

# 泡沫镍孔隙尺度光谱辐射特性的实验与数值研究

李 洋, 夏新林, 孙 创, 范 超, 谈和平

哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 实验测量了不同厚度的泡沫镍在  $0.4\sim 2.2\ \mu\text{m}$  波长的法向-半球反射率/透射率, 采用蒙特卡罗法对泡沫镍的计算机断层扫描结构进行孔隙尺度辐射传输建模, 对比研究了泡沫镍辐射特性随入射光谱和样品厚度的变化, 计算得到了泡沫镍辐射特性的孔隙尺度分布特征。结果表明: 所建立的泡沫镍孔隙尺度辐射传输模型在计算其光谱辐射特性方面具有正确性。波长增长, 吸收率逐渐降低, 反射率逐渐升高; 样品厚度增加, 吸收率逐渐升高并趋于稳定, 透射率逐渐降低至 0。孔隙尺度辐射特性分布强烈依赖于局部纹理结构, 波长  $1.5\ \mu\text{m}$  时, 泡沫孔隙中的平均吸收率是肋筋上的 1.5 倍, 而肋筋上的平均反射率则达到孔隙中平均反射率的 3.7 倍。

**关键词** 表面光学; 辐射; 光谱特性; 蒙特卡罗法; 泡沫材料; 孔隙尺度

中图分类号 TK124 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0424002

## Experimental and Numerical Study on Pore-Scale Spectral Radiative Properties of Ni Foam

Li Yang, Xia Xinlin, Sun Chuang, Fan Chao, Tan Heping

School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** The experiment involves normal-hemisphere reflectance/transmittance from foam slices with different thickness at incident wavelength of  $0.4\sim 2.2\ \mu\text{m}$ . The pore-scale radiative transfer simulation is modeled with Monte Carlo method applied in foam reconstruction from computed tomography. The radiative properties of Ni foam obtained from experiment and simulation are compared and the pore-scale distributions of radiative properties are analyzed. The results show that the pore-scale radiative transfer model is valid to simulate the radiative properties of Ni foam. The absorptance decreases and reflectance increases as the incident wavelength becomes longer. With samples thick enough, the absorptance increases to a stable value, while the transmittance decreases to zero. In addition, the pore-scale distributions of radiative properties are strongly dependent on the local structure. With incident wavelength of  $1.5\ \mu\text{m}$ , the absorptance in void pores is 1.5 times of that on solid skeletons. However, the reflectance on solid skeletons is 3.7 times of that in void pores.

**Key words** optics at surfaces; radiation; spectral property; Monte Carlo method; foam material; pore scale

**OCIS codes** 240.6700; 350.5610; 060.2310; 080.2740

## 1 引 言

泡沫材料的独特三维网络结构使其具有良好的热辐射传输性能, 已广泛应用于太阳能泡沫吸热器<sup>[1]</sup>、多孔燃烧器<sup>[2]</sup>、高温热防护<sup>[3]</sup>及飞行器红外隐身<sup>[4]</sup>等技术领域。泡沫材料的辐射传输问题一直是上述应用领域中的研究热点, 而泡沫材料的光谱辐射特性在其辐射传输研究中具有基础作用。

对于泡沫材料辐射特性的实验研究, 目前已针对 Al-NiP 泡沫<sup>[5]</sup>、FeCrAlY 泡沫<sup>[6]</sup>、Cu 泡沫<sup>[7]</sup>、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  泡沫<sup>[8]</sup>等多种材料, 获得了方向-方向透射率(主要为法向-法向)、法向-半球透射率及法向-半球反射率等数据。

收稿日期: 2016-12-07; 收到修改稿日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51536001)、基础科研项目(B2320132001)

作者简介: 李 洋(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事泡沫材料多光谱辐射特性与多尺度耦合传输方面的研究。

E-mail: upcliyang@163.com

导师简介: 夏新林(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事杂散光、红外辐射和耦合传热等方面的研究。

E-mail: xiaxl@hit.edu.cn(通信联系人)

由于受到复杂肋筋结构的强散射和环境杂散光的干扰,方向-方向光谱辐射特性的测量误差很大,甚至难以探测。受限于探测手段,在与泡沫肋筋结构相当的尺度上(孔隙尺度,约 0.3~5 mm),辐射特性分布测量更加无法实施,故目前多采用内含积分球的设备收集半球封闭空间的散射信号,获取更准确的方向-半球光谱特性<sup>[9]</sup>。

