

# 一种金属增材结构中微缺陷的工业CT检测灵敏度验证方法

孟嘉 肖鹏

(中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 201324)

**文 摘** 针对金属增材制造样品中微米级尺度缺陷工业CT检测灵敏度验证问题,设计并制造了一种包含参考标样的组装结构试块,实现了零件感兴趣区域的检测效果验证。使用试块初步研究了不同几何放大倍数下及不同偏心距离下试块感兴趣区域的缺陷检测灵敏度变化规律。研究表明,随着检测几何放大倍数的降低,及偏心距离的不断增大,缺陷的不可检缺陷的尺寸逐渐增大,缺陷的可检性及识别的准确率逐渐降低。

**关键词** 工业CT,金属增材制造,微缺陷,对比试块

中图分类号:TB302.5

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.06.013

## A Sensitivity Verification Method of Industrial CT Detection for Micro-defects in Metal Additive Manufacturing Structures

MENG Jia XIAO Peng

(Comac Shanghai Aircraft Manufacturing Co. Ltd., Shanghai 201324)

**Abstract** For the verification of industrial CT detection sensitivity of micro-scale defects in metal additive manufacturing samples, an assembled structural specimen block, which includes a reference specimen, was designed and manufactured to evaluate detection performance in the target region of the part. Using the test block, the variation in defect detection sensitivity within its region of interest was preliminarily investigated under varying geometric magnifications and eccentricity distances. Results show that, with the reduction of the detection geometry magnification, and the increasing eccentricity distance, the size of the undetectable defects gradually increases, and the detectability of the defects and the accuracy of the identification gradually decreases.

**Key words** Industrial CT, Metal additive manufacturing, Micro defect, Test block

### 0 引言

金属增材制造技术<sup>[1]</sup>制造的零件具有如结构可定制性强、材料费效比高、力学性能优异等优势,但在生产或服役阶段也可能受工艺控制不当、冲击/疲劳损伤等因素影响而在其内部产生缺陷,通常包含尺度从数十微米到上百微米不等的微观缺陷,如孔洞、孔隙、裂纹等,这对材料的力学性能产生影响<sup>[2-3]</sup>。因此如何对这些微观缺陷进行定量表征是金属增材零件无损检测技术领域的一大难点。由于金属增材制造具有可“定制”的特性,产品通常具有复杂的不规则的外形或较差的表面粗糙度;这限制了目前应用较为广泛的超声技术在金属增材制造检

测领域的应用。而和超声技术相比,射线技术对工件的外形和表面状态的要求较低,是金属增材制造零件的一种理想检测手段。尤其是工业CT技术<sup>[4]</sup>,作为一种基于射线理论的先进无损检测手段,具有高精度、三维可视化成像等显著优势,正逐渐在金属增材制造<sup>[5-7]</sup>、复合材料制造<sup>[8-10]</sup>等先进材料制造工艺的质量控制中发挥重要的作用。

对于一种新的检测技术、一套新的检测设备或一种新结构形式的零件,在正式开展无损检测前通常需要开展检测设备的性能评价及检测工艺研究。通过针对零件的验收要求开展检测灵敏度分析及评价,确定合适的检测参数以确保零件中缺陷的可检

