

〈无损检测〉

红外热成像技术在孔隙尺度下多孔介质 相变过程表征中的应用与优化研究

王淑^{1,2}, 冷航^{1,2}, 陈彦伶^{1,2}, 王昌涛^{1,2}, 陈周林^{1,2}, 杨英英^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘要: 红外热成像技术是一种应用广泛、发展较快的新型数字化无损检测技术,但其目前仍存在测量精度较低、图像噪声影响较大、数据量巨大等缺点。本文利用红外热成像技术,在孔隙尺度下对多孔材料内石蜡和水的相变过程进行了表征,并对红外热成像测温精度和相界面的表征进行了优化。首先通过添加反射表面(褶皱的铝箔)获取测试过程中环境反射温度,以修正目标物体温度;同时通过引导滤波和主成分热像法(Principal component thermography, PCT)对红外热成像图片降噪,提高红外热像仪对温度场及相界面的检测精度。实验结果表明:环境反射温度修正法可以排除测试环境温度变化对红外测温结果的影响;引导滤波法选取合适的滤波半径和滤波参数后相界面轮廓更加清晰,并取得较好的降噪效果;主成分热像法除了降噪效果好,使相界面更清晰,并使处理数据量减少了4个量级。上述3种优化方法为红外热成像技术在孔隙尺度下多孔介质相变过程表征中的应用提供了技术支持。

关键词: 红外无损检测; 孔隙尺度; 多孔介质; 相变过程; 降噪优化

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2022)03-0294-09

Application of Infrared Thermography for Characterizing Phase Change Process of Porous Media at Pore Scale

WANG Shu^{1,2}, LENG Hang^{1,2}, CHEN Yanling^{1,2}, WANG Changtao^{1,2}, CHEN Zhoulin^{1,2}, YANG Yingying^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: Infrared thermography (IRT) is a new type of digital nondestructive testing technology that has developed rapidly and has found wide use. However, it still has some shortcomings, such as low accuracy, image noise, and requires a large amount of data. In this study, the phase change processes of paraffin and water in porous materials are characterized by IRT technology at pore scale, and the temperature measurement accuracy and phase interface characterization are optimized. First, the reflective surface (wrinkled aluminum foil) is added to obtain the environmental reflective temperature in the test process to correct the target object temperature; subsequently, guided filtering and principal component thermography (PCT) are used to reduce the noise of IRT images to improve the detection accuracy of the infrared thermal imager for temperature field and phase interface. The experimental results show that the temperature measured by the environmental reflection temperature correction method is closer to that measured by a thermocouple after eliminating the influence of changing environmental temperature; after selecting an appropriate filter radius and filter parameters, the contour of phase interface is clearer, and a better noise reduction effect is obtained. In addition to the good noise reduction effect, PCT makes the phase interface clearer and reduces the amount of processed data by four orders of magnitude. These three processing methods provide better optimization methods and

收稿日期: 2021-08-14; 修订日期: 2021-10-16.

作者简介: 王淑(1999-),女(白族),云南楚雄人,本科生,研究方向为无损检测、相变储能技术及应用,Email: wangshu990810@163.com.

通信作者: 杨英英(1988-),女,河北保定人,硕导,副教授,研究方向为无损检测、建筑节能、相变储能技术及应用,Email: yingyingyang@usst.com.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(52006146);上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1434700);上海高校青年东方学者岗位计划.

theoretical support for infrared thermal imaging technology to characterize the phase transition process of porous media at the pore scale.

Key words: infrared thermography, non-destructive testing, porous media, phase change process, noise reduction optimization

0 引言

无损检测逐渐成为工业生产中不可或缺的技术手段。无损检测技术是指在不损坏被检测物体内部结构的前提下,应用物理方法检测物体内部或表面的结构、状态及性能,检查物质内部是否存在缺陷,从而判断被检测物体是否合格,并评价其适用性。常用的无损检测技术有射线检验、超声波检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测^[1]。利用红外图像对设备表面温度场进行测定进而评估其状态的红外热像检测技术也是无损检测技术之一。近年来,红外热成像无损检测技术已愈发广泛地运用在航空航天^[2]、石油化工^[3]、电子电力^[4]、文物保护^[5]以及医疗^[6]等领域。

相比于传统无损检测技术,红外无损检测技术有测量速度快、远距离非接触探测、测量结果直观形象、测温范围广、测量精度高、易于实现自动化和实时检测等特点^[7]。

红外无损检测技术仍处于发展阶段,有许多问题需要解决。比如红外热像仪在拍摄目标物体时容易受到周围环境温度的影响,导致拍摄到的目标物体温度与实际温度有所偏差,所以需要尽可能减少环境温度的影响。此外,拍摄得到的红外热像图会因时间噪声及空间噪声造成图像不清晰,导致红外图像的部分信息被覆盖,从而影响红外测温精度。所以如何降低噪声,提高信噪比是一个问题。同时,在处理序列图像时,数据量巨大,如何简便又高效地处理这些数据也是需要解决的问题之一。

另一方面提高能源利用率对于实现碳中和具有重要意义,其中储能是一个关键途径。相变储能因其密度大,输出稳定,具有显热储能难以比肩的优势^[8],被广泛应用在各个领域,可以利用相变材料实现高效的热能储存来解决能源浪费的问题。

目前常用的相变材料有有机相变材料(如石蜡等)和无机相变材料(如水等)。其中有机相变材料比如石蜡具有稳定、成本低、低腐蚀等优点,但作为储热介质的缺点是封装问题和导热系数相对较小导致相变循环效率低。目前改进方法有提高相变材料的导热系数,即以泡沫金属这种高导热多孔材料作为载体^[9]。泡沫金属是孔隙率高达90%以上的新型轻质材料,散热性能较强,以泡沫金属作为吸附相变材料石

蜡的载体,既解决了封装问题,又在一定程度上提高了导热效率。

同时水作为相变蓄冷材料,广泛应用在工业建筑、空调制冷、供冷系统等领域,比如基于冰蓄冷技术的冰蓄冷空调系统^[10]和结合消防水池的水蓄冷系统的广泛应用等。因此,研究相变材料(如石蜡、水等)在多孔介质内的相变过程具有现实意义。但是目前国内外对于多孔介质内相变过程的实验研究大多是宏观上,对于微观或孔隙尺度的研究大多集中在数值计算模拟^[11-12],缺乏可视化实验研究。

