

乔鹏刚, 魏交统, 潘晋孝. 基于多能谱 CT 与 NC-POCS 重建算法的泡沫铝孔隙率计算[J]. CT 理论与应用研究, 2021, 30(1): 71-80. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.01.07.
QIAO P G, WEI J T, PAN J X. Calculation of aluminum foam porosity based on multi-spectrum CT and NC-POCS reconstruction algorithm[J]. CT Theory and Applications, 2021, 30(1): 71-80. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.01.07. (in Chinese).

基于多能谱 CT 与 NC-POCS 重建算法 的泡沫铝孔隙率计算

乔鹏刚^a, 魏交统^b, 潘晋孝^{a, b}✉

(中北大学 a)理学院; b)信息与通信工程学院, 太原 030051)

摘要: 孔隙率是评价多孔材料相关性能的重要因素之一, 是检测材料质量的一项重要指标。针对孔隙率值受分辨率影响较大的问题, 在能与材质信息均未知的条件下, 本文基于多能谱 CT 与 (NC-POCS) 非凸-凸集投影算法, 结合非负矩阵求解方法, 实现分解重建, 以多孔材料泡沫铝为例, 分析其在不同分辨率下的孔隙率变化情况。实验结果表明, 本文提出的算法具有抑制射束硬化伪影的效果, 并且测得的孔隙率值受分辨率影响较小。

关键词: 孔隙率; 多能谱 CT 成像; 非负矩阵分解; NC-POCS 算法

DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.01.07 中图分类号: O 434.1; TP 301 文献标志码: A

近年来, 多孔材料逐渐成为了一种发展迅速的热点材料。多孔材料内部包含有大量的孔隙, 孔隙率这一参数对评价材料性能具有重大意义, 因此对孔隙率的测量研究至关重要。目前孔隙率测量方法有质量体积法、压泵法、气体吸附法、计算机断层成像 (CT) 技术^[1-3]等。其中, 质量体积法操作简单, 但无法得到内部孔隙分布情况, 测量精度较低; 压泵法只能测量开口孔隙率, 且结果与压力关系较大, 测量误差较大; 气体吸附法只适合测量纳米级别的孔洞, 不适合孔隙较大、表面积较小的材料; 相比这些破坏性检测方法, 采用 CT 技术测量孔隙率, 能够在不损坏物体内部结构下, 显示内部孔隙的分布情况^[4-5]。

为提高测量孔隙率的精度, 显微 CT、纳米 CT 技术应用而生^[6-7]。江柏红等^[8]提出了一种基于显微 CT 技术的测量复合材料孔隙率的新方法, 通过灰度直方图阈值分割法来区分孔隙与基质; 为减弱分辨率对孔隙率值的影响, Yang 等^[9-11]提出了基于同步辐射源的数据约束模型 (data-constrained modelling, DCM) 方法, 提供了一种有效替代传统高分辨率 CT 测孔隙率的方法, 直接分解矿物和孔隙, 获得每个体素内组份的体积分布情况, 实现对材料组份的表征分析, 但同步辐射源为大科学装置且造价昂贵, 难以在实际工程中广泛应用; Chen 等^[12]提出了一种基于局部 CT 的 DCM 方法, 能够定量表征样品中材料和孔洞成分的三维分布情况, 极大地提高了空间分辨率; Kong 等^[13]利用多个能量同步 X 射线微 CT 数据对岩砂样品进行了组份分析, 基于 DCM 软件采用多能量最小二乘分割法实现对样品的三维结构表征。

收稿日期: 2020-11-24。

基金项目: 国家自然科学基金 (61801437; 61871351); 山西省自然科学基金 (201801D221207; 201801D221206); 山西省研究生创新项目 (2020BY098)。

多能谱 CT 成像以其更强的组份区分能力, 广泛应用于材料的不同组份表征中^[14-15]。目前多能谱成像通过光子计数探测器成像^[16-17]等方式, 将接受到的光子按能量分为不相交的区段, 进行窄能谱成像, 实现对组份的定量表征。基于光子计数探测器的能谱分离思想, 牛素莹等^[18]提出了一种基于能谱滤波分离的多谱成像方法, 通过添加滤波片获取近似单能的窄能谱图像, 实现对组份的识别, 但其能谱区分度不够; 陈平等^[19]针对此问题进行了仿真实验模拟, 提出基于 Geant4 的能谱滤波分离虚拟平台, 实现对复杂成分的识别; 近期, Chen 等^[20]提出的基于非凸优化的多能谱重建算法中将衰减系数分解为能量相关和能量无关两项, 通过正反投影迭代过程匹配不同能谱投影数据, 该算法具有代数重建算法 (algebra reconstruction technique, ART) 优点, 符合实际 X 射线非线性衰减模型。