对于泡沫材料辐射传输的数值研究,一般是直接将泡沫材料视为一种辐射参与性介质,在介质层次上求解辐射传输方程,将骨架材质、孔隙结构的辐射作用归结为辐射传输方程中的介质辐射特性参数(通常是材料发射率、孔隙率、孔径的实验关联式),计算方法已比较成熟,主要有蒙特卡罗(MC)法<sup>[10]</sup>、有限体积(FV)法<sup>[11]</sup>、离散坐标(DO)法<sup>[12]</sup>等。但是,此类介质方法无法考虑真实肋筋结构间的相关性散射,且所用介质辐射特性参数关联式具有相当大的局限性,因此常无法准确计算泡沫材料的辐射传输问题<sup>[13]</sup>。近年来,孔隙尺度层次的辐射传输问题受到越来越多的重视。该类方法采用人工构造的仿泡沫结构(Kelvin 十四面体、Weaire-Phelan 结构等)或直接采用计算机断层成像(CT)技术获取泡沫材料的真实重建结构,能够细致地考虑泡沫材料的微细观形貌,元胞肋筋间的相关性散射模拟也更充分<sup>[14]</sup>。目前普遍认为 MC 法是求解此类泡沫材料孔隙尺度辐射传输的最有效方法<sup>[15]</sup>。通过对孔隙尺度辐射传输的分析,可清楚了解泡沫结构形态及材质性质等如何影响材料的辐射特性<sup>[16]</sup>,从而更真实地反映辐射特性与泡沫结构之间的关系。

本文以太阳能泡沫吸热器为研究背景,为解决泡沫材料孔隙尺度光谱辐射特性难以获取的问题,首先采用内含积分球的实验台测量泡沫镍的法向-半球光谱反射率/透射率,然后采用 MC 法对泡沫镍的 CT 结构进行孔隙尺度辐射传输建模,对比实验测量与数值模拟结果随入射光谱和样品厚度的变化,最后计算得到泡沫镍的光谱辐射特性的孔隙尺度分布特征。

## 2 实验测量

### 2.1 实验原理介绍

泡沫镍是一种强散射性材料,直接测量狭小空间角内的定向辐射能量十分困难且易受环境杂散光的干扰,因此借助积分球测量其法向-半球光谱特性。图 1 是利用积分球测量泡沫镍光谱特性的原理图及被测样品,其中 1 为准直光源;2 为泡沫样品;3 为积分球;4 为光电探测器。如图 1(a)所示,测量法向-半球光谱反射率时,准直光源沿泡沫端面法向从积分球上的小缺口进入,经泡沫样品反射后在积分球内壁上多次反射,最终被光电探测器接收,并转化为电信号输出。测量法向-半球光谱透射率的原理如图 1(b)所示,准直光源垂直射入泡沫样品,经泡沫材料的吸收和散射后,剩余辐射能量进入积分球,经积分球内壁多次反射后,由光电探测器将光信号转化为电信号并输出。

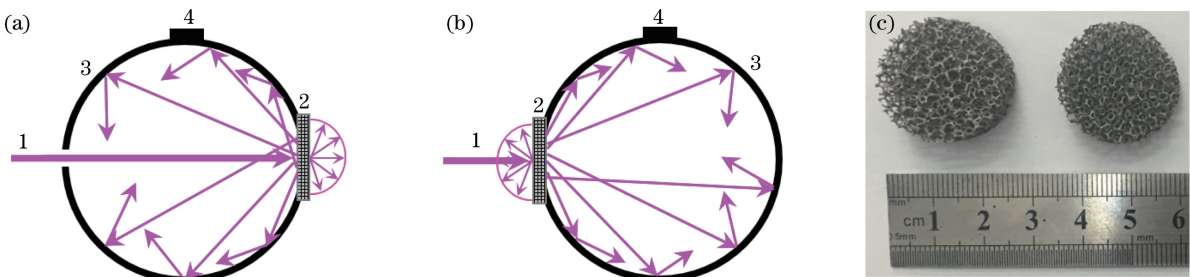


图 1 泡沫镍光谱特性测量原理及被测样品。(a)反射率;(b)透射率;(c)镍样品照片

Fig. 1 Measuring schematic of spectral radiative properties. (a) Reflectance; (b) transmittance; (c) Ni sample

对于入射、透射、反射辐射能量,利用光电探测器配合斩波器以及锁相放大器对测量信号进行放大处理,将测量信号内的有效信号提取出来并转化为相应的电压信号,其电压响应值计算公式为<sup>[17]</sup>

$$U_{\lambda} = K \mathfrak{R}_{\lambda} I_{\lambda} \eta_{\lambda} \Delta\lambda, \quad (1)$$

