

# 骨架中空对泡沫铜内融化过程的影响\*

杨浩 张销杰 黄荣宗†

(中南大学能源科学与工程学院, 长沙 410083)

(2023 年 2 月 6 日收到; 2023 年 4 月 28 日收到修改稿)

将多孔介质和相变材料复合是提高固液相变储能系统传热性能的有效措施. 本文通过微型计算机断层扫描 (micro computed tomography, Micro CT) 三维重构得到泡沫铜的数值结构, 采用格子 Boltzmann 方法对填充泡沫铜复合相变材料的方腔融化过程进行孔隙尺度模拟研究, 讨论不同 Rayleigh 数以及热导率下, 泡沫铜骨架中空对泡沫铜内融化过程的影响. 结果表明, 中空骨架泡沫铜相比实心骨架泡沫铜, 融化前期换热强度更低、相变材料的融化更慢、储能效率  $\eta$  更高. 与泡沫铜骨架相比, 通过骨架中空区进入方腔的热流量可以忽略不计; 随 Fourier 数的增大, 泡沫铜的传热增强效率  $\zeta$  会因为导热和自然对流的竞争而出现先上升后下降然后再上升的现象; 当 Rayleigh 数减小时, 储能效率  $\eta$  提高, 传热增强效率  $\zeta$  随 Fourier 数的变化趋于平缓, 中空骨架泡沫铜和实心骨架泡沫铜对应的传热增强效率  $\zeta$  的差距减小; 泡沫铜骨架和相变材料热导率之比越大, 融化结束时储能效率  $\eta$  越低, 中空骨架泡沫铜和实心骨架泡沫铜对应的传热增强效率  $\zeta$  的差距越小.

**关键词:** 中空骨架, 泡沫铜, 微型计算机断层扫描, 融化**PACS:** 44.30.+v, 64.70.D-**DOI:** 10.7498/aps.72.20230151

## 1 引言

随着电力市场向能源清洁低碳转型, 电力生产的热能来源将越来越多地依靠核能、地热能、太阳能、工业余热等, 太阳能和工业余热的间歇性极大地限制了其发电应用. 热能储存系统能够将热能大规模储存, 实现间歇性输入-连续输出的目的, 是太阳能和工业余热大规模高效利用的重要保障. 热能储存通常可分为显热储能和潜热储能, 潜热储能的能量密度至少比显热储能高 1 个数量级; 固液相变在相变过程中温度基本恒定、体积变化小和潜热大的优点, 使固液相变材料在潜热储能系统中得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>.

固液相变材料的储能密度较高, 但其热导率通常较低, 导致储能速率低下. 为了提高潜热储能系统的储能速率, 可在相变材料中填充高导热介质,

如肋片、纳米颗粒、热管、多孔介质等<sup>[4-10]</sup>; 由于多孔介质热导率高、孔隙率高、比表面积大的优异特性, 其在固液相变传热强化方面的应用得到了国内外学者的广泛关注. Li 等<sup>[11]</sup>通过还原组装和真空浸渍法制备了石墨烯气凝胶/正十八烷复合相变材料并对其热物性进行了研究. 测得石墨烯气凝胶质量分数为 13.99% 的复合材料, 其导热系数比纯正十八烷高 306.2%, 融化潜热和凝固潜热分别下降了 13.8% 和 10.8%. Xiao 等<sup>[12]</sup>采用真空浸渍法制备了石蜡/泡沫铜复合相变材料并研究了其热特性. 结果表明多孔金属泡沫的存在使得相变温度发生了轻微的偏移, 融化温度上升而凝固温度下降. Zhang 等<sup>[13]</sup>采用格子 Boltzmann (LB) 方法研究了填充多孔介质方腔内纳米流体的对流传热特性. 研究表明 Rayleigh 数、多孔介质孔隙率和纳米颗粒浓度在非均匀温度边界条件下并不像均匀温度边界条件下那样总是起到强化传热的作用. Huang

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 52006244) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: rongzong.huang@csu.edu.cn

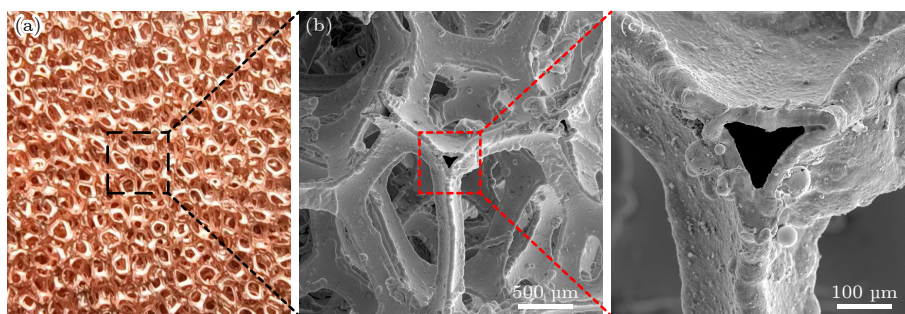


图 1 (a) 泡沫铜的实物图; (b) SEM 图; (c) 骨架中空区局部放大 SEM 图

Fig. 1. (a) Physical image of copper foam; (b) SEM image; (c) enlarged SEM image of the hollow skeleton.

等<sup>[14]</sup>采用四参数随机生长法生成多孔介质并研究了孔隙率对融化过程的影响. 结果表明多孔介质导热在热传递中占主导地位, 相变材料融化速率随孔隙率的降低而提高. Zhang 和 He<sup>[15]</sup>模拟研究了三维梯级泡沫铝的孔隙率梯度对方腔中相变材料融化的影响, 并采用十四面体结构近似表征实际泡沫铝. 结果表明梯级泡沫铝可通过增强方腔底部等效热导率来提高整体融化速率. Ghahremannezhad 等<sup>[16]</sup>研究了方腔储能系统中非均匀多孔介质的方向对相变材料融化的影响. 结果表明, 合理的梯度多孔结构能够使整个系统的融化曲线和传热分布更均匀, 并且在底面加热方式下的相变材料融化模式会出现明显改变. Li 等<sup>[17]</sup>通过三维重构实际泡沫金属建立了多孔介质模型来研究多孔介质复合相变材料的传热机制, 发现相较于三维模拟, 流体在二维模拟中被忽视的横向流动会导致流动传热模拟预测出现较大偏差.

