } \mu\text{m}$, $\Phi = 0.306$, 平均颗粒直径 $d_p = 5 \text{ } \mu\text{m}$, $T_p = 296.15 \text{ K}$; $T_a = 296.15 \text{ K}$ 。模拟结果如图 4 所示。

表1 常温下3种物质的物性参数

Table 1 Physical parameters of three materials

名称	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容 $c_p/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	热导率 $k/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	动力黏度 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	表面张力 $\sigma/$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	平衡接触角 $\theta_{\text{SCA}}/(^{\circ})$
正庚烷	667.5	2 233.00	0.122 25	0.000 41	0.020 1	5
水	998.2	4 182.00	0.600 00	0.001 00	0.072 8	75
不锈钢	5 572.8	502.48	2.700 00			

图4 铺展因子 β 随无量纲时间 t^* 的变化Figure 4 Variation of spread factor β varies with dimensionless time t^*

其中, $\beta = r/r_0$, $t^* = \frac{tV_0}{2r_0}$ 。从模拟结果中我们可以

发现,正庚烷和水液滴的 β 随 t^* 的变化趋势与实验结果相比吻合良好。此外,在模拟水撞击热多孔不锈钢板的降温实验^{[17]9}中,选取了壁面温度 T_p 为 333.15 K 和 393.15 K 的 2 组实验进行模拟对比验证。通过模拟液滴撞击后 $t = 4 \text{ ms}$ 时,撞击中心处温度的变化与实验结果进行对比,模拟结果如表 2 所示。

表2 水撞击热多孔不锈钢板降温实验中
模拟和实验数据对比

Table 2 Comparison of simulation and experimental data in cooling experiment of water impingement on hot porous stainless steel plate

名称	温度 $T_p/^\circ\text{K}$		温差 $\Delta T_p/^\circ\text{K}$	相对误差/%
	$t = 0 \text{ ms}$	$t = 4 \text{ ms}$		
I 组实验值	333.27	325.05	8.220 3	
I 组模拟值	333.15	325.06	8.090 0	1.585
II 组实验值	393.26	371.79	21.470 0	
II 组模拟值	393.15	371.94	21.209 0	1.217

从 2 次模拟对比结果中可以发现,多孔不锈钢表面温差 ΔT_p 误差较小,降温模拟结果良好,这说明该模型可以用来研究液滴撞击热多孔介质的热流耦合问题。

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,他们的物性参数如表 3 所示。

表3 常温下水、空气和多孔铝板的物性参数

Table 3 Physical parameters of water, air and porous aluminum plate at room temperature

名称	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容 $c_p/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	热导率 $k/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	动力黏度 $\mu/$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
空气	1.225	1 006.43	0.024 20	0.000 02
水	998.200	4 182.00	0.600 00	0.001 00
多孔铝板	2 719.000	871.00	202.400 00	

此外 $\Phi = 0.4$, $d_p = 100 \text{ } \mu\text{m}$, $a = 40 \text{ } \mu\text{m}$, $R_a = 10 \text{ } \mu\text{m}$, $T_p = 333.15 \text{ K}$; $r_0 = 1 \text{ mm}$, $V_0 = 1 \text{ m/s}$, $T_d = 293.15 \text{ K}$; $T_a = 293.15 \text{ K}$, $\sigma = 0.072 8 \text{ N/m}$, $\theta_{\text{SCA}} = 45^\circ$ 。