考虑到能谱、材质信息的测量耗费成本较高, 在能谱跟材质均未知的条件下, 本文基于 Chen 等^[20]提出的方法, 结合非负矩阵求解方法来进行重建分解图像, 以泡沫铝材料为实验模体, 分析其在不同分辨率下传统结果和分解结果中孔隙率变化情况。

1 多能谱成像算法

1.1 多能谱成像原理

实际 X 能谱成像原理的离散化形式为:

$$I = I_0 \sum_m^M \left(S(E_m) \exp \left(- \sum_{k=1}^K \mu_k(E_m) d_k \right) \right) \quad (1)$$

其中 I 为探测器接收到的 X 射线强度, I_0 表示 X 射线初始强度, $S(E_m)$ 表示归一化能谱, 满足 $\sum_m S(E_m) = 1$, $\mu_k(E_m)$ 表示第 k 种材质在 m 能量下的线性衰减系数, d_k 为射线穿过第 k 种材质的长度。

对式 (1) 两边同除以 I_0 , 可得:

$$\frac{I}{I_0} = \sum_m^M \left(S(E_m) \exp \left(- \sum_{k=1}^K \mu_k(E_m) d_k \right) \right) \quad (2)$$

1.2 NC-POCS 算法

物质的线性衰减系数可以分解为各个基材料的线性衰减系数 $\mu_k(E)$ 的线性组合, 可表示为:

$$\mu(E) = \sum_{k=1}^K b_k \mu_k(E) = \sum_{k=1}^K \frac{V_k}{\sum_{k=1}^K V_k} \mu_k(E) \quad (3)$$

其中 b_k 表示材料 k 的体积比例分布, V_k 表示为材料 k 的体积。

根据多谱衰减的比尔定律, 对于能谱为 s 的射线 j , 物体的实际投影 $p_j^{[s]}(b)$ 表示为:

$$p_j^{[s]}(b) = - \ln \left(\sum_m^M \left(q_{jm}^{[s]} \exp \left(- \sum_k^K \left(\mu_{km} \sum_i^I a_{ji}^{[s]} b_{ki} \right) \right) \right) \right) \quad (4)$$

其中 $q_{jm}^{[s]}$ 为射线 j 在能量 m 下能谱 s 的值, μ_{km} 为第 k 种物质在能量 m 下的线性衰减系数, $a_{ji}^{[s]}$ 表示能谱 s 下射线 j 对像素点 i 的贡献。

根据文献[20]中所提到的算法, 首先将第 k 种物质的衰减系数 μ_{km} 分解成能量无关项 $\bar{\mu}_{jk}^{[s]}$ 和能量相关项 $\Delta\mu_{jkm}^{[s]}$ 两部分:

$$\mu_{km} = \bar{\mu}_{jk}^{[s]} + \Delta\mu_{jkm}^{[s]} \quad (5)$$

其中 $\bar{\mu}_{jk}^{[s]} = \sum_m q_{jm}^{[s]} \mu_{km}$, 表示以能谱为加权系数, 对应每个能量下衰减系数 μ_{km} 乘积的和; $\Delta\mu_{jkm}^{[s]} = \mu_{km} - \bar{\mu}_{jk}^{[s]}$ 。将式 (5) 代入式 (4) 中得:

$$p_j^{[s]}(b) = \bar{p}_j^{[s]}(b) + \Delta p_j^{[s]}(b) \quad (6)$$

其中 $\bar{p}_j^{[s]}(b) = \sum_k \bar{\mu}_{jk}^{[s]} \sum_i a_{ji}^{[s]} b_{ki}$, $\Delta p_j^{[s]}(b) = -\ln \left(\sum_m \left(q_{jm}^{[s]} \exp \left(-\sum_k (\Delta\mu_{jkm}^{[s]} a_{ji}^{[s]} b_{ki}) \right) \right) \right)$ 。

特别地, 将式 (6) 转化为矩阵形式:

$$p(b) - \Delta p(b) = \Phi b \quad (7)$$

其中矩阵 $\Phi = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_1^{[1]} \mathbf{A}^{[1]} & \mathbf{M}_2^{[1]} \mathbf{A}^{[1]} & \dots \\ \mathbf{M}_1^{[2]} \mathbf{A}^{[2]} & \mathbf{M}_2^{[2]} \mathbf{A}^{[2]} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$, 矩阵 $\mathbf{A}^{[s]}$ 由元素 $a_{ji}^{[s]}$ 组成, $\mathbf{M}_k^{[s]}$ 为由对角元素 $\bar{\mu}_{jk}^{[s]}$ 构