收稿日期:2022-06-22

第一作者简介:孟嘉,1987年出生,工程师,主要从事复合材料超声、射线等无损检测技术研究工作。E-mail:mengjia@outlook.com

性。为确保检测效果,相关工业CT检测标准规范均包含了必要的受控条款,如应定期监测设备的空间分辨率及密度分辨率指标对设备的性能及稳定性进行评估。与此同时,ASTM E1570、GB/T 29070、ISO 15708等主流的工业CT检测标准还要求对零件正式开展检测前应对设备特定检测参数下的缺陷检测能力进行验证。与超声<sup>[11]</sup>、射线<sup>[12]</sup>、红外<sup>[13]</sup>等检测手段类似,对比试块法是一种可对工业CT缺陷检测能力进行直观评价的方法。然而目前工业CT检测技术适用的金属增材制造零件检测对比试块较少且不通用,尤其是对于验收要求较高的增材制造结构零件来说,目前具备验证高灵敏度工业CT检测工艺验证能力的对比试块较少。原因主要是验证高灵敏度CT检测工艺需要在对比试块内部数个区域埋入大小可控的微缺陷,而现有金属增材制造材料对比试块内部的缺陷通常是直接通过打印埋入的,其难以满足对数十微米尺度微观缺陷直接进行成型的精度要求。这导致难以评价相应零件的工业CT检测结果的准确性及稳定性,无法满足工艺控制要求。针对这一问题,本文提供了一种适用于金属增材制造零件工业CT缺陷检测灵敏度评价的对比试块的设计制造思路,可用于微米尺度缺陷检测灵敏度的评价并具有较好的通用性。选用TC4(Ti-6Al-4V)粉末材料及选区激光熔合(SLS)制造技术完成了验证用试块的制造,并使用微纳米焦点工业CT检测系统对试块的检测灵敏度评价效果进行了初步验证。

### 1 试块设计及制造

试块的设计制造思路如下:首先,根据被检零件的材料特性使用相同的制造工艺打印数个尺寸相等的微型圆柱体,微圆柱体的直径为1 mm,高度为2

mm。然后根据零件的检测灵敏度要求,通过调整激光功率、扫描线距、扫描速度等手段在微圆柱打印过程中随机引入微缺陷。使用经计量的高分辨率微焦点工业CT设备对微圆柱体上微缺陷的形貌及尺寸进行标定,筛选出包含特定典型缺陷的微圆柱作为参考标样,剩余的微圆柱则作为填充物使用。相对于常规尺寸的样品,微小尺寸的样品可使用相对较大的放大倍数进行CT扫描,进而具备更好的细节分辨能力。因此相对于传统的尺寸较大的参考标样,该方案可实现标样内部的缺陷形貌的较精准标定。

其次,根据被检零件的形貌特性设计并制造代表其结构特征的对比试块胚体。在试块设计时在检测灵敏度关注区域预留和微圆柱体尺寸相匹配的空腔,同时将试块设计为多个独立的镶嵌部段,保证在每一个检测灵敏度关注区域均留有放置参考标样的空腔及对应的开口。各个部段通过组装的方式形成试块整体,组装完成后,理论上试块内部将基本不包含额外的缝隙与空腔,射线等效穿透厚度将与实际零件等同,但由于实际制造难度、精度、装配工艺性等因素制约,试块在组装后其内部可能会存在因误差导致的缝隙,但缝隙的宽度相对于零件的透射厚度来说可近似忽略,此外还可以通过合理设计空腔的开口方向进一步降低缝隙对零件内部射线透射衰减效应的影响。此时试块的检测效果可为正式零件的无损检测工艺质量评价提供较准确的参考。本研究假定检测对象为直径10 mm,高度为11 mm的Ti-6Al-4V棒状样品。试块的外形尺寸与检测对象保持一致,根据上述思路将试块设计为两段式组装结构,并在试块的中心轴及最外侧偏下区域分别设置了检测灵敏度关注区域,试块设计及实物如图1所示。

