

压水堆燃料组件管座的 X 射线数字成像检测

张小刚, 俞东宝, 汤 慧, 朱永利, 张洪伟

(中核北方核燃料元件有限公司, 内蒙古包头 014035)

摘要: 通过开展管座三维CT成像射线检测技术研究, 获得带人工气孔缺陷的管座三维结构。并利用三维结构图, 借鉴X射线照相工艺开展二维DR成像的透照角度分析, 模拟仿真特定角度下的DR透照图像, 确定最佳DR透照角度和可能存在的检测盲区。通过模拟仿真所得最佳透照角度开展DR透照实验, 确定最佳透照角度参数、最终的检测盲区和缺陷检出能力, 对多方向DR检测方法的可行性进行验证, 建立管座X射线数字成像快速检测方法, 检测灵敏度可达 $\Phi 0.3$ mm。

关键词: 压水堆; 燃料组件管座; X射线检测; 数字成像; 三维成像

管座是燃料组件的两端构件, 在整个组件中起到固定元件、保证元件结构稳定、分配冷却剂流量和异物过滤等作用, 所以管座的整体质量关系到整个组件的精度以及入堆后元件的运行稳定性^[1-3]。国产化压水堆燃料组件管座采用精密铸造技术整体成形再加工完成。精密铸造管座表面积大, 结构复杂, 铸件表面品质要求高, 纵横交错的薄壁筋板遍布, 连接板为薄壁结构, 因而铸造难度大^[4-5]。

本文采用9MeV高能工业CT检测系统对带人工气孔缺陷的管座进行三维CT成像, 得到带人工气孔缺陷的管座三维结构模型。借鉴X射线胶片照相透照角度, 利用9MeV三维CT成像获得的管座三维结构图, 开展DR成像透照角度分析, 并从特定角度下进行DR透照成像仿真, 以观察是否能从仿真图上发现人工气孔缺陷。为了便于验证DR检测方法对缺陷的检出能力, 依据燃料组件管座的不同部位加工人工模拟缺陷。依据分析得出的透照角度, 采用450 kV射线源和平板探测器开展管座的实际DR检测, 获得透照DR图像。结合实物上的人工孔型缺陷, 分析实际DR检测对缺陷的检出能力, 验证450 kV射线源和平板探测器开展管座DR快速检测方案的可行性。

1 管座透照模拟仿真分析

1.1 管座模拟缺陷加工

为了便于验证射线成像对于管座缺陷的检出能力, 在管座具有代表性位置如四周外侧厚沿、四周外侧薄沿、底部凸起厚出、座脚盲区、边顶盲区等位置使用硬质合金钻头加工多组孔型缺陷, 结合燃料组件管座不同厚度下的X射线检测灵敏度要求, 根据产品技术条件在不同型面上加工 $\Phi 0.3$ mm和 $\Phi 0.5$ mm孔型缺陷, 其中上管座加工9组人工缺陷(图1), 下管座加工7组人工缺陷(图2)。

1.2 管座三维CT检测

锥束CT每次可以扫描一段被检测工件, 相比于传统扇束CT断层扫描, 具有更高的检测效率。以扫描一个高度为300 mm的工件检测为例, 采用传统扇束CT扫描, 若切片厚度为1.0 mm, 单层扫描需要2 min, 完全检测需要扫描300个CT切片图像, 耗时大约需600 min; 而锥束CT检测同样的工件一次即可完成, 耗时大约只需30 min,

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。E-mail: zhangupc06@163.com

中图分类号: TG115.22;
TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)
10-1277-07

收稿日期:

2023-02-21 收到初稿,
2023-03-29 收到修订稿。

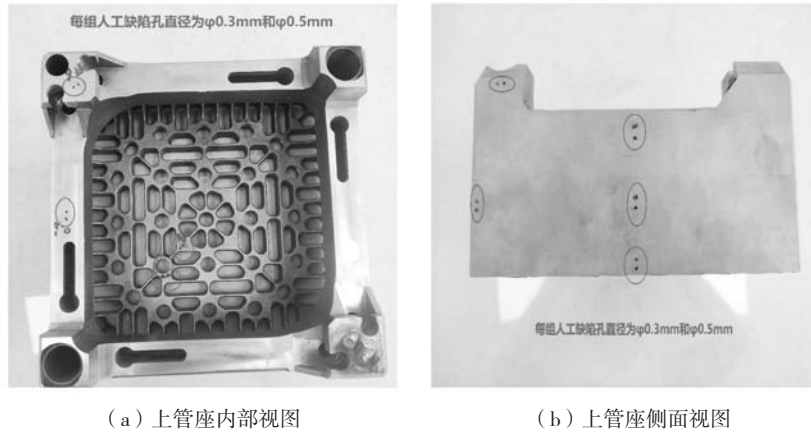


图1 上管座实物图 (带模拟缺陷)

Fig. 1 Physical images of the upper tube base (with simulated defects)

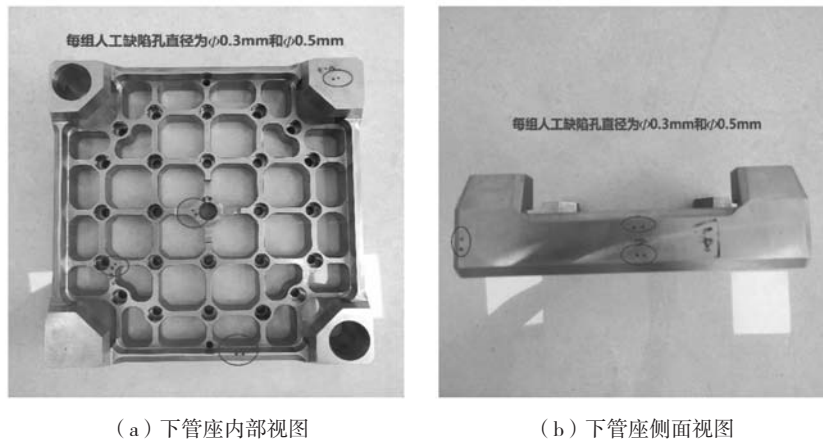


图2 下管座实物图 (带模拟缺陷)

Fig. 2 Physical images of the lower tube base (with simulated defects)

而可以获得不少于1 024个CT切片图像。因此, 锥束CT的检测效率大约是扇束CT的20倍。

由于管座的最大钢厚度超过200 mm, 为了保证缺陷检出能力以及保证结构的完整性, 使用9MeV高能加速器CT系统对上下管座进行三维CT扫描, 获得上下管座三维结构图像。检测时选择的技术参数如表1所示。

表1 管座三维成像检测参数

Table 1 Three-dimensional imaging detection parameters of the pipe seat

序号	项目	具体参数
1	X射线能量	9MeV
2	X射线源焦点尺寸	Φ2.0mm
3	扫描方式	三维CT扫描
4	矩阵大小	1 024 × 1 024 × 1 024
5	视场直径	300 mm
6	同步频率	150 Hz
7	剂量率	1 850 cGy/min
8	采样时间	500 ms

采用ZCVAS软件对采集所得三维CT数据进行三维重构和可视化, 可得如图3所示的三维CT图像, 三维图上可见清晰的人工气孔缺陷。

1.3 数字成像透照仿真计算

以工件的三维CT图像数据为基础, 进行DR透照仿真。DR透照仿真算法主要包括两部分: 投影路径算法^[9-10]和像素投影算法^[11]。

投影路径算法主要分为三个部分: 坐标映射, 画布变换, 三线性插值。坐标映射如图4所示。图像以图中的某一点为原点, 原点与像素点 (x, y, z) 的连线看作一条向量, 将此向量旋转一定角度 θ , 得到新坐标 (x', y', z') 。在算法中图像矩阵中心点与 (x, y, z) 的连线作为向量进行旋转。

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: λ 为尺度比例因子, 初始值假设为1; R 为 3×3 旋