3.1 液滴 We 数的影响

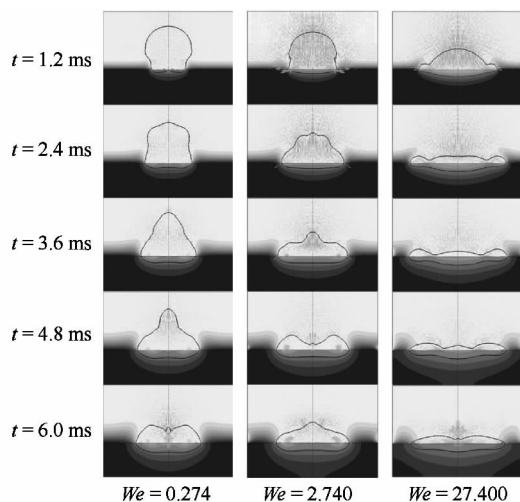
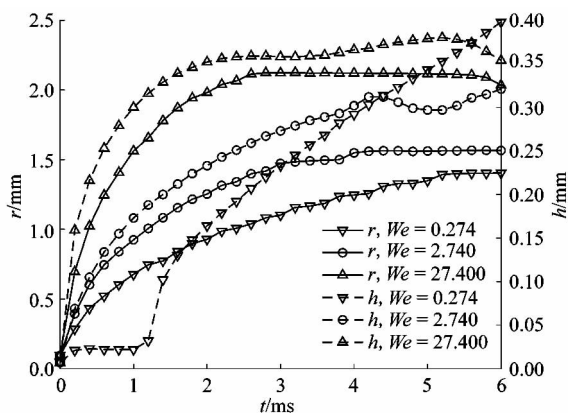
液滴的 We 数描述了惯性力与表面张力之间的关系公式为

$$We = \frac{2\rho V^2 r_0}{\sigma} \quad (10)$$

液滴的 We 数越大,撞击后越容易发生变形;液滴的 We 数越小,越不能忽视表面张力对液滴变形的影响。此研究通过控制液滴的撞击速度 V_0 来改变液滴 We 数的大小。不同 We 数下液滴变形及温度分布如图 5 所示。

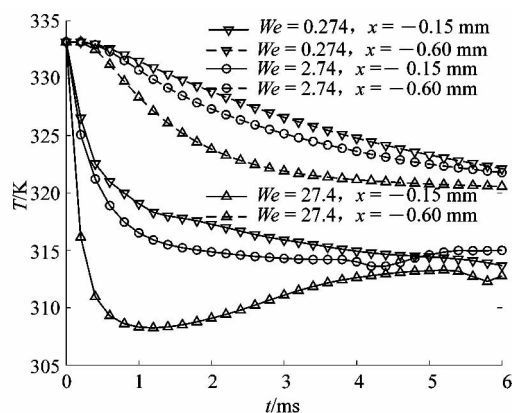
不同 We 数下 r 和 h 随 t 的变化曲线如图 6 所示。

不同 We 数下不同深度处 T 随 t 的变化曲线如图 7 所示。

图5 不同 We 数下液滴变形及温度分布Figure 5 Droplet deformation and temperature distribution at different We numbers图6 不同 We 数下 r 和 h 随 t 的变化Figure 6 Change of r and h with t at different We numbers

从图5中可以观察到,随着 We 数的增加,液滴的变形效果越明显。由于受到重力的影响,液滴在剪切变形的过程中重力势能不断转化为动能,动能一部分转化为液滴的表面能,而另一部分因黏性耗散而损失。由图6可知,随着 We 数的增加,三相接触线移动速度增快,达到最大湿润半径所需要的时间也越短。大 We 数伴随着较大的撞击速度,利于液滴快速浸入多孔材料,但较大的速度也会带来极大的惯性阻力,使液滴的动能大量损耗从而不利于后期的渗透。

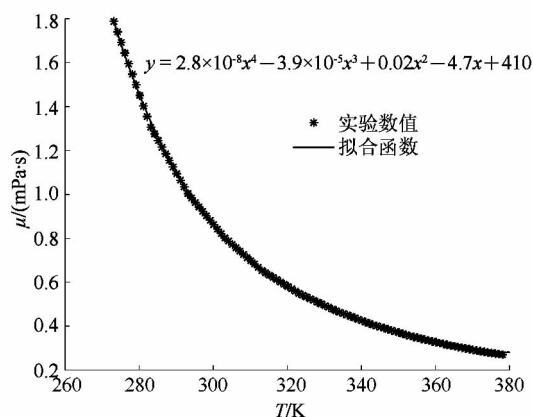
由图7可以发现,随着冷液滴不断浸入热多孔材料,表层材料最先受到对流传热的影响开始降温,随后

图7 不同 We 数下不同深度处 T 随 t 的变化Figure 7 Change of T with t at different depths under different We numbers

