

# ZL205A 合金筒类铸件微焦点射线数字成像自动检测技术

李兴捷, 宋照伟, 于 涵, 孙春贵, 陈 亮

(沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

**摘要:** ZL205A合金筒类铸件的缺陷检测采用传统的胶片射线照相。为降低其检测成本并提高效率, 采用微焦点射线数字成像自动检测技术, 制定检测工艺参数, 控制图像质量。通过ZL205A合金筒类铸件微焦点射线数字成像与胶片法检测对比, 以及缺陷图像对比, 验证了微焦点射线数字成像自动检测与胶片射线照相具有等价性, 完全可以替代传统的胶片射线照相, 从而极大提高了检测效率, 减轻了检测人员工作强度, 降低了材料成本。

**关键词:** ZL205A合金筒类铸件; 微焦点射线数字成像; 灵敏度; 空间分辨率; 归一化信噪比

## 作者简介:

李兴捷(1965-), 男, 研究员, 研究方向为无损检测技术。电话: 024-25852311-263, E-mail: lixingjie306@sina.com

中图分类号: TG247

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)10-1104-06

## 基金项目:

辽宁省重点研发计划(2018106013); 机械科学研究总院集团有限公司重点基金(223220ZY01); 机械科学研究总院集团有限公司专项基金(223218ZY01)。

## 收稿日期:

2020-08-05 收到初稿,  
2020-08-28 收到修订稿。

ZL205A高强度铝合金, 广泛应用于航空、航天、兵器等领域。由于该合金有铜及其他多种合金元素的加入, 凝固结晶范围非常宽, 显糊状凝固方式, 铸造性能较差, 易产生裂纹、缩孔、偏析等缺陷, 影响产品的内部质量<sup>[1]</sup>。ZL205A合金筒类铸件, 按照技术条件要求, 采用胶片射线照相检测。传统的胶片射线照相检测存在效率低、劳动强度大、材料成本高、底片难保存、环境污染等弊端, 影响ZL205A合金筒类铸件的批产进度。二十一世纪以来, 随着电子信息与计算机技术的进步, 射线数字成像检测技术得到了迅猛发展, 射线数字成像技术具有检测速度快、成本低、图像计算机处理、数字存储传输、计算机评定等特点, 正在逐步取代传统的胶片射线照相检测, 得到广泛应用。针对ZL205A合金筒类铸件结构和缺陷的特点, 研究采用微焦点射线数字成像自动检测技术, 确保检测质量和可靠性达到胶片法的要求, 替代胶片射线照相检测, 提高检测效率, 降低检测材料成本。

## 1 微焦点射线数字成像自动检测技术

### 1.1 射线数字成像检测技术

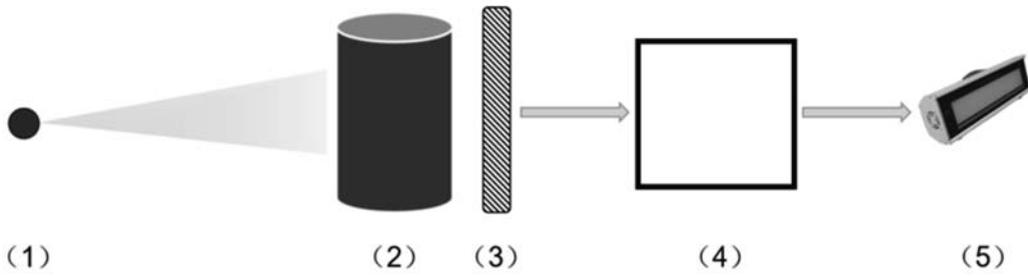
射线数字成像检测技术是使用数字探测器阵列完成射线信号的探测和转换, 形成初始检测图像, 采用图像数字化技术, 将初始检测图像转换为数字射线检测图像, 然后通过数字图像增强处理技术来改进图像质量, 识别检测图像的更多细节。射线数字成像检测技术动态范围宽, 数字图像可以方便地进行图像处理和信息传输交换, 图像的缺陷可以实现自动识别评估。