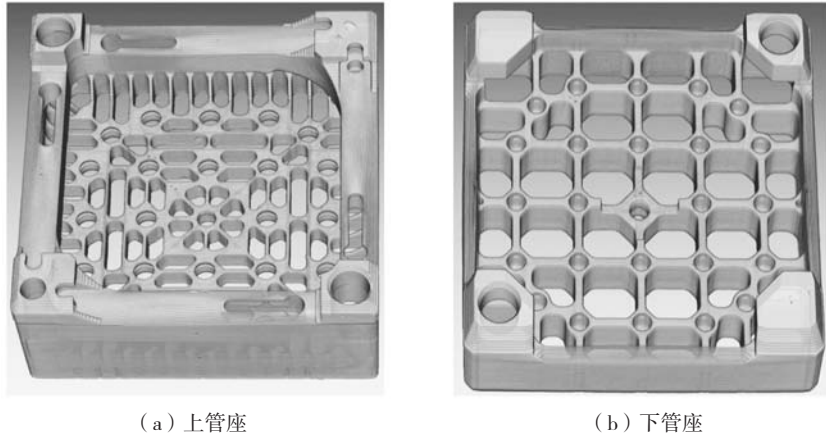


图3 管座三维CT图像(带人工气孔缺陷)

Fig. 3 Three-dimensional CT images of the nuclear fuel assembly nozzle (with artificial porosity defect)

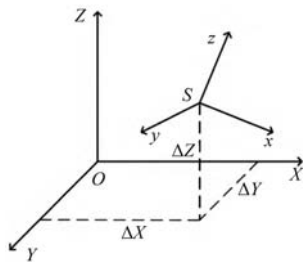


图4 三维坐标映射原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the 3D coordinate mapping

转矩阵。根据公式(1)求出新图像每一个像素点旋转前在原图像中的位置,再将原图像中对应灰度值赋值给新图像。

引入一个具有3个独立元素的反对称矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -c & -b \\ c & 0 & -a \\ b & a & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: a, b, c 相互独立, 则罗德里格矩阵可由反对称矩阵构建为:

$$R = (I + S)(I - S)^{-1} \quad (3)$$

式中: R 是个正交矩阵, 其中 I 是3阶单位阵, 将 R 展开为:

$$R = \frac{1}{1+a^2+b^2+c^2} \begin{bmatrix} 1+a^2-b^2-c^2 & -2c-2ab & -2b+2ac \\ 2c-2ab & 1-a^2+b^2-c^2 & -2a-2bc \\ 2b+2ac & 2a-2bc & 1-a^2-b^2+c^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

旋转过程中图像会出现超出画布的情况, 因此画布的大小需要重新计算, 并且需要重新计算画布中心的位置 c' 。 c' 的位置根据旋转后得到的新画布的长宽很容易计算得到, 如图5所示。

$$c' = \frac{\text{height}' + \text{width}'}{2} \quad (5)$$

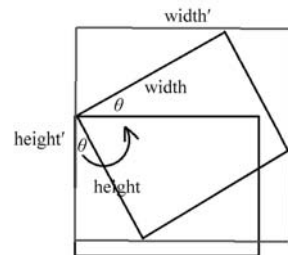


图5 画布变换示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the canvas transformation

由图5很容易得到公式(6):

$$\begin{aligned} \text{width}' &= \text{width} * \cos\theta + \text{height} * \sin\theta \\ \text{height}' &= \text{height} * \cos\theta + \text{width} * \sin\theta \end{aligned} \quad (6)$$

旋转过后, 原图的坐标在新图中可能会没有整数坐标与之对应, 因此会导致像素的缺失, 为了避免出现此类情况, 本算法采用逆向查找的思路, 从旋转后的图像坐标反推原图的坐标, 对于逆向查找得到的横纵坐标不为整数的像素点, 采用双线性插值法进行插值。双线性插值能够避免图像出现锯齿, 使图像变化较为平滑, 由于工件切面图的边缘比较明显和规则, 因此使用插值算法并不影响测量精度。

三线性插值算法主要是用目标点周围四个点的灰度值来逼近目标点的灰度。如图6所示目标点坐标为 C , 根据三线性插值算法可以得到相对最小的点。三线性插值算法是先求出目标点周围像素点的距离比, 并根据该比率由八邻域的灰度值进行插值, 因此避免了图像出现锯齿。

