辐照碳化硅包壳三维X射线断层成像的高级分析

徐飞[1, #], Joshua J. Kane[2], 徐鹏[1, #], Jason L. Schulthess[1], Sean Gonderman[3], Nikolaus L. Cordesa[4]

[1] 爱达荷国家实验室，美国爱达荷州爱达荷福尔斯[2] Ultra Safe Nuclear Corporation，美国华盛顿州西雅图 [3] 通用原子公司，美国加利福尼亚州圣迭戈[4] 洛斯阿拉莫斯国家实验室，美国新墨西哥州

[#]通讯作者 徐飞：电子邮箱：Fei.Xu@inl.gov徐鹏，电子邮箱：Peng.Xu@inl.gov

摘要：

碳化硅（SiC）陶瓷基复合材料（CMC）包壳目前正作为事故容错燃料的主要候选材料之一而受到研究。为了更好地了解碳化硅-碳化硅复合材料的性能，需要开发无损评价技术，以评估关键缺陷。三维X射线成像（亦称X射线计算机断层扫描（CT））是一种无损、数据丰富的表征技术，能够提供表面及次表面空间信息。本文讨论了一种全自动工作流程的设计与实现，该流程利用三维X射线图像上的图像处理技术检测并分析碳化硅-碳化硅缺陷。此工作流程包含四个处理模块：数据准备、孔隙/裂纹检测、可视化和分析。为实现这一工作流程，首先对齐与体积Z轴正交的圆柱轴。随后使用专门设计的自动算法提取包含材料部分的子图像。接着，将体积从笛卡尔坐标系转换到极坐标系，从而缩小图像尺寸，使计算负担降低60倍。然后检测孔隙、去除伪影并标记缺陷。最后，生成三维可视化孔隙/裂纹的连通结构及统计结果。本研究考察了通用原子公司提供的三个碳化硅样品（两个辐照样品和一个未辐照样品）。辐照样品接受了预期会诱发裂纹的辐照；果然，本研究开发的自动化工作流程成功识别并表征了辐照样品中的裂纹形成，同时未检测到未辐照样品中有裂纹。这些结果表明，自动化X射线计算机断层扫描工具有助于更好地了解核能应用中碳化硅-碳化硅结构的损伤及其扩展。

关键词：

碳化硅；X射线计算机断层扫描；裂纹检测；结构可视化

1. 引言

事故容错燃料（ATF）旨在提高燃料对严重事故工况的耐受能力，例如失水事故（LOCA）或反应性引发事故（RIA）[1]。在核反应堆中，包壳是构成核燃料棒外层护套的薄壁管。它是燃料与反应堆冷却剂之间的关键屏障，在为燃料提供结构支撑的同时，还能滞留裂变产物。碳化硅纤维、碳化硅基体（碳化硅-碳化硅）复合材料由一层编织核级碳化硅纤维经化学气相渗透（CVI）覆层制成。凭借其优异的物理和化学性能，这类材料被研究作为事故容错燃料的候选包壳材料[2]。碳化硅陶瓷基复合材料（CMC）具有优异的高温抗氧化性能、出色的辐照抗性、固有的低活化特性，以及其他优越的物理和化学性能[3]。然而，在不同条件下，碳化硅会表现出非线性的损伤力学行为，这一行为受材料内部微裂纹的影响；这些条件包括辐照过程中为维持气密性而产生的应力状态，以及反应性引发事故或其他瞬态条件下发生的芯块-包壳机械相互作用失效，在这些情况下可能会形成微裂纹[4-9]。

要设计出最优的碳化硅结构，必须了解碳化硅陶瓷基复合材料的损伤机制与微观结构之间的关系。微裂纹是影响包壳性能并关系到反应堆安全的关键挑战之一。因此，定量评估裂纹形成和泄漏路径，对于确定碳化硅陶瓷基复合材料的堆芯内性能至关重要。如图 1 (a)-(c) 所示，微裂纹是材料表面及近表面众多微观结构特征之一，会以不同尺度遍布包壳。目前，扫描电子显微镜（SEM）和透射电子显微镜（TEM）等破坏性分析方法，是从样品中获取微裂纹数据的最佳手段。这些方法耗时、成本高，而且会损坏样品，使其无法用于后续性能评估。这凸显了改进无损评价技术的必要性，以便针对微裂纹评估和理解进行优化。为应对这一挑战，爱达荷国家实验室（INL）的燃料材料综合设施（MFC）开发了辐照后

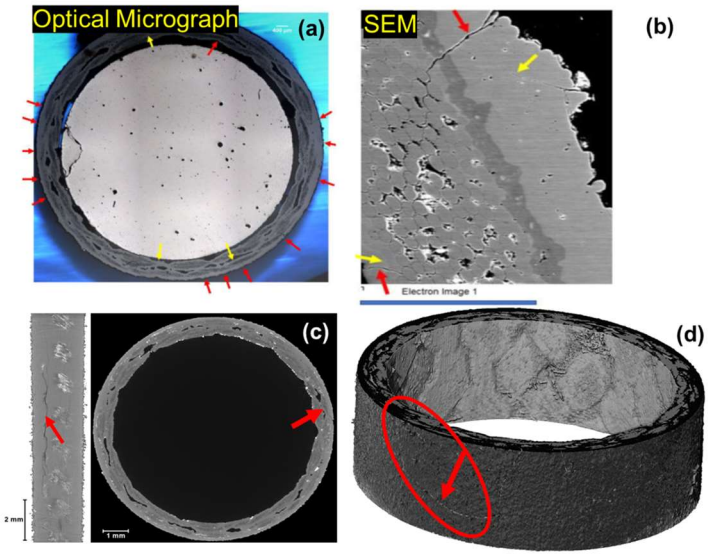


图1。a）样品1[15] 燃料横截面的光学显微图像，红色和黄色箭头标出了裂纹位置；b）样品1[15]燃料包壳局部区域的高分辨率扫描电子显微镜图像，红色和黄色箭头标出了裂纹位置；c）垂直（左）和水平方向（右）的二维横截面图像，显示碳化硅-碳化硅包壳中的垂直近表面裂纹（红色箭头）；d）由X射线断层图像生成的辐照去燃料碳化硅-碳化硅包壳三维体积渲染图。