式中  $U_{\lambda}$  为光谱响应电压; $K$  为测量系统几何集合数; $\mathfrak{R}_{\lambda}$  为探测器的光谱响应度; $I_{\lambda}$  为光谱辐射强度; $\eta_{\lambda}$  为锁相放大器的响应效率; $\Delta\lambda$  为光源带宽。在获得反射电压和透射电压后,相应的光谱特性计算公式为

$$\rho_{\lambda} = U_{\rho\lambda} / U_{0\lambda}, \quad (2)$$

$$\tau_{\lambda} = U_{\tau\lambda} / U_{0\lambda}, \quad (3)$$

$$\alpha_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} - \tau_{\lambda}, \quad (4)$$

式中  $\rho_{\lambda}$ 、 $\tau_{\lambda}$ 、 $\alpha_{\lambda}$  分别为法向-半球光谱反射率、法向-半球光谱透射率、法向-介质光谱吸收率； $U_{\rho\lambda}$ 、 $U_{\tau\lambda}$ 、 $U_{0\lambda}$  分别为光谱反射、透射电压和无样品时的光谱入射电压。

### 2.2 实验系统与校核

所采用泡沫材料光谱测量系统如图 2 所示。该系统由以下部件组成。1 为光源发生器：内有氙灯光源、钨灯光源、滤光片轮；2 为斩波器；3 为单色仪；4 为组合准直镜；5 为平面反射镜；6 为透射率样品托架；7 为反射率样品托架；8 为硅探测器；9 为钢镓砷探测器；10 为积分球；11 为锁相放大器；12 为数据采集系统。各组成部件的详细介绍参见文献[17]。实验时，氙灯和钨灯产生的光经准直镜调节后成为准直光束，经平面镜反射射向积分球。若样品置于反射率样品托架上，则通过比较探测器测得的光谱电压与无样品时的电压信号，可得到样品的光谱反射率[(2)~(4)式]。同理，样品置于透射率样品托架上时可获得样品的透射率数据。

分别多次对 Labsphere 标准白板的光谱反射率、四种标准滤波片的光谱透射率、JGS1 标准石英玻璃的光谱透射率进行测量并与中国计量科学院的标准值或厂家给定值进行对比，误差均小于 3%，表明所采用的光谱测量系统具有可靠的测量精度及稳定性。

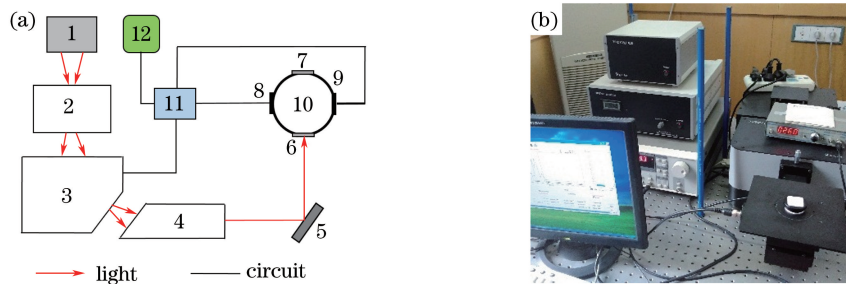


图 2 泡沫材料光谱特性测量系统。(a)光电路示意图；(b)实物图

Fig. 2 Measuring system for spectral properties of foam materials. (a) Path of light and circuit; (b) photograph of system

## 3 数值模拟

### 3.1 泡沫镍结构重建

利用泡沫镍中的固相(金属镍)和气相(空气)对射线的吸收能力不同的原理,可以用 CT 技术对其进行多角度的扫描成像,然后利用得到的多个二维灰度图像进行三维重构,从而获得样品的三维重建结构<sup>[18-19]</sup>。利用 CT 机(nanoVoxel-2700,三英精密仪器股份有限公司,中国)获得了泡沫镍的重建结构,重建精度为  $20 \mu\text{m}$ <sup>[20]</sup>。用于重建的泡沫镍样品规格为:直径  $D=18.8 \text{ mm}$ ,厚度  $L=9.5 \text{ mm}$ ,孔隙率  $\phi=0.899$ ,孔密度  $n_{\text{PPI}}=20$ 。重建样品如图 3(a)所示,重建后的泡沫结构如图 3(b)所示,重建体上端面处的切片俯视图如图 3(c)所示。