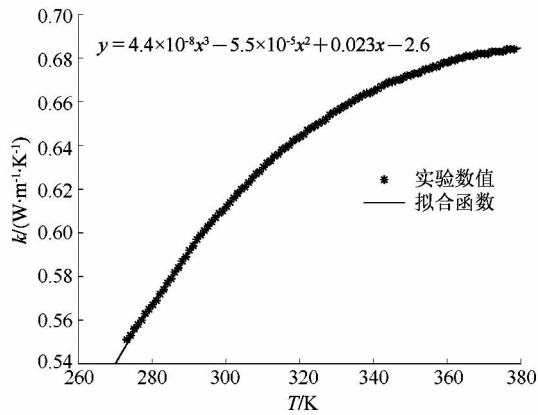
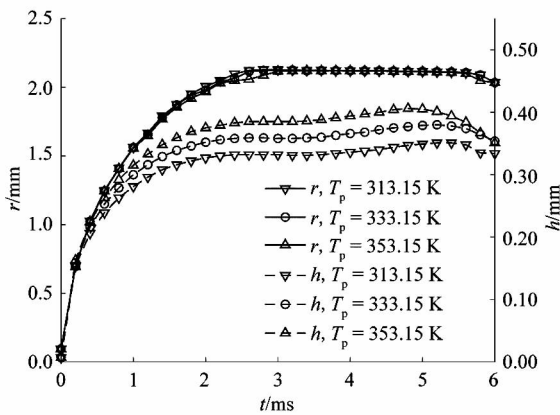
材料内部在热传导的作用下也逐渐开始降温。多孔材料表层降温效果明显大于内部,且随着 We 数的增加,对流传热效果更加显著。当 $t = 5$ ms 时, $We = 0.274$ 的液滴仍在进行对流换热降温,而 We 数较大的液滴已进入热传导散热阶段,湿区温度持续回升。

3.2 表面温度 T_p 的影响

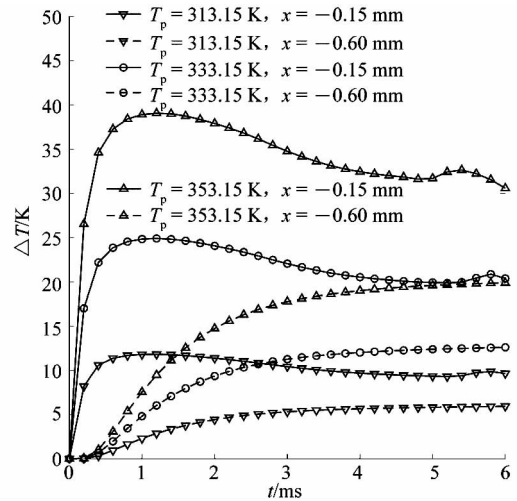
水的物性参数会随着温度的变化而发生改变,经查阅相关资料^[18-20]并运用函数拟合的方法列出了部分液态水的热物性参数如图8~9所示。

图8 μ 随 T 的变化Figure 8 Change of μ with T

由图8和图9中可以发现,随着温度的升高,水的热导率也逐渐增大,传热性得到改善;随着温度的升高,水的动力黏度不断减小,运动性能增强。此研究通过改变多孔材料表面温度 T_p 来观察液滴的变形行为和多孔材料的降温效果 ΔT ,模拟结果如图10~11所示。

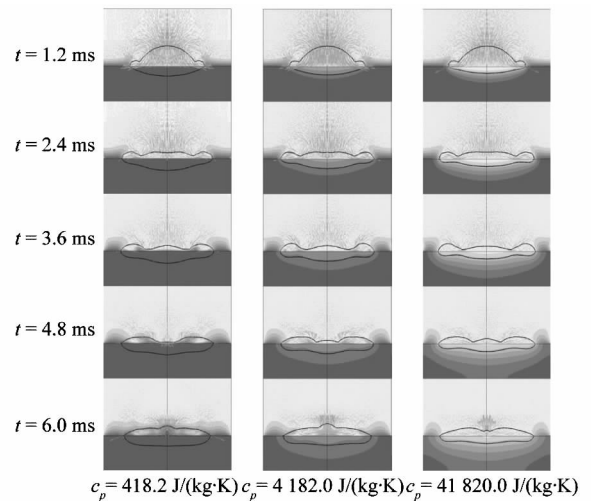
图9 k 随 T 的变化Figure 9 Change of k with T 图10 不同 T_p 下 r 和 h 随 t 的变化Figure 10 Change of r and h with t at different T_p