检查能力，可使用 ZEISS Xradia 520 获取无损三维微观结构数据

Versa X射线显微镜（图1(d)）。该系统用于在广泛的长度尺度（10^{1} – 10^{-2} cm）上获取各类微观结构数据，并能以三维[10]方式捕捉材料的表面和内部结构。具体而言，通过对目标样品进行样品旋转，采集数百张X射线影像。随后，三维重建处理会将材料横截面的二维射线影像合成为一组堆叠图像，从而生成三维图像。这些高分辨率三维模型可用于探索样品的构造和微观结构，从而更准确地判断样品的状态，并加深对材料性能表现方式的理解[11-14]。

在本文中，我们开发了一套全自动工作流程，利用图像处理技术对三维X射线图像中的裂纹进行检测和分析（图2）。孔隙/裂纹检测、可视化和分析是其中的三个主要组成部分，包括四个处理模块，分别记为 P_1 至 P_4。P_1 在空间上将圆柱轴调整为与体积Z轴正交，并在笛卡尔坐标系内提取可能的最小感兴趣体积。P_2 通过将材料环状结构展开，将

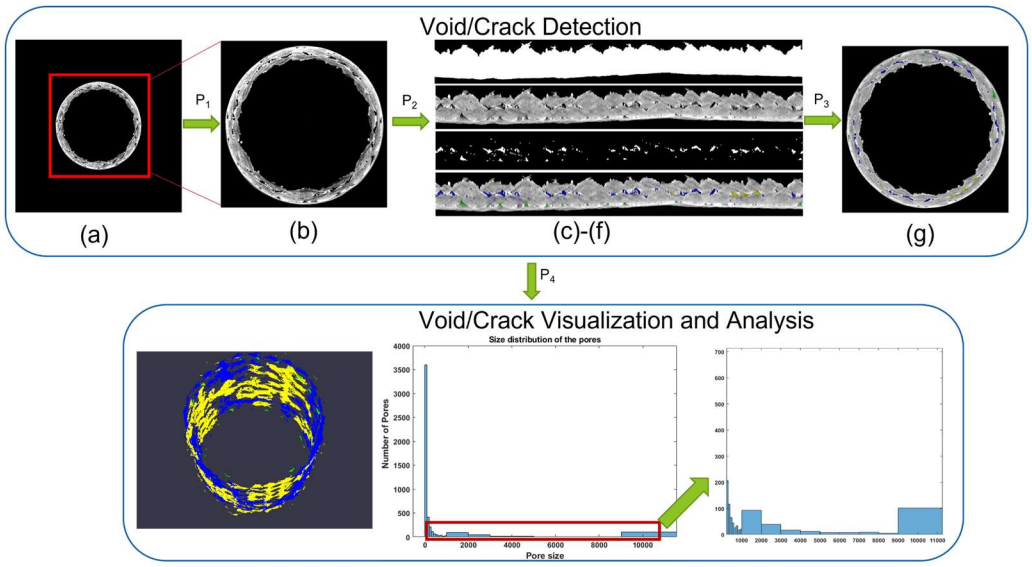


图2. 所提出的工作流程。(a) 样品3的一幅图像，其视场表示3024×3064，分辨率为6μm/像素；(b) 包含材料环带的子图像；(c)–(f) 表示样品3的一个空间变换坐标系，从上到下分别显示环体的二值分割、原始灰度重建、分割出的孔隙以及颜色编码的孔隙分类。在(f)中：绿色表示与环体外表面直接连通的孔隙/裂纹；蓝色表示不接触环体内表面或外表面的封闭孔隙/裂纹；黄色表示接触环体内表面的孔隙/裂纹；红色表示同时接触内、外表面的孔隙/裂纹。(g) 与(f)中相应分类结果对应的重新展开的图像帧。

体积，使用图像分割方法。P生成转换坐标系。P2检测并通过孔隙/裂纹结果。通用原子公司提供的碳化硅样品已在

TREAT中进行测试，并使用所提出的工作流程进行评估。

2. 方法

2.1. 实验数据

爱达荷国家实验室一直是开展核燃料研发的领先国家实验室。该研究涵盖多种燃料形式以及辐照后表征。研究人员采用现代实验仪器，在瞬态反应堆试验（TREAT）设施开展先进燃料（包括先进核燃料）的瞬态辐照试验，其中包括本研究所使用的辐照样品。两根辐照燃料细棒（样品1和样品2）的材料及辐照参数，以及碳化硅-碳化硅