本文以多孔介质内石蜡和水的相变过程为研究对象,利用红外无损检测技术,研究孔隙尺度下石蜡在泡沫金属中融化及水在多孔树脂中结冰的相变过程,通过环境反射温度修正法、引导滤波降噪^[13]和主成分热像法^[14],优化红外热成像图片,提高红外热像仪检测精度,进而为在孔隙尺度下多孔介质相变过程的表征提供更好的技术支持。

1 影响红外测温精度的因素分析及优化方法

1.1 红外热像仪测温原理

所有温度高于绝对零度的物体都会释放热辐射,而物体释放的能量密度由物体的温度决定。除了直接释放辐射,物体在接收所处环境的入射辐射时,会吸收、反射一部分,或让一些能量直接通过。根据图1^[15]所示,红外相机接收到的总辐射 W_{tot} 有3个来源:目标物体所释放的辐射 W_{obj} ,物体反射环境释放的辐射 W_{refl} 以及大气辐射 W_{atm} 。这3部分的辐射在穿过大气时候都会衰减。由于大气吸收了一部分的辐射,大气本身也会发出辐射(基尔霍夫定律)。可以用以下方程表示:

$$W_{tot} = W_{obj} + W_{refl} + W_{atm} \quad (1)$$

$$W_{obj} = \varepsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{obj}^4 \quad (2)$$

$$W_{refl} = (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 \quad (3)$$

$$W_{atm} = (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 \quad (4)$$

式中: ε_{obj} 为目标物体的发射率; τ_{atm} 为大气的透射率; σ 为斯蒂芬玻尔兹曼常数; T_{obj} 为目标物体的温度; T_{refl} 为反射温度; T_{atm} 为大气温度。

所以红外相机接收到的总辐射 W_{tot} 可以表示为:

$$W_{tot} = \varepsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 + (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 \quad (5)$$

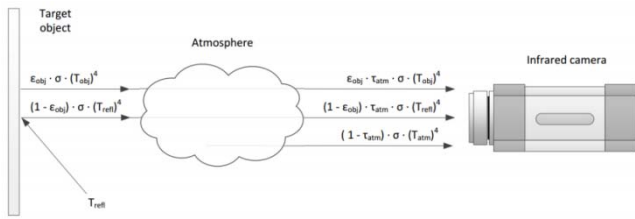


图1 红外热像仪测温原理图^[15]

Fig.1 Schematic of IR camera when measuring temperature^[15]

计算得到目标物体的温度:

$$T_{obj} = \left(\frac{W_{tot} - (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 - (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4}{\varepsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

在红外热像仪的实际使用中,需要已知被测物体的被测距离、热范围、光圈、透镜度、发射率、环境温度、湿度、滤光片类型等参数,从而去计算目标物体的温度。

1.2 环境反射温度及修正方法

在利用红外测温仪测量被加热物体的温度时,得到结果通常比用热电偶测得的温度高出1~2℃,然而在冷却过程中,这种偏差却很小,所以我们假设这种现象产生的原因是环境温度的迅速升高。

为了减小这种误差,需要利用一种新的温度计算方法,来减小环境温度升高所带来的影响。我们通过布置一个褶皱的铝箔测得环境温度,目标表面的温度可以利用测得的环境温度进行修正。

铝箔的总辐射为:

$$W_{tot}^{Alu} = \varepsilon_{Alu} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{Alu}^4 + (1 - \varepsilon_{Alu}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 + (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 \quad (7)$$

视铝箔为一个反射体,发射率 $\varepsilon_{Alu}=0$,公式(7)可以简化为:

$$W_{tot}^{refl} = W_{tot}^{Alu} = \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 + (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 \quad (8)$$

即可通过红外相机输出的辐射量求出环境温度。

公式(5)左端利用玻尔兹曼定律展开:

$$\varepsilon \sigma T_{obj,cam}^4 = \varepsilon \tau \sigma T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon) \tau \sigma T_{refl}^4 + (1 - \tau) \sigma T_{atm}^4 \quad (9)$$

当红外相机与物体距离近似为0时,大气透射率 τ 近似为1,公式(9)可以写成:

$$\varepsilon \sigma T_{obj,cam}^4 = \varepsilon \sigma T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon) \sigma T_{refl}^4 \quad (10)$$

于是可算出目标物体的实际温度为:

$$T_{obj} = \left(\frac{\varepsilon T_{obj,cam}^4 - (1 - \varepsilon) T_{refl}^4}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (11)$$

1.3 红外热成像噪声及其修正

红外热像仪的噪声分为时间噪声和空间噪声两种。时间噪声是指在目标辐射不随时间变化的前提下,像素信号强度随时间的变化。空间噪声是指当热像仪观察到相同的均匀物体时,不同像素的输出信号之间的差异。在实际的观察过程中,图像的空间噪声往往大于时间噪声^[16]。

图像空间噪声主要包括背景噪声、放大器噪声、“闪烁”噪声、产生-复合噪声、热噪声等。背景噪声主要由周围环境的辐射噪声引起;放大器噪声产生原因是其内部自由电子无规则运动产生电流,导致电阻两端产生噪声电压;“闪烁”噪声与频率相关,当频率高于某一特定值时,其可忽略不计;产生-复合噪声是由检测器输出电流的波动引起的;热噪声是所有导电材料都有的^[17]。这些噪声源的综合作用可能会导致红外图像的部分信息被覆盖,从而影响测量精度,因此图像去噪十分重要。

经典的红外图像噪声抑制的方法主要分为帧内降噪与帧间降噪两类。

1.3.1 帧内降噪-引导滤波

原始图像通过引导图像进行滤波的滤波方式称为引导滤波。该滤波的主要作用是对原始图像进行降噪并且融合导图的边缘特征,消除图像内伪轮廓和噪声。

输入一个图像 p ,通过引导图像 I (引导图像 I 可直接取输入图像 p),经滤波后得到输出图像 q 。对于 i 位置的像素点,滤波输出为一个加权平均值:

$$q_i = \sum_i W_i(I) p_i \quad (12)$$

式中: i 表示像素点坐标; $W(I)$ 是权重函数,只与引导图像 I 相关。假设引导滤波中输出图像 q 和引导图像 I 在滤波窗口 ω_k 中存在线性关系,有:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (13)$$