像素投影算法为确定投影路径坐标系后, 从投影方向上发出一束分布均匀的线束, 线束穿过三维体数据, 与图像相交, 此时首先计算路径所穿过的体素, 对该路径上所有体素的灰度值进行叠加, 然后取其平

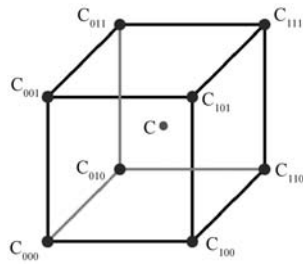


图6 三线性插值算法原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the trilinear interpolation algorithm

均数，即可得到投影灰度值，该值模拟了DR投影方向上的灰度衰减信息。

根据X射线照相检测工艺，本文利用MATLAB软

件开发了通过CT提数据进行投影计算功能模块，在管座三维CT结构模型上针对不同区域确定了每次DR检测区域及透照角度。DR透照角度选择的具体原则：①沿着最小厚度方向，以保证有最理想的穿透效果和透照灵敏度；②尽量避免双壁透照，以保证可以准确实现每个缺陷所在部位；③如果两者发生冲突，优先考虑透照厚度问题，如果双壁透照厚度较大，也可通过倾斜适当角度通过单壁透照以尽量减小透照厚度。

结合上述三个原则，进行透照角度的规划和设计，上管座和下管座均需透照15个角度，从而实现全覆盖DR检测，在相应角度下可发现相应人工气孔缺陷，如图7和图8所示。

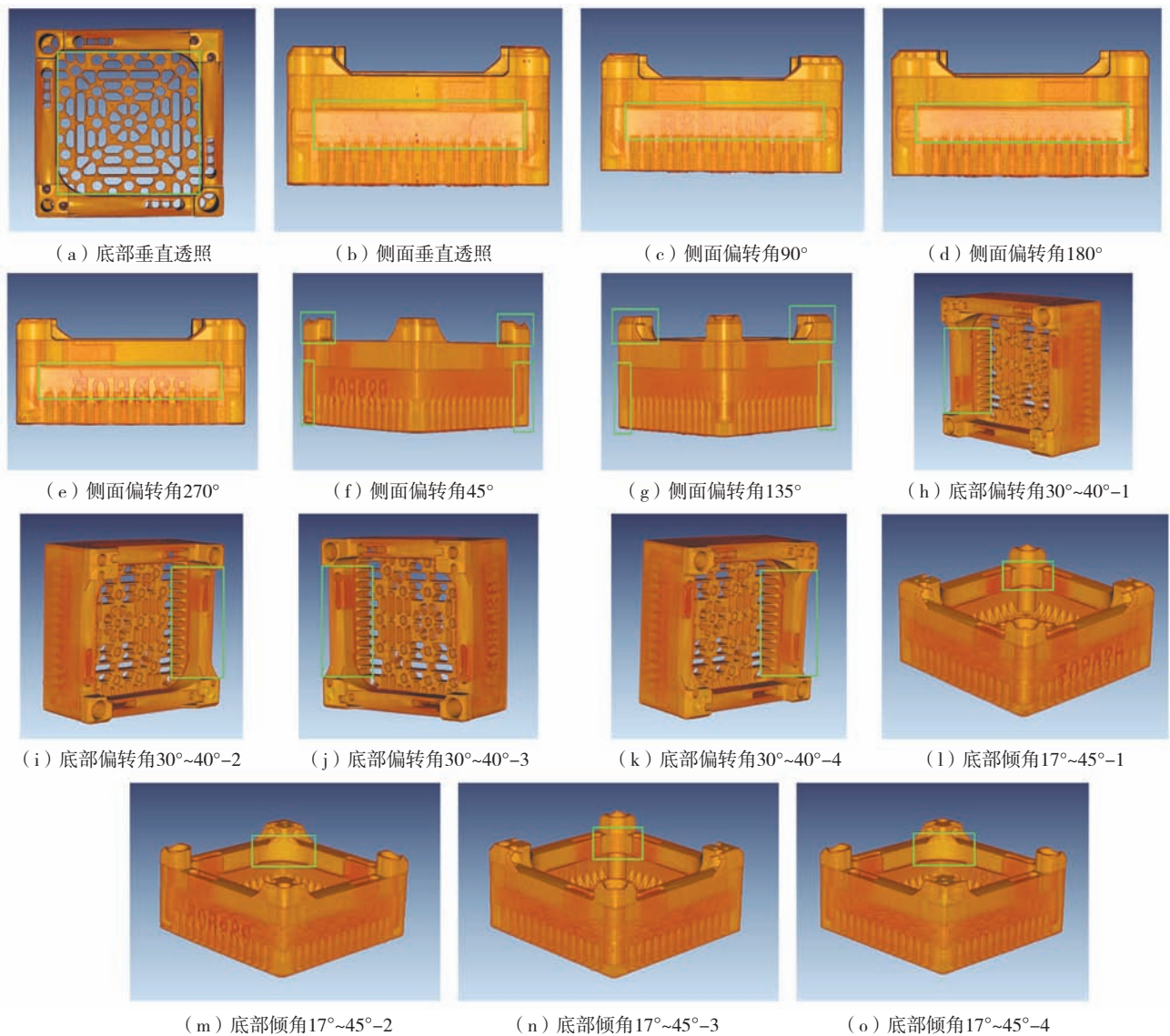


图7 上管座不同DR透照角度（框内为目标透照区域）

Fig. 7 Different DR transillumination angles of the upper tube base (the target transillumination area is in the box)

