

精密铸件射线 CR 检测工艺参数对图像质量的影响

李永君, 肖俊峰, 高松, 张炯, 高斯峰, 唐文书, 南晴

(西安热工研究院有限公司, 陕西西安 710054)

摘要: 以含人工裂纹缺陷的精密铸造平板试件为检测对象, 研究并分析了管电压、曝光量、焦距等工艺参数对射线CR图像质量的影响规律。结果表明: 图像对比灵敏度和空间分辨率随管电压升高均呈先升高后降低趋势, 随曝光量和焦距增加均呈先增加后稳定趋势; 图像平均灰度随管电压升高和曝光量增加均呈降低趋势, 随焦距增加没有明显变化; 可识别最小裂纹缺陷尺寸随管电压升高呈先减小后增大的趋势, 随曝光量和焦距增加呈先减小后稳定趋势。该研究结果可为精密铸件射线CR检测工程应用提供理论依据和数据支撑。

关键词: 精密铸件; 射线CR; 管电压; 曝光量; 焦距

作者简介:

李永君(1987-), 男, 工程师, 从事燃气轮机部件检测与评估技术研究及应用工作。电话: 029-82001162, E-mail: lee19870914@163.com

通讯作者:

肖俊峰, 男, 研究员。电话: 029-82001158, E-mail: xiaojunfeng@tpri.com.cn

中图分类号: TG115

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

09-1021-05

基金项目:

国家自然科学基金(51601145); 华能集团总部科技项目(HNKJ18-H11)。

收稿日期:

2019-04-28 收到初稿,

2019-05-30 收到修订稿。

精密铸造技术具有复杂件成形快捷、尺寸精度高、表面粗糙度低等优点, 在航空航天、能源电力、汽车医疗等领域应用广泛^[1-2]。由于工艺过程复杂, 在铸造过程中易产生裂纹、气孔、夹杂等缺陷, 必须采用准确有效的检测方法来保证铸件的质量^[3]。

射线CR(Computed Radiology)成像技术具有检测速度快、成像质量高、环保节约等优点, 逐渐取代传统胶片照相, 在精密铸件的检测中得到越来越广泛的应用, 引起许多科研人员的研究兴趣。敖波等^[4]开展了航空精密铸件射线CR成像检测研究, 结果表明: CR图像质量与常规胶片射线图像质量相当, 极大地降低了检测成本和提高了检测效率。刘文锁等^[5]开展了精密铸造涡轮叶片CR成像中的边蚀散射和厚度补偿技术研究, 结果表明: 采用钨酸钠粉末吸收和补偿液厚度补偿, 可有效改善边蚀散射和增加透照范围。肖宇行等^[6]研究了涡流器精密铸件CR检测应用研究, 结果表明: 射线CR与相应的胶片照相结果像质指数相同。Khalifah等^[7]研究了所处温度对IP板成像噪声的影响规律, 结果表明: 当温度 $> 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 图像的噪声水平显著升高。Zullo等^[8]研究了IP板的自身线性和均匀性性能, 提出了IP板性能评价指标参数。

目前, 国内精密铸件射线CR检测技术研究主要为实际工程应用案例研究^[4-6], 而国外研究多集中在射线CR检测中IP板自身特性研究^[7-8], 均未见关于检测工艺参数对CR图像质量影响规律及内在机理的详细研究报告。因此, 本试验研究采用含人工裂纹缺陷的精密铸造等轴高温合金平板试件, 研究并分析了管电压、曝光量、焦距等参数对射线CR图像质量的影响规律。

1 检测设备和对象

检测设备为XXG2505型定向辐照X射线机、Crown型扫描仪、MDRC-2120型显示器。检测对象为含人工裂纹缺陷并且喷有TBCs涂层的等轴晶高温合金平板(图1)。其制作工序为: ①普通熔模铸造制备K438等轴晶高温合金平板; ②磨削加工平板表面; ③电火花在平板表面加工裂纹缺陷, 尺寸见表1; ④喷涂TBCs(粘结层厚

度为: $150 \mu\text{m} \pm 20 \mu\text{m}$, 成分为: Ni-22Cr-9Al-37Co-0.5Y; 陶瓷层厚度为: $350 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$, 成分为: 7%~8% Y_2O_3 稳定 ZrO_2)。

2 检测试验

检测透照示意图见图2, 现场检测如图3所示, 主要参数设置见表2。对于数字射线检测技术, 检测不清晰度 U 由几何不清晰度 U_g 和探测器固有不清晰度 U_D 决定, 可用平方关系表示, 见式 (1)、(2)^[9]。

$$U^2 = U_g^2 + U_D^2 \quad (1)$$

$$U_g = \frac{d \cdot b}{F - b} \quad (2)$$

式中: d 为焦点尺寸, F 为焦距, b 为缺陷到IP板距离 (图2)。由式 (2) 可知, 在焦点尺寸和工件厚度给定的情况下, 最大几何不清晰度相当于射线源表面缺陷或者射线源侧放置的像质计金属丝所产生的几何不清晰度。因此, 为保证透照工艺的最大适用性, 本试验透照均采用裂纹缺陷和像质计置于射线源侧布置。