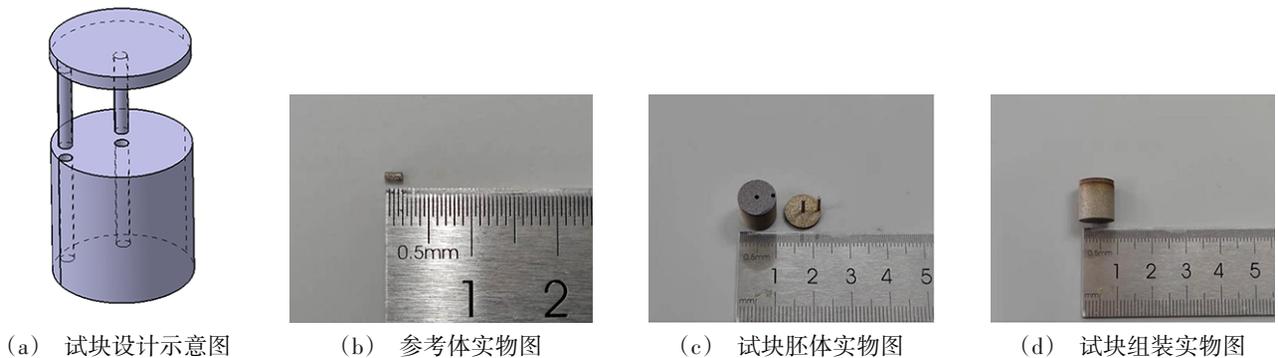


图1 试块设计示意图及实物图

Fig. 1 Schematic and physical diagram of the test block

### 2 基于试块的工业CT检测工艺验证

使用微焦点工业CT检测系统对不同检测条件下试块的工业CT成像效果进行了研究。将经筛选过的含有微缺陷的参考标样分别放入检测灵敏度关

注区域的空腔中,其余的空腔则放入同样材质的等效填充物。测试时将试块用热熔胶牢固固定在玻璃棒上以避免震动造成伪影,测试示意图如图2所示。所选用的通用的检测参数如下:射线管电压:130

kV、射线管电流:100  $\mu$ A、焦点模式:big模式、曝光时间:1 000 ms、曝光平均次数:2次、投影张数:1 600、滤波片:0.2 mm铜质滤波片。使用设备自带的datlos rec软件进行三维重建,射束硬化校正系数:8.1。重建完成后,使用VG Studio MAX软件进行三维可视化分析研究。

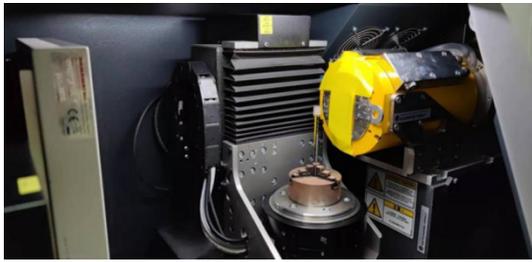
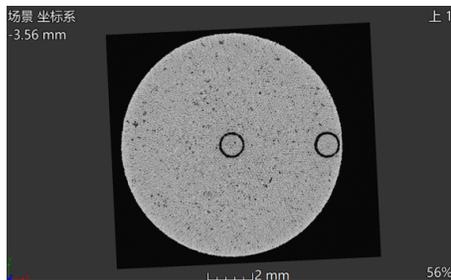


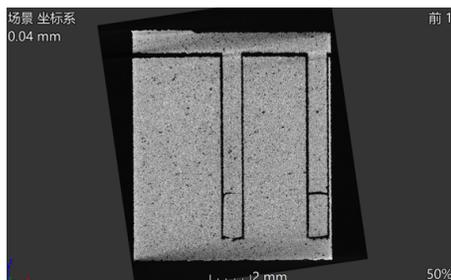
图2 样品扫描示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sample testing

图3为该试块的一组典型的工业CT检测结果(体素大小约7.14  $\mu$ m),可以看到试块内部存在有较多的孔隙缺陷,孔隙分布较为均匀,未发现显著的裂纹、夹杂等其他缺陷,使用VG软件自带的测量工具对孔隙尺寸进行了测量,发现大多数孔隙的尺寸处于 $10^{-2}$ mm量级区间。参考标样与试块胚体的装配匹配性良好,由于存在制造工艺误差,二者在配合界面存在缝隙。但缝隙宽度较小,对射线衰减的影响可近似忽略,且试块中心及边缘缝隙的存在并没有对整体CT图像带来显著的干扰伪影,表明该类型试块结构设计合理。