图1是传统的胶片射线照相检测技术与射线数字成像检测技术系统框图, 从图中可见, 两者物理基础相同, 系统构成部分相同。射线数字成像检测技术不同于胶片射线照相检测技术之处在于, 采用数字探测器阵列代替胶片获取和转换射线信号; 采用图像数字化技术, 代替暗室处理获得数字射线检测图像<sup>[2]</sup>。

### 1.2 射线数字成像检测等价性关键技术要求

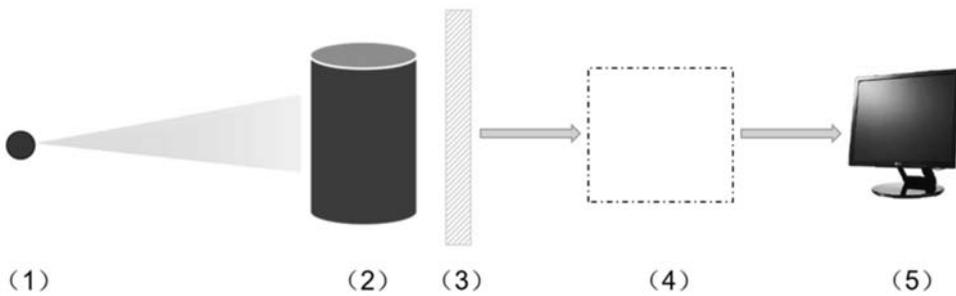
#### 1.2.1 胶片系统与探测器DDA的转换

胶片系统的颗粒度实质上就是胶片图像的噪声, 归一化的概念是源自胶片系统分级标准(表1), 用于对使用不同光圈大小的密度计测量的“颗粒度”进行归



1. 射线源 2. 工件 3. 胶片 4. 暗室处理 5. 观片灯

(a) 胶片射线照相检测技术系统



1. 射线源 2. 工件 3. 数字探测器阵列 4. 数字化系统 5. 灰阶显示器

(b) 射线数字成像检测技术系统

图1 胶片射线照相检测技术与射线数字成像检测技术系统框图

Fig. 1 Block diagram of film radiography and digital radiography systems

一化处理。胶片系统的分级参数最重要是“最小梯度颗粒度比”，实际上就是“归一化的最小梯度颗粒度比”，表示为 $GNR_N$ 。根据胶片的特性曲线关系和衰减定律，可以推导出归一化的梯度颗粒度比与归一化信噪比的关系为： $GNR_N = 2.3 \times SNR_N$ ，信噪比是图像测定区灰度值的平均值（信号）与灰度值的标准差（噪声）之比，所以胶片系统分级参数可以改为用归一化信噪比来进行等级划分。射线数字成像技术与其等价的归一化信噪比非常容易计算，因此，归一化信噪比（ $SNR_N$ ）是用于评价探测器DDA（主要是胶片系统在净密度2.0时的测量值）图像质量的参数。按照等价性原则，探测器DDA可以同样根据归一化信噪比进行分级（表2）。

胶片法的胶片类别和光学密度与数字图像的归一化信噪比相对应。射线数字成像规定的归一化信噪比值对应的是胶片法中的胶片（包括“屏-片”）等级。例如铝合金胶片法不同射线能量的“屏-片”系统等级见表3，与此相对应的铝合金射线数字成像不同射线能量的图像达到的“归一化信噪比”见表4<sup>[3]</sup>。

1.2.2 图像空间分辨率

图像空间分辨率 $SR_b^{image}$ 表示探测器在一定放大倍数下图像中可分辨的最小几何尺寸。为图像不清晰度值的1/2。

表1 GB/T 19348.1胶片系统分级参数  
Table 1 Film system grading parameters in GB/T 19348.1

胶片系统 分级	最小梯度		最小梯度颗粒度比 ( $G/\sigma_D$ )	最大颗粒度 ( $\sigma_D$ )
	$D=2.0$	$D=4.0$		
C1	4.5	4.5	300	0.018
C2	4.3	7.4	230	0.020
C3	4.1	6.8	180	0.023
C4	4.1	6.8	150	0.028
C5	3.8	6.4	120	0.032
C6	3.5	5.0	100	0.039

