

• 应力控制与理化测试技术 Stress Control and Physicochemical Testing Technology •  
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.10.014

# X 射线数字成像技术在铸件产品及材料质量检测中的应用

王琳锐<sup>1</sup>,王开<sup>1</sup>,何乃军<sup>1</sup>,陈建军<sup>2</sup>,邱孝祥<sup>3</sup>

(1. 重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400044;2. 重庆红旗缸盖制造有限公司,重庆 402760;3. 重庆高金实业股份有限公司,重庆 401122)

**摘要:**基于 X 射线数字成像(DR)技术在铸件产品质量检测方面的重要作用,考察了 7075 铝合金铸件内部微观缺陷、内部成分与组织均匀性。结果表明,高分辨率的 DR 图像灰度及其分布与合金成份分布均匀性和组织均匀性存在对应关系,发现含镍 7075 铝合金具有更为均匀的组织结构和更少晶间缺陷,展现出更佳的极限抗拉强度和伸长率。高分辨 DR 对加快新材料、新产品研发展现出积极作用。

**关键词:**X 射线数字成像;无损检测;铸件;晶间缩松;微观组织

中图分类号: TG115

文献标识码:A

文章编号:1000-8365(2021)10-0891-04

## Application of X-ray Digital Imaging Technology in the Quality Inspection of Casting and Alloys

WANG Linrui<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, HE Naijun<sup>1</sup>, CHEN Jianjun<sup>2</sup>, QIU Xiaoxiang<sup>3</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing Universtiy, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Hongqi Cylinder Head Manufacturing Co., Ltd., Chongqing 402760, China; 3. Chongqing Gaokin Industrial Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

**Abstract:** Based on the important role of the X-ray digital (DR) imaging technique in the quality inspection of casting products. The internal micro-defects of 7075 aluminum alloy castings, the internal composition and microstructure uniformity of 7075 aluminum alloy were investigated. The results show that the high-resolution DR can identify small-sized intergranular shrinkage defects, and that the grayscale and its distribution of the DR image are relate to the uniform of the alloy composition and microstructure. Ni-containing 7075 aluminum alloy exhibits higher strength and more elongation for its fewer intergranular defects and more uniform chemical composition comparing with 7075 aluminum alloy. Obviously, high-resolution DR exhibits a positive effect on accelerating the development of advanced materials and novel products.

**Key words:** X-ray digital radiography; nondestructive inspection; casting; intergranular defects; microstructure

随着社会进步和科技发展,汽车工业对零部件质量的要求越来越高,汽车生产商不断制定出针对零部件内部质量的要求,定量地规定零部件内部缺陷可以存在的标准<sup>[1-2]</sup>。对产品的一种或多种质量进行检查时,除必需进行破坏性试验时,无损检测具有不损伤产品结构和工作状态,同时可以给出缺陷种类、大小、数量、形态、分布等信息,为科研工作者

员给出指导性意见,改进加工工艺,以便达到改善产品质量,降低生产成本,增强产品可靠性的目的,因此在产品质量检测方面起着不可代替的作用<sup>[3-4]</sup>。无损检测技术发展经过了无损探伤(non-destructive inspection)、无损检测(non-destructive testing)、无损评价(non-destructive evaluation)3个阶段<sup>[5]</sup>。随着科技进步和产品生产要求提高,无损检测技术正进入无损评价阶段。

X 射线数字成像检测技术(DR 检测)对工件表面状况要求不高,可以在铸件生产的各个环节都进行质量检测,并对铸造件内部气孔、砂眼、冷热裂纹、偏析等非连续缺陷有较高的检出率,因而特别适合铸造件内部缺陷的检测,特别地用于铸件、焊接件等工艺产品的检测中<sup>[6,9]</sup>。而且,DR 检测得到的数字化数据,可方便的整合到工业自动化体系,实现铸件生产线的智能化品质控制。

收稿日期:2021-07-07

基金项目:重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2019jscx-msxm X0028, cstc2020jscx-msxmX0203)

作者简介:王琳锐(1996—),女,贵州赤水人,硕士生。研究方向:铸造合金研究。电话:02365127306, Email:1769050699@qq.com

通讯作者:王开(1976—),四川南充人,博士,副教授。研究方向:金属凝固及材料成形工艺。电话:02365127306, E-mail:wangkai@cqu.edu.cn