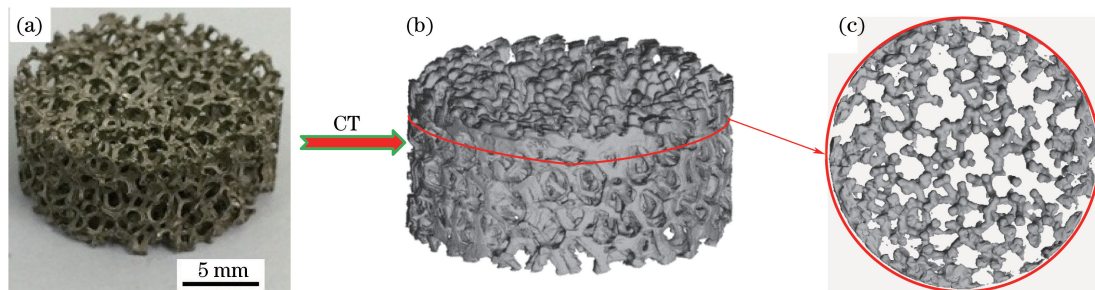


图 3 (a)泡沫镍重建样品；(b)重建结构；(c)上端面处切片

Fig. 3 (a) Sample of Ni foam; (b) reconstructed structure; (c) foam slice near upper boundary



### 3.2 辐射传输计算

获得泡沫镍的 CT 扫描结构后,根据 2.1 节泡沫镍辐射特性测量原理,可建立其孔隙尺度辐射传输模型,模拟得到相应的法向-半球辐射特性。

为计算泡沫镍中的辐射传输,作如下假设<sup>[21]</sup>: 1) 辐射传输满足几何光学判据;2) 固相(金属镍)视为不透明介质,气相(空气)视为透明介质;3) 泡沫镍肋筋表面粗糙,光线发生漫反射;4) 忽略泡沫肋筋边缘的衍射效应。基于以上假设和 MC 法基本原理<sup>[22]</sup>,建立泡沫镍孔隙尺度辐射传输模型[图 1(a)、(b)],肋筋间的辐射传输如图 4 所示。

数值计算时,平行光线沿泡沫重建体端面法向射入,分别记录最终被泡沫吸收、反射回入射半球空间、透过泡沫进入对侧半球空间的光线数,从而得到

$$\alpha_\lambda = N_a / N_0, \quad (5)$$

$$\rho_\lambda = N_\rho / N_0, \quad (6)$$

$$\tau_\lambda = N_\tau / N_0, \quad (7)$$

式中  $N_a$ 、 $N_\rho$ 、 $N_\tau$ 、 $N_0$  分别为泡沫吸收光线数、反射回入射半球空间的光线数、透过泡沫进入对侧半球空间的光线数、发射光线总数。

MC 法求解泡沫镍辐射特性的简要流程如图 5 所示。首先,镍的金属镜面方向光谱反射率  $\rho_{2\lambda}(\theta)$  计算公式为<sup>[23]</sup>

$$\rho_{2\lambda}(\theta) = \frac{1}{2} \left[ \frac{(n_2 - n_1 / \cos \theta)^2 + \kappa_2^2}{(n_2 + n_1 / \cos \theta)^2 + \kappa_2^2} + \frac{(n_2 - n_1 \cos \theta)^2 + \kappa_2^2}{(n_2 - n_1 \cos \theta)^2 + \kappa_2^2} \right], \quad (8)$$

式中  $\theta$  为当地坐标系(当前网格面元)下的光线入射角; $n$  和  $\kappa$  分别为金属镍复折射率  $m = n - i\kappa$  的实部和虚部,由文献[23]查得;下标 1 和 2 分别表示气相(空气)和固相(金属镍)。(8) 式可由下述经验公式转化为金属镍粗糙表面的方向光谱吸收率<sup>[24]</sup>:

$$\alpha_{2\lambda}^r(\theta) = 1 - 2.8\rho_{2\lambda}^3(\theta) + 2.8\rho_{2\lambda}^2(\theta) - \rho_{2\lambda}(\theta). \quad (9)$$

光线在肋筋表面发生反射时,先根据兰贝特定律得出漫反射方向在当地坐标系下的反射天顶角  $\theta'$  与圆周角  $\psi$ <sup>[22]</sup>,

$$\theta' = \arccos \sqrt{1 - R_\theta}, \quad \psi = 2\pi R_\psi, \quad (10)$$

式中  $R_\theta \in [0, 1]$ 、 $R_\psi \in [0, 1]$  分别为天顶角和圆周角的均匀分布随机数。将漫反射天顶角和圆周角转换到系统坐标系下,

$$\mathbf{m}_d = \begin{pmatrix} \cos A_X & \cos A_Y & \cos A_Z \\ \cos B_X & \cos B_Y & \cos B_Z \\ \cos C_X & \cos C_Y & \cos C_Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \theta' \cos \psi \\ \sin \theta' \sin \psi \\ \cos \theta' \end{pmatrix}, \quad (11)$$