式中: a_k 和 b_k 是当窗口为 ω_k 时线性函数的系数,每一个 ω_k 都对应一个 a_k 和 b_k 。

对于图像中的其他非边缘并且不平滑区域可看作是噪声 n ,有:

$$q_i = p_i - n_i \quad (14)$$

据需求,噪声 n 越小越好,所以利用最小二乘法来最小化噪声的平方和,以此计算出 a_k, b_k 。

$$a_k = \frac{p_k I_k - p_k I_k}{\sigma k^2 + \varepsilon} \quad (15)$$

$$b_k = \overline{p_k} - a_k \overline{I_k} \quad (16)$$

式中: $\overline{p_k}$ 是输入图像 p 在窗口 ω_k 中的均值。 $\overline{I_k}$ 是引导图像 I 在窗口 ω_k 中的均值。 σ_k^2 是 I 在窗口 ω_k 中的方差。 ε 是滤波参数, 用于判断引导滤波对图像的作用大小, ε 越大, 作用效果越强。

与传统的滤波核函数相比, 引导滤波使用了邻域内的像素均值和方差作为局部估计, 能够根据图像内容自适应调整输出权重值, 使其具有良好的边缘保持和细节增强性能。

1.3.2 帧间降噪-主成分热像法

考虑到红外仪测温数据量巨大, 将主成分热像法 (principal component thermography, PCT) 引入到红外仪测温研究中, 将二维图像利用分解算法分解为多个子图, 通过对子图进行选择重构来压制随机噪声, 能有效提高温度信号的信噪比, 对有效信息的畸变小, 并减少了进行信源空间压缩的后续工作量。

首先, 将红外热像仪输出的表示空间和时间变化的三维热图数据 $T_{(x,y),t}$ 重构为二维矩阵 $A_{m \times n}$ 。其中 m 为红外图像每帧像素点个数, 表征空间变化, n 为帧数, 表征时间变化。通过重构, 将三维矩阵降为二维矩阵 $A_{m \times n}$ 如图 2 所示。

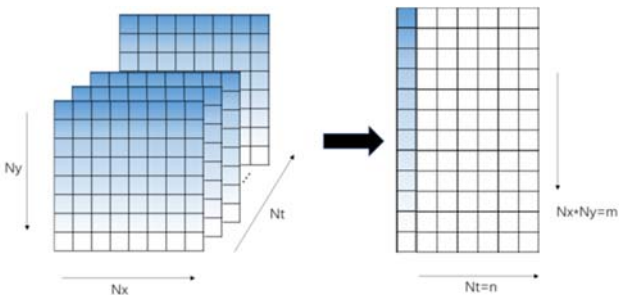


图 2 将三维矩阵重构为二维矩阵

Fig.2 The three-dimensional matrix is reconstructed into a two-dimensional matrix

奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 算法是本征图像滤波算法中最基础的算法。重构后的二维矩阵 A 通过 SVD 分解从温度图矩阵中提取出空间和时间信息, 其结果可以表示为:

$$A_{m \times n} = U_{m \times m} \cdot B_{m \times n} \cdot V_{n \times n}^T \quad (17)$$

式中: B 是由奇异值 b_i 按照从大到小顺序构成的一个对角矩阵 ($b_1 > b_2 > \dots > b_r$), 主对角线元素为 b_i , 其余元素为 0, r 为矩阵 A 的秩。

$$B = \begin{bmatrix} b_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & b_r \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: U 是 AA^T 的特征值向量构成的 $m \times m$ 的正交矩阵, 称为经验正交函数 (Empirical orthogonal functions,

EOF), 用于描述数据的空间变化。 V 是由 $A^T A$ 的特征值向量构成的 $n \times n$ 的正交矩阵, V^T 表示 V 的共轭转置矩阵, 代表时间变化 (principal components, PC)。

随着 r 增大, b_i 的下降速度很快, 奇异值 b_i 的大小代表着第 i 个子矩阵在总矩阵 A 中的权重或贡献, 大奇异值对应的子矩阵代表着主要特征成分, 而小奇异值对应的子矩阵代表着小扰动或噪声。可以通过舍弃小奇异值的项, 从而减小扰动和噪声。

利用截断奇异值分解算法 (truncated singular value decomposition, TSVD) 对矩阵中较小的奇异值赋予零值, 从而减少误差影响。处理后的新矩阵表示:

$$C_j = \sum_{i=1}^j U_i \cdot B_i \cdot V_i^T \quad (19)$$

式中: j 为截断值。为了使新矩阵 C 能够表达矩阵 A 的主要统计信息, 需要通过实验选取最为合适的截断值 j , 使得 P_j 趋近于 1。

$$P_j = \frac{\|A_j\|_2}{\|A\|_2} \times 100 \quad (20)$$

将 SVD 应用于二维矩阵后, 可以重新排列成三维序列, 如图 3 所示。

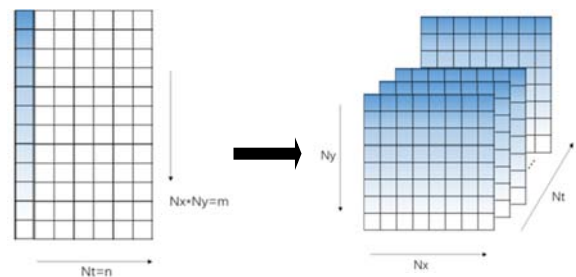


图 3 将二维矩阵重排为三维矩阵

Fig.3 The two-dimensional matrix is reconstructed into a three-dimensional matrix.

2 多孔介质相变过程表征实验

2.1 多孔相变材料制备

2.1.1 泡沫铜/石蜡

石蜡是一种常见的有机相变材料, 因其相变潜热大、稳定, 价格低廉、几乎无相分离和腐蚀性等优点, 故常被用作潜热储能材料, 使用差示扫描量热仪 (differential scanning calorimeter, DSC) 测得本实验所用石蜡的融化温度为 $46 \sim 62^\circ\text{C}$, 测量结果如图 4 所示。

泡沫金属是含有沫泡气孔的新型能源材料, 其具有比重轻、孔径大、孔隙率高, 比表面积大、换热散热性能好、耐热等特点, 泡沫金属分为闭孔和通孔两种, 基于泡沫铜的制备工艺成熟, 应用广泛, 导热系数大等特点, 本实验选用孔径为 60ppi 的通孔泡沫铜 (20

mm×10 mm×10 mm) 为研究对象, 如图 5(a)所示。

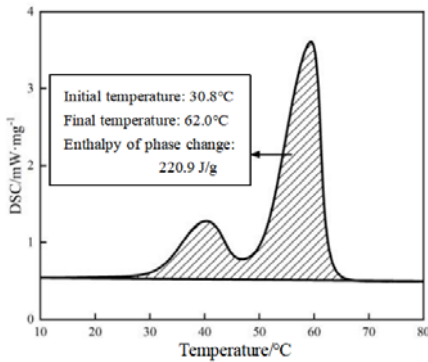


图4 石蜡融化与凝固过程中吸热和放热曲线

Fig.4 Endothermic and exothermic curves of paraffin wax during melting and solidification.

