

弥散燃料芯块中核芯颗粒位置信息的CT检测方法

张小刚, 俞东宝, 申俊华, 季 婧

(中核北方核燃料元件有限公司, 包头 014035)

摘要: 在弥散燃料芯块中, 核芯颗粒随机分布在其非金属材料处。采用表征核芯颗粒位置信息的方法评估产品工艺质量, 具有重要意义。采用三维 CT 图像法, 通过 VG 软件拟合芯块的外轮廓, 以此来获得芯块的三维坐标, 并将核芯颗粒视为夹杂, 从而在获得每个核芯颗粒中心坐标的基础上, 自动计算出其与相邻核芯颗粒的间距; 然后采用微焦 CT 对弥散燃料芯块进行检测和处理, 并采用统计热图方式, 直观表征燃料芯块中核芯颗粒的分布均匀性; 最后进行了实际燃料芯块相邻核芯颗粒间距的自动测量, 验证了该方法的可行性, 为进一步开展核芯颗粒分布状况的表征工作奠定了基础。

关键词: 核芯颗粒; CT 检测; 三维分割; 间距自动测量; 分布均匀性

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)01-0061-07

CT detection method for position information of core particles in dispersed fuel pellets

ZHANG Xiaogang, YU Dongbao, SHEN Junhua, JI Jing

(China North Nuclear Fuel Co., Ltd., Baotou 014035, China)

Abstract: In dispersed fuel pellets, core particles are randomly dispersed and distributed in non-metallic materials. The method of characterizing the position information of core particles is usually used to evaluate and evaluate the quality of product processes, which is of great significance. This paper adopted the three-dimensional CT image method and used VG software to fit the outer contour of the core block to obtain the three-dimensional coordinates of the core block. The core particles were treated as inclusions, and on the basis of obtaining the center coordinates of each core particle, the distance between adjacent core particles was automatically calculated. Then, microfocal CT was used to detect and process dispersed fuel pellets, and statistical heat map was used to visually characterize the distribution uniformity of core particles in the fuel pellets. Finally, the automatic measurement of the spacing between adjacent core particles was tested using actual fuel pellets, proving the feasibility of this method for measuring the spacing between core particles. This lays a technical foundation for further characterization of core particle distribution.

Key words: core particle; CT detection; 3D segmentation; automatic measurement of spacing; uniformity of distribution

高温气冷反应堆作为第四代核能系统的基本组成单元, 是一种国际核能界公认的具有良好安全特性的堆型。其燃料元件是由石墨基体及弥散在其中的核芯颗粒组成的全陶瓷型元件, 基本组成单元是

核芯颗粒^[1-2]。随着核电技术的发展, 燃料元件也不断更新换代, 但始终遵循安全经济特性。核芯颗粒作为耐事故燃料的最小单元, 其固有的安全特性受到了广泛重视^[3-4]。美国三里岛、苏联切尔诺贝利和日本福岛的 3 次重大核事故对核能的发展产生了深远的影响, 基于此提出的事故容错燃料 (Accident tolerant fuel, ATF) 是国内外核燃料革新性发展的主要思路。与传统的二氧化铀燃料-锆合金包壳体

收稿日期: 2023-05-12

作者简介: 张小刚 (1987-), 男, 高级工程师, 主要从事核燃料及核材料相关无损检测等方面的研究

通信作者: 张小刚, zhangupc06@163.com

系相比,该燃料能够大幅降低事故发生时的堆内温度以及放射性物质的释放量。ATF 燃料芯块的研究方向主要包括二氧化铀基复合燃料、高铀密度燃料和微封装燃料等^[5-6]。文章研究了一种全陶瓷微封装燃料设计结构的 ATF 燃料芯块,其是将直径为 450~550 μm 的 TRISO 颗粒弥散在 SiC 基体中,经烧结等加工工艺制备而成的燃料芯块。该芯块呈直径约为 20 mm,高度约为 30 mm 的实心圆柱状,受制造工艺影响,核芯颗粒在基体材料中的分布是随机且非均匀的。表征和分析核芯颗粒在非金属基体材料中的分布均匀性状况对于评价芯块的制造质量具有重要意义^[7]。