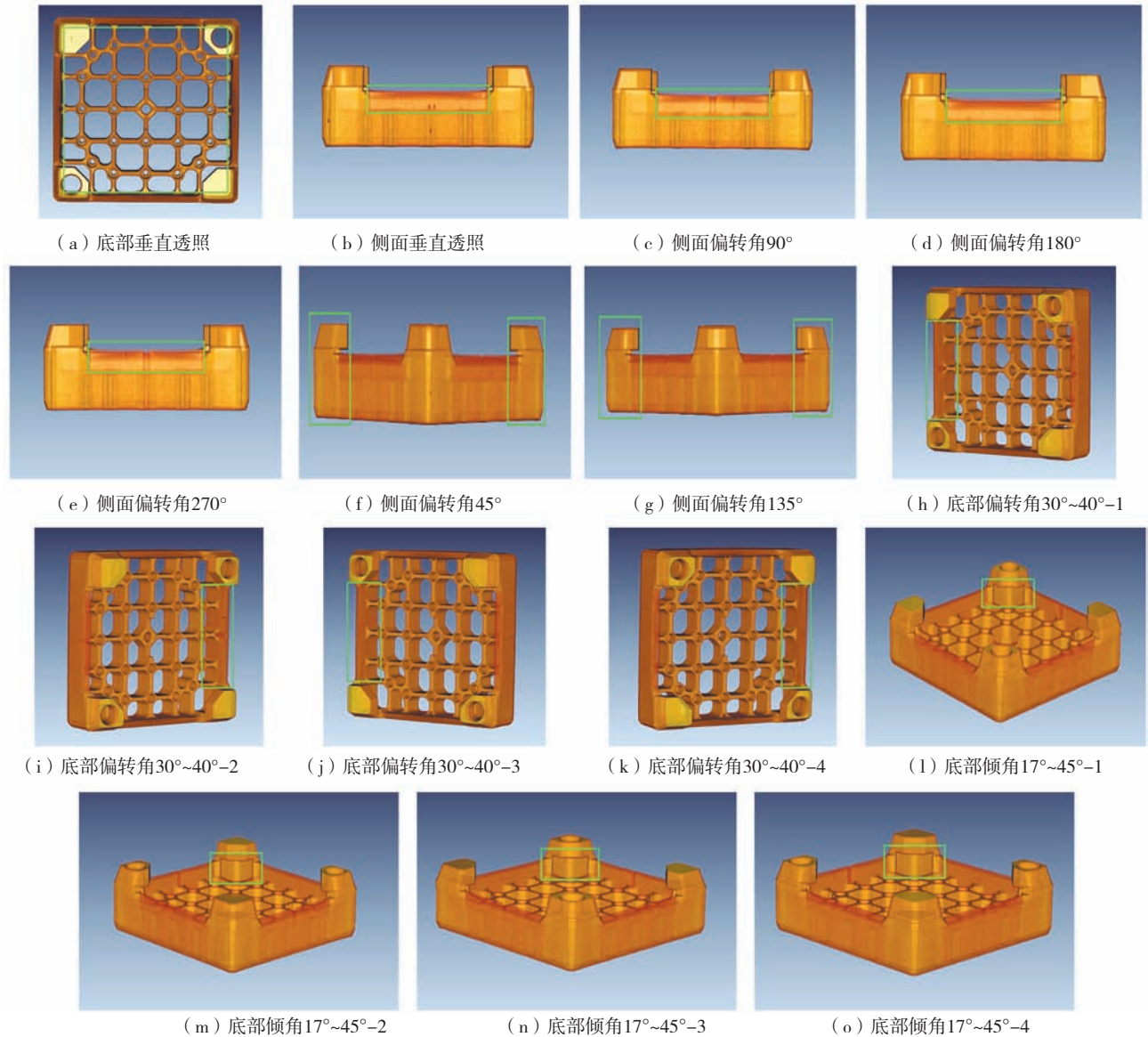


图8 下管座不同DR透照角度(框内为目标透照区域)

Fig. 8 Different DR transillumination angles of the lower tube base (the target transillumination area is in the box)

2 管座数字成像透照

根据模拟仿真分析结果,使用450 kV数字成像系统按照模拟分析得到的最佳透照角度对管座进行数字成像检测,验证前述透照角度是否可发现人工气孔缺陷,检测参数如表2所示。

将实际数字成像结果与实物人工缺陷进行对比,验证数字成像检测方法对上管座和下管座模拟缺陷的检出能力,模拟仿真最佳数字成像透照角度及数字成像扫描工艺参数设置的可行性和合理性,透照结果如图9、图10所示。

通过验证检测450 kV射线机和平板探测器组成的数字成像系统,利用表1的检测工艺参数和本文确定的

表2 管座数字成像检测参数

Table 2 Digital imaging detection parameters of the nuclear fuel assembly nozzle

序号	项目	具体参数
1	扫描方式	锥束DR扫描
2	管电压	450 kV
3	管电流	0.6 mA
4	焦点模式	0.4 mm
5	采样时间	500 ms
6	采样帧数	10帧
7	探测器像素尺寸	139 μ m
8	探测增益	2 pF
9	射线源至样品距离	900 mm
10	射线源至探测器距离	1 300 mm
11	放大倍数	1.44倍