成的对角阵。

将多谱投影非线性模型转化为线性模型进行重建, 式 (7) 类似传统投影跟重建图像的关系, 基于传统的 ART 重建算法, 得到分解图像 b 的更新式^[20]:

$$b_k^{(n+1)} = b_k^{(n)} + \gamma^{(n)} \cdot \bar{\mu}_{jk}^{[s]} \cdot \frac{\left(p_{M_j}^{[s]} - \Delta p_j^{[s]}(b_k^{(n)}) \right) - a_j^{[s]} \sum_{k=1}^K \left(\bar{\mu}_{jk}^{[s]} b_k^{(n)} \right)}{\sum_{k=1}^K \left(\bar{\mu}_{jk}^{[s]} \right)^2 a_j^{[s]} a_j^{[s]T}} \cdot a_j^{[s]T} \quad (8)$$

式中 $p_{M_j}^{[s]}$ 表示为实际采集的投影数据, 通过式 (6) 中的非线性部分求得 $\Delta p_j^{[s]}(b)$, $a_j^{[s]}$ 为矩阵 $\mathbf{A}^{[s]}$ 的第 j 行, $a_j^{[s]T}$ 表示 $a_j^{[s]}$ 的转置, $0 < \gamma^{(n)} < 2$ 。

1.3 非负矩阵方法求解 S 、 U

根据式 (2) 知, 针对多个电压下的 X 射线成像, 记第 s 个电压下第 i 个像素对应的 I/I_0 为 f_{si} , 则将多个电压 X 射线成像写成矩阵形式^[21-22]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{S} \exp(-\mathbf{U}\mathbf{D}) \quad (9)$$

其中 $\mathbf{F} = (f_{si})_{S_I}$, $\mathbf{S} = (q_{sm})_{S_M}$, $\mathbf{U} = (\mu_{mk})_{M_K}$, $\mathbf{D} = (d_{ki})_{K_I}$ 。 \mathbf{S} 的行是不同电压对应的能谱值, \mathbf{U} 的一列对应一种材质在各窄能谱段的衰减系数, \mathbf{D} 的相应行是同种材料在 X 射线图像各像素上的衰减长度。

以矩阵欧氏距离作为矩阵分解误差的衡量标准, 可将上述多电压成像的分解问题可转化下面的优化模型:

$$\begin{aligned} \min(\Theta) &= \|\mathbf{F} - \mathbf{S} \exp(-\mathbf{U}\mathbf{D})\|_F^2 \\ \text{s.t. } & \mathbf{S} \geq 0, \mathbf{U} \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

其中 “ $\|\cdot\|_F$ ” 表示矩阵 F 的范数，为矩阵各元素的平方和。

考虑到多能谱成像中能谱跟材质信息的获取比较复杂，因此本文在 S 、 U 均未知的条件下进行重建研究，依非负矩阵分解法求解上述优化模型，利用 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件求解，得到能谱和衰减系数迭代更新式如下^[21-22]：

$$q_{sm} = q_{sm} \cdot \frac{\left((S \exp(-UD)) (\exp(-UD))^T \right)_{sm}}{\left(F (\exp(-UD))^T \right)_{sm}} \quad (11)$$

离散化为：

$$\begin{cases} q_{sm} = q_{sm} \cdot \delta_{sm} \\ \delta_{sm} = A_{sm} / B_{sm} \\ A_{sm} = \sum_{i=1}^I H_i \exp(-(\mu_{m1} d_{1i} + \mu_{m2} d_{2i} + \dots + \mu_{mK} d_{Ki})) \dots \dots H_i = \sum_{m=1}^M \left(q_{sm} \exp\left(-\sum_{k=1}^K (\mu_{mk} d_{ki})\right) \right) \\ B_{sm} = \sum_{i=1}^I \left(f_{si} \exp(-(\mu_{m1} d_{1i} + \mu_{m2} d_{2i} + \dots + \mu_{mK} d_{Ki})) \right) \end{cases}$$

δ_{sm} 为能谱更新因子。

$$\mu_{mk} = \mu_{mk} \cdot \frac{\left(\left((S^T (S \exp(-UD))) \odot (\exp(-UD)) \right) D^T \right)_{mk}}{\left(\left((S^T F) \odot (\exp(-UD)) \right) D^T \right)_{mk}} \quad (12)$$