X 射线微焦 CT 是一种分辨能力可达到微米级的精密 CT 检测方法,可以获取被测物体内外部的三维结构状况,具有出色的几何细节分辨能力而越来越广泛地应用于精密工件的高精度检测分析中^[8-10]。对于空间内颗粒状物体的分布均匀性表征及评价,殷亚军等^[11]以微焦 CT 扫描数据为基础,结合概率密度函数的非参数估计,提出了一种石墨颗粒三维空间分布均匀性定量表征方法;郭慧等^[12]结合播种深度和种子距离行中心偏差两个指标提出一种种子纵向分布均匀性指标计算方法;吴胜兴等^[13]借助离散元方法和 EDEM 软件建立了基于像素的均匀度数字化算法,用以表征新拌混凝土中的骨料分布均匀性。这些方法均较好地评价了颗粒状物体的分布均匀性,但是在表征的直观性方面尚存在一定局限性。

针对核芯颗粒位置信息的表征问题,文章通过微焦 CT 扫描获得燃料元件中核芯颗粒分布的三维图像,将每个球定义为夹杂,利用 VG 软件的夹杂分析模式识别每个核芯颗粒的球心坐标、半径等信息,并导出 Excel 数据表格。利用 C++ 编程将 Excel 数据表格读入,实现核芯颗粒的分布均匀性、颗粒间距和无颗粒区域尺寸的行测量和评价,最后通过热图展现核芯颗粒在燃料元件中的位置信息。

1 方法论述

1.1 基本原理

微焦 CT 系统通常采用锥束 CT 扫描方式,锥束 CT 利用锥形 X 射线束从圆周分布的多个等角度方向以透射方式穿透被检测工件,用平板探测器把透过被测工件后的衰减 X 射线信息采集记录下来,并通过图像重建算法将被测工件的内外部结构、缺

陷等信息以三维图像的形式展现出来,可以完整获取被检工件的三维数据,其工作原理示意如图 1 所示。锥束 CT 的检测方式具有检测结果直观、清晰、准确,不损坏被检测工件,不受被检测工件材料及形状限制等诸多优点。

采用的检测设备为 300 kV 微焦 CT 系统,其由高功率 300 kV 射线管、Whale 4343 系列高动态范围探测器、机械、控制、图像重建处理、安全防护与报警等子系统组成,可直接对被检测工件进行锥束 CT 三维扫描成像。采用 JIMA 空间分辨力测试卡对系统主要性能指标进行校验。实际校验后,系统最高空间分辨力可达 2 μm 。

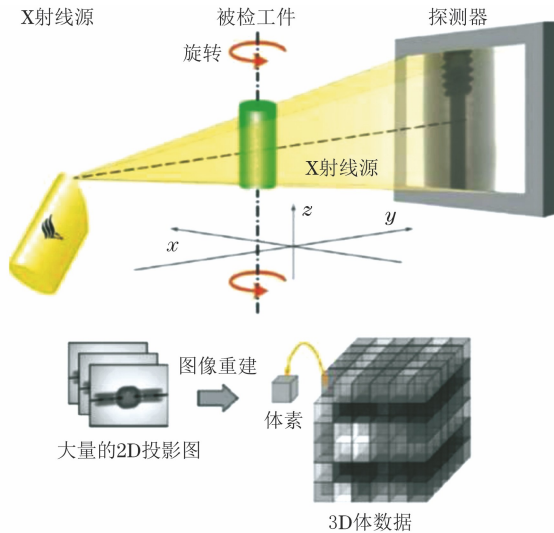


图 1 微焦 CT 工作原理示意

1.2 核芯颗粒位置信息评价方法

采用微焦 CT 系统对弥散燃料芯块进行三维成像,将扫描投影数据重建后获取切片数据。利用 VG 软件导入切片图像,进行体绘制并显示。利用 VG 软件绘制芯块的外轮廓,外轮廓为圆柱体,并确定其半径 r 。以圆柱体轴线为 z 轴,以轴线与芯块底面的交点为坐标原点,建立直角坐标系 (x, y, z) 。

核芯颗粒密度约为 $6.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, SiC 基体密度约为 $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。射线穿过物体时的衰减程度与物体的材料密度一般呈线性关系,密度大则射线衰减程度大,密度小则衰减程度小。映射到 CT 图像上则是灰度值大的区域为颗粒区域,灰度值小的为非颗粒区域。选取颗粒与非颗粒区域的灰度值分界点,提取出颗粒区域,完成颗粒分割。将每个球定义为夹杂,通过 VG 软件的夹杂分析模块识别每个球形颗粒的球心坐标、半径等信息,并导出 Excel 数据