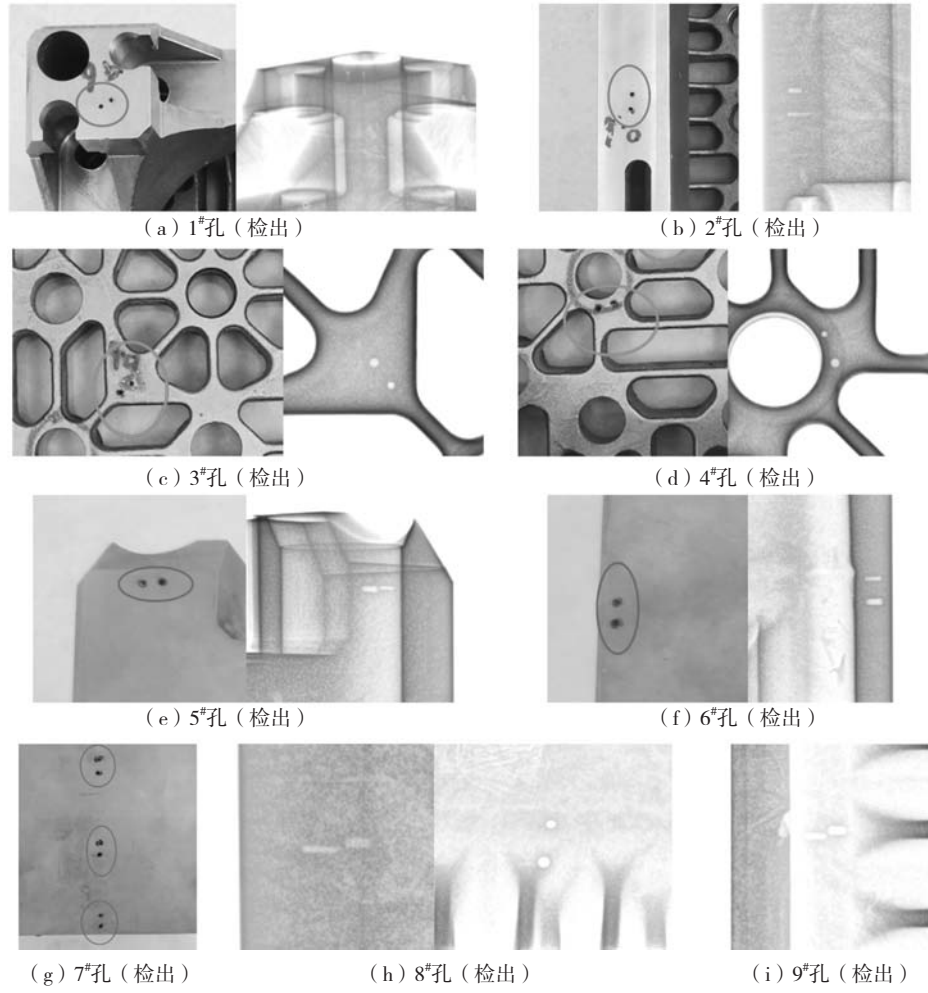


图9 上管座实物与DR检出缺陷对比图

Fig. 9 Comparison of the defects detected by upper tube base and DR

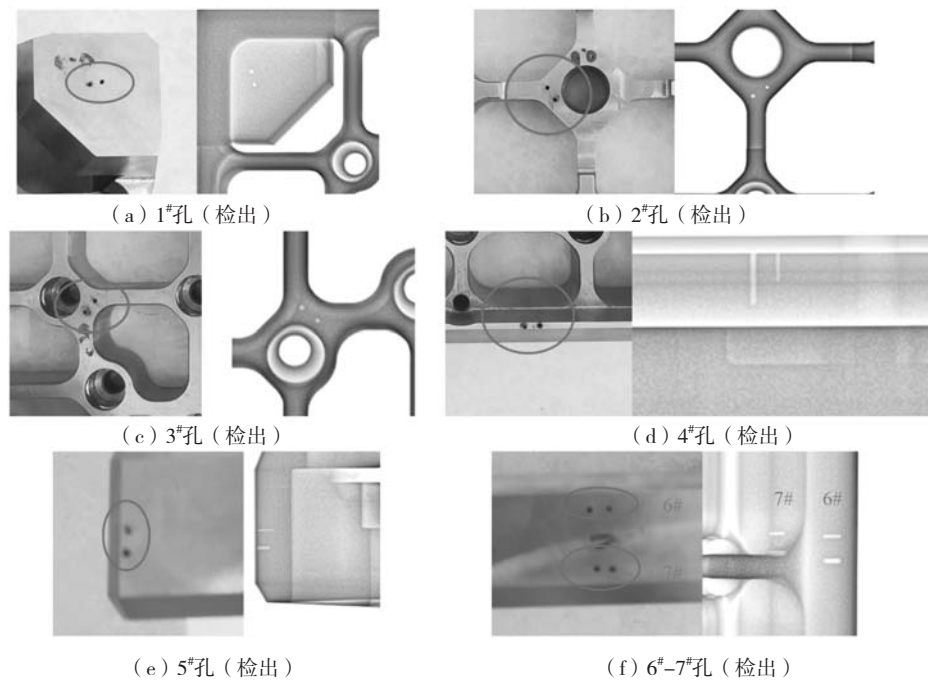


图10 下管座实物与DR检出缺陷对比图

Fig. 10 Comparison of the defects detected by lower tube base and DR

透照角度, 即可实现上管座和下管座的全覆盖检测, 数字图像上可清晰发现 $\Phi 0.3$ mm和 $\Phi 0.5$ mm孔型缺陷影像。

3 结束语

本研究建立了一种采用三维CT图像进行压水堆核燃料组件管座X射线数字成像透照角度工艺参数选择的

方法。该方法利用三维CT图像进行透照角度分析, 并用三维CT图像进行数字成像透照仿真成像验证, 最终确定了数字成像透照角度。通过缺陷样品的制作和数字成像结果验证, 实现了上管座和下管座的全覆盖X射线检测, 且数字图像上可清晰发现 $\Phi 0.3$ mm和 $\Phi 0.5$ mm孔型缺陷影像。

参考文献:

- [1] 焦拥军, 肖忠, 李云, 等. “华龙一号”燃料组件设计研究及验证 [J]. 中国核电, 2017, 10 (4): 478-482.
- [2] 许小进, 杨堃, 王荣, 等. 基于结构光识别的核燃料组件关键尺寸测量技术研究 [J]. 现代制造工程, 2022 (11): 115-121.
- [3] 姚波, 向文欣, 王鹏, 等. AFA3G LE 燃料组件的结构特点和设计论证 [J]. 核动力工程, 2015, 36 (S1): 40-43.
- [4] 冯海宁, 赵瑞瑞, 王虹, 等. 压水堆环形燃料组件研发综述 [J]. 中国核电, 2020, 13 (6): 759-764.
- [5] 钟建伟, 胜国福, 余桂峰, 等. 新型燃料组件下管座精密铸造工艺 [J]. 中国核电, 2020, 40 (10): 1110-1113.
- [6] 陈昶羽, 高河伟, 张涛, 等. CT解析重建方法进展: 从圆轨迹扫描到多源直线扫描成像 [J]. CT理论与应用研究, 2021, 30 (2): 263-277.
- [7] 吴彦举, 郝兵, 吕益良, 等. 锥束CT在电子元器件方面的应用 [J]. 数字技术与应用, 2020, 38 (5): 37-38.
- [8] 潘小东, 张催, 尚宏杰, 等. 锥束CT成像质量影响因素研究 [J]. 原子核物理评论, 2019, 36 (02): 211-217.
- [9] 魏鹏, 严宇, 张东辉, 等. CIVA 软件仿真平台在射线检验中的应用 [J]. 无损检测, 2015, 37 (3): 52-55.
- [10] NAZEMI E, ROKKOK B, MOVAFEGHI A, et al. Simulation of a complete X-ray digital radiographic system for industrial applications [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2018, 139: 294-303.