多孔泡沫铜具有良好的力学性能、导热性、导电性等优点, 在冶金、化工、航天、能源等领域具有广泛应用前景. 泡沫铜目前主要制备方法有粉末烧结法、粉末加压发泡法和电沉积法等<sup>[18]</sup>, 其中电沉积法应用较为广泛, 通过在聚氨酯泡沫基体上进行镀铜, 再焚烧去除泡沫基体得到泡沫铜; 该方法制备的泡沫铜会存在骨架中空的情况<sup>[19]</sup> (图 1), 而现有的泡沫铜复合相变材料传热特性的相关研究均近似将泡沫铜骨架视为实心. 近年来 LB 方法已发展成为一种计算流体动力学和数值传热学通用且强大的介观数值方法, 该方法在孔隙尺度模拟复杂多孔介质中的流动传热问题具有独特的优势<sup>[20–22]</sup>. 因此, 本文将基于微型计算机断层扫描 (micro computed tomography, Micro CT) 三维重构泡沫铜的真实数值结构, 采用介观 LB 方法对泡沫铜复合相变材料的融化过程进行孔隙尺度模拟, 研究揭示骨

架中空对融化特性的影响.

## 2 物理模型

将基于 Micro CT 三维重构泡沫铜的真实数值结构, 图 1 为泡沫铜的实物图和 SEM 图, 可以看出泡沫铜具有三维全贯通网孔结构, 以此保证热量能够连续传导. 图 1(c) 为骨架中空区的局部放大图, 可以看出由于制备工艺的影响, 真实泡沫铜骨架内部是中空的. 骨架中空不仅会削弱泡沫铜内部热传导, 还会降低骨架与热源的接触面积, 进一步削弱其强化传热性能.

为了得到泡沫铜的真实数值结构, 对其进行 Micro CT 三维重构. 首先, 将泡沫铜样品 (25 mm × 25 mm × 25 mm, 20 PPI) 进行 Micro CT 扫描, 得到分辨率为 15 μm 的系列切片图; 然后将切片图根据灰度阈值进行分区处理, 得到金属骨架区、骨架内部中空区和外部孔隙区, 如图 2 所示. 最后, 将处理后的切片图按照顺序排列重构得到泡沫铜的数值结构, 如图 3 所示. 图 3(a) 显示了中空骨架泡沫铜的真实数值结构, 其中骨架中空区域 (红色) 的分布如图 3(b) 所示, 该泡沫铜孔隙率为 92.08%, 中空率 (中空区域占方腔容积比例) 为 1.09%.

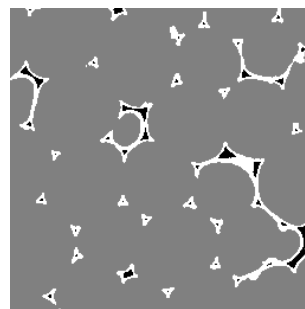


图 2 泡沫铜 Micro CT 图阈值分区处理

Fig. 2. Threshold partition processing of Micro CT image of copper foam.

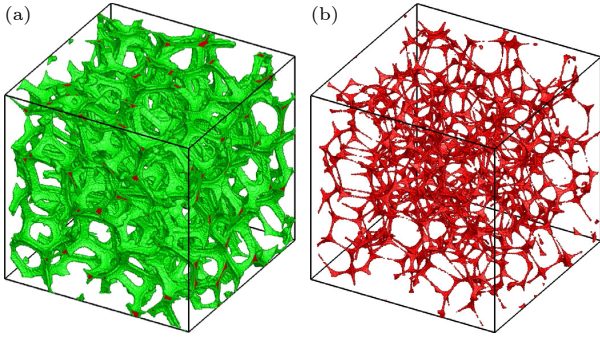


图 3 (a) 泡沫铜的真实数值结构; (b) 骨架中空区域分布  
Fig. 3. (a) Actual numerical structure; (b) distribution of hollow regions in the skeleton of copper foam.

将模拟填充泡沫铜复合相变材料的三维方腔左壁面加热融化问题, 如图 4 所示. 作为对比, 同时考虑了将中空骨架近似为实心骨架的情形, 即将骨架中空区域 (图 3) 设置为与骨架相同的材料. 初始时刻, 方腔内部相变材料为固相并处于融化温度  $T_m$ ; 随后, 方腔左壁面 ( $x = 0$ ) 温度升高至高温  $T_h$  并保持恒定, 其他壁面则保持绝热. 为便于讨论, 引入无量纲参数 Prandtl 数, Rayleigh 数, Stefan 数和 Fourier 数:

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{\nu_l}{\alpha_1}, & Ra &= \frac{|g_a| \beta_l (T_h - T_m) l_c^3}{\nu_l \alpha_1}, \\ Ste &= \frac{C_{p,l} (T_h - T_m)}{L}, & Fo &= \frac{\alpha_1 \tau}{l_c^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\nu_l$  和  $\alpha_1$  分别为液相相变材料的运动黏度和热扩散率,  $g_a$  为重力加速度,  $\beta_l$  为热膨胀系数,  $l_c$  为方

腔边长,  $C_{p,l}$  为相变材料的定压比热容,  $L$  为融化潜热,  $\tau$  为时间. 模拟的网格规模为  $256 \times 256 \times 256$ , 所使用物理参数皆为无量纲单位, 全局初始密度  $\rho = 1$ , 相变材料的导热系数设置为  $\lambda_l = 1$ , 其余参数设置为  $|g_a| = 1$ ,  $T_h = 1$ ,  $T_m = 0$ ,  $l_c = 1$ .