统计表格。利用 C++ 编程读入 Excel 数据表格, 实现球形颗粒的分布均匀性、颗粒间距和无颗粒区域尺寸的行测量和评价。

区域划分截面示意如图 2 所示, 将工件划分为 l 行、 p 列、 q 层, 总计 $l \times p \times q$ 个区域, 每个区域的中心坐标为 (x_{lm}, y_{pm}, z_{qm}) , 其中 $m=1, 2, \dots, l \times p \times q$ 。以该中心坐标为球心, 可做出直径为 d 的一系列球面坐标表达为

$$(x - x_{lm})^2 + (y - y_{pm})^2 + (z - z_{qm})^2 = d^2 \quad (1)$$

则任意一个“区域统计球”内所包含的球形颗粒个数为

$$C_m = C(\sqrt{(x_{lm} - x_j)^2 + (y_{pm} - y_j)^2 + (z_{qm} - z_j)^2} \leq d \quad j = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

式中: C_m 为第 m 号“区域统计球”所包含的球形颗粒个数; j 为 m 号区域内的第 j 个球; N 为 m 号区域内的所有球个数。

通过上述公式, 对于直径为 d 的所有“区域统计球”, 可计算 $l \times p \times q$ 个 C_m 值, 从而统计 C_m 的均值和方差。后改变“区域统计球”直径 d 值的大小, 获得新 d 值下的均值和方差, 从而建立“区域统计球”直径 d 与该半径下“球”内所包含颗粒球均值和方差的关系, 根据方差即可分析球形颗粒的分布均匀性。

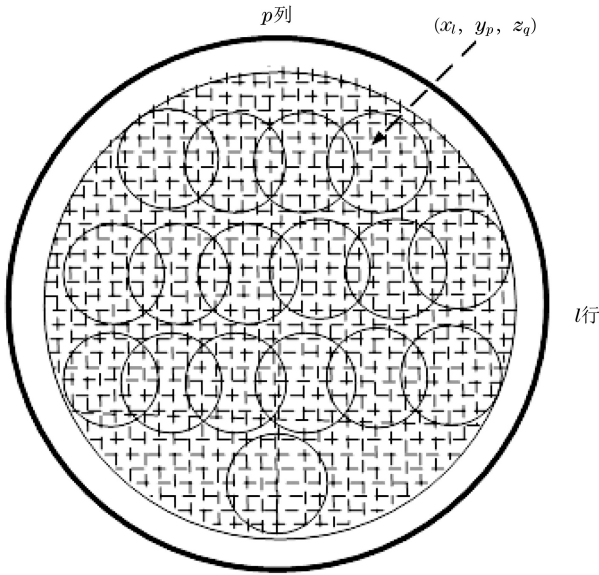


图 2 工件区域划分截面示意

无燃料区域尺寸评价需要在三维图像中找出距芯块上端表面、下端表面和周向表面最近的核芯颗粒, 并测量其距表面的距离。文章对三维 CT 图像进行剖切, 利用得到的二维图像直接进行计算、测量

和标注统计即可得到所求距离, 具体算法如公式(3)所示。

$$R_i = R - (\sqrt{x_i^2 + y_i^2} + r_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中: R_i 为第 i 号球的球面与工件外壳的距离。

通过上述公式, 可精确计算出任何一个球面与工件外壳的距离, 对那些比较小的距离值(或很多小值的平均值)进行分析即可。

2 试验结果

2.1 核芯颗粒位置测量试验

为了验证文章方法对弥散燃料芯块中核芯颗粒间距测量的有效性, 对文章 ATF 弥散燃料芯块采用 300 kV 微焦 CT 系统进行锥束 CT 扫描重建, 体素尺寸约为 $10.89 \mu\text{m}$, 重建三维 CT 图像及核芯颗粒分布图像如图 3(a), (b) 所示。由于颗粒间距的测量方法对于空间内的任意颗粒都是适用的, 故文章任意选取图 3(b) 中的 5 颗核芯颗粒进行分割, 结果如图 3(c) 所示。最后计算了图 3(c) 中目标核芯颗粒的质心坐标值, 并对相邻球体间距进行计算, 结果如表 1 所示。