包壳列于表1中。先前研究中，样品1被标记为SETH-H，样品2被标记为SETH-I[15,16]。碳化硅的熔化温度为~2818K（~2445 C）[17,18]。这两个辐照样品展示了碳化硅包壳在瞬态条件下高温时的热机械响应。与样品2相比，样品1接受了更高的能量沉积。为评估芯块-包壳机械相互作用，样品2设计了较小的芯块/包壳间隙，旨在利用燃料的热膨胀向包壳施加快速应变位移载荷[15,16]。瞬态前后的尺寸测量表明，样品1的短棒在靠近上部区域的最大正向直径应变位移为~0.55%，而样品2的应变位移为~ 0.65%。这两种应变均超过Kamerman 等人[19,20] 预测的0.32%应变；该应变足以在包壳外表面引发裂纹，并使裂纹扩展穿过包壳壁。目视检查显示，这两个辐照样品在高温下仍保持完整且呈棒状几何形态。此外，对样品进行的光学显微镜观察显示，燃料中存在较大的孔隙。样品3是未装燃料的通用原子公司碳化硅-碳化硅包壳。

使用ZEISS Xradia 520 Versa X射线显微镜（卡尔蔡司X射线显微镜公司，美国加利福尼亚州都柏林）在爱达荷国家实验室材料与燃料综合设施的辐照材料表征实验室（IMCL）进行了无损三维成像。Nordson DAGE钨靶X射线源（英国艾尔斯伯里）采用专有高能滤波器运行，加速电压为110.9 kVp，靶电流为111.7 μA。所有投影射线图像均在样品旋转360度的过程中采集，每幅射线图像平均包含20个图像帧。帧尺寸为3024×3064像素。重建三维切片如图3所示。更多详细信息见表2。

表1 三个样本的信息

Sample	Fuel	Clad	Pellet Clad Gap (μm)	Rodlet Energy Deposited (J/g)	Pulse Width (ms)	Peak Fuel T (C)	Peak Clad T (C)	Objective
1	NE-U3Si2	SiC	80	528	95	2050	1133-1156	PCI/Fuel melting
2	NE-U3Si2	SiC	50	330	100	1440	831-840	PCMI
3	NE-U3Si2	SiC						Fresh sample

表2 三个样本的三维X射线数据信息

样品至旋转	轴（RA）（mm）	探测器至 RA（mm）	像素尺寸 (μm)	数量 投影	锥角 切片数	
1	-26.0461	245.4407	7.1762	4,501	14.9334	1932
2	-26.0461	245.4392	7.1763	4,501	14.9040	1932
3	-21.0601	234.2374	6.1704	2,401	15.8031	1932

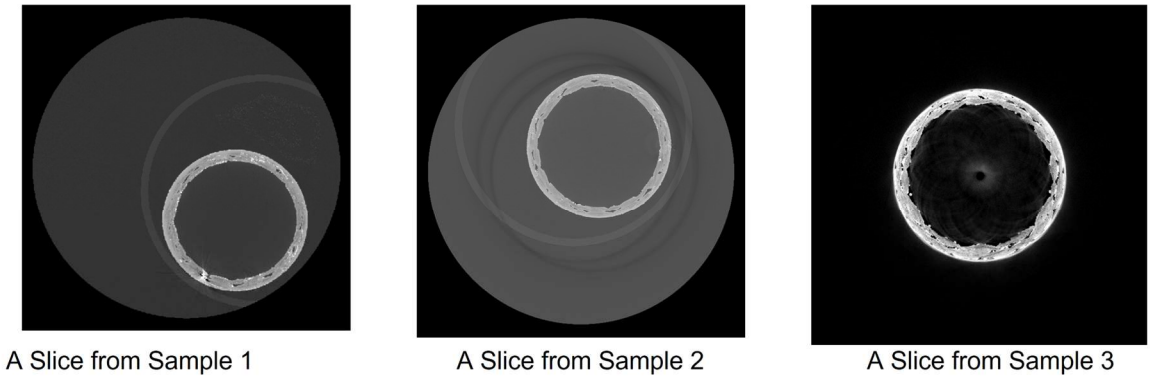
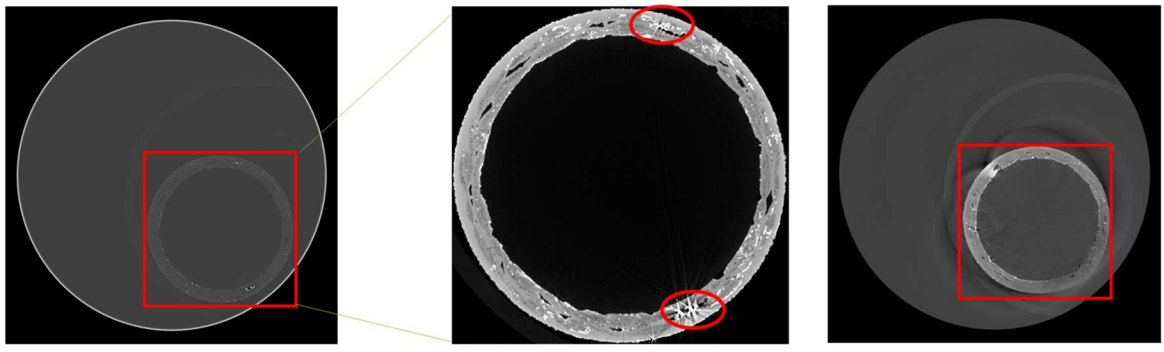


图3. 三个样本的图像切片

尽管三维X射线成像提供了高分辨率且无损的数据，但三维X射线的切片在重建过程中会发生旋转和漂移，从而影响孔隙/裂纹的三维结构。如图4(a)和(c)所示，来自同一样品的切片#410和切片#1156的包层圆心分别为（1973,1916）和（2038,1962）。此外，三维图像中引入了高密度伪影（图4(b)），这会影响孔隙检测。另外，不同样品中的材料中心也存在差异