从图10中可以发现,随着多孔材料表面温度的升高,液滴的渗透效果有小幅度的增强。由于液滴的铺展与渗透之间是相互竞争的,因此,表面温度高的多孔材料湿润半径稍弱于低温多孔材料。由图11可知,不管位于多孔材料的表层或是内部,温度越高的多孔材料在冷液滴撞击后降温效果越强。在对流换热的过程中,冷液滴与热壁面温差越大,对流换热速率就越高,因此高温多孔表面的降温速率也就越快。与此同时,随着换热量的增加,液滴的温度不断升高,动力黏度不断减小,液滴的运动性能得到改善。从式(3)和(6)中可知,随着动力黏度的减小,液滴在流动中所受到的黏性剪切力将会减小,多孔材料对其的黏性阻力也会减小。因此,随着多孔材料温度的升高,液滴的渗透深度就会增大,而铺展半径则会相对减小。

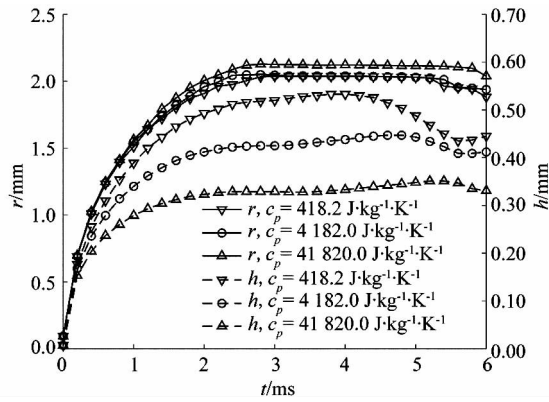
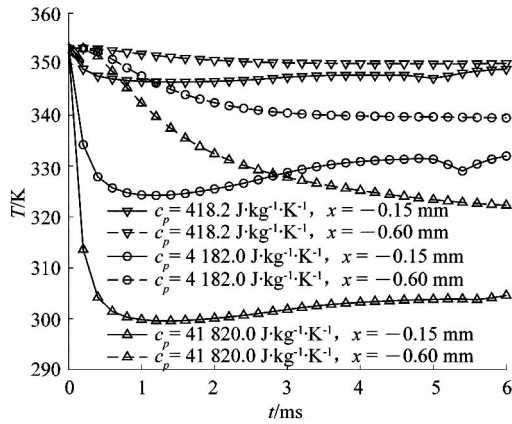
图11 不同 T_p 下不同深度处 ΔT 随 t 的变化Figure 11 Change of ΔT with t at different depths under different T_p

3.3 比热容 c_p 的影响

比热容是用来衡量物质吸热量与升温量之间关系的物理量,比热容越大,物质吸热升温就越难。通过给定不同数量级的 c_p ,观察液滴流动与传热之间的影响,模拟结果如图12~14所示。

图12 不同 c_p 下液滴变形及温度分布图Figure 12 Droplet deformation and temperature distribution at different c_p

从图12中可以发现, c_p 较小的液滴虽然更易浸入多孔材料内部,但对多孔材料的降温效果较差。当液滴达到最大湿润半径后,受表面张力的影响,液滴的铺展前沿开始产生涡流。由涡流引起的回流速度逐渐增