2.2 核芯颗粒分布均匀性测量试验

采用微焦 CT 系统对弥散燃料芯块进行扫描检测, 采用 FDK 算法重建后获得的三维图像如图 4 所示。被检工件中核芯颗粒密集分布, 无法直接观察其内部分布均匀性状况。

在三维图像的某部位, 采用 3 个正交面与三维图像相切, 即可获得正交的 x 、 y 、 z 方向的切片图像, 如图 5 所示。从切片图像上可以看出, 核芯颗粒大小、形貌不一, 且分布存在不均匀性。但通过 3 个方向的切片仍然难以直观表达其分布均匀性。

采用快速 NL-SIFCM 算法对三维图像中的核芯颗粒进行分割获得二值化数据, 其中背景为黑色(灰度值为 0)、核芯颗粒为白色(灰度值为 255), 并通过渲染获得三维分布图像(见图 6)。由图 6 可看到核芯颗粒在三维空间的总体分布情况, 但很难得出其分布均匀性的有关信息。

对图 6 的三维分割数据进行子区域划分, 同时计算各子区域内核芯颗粒的体积占比。分割后三维体数据为 $1\,800 \text{ 体素} \times 1\,800 \text{ 体素} \times 1\,400 \text{ 体素}$, 设定子区域大小为 $10 \text{ 体素} \times 10 \text{ 体素} \times 10 \text{ 体素}$ 。计算体积占比时, 首先在子区域内统计灰度值为 255(根据图像分割赋值核芯颗粒为白色)的体素数量, 然后

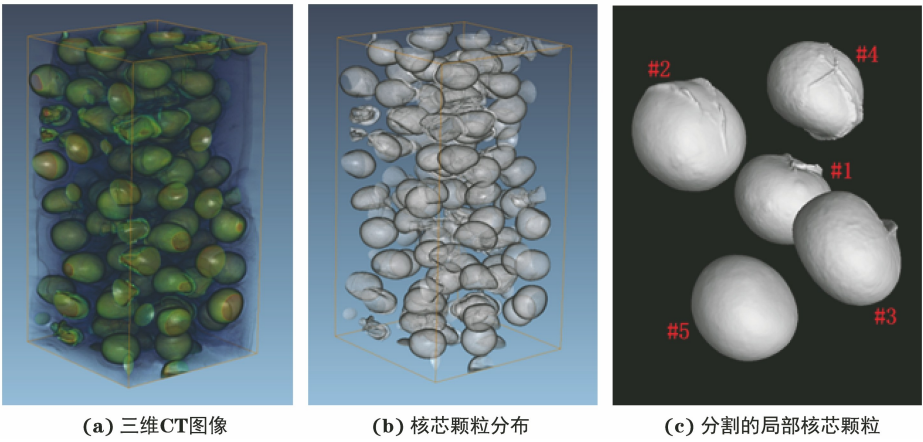


图 3 ATF 弥散燃料芯块的锥束 CT 扫描重建结果

表 1 核芯颗粒质心坐标值及相邻球体间距测量结果

球体编号	质心坐标值	最近球体编号	最近球体质心坐标	球心距/pixel	球心距/ μm
# 1	(476, 193, 210)	# 4	(465, 170, 299)	92.58	1 008.2
# 2	(565, 110, 259)	# 4	(465, 170, 299)	123.29	1 342.6
# 3	(595, 248, 269)	# 5	(606, 210, 184)	93.75	1 021.0
# 4	(465, 170, 299)	# 1	(476, 193, 210)	92.58	1 008.2
# 5	(606, 210, 184)	# 3	(595, 248, 269)	93.75	1 021.0