泡沫铜/石蜡复合相变材料通过真空吸附实验制成。在真空条件下使泡沫铜吸附融化后的液态石蜡, 待自然冷却凝固后切去泡沫铜表面多余的石蜡, 得到与原泡沫铜尺寸一致的泡沫铜/石蜡复合式样, 如图 5(b)所示。

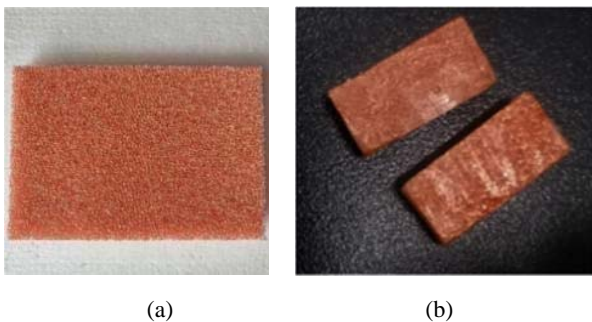


图5 复合相变材料(a)泡沫铜金属; (b)泡沫铜/石蜡复合式样
Fig.5 Phase transition material: (a) Copper foam metal; (b) Copper foam and paraffin composite pattern

2.1.2 多孔树脂/水

水是一种典型的无机相变材料, 无毒、无色、无味, 具有较高的潜热、显热, 物理化学性质稳定, 来源广泛, 常被用作蓄冷材料。本实验采用环氧丙烯酸酯树脂通过 3D 打印的多孔树脂材料, 如图 6 所示, 具有耐水、耐溶剂、耐酸碱、热稳定性好、耐腐蚀性等特点。多孔树脂浸水后放入抽梯型亚克力板中并保障其平整如图 7 所示。

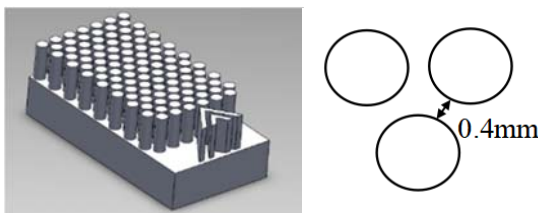


图6 多孔树脂模型(a)三维模型(b)孔间距

Fig.6 Model of porous resin: (a) three-D model; (b) pitch of holes

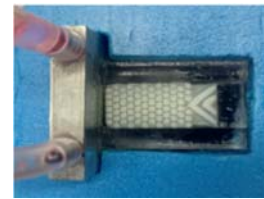


图7 置于抽梯型亚克力板中的多孔树脂

Fig.7 Porous resin placed in ladder-type acrylic board.

2.2 实验系统及装置

多孔介质相变过程表征实验的实验测试系统主要包括恒温槽、铝板、红外热像仪、保温板、热电偶数据采集仪等设备, 如图 8(a)所示。其中热电偶数据采集仪测量复合式样的真实温度变化, 红外摄像机用于孔隙尺度的二维温度场测量, 恒温槽用于控制进水水温, 铝板用于传递热量。

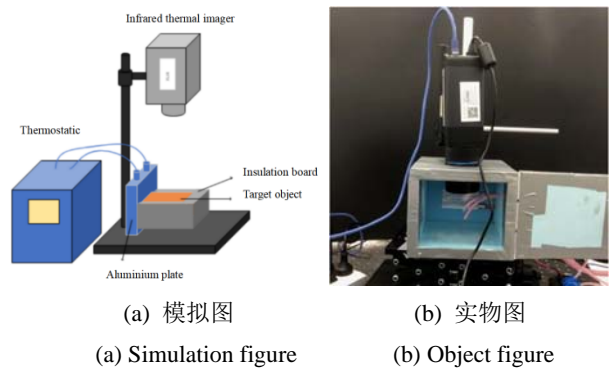


图8 实验系统

Fig.8 Experimental system

实验使用的红外测温设备为 FLIR A655sc, 其光谱范围为 7.5~14 μm、精度为 ±2°C (±3.6°F), 该红外热像仪由 FLIR ResearchIR 软件控制。

将加工完的复合式样置于亚克力板中, 保障其平整, 在旁边贴上褶皱的铝箔来反映环境温度。然后将其固定后平置于红外热像仪下, 如图 8(b)所示。调整好焦距后开始记录数据。(石蜡融化实验通入 80°C 恒温水, 水结冰实验通入 -20°C 恒温水)。

在整个采集数据的过程中, 应尽量保持仪器稳定, 避免人为干扰。一旦仪器晃动, 会导致采集的图像模糊。

3 红外检测实验数据处理

3.1 温度修正

为排除相变过程中变化的环境温度带来的影响, 需要修正目标物体的温度。将红外热像仪测得温度导出后, 使用 Matlab 软件进行数据处理。以石蜡在泡沫金属中融化为例, 取铝箔区域 (图 9 右侧) 像素点的平均温度作为环境温度, 然后根据公式(11)进行温度修正。

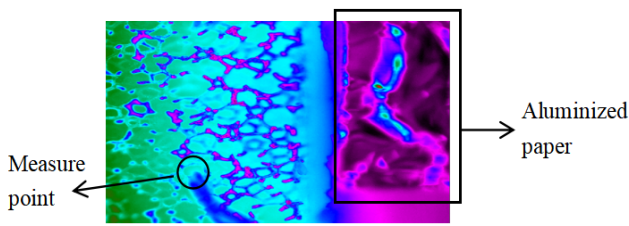


图9 红外拍摄区域

Fig.9 Infrared imaging area

为验证修正后温度的准确性,我们在泡沫铜/石蜡复合式样上布置了1个热电偶,如图9所示,以测量准确的温度。图10为修正后温度与未修正温度及热电偶所测温度的对比。可以看出红外热像仪测得温度总是高于热电偶所测温度,排除变化的环境温度的影响后,更加接近热电偶所测温度。