(a) 切片#1156 (3024×3064) (b) 包层圆形部分 (1351×1351) (c) 切片#410

图4. 现存挑战

（图3）。为弥补这一点，采用重定向方法使圆柱轴与体积Z轴正交，并设计了一种自动算法，用于提取包含材料部分的子图像。

2.2. 重新定向和感兴趣区域（ROI）提取

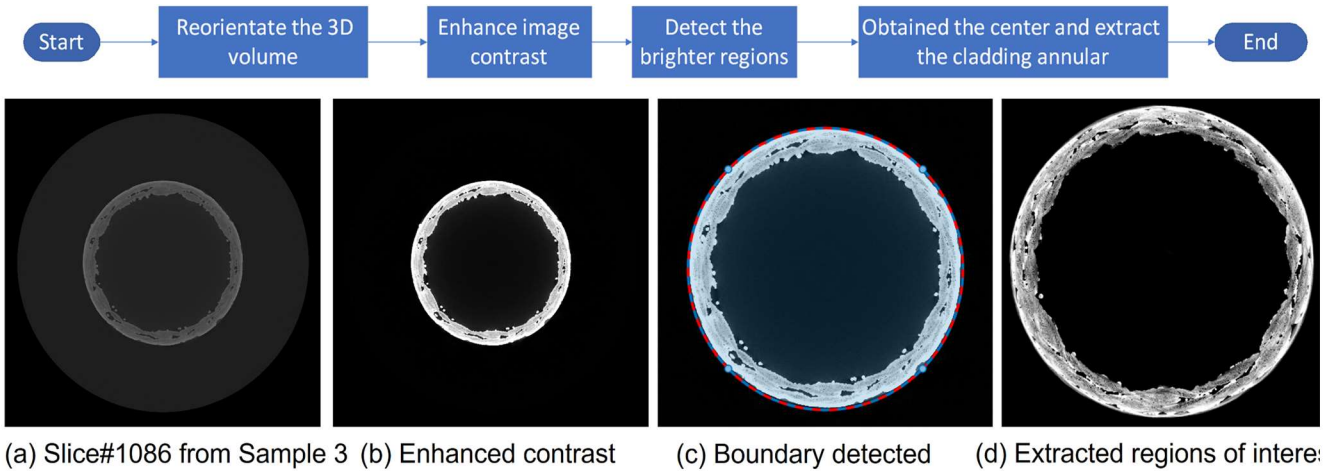


图5. 重新定向和ROI提取。(a) 大小为 3024×3064 的原始图像；(b) 对比度增强；(c) 放大的包层边界检测结果；(d) 重新定向后提取包层圆形区域，图像大小为 1351×1351

如图2所示，P_1 的处理过程是对体积进行对齐并提取包层圆形区域。该处理过程的流程图及相应的中间结果如图5所示。在重新定向过程中，我们应用了一种算法，将圆柱轴与体积Z轴对齐。该算法有两个输入：三维体积，以及由$(x_i,\ y_i,\ i)$组成的二维矩阵，即中心，其中$(x_i,\ y_i)$是第i个切片的包层中心。包层中心由圆形边界检测结果自动生成（图5(c)）。图像中每个像素的值称为强度，较亮的区域表示强度较高。如图5(b)所示，包层比其他区域亮得多。我们使用全局阈值分割方法[21]检测材料的圆形区域。该阈值方法将图像强度大于自适应阈值$\mathbf{T}_0$的像素值设为1；否则设为0。包层圆形区域的中心通过检测到的

包层外边界计算得出。在本研究中，我们为第一个和最后一个切片创建了一个中心列表，命名为中心。

重新定向过程包含三个主要步骤：1）通过计算沿*x*轴和*y*轴的*z*轴（切片编号）方向斜率，确定从中心沿*x*轴和*y*轴的错配角；2）假设方向和漂移的变化是对称的，分别对前半部分体积和后半部分体积生成变换矩阵，沿*x*轴、*y*轴和*z*轴的线性平移量依次为[*mean(x)*、*mean(y)*，切片数/*2*] 以及–[*mean*(x)、*mean(y)*、切片数/*2*] 。*mean(x)*和*mean(y)*分别是中心中x轴和y轴数值的平均值；3）使用平移矩阵进行空间变换，计算重新定向空间中每个位置在原始三维体积变换下标空间中对应的位置，如图5 (c)和(d)所示。

重新定向后，系统会自动检测每个切片中的包壳部分，并裁剪出每个切片中仅包含圆形包壳的体积。样品3的原始体积大小为17GB，而包含包壳的子体积为2GB，存储空间减少了8倍以上。