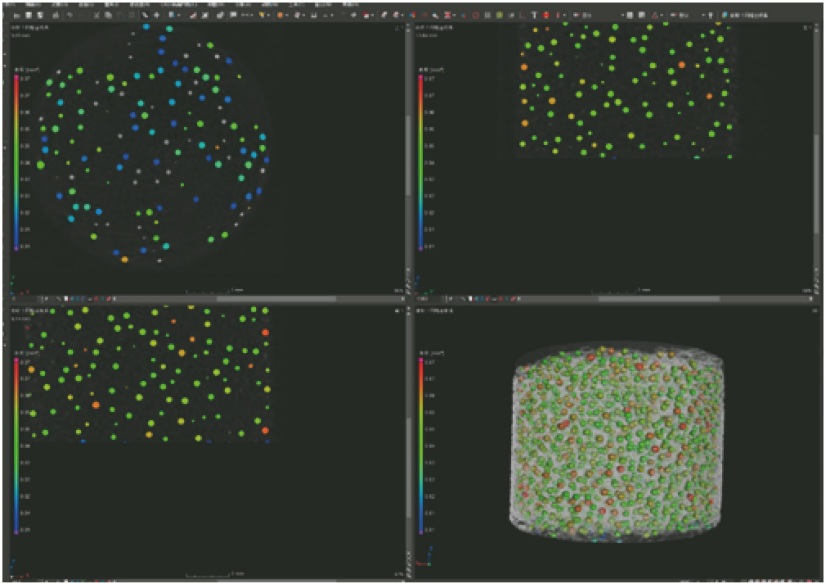


图 4 FDK 重建后的核芯颗粒三维 CT 图像

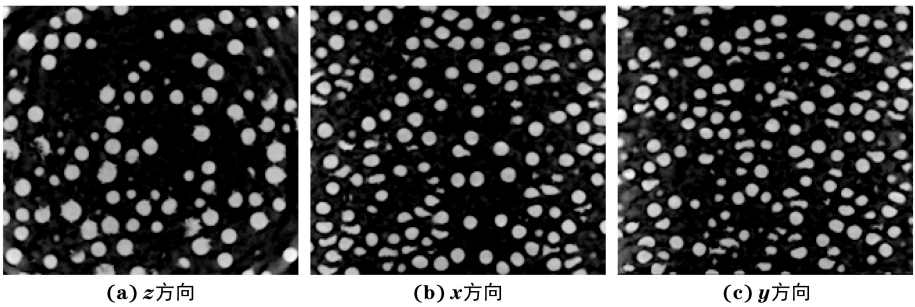


图 5 核芯颗粒的 3 个方向二维 CT 切片图像

将其与子区域体素数量(1 000 体素)相比即可得到体积占比 R 。

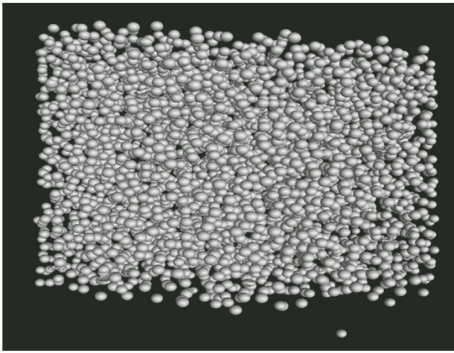


图 6 分割渲染后的核芯颗粒三维分布图像

求出体积占比的最小值 R_{\min} 、最大值 R_{\max} 及中间值 R_{mid} ，从而构成两个体积占比区间 $[R_{\min}, R_{\text{mid}}]$ 和 $(R_{\text{mid}}, R_{\max}]$ ，同时按子区域坐标构建新的三维数据，三维数据的每一个体素对应的颜色值采用 RGB 颜色值来表示，并将 R_{\min} 定义为蓝色，即 RGB 为 $(0, 0, 255)$ ； R_{mid} 为绿色，即 RGB 为 $(0, 255, 0)$ ； R_{\max} 为红色，即 RGB 为 $(255, 0, 0)$ 。中间值相应映射为三基色的合成色，最后将样品区域外的体素赋值为背景色黑色，即 RGB 为 $(0, 0, 0)$ ，从而获得图 7 所示的热图，该热图表征了燃料元件样品中核芯颗粒的分布均匀性。