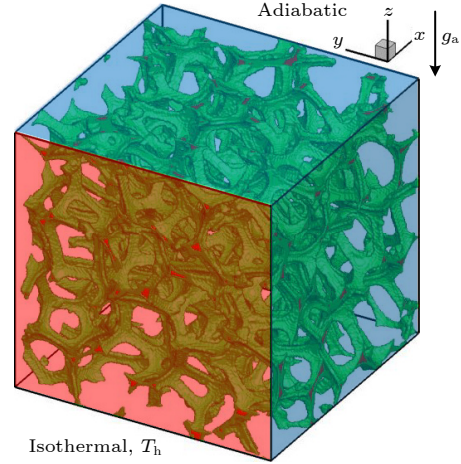


图 4 填充泡沫铜复合相变材料的三维方腔左壁面加热融化示意图

Fig. 4. Schematic of melting in a three-dimensional cubic cavity filled with phase change material embedded with copper foam and heated by the left wall.

### 3 数值方法

采用固液相变总焓 LB 方法, 速度场由基于密度的 LB 方程来求解, 温度场由基于总焓的 LB 方程来求解 [23]. 对于三维情况, 选用 D3Q19 离散速度集, 离散速度为

$$\mathbf{e}_i = \begin{cases} c(0, 0, 0)^T, & i = 0, \\ c(\pm 1, 0, 0)^T, c(0, \pm 1, 0)^T, c(0, 0, \pm 1)^T, & i = 1-6, \\ c(\pm 1, \pm 1, 0)^T, c(\pm 1, 0, \pm 1)^T, c(0, \pm 1, \pm 1)^T, & i = 7-18, \end{cases} \quad (2)$$

其中  $c = \delta_x / \delta_t$  为格子速度,  $\delta_x$  和  $\delta_t$  分别为格子步长和时间步长.

#### 3.1 速度场 LB 方程

密度分布函数  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) = [f_i(\mathbf{x}, t)]^T$  的多松弛时间 LB 方程为

$$\begin{aligned} & \mathbf{f}^*(\mathbf{x} + \mathbf{e}\delta_t, t + \delta_t) \\ &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{S} [\mathbf{m}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{m}^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)] \\ & \quad + \delta_t \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{S}/2) \mathbf{F}_m(\mathbf{x}, t), \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{f}^*(\mathbf{x} + \mathbf{e}\delta_t, t + \delta_t) = [f_i^*(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i\delta_t, t + \delta_t)]^T$ .

此外,  $\mathbf{M}$  为速度空间到矩空间的正交变换矩阵 [24],  $\mathbf{S}$  为密度分布函数在矩空间的松弛矩阵,  $\mathbf{m} = \mathbf{M}\mathbf{f}$  为密度分布函数的矩,  $\mathbf{m}^{\text{eq}}$  为密度平衡态分布函数的矩,  $\mathbf{I}$  为  $19 \times 19$  的单位矩阵,  $\mathbf{F}_m$  为离散外力项的矩. 为了实现固相无滑移条件, 采用 Huang 和 Wu [25] 提出的体积格式处理得到密度分布函数:

$$f_i = f_l f_i^* + (1 - f_l) f_i^{\text{eq}}(\rho, \mathbf{u}_s), \quad (4)$$

其中  $f_l$  为液相率,  $\mathbf{u}_s = \mathbf{0}$  为固相速度. 宏观量密度

$\rho$  和速度  $\mathbf{u}$  的计算式为

$$\rho = \sum_{i=0}^{18} f_i^*, \quad \rho \mathbf{u} = \sum_{i=0}^{18} \mathbf{e}_i f_i + \frac{\delta_t}{2} \mathbf{F}, \quad (5)$$

对速度场的 LB 方程进行 Chapman-Enskog 分析, 可在液相区恢复宏观质量-动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0, \quad (6) \\ \frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) \\ &= -\nabla p + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left\{ \rho \nu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} + \rho \varsigma (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}, \quad (7) \end{aligned}$$

其中压力、运动黏度和体积黏度分别为

$$\begin{aligned} p &= \rho c^2 / 3, \quad \nu = c^2 \delta_t (s_p^{-1} - 0.5) / 3, \\ \varsigma &= 2c^2 \delta_t (s_e^{-1} - 0.5) / 9. \end{aligned}$$

### 3.2 温度场 LB 方程

总焓分布函数  $\mathbf{g}(\mathbf{x}, t) = [g_i(\mathbf{x}, t)]^T$  对应的多松弛时间 LB 方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{g}(\mathbf{x} + \mathbf{e} \delta_t, t + \delta_t) \\ = \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{R} [\mathbf{n}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{n}^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)], \quad (8) \end{aligned}$$

其中  $\mathbf{R}$  为总焓分布函数在矩空间的对角松弛矩阵,  $\mathbf{n} = \mathbf{M} \mathbf{g}$  为总焓分布函数的矩,  $\mathbf{n}^{\text{eq}}$  为总焓平衡态分布函数的矩. 宏观量总焓  $H$  的计算式为

$$H = \sum_{i=0}^{18} g_i, \quad (9)$$

液相率  $f_l$  和温度  $T$  由  $H$  确定. 对温度场的 LB 方程进行 Chapman-Enskog 分析, 可在整个区域恢复宏观能量守恒方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (C_p T \mathbf{u}) = \nabla \cdot (D \nabla T), \quad (10)$$

其中,  $D = C_{p,\text{ref}} c^2 \delta_t (\sigma_j^{-1} - 0.5) / 3$ , 热导率  $\lambda = \rho D$ . 需要指出的是, 本文仅给出了固液相变总焓 LB 方法的基本框架, 更多的技术细节可参见文献 [23].