式中 “ \odot ” 表示矩阵的 Hadamard 乘积（对应元素相乘），其离散化形式为：

$$\begin{cases} \mu_{mk} = \mu_{mk} \cdot \psi_{mk} \\ \psi_{mk} = C_{mk} / E_{mk} \\ C_{mk} = \sum_{i=1}^I \left(\left(\sum_{s=1}^S q_{sm} H_i \right) \cdot \exp\left(-\sum_{k=1}^K \mu_{mk} d_{ki}\right) \cdot d_{ki} \right) \dots \dots H_i = \sum_{m=1}^M \left(q_{sm} \exp\left(-\sum_{k=1}^K \mu_{mk} d_{ki}\right) \right) \\ E_{mk} = \sum_{i=1}^I \left(\left(\sum_{s=1}^S q_{sm} H_i \right) \cdot \exp\left(-\sum_{k=1}^K \mu_{mk} d_{ki}\right) \cdot d_{ki} \right) \end{cases}$$

ψ_{mk} 为衰减系数更新因子。

本文将能谱、衰减系数更新式与 NC-POCS 算法结合重建，其算法具体步骤如下：

- (1) 赋初值： $q^{(0)} \leftarrow q_M, \mu^{(0)} \leftarrow \mu_{\max}, b_k^{(0)} \leftarrow 0$ ；
- (2) 根据式 (11) 和式 (12) 分别更新能谱和衰减系数；
- (3) 假设经过 n 次迭代后，图像的估计值为 $b_k^{(n)}$ ，依据式 (8) 计算迭代图像 $b_k^{(n+1)}$ 。
- (4) 然后对图像作 TV 下降更新，表达式为：

$$b_k^{(n+1)} \leftarrow b_k^{(n+1)} - \alpha_k^{(n+1)} \nabla_{b_k} \left\| b_k^{(n+1)} \right\|_{TV}$$

- (5) 判断收敛条件是否满足，若满足则终止迭代，不然则转向步骤 (2)。

1.4 孔隙率计算

对于单材质多孔材料，物体的线性衰减系数分解为基质和孔隙，通过分解重建得到相应基质体积比例分布图，然后用 1 减去基质体积比例分布图，进而获得相应的孔隙分布图。

材料孔隙率指的是材料内部的孔隙占总体积的比例，其计算公式为^[6,8]：

$$\rho_{\text{hole}} = \frac{N_{\text{hole}}}{N_{\text{all}}} \times 100\% \quad (13)$$

式中 ρ_{hole} 为孔隙率； N_{hole} 表示测量区域内孔隙的像素数目； N_{all} 表示为测量区域像素的总数目。

2 实验结果及分析

2.1 实验样品

金属泡沫铝是一种包含大量孔洞的轻质多孔材料，具有密度低、耐高温，以及隔音降噪和阻尼性良好等特性，在当今的材料领域具有广阔的应用前景，特别是交通运输工业、建筑结构工业等方面。故实验材料选取单材质材料泡沫铝，采用渗流法制备的球型孔开孔泡沫铝板，切割成圆柱形样品，如图 1 (a)，使用游标卡尺量得该泡沫铝是直径为 34.80 mm，高为 21.28 mm。



(a) 泡沫铝样品



(b) 放入物体后量筒体积

图 1 试验样品

Fig.1 Experimental sampled

2.2 实验参数及条件

对于上图 1 (a) 中的泡沫铝模体，通过 YXLON FF20 CT 机获取实验所需投影数据。射线源距物体旋转中心 259.99 mm，射线源距探测器中心 780.57 mm。在 NC-POCS 算法中所用到的参数设置（根据经验，取步长因子 γ 为 0.1），在表 1 的条件下，能谱初始值选取由开源能谱生成程序 Spectrum GUI 软件生成的接近真值的能谱，初始能谱如下图 2 所示，衰减系数的初始值选择从 NIST 数据库中获得的衰减系数最大值，考虑到有 3 组未知量：能谱、衰减系数和分解系数（只含 Al），则最少要取 3 个电压下的投影数据，实验中电压、电

表 1 电压、电流、曝光时间对应参数
Table 1 Scanning parameters of voltage, current, exposure time

实验参数	投影序列		
	投影 1	投影 2	投影 3
电压/kV	110	120	130
电流/ μ A	55	50	50
曝光时间/ms	454	400	400