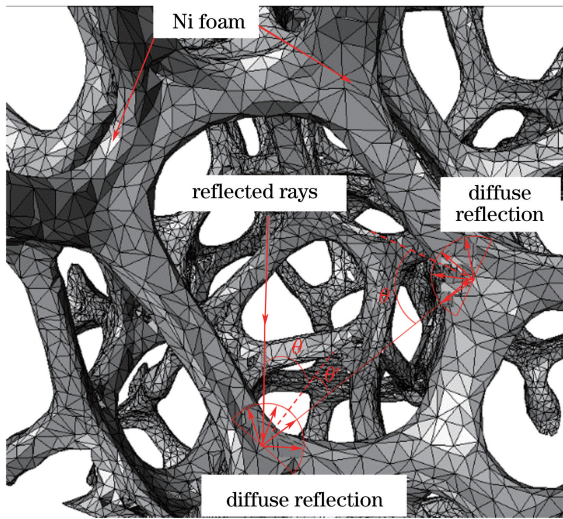


图 4 泡沫镍孔隙尺度辐射传输示意图

Fig. 4 Schematic of pore-scale radiative transfer of Ni foam

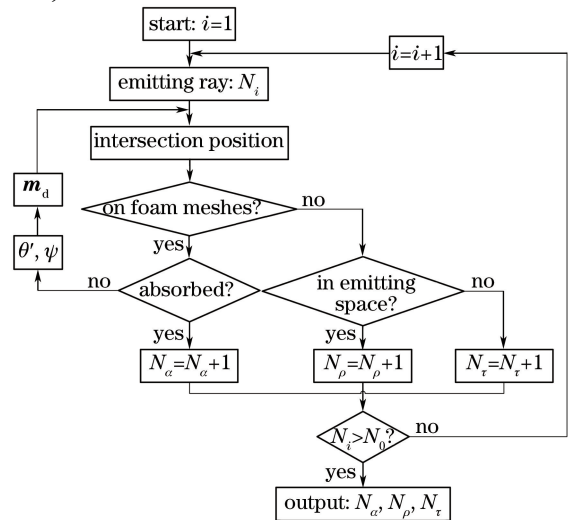


图 5 泡沫镍辐射特性计算流程图

Fig. 5 Flowchart of computing radiative properties of Ni foam



式中  $m_d$  为系统坐标系下的漫反射方向矢量;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为当地坐标系坐标轴与系统坐标系坐标轴的夹角; 下标  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别表示不同坐标系下的三个坐标轴。

MC 法求解一般表面辐射传输的可靠性已由文献[22]验证, 针对 CT 扫描结构的 MC 法计算可靠性分析见文献[20]。建立的泡沫镍孔隙尺度辐射传输模型的有效性将由下文的实验测量证实。另外, 发射光线数  $N_0=1\times 10^6\text{ mm}^{-2}$  时已满足光线取样数的无关性检验, 但考虑到泡沫结构的随机性会造成一定的不确定性, 取发射光线总数  $N_0=1\times 10^7\text{ mm}^{-2}$ 。

## 4 光谱辐射特性结果分析

### 4.1 光谱辐射特性的实验与数值分析

首先分析泡沫镍辐射特性随光谱波长  $\lambda$  及样品厚度  $L$  的变化。图 6 为厚度  $L=2, 4, 6, 8\text{ mm}$  的泡沫镍样品的法向-半球反射率/透射率和法向-介质吸收率的实验与数值结果, 泡沫镍辐射特性随光谱波长及样品厚度的变化特点归纳如下。

1) 除反射率在  $\lambda > 1\text{ }\mu\text{m}$  后偏差较大外, 数值计算所得光谱辐射特性在所测光谱范围内 ( $0.4\sim 2.2\text{ }\mu\text{m}$ ) 与实验结果基本吻合。四种厚度泡沫镍样品的吸收率数值结果与实验值相比, 最大相对偏差 11.4%, 透射率最大相对偏差 7.6%, 反射率最大相对偏差 26.2%。由于反射率多为端面肋筋的一次反射贡献, 端面肋筋直接受到切割断裂形态的影响[图 3(c)], 而人工切割的断面具有偶然性, 因此造成反射率的计算值与测量值存在一定偏差。数值模拟采用了同规格的真实泡沫材料进行结构重建, 并采用严格的 MC 法进行辐射传输计算, 所得数值结果接近真实状况<sup>[25]</sup>, 故而大多数计算值与实验值吻合较好。数值计算结果与实验测量结果的吻合表明, 本文建立的泡沫镍孔隙尺度辐射传输模型在计算其光谱辐射特性方面具有可靠性和有效性。