注：归一化梯度噪声比 $GNR_N = G/\sigma_D$ ；归一化噪声比 $SNR_N = \sigma_D$ 。

表2 胶片与探测器DDA系统分级  
Table 2 Film and detector DDA system grading

胶片系统分级	最小梯度颗粒度比 ( $GNR_N$ )	最大颗粒度 ( $SNR_N$ )	DDA分级
	$D=2.0$	$D=2.0$	
C1	300	130	D1
C2	230	117	D2
C3	180	78	D3
C4	150	65	D4
C5	120	52	D5
C6	100	43	D6

$$M_{\text{opt}} = 1 + \left( \frac{2SR_b^{\text{detector}}}{d} \right)^2 \quad (1)$$

$$SR_b^{\text{image}} = \frac{1}{2M_{\text{opt}}} \sqrt{[d(M_{\text{opt}} - 1)]^2 + (2SR_b^{\text{detector}})^2} \quad (2)$$

式中： $SR_b^{\text{detector}}$ 为探测器基本空间分辨率； $d$ 为焦点尺寸； $M_{\text{opt}}$ 为最佳几何放大倍数。

在应用几何放大技术的场合，从公式（1）、（2）中可以看出图像空间分辨率 $SR_b^{\text{image}}$ 主要受探测器、放射源焦点、最佳几何放大倍数的影响，使用最佳几何放大倍数确定透照几何参数。在特定的探测器和放射源条件下，按照最佳几何放大倍数进行透照布置，检测图像空间分辨率最小。

### 1.2.3 图像细节（缺陷或像质计）可识别能力

对比度噪声比 $CNR$ 见式（3），表示细节的可识别性参数。

$$CNR = \mu_{\text{eff}} \Delta w \times SNR \quad (3)$$

归一化对比度噪声比 $CNR_N$ 见式（4），对比度噪声比被空间分辨率归一化处理，表示细节可识别能力。

$$CNR_N = c \frac{\mu_{\text{eff}} \Delta w SNR}{SR_b^{\text{image}}} = \mu_{\text{eff}} \Delta w \times SNR_N \quad (4)$$

特定细小厚度差的归一化对比度噪声比 $CNR_N^{\text{sp}}$ 见式（5）。

$$CNR_N^{\text{sp}} = \frac{CNR_N}{\Delta w} = c \frac{\mu_{\text{eff}} SNR}{SR_b^{\text{image}}} = \mu_{\text{eff}} SNR_N \quad (5)$$

对比度灵敏度 $CS_a$ 见式（6）。

$$CS_a = \frac{1}{CNR_N^{\text{sp}}} = \frac{1}{\mu_{\text{eff}} SNR_N} \quad (6)$$

式中： $c$ 为常数； $\mu_{\text{eff}}$ 为有效衰减系数； $\Delta w$ 为细小厚度差； $SNR$ 为信噪比； $SNR_N$ 为归一化信噪比。

从公式（3）~（6）中可以看出，射线数字成像图像细节可识别能力（对比度灵敏度）主要受管电压（对应 $\mu_{\text{eff}}$ ）和探测器特性、放射源焦点、放大倍数（对应 $SNR_N$ ）的影响<sup>[5]</sup>，需要通过射线数字成像检测系统的设计，以及工艺参数的制定来保证细节可识别能力（对比度灵敏度）。同时，为了获得足够的细节可识别能力（对比度灵敏度），以公式（5）建立了补偿规则。

射线数字成像检测技术与胶片法构成的是不同成像系统，不同的成像系统是否具有同等细节可识别能力（即等价性），决定了射线数字成像检测技术可否替代胶片法。公式（6）表示，无论采用胶片法、射线数字成像技术，还是基于同一种射线检测技术的不同工艺，若图像的特定细小厚度差的归一化对比度噪声比 $CNR_N^{\text{sp}}$ 值相同，即在相同的管电压下归一化信噪比 $SNR_N$ 相同，则这些方法的对比度灵敏度相同，具有相同的细节可识别能力。