(a) 俯视图



(b) 侧视图

图3 典型的试块CT扫描结果

Fig. 3 Typical CT test results of the test block

## 2.1 不同放大倍数状态下相同区域的缺陷检测结果验证

根据样品的尺寸和工业CT设备硬件条件,分别设计了一种针对参考标样及4种针对零件/试块的透照布置参数,如表1所示。首先针对参考标样的尺寸使用了较为极限的放大条件(35倍)以获得较好的细节分辨能力,进而实现对参考标样中缺陷的标定。在该检测条件下理论体素大小为1.429  $\mu$ m,小于文献[14-15]中的典型孔隙缺陷尺寸。然后将参考标样固定放置在试块中心的空腔内,对试块分别使用了9.3倍、7倍、5.6倍及4.7倍的放大透照布置条件,以考察不同放大倍数条件下参考标样区域的工业CT检测效果,其对应的理论体素大小分别为5.36  $\mu$ m、7.14、8.93、10.71  $\mu$ m。使用基本一致的窗宽和窗位对CT重建结果进行了可视化成像,并基于阈值分析对参考标样内部缺陷的相关信息进行了统计。

表1 射线透照布置参数表

Tab. 1 Parameter table of the transilluminations

FOD距离/mm	FDD距离/mm	放大倍数	理论体素大小/ $\mu$ m
10.0	350	35.0	1.429
37.5	350	9.33	5.357
50.0	350	7.00	7.143
62.5	350	5.60	8.929
75.0	350	4.67	10.71

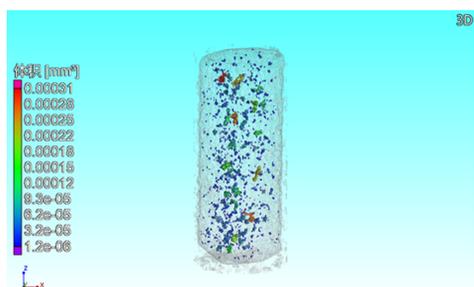
图4为不同放大倍数下参考标样内部缺陷工业CT三维成像结果,参考标样在三维图像中的位姿基本保持一致。可以看到,当放大倍数为35倍时,即标样处于缺陷标定测试状态时,参考标样内统计出的缺陷数量最为丰富,缺陷分布较为均匀,体积大小位于 $1 \times 10^{-6} \sim 4.1 \times 10^{-4} \text{mm}^3$ 。随着放大倍数的逐渐降低,相应CT图像中统计出的缺陷数量逐渐减少,且相同区域的缺陷检出尺寸有降低的趋势,这是因为CT的图像可看作为点扩散函数(PSF)与样品真实细节图像的卷积,任何尺寸小于点扩散函数宽度的缺陷在经过卷积计算后其与周围优区的对比度差异将会显著降低,导致缺陷难以检出。ASTM E1411中给出了点扩散函数宽度的近似估计公式如下:

$$BW \approx \frac{\sqrt{d^2 + [a(M-1)]^2}}{M} \quad (1)$$

式中, $d$ 为探测器的宽度, $a$ 为射线源焦点尺寸, $M$ 为放大倍数。可见,在CT检测系统硬件参数确定的情况下,点扩散函数的宽度随放大倍数的减小而逐渐增大,进而导致更多缺陷的尺寸或缺陷局部细节尺寸处于小于点扩散函数宽度的区间范围,在卷积计算后对比度差异的下降导致了缺陷可检性的下降。



(a) 35.00倍(标定状态)



(b) 9.33倍



(c) 7.00倍



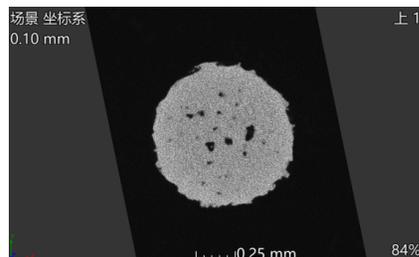
(d) 5.60倍



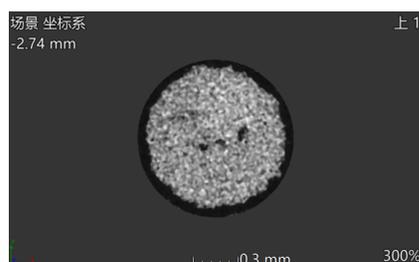
(e) 4.67倍

图4 不同放大倍数下参考标样内部缺陷工业CT三维成像结果  
Fig. 4 Results of industrial CT 3D imaging of internal defects in reference specimens at different magnifications