值得注意的是,工业制品的整体质量与零部件品质息息相关。由于不可能对每个零部件采取破坏性试验,对一些重要构件即使采用抽查的方法,也不能确保其可靠性,因此,生产加工过程中采用各种手段,在不破坏零件的质量和功能的条件下及时发现缺陷十分必要<sup>[7]</sup>。基于此,对铸造合金和铸件开发中 X 射线数字成像技术的应用进行介绍,为高品质铸件生产和质量分析提供思路。

### 1 数字化射线检测系统构成

典型的 X 射线检测系统参见图 1<sup>[8]</sup>,该系统包括 X 射线光源、铸件承载台、射线数字化 DR 平板探测器、X 射线图像采集控制系统、射线图像接收和处理器等。与胶片法射线不同,数字化射线检测技术用 CCD 来捕捉射线,取代传统胶片照相技术,实现将射线信号转换为电信号,从而完成不可见的射线影像的可视化过程。这种“射线-数字”的直接转换方法,大大减小了信号长距离传输和变换过程中产生的噪声信号,配合使用相应的滤波电路获得低噪声、高灵敏度图像。相比而言,DR 技术能够快速获取检测结果,便于实现自动化。

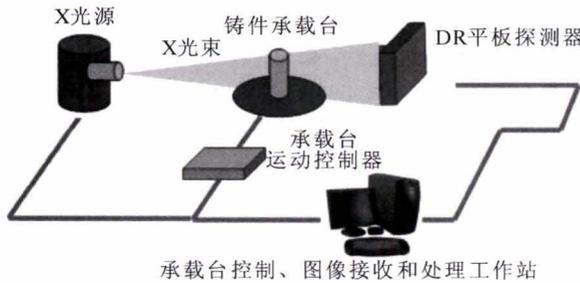


图 1 X 射线数字成像系统构成示意图  
Fig.1 Schematic diagram and actual picture of X-ray digital imaging system

DR 检测系统的工作原理可以简化为: X 射线对受检验工件透照,经 DR 平板探测器接收形成 X 射线检测的数据,经数字图像接收和处理工作站得到数字图像,射线检测数据还可以进一步通过检测数据分析系统进行分析,得到测试结果等等。这一过程可以产生人工目检的数字射线影像,以及整合进自动化系统的数字化检测数据。《铸件 X 射线数字成像检测》(GB/T39638-2020) 的国家标准将于 2021 年 7 月 1 日正式实施,该标准确定了数字化检测技术与传统的胶片成像技术的等价性,规定获得与胶片射线照相技术同等检测灵敏度的数字检测图像的技术要求,将会加快 X 射线数字成像检测技术在铸造行业的运用<sup>[9]</sup>。

## 2 铸件内部缺陷特征检测

### 2.1 铸件内部缺陷射线成像原理

缺陷分类有利于客观评价铸件品质,因此铸件缺陷鉴别工作显得越来越重要。铸件品质主要取决于缺陷的类型和数量,国际铸造工程学会将铸件缺陷分为近 100 种。气孔、缩孔、裂纹等是铸件内部常见的非连续性缺陷,显著地降低了铸件材料的局部机械性能,对铸件的服役性能和疲劳寿命也有着极大的影响。

X 射线检测是利用射线穿透力强,穿透物质后射线能量衰减的原理检测发现缺陷的存在。图 2 为 X 射线检测原理示意,对于一定厚度的物质,透过该物质的射线强度  $I$  为:

$$I = I_0 e^{-\mu d} \tag{1}$$

式中,  $I_0$  为穿透前物质的强度;  $\mu$  为射线在物质中的衰减系数;  $d$  为物质的厚度。

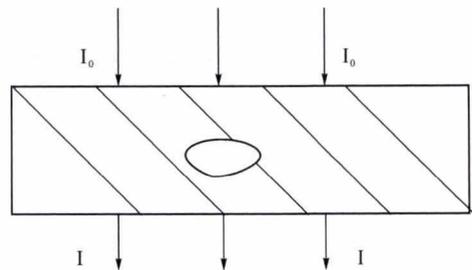


图 2 X 射线检测原理示意图<sup>[10]</sup>  
Fig.2 Schematic diagram of X-ray detection principle