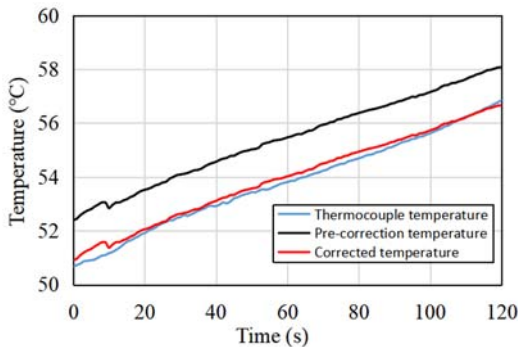


图10 修正后温度、未修正温度与热电偶所测温度的对比

Fig.10 Comparison of corrected temperature, uncorrected temperature and temperature measured by thermocouple

3.2 引导滤波降噪

利用 Matlab 对图像进行引导滤波处理,处理石蜡融化过程时,选取第 205 帧图像利用 Matlab 对图像进行引导滤波处理,进行引导滤波降噪效果分析。选取第 1300 帧对水结冰过程的降噪效果进行分析。

在利用引导滤波降噪时,需要选取不同的滤波窗口大小以及滤波参数观察其效果,如图 11、图 12 所示。图 11(b)、(c)、(d)显示了当滤波半径 $r=4$, 滤波参数分别为 $\epsilon=0.2$ 、 $\epsilon=0.4$ 、 $\epsilon=0.8$ 时引导滤波处理后的效果,可以看出当滤波半径一定时,滤波参数越大,去噪效果越好,如图 11(a)原图的噪点较多,但是随着滤波参数的增大,如图 11(b)、(c)、(d)所示,噪点数量不断减少,可见降噪效果不断提高。但随着滤波参数的增大,图像也变得逐渐模糊,对图像细节的保护不到位。同理,图 11(e)、(f)显示了当滤波参数 $\epsilon=0.4$, 滤波半径分别为 $r=2$ 、 $r=8$ 时引导滤波处理后的效果,当滤波参数相同时,滤波半径越大,噪点数量越多,降噪效果变差。但随着滤波半径的增大如图 11(e)、(c)、(f),图像由模糊变为清晰,可见滤波半径越大对

图像细节保护越好。

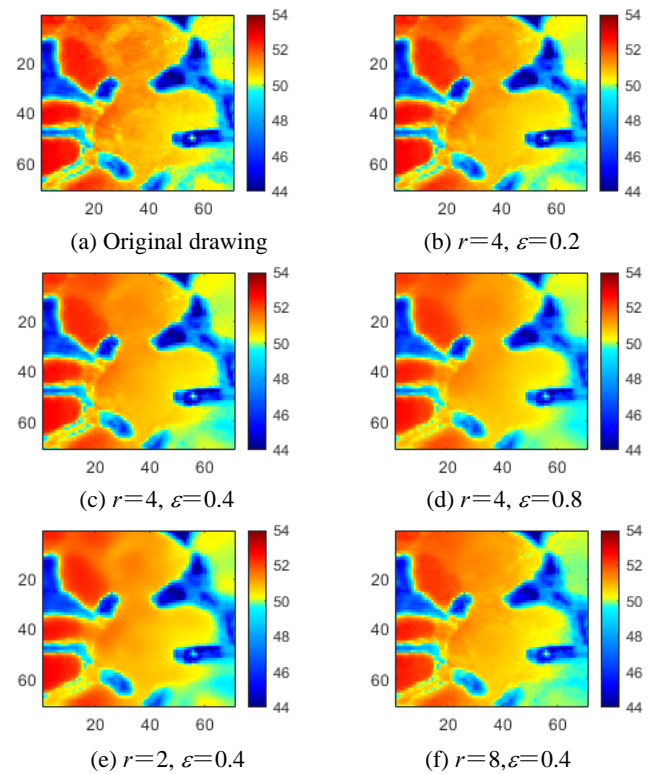


图 11 泡沫铜/石蜡不同滤波窗口及参数下的对比

Fig.11 Comparison of copper foam/paraffin under different filtering windows and parameters

从图 11 可以清晰看出相界面介于红色蓝色之间,与实验测得的石蜡融化温度 50°C 左右一致。以 50°C 等温线为相界面为例,由图 12(a)原图相界面及图 12(b) $r=4$, $\epsilon=0.4$ 引导滤波处理后相界面可以看出引导滤波降噪使相界面轮廓更加清晰。

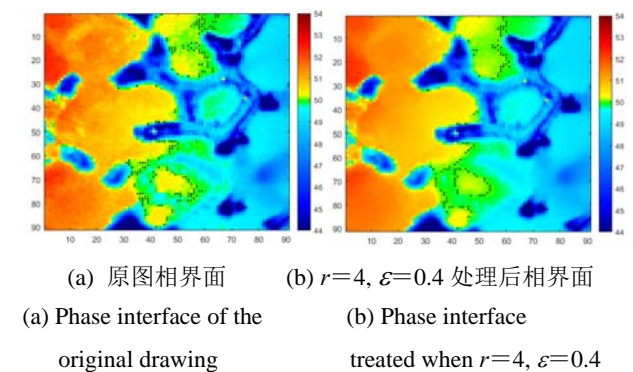


图 12 引导滤波处理前后泡沫铜/石蜡相界面对比

Fig.12 Comparison of copper foam/paraffin phase interface before and after guided filtering treatment.