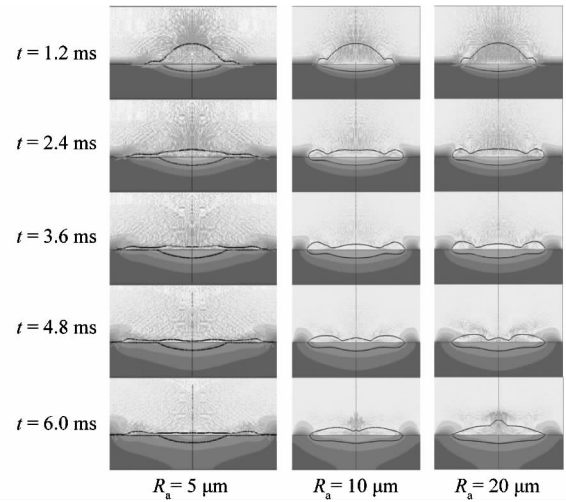
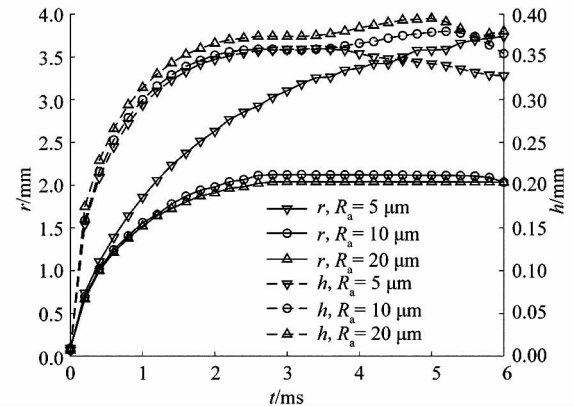
图 13 不同 c_p 下 r 和 h 随 t 的变化Figure 13 Change of r and h with t at different c_p 图 14 不同 c_p 下不同深度处 T 随 t 的变化Figure 14 Change of T with t at different depths at different c_p

加,并将底部吸热升温的流体带回液滴中心处,中心处流体受到四周回流的挤压形成朝上的升流。由图 13 可知,随着 c_p 的减小液滴的渗透深度逐渐增加,湿润半径则会减少。 c_p 较小的液滴吸热升温较快,热物性更易得到改善,液滴的运动性能增强从而更易浸入多孔材料内部。从图 14 可以发现, c_p 越大,液滴对多孔材料表层和内部的降温效果越好。从式(7)中可以得知,在局部热平衡的条件下,随着单位控制体内的加权热容的增加,控制体温度的变化率则会减小。因此, c_p 较大的液滴在浸润多孔材料时的吸热降温能力更强。

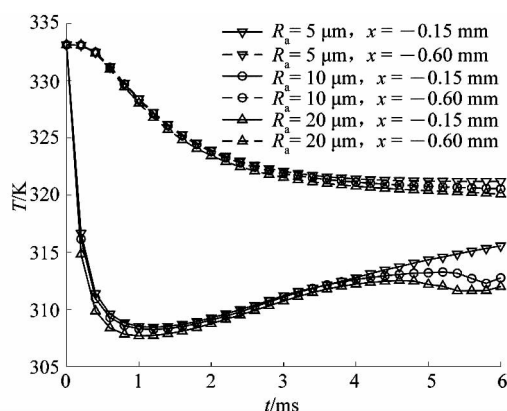
3.4 表面粗糙度 R_a 的影响

粗糙度 R_a 表征了多孔材料表面的平整度, R_a 越小多孔材料表面越平整。此研究通过控制高度特征参

数 b ,来改变粗糙度 R_a 的大小,模拟结果如图 15 ~ 17 所示。

图 15 不同 R_a 下液滴变形及温度分布Figure 15 Droplet deformation and temperature distribution at different R_a 图 16 不同 R_a 数下 r 和 h 随 t 的变化Figure 16 Change of r and h with t at different R_a

从图 15 可以发现, $R_a = 5 \mu\text{m}$ 的多孔表面近似于光滑壁面,对液滴的铺展阻碍能力较弱,液滴的湿润半径远大于 R_a 较大的多孔表面。 R_a 越大,液滴润湿多孔表面受到的阻力就越大,克服阻力所损耗的动能越多,铺展变形越难。由图 16 可知,随着 R_a 的增加,液滴的铺展能力极大的削弱,湿润半径也会减小。 R_a 对液滴的渗透作用影响较弱,由于液滴铺展与渗透之间的竞争关系,较小 R_a 的多孔表面液滴渗透深度也略小。从图 17 可以发现,随着 R_a 的增加,液滴在撞击中

图 17 不同 R_a 下不同深度处 T 随 t 的变化Figure 17 Change of T with t at different depths at different R_a