2) 样品厚度一定时, 随着入射波长增长, 吸收率逐渐降低, 反射率逐渐升高, 而透射率变化很小。  $L=4\text{ mm}$ ,  $\Delta\lambda=0.4\sim 2.2\text{ }\mu\text{m}$  时, 实验测得吸收率由 80.5% 降为 61.6%, 反射率由 8.9% 增加至 22.4%。一方面, 短波辐射能量更容易进入肋筋表面的凹槽、褶皱等微细结构, 从而造成辐射能量的多次吸收; 随着入射波长增长, 更多的长波辐射能量被直接反射回孔隙空间, 故而吸收率下降, 反射率上升。另一方面, 透射率主要由材料的衰减系数决定, 而泡沫材料的衰减系数一般仅取决于几何结构参数(如孔隙率、孔径等), 在较窄光谱范围内随波长变化很小<sup>[14]</sup>, 故透射率几乎不受入射波长影响。

3) 入射光谱波长一定时, 随着泡沫样品厚度增加, 吸收率逐渐升高并趋于稳定, 透射率逐渐降低至 0, 反射率变化较小。  $\lambda=1.5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L=2, 4, 6, 8\text{ mm}$  时, 实验测得吸收率依次为 41.0%, 67.2%, 68.9%, 74.6%, 透

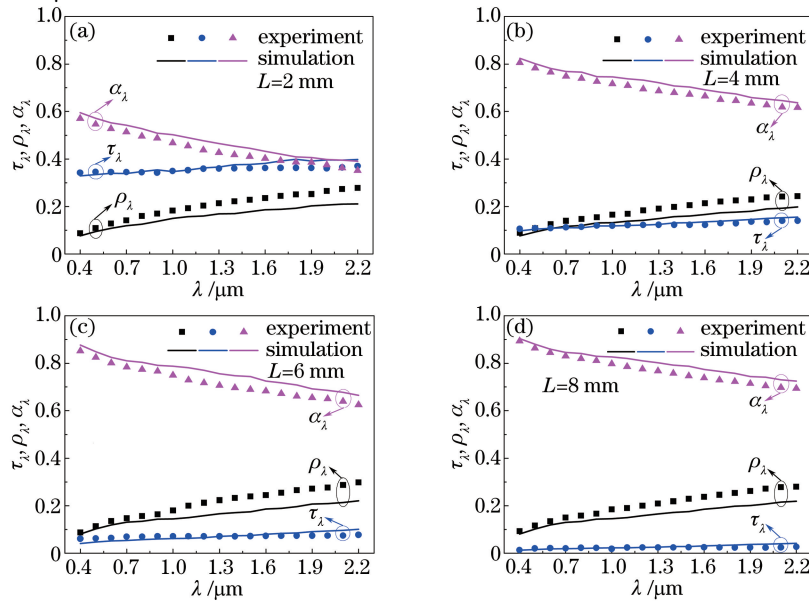


图 6 泡沫镍光谱辐射特性实验与数值结果

Fig. 6 Spectral radiative properties of Ni foam from experiment and simulation

射率依次为 36.1%, 12.3%, 7.1%, 2.4%。泡沫镍样品越厚, 辐射能量潜在的传播路径越长, 则被吸收的份额越多, 透过样品的能量会相应减少, 因而吸收率上升、透射率下降; 同时, 反射率主要受光源入射端面[图 3(c)]的一次反射影响<sup>[26]</sup>, 因而增加样品厚度(增加二次反射)对反射率影响较小。

#### 4.2 孔隙尺度辐射特性分布

研究孔隙尺度辐射特性分布与纹理结构的关系对理解泡沫辐射传输具有重要作用, 而限于测量手段和测量精度, 目前孔隙尺度辐射特性分布无法直接通过实验测量获得。4.1 节对比验证了所建立的泡沫镍孔隙尺度辐射传输模型的有效性, 因此通过基于真实 CT 结构的辐射传输模型可计算获取其孔隙尺度辐射特性分布。

图 7 为厚度  $L=9.5$  mm 的泡沫镍的法向-半球反射率和法向-介质吸收率分布, 色条表示反射率和吸收率的大小。此时样品足够厚, 光谱透射率几乎为 0。对比泡沫重建体的端面切片[图 3(c)]可以直观看出, 辐射特性分布强烈依赖于局部纹理结构, 肋筋处的反射率明显高于泡沫孔隙中的反射率, 而吸收率分布则恰好相反。统计了所有可辨识的肋筋和孔隙, 以  $\lambda=1.5$   $\mu\text{m}$  为例, 孔隙中的平均吸收率是肋筋上的 1.5 倍, 而肋筋上的平均反射率则达到孔隙中的 3.7 倍。肋筋和孔隙上的辐射特性分布出现强烈差异, 原因在于当入射辐射能射向泡沫端面处的肋筋时, 未被材料吸收的辐射能量直接被反射回发射半球空间(一次反射), 使端面肋筋处呈现较高的反射率; 与此相反, 射入孔隙中的辐射能量能够继续向泡沫内部传输, 被泡沫内部大量的肋筋骨架多次吸收, 形成辐射黑腔效应, 导致孔隙中的吸收率明显升高。