同样,利用引导滤波处理水结冰过程时,如图 13 所示,也可以得出相同的结论:当滤波半径 r 一定时,随着滤波参数 ϵ 增大,如图 13(b)、(c)、(d)所示,图像中噪点数目明显地减少,即去噪效果变好。但随着滤波参数 ϵ 增大,多孔树脂结构与水的边界越发不明显,

多孔树脂结构越发不清晰，即对图像细节保护不到位。当滤波参数 ε 相同时，滤波半径 r 越大，如图13(e)、(c)、(f)所示，图像中噪点数目明显增多，即去噪效果变差，但随着滤波半径的增大，多孔树脂结构与水的边界越来越明显，即对图像细节保护越好。

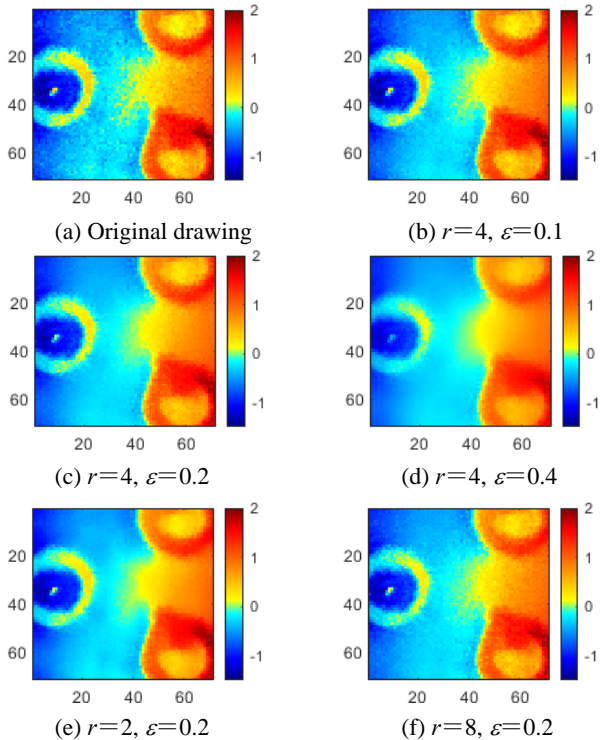
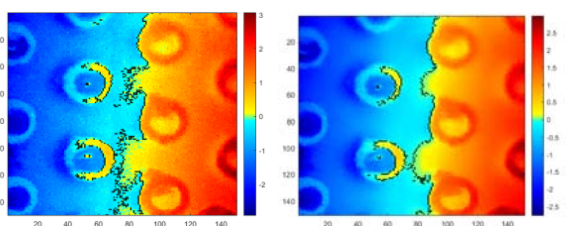


图13 多孔树脂/水不同滤波窗口及参数下的对比

Fig.13 Comparison of porous resin/water under different filtering windows and parameters

从图13也可以清晰看出相界面介于红色蓝色之间，以 0°C 等温线为相界面为例，由图14(a)原图相界面及图14(b) $r=4, \varepsilon=0.2$ 引导滤波处理后相界面可以看出引导滤波降噪使相界面轮廓更加清晰。



(a) 原图相界面 (b) $r=4, \varepsilon=0.2$ 处理后相界面
(a) Phase interface of the original drawing (b) Phase interface treated when $r=4, \varepsilon=0.2$

图14 引导滤波处理前后多孔树脂/水相界面对比

Fig.14 Comparison of porous resin/water interface before and after filtering treatment

3.3 主成分热像法降噪

石蜡/泡沫铜中相变实验总共记录了500帧。水/多孔树脂实验共记录了2000帧。在用主成分热像法

处理时，设定泡沫铜/石蜡实验每10帧为一个时间步长，总计38个；设定圆柱树脂/水实验每20帧为一个时间步长，总计94个。两实验测试区域大小均为 150×150 ，共22500个像素点。

图15和图16分别为泡沫铜/石蜡和多孔树脂/水实验的奇异值及奇异值个数对应的 p_j 值。发现只有少数几个奇异值是有效的。图15(b)可以看出由于前4个奇异值占初始矩阵 A 的99.5%以上，所以泡沫铜/石蜡实验选择截断值 $j=4$ 。同理多孔树脂/水实验前4个奇异值占初始矩阵 A 的99.5%以上，故选择截断值 $j=4$ 。

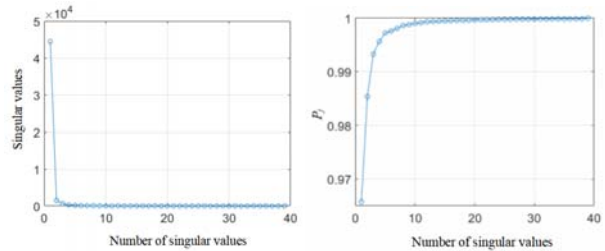


图15 泡沫铜/石蜡(a)奇异值(b)不同奇异值个数对应的 P_j 值

Fig.15 Copper foam/paraffin:(a)singular value; (b) P_j values corresponding to different singular values

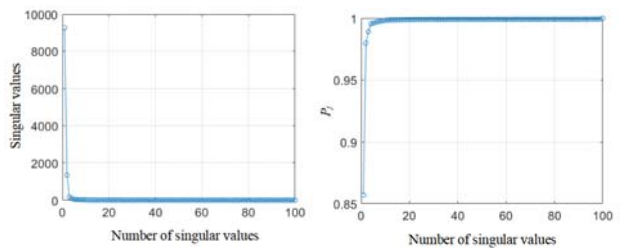


图16 多孔树脂/水(a)奇异值(b)不同奇异值个数对应的 P_j 值

Fig.16 Porous resin/water:(a)singular value; (b) P_j values corresponding to different singular values.

由于赋给矩阵中较小的奇异值零值，故矩阵存储量大大减小，如图17，深灰色为计算需要数据。石蜡融化实验里 U 矩阵大小为 22500×22500 ， B 矩阵大小为38， V^T 矩阵大小为 38×38 。截断后 U 矩阵大小为 $22500 \times j$ ， B 矩阵大小为 j ， V^T 矩阵大小为 $38 \times j$ 。由于只有少数几个奇异值有用， j 通常为个位数，所以计算量大大减小。表1和表2分别显示了石蜡融化实验和水结冰实验在不同截断值下数据量的变化，可以看出数据量均减少了4个量级。