3 结果分析

3.1 管电压对图像质量的影响

表3和图4a为采用不同管电压对平板试件进行射线CR检测结果 (曝光量: $15 \text{ mA} \cdot \text{min}$, 焦距: 700 mm)。结果表明: 随管电压升高, 图像对比灵敏度和图像空间分辨率先升高后降低, 图像平均灰度逐渐降低, 可识别最小裂纹缺陷尺寸先减小后增大。当管电压为 170 kV 时, 识别单线型编号可达 W12, 识别双线型编号可达 D10, 可识别最小裂纹缺陷尺寸为深度 0.6 mm 、宽度 0.2 mm 、长度 2 mm 。

分析原因, 是由于管电压较高时, 材料衰减系数降低, 不同厚度黑度差减小, 因而对比灵敏度降低。但管电压较低时, 一次穿透射线较少, 散射比相应增加, 也会导致对比灵敏度较低。适中的管电压下衰减系数和散射比的作用达到平衡, 图像对比灵敏度最高。同时, 管电压较高时射线光子能量大, 行程较长, 一个射线光子作用于多个感光颗粒, 形成区域显影, 造成影像边界扩散和轮廓模糊, 因而空间分辨率降低。但管电压较低时, 散射比增大, 也会导致空间分辨率降低。适中的管电压下光子能量和散射比的作用达到平衡, 图像空间分辨率最高。另外, 管电压升高, IP板接收并与磷感光材料相互作用的光子能量增大, 降低了量子噪声, 提高了图像信噪比。图像的平均灰度与信噪比呈反比^[9], 即降低了图像平均灰度值。

3.2 曝光量对图像质量的影响

表4和图4b为采用不同曝光量对平板试件进行射线

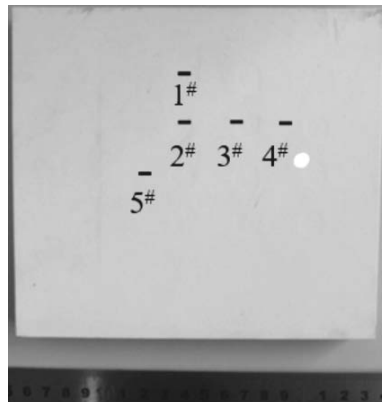


图1 平板试件

Fig. 1 Plate specimen

表1 裂纹缺陷尺寸

Table 1 Dimensions of cracks /mm

项目	1#	2#	3#	4#	5#
长	2	2	2	2	2
宽	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
深	0.2	0.4	0.6	0.9	1.2