另外, 辐射特性分布在肋筋与孔隙处的差异并未因入射波长不同而减弱或消失, 表明至少对可见光和近红外辐射源, 此类分布差异始终存在。

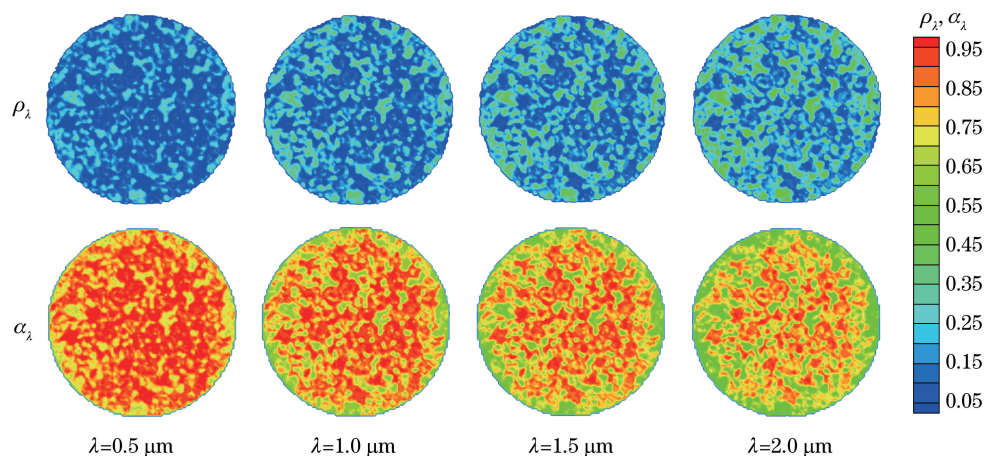


图 7 泡沫镍光谱辐射特性孔隙尺度分布 ( $L=9.5$  mm)

Fig. 7 Pore-scale distribution of spectral radiative properties of Ni foam ( $L=9.5$  mm)

## 5 结 论

提出了泡沫材料孔隙尺度辐射特性分布的获取方法: 利用 CT 技术重建泡沫镍的真实孔隙结构, 建立孔隙尺度辐射传输模型, 实验验证模型的有效性, 数值计算得到泡沫材料孔隙尺度的辐射特性分布。数值计算结果与实验测量结果基本吻合, 证明所建立的泡沫镍孔隙尺度辐射传输模型在计算其光谱辐射特性方面具有可靠性和有效性。泡沫镍厚度一定时, 随着入射波长增长, 吸收率逐渐降低, 反射率逐渐升高, 透射率变化很小; 入射波长一定时, 随着泡沫镍厚度增加, 吸收率逐渐升高并趋于稳定, 透射率逐渐降低至 0, 反射率变化较小。泡沫镍孔隙尺度辐射特性分布强烈依赖于局部纹理结构。对于孔隙率 0.899, 孔密度 20 的泡沫镍, 在入射波长 1.5  $\mu\text{m}$  时, 泡沫孔隙中的平均吸收率是肋筋上的 1.5 倍, 而肋筋上的平均反射率则达到孔隙中的 3.7 倍。

## 参 考 文 献

- [1] Wang F Q, Guan Z N, Tan J Y, *et al.* Transient thermal performance response characteristics of porous-medium receiver heated by multi-dish concentrator[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 75:

36-41.