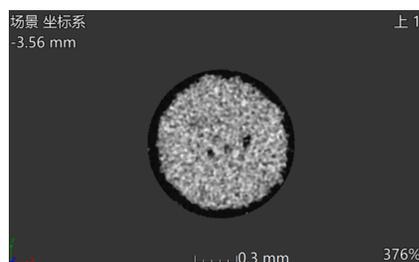
图5展示了不同放大倍数下参考标样内部相同位置工业CT断层成像结果,可以看到,当对参考标样使用标定模式进行扫查时,三维重建数据的断层



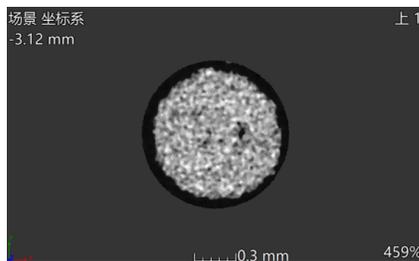
(a) 35.00倍(标定状态)



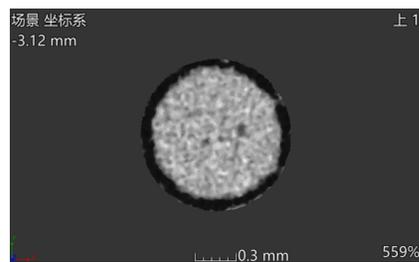
(b) 9.33倍



(c) 7.00倍



(d) 5.60倍



(e) 4.67倍

图5 不同放大倍数下参考标样内部相同位置处的工业CT断层成像结果(俯视)

Fig. 5 Industrial CT tomography results at the same location within the reference specimen at different magnifications (top view)

图中参考标样的组织灰度较均匀,未发现有显著的射束硬化现象及伪影,孔隙缺陷可识别性高,对比度差异显著,缺陷边缘清晰可辨,表明该检测参数下的参考样品内部缺陷的标定效果良好。在参考标样的中心区域可以看到3个显著的空腔型缺陷,直径50~100  $\mu\text{m}$ 不等。当使用约9.3倍的放大倍数对含参考标样的试块进行扫查时,参考标样的CT断层图像质量开始出现显著的劣化,随着放大倍数的逐渐减小,图像的信噪比开始逐渐下降,对比度差异开始减小,缺陷的边缘逐渐模糊,小尺寸缺陷逐渐难以辨识,同时缺陷的形貌开始出现失真现象,这与上述的理论分析相符。

对不同放大倍数下的缺陷进行统计分析,结果如图6(a)所示,可以看到随着放大倍数的逐渐增添减小,统计的缺陷体积比含量(孔隙率)也出现了下降的趋势,即缺陷的检出率逐渐降低,这是由于点扩

散函数的逐渐扩展导致最大不可检缺陷尺寸的逐渐增大,进而导致越来越多的缺陷难以被识别。同时,当放大倍数处于1.43~5.36倍之间时,即体素大小处于1.43~5.36  $\mu\text{m}$ 之间时,参考标样的孔隙率统计数值下降速度较为平缓,这可能是由于尺寸处于这一区间范围内的孔隙缺陷总体积占据所有缺陷总体积的比例相对较少,放大倍数降低导致该部分缺陷未检出并没有显著干扰样品总体的孔隙率统计结果。

图6(b)展示了不同放大倍数下孔隙缺陷体积分布的统计结果,其中缺陷数量以指数坐标展示,可以看出在所有检测参数条件下孔隙缺陷主要以小尺寸微缺陷为主,缺陷数量随着缺陷尺寸的增大而逐渐减少,而随着放大倍数的不断减小,相同区间范围内的缺陷数量亦逐渐减少,其中较小体积区间内的缺陷数量变化较显著,这与参考标样的CT三维图像及断层图像中的缺陷统计变化趋势相符。