## 4 结果与讨论

### 4.1 融化特性分析

为分析骨架中空对融化特性的影响, 首先将骨架中空部分的导热系数和比热容分别设置为  $0.5\lambda_l$  和  $0.5C_{p,l}$ , 将泡沫铜骨架部分的导热系数和比热容分别设置为  $100\lambda_l$  和  $2C_{p,l}$ , 算例的无量纲参数设为  $Pr = 50$ ,  $Ra = 10^6$  和  $Ste = 0.5$  [23]. 图 5 给出了实心骨架泡沫铜 (SSCF) 和中空骨架泡沫铜 (HSCF)

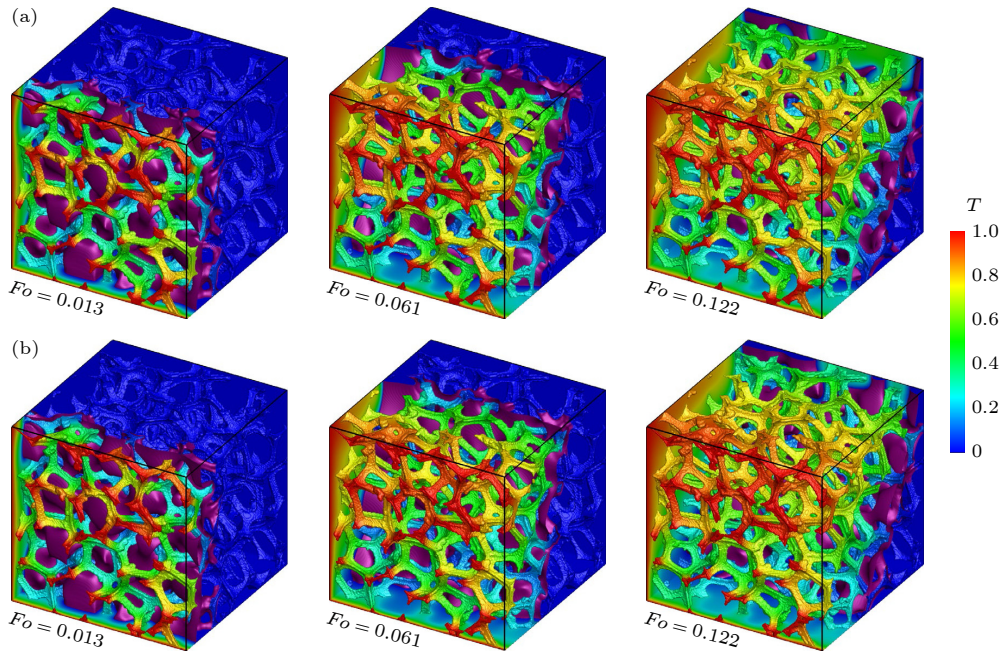


图 5 融化过程中固液相界面 (紫色曲面) 位置, 以及右壁面 ( $x = 1$ )、后壁面 ( $y = 1$ )、下壁面 ( $z = 0$ ) 和骨架表面的温度分布 (a) SSCF; (b) HSCF

Fig. 5. Evolution of the solid-liquid phase interface (the purple surface), the temperature distributions on the right ( $x = 1$ ), back ( $y = 1$ ), bottom ( $z = 0$ ) walls and skeleton surface during the melting process: (a) SSCF; (b) HSCF.

两种情况下固液相界面的位置, 以及右壁面 ( $x = 1$ )、后壁面 ( $y = 1$ )、下壁面 ( $z = 0$ ) 和骨架表面的温度分布. 当  $Fo = 0.013$  时, 融化处于初始阶段, 固液相界面呈纵深分布, 这是由于泡沫铜的高导热率使其附近的相变材料迅速融化. 随着相变材料的融化, 热流体受浮升力上升, 使得相界面上半部分融化得更快, 同时位于方腔左上方的泡沫铜骨架表面温度升高. 当  $Fo = 0.122$  时, SSCF 的相界面更早地到达右壁面, 说明 SSCF 的强化传热能力更强.

为研究泡沫铜骨架中空区域对左壁面热量传输的影响, 图 6 展示了  $Fo = 0.061$  时左壁面热流密度的分布情况. 相对于相变材料, 泡沫铜骨架的热流密度较高, 且左壁面下半区的热流密度高于上半区, 这是因为左壁面上半区附近整体温度较高、传热温差较小. 由图 6(b) 可看出, 相对于 SSCF, HSCF 的骨架中空区域热流密度十分低, 降低了整体的传热速率.

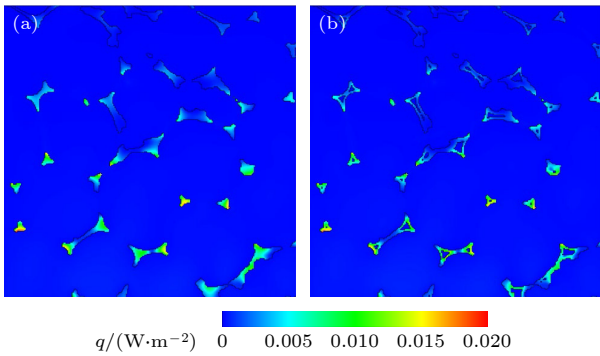


图 6  $Fo = 0.061$  时, 方腔左壁面的热流密度分布 (a) SSCF; (b) HSCF

Fig. 6. Heat flux distribution on the left wall of the cubic cavity at  $Fo = 0.061$ : (a) SSCF; (b) HSCF.

为定量分析融化过程, 图 7 给出了左壁面平均 Nusselt 数  $Nu_{ave}$ , 方腔内平均液相率  $f_{l,ave}$  和储能效率  $\eta$  随 Fourier 数  $Fo$  的变化, 其中储能效率  $\eta$

定义为潜热储能量在显热和潜热储能量总和中的占比, 其计算式为

$$\eta = \frac{\int_{PCM} f_l L \rho dV}{\int_{PCM} f_l L \rho dV + \int_V C_p (T - T_0) \rho dV}, \quad (11)$$

其中 PCM 和  $V$  分别代表相变材料区域和整个计算区域. 从图 7(a) 可以看出,  $Nu_{ave}$  随着  $Fo$  的增大而单调减小, 这是由于泡沫铜阻碍了自然对流, 方腔内传热机制以导热为主, 随着融化的进行, 相界面远离加热面致使热阻逐渐增大. 由于 SSCF 的等效导热系数更高, 其对应的  $Nu_{ave}$  在  $Fo = 0-0.125$  内较大, 相变材料融化得更快, 如图 7(b) 所示.