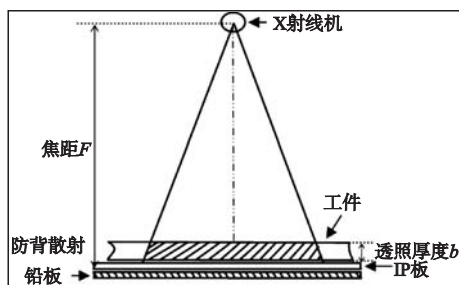


图2 透照示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CR irradiations

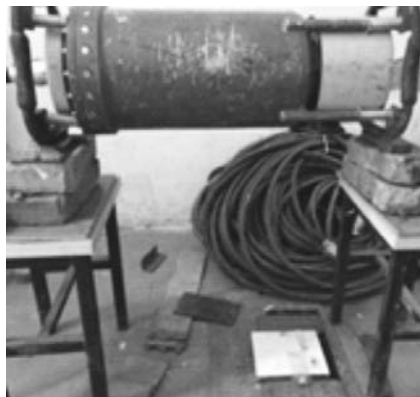


图3 现场检测图

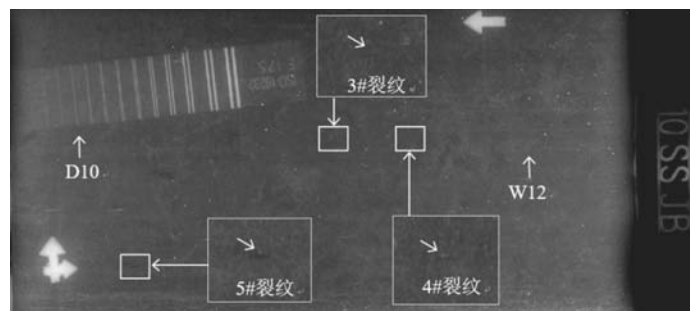
Fig. 3 Scene of test

表2 主要检测参数
Table 2 Main detection parameters

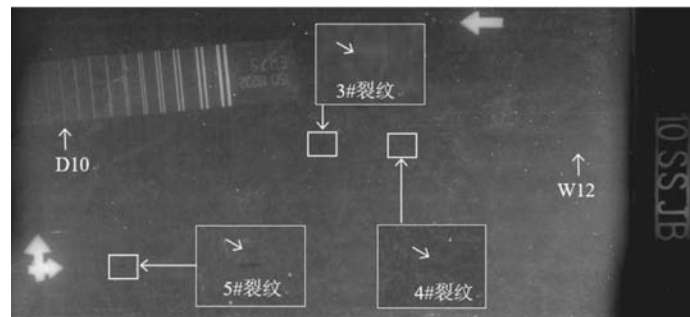
X射线机			扫描仪			其他		
管电压/kV	曝光量/mA · min	焦距/mm	扫描步距/ μ m	激光功率	光电倍增管增益	增感屏	背散射防护	像质计/人工裂纹缺陷
150~200	5~25	400~1 000	100	20	6.25	0.3 mm铅箔	5 mm铅板	射线源侧

表3 管电压对CR图像的影响
Table 3 Influence of different tube voltages on image quality

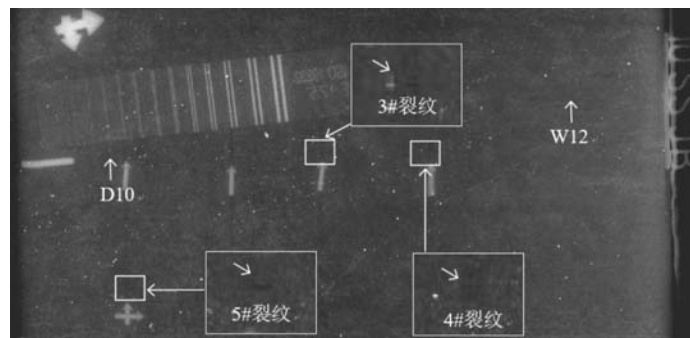
管电压/kV	平均灰度值	图像对比灵敏度 (单线型编号)	图像空间分辨率 (双线型编号)	可识别最小裂纹缺陷尺寸 (长×宽×深)/mm
150	19 290	W11	D9	2×0.2×0.9
160	19 658	W11	D9	2×0.2×0.9
170	17 536	W12	D10	2×0.2×0.6
180	17 382	W12	D9	2×0.2×0.6
190	16 830	W11	D9	2×0.2×0.6
200	16 417	W10	D8	2×0.2×0.9



(a) 170 kV/15 mA · min/700 mm



(b) 170 kV/20 mA · min/700 mm



(c) 170 kV/11 mA · min/600 mm

图4 射线CR图像

Fig. 4 Computed Radiography image

CR检测结果(管电压: 170 kV, 焦距: 700 mm)。结果表明: 随着曝光量的增加, 图像对比灵敏度和图像空间分辨率均逐渐升高, 曝光量大于等于15 mA·min时, 趋于稳定。图像平均灰度随曝光量增加逐渐降低。可识别最小裂纹缺陷尺寸随曝光量增加逐渐减小后趋于稳定。当曝光量大于等于15 mA·min时, 识别单线型编号可达W12, 识别双线型编号可达D10, 可识别最小裂纹缺陷尺寸为深度0.6 mm、宽度0.2 mm、长度2 mm。

分析原因, 是由于随着曝光量增加, 更多的光子到达IP板, 大量光子的叠加作用使IP板黑度的随机性起伏降低, 相当于降低图像散射比, 从而增加了图像对比灵敏度和空间分辨率。同时, 大量饱和光子作用使图像的量子噪声降低, 提高了图像信噪比, 即降低了图像平均灰度值。当曝光量达到一定程度时, 光子密度达到饱和, 图像对比度和空间分辨率趋于稳定。

3.3 焦距对图像质量的影响

表5和图4c为采用不同焦距对平板试件进行射线CR检测结果。为消除焦距改变导致曝光量不同的影响, 曝光量按平方反比定律进行换算。结果表明: 随着焦距增加, 图像对比灵敏度和图像空间分辨率均逐渐升高, 当焦距大于等于600 mm时, 趋于稳定。图像

平均灰度随焦距增加没有明显规律。可识别最小裂纹缺陷尺寸随焦距增加逐渐减小后趋于稳定。当焦距大于等于600 mm时, 识别单线型编号可达W12, 识别双线型编号可达D10, 可识别最小裂纹缺陷尺寸为深度0.6 mm、宽度0.2 mm、长度2 mm。