- [2] Huang Y, Chao C Y H, Cheng P. Effects of preheating and operation conditions on combustion in a porous medium [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(21): 4315-4324.
- [3] Fan Xuji. On the radiative heat transfer in the porous medium[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(1): 8-13.  
范绪箕. 多孔介质隔热材料中的辐射热传递分析[J]. *航天器工程*, 2011, 20(1): 8-13.
- [4] Bedarev I A, Mironov S G, Serdyuk K M, *et al.* Physical and mathematical modeling of a supersonic flow around a cylinder with a porous insert[J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2011, 52(1): 9-17.
- [5] Coquard R, Rousseau B, Echegut P, *et al.* Investigations of the radiative properties of Al-NiP foams using tomographic images and stereoscopic micrographs[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(5-6): 1606-1619.
- [6] Zhao C Y, Lu T J, Hodson H P. Thermal radiation in ultralight metal foams with open cells[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(14): 2927-2939.
- [7] Xu Zhiguo, Wang Meiqin, Zhao Changying. Morphology effect on radiation performance of open-cell metal foams[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2015, 14(4): 267-271.  
徐治国, 王美琴, 赵长颖. 形貌对通孔金属泡沫辐射性能的影响[J]. *热科学与技术*, 2015, 14(4): 267-271.
- [8] Dietrich B, Fishedick T, Heissler S, *et al.* Optical parameters for characterization of thermal radiation in ceramic sponges: Experimental results and correlation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 79: 655-665.
- [9] Sacadura J F, Baillis D. Experimental characterization of thermal radiation properties of dispersed media [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2002, 41(7): 699-707.
- [10] Cui F Q, He Y L, Cheng Z D, *et al.* Numerical simulations of the solar transmission process for a pressurized volumetric receiver[J]. *Energy*, 2012, 46(1): 618-628.
- [11] Zmywaczyk J, Koniorczyk P. Numerical solution of inverse radiative-conductive transient heat transfer problem in a grey participating medium[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2009, 30(4): 1438-1451.
- [12] Das R, Mishra S C, Uppaluri R. Retrieval of thermal properties in a transient conduction-radiation problem with variable thermal conductivity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(11): 2749-2758.
- [13] Petrasch J, Haussener S, Lipinski W. Discrete vs. continuum-scale simulation of radiative transfer in semitransparent two-phase media[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112: 1450-1459.
- [14] Coquard R, Baillis D, Randrianalisoa J. Homogeneous phase and multi-phase approaches for modeling radiative transfer in foams[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50(9): 1648-1663.
- [15] Randrianalisoa J, Baillis D. Thermal conductive and radiative properties of solid foams: Traditional and recent advanced modelling approaches[J]. *Comptes Rendus - Physique*, 2014, 15(8-9): 683-695.
- [16] Rousseau B, de Sousa Meneses D, Echegut P, *et al.* Textural parameters influencing the radiative properties of a semitransparent porous media[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50(2): 178-186.
- [17] Huang Xing, Zhang Xiaoxian, Shuai Yong, *et al.* Spectral radiation property investigation of iron based oxide micro-particles[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2011, 66(s1): 308-313.  
黄 兴, 张筱娟, 帅 永, 等. 铁基氧化物微颗粒的光谱辐射特性[J]. *化工学报*, 2011, 66(s1): 308-313.
- [18] Tan Hai, Wang Dadong, Xue Yanling, *et al.* Parallelization of 3D thinning algorithm for extracting skeleton of micro-CT vasculature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1117003.  
谭 海, 王大东, 薛艳玲, 等. 显微 CT 血管系统三维结构的骨架细化算法并行化设计实现[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1117003.
- [19] Mao Lingtao, Chiang Fupen, Yuan Zexun. Three-dimensional displacement measurement in solid using digital volumetric speckle photography based on computer tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0312001.  
毛灵涛, Chiang Fupen, 袁则循. 基于 CT 的数字体散斑法测量物体内部三维变形场[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0312001.
- [20] Li Yang, Xia Xinlin, Chen Xue, *et al.* Simulation study on accelerated pore-scale radiative transfer of Ni foam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1124001.  
李 洋, 夏新林, 陈 学, 等. 泡沫镍孔尺度辐射传递加速模拟研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1124001.
- [21] Coquard R, Rochais D, Baillis D. Modeling of the coupled conductive and radiative heat transfer in NiCrAl from photothermal measurements and X-ray tomography[J]. *Special Topics and Reviews in Porous Media*, 2011, 2(4): 249-265.
- [22] Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua, *et al.* Numerical calculation of infrared radiative transfer[M]. Harbin: Press of



Harbin Institute of Technology, 2006: 157-163.

谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射传输的数值计算[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 157-163.

[23] Siegel R, Howell J R. Thermal radiation heat transfer[M]. New York: Taylor and Francis, 2002.

[24] 克利克苏诺夫. 红外技术原理手册[M]. 俞福堂, 译. 北京: 国防工业出版社, 1986.

[25] Suter S, Steinfeld A, Haussener S. Pore-level engineering of macroporous media for increased performance of solar-driven thermochemical fuel processing[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78: 688-698.

[26] Randrianalisoa J, Baillis D. Radiative transfer in dispersed media: Comparison between homogeneous phase and multiphase approaches[J]. Journal of Heat Transfer, 2010, 132(2): 023405.