从图 7(c) 可以看出, 储能效率  $\eta$  随着  $Fo$  的增大先上升后下降, 其下降的原因是随着融化的进行液相逐渐增多, 更多的热量被液相吸收从而以显热的形式储存; 当融化完成时, HSCF 和 SSCF 的  $\eta$  分别为 68.69% 和 68.38%, 前者相对于后者提高了 0.45%, 说明 SSCF 的高导热率更有利于增强显热吸收. 为定量分析左壁面热流量的分布情况, 引入传热增强效率  $\zeta$ , 其定义为通过泡沫铜 (骨架及骨架中空区域) 进入方腔的热流量占总热流量的比例. 左壁面热流量  $\Phi$  和传热增强效率  $\zeta$  的计算表达式分别为

$$\Phi = \int_A -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} dA, \quad (12)$$

$$\zeta = \frac{\Phi_{Ske} + \Phi_{Hol}}{\Phi_{Ske} + \Phi_{Hol} + \Phi_{PCM}}, \quad (13)$$

其中, 积分区间  $A$  代表左壁面相变材料 (PCM) 区域、骨架 (Ske) 区域或骨架中空 (Hol) 区域.

图 8 给出了左壁面不同区域的热流量  $\Phi$  以及泡沫铜传热增强效率  $\zeta$  随  $Fo$  的变化. 可以看出, 随着融化的进行, 通过左壁面不同区域进入方腔的

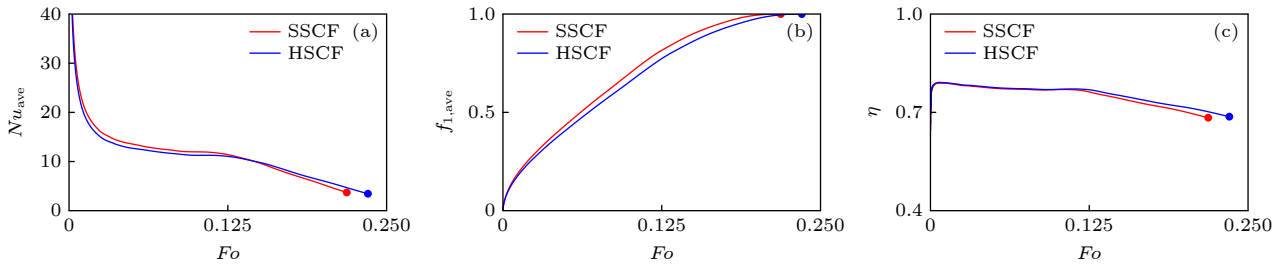


图 7 不同因素随 Fourier 数  $Fo$  的变化 (a) 左壁面平均 Nusselt 数  $Nu_{ave}$ ; (b) 方腔内平均液相率  $f_{l,ave}$ ; (c) 储能效率  $\eta$

Fig. 7. Variations of different factors with the Fourier number  $Fo$ : (a) Average Nusselt number  $Nu_{ave}$  along the left wall; (b) average liquid fraction over the whole cavity  $f_{l,ave}$ ; (c) energy storage efficiency  $\eta$ .

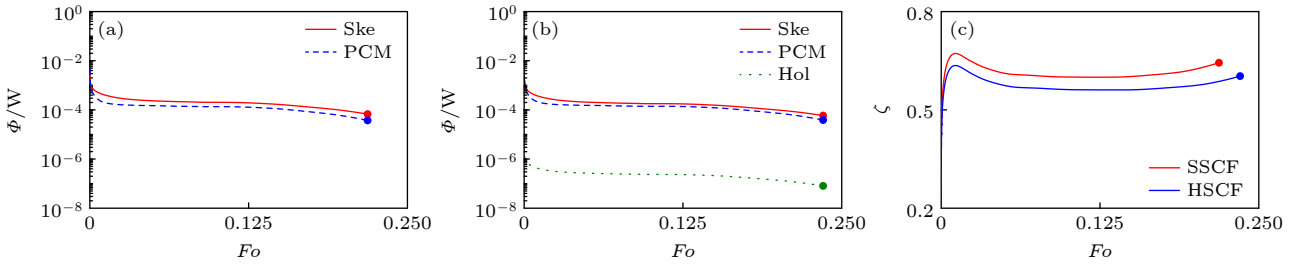


图 8 SSCF (a) 和 HSCF (b) 对应左壁面不同区域的热流量  $\Phi$ ; (c) 泡沫铜传热增强效率  $\zeta$  随 Fourier 数  $Fo$  的变化

Fig. 8. Variations of the heat transfer rate  $\Phi$  of different regions of the left wall corresponding to SSCF (a) and HSCF (b); (c) heat transfer enhancement efficiency of copper foam  $\zeta$  with the Fourier number  $Fo$ .