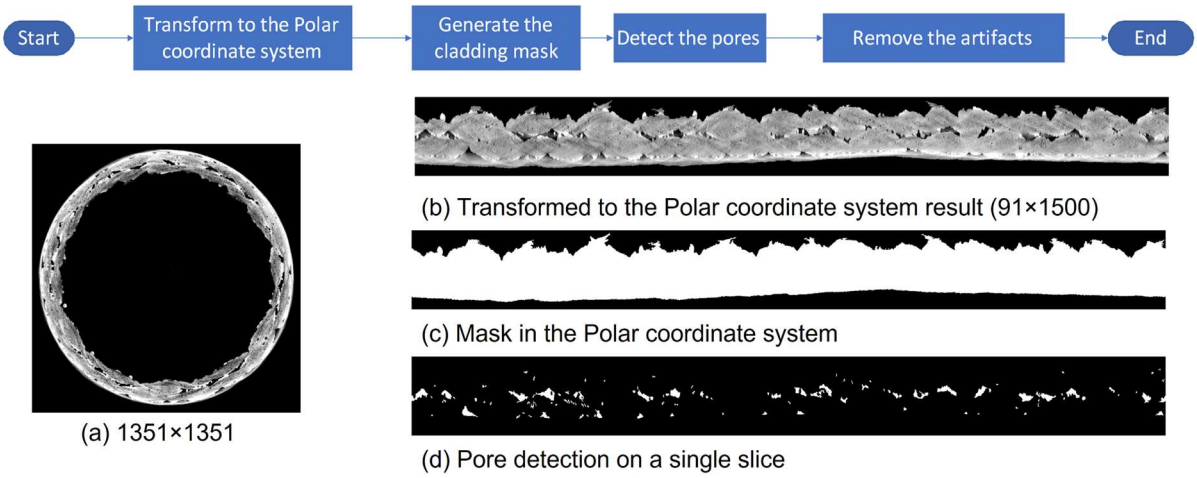


图6。空洞检测。

2.3. 空洞检测

图6展示了空洞检测的过程。首先，将笛卡尔坐标系转换为极坐标系，以降低计算复杂度。由于包壳材料呈环形，二维笛卡尔坐标数组*x* 和*y*中的对应元素

被转换为极坐标θ角和ρ。包壳内、外边界的半径距中心分别约为550和650像素。包壳厚度小于100像素。在极坐标系中生成了1500个角度，其半径范围覆盖包壳的内、外边界。变换图像的尺寸为91×1500，如图6(b)所示，计算规模因此缩小了近7倍。

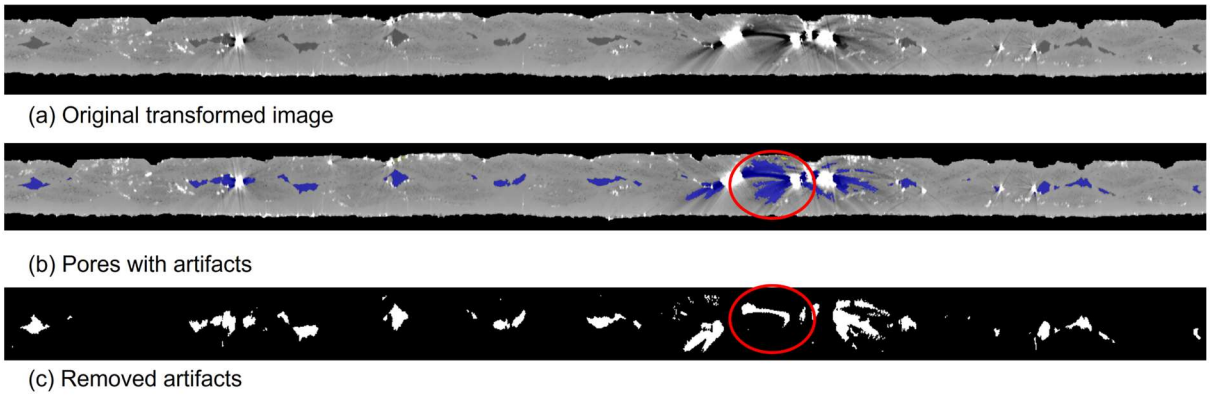


图7. 移除着色器空洞检测。

变换后，检测到包壳区域中的空洞（图6(c)）。包壳中的空洞比其他区域呈现出更暗的色调。调整图像对比度后，去除噪声，并使用自适应阈值分割法检测空洞[21]。然而，图7(a)和(b)中红色圆圈所标出的阴影，是X射线扫描过程中高密度金属产生的[22,23]。阴影与空洞相互包围且分布不均，难以根据强度将其区分，这将导致阈值分割法误检。为解决该问题，计算每个连通对象的强度标准差；如果标准差大于d_1,，则在连通空洞中生成一个自适应局部阈值，并去除强度大于该阈值的像素（图7(c)）。

2.4. 可视化与分析

正如 Schulthess 先前的研究所述，等[15]，燃料芯块的快速热膨胀使其与包壳接触，而传递至包壳的热量在包壳壁上产生热应力梯度，导致样品1和样品2中出现裂纹。为对孔隙与裂纹结构进行分类，

将孔隙/裂纹分为四类：包壳内部的孔隙/裂纹、邻近外边界的孔隙/裂纹、邻近内边界的孔隙/裂纹，以及连接内边界和外边界的孔隙/裂纹，分别记为 c_1-$c_{4,}$。空洞和裂纹的三维结构信息（c_4）由 Matlab[24,25] 中的内置函数 regionprops3 生成。

孔隙率统计分析。三个样品中空洞和裂纹的总数如表3所示。样品1的空洞数量最多，但样品2的孔隙率最高。样品1和样品2中的空洞数量几乎是新鲜样品3的两倍或更多。如表4的c_4 列所示，样品3中未检测到贯穿包壳内外边界的裂纹；样品1中发现的独立裂纹数量最多，而样品2的裂纹最大。从空洞的位置来看，样品3中几乎所有空洞（>99%）都位于包壳内部（c_1）。而样品1和样品2中的大多数空洞是贯穿包壳内外边界的裂纹（c_4）和微裂纹（c_2），这与先前研究中的表征观察结果一致[15]。样品1和样品2的裂缝结构见图8和图9。图中较暗的区域为空洞，彩色部分为裂纹。裂纹的属性按表4所示生成，包括裂纹体积和主轴长度。主轴长度是与该区域具有相同归一化二阶中心矩的椭球体长轴长度，以1×3向量表示。表4中的数据表明，所有裂纹在垂直方向上的长度都更长，尤其是样品2的裂纹1。样品2的裂纹数量较少，但每条裂纹都比样品1中的裂纹更大。