分析原因, 是由于焦距增加, 影像的本影区增大, 半影区缩小, 因而图像对比灵敏度增加。同时焦距增加可使图像几何不清晰度降低, 故图像空间分辨率提高。但当焦距增加到一定程度时, 其改善作用接近饱和, 故图像对比灵敏度和空间分辨率趋于稳定。由于采用平方反比定律换算的曝光量进行透照, IP板接收并与磷感光材料相互作用的光子数量相差不大, 故平均灰度变化较小。

4 结论

(1) 图像对比灵敏度和空间分辨率随管电压升高均呈先升高后降低趋势, 随曝光量和焦距增加均呈增加后稳定趋势。

(2) 图像平均灰度随管电压升高和曝光量增加均呈降低趋势, 随焦距增加没有明显变化。

(3) 可识别最小裂纹缺陷尺寸随管电升高呈先减小后增大的趋势, 随曝光量和焦距增加呈先降后稳定趋势。

表4 曝光量对CR图像的影响
Table 4 Influence of different exposure doses on image quality

曝光量 /mA·min	平均 灰度值	图像对比灵敏度 (单线型编号)	图像空间分辨率 (双线型编号)	可识别最小裂纹缺陷尺寸 (长×宽×深)/mm
5	27 555	W11	D9	2×0.2×0.9
10	21 473	W11	D9	2×0.2×0.9
15	17 536	W12	D10	2×0.2×0.6
20	15 659	W12	D10	2×0.2×0.6
25	13 890	W12	D10	2×0.2×0.6

表5 焦距对CR图像的影响
Table 5 Influence of different focal distances on image quality

焦距 /mm	曝光量 /(mA·min)	平均 灰度值	图像对比灵敏度 (单线型编号)	图像空间分辨率 (双线型编号)	可识别最小裂纹缺陷尺寸 (长×宽×深)/mm
400	5	18 281	W10	D8	2×0.2×0.9
500	7.5	20 067	W11	D9	2×0.2×0.9
600	11	19 868	W12	D10	2×0.2×0.6
700	15	17 536	W12	D10	2×0.2×0.6
800	20	20 467	W12	D10	2×0.2×0.6
1 000	30	21 101	W12	D10	2×0.2×0.6

参考文献:

- [1] 陈延丽, 郑煜川, 刘仕伟, 等. 大型泵用不锈钢轴承盖精密铸造工艺改进 [J]. 铸造, 2018, 67 (11): 968-970.
- [2] 吴代建, 张光明, 彭显平, 等. 基于尺寸检测的预燃烧室熔模铸件工艺改进 [J]. 铸造, 2018, 67 (8): 699-702.
- [3] 沈昀, 郑功, 冯辰铭, 等. 熔模精密铸造技术研究进展 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (1): 54-62.
- [4] 敖波, 邬冠华, 邓翠贞, 等. 航空精密铸件射线CR成像检测研究 [J]. 铸造, 2011, 60 (9): 884-887.
- [5] 刘文锁, 李兴捷, 谷中平. 涡轮叶片CR成像中的边蚀散射和厚度补偿技术研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (9): 815-822.
- [6] 肖宇行, 敖波, 王婵. 涡流器精密铸件CR数字化检测研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (12): 1299-1302.
- [7] KHALIFAH K A, BRINDHABAN A. Effect of heat on image plates in computed radiography systems [J]. Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences, 2012, 43 (1): 11-15.
- [8] ZULLO J R, BLOCH C. Linearity and uniformity response as an indicator of performance for AGFA ADC-MD10 computed radiography plates [J]. Medical Dosimetry, 2004, 29 (2): 118-121.
- [9] 郑世才, 王晓勇. 数字射线检测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 58-67.

Influence of Process Parameters on Image Quality of Computed Radiography on Precision Castings

LI Yong-jun, XIAO Jun-feng, GAO Song, ZHANG Jiong, GAO Si-feng, TANG Wen-shu, NAN Qing
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract:

In this paper, taking the precision casting plate specimen with artificial crack defects as the test object, the influences of process parameters such as tube voltage, exposure dose, focal distance on the computed radiography image quality were studied and analyzed. The results showed that the contrast sensitivity and spatial resolution of images first increased and then decreased with the increasing of tube voltage, and first increased and then stabilized with the increasing of exposure dose and focal distance; the average gray values of images decreased with the increasing of tube voltage and exposure dose, and did not change obviously with the increasing of focal distance; the minimum size of recognizable cracks first decreased and then increased with the increasing of tube voltage, and first decreased and then stabilized with the increasing of exposure dose and focal distance. These results will provide theoretical basis and data support for the engineering application of computed radiography detection to precision castings.

Key words:

precision casting; computed radiography; tube voltage; exposure dose; focal distance