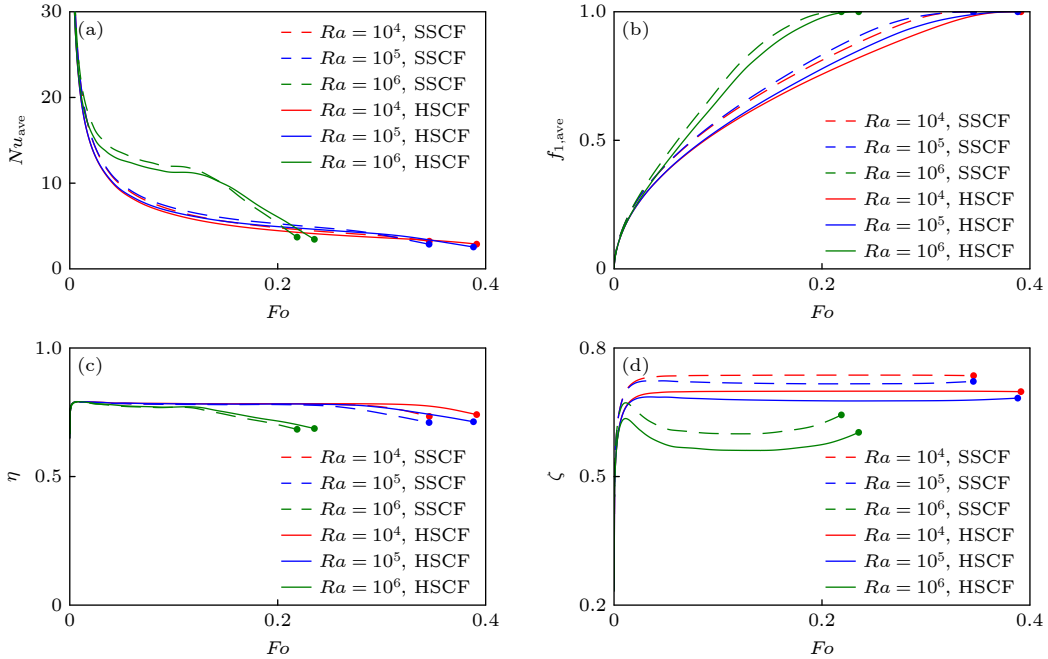


图 9 不同  $Ra$  时, 不同因素随 Fourier 数  $Fo$  的变化 (a) 左壁面平均 Nusselt 数; (b) 方腔内平均液相率  $f_{l,ave}$ ; (c) 储能效率  $\eta$ ; (d) 泡沫铜传热增强效率  $\zeta$

Fig. 9. Variations of different factors with the Fourier number  $Fo$  at different  $Ra$ : (a) Average Nusselt number along the left wall; (b) average liquid fraction over the whole cavity  $f_{l,ave}$ ; (c) energy storage efficiency  $\eta$ ; (d) heat transfer enhancement efficiency of copper foam  $\zeta$ .

热流量会因热阻的增加而逐渐减小. 相比于泡沫铜骨架和相变材料区域, 通过骨架中空区域进入方腔的热流量几乎可以忽略不计, 如图 8(b) 所示. 图 8(c) 对 SSCF 和 HSCF 的传热增强效率  $\zeta$  进行了对比, 二者的  $\zeta$  都经历了先上升后下降, 然后再上升的过程, 这是因为初始时刻相变材料和泡沫铜的温度相同, 在壁面定温加热的驱动下, 左壁面相变材料区域的面积远大于泡沫铜区域的面积, 通过相变材料的热流量更多; 随后, 由于相变材料的导热率较低, 相变材料与壁面之间的温度梯度降低得更快, 因此相变材料区域热流量降低得更快, 致使  $\zeta$  迅速上升; 随着融化的进行, 液相逐渐增多, 相变材料与左壁面的对流换热增强,  $\zeta$  逐渐降低并达到稳定; 在融

化后期, 固液相界面与右壁面接触使得对流作用逐渐减弱,  $\zeta$  又缓慢上升. 在  $Fo = 0-0.125$  内, SSCF 和 HSCF 的平均传热增强效率分别为 61.16% 和 57.53%, 由此可见骨架中空会显著削弱泡沫铜的传热能力.

#### 4.2 $Ra$ 对融化的影响

将研究不同  $Ra$  时泡沫铜骨架中空的影响,  $Ra$  依次设置为  $10^4$ ,  $10^5$  和  $10^6$ . 图 9 为左壁面平均 Nusselt 数  $Nu_{ave}$ , 方腔内平均液相率  $f_{l,ave}$ , 储能效率  $\eta$  和传热增强效率  $\zeta$  随 Fourier 数  $Fo$  的变化. 可以看出,  $Nu_{ave}$  随着  $Ra$  的减小而减小, 这是因为  $Ra$  的减小意味着自然对流传热的减弱. 当  $Ra$

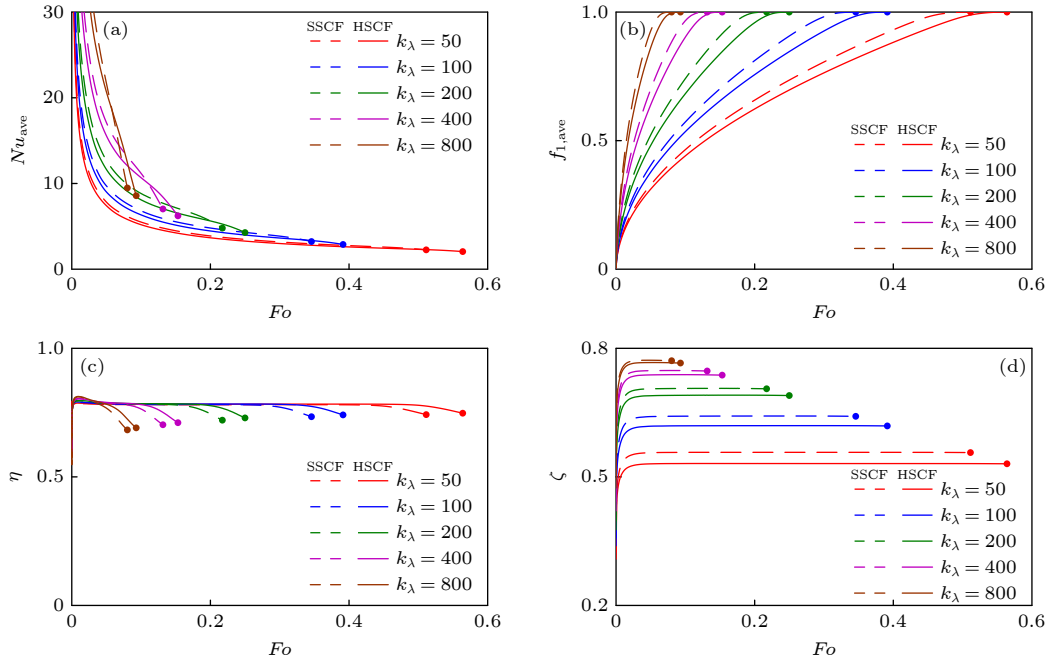


图 10 不同  $k_\lambda$  时, 不同因素随 Fourier 数  $Fo$  的变化 (a) 左壁面平均 Nusselt 数  $Nu_{ave}$ ; (b) 方腔内平均液相率  $f_{l,ave}$ ; (c) 储能效率  $\eta$ ; (d) 泡沫铜传热增强效率  $\zeta$

Fig. 10. Variations of different factors with the Fourier number  $Fo$  at different  $k_\lambda$ : (a) Average Nusselt number along the left wall  $Nu_{ave}$ ; (b) average liquid fraction over the whole cavity  $f_{l,ave}$ ; (c) energy storage efficiency  $\eta$ ; (d) heat transfer enhancement efficiency of copper foam  $\zeta$ .