射线在物质中的衰减系数取决于物质的密度、吸收和色散系数,他们间存在关系:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} \tag{2}$$

式中,  $\tau$  为吸收系数;  $\sigma$  为散射系数;  $\rho$  为物质的密度。

物质的吸收系数  $\frac{\tau}{\rho}$ , 原子序数及射线波长存在关系:

$$\frac{\tau}{\rho} \propto Z^3 \lambda^3 \tag{3}$$

由此可知射线的波长越短,衰减程度越小,穿透物质的能力越强,射线越硬;原子序数越大的物质,射线穿透后衰减越大,射线越难穿透。当强度均匀的射线照射在零件上时,射线的强度减弱<sup>[10]</sup>。经过 X 射线的透照,铸件上密度大的地方会吸收较多的辐射量,使得通过的 X 射线能量减少很多。相应的,密度小的地方允许更大的辐射量通过,这些强弱不同的射线,在接收 X 射线的 DR 探测器上形成跟密度对应的射线能量强弱分布矩阵图,经过软件数模转换,

就可以得到铸件的结构图像,可以显示铸件的裂纹、孔洞或夹杂等质量缺陷。

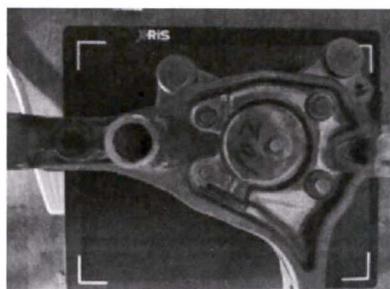
### 2.2 内部缺陷检测结果

在比较研究过程中,采用比利时 X-ray imaging solutions 公司(以下简称 XRIS 公司)的微焦点 X 射线数字成像检测系统,该设备由  $\mu$ Gemx150 微焦点射线机 (200  $\mu$ m 焦点尺寸)、UP2530 高分辨率 DR 探测器(100  $\mu$ m 像素尺寸)和 Maestro5.0.1 图像接收和处理软件构成。对 7075 铝合金铸件进行 X-射线检测,经 Maestro 软件图像处理后的检测结果如图 3,从图中看出,铸件整体结构完整,但是内部存

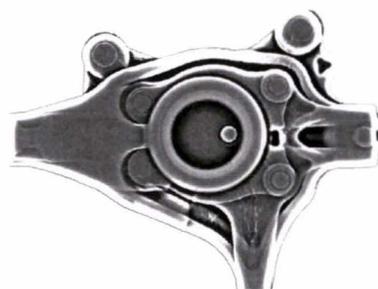
在明显的亮白色丝纹状图案。根据图 4 的试样微观结构,可以看出试样中存在尺寸较大的孔洞和明显的晶间缩松,经分析铸件在成形过程中发生卷入,铸件中心区域凝固速度慢,加之成份偏析导致该处存在明显的晶间缩松组织。这些内部不连续缺陷对应于 DR 成像中的亮白色丝纹状结构(见图 3)。

### 2.3 合金成份偏析情况检测

采用 Xris 公司的高分辨率 X 射线数字成像探测器系统,对 7075 合金和质量分数为 0.6%的金属镍改性 7075 合金的铸态拉伸试样进行检测,结果如图 5。相比于 7075 合金试样,含镍 7075 合金试样中



