

精密铸造高温合金板材射线 CR 检测技术研究

李永君, 肖俊峰, 高松, 张炯, 唐文书, 高斯峰, 南晴

(西安热工研究院有限公司, 陕西西安 710054)

摘要: 对精密铸造等轴晶高温合金板材射线CR检测技术进行了研究, 制作了适用于射线CR检测的曝光曲线。结果表明, 射线CR检测技术可实现深度 ≥ 0.6 mm裂纹缺陷的有效检测, 图像质量可达AB级。通过窗宽窗位和锐化处理可有效改善射线CR图像质量, 提高裂纹缺陷的识别度。

关键词: 精密铸造; 高温合金; 射线CR; 裂纹缺陷; 图像处理

K438合金为我国开发的耐热、腐蚀性良好的镍基铸造高温合金, 成分和性能与国外IN738合金类似, 广泛用于精密铸造制备900℃以下工作的涡轮叶片、燃烧室、热压模具、热轧导板等部件^[1-2]。由于部件形状复杂, 铸造过程中易产生欠铸、裂纹、疏松、夹渣等缺陷, 必须采用准确可靠的检测方法来保证铸件的质量状况^[3-4]。

射线CR (Computed Radiology) 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。刘文锁^[5]等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。敖波^[6-7]等开展了精密铸件射线CR检测技术研究, 结果表明: CR成像可替代胶片进行涡轮叶片叶身数字射线成像检测。

本文采用精密铸造K438等轴晶高温合金阶梯试块和含人工裂纹缺陷的平板试件, 制备了等轴晶高温合金射线CR曝光曲线, 获得了平板试件射线CR检测最佳工艺参数, 并对射线CR图像进行了增强处理研究。

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。检测对象为带TBCs含人工裂纹缺陷的等轴晶高温合金平板(图1), 其制作工序为: ①普通熔模精密铸造制备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 wt.% Y_2O_3 稳定 ZrO_2)。等轴晶阶梯试块见图2, 规格参数见表2。

2 检测试验

检测透照示意图见图3, 参照之前的研究成果^[8], 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 试验结果及讨论

3.1 曝光曲线

曝光曲线是在检测设备固定的情况下, 管电压、曝光量与被检材料厚度的关

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。电话: 029-82001162, E-mail: lee19870914@163.com

通信作者:

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(2020)

04-0392-04

基金项目:

华能集团总部科技项目(HNKJ20-H42)。

收稿日期:

2019-12-19 收到初稿,

2020-01-14 收到修订稿。

系曲线，是实际部件射线检测时确定工艺参数的必备依据。参照之前的研究成果，当CR图像灰度值达到17 500左右时，图像效果较好^[9]。试验采用等轴晶高温合金阶梯试块，以17 500为基准灰度制作曝光曲线，见图4。

3.2 射线 CR 检测

参照胶片射线照相时规定的最小曝光量 $15 \text{ mA} \cdot \text{min}$ ，平板试件厚度为 15.4 mm ，在图4曝光曲线中查知，合适的管电压应为 170 kV 。采用管电压为 170 kV ，曝光量为 $15 \text{ mA} \cdot \text{min}$ ，焦距为 700 mm 的工艺参数对平板试件进行射线CR检测，成像结果见图5。图像平均灰度为 $17 536$ ，与曝光曲线的基准灰度值相近，说明该曝光参数选择较合适。图像中可清晰识别单线型编号达W12，双线型编号达D10，最小裂纹缺陷尺寸为深度 $=0.6 \text{ mm}$ 、宽度 $=0.2 \text{ mm}$ 、长度 $=2 \text{ mm}$ 。参考NB/T 47013.11—2015《承压设备无损检测 第11部分：X射线数字成像检测》中关于图像质量要求，该图像像质识别指标已达到AB级（中灵敏度）检测技术等级，满足常规承压设备的射线检测要求。

3.3 图像处理

为了提高图像的可辨识度，采用图像处理技术来改善图像质量，增强图像特征信息。窗技术是数字射线中用以观察不同厚度部位特征的一种显示技术，包括窗宽和窗位。窗宽是图像显示的灰度值范围。超过此范围，均以白影显示，低于此范围，均以黑影显示。增大窗宽，各部位灰度差别减小。减小窗宽，各部位灰度差别增加。窗位是窗的中心位置，须将窗位设为重点观察部位的灰度中心值。图6为CR图像的局部窗宽窗位处理图，经处理后，裂纹缺陷的显示对比度明显提高。