心处对多孔材料的降温效果略微增加。当 $t = 4.5$ ms 后,受回流带来的对流传热影响, R_a 较大的 2 组多孔表层发生了二次降温;而 $R_a = 5 \mu\text{m}$ 的多孔表面仍处于铺展润湿阶段,撞击中心处受内部热传导影响温度持续回升。

4 结论

课题组研究了液滴撞击热多孔介质表面的变形和传热规律,分析了液滴的 We 数、比热容 c_p 、多孔介质表面温度 T_p 和表面粗糙度 R_a 对液滴撞击变形和传热的影响。研究发现:

1) 随着液滴 We 数的增大,液滴的铺展能力越强,到达最大湿润半径所用的时间也越短。随着 We 数的增大,液滴撞击前期的渗透作用越强,由对流传热带来的降温效果也越明显,撞击中心处多孔材料表层降温大于内部。而较小 We 数的液滴运动性能差,变形和传热行为发生较为滞后。

2) 随着多孔材料表面温度 T_p 的增大,对流换热速率越高,多孔材料的降温效果也越明显。与此同时,液滴的动力黏度减小,流动所受到的黏性剪切力和多孔材料对其的黏性阻力也会减小,渗透深度增加。

3) 随着液滴比热容 c_p 的减小,吸热升温加快,热物理性能得到改善,运动性能增强。与此同时,液滴的渗透深度增加,但对多孔材料的降温效果较差,湿润半径减小。

4) 随着粗糙度 R_a 的增大,液滴在润湿多孔材料表面时受到的阻力增大,湿润半径减小,但对多孔材料

的降温效果增强。

参考文献:

- [1] 魏鹏. 番茄垄膜沟灌与膜下滴灌技术应用效果试验报告[J]. 农业科技与信息, 2021(16): 23-24.
- [2] 苏建民, 张泽鹏, 潘越, 等. 高压喷雾雾化特性实验研究[J]. 煤矿机械, 2021, 42(11): 48-50.
- [3] 何君勇, 李路海. 喷墨打印技术进展[J]. 中国印刷与包装研究, 2009, 1(6): 1-9.
- [4] 焦运景. 车用直喷式柴油机燃烧过程的多维数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2006: 1-66.
- [5] 王文辉. 液滴润湿微观过程的分子动力学模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018: 1-79.
- [6] 李然, 李洪, 李嘉, 等. 气液两相流理论在明渠水气界面计算中的应用[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2002(1): 77-83.
- [7] WORTHINGTON A M. On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1876, 25(1): 261-272.
- [8] 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.
- [9] 李燕. 液滴撞击加热固体平壁变形过程的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 1-71.
- [10] FU F D, LI P C, WANG K Y. Numerical Simulation of Sessile Droplet Spreading and Penetration on Porous Substrates[J]. Langmuir, 2019, 35(8): 2917-2924.
- [11] 邓辉良, 李培超. 附着滴在粗糙多孔介质表面铺展渗透的数值研究[J]. 轻工机械, 2021, 39(5): 53-57.
- [12] 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.
- [13] TEODORI E, PONTES P, MOITA A, et al. Sensible heat transfer during droplet cooling: experimental and numerical analysis[J]. Energies, 2017, 10(6): 790-817.
- [14] 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.
- [15] KUZMIN Y P. Determination of R_a (arithmetic mean profile deviation) using digital display counting device[J]. Measurement Techniques, 1974, 17(3): 470-471.
- [16] HSU C T, CHENG P. Thermal dispersion in a porous medium[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1990, 33(8): 1587-1597.
- [17] LIPSON N, CHANDRA S. Cooling of porous metal surfaces by droplet impact[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 152(C): 119494.
- [18] KESTIN J, SOKOLOV M, WAKEHAM W A. Viscosity of liquid water in the range -8°C to 150°C [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1978, 7(3): 941-948.
- [19] 王柳磊, 寇广孝. 两种导热油和水的黏度对比[J]. 广州化学, 2017, 42(2): 26-31.
- [20] 胡粉娥, 魏生贤, 时有明, 等. 水的表面张力系数与温度的关系的对比研究[J]. 曲靖师范学院学报, 2015, 34(3): 7-10.