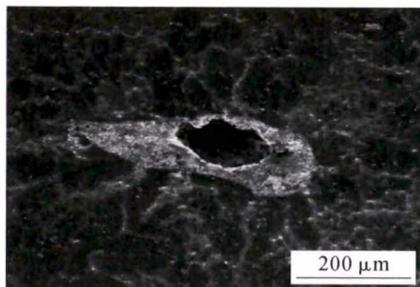
(a)铸件实物



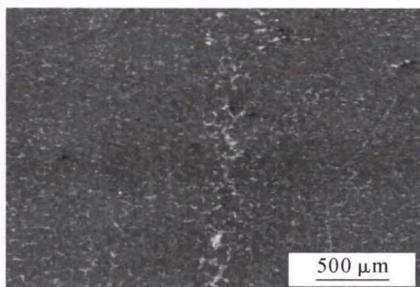
(b)铸件DR图

图 3 铸件 X 射线检测成像结果

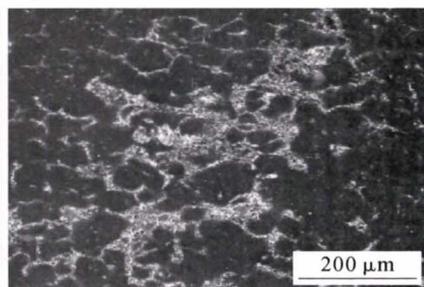
Fig.3 Casting and detected imaging results of casting by X-ray detection



(a)气孔



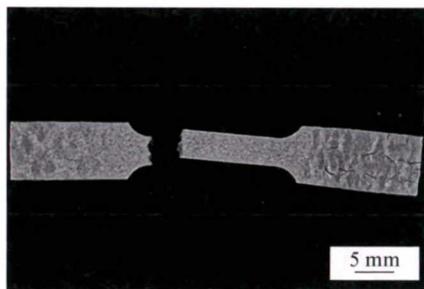
(b)不连续缺陷



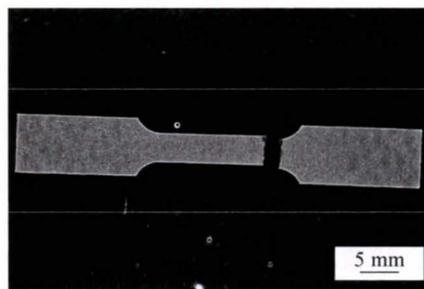
(c)晶间缩松

图 4 试样内部卷入性气孔和晶间缩松

Fig.4 Entrapped pores and intergranular shrinkage defects within sample



(a)7075铝合金



(b)0.6Ni-7075铝合金

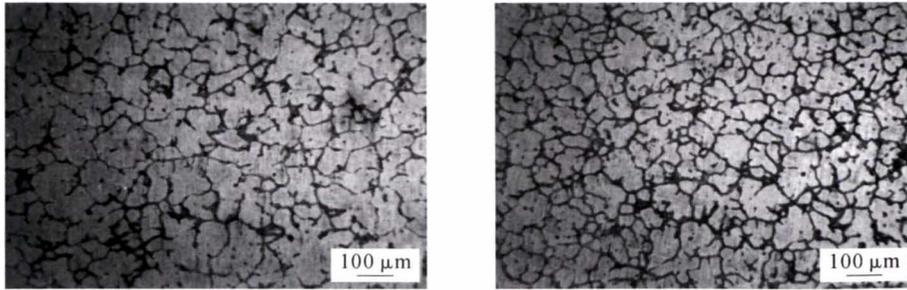
图 5 7075 铝合金与含镍 7075 铝合金试样 DR 结果

Fig.5 DR results of 7075 aluminum alloy and nickel containing 7075 aluminum alloy samples

的灰度较小,且分布细密均匀。

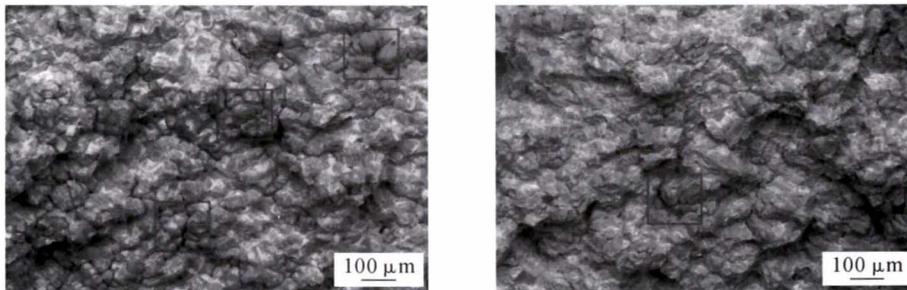
结合图 6 中两种试样的微观结构检测结果,可以看出 7075 铝合金中晶粒尺寸较大,且有明显的枝晶组织结构,而含镍 7075 铝合金中晶粒尺寸较小。相比于 7075 铝合金,含镍 7075 铝合金凝固组织分