为  $10^4$  和  $10^5$  时, 自然对流十分微弱, 导热传热机制占据主导地位, 两种情况下的  $Nu_{ave}$  变化十分接近. 在融化前中期, SSCF 对应的  $Nu_{ave}$  比 HSCF 对应的  $Nu_{ave}$  高, 且  $Ra$  越大, 差距越大. 相比于 SSCF, HSCF 在  $Ra$  为  $10^4$ ,  $10^5$  和  $10^6$  时的融化时间分别延长了 13.17%, 12.35% 和 7.61%; 由此可见,  $Ra$  越小, 泡沫铜骨架中空对融化时间的影响就越大, 如图 9(b) 所示. 从图 9(c) 可以看出, 储能效率  $\eta$  随着  $Ra$  的增加而减少, 且 SSCF 对应的  $\eta$  比 HSCF 对应的  $\eta$  低, 这意味着提高对流传热强度和泡沫铜导热能力都会降低  $\eta$ . 从图 9(d) 可以看出, 当  $Ra$  为  $10^6$  时, 泡沫铜传热增强效率  $\zeta$  随  $Fo$  的变化存在明显波动, 这是对流传热和导热传热机制相互竞争的结果; 当  $Ra$  降低到  $10^5$  时, 对流作用减弱,  $\zeta$  的变化更加平缓; 当  $Ra$  为  $10^4$  时, 导热完全占据主导地位,  $\zeta$  在融化前期迅速上升后即保持在稳定状态直至融化结束.

### 4.3 热导率对融化的影响

将研究不同热导率 (泡沫铜骨架热导率和相变材料热导率之比  $k_\lambda$ ) 时泡沫铜骨架中空的影响,  $k_\lambda$  依次设为 50, 100, 200, 400 和 800, 无量纲参数设

为  $Pr = 50$ ,  $Ra = 10^4$  和  $Ste = 0.5$ . 图 10 给出了不同  $k_\lambda$  时左壁面平均 Nusselt 数  $Nu_{ave}$ , 方腔内平均液相率  $f_{l,ave}$ , 储能效率  $\eta$  和传热增强效率  $\zeta$  随 Fourier 数  $Fo$  的变化. 可以看出,  $k_\lambda$  越大,  $Nu_{ave}$  越大, 相变材料融化越快. 当  $k_\lambda$  增大时, SSCF 和 HSCF 对应的融化时间逐渐接近, 如图 10(b) 所示. 由图 10(c) 可以看出,  $k_\lambda$  越大, 储能效率  $\eta$  在融化前期值越大, 且在融化完成时的值越小. 由图 10(d) 可以看出, 泡沫铜传热增强效率  $\zeta$  随  $k_\lambda$  的增大而增大, 且  $k_\lambda$  越大, SSCF 和 HSCF 的  $\zeta$  差别越小, 这意味着泡沫铜骨架中空的影响随  $k_\lambda$  的增大而逐渐减小.

## 5 结 论

通过 Micro CT 三维重构了泡沫铜的真实数值结构, 成功获得了骨架内部中空区域的分布; 在此基础上, 采用介观 LB 方法对填充泡沫铜复合相变材料的方腔融化问题进行了孔隙尺度模拟研究. 主要结论如下.

1) HSCF 相比于 SSCF, 在融化前期方腔  $Nu_{ave}$  更低, 相变材料融化更慢, 储能效率更高. 相比于泡沫铜骨架, 通过骨架中空区进入方腔的热通量可

以忽略不计. 泡沫铜传热增强效率  $\zeta$  会因为导热和对流的相互竞争出现先上升后下降然后再上升的现象, 并且 SSCF 的传热增强效率更高.

2)  $Ra$  降低时, 储能效率  $\eta$  提高, 方腔内自然对流逐渐减弱, 泡沫铜传热增强效率  $\zeta$  随  $Fo$  的波动趋于平缓, HSCF 和 SSCF 对应的传热增强效率  $\zeta$  的差距减小.

3) 泡沫铜骨架热导率和相变材料热导率之比  $k_\lambda$  增大时, 储能效率  $\eta$  在融化前期增大, 融化结束时刻减小; 并且骨架中空区的热阻对强化传热的影响减小, HSCF 和 SSCF 对应的传热增强效率  $\zeta$  的差距减小.