表3 空洞和裂纹总体统计

Sample #	Volume size	Cladding size (mm^3)	# of voids	Porosity ratio	c_1	c_2	c_3	c_4	# of void with size >0.001mm^3	# of void with size >0.01mm^3	# of separated cracks
1	91×1500×1111	55.39	97446	5.73%	26%	40%	1%	33%	124	97	8
2	91×1500×1865	92.98	84333	6.96%	23%	11%	2%	63%	84	66	2
3	220×1500×1931	85.23	4828	3.01%	99%	1%	0%	0	135	55	0

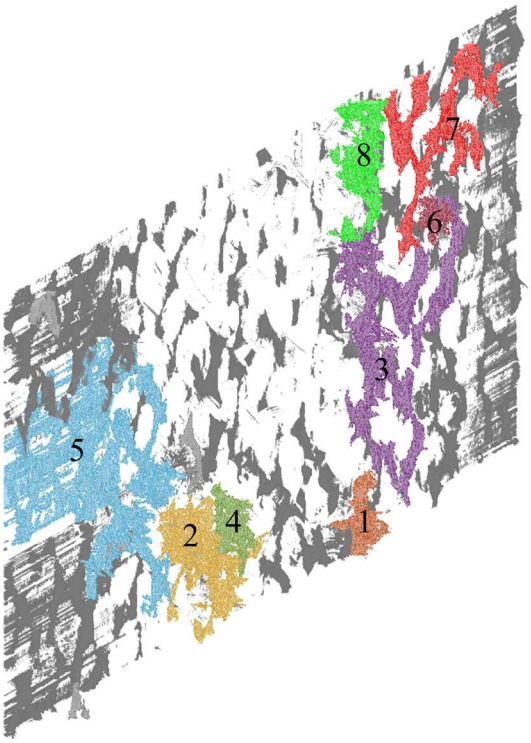


图8. 展开后的样品1中的裂缝结构

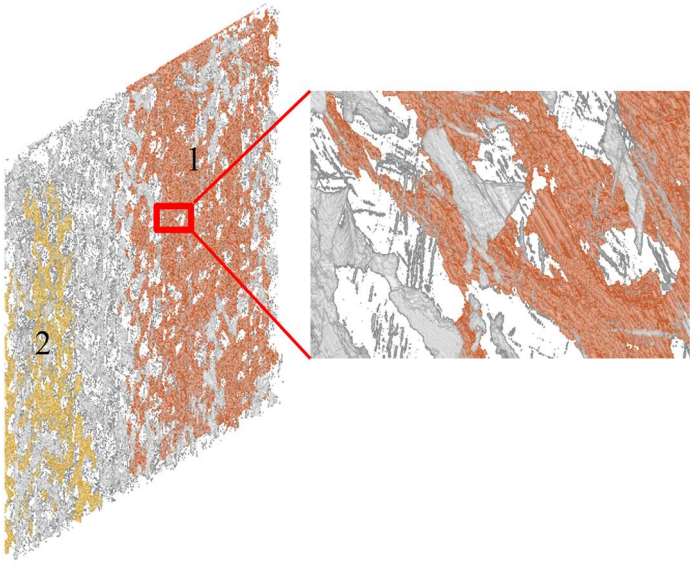
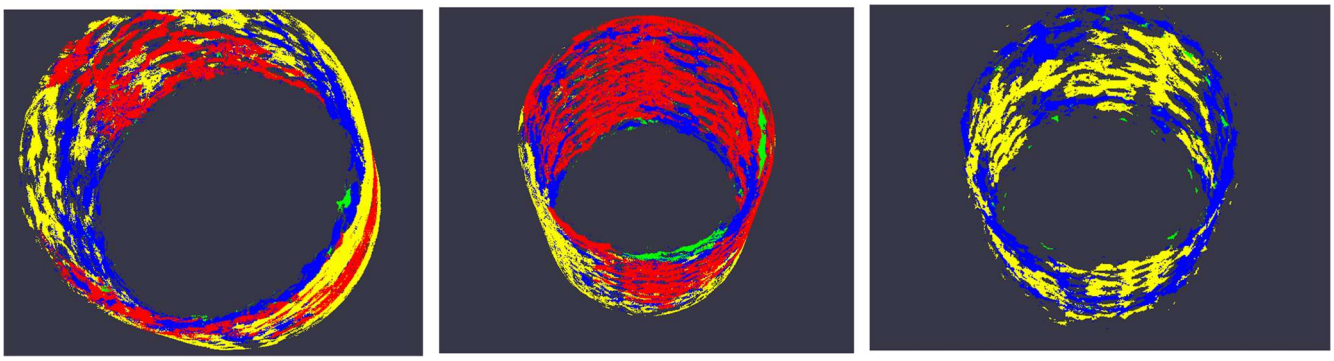


图9. 展开后的样品2中的裂缝结构

表4 空洞和裂纹总体统计

样品编号	裂纹数量	体积大小（mm^3）	主轴长度（mm）		
样品1	1	0.04	1.41	0.81	0.43
	2	0.12	3.19	1.28	0.54
	3	0.28	5.50	2.71	0.37
	4	0.04	1.76	0.60	0.48
	5	0.32	5.11	3.21	0.56
	6	0.01	0.69	0.55	0.43
	7	0.16	3.25	2.79	0.26
	8	0.08	2.88	0.86	0.40
样品2	1	3.23	17.38	6.97	0.72