布更加均匀,晶界数量增加。图 7 所示拉伸试样断口形貌特征表明,7075 铝合金晶间缺陷较多,而含镍 7075 合金晶间缺陷较少。结合 X 射线摄像成像技术特征,均匀灰度的分布特征表明含镍 7075 铝合金晶间高密度合金元素分布均匀、组织结构致密。



(a)7075铝合金 (b)0.6Ni-7075铝合金

图 6 7075 铝合金与含镍 7075 铝合金的凝固组织微观结构  
Fig.6 Solidification microstructure of 7075 aluminum and nickel alloy 7075



(a)7075铝合金 (b)0.6Ni-7075铝合金

图 7 7075 铝合金与含镍 7075 铝合金拉伸试样断口形貌  
Fig.7 Fracture morphology of tensile samples of 7075 aluminum and nickel alloy 7075

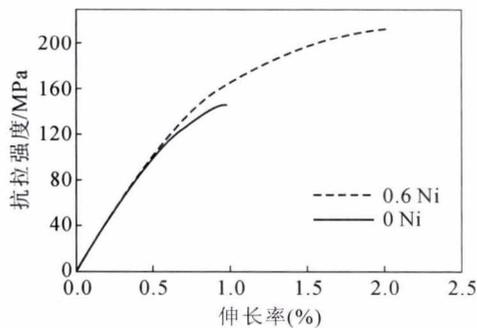


图 8 7075 铝合金与含镍 7075 铝合金试样应力-应变关系  
Fig.8 Stress-strain curves for 7075 aluminum alloy and nickel containing 7075 aluminum alloy

图 8 所示为 7075 铝合金和含镍 7075 铝合金的工程应力-应变曲线,可以看出含镍 7075 铝合金具有更高的强度和更长的延伸率。结合图 6、图 7 的微观结构结果,可得出含镍 7075 合金所具有更高强度和更高伸长率主要归咎为细小的初生相晶粒,以及晶间更少量的不连续缺陷。这与从 DR 检测结果中获得含镍 7075 铝合金具有更均匀的组织结构有密切联系。

### 3 结论

- (1)高精度、高相应速度无损检测技术能快速探测铸件内部尺寸小的晶间缩松缺陷及分布特征。
- (2)在合金研发过程中,运用高分辨率 X 射线数字成像探测器系统能够鉴别化学成分和组织结构

的分布均匀性。

(3)通过合金化技术有助于降低初生相晶粒尺寸和减少铸态合金晶间缺陷,提升材料综合力学性能。

### 参考文献:

- [1] 张凤敏. 浅谈机械零件缺陷的无损检测方法发展趋势 [J]. 科技与企业, 2016(3):206-206.
- [2] 严青松,余欢,魏伯康,等. 汽车铝合金缸盖铸件缺陷分析及控制[J]. 失效分析与预防, 2009(1):30-34.
- [3] 张建平. 中国射线检测技术现状及研究进展 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(6):58-59.
- [4] 徐丽,刚铁,张明波,等. 铸件缺陷无损检测方法的研究现状[J]. 铸造, 2002(9):535-540.
- [5] 刘占鑫. 浅谈无损检测技术的原理及特点 [J]. 中国科技博览, 2014(4):547-547.
- [6] 张臻. 基于 X 射线测量的铝合金铸件微观缺陷预测及分析[J]. 铸造技术, 2014, 35(11):2760-2762.
- [7] 马青芬. 铸造缺陷分析及工艺优化措施 [J]. 机械研究与应用, 2019, 32(5): 177-179.
- [8] ZHAO X, HE Z, ZHANG S, et al. A sparse-representation-based robust inspection system for hidden defects classification in casting components[J]. Neurocomputing, 2015,153: 1-10.
- [9] 王海登,王伏喜,张克俭,等. 铝合金铸件国内外射线检测标准对比[J]. 铸造技术, 2019, 40(1):112-115.
- [10] 吉泽升,孙海波,赵密,等. X 射线实时成像在铝合金压铸件上的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013,18(6):1-4.