## 参考文献

- [1] Zhang N, Yuan Y P, Cao X L, Du Y X, Zhang Z L, Gui Y W 2018 *Adv. Eng. Mater.* **20** 1700753
- [2] Vélez C, Khayet M, Ortiz de Zárate J M 2015 *Appl. Energy* **143** 383
- [3] Su W G, Darkwa J, Kokogiannakis G 2015 *Renew. Sust. Energy. Rev.* **48** 373
- [4] Ren Q L, Chan C L 2016 *Int. J. Heat Mass Transfer* **100** 522
- [5] Arıcı M, Tütüncü E, Kan M, Karabay H 2017 *Int. J. Heat Mass Transfer* **104** 7
- [6] Luo K, Yao F J, Yi H L, Tan H P 2015 *Appl. Therm. Eng.* **86** 238
- [7] Gong W, Yang Z, Duan Y Y 2014 *Acta Energ. Sol. Sin.* **35** 1682 (in Chinese) [龚玮, 杨震, 段远源 2014 *太阳能学报* **35** 1682]
- [8] Ren Q L, Wang Z X, Lai T, Zhang J F, Qu Z G 2021 *Appl. Therm. Eng.* **189** 116618
- [9] Yang X H, Bai Q S, Guo Z X, Niu Z Y, Yang C, Jin L W, Lu T J, Yan J Y 2018 *Appl. Energy* **229** 700
- [10] Feng Y H, Feng D L, Chu F Q, Qiu L, Sun F Y, Lin L, Zhang X X 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 016501 (in Chinese) [冯妍卉, 冯黛丽, 褚福强, 邱琳, 孙方远, 林林, 张欣欣 2022 *物理学报* **71** 016501]
- [11] Li J, Li S W, Cai D, Liao Y N 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 040503 (in Chinese) [李静, 李绍伟, 蔡迪, 廖燕宁 2021 *物理学报* **70** 040503]
- [12] Xiao X, Zhang P, Li M 2013 *Appl. Energy* **112** 1357
- [13] Zhang B H, Zheng L 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 164401 (in Chinese) [张贝豪, 郑林 2020 *物理学报* **69** 164401]
- [14] Huang X P, Sun C, Chen Z Q, Han Y S 2021 *Int. J. Therm. Sci.* **170** 107151
- [15] Zhang Z Q, He X D 2017 *Appl. Therm. Eng.* **113** 298
- [16] Ghahremannezhad A, Xu H, Salimpour M R, Wang P, Vafai K 2020 *Appl. Therm. Eng.* **179** 115731
- [17] Li X Y, Zhu Z L, Xu Z R, Ma T, Zhang H, Liu J, Wang X, Wang Q W 2019 *Appl. Energy* **254** 113507
- [18] Zhang S W 2016 *Powder Metall. Technol.* **34** 222 (in Chinese) [张士卫 2016 *粉末冶金技术* **34** 222]
- [19] Zhang Q L, Yang Z M, Ding B J 2009 *Nonferrous Met.* **61** 30 (in Chinese) [张秋利, 杨志懋, 丁秉钧 2009 *有色金属* **61** 30]
- [20] He Y L, Liu Q, Li Q, Tao W Q 2019 *Int. J. Heat Mass Transfer* **129** 160
- [21] Huang R Z, Wu H Y, Adams N A 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 244501
- [22] Lou Q, Huang Y F, Li L 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 214702 (in Chinese) [娄钦, 黄一帆, 李凌 2019 *物理学报* **68** 214702]
- [23] Huang R Z 2017 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University) (in Chinese) [黄荣宗 2017 博士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
- [24] d'Humières D 2002 *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* **360** 437
- [25] Huang R Z, Wu H Y 2016 *J. Comput. Phys.* **315** 65

# Effects of hollow skeleton on melting process in copper foam<sup>\*</sup>

Yang Hao   Zhang Xiao-Jie   Huang Rong-Zong<sup>†</sup>*(School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)*

( Received 6 February 2023; revised manuscript received 28 April 2023 )

## Abstract

The compositing of porous medium and phase change material is an effective way to improve the heat transfer performance of solid-liquid phase change energy storage system. In this paper, we reconstruct the three-dimensional numerical structure of the copper foam by using the micro computed tomography, and then conduct the pore-scale numerical simulation of the melting process in a cubic cavity filled with the phase change material comprised of the copper foam via the lattice Boltzmann method. The effects of the hollow skeleton on the melting process are discussed in detail under different Rayleigh numbers and ratios of thermal conductivity of the copper foam to that of the phase change material. The results show that the hollow skeleton copper foam possesses a lower average Nusselt number along the left wall at the early stage of the melting process, a slower melting rate, and a higher energy storage efficiency than the solid skeleton copper foam. Comparing with the skeleton region of the copper foam, the heat transfer rate entering the cubic cavity through the hollow region of the skeleton is almost negligible. Because of the competition between heat conduction and natural convection, the heat transfer enhancement efficiency of copper foam first increases, then decreases, and then increases again with the increase of the Fourier number. When the Rayleigh number decreases, the energy storage efficiency increases, and the natural convection also weakens. Meanwhile, the fluctuation of the heat transfer enhancement efficiency decreases as the Fourier number increases, and the gap of the heat transfer enhancement efficiency between the hollow skeleton copper foam and the solid skeleton copper foam becomes smaller. When the ratio of the thermal conductivity of the copper foam skeleton to that of the phase change material increases, the energy storage efficiency is relatively high at the early stage of the melting process but becomes relatively low when the melting process is completed. With a larger thermal conductivity ratio, the heat transfer rate entering the cubic cavity through the skeleton region of the copper foam becomes dominant, which reduces the effect of the hollow skeleton on heat transfer, and thus the gap of the heat transfer enhancement efficiency between the hollow skeleton copper foam and the solid skeleton copper foam becomes relatively small.

**Keywords:** hollow skeleton, copper foam, micro computed tomography, melting**PACS:** 44.30.+v, 64.70.D-**DOI:** [10.7498/aps.72.20230151](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230151)

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52006244).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [rongzong.huang@csu.edu.cn](mailto:rongzong.huang@csu.edu.cn)



## 骨架中空对泡沫铜内融化过程的影响

杨浩 张销杰 黄荣宗

### Effects of hollow skeleton on melting process in copper foam

Yang Hao Zhang Xiao-Jie Huang Rong-Zong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 134401 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230151

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230151>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 难熔金属钒熔化行为的局域原子结构模拟与分析

Simulation and analysis of melting behavior of local atomic structure of refractory metals vanadium

物理学报. 2020, 69(20): 203601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200185>

#### 方镁石高压结构预测和高温结构稳定性研究

High-pressure structure prediction and high-temperature structural stability of periclase

物理学报. 2019, 68(12): 126201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190204>

#### 螺旋锥束计算机断层成像倾斜扇束反投影滤波局部重建算法

Tilting fan beam back-projection filtration algorithm for local reconstruction in helical cone-beam computed tomography

物理学报. 2019, 68(8): 088701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190055>

#### 准二维湿颗粒体系融化过程中的结构与缺陷

Structure and defects in melting process of quasi-two-dimensional wet particle system

物理学报. 2021, 70(11): 116401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202037>

#### 微分相位衬度计算机层析成像的感兴趣区域重建方法

Method of reconstructing region of interest for differential phase contrast computed tomography imaging

物理学报. 2021, 70(11): 118702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202192>

#### 超强激光与泡沫微结构靶相互作用提高强流电子束产额模拟研究

Enhancement of high-energy electron yield by interaction of ultra-intense laser pulses with micro-structured foam target

物理学报. 2019, 68(9): 094101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182291>