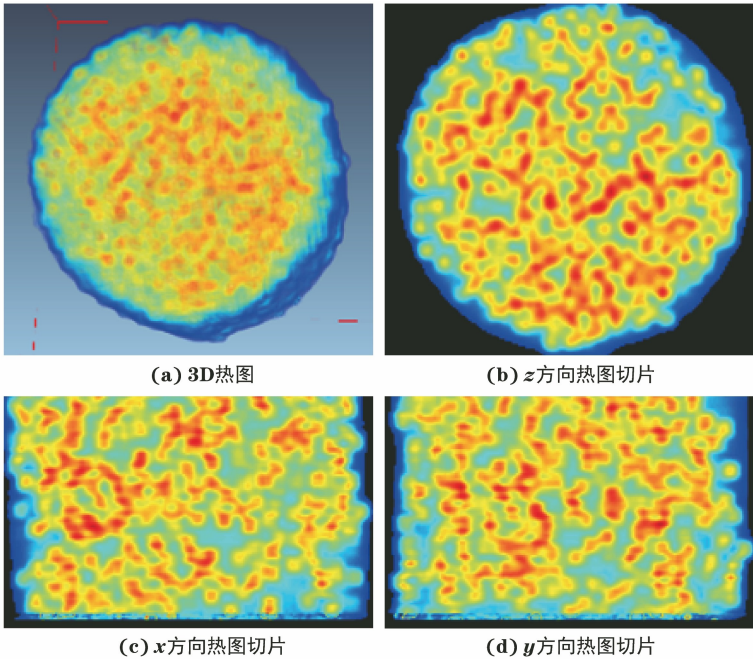


图 7 核芯颗粒分布均匀性热图

从图 7 可知，蓝色区域为核芯颗粒分布稀疏的区域，蓝色越深分布越稀疏；红色区域为核芯颗粒分布密集的区域，红色越深分布越密集。

2.3 结果验证

为确认微焦 CT 系统测量核燃料芯块中核芯颗粒位置信息的准确性，选取燃料芯块的确定高度位置的微焦 CT 分析结果与该位置的金相解剖结果进行比较。首先对燃料芯块的待验证位置进行标识，在验证附近进行切割，然后磨抛至测量位置，并将其大部分颗粒磨抛至赤道面，再对其中相切性、完整性符合颗粒直径和间距测量要求的颗粒进行图像采集及测量，金相样品图如图 8 所示。

鉴于金相样品为圆柱状，为使测量数据具有可追溯性，在电动移动平台上加入了定位装夹装置。

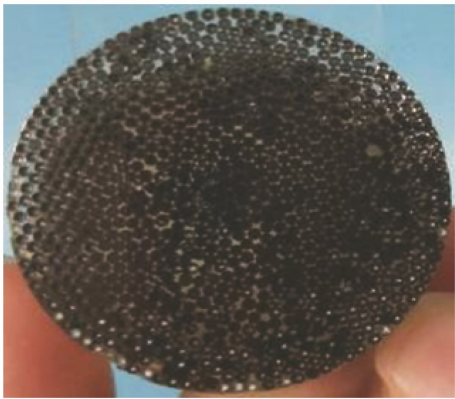


图 8 被检工件横截面金相样品

其中，将金相样品准确地放至定位板的桶状内壁中，确保金相样品中心定位在 2 mm 范围内。定位板上的扇形开槽可以保证载玻片与金相片在制样过程当

中如发生偏差仍可以放入其中。定位板上有定位标线，配合金相片上的标线可以完成金相片在圆周方向上的定位。相机按照预定的采样原则，在 4 mm 中视野下遍历金相样品，自动聚焦采集高清晰中视野图像。同时，使用训练好的机器视觉识别算法，快速准确地挑选出可测颗粒，并且定位出其位置信息，定位结果如图 9 所示。

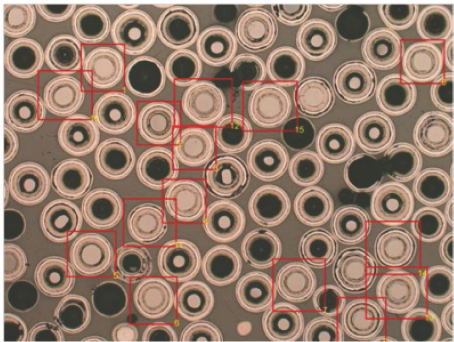


图 9 可测量核芯颗粒识别定位结果

将设备切换到 1.2 mm 左右的小视野，根据中视野提供的可测颗粒位置信息连续对可测颗粒进行小视野成像，使用自适应种子区域生长和形态学处理的算法对小视野成像图像进行位置分析。先对小