图像锐化处理是补偿图像的轮廓，增强图像边缘及灰度跳变部分，使图像变得清晰，一般有空域微分法和高通滤波法。

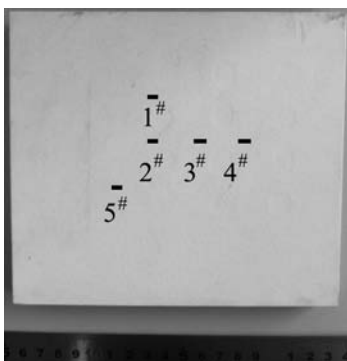


图1 平板试件
Fig. 1 Plate specimen

表1 裂纹缺陷尺寸
Table 1 Size of cracks

裂纹缺陷编号	1#	2#	3#	4#	5#
深/mm	0.2	0.4	0.6	0.9	1.2

注：裂纹长度均为 2 mm ，宽度均为 0.2 mm 。

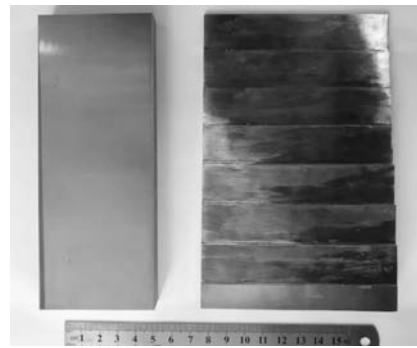


图2 阶梯试块（7阶+垫板）
Fig. 2 Multi-steps sample

表2 阶梯试块规格
Table 2 Specification of multi-steps sample

阶数	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶	7阶	垫板
厚度/mm	2	4	6	8	10	12	14	14

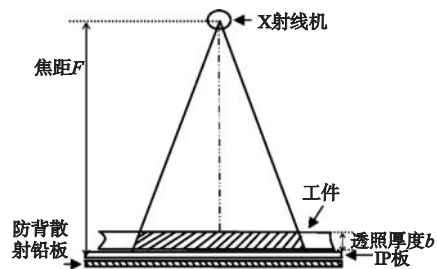


图3 透照示意图
Fig. 3 CR irradiations scheme

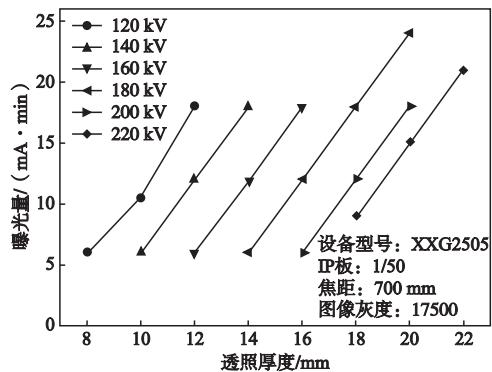


图4 等轴高温合金射线CR曝光曲线
Fig. 4 CR exposure curves for equiaxed superalloy

空域微分法：微分运算是求图像空域内灰度信号的变化率（梯度），在图像灰度变化较大的边缘区域，其梯度值大，在灰度变化平缓的区域，其梯度值小，而在灰度均匀的区域其梯度值为零。根据梯度值来返回设定像素灰度值，将梯度值大的像素灰度值加大，即可达到突出细节锐化图像的目的。

高频滤波法：图像边缘或线条的细节部分与图像

频谱的高频分量相对应，通过傅立叶变换将图像从空间域转换为频率域，采用高频滤波让高频分量通过，并适当抑制低频分量，可使图像的细节变清楚，实现图像锐化。

图7和图8分别为CR图像的空域微分和高通滤波处理图。经处理后，裂纹缺陷的边缘细节更加清晰易识别。

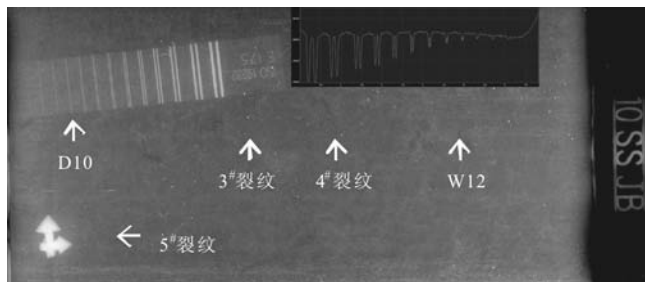


图5 射线CR图像 (170 kV, 15 mA · min, 700 mm)