- [11] HUANG K D, ZHANG D H, LIU J, et al. Rapid simulation method of cone-beam computed tomography based on STL phantom [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19 (11): 2578-2582.
- [12] 毛海鹏, 张定华, 卜昆, 等. 锥束三维 CT 仿真系统的研究与实现 [J]. 计算机应用研究, 2005 (6): 243-245.

X-Ray Digital Imaging Inspection of PWR Fuel Assembly Nozzle

ZHANG Xiao-gang, YU Dong-bao, TANG Hui, ZHU Yong-li, ZHANG Hong-wei
(China North Nuclear Fuel Co., Ltd., Baotou 014035, Inner Mongolia, China)

Abstract:

The three-dimensional structure of PWR nuclear fuel assembly nozzle was obtained through the research of three-dimensional CT imaging radiographic testing technology of nozzle. The three-dimensional structure diagram of the tube base obtained by three-dimensional CT imaging was used to carry out the simulation of the transillumination thickness of two-dimensional DR imaging, and the best DR transillumination angle and possible detection blind area were determined by combining with the X-ray radiography process. Through the best transillumination angle obtained by simulation, DR transillumination experiment was carried out to determine the best transillumination angle parameter, final detection blind area and defect detection ability. The feasibility of the multi-directional DR detection method was verified. The rapid detection method of tube socket X-ray digital imaging was established, with detection sensitivity up to $\Phi 0.3$ mm.

Key words:

PWR; fuel assembly nozzle; X-ray inspection; digital imaging; 3D imaging