### 1.3 微焦点射线数字成像自动检测系统的设计

主要由机械系统、棒阳极微焦点X射线源、数字探测器、控制系统、图像处理及缺陷识别软件组成。

（1）机械系统：由龙门双梁式6轴数控伺服机械系统和移动工作组合转台组成。

（2）棒阳极微焦点X射线源：采用棒阳极微焦点X射线管，焦点尺寸40~80 μm，棒阳极深入待测铸件内部，实现单壁透照。

（3）数字探测器：像素尺寸127 μm，极限分辨率达到3.9 Lp/mm，动态范围16 bit。

（4）控制系统：采用中央集成式控制方式，以PLC为核心，控制各轴运动；系统具有手动和自动检测两种操作模式。

（5）数字检测图像处理及缺陷识别软件：除了常规的图像读取与保存、窗宽/窗位调节、图像滤波（降噪与增强等）、几何标定、归一化信噪比测量等功能，还具有：ASTM缺陷参考图谱比对、HDR（高动态范围）显示、缺陷识别等。

## 2 微焦点数字成像与胶片法检测对比验证

### 2.1 ZL205A 合金筒类铸件射线检测技术要求

ZL205A合金筒类铸件射线检测按GJB 1187A—2019《射线照相检测》进行，内部质量符合HB 963—2005《铝合金铸件规范》I类铸件的要求。粗加工后进行射线检测，铸件透照壁厚在10~35 mm。

表3 铝合金胶片系统类别和金属增感屏

Table 3 Aluminium alloy film system categories and metal sensitized screens

射线能量/kV	增感屏金属厚度/mm	胶片系统类别	
		金属增感屏A级	金属增感屏B级
≤150	不用屏或用铅前屏 ≤0.03；后屏≤0.15	C5	C3
>150~250	铅屏（前后）0.02~0.15		
>250~500	铅屏（前后）0.1~0.2		

表4 铝合金射线数字成像图像最小 $SNR_N$

Table 4 Aluminium alloy digital radiography image minimum  $SNR_N$

射线能量 /kV	最小 $SNR_N$	
	A级	B级
≤150	70	120
>150~250	70	100
>250~500	70	100

## 2.2 胶片法检测

单壁外透法，射线机为XYD1520（图2），后屏增感Pb0.03 mm，胶片KodakAA400，洗片机洗片，技术等级A级，焦距1.5 m，透照电压60~100 kV，透照电流20 mA，曝光时间2 min。

## 2.3 微焦点射线数字成像自动检测

采用单壁中心内透的棒阳极微焦点射线数字成像自动检测（图3），铸件在转台上自动旋转，技术等级A级，焦距310~340 mm，透照电压70~110 kV，透照电流500  $\mu$ A，采集帧数40帧，放大倍数1.4~2.2。

## 2.4 图像质量对比分析验证

按照胶片法检测和微焦点射线数字成像自动检测方法，在透照的厚度范围内，选择具有代表性的12 mm和33 mm两个壁厚。胶片法通过图像上单丝像质计评价灵敏度（识别能力），并按照工艺参数，转换计算出胶片图像应达到的理论空间分辨率和理论归一化信噪比。微焦点射线数字成像通过图像上单丝和双丝像质计评价灵敏度（识别能力）和空间分辨率，并测试图像归一化信噪比，检测图像见图4。胶片法数值如表5，微焦点射线数字成像数值如表6。从表5与表6可以看出微焦点射线数字成像检测与胶片法检测灵敏度相同，符合GJB 1187A规定A级像质值要求；微焦点射线数字成像空间分辨率超出相关射线数字成像标准和胶