流、曝光时间等参数列于下表 1。

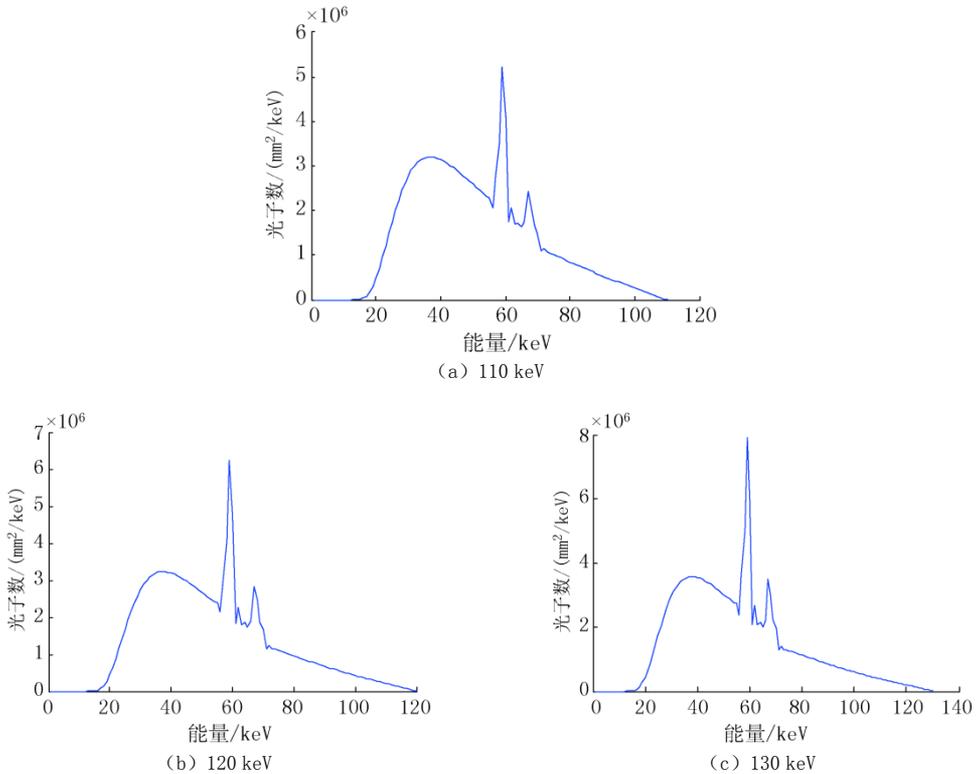


图 2 能谱图

Fig 2 Energy spectrum

图 3 为本文方法的收敛曲线，每次迭代计算相应重建图像的均方根误差（root mean square error, RMSE），其数值结果验证了所提算法在迭代过程中的收敛性。

2.3 实验结果分析

2.3.1 伪影情况分析

以 $150 \times 150 \times 150$ 三维重建结果为例，截取其中第 75 层进行射束硬化伪影分析。图 4 为重建结果，其中图 4 (a) 为电压 110 kV 下传统 3D-ART 算法重建结果第 75 层图像，图 4 (b) 为利用 Gamma 校正伪影结果图像^[23]，图 4 (c) 为文献[20]中提出的方法结果图像，图 4 (d) 为根据基材料分解模型，利用本文方法得到的分解图像获得 110 keV 单能图像。