	2	**0.87**	**13.51**	**3.66**	**0.63**



样品1 样品2 样品3

图10. 展开后的样品1、样品2和样品3中的裂缝结构。

辐照后检验数据分析。对样品1进行扫描电子显微镜表征后发现，在横截面表面观察到14条径向裂纹和3条周向裂纹，而纵截面中发现2条径向裂纹和3条轴向裂纹。从横截面可见，裂纹贯穿包壳厚度并相互连通。

对样品2进行光学显微镜观察发现，与样品1[15]相比，碳化硅包壳中有更多径向裂纹和周向裂纹。在样品表面，横截面中观察到31条径向裂纹和10条周向裂纹，纵截面中观察到15条径向裂纹和0条轴向裂纹。发现至少有6条裂纹贯穿包壳壁厚。还发现许多尺寸介于~300 至~400 μm的大孔隙。主裂纹旁出现了互连裂纹，并有分支裂纹从主裂纹延伸而出。此外，在内表面观察到裂纹网络，这可能是由制造工艺造成的。进一步的扫描电子显微镜检查发现了更多分支裂纹和广泛分布的微裂纹。样品表面的所有发现均与X射线三维结果一致。

这是首项展示在爱达荷国家实验室进行瞬态安全测试后，碳化硅陶瓷基复合材料包壳中缺陷和裂纹的三维X射线无损检测能力的研究。裂纹程度与包壳在TREAT实验中经历的瞬态应变成正比。缺陷的统计数据及

其特征可用于了解碳化硅包壳在事故中的力学响应，之后还可与制造过程相关联，以改进工艺和性能。

3. 结论

本研究提出了一种自动处理三维X射线数据的工作流程，整合了预处理、目标检测和可视化，并展示了X射线断层成像能力在快速支持非燃料部件辐照后检查方面的适用性。

所提出的工作流程具有以下三项优势：a）自动提取感兴趣区域并将其从笛卡尔坐标系转换到极坐标系，使计算规模缩小了近60倍；b）简单的基于阈值的分割可高效完成自动孔隙检测；c）通过三维可视化对空洞和裂纹进行分析，揭示了空洞和裂纹的整体孔隙率状况、位置和结构，从而提供关键的定量信息，用于评估材料状况和性能，并最终协助决策者确定材料的使用寿命。

实验结果表明，样品1（较低应变）和样品2（较高应变）中的裂纹形成了连接环体内表面与外表面的连续通道，破坏了材料所需的密封性；而样品3（新鲜材料）中未观察到此类裂纹。这些结果表明，借助先进的可视化方法和自动化缺陷分析，X射线断层成像能够快速支持非燃料部件的辐照后检查。该工作流程还可应用于其他类似的三维X射线数据分析任务。

此外，爱达荷国家实验室目前的X射线仪器能够提供的图像质量对应的长度尺度为 10 到 10^{-2} cm，无法观测宽度或长度小于该尺度的微裂纹。由于分辨率的限制，本研究无法检测尺寸小于 35 μm2（5 个像素）的裂纹或孔隙。未来，我们将应用超分辨率模型生成高分辨率

待分析的图像 体积中的微裂纹，并对扫描电子显微镜、扫描透射电子显微镜开展更先进的分析 ，以及 EE LS 数据，以揭示化学成分与裂纹形成之间的关系 on.

4. 致谢

本研究使用从先进燃料计划获得的资金开展。所研究的样品由通用原子公司提供。

5. 免责声明

作者不存在已知的利益冲突。

本信息由美国政府机构资助的工作承办方编制。美国政府及其任何机构或其任何雇员，均不对所披露的任何信息、设备、产品或流程的准确性、完整性或实用性作出明示或默示的任何保证，也不承担任何法律责任或义务，亦不表示使用这些信息、设备、产品或流程不会侵犯私有权利。本文提及的任何特定商业产品、流程或服务，无论是以商品名称、商标、制造商名称或其他方式指称，均不一定构成或暗示美国政府或其任何机构对其的认可、推荐或支持。作者在本文中表达的观点和意见不一定代表或反映美国政府或其任何机构的观点。

6. 数据可用性声明

支持本研究结论的数据，可根据合理请求向通讯作者获取。

7. 参考文献

1 美国能源部，《开发具有增强事故容错能力的轻水反应堆燃料：致国会报告》，华盛顿特区 20585（2015）。https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f23/ Report% 20to%20Congress%20-%20Accident%20Tolerant%20Fuels.pdf 。2 Yueh K, Terrani KA（2014）用于轻水反应堆燃料组件应用的碳化硅复合材料。《核材料杂志》448:380–388。https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.12.0043 Y. Katoh, L.L. Snead, C.H. Henager, A. Hasegawa, A. Kohyama, B. Riccardi, H. Hegeman，聚变应用碳化硅复合材料研发的现状与关键问题，《核材料学报》367-370（2007）659–671，A辑，doi: 10.1016/j.jnucmat.2007.03.032。4 P.J. Doyle, C. Ang, L. Snead, Y. Katoh, K. Terrani, S.S. Raiman，碳化硅上第一代双用途涂层在事故容错燃料包壳中的水热腐蚀，《核材料学报》544（2021）152695，doi: 10.1016/j.jnucmat.2020.152695