Fig. 5 Computed Radiography image (170 kV, 15 mA · min, 700 mm)

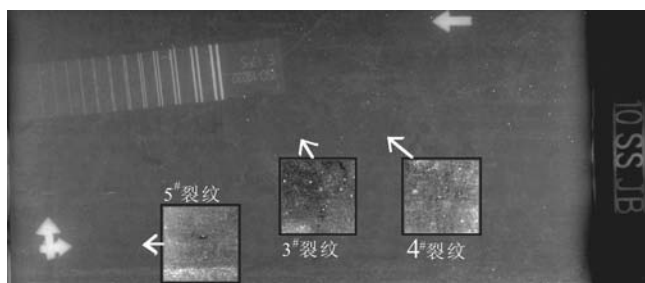


图6 射线CR图像局部窗宽窗位处理

Fig. 6 The window width and window level processing of CR image

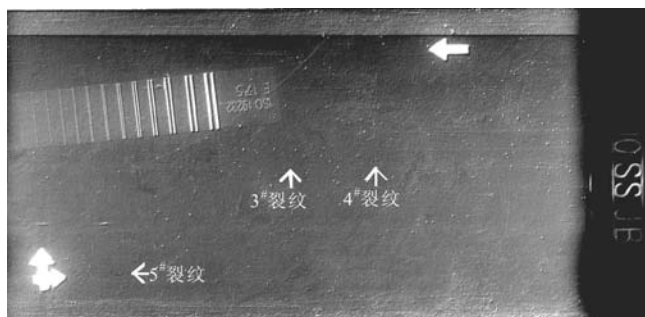


图7 射线CR图像空域微分处理

Fig. 7 Differential grads treatment of CR image

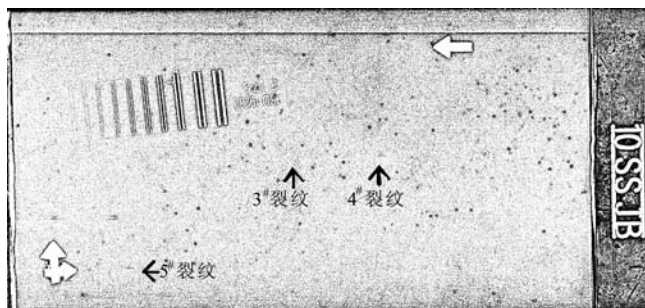


图8 射线CR图像高通滤波处理

Fig. 8 High pass filtering treatment of CR image

4 结论

(1) 采用射线CR技术可实现精密铸造等轴晶高温合金平板深度 ≥ 0.6 mm裂纹缺陷的有效检测, 图像质量可达AB级。

(2) 采用局部窗宽窗位处理技术可提高图像对比度, 采用空域微分和高通滤波处理技术可增强图像边缘轮廓信息。上述处理技术均可改善图像视觉质量, 提高裂纹缺陷的识别度。

参考文献:

- [1] 雷四雄, 杨伟, 郑行, 等. 精铸工艺对K438合金组织及高温力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (3): 306-309.
- [2] 周建波, 张锡桢, 常林林, 等. 高温合金导板的析出相与使用寿命的研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (14): 59-63.
- [3] 谭巍, 金文光. 重型燃机涡轮叶片精铸工艺研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (4): 377-385.
- [4] 姚雷, 王倩, 谢秋峰, 等. 高温合金薄壁密封片的精铸工艺. 铸造, 2016, 65 (4): 333-335.
- [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] 敖波, 鄂冠华, 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.
- [7] 敖波, 周笔文, 王婵, 等. 精铸涡轮叶片X射线CR成像 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (5): 508-512.
- [8] 李永君, 肖俊峰, 高松, 等. 精密铸件射线CR检测工艺参数对图像质量的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (9): 1021-1025.
- [9] 李永君, 肖俊峰, 高松, 等. 燃气轮机透平叶片射线CR检测技术研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (9): 985-987.

Study on Inspection Technique of Precision Cast Superalloy Sheet by Computed Radiography

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

Abstract:

The inspection technique of precision cast equiaxed superalloy sheet by Computed Radiography (CR) was studied and the exposure curve suitable for equiaxed superalloy was made. The results show that the cracks deeper than 0.6 mm in superalloy sheet could be detected and the image quality could reach AB grade. The picture quality and cracks identification resolution were improved by the window width and window level processing and sharpening treatment.

Key words:

precision casting; superalloy; computed radiography; cracks; image processing