图2 胶片法

Fig. 2 Film radiography



图3 微焦点数字射线自动检测

Fig. 3 Microfocus digital radiography automatic detection

表5 胶片法的灵敏度、空间分辨率和归一化信噪比

Table 5 Sensitivity, spatial resolution and normalized signal-to-noise ratio of film radiography

厚度/mm	最大能量/kV	技术等级	GJB 1187A像质值	图像像质值	计算不清晰度/mm	理论 $SR_b^{image}$	理论 $SNR_N$
12	66	A级	W12	W12	0.307 4	D8	$\geq 252$
33	100	A级	W9	W10	0.431 1	D7	$\geq 168$

表6 射线数字成像的灵敏度、空间分辨率和归一化信噪比

Table 6 Sensitivity, spatial resolution and normalized signal-to-noise ratio of digital radiography

厚度/mm	技术等级	GJB 1187A像质值	图像像质值	相关标准 $SR_b^{image}$	图像 $SR_b^{image}$	相关标准 $SNR_N$	图像 $SNR_N$
12	A级	W12	W12	D8	D10	$\geq 70$	289
33	A级	W9	W10	D7	D9	$\geq 70$	204



(a) 胶片法，厚度12 mm



(b) 射线数字成像，厚度12 mm



(c) 胶片法，厚度33 mm



(d) 射线数字成像，厚度33 mm

图4 检测图像

Fig. 4 Detection images of film radiography and digital radiography

片法理论空间分辨率二个丝对，体现了微焦点射线数字成像有较高的空间分辨率；微焦点射线数字成像归一化信噪比满足相关射线数字成像标准和胶片法理论归一化信噪比的规定；综合对比验证，微焦点射线数字成像自动检测与胶片射线照相具有等价性。

### 3 微焦点射线数字成像与胶片法缺陷图像对比

对ZL205A合金筒类铸件，按照棒阳极微焦点射线数字成像自动检测和胶片射线照相检测工艺，开展了

大量的对比测试，发现的典型缺陷（如偏析、缩孔、裂纹等）的检测图像，见图5。同一缺陷，二者对比，可以确定图像中的缺陷形态、分布、性质基本一致，检测结果基本相同。可见微焦点射线数字成像检测方法缺陷检出能力与胶片射线照相检测相当。微焦点射线数字成像自动检测甚至具有更高的缺陷细节识别能力。