5 T. Koyanagi, Y. Katoh, T. Nozawa，面向核能的新一代碳化硅复合材料设计与策略，《核材料学报》540（2020）152375，doi: 10.1016/j.jnucmat.2020.152375。6 C.M. Petrie, T. Koyanagi, J.L. McDuffee, C.P. Deck, Y. Katoh, K.A. Terrani，在原型高热流条件下辐照SiC/SiC复合管的实验设计与分析，《核材料学报》491（2017）94–104，doi: 10.1016/j.jnucmat.2017.04.058。7 J.G. Stone, R. Schleicher, C.P. Deck, G.M. Jacobsen, H.E. Khalifa, C.A. Back，多层碳化硅基事故容错核燃料包壳的应力分析与概率评估，《核材料学报》466（2015）682–697，doi: 10.1016/j.jnucmat.2015.08.001。8 W. Li, K. Shirvan，正常运行期间BISON中U_3Si_2-SiC燃料性能分析，《核能年刊》132（2019）34–45，doi: 10.1016/j.anucene.2019.04.021。9 Y. He, K. Shirvan, Y. Wu, G.H. Su，正常运行、功率提升及反应性引入事故条件下U_3Si_2-SiC设计的燃料性能优化，《核工程与设计》353（2019）110276，doi: 10.1016/j.nucengdes.2019.110276。10 Cordes, N., Kane, J., & Craft.（2020）。核能材料的三维X射线显微术。《显微学与微量分析》26(S2)，872-872。doi:10.1017/S1431927620016141 11 Y.T. Chen, T.N. Lo, Y.S. Chu, J. Yi, C.J. Liu, J.Y. Wang, C.L. Wang, C.W. Chiu, T.E. Hua, Y. Hwu, Q. Shen, G.C. Yin, K.S. Liang, H.M. Lin, J.H. Je, G. Margaritondo，30纳米以下的全场硬X射线显微术：一项具有挑战性的纳米制造成果，《纳米技术》19（2008）。https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/39/39530212 N.L. Cordes, W.C. Chuirazzi, J.J. Kane, J.D. Stempien，透视核燃料：中子辐照TRISO包覆燃料核的三维无损X射线显微术和体积分析，《MRS Advances》（2021）。https://doi.org/10.1557/s43580-021-00167-1。13 G.W. Helmreich, D. Richardson, S. Venkatakrishnan, A. Ziabari，利用X射线计算机断层扫描测量TRISO燃料核及各层体积的方法，《核材料学报》539（2020）152255。https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152255。14 J.J. Kane, D.W. Marshall, N. Cordes, W.C. Chuirazzi, B. Kombaiah, I. van Rooyen, J.D. Stempien，利用X射线计算机断层扫描对TRISO燃料压块进行三维分析，《核材料学报》565（2022）153745。https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153745。15 Schulthess, J., Kamerman, D., Winston, A., Pomo A., Trowbridge T., Pu X., Woolstenhulme N., Imholte D., Jensen, C., Wachs D.，反应性引入事故条件下硅化铀燃料和碳化硅复合包壳性能的瞬态后检查，《核材料杂志》，第560卷，2022年，153520，ISSN 0022-3115，https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153520。16 David Kamerman, Nicolas Woolstenhulme, Devin Imholte, Austin Fleming, Colby Jensen, Charles Folsom, Connor Woolum, Korbin Tritthart, Jason Schulthess, Dan Wachs，在锆合金和碳化硅包壳中对硅化铀燃料进行瞬态测试，《核能年刊》，第160卷，2021年，108410，ISSN 0306-4549，https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108410。17 L.L. Snead, Y. Katoh, S. Connery，中高辐照温度下SiC的肿胀，《核材料学报》367-370（2007）677–684，A辑，doi: 10.1016/j.jnucmat.2007.03.097。18 R.W. Olesinski, G.J. Abbaschian，C-Si（碳-硅）系统，《合金相图系统通报》5（1984）486 https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02872902.pdf。19 D. Kamerman, N. Woolstenhulme, D. Imholte, A. Fleming, C. Jensen, C. Folsom, C. Woolum, K. Tritthart, J. Schulthess, D. Wachs，反应性引发事故试验中硅化铀燃料和碳化硅复合包壳的性能，《核能年刊》160（2021）108410，doi:10.1016/j.anucene.2021.108410。20 D. Kamerman, N. Woolstenhulme, D. Imholte, A. Fleming, C. Jensen, C. Folsom,C. Woolum, K. Tritthart, J. Schulthess, D. Wachs，硅化铀燃料和碳化硅复合包壳的性能

反应性引发事故试验中的复合包壳，爱达荷国家实验室，2020年 INL/EXT-20- 59155（技术报告）21 Gonzalez, R. C. 与 Woods., R. E. 阈值处理。载于《数字图像处理》。595-611（培生教育，2002年）。22 S. Zhao、D.D. Robertson、G. Wang、B. Whiting、K.T. Bae，使用小波进行X射线计算机断层扫描金属伪影校正：全髋关节假体成像应用，IEEE医学影像学汇刊。19（2000年）1238–1247。https://doi.org/10.1109/42.897816。23 J. Hur、D. Kim、Y.G. Shin、H. Lee，基于受约束束硬化估计器的多色X射线计算机断层扫描金属伪影校正方法，《物理学与医学中的生物学》。66（2021年）。https://doi.org/10.1088/1361-6560/abe026。24 Lehmann、Gaetan 和 David Legland。使用克罗夫顿公式和游程编码进行高效*N*维表面估计，《The Insight Journal》，2012年。https://insight- journal.org/browse/publication/852。25 Shoemake, Ken，《图形宝石IV》。Paul S. Heckbert 编，Morgan Kaufmann，1994年，第222–229页。26 R.E. Hoggan、K.R. Tolman、F. Cappia、A.R. Wagner、J.M. Harp，U3Si2燃料芯块的晶粒尺寸与相纯度表征，《核材料学报》。512（2018年）199–213，doi:10.1016/j.jnucmat.2018.10.011