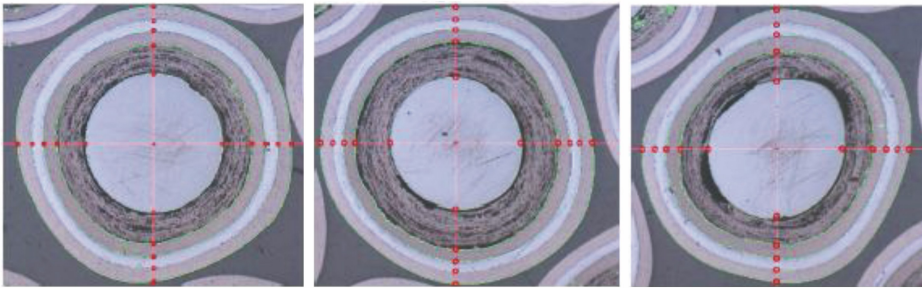


图 10 小视野成像图像处理试验效果

表 2 相同颗粒的显微 CT 测量结果和金相解剖结果对比

				mm			
序号	CT	金相	偏差	序号	CT	金相	偏差
1	0.535	0.520	0.015	11	0.502	0.520	−0.018
2	0.502	0.517	−0.015	12	0.521	0.500	0.021
3	0.507	0.499	0.008	13	0.497	0.499	−0.002
4	0.515	0.509	0.006	14	0.502	0.509	−0.007
5	0.514	0.526	−0.012	15	0.508	0.496	0.012
6	0.527	0.525	0.002	16	0.512	0.527	−0.015
7	0.508	0.516	−0.008	17	0.509	0.508	0.001
8	0.513	0.503	0.010	18	0.500	0.513	−0.013
9	0.517	0.523	−0.006	19	0.513	0.517	−0.004
10	0.510	0.529	−0.019	20	0.503	0.510	−0.007

参考文献：

[1] 张浩,王建建. 模块式高温气冷堆的技术背景及展望

[J]. 中国核电,2021,14(3):419-422.

[2] 张作义,吴宗鑫,王大中,等. 我国高温气冷堆发展战略研究[J]. 中国工程科学,2019,21(1):12-19.

[3] 张翔,潘小强,陆永洪,等. 耐事故燃料芯块的制备方法与研究进展[J]. 粉末冶金技术,2022,40(4):334-339,350.

[4] 莫华均,张伟,吴璐,等. 耐事故 UO₂ 基复合燃料芯块的研发进展[J]. 核动力工程,2020,41(2):36-39.

[5] 杨红发,巫英伟,尹莎莎,等. 事故容错燃料安全性能初步分析[J]. 原子能科学技术,2020,54(8):1441-1447.

[6] 尹春雨,高士鑫,钱立波,等. 耐事故燃料用于高性能压水堆的分析研究[J]. 核动力工程,2023,44(2):136-144.

[7] 张小刚,卢艳平,谭辉,等. X 射线微焦 CT 测量燃料颗粒分布均匀性的表征方法[J]. 光学技术,2023,49(2):215-219.

[8] CARMIGNATO S. Industrial X-Ray Computed Tomography [M]. Cham: Springer International Publishing,2018.

[9] VILLARRAGA-GÓMEZ H,HERAZO E L,SMITH S T. X-ray computed tomography: from medical imaging to dimensional metrology [J]. Precision Engineering,2019,60:544-569.

[10] HSIEH J,FLOHR T. Computed tomography recent history and future perspectives[J]. Journal of Medical Imaging,2021,8(5):052109.

[11] 殷亚军,涂志新,周建新,等. 基于概率密度函数的铸铁石墨颗粒分布研究[J]. 现代铸铁,2017,37(6):80-84.

[12] 郭慧,王刚,赵佳乐,等. 种子纵向分布均匀性指标及空间分布均匀性评价方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(3):1120-1130.

[13] 吴胜兴,孙克纬,沈德建. 新拌混凝土骨料分布均匀性表征方法及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):67-75.

(上接第 50 页)

[9] 王强,宋春晓. 基于 Lamb 波结构健康监测的压缩感知方法研究[J]. 仪表技术与传感器,2016(10):123-126.

[10] 夏小松,郑艳萍. 基于 Lamb 波时间反转法的复合材料损伤检测[J]. 中国机械工程,2021,32(1):26-31,53.

[11] 刘增华,徐庆龙,董拓灿,等. 基于时间反转法的 Lamb 波检测技术的研究进展[J]. 试验力学,2015,30(2):131-141.

[12] 张晓勇,罗来源. 虚拟时间反转水声信号检测[J]. 声学学报,2016,41(1):67-72.

[13] 蔡笑风,刘继方,李永峰,等. 复合材料 Lamb 波时间反转检测方法研究现状[J]. 无损检测,2018,40(11):64-69.

[14] 赵竹君,李成,侯玉亮,等. 基于 PZT 结 Lamb 波方向算法的损伤定位方法[J]. 振动·测试与诊断,2019,39(2):340-345,445.