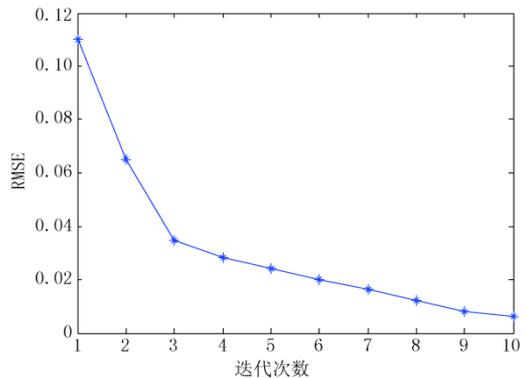


图 3 所提方法的迭代收敛曲线

Fig.3 The convergence curve of the proposed method

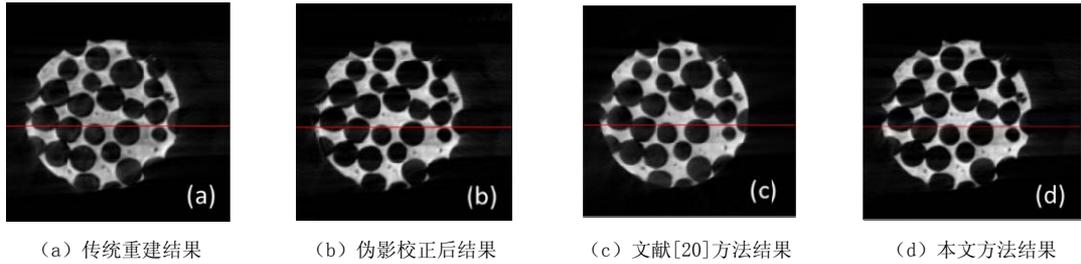


图 4 重建结果

Fig.4 Reconstruction results

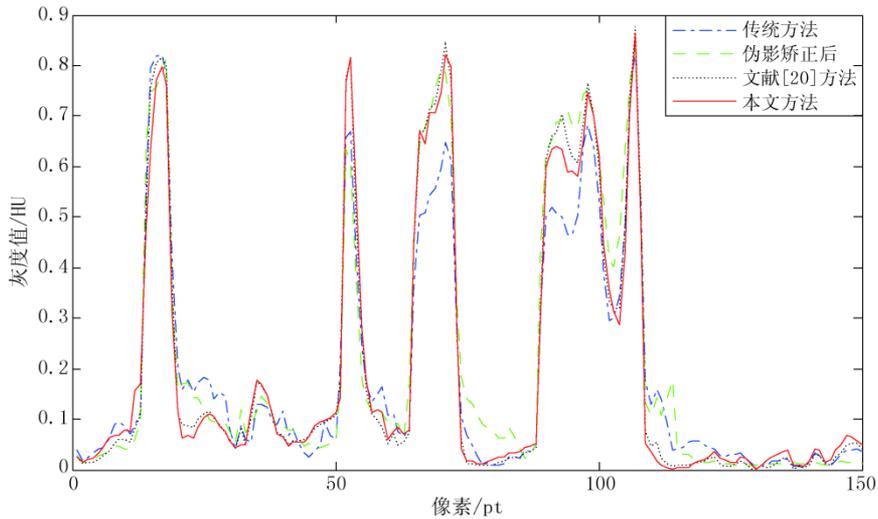


图 5 重建图中划线处的灰度曲线

Fig.5 Gray curve at the line in the reconstruction

通过观察图 5 中的灰度曲线，从整体曲线趋势上来看，在传统 3D-ART 重建结果中，中间低边缘高，射束硬化伪影较为严重，伪影校正后结果灰度波动较大，而文献[20]方法与本文提出的方法灰度更为一致，具有抑制射束硬化伪影的效果。

为了更清楚地验证抑制伪影的情况，计算了传统与分解结果的灰度相对偏差，如下表 2 所示，最

表 2 传统与分解结果的灰度相对偏差对比情况

Table 2 Comparison of the relative deviation of gray scale between traditional and decomposition results

方法	分解结果		
	m/HU	μ/HU	$\varepsilon/\%$
传统	0.83	0.55	33.73
分解	0.86	0.64	22.58

大像素 $m = \max(a_{ij})(j=86)$ ，图中铝的平均像素 $\mu = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}}{\text{num}(\text{非}0\text{像素数})}$ ，相对偏差 $\varepsilon = ((m - \mu) / \mu) \times 100\%$ 。

从表 2 中看出，相比传统结果，本文分解结果的相对偏差较小，相差 11.15%，具有抑制射束硬化伪影的效果。

表 3 不同分辨率下传统结果与分解结果的孔隙率比较
Table 3 Comparison of porosity between traditional and decomposition results at different resolutions

方法	孔隙率/%		
	150 × 150 × 150 (像素尺寸 0.127 mm × 2 mm)	300 × 300 × 300 (像素尺寸 0.127 mm × 1 mm)	600 × 600 × 600 (像素尺寸 0.127 mm × 0.5 mm)
传统结果	56.19	57.60	58.79
本文结果	56.52	56.94	57.18

2.3.2 不同分辨率下孔隙率测量

首先使用阿基米德排水法来测量该泡沫铝的孔隙率, 实验中使用 250 mL 量筒 (最小刻度为 2 mL、允许误差为 ± 1 mL), 量筒加入水后体积为 100 mL, 再放入泡沫铝后体积为 111 mL, 如图 1 (b)。为了提高测量的精度, 使用精度为 0.02 mm 的游标卡尺量得 100 mL 时高度为 8.450 cm, 排水后水面升高高度为 0.770 cm, 利用排水法测得该泡沫铝模体的孔隙率值为 54.96% ($\pm 0.25\%$), 实验中通过重建不同分辨率大小的图像, 然后对其进行孔隙率测量, 结果如表 3 所示。