同时，由于数字检测图像较高的动态范围，对其施加“窗宽/窗位”图像处理技术，便于图像的定量分析与识别评定，更具有优势。

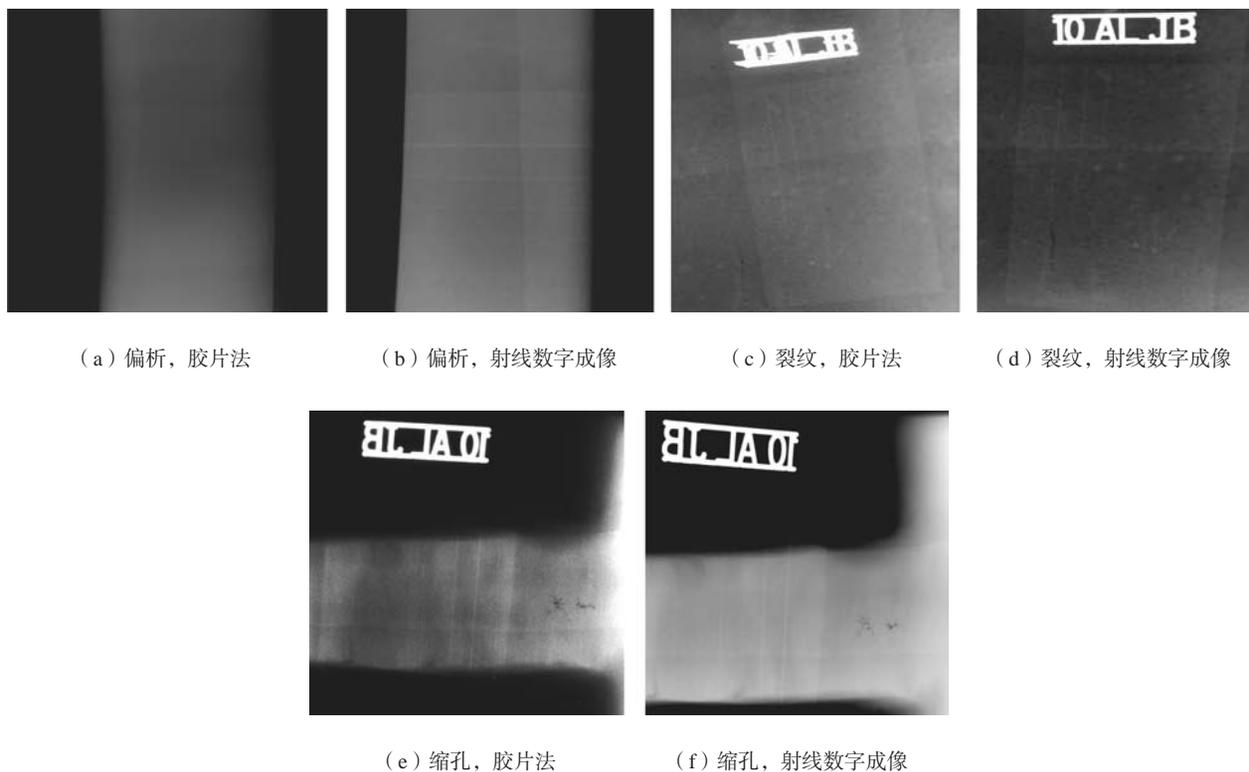


图5 缺陷检测图像

Fig. 5 Defect detection images of film radiography and digital radiography

## 4 结论

(1) 采用微焦点射线数字成像检测替代传统的胶片射线照相，需遵守等价性关系原则设计射线数字成像检测系统，制定检测工艺参数，控制图像质量。

(2) 针对ZL205A合金筒类铸件，微焦点射线数字成像自动检测能达到胶片射线照相检测灵敏度（GJB 1187A规定的A级）的要求，数字图像的空间分辨率、归一化信噪比也能达到相关射线数字成像标准和胶片法转换计算的理论值，有效地检出铸件中的气孔、夹渣、裂纹、偏析、缩孔等缺陷，具有等价性，完全可以替代传统的胶片射线照相检测。

(3) 微焦点射线数字成像自动检测，大大提高了检测效率，与胶片法相比透照效率至少可提高10倍。同时有效减轻了检测人员工作强度，极大降低了检测成本。

**参考文献:**

- [1] 马福民, 曲银辉, 王涛, 等. ZL205A铝合金筒类铸件铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2014, 63 (9): 938-941.
- [2] 郑世才, 王晓勇. 数字射线检测技术 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [3] 孙忠诚. 射线数字成像技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [4] 全国无损检测标准化技术委员会. 无损检测 X射线数字成像检测 检测方法: GB/T 35388-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [5] 全国无损检测标准化技术委员会. 无损检测 X射线数字成像检测 导则: GB/T 35389-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

---

## Microfocus Digital Radiography Automatic Detection Technology for ZL205A Alloy Tube Castings

LI Xing-jie, SONG Zhao-wei, YU Han, SUN Chun-gui, CHEN Liang

( Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Foundry Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China )

**Abstract:**

The detection for the defects of ZL205A alloy tube castings usually adopts conventional film radiography, which exposes some problems such as high material cost and lower detection efficiency. In the present study, the microfocus digital radiography automatic detection technique was utilized, a comparison with the film method was carried out, and their defect images are also presented, to verify that the microfocus digital radiography automatic detection method has equivalence property with the film radiography and can completely replace traditional film radiography. Our experimental results demonstrate that the microfocus digital radiography automatic detection method can significantly improve the detection efficiency, weaken the work intensity of detection workers and reduce material cost.

**Key words:**

ZL205A alloy tube castings; microfocus digital radiography; sensitivity; spatial resolution; normalized signal-to-noise ratio

---