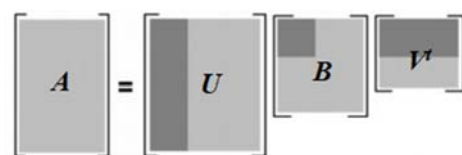


图17 截断奇异值分解算法原理

Fig.17 Principle of TSVD

完成序列图像奇异值分解后,对于石蜡融化过程我们选取了第 210 帧以演示截断值从 1~5 的处理情况并与原图进行对比,如图 18。随着截断值增大,图片特征信息不断被完善,当截断值 $j=1$ 时如图 18(b),图像主要呈现出泡沫铜骨架温度的信息,但对于石蜡温度的信息并没有反映出来。当截断值 $j=2$ 时如图 18(c),石蜡温度信息已基本呈现出来,如图 15(b) $P_j=98.6%$,已趋向于 1。但与原图即图 18(a)对比,部分位置信息仍未表达完整,存在差异,如图 18(c)圆圈位置。当截断值 $j=3$ 时如图 18(d),与原图相比图 18(c)所圈位置信息仍未呈现完整,但当截断值 $j=4$ 时如图 18(e),各位置与原图对比较为吻合。所以当 $j=4$ 时,处理后图像与原图像相比在最大程度上保留了主要信息。同时可看出当 $j=4$ 时噪点明显减少,如图 18(e)圆圈位置最为明显,孤立的颜色点减少,该颜色过渡部分更为连续,得到了一定程度的降噪。

表 1 石蜡融化实验不同截断值与原图数据量对比

Table 1 Comparison between different cut-off values of paraffin melting experiment and data quantity of original image

Original drawing	$22500 \times 22500 + 38 \times 38 \times 38 = 506,251,482$
$j=1$	$22500 \times 1 + 1 + 38 \times 1 = 22,539$
$j=2$	$22500 \times 2 + 2 + 38 \times 2 = 45,078$
$j=3$	$22500 \times 3 + 3 + 38 \times 3 = 67,617$
$j=4$	$22500 \times 4 + 4 + 38 \times 4 = 90,156$

表 2 水结冰实验不同截断值与原图数据量对比

Table 2 Comparison between different cut-off values of water icing experiment and data quantity of original image

Original drawing	$22500 \times 22500 + 94 \times 94 \times 94 = 506,258,930$
$j=1$	$22500 \times 1 + 1 + 94 \times 1 = 22,595$
$j=2$	$22500 \times 2 + 2 + 94 \times 2 = 45,388$
$j=3$	$22500 \times 3 + 3 + 94 \times 3 = 67,785$
$j=4$	$22500 \times 4 + 4 + 94 \times 4 = 90,380$

对于水结冰实验我们选取了第 1300 帧以演示截断值从 1 到 5 的处理情况,如图 19。同理,图 19(b)截断值 $j=1$ 时呈现信息不完整,图 19(c)截断值 $j=2$ 呈现信息基本完整,图 19(c)圆圈部分与原图的差异直到截断值 $j=4$ 时不再出现,由图 19(e)可以看出,在 $j=4$ 时,处理图像效果最佳,相界面清晰明显。

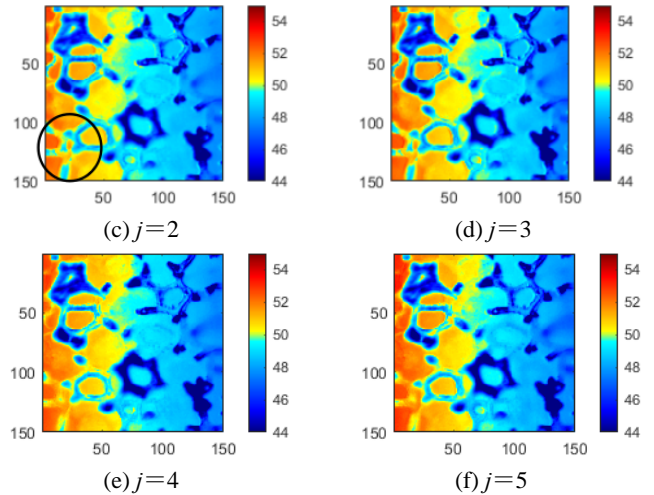
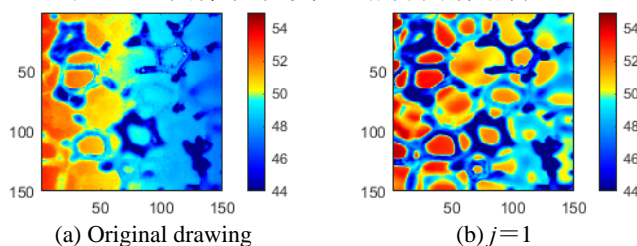


图 18 泡沫铜/石蜡不同截断值 j 对比图

Fig.18 Comparison charts of copper foam/paraffin with different cut-off values j

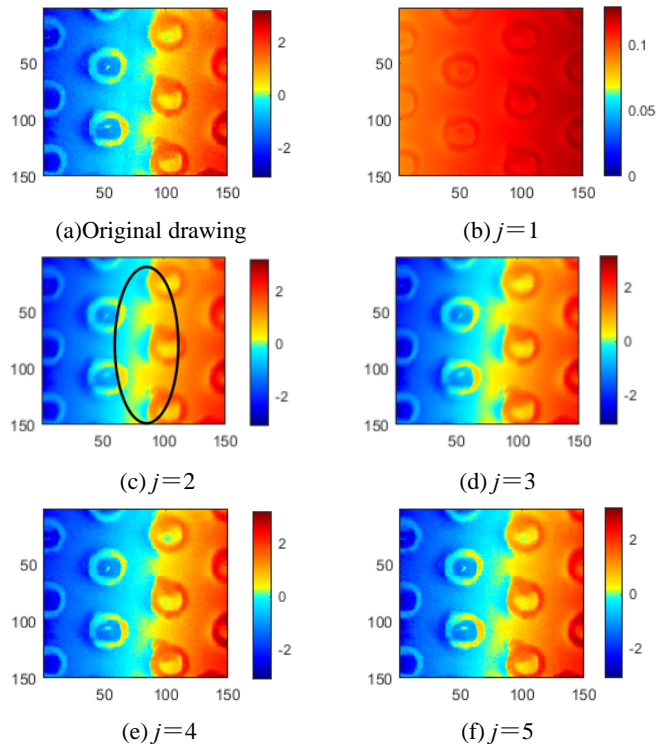


图 19 多孔树脂/水不同截断值 j 对比图

Fig.19 Comparison chart of porous resin/water with different cut-off values j

4 结论

本文针对红外无损检测技术在孔隙尺度下表征多孔介质内相变过程时存在的受环境温度影响较大、图像噪声影响较大、数据量巨大等缺点,提出分别用环境反射温度修正法、引导滤波降噪、主成分热像法等 3 种方法对红外检测的精度进行提高,通过进行石蜡在泡沫铜中融化实验及水在多孔树脂中结冰实验得出以下结论:

1) 通过添加反射表面(褶皱的铝箔)获取环境反射温度,以修正检测过程中环境温度变化对检测结果带来的影响。并与热电偶测得的温度进行对比,发现修正后的红外测温数据,比没有修正的红外数据,更接近热电偶测得的温度,具有较好的修正效果。

2) 采用引导滤波算法,提高图像信噪比,去除图像噪声,使相变界面更清晰。并研究了滤波半径和滤波参数对图像降噪效果的影响,发现当滤波半径不变时,滤波参数越大,去噪效果越好,但同时图像的细节保护不够到位。滤波参数相同时,滤波半径越大,对图像细节保护越好,但去噪效果变差。处理图像时,需多次尝试达到最佳效果。

3) 采用主成分热像法,进行红外热检测序列热成像的降噪处理,可解决噪声影响测温精度的问题,并且大大减少了红外仪测温所需处理数据量和进行信源空间压缩的后续工作量。通过研究截断值的选取对于图像降噪效果和表征主要特征成分的程度,选取合适的截断值能减少数据处理量4个量级,在保证降噪效果的同时,使相变界面轮廓表征更加清晰。

参考文献:

- [1] 袁仁续, 赵鸣. 红外热像技术在无损检测中的应用研究进展[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2005(S1): 203-207.
YUAN Renxu, ZHAO Ming. Advances in the application of infrared thermography in nondestructive testing[J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science*, 2005(S1): 203-207.
- [2] 徐悦. 民航 ISS 系统中红外/可见光的跑道监视算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
XU Yue. Research on Runway Monitoring Algorithm in Infrared/Visible Light in CIVIL Aircraft ISS System[D]. *Shanghai: Shanghai Jiao Tong University*, 2012.
- [3] 李鑫. 红外热成像技术在化工装置中的应用[J]. 科技创新与应用, 2017(13): 29-30.
LI Xin. Application of infrared thermal imaging technology in chemical plant[J]. *Technology Innovation and Application*, 2017(13): 29-30.
- [4] 邵进, 胡武炎, 贾凤鸣, 等. 红外热成像技术在电力设备状态检修中的应用[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 126-129, 133.
SHAO Jin, HU Wu Yan, JIAO Feng Ming, et al. Application of infrared thermal imaging technology in state maintenance of power equipment[J]. *High Voltage Apparatus*, 2013, 49(1): 126-129, 133.
- [5] 史宁昌, 王迅, 张存林. 红外热波成像技术在文物保护修复中的应用[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2017(5): 149-157.
SHI Ningchang, WANG Xu, ZHANG Cunlin. Application of infrared thermal wave imaging technology in conservation and restoration of cultural relics[J]. *Journal of National Museum of Chinese History*, 2017(5): 149-157.
- [6] 赵明媛, 曹向阳, 翟远坤, 等. 红外热成像技术在骨折科中的应用进展[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2015, 23(8): 78-80.
ZHAO Minyuan, CAO Xiaoyang, ZHAI Yuankun, et al. Application of infrared thermal imaging in orthopedics[J]. *Chinese Journal of Traditional Medical Traumatology*, 2015, 23(8): 78-80.
- [7] 袁仁续, 赵鸣. 红外热像技术在无损检测中的应用研究进展[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2005, 33(z1): 203-207.
YUAN Renxu, ZHAO Ming. Advances in the application of infrared thermography in nondestructive testing[J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science*, 2005, 33(z1): 203-207.
- [8] 闫洪远. 用于建筑节能的多孔基体相变储能材料的制备及应用实验[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
YAN Hongyuan. Preparation and Application of Porous Matrix Phase Change Energy Storage Materials for Building Energy Conservation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [9] 金虹庆. 泡沫金属复合相变材料熔化传热过程可视化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
JIN Qinhong. Visualization of Melting And Heat Transfer of Metallic Foam Composite Phase Change Materials [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [10] 晏旺, 唐中华, 靳俊杰. 冰蓄冷技术在空调系统中的应用及发展方向[J]. 节能, 2013, 32(5): 41-42.
YAN Wang, TANG Zhonghua, JIN Junjie. Application and development trend of ice storage technology in air conditioning system [J]. *Energy Conservation*, 2013, 32(5): 41-42.
- [11] 张旋, 吴晓敏, 闵敬春. 冷壁上单个静止过冷液滴冻结过程的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(1): 159-164.
ZHANG Xuan, WU Xiaomin, MIN Jingchun. Numerical simulation of freezing process of single stationary subcooled liquid droplet on cold Wall [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(1): 159-164.
- [12] 于萍, 黄传辉, 张红, 等. 组合式吸液芯内液汽相变过程的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(12): 2732-2737.
YU Pin, HUANG Chuanhui, ZHANG Hong, et al. Numerical simulation of liquid-vapor phase transition in a combined suction core[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(12): 2732-2737.
- [13] 葛朋, 杨波, 韩庆林, 等. 一种基于引导滤波图像分层的红外图像细节增强算法[J]. 红外技术, 2018, 40(12): 1161-1169.
GE Peng, YANG Bo, HAN Qinglin, et al. Infrared image detail enhancement algorithm based on hierarchical processing by guided image filter[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(12): 1161-1169.
- [14] 钱征文, 程礼, 李应红. 利用奇异值分解的信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 459-463.
QIAN Zhengwen, CHENG Li, LI Yinghong. Signal denoising method using singular value decomposition[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(4): 459-463.
- [15] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技术, 1999, 21(4): 20-24.
YANG Li. Temperature calculation and error analysis of infrared thermal imager[J]. *Infrared Technology*, 1999, 21(4): 20-24.
- [16] 马宁, 刘莎, 李江勇. 红外热像仪的空间噪声和时间噪声分析[J]. 激光与红外, 2017, 47(6): 717-721.
MA Ning, LIU Sha, LI Jiangyong. Analysis of spatial and temporal noise of infrared thermal imager[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(6): 717-721.
- [17] 邹前进, 冯亮, 汪亚. 红外图像空间噪声分析和预处理方法改进[J]. 应用光学, 2007(4): 426-430.
ZOU Qianjin, FENG Liang, WANG Ya. Spatial noise analysis and preprocessing of infrared image [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007(4): 426-430.