从表 3 中来看, 排水法所测孔隙率始终低于 CT 测量方法, 可能是由于内孔隙存在的原因。随着分辨率的增大, 传统结果中孔隙率由 56.19% 增加到 58.79%, 增加了 2.6%; 而在分解结果中孔隙率由 56.52% 到 57.18%, 增加了 0.66%。本文分解结果中孔隙率受分辨率影响较小。

3 结论

针对孔隙率受高分辨率影响较大的问题, 本文考虑在能谱跟材质信息均未知情况下, 借鉴非负矩阵分解算法进行求解, 结合文献[20]中的 NC-POCS 算法, 来重建分解图像。模体泡沫铝实验中表明, 本文的分解方法具有抑制伪影的效果, 另外, 相比 3D-ART 重建方法, 其分辨率大小对孔隙率值的影响较小, 为以后多孔材料的孔隙率计算提供了重要的参考价值。

参考文献

- [1] 刘颀, 胡亚非, 熊建军. 石墨多孔材料孔隙率测定方法研究[J]. 润滑与密封, 2010, 35(10): 99-101.
LIU Q, HU Y F, XIONG J J. Experimental study on porosity measurement of Graphite porous materials[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(10): 99-101. (in Chinese).
- [2] 李晨安, 李承峰, 刘昌岭, 等. CT 图像法计算 Berea 砂岩孔隙度[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(5): 482-487.
LI C A, LI C F, LIU C L, et al. A method to calculate the porosity of Berea sandstone based on CT digital images[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2017, 37(5): 482-487. (in Chinese).
- [3] 郎颖娴, 梁正召, 段东, 等. 基于 CT 试验的岩石细观孔隙模型重构与并行模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1204-1212.
LANG Y X, LIANG Z Z, DUAN D, et al. Three-dimensional parallel simulation of porous rocks based on CT technology and digital image processing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 1204-1212. (in Chinese).
- [4] 肖体乔, 谢红兰, 邓彪, 等. 上海光源 X 射线成像及其应用研究进展[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 9-23.

- XIAO T Q, XIE H L, DENG B, et al. Progresses of X-ray imaging methodology and its applications at Shanghai synchrotron radiation facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 9-23. (in Chinese).
- [5] 王宇, 李晓, 阙介民, 等. 基于 CT 图像灰度水平的孔隙率计算及应用[J]. *水利学报*, 2015, 46(3): 357-365. WANG Y, LI X, QUE J M, et al. A porosity calculation method based on CT images and its application[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(3): 357-365. (in Chinese).
- [6] 李建胜, 王东, 康天合. 基于显微 CT 试验的岩石孔隙结构算法研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(11): 1703-1708. LI J S, WANG D, KANG T H. Algorithmic study on rock pore structure based on micro-CT experiment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(11): 1703-1708. (in Chinese).
- [7] 苟启洋, 徐尚, 郝芳, 等. 纳米 CT 页岩孔隙结构表征方法——以 JY-1 井为例[J]. *石油学报*, 2018, 39(11): 1253-1261. GOU Q Y, XU S, HAO F, et al. Characterization method of shale pore structure based on Nano-CT: A case study of Well JY-1[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(11): 1253-1261. (in Chinese).
- [8] 江柏红, 周金帅, 高晓进, 等. 基于显微 CT 技术的 C/C-SiC 复合材料孔隙率测量方法[J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(4): 122-126. JIANG B H, ZHOU J S, GAO X J, et al. Porosity measurement method of C/C-SiC composites based on Micro-CT technology[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2015, 45(4): 122-126.
- [9] YANG Y S, TULLOH A, COLE I, et al. A data-constrained computational model for morphology structures[J]. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2007, 43(2): 159-164.
- [10] YANG Y S, GUREYEV T E, TULLOH A, et al. Feasibility of a data-constrained prediction of hydrocarbon reservoir sandstone microstructures[J]. *Measurement Science & Technology*, 2010, 21(4): 89-94.
- [11] YANG Y S, LIU K Y, MAYO S, et al. A data-constrained modelling approach to sandstone microstructure characterization[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 105: 76-83.
- [12] CHEN W H, YANG S, XIAO T Q, et al. A synchrotron-based local computed tomography combined with data-constrained modelling approach for quantitative analysis of anthracite coal microstructure[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(3): 586-593.
- [13] KONG H H, LI R R, YANG Y S, et al. Sandstone 3D compositional microstructure analysis with synchrotron-based multi-energy X-ray micro-CT[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(6): 1-10.
- [14] 肖圣详, 吴国兵. CT 能量成像技术的现状和未来[J]. *中国医疗设备*, 2013, 28(2): 5-8. XIAO S X, WU G B. Current situation and future of CT energy imaging technology[J]. *China Medical Devices*, 2013, 28(2): 5-8. (in Chinese).
- [15] 滕月阳, 郑孙易, 卢子鹏, 等. 基于梯度下降法的双能 CT 双物质分解算法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(7): 936-940. TENG Y Y, ZHENG S Y, LU Z P, et al. Two-material decomposition algorithm of dual-energy CT based on gradient descent method[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017, 38(7): 936-940. (in Chinese).
- [16] 廖玉婷, 王永波, 许可欣, 等. 基于光子计数探测器的 X 线 CT 蒙特卡罗仿真[J]. *中国医学物理学杂志*, 2016, 33(2): 122-127. LIAO Y T, WANG Y B, XU K X, et al. X-ray computed tomography Monte Carlo simulation based on photon counting detector[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2016, 33(2): 122-127. (in Chinese).
- [17] Schmidt T G, Barber R F, Emil Y S. A spectral CT method to directly estimate basis material maps from experimental photon-counting data[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2017, 36(9): 1808-1819.
- [18] 牛素莹, 潘晋孝, 陈平. 基于能谱滤波分离的多谱计算机层析成像方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 346-352. DOI:10.3969/j.issn.0258-0934.2014.07.023. NIU S Y, PAN J X, CHEN P. Multi-spectrum computed tomography imaging method based on energy spectrum filtering separation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 346-352. DOI:10.3969/j.issn.0258-0934.2014.07.023. (in Chinese).
- [19] 陈平, 郭蓉, 潘晋孝, 等. 基于 Geant4 的能谱滤波分离虚拟平台研究[J]. *中国测试*, 2016, 42(6): 65-69.

- CHEN P, GUO R, PAN J X, et al. Study on virtual platform based on Geant4 energy spectrum filtering separation[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(6): 65-69. (in Chinese).
- [20] CHEN B X, ZHANG Z, SIDKY E Y, et al. Image reconstruction and scan configurations enabled by optimization-based algorithms in multispectral CT[J]. Physics in Medicine & Biology, 2017, 62: 8763-8793.
- [21] 魏交统, 陈平, 韩焱. 多电压 X 射线图像分解的高对比度 CT 成像[J]. 光电工程, 2016, 43(8): 59-63. WEI J T, CHEN P, HAN Y. Applying decomposition of multi-voltage X-ray images to accomplish high contrast computed tomography imaging[J]. Opto-electronic Engineering, 2016, 43(8): 59-63. (in Chinese).
- [22] 赵耀霞, 韩焱, 陈平. 基于基效应分解的多谱投影序列盲分离算法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2763-2768. ZHAO Y X, HAN Y, CHEN P. Blind separation of multi-voltage projection sequence based on fundamental effect decomposition[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9): 2763-2768. (in Chinese).
- [23] CHANG S J, LI M F, YU H Y, et al. Spectrum estimation-guided iterative reconstruction algorithm for dual energy CT[J]. IEEE Transaction on Medical Imaging, 2020, 39(1): 246-258.

Calculation of Aluminum Foam Porosity Based on Multi-spectrum CT and NC-POCS Reconstruction Algorithm

QIAO Penggang^a, WEI Jiaotong^b, PAN Jinxiao^{a,b}✉

a).School of Science; b).Collage of Information and Telecommunication,
North University of China, Taiyuan 030051, China

Abstract: Porosity is one of the important factors to evaluate the related properties of porous materials and an important index for material quality inspection. To solve the problem that the porosity value is greatly affected by the resolution, under the condition that the spectrum and material information are unknown, this paper, based on the multi-spectrum CT and NC-POCS (non-convex projection onto convex sets) algorithm and combined with the non-negative matrix factorization method, realizes decomposition image reconstruction. Taking the porous material aluminum foam as an example, we analyze the porosity change of the porous material under different resolutions. The experimental results show that the proposed algorithm can suppress the hardening artifacts, and the measured porosity is less affected by the resolution.

Keywords: porosity; multi-spectrum CT imaging; non-negative matrix factorization; NC-POCS algorithm



作者简介: 乔鹏刚 (1995—), 男, 中北大学理学院在读硕士, 目前研究方向为 CT 成像算法, Tel: 19834531142, E-mail: 1970419753@qq.com; 潘晋孝[✉] (1966—), 男, 中北大学教授、副校长, 主要研究图像信息处理、工程中的数学问题, Tel: 0351-3923715, E-mail: panjx@nuc.edu.cn。