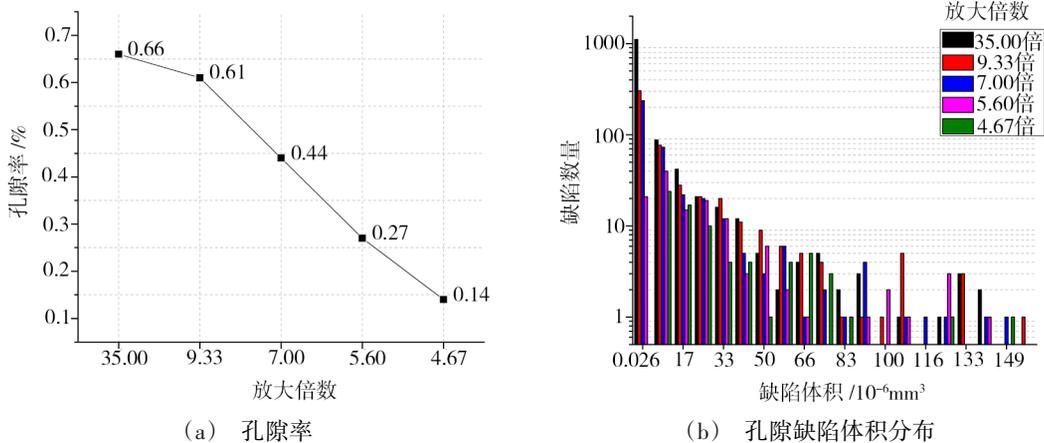


图6 不同放大倍数下参考标样内孔隙缺陷分析统计结果

Fig. 6 Statistical results of the analysis of porosity defects in reference specimens at different magnifications

## 2.2 典型放大倍数下不同区域的缺陷检测效果验证

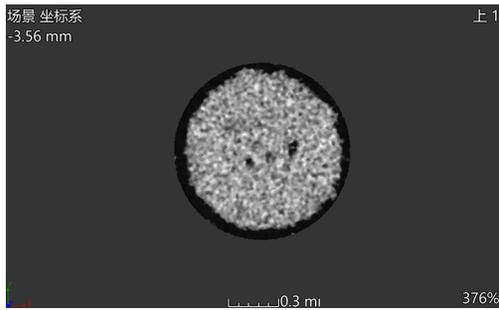
对处于相同放大倍数条件下试块不同区域缺陷的CT检测效果进行了考察,选用的放大倍数为7倍,在该检测条件下理论体素大小约7.14  $\mu\text{m}$ 。然后将参考标样分别放置在试块中心及试块边缘的空腔内,使用一致的参数进行CT扫查及三维重建,使用基本一致的窗宽和窗位对CT重建结果进行了可视化成像,并基于阈值分析对参考标样内部缺陷的相关信息进行了统计。

从图7可以看到当参考标样位于试块边缘区域时,其成像效果要差于位于试块中心区域,缺陷边缘相对较模糊,且信噪比较低,导致小尺寸缺陷的辨识难度相对较大。进一步分析孔隙缺陷的体积分布发

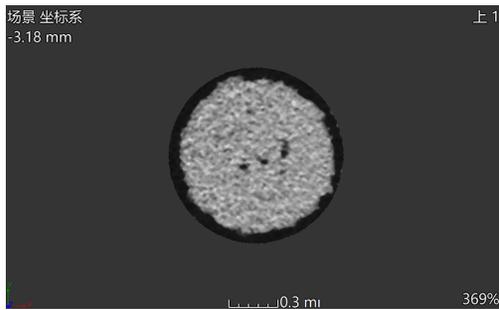
现体积小于 $2.9 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$ 的孔隙缺陷数量统计差异较大,表明试块边缘区域的较小尺度微缺陷的可检性较低。这是因为对于锥束射线源来说锥束中心的能量强度及密度要大于边缘处,会导致不同检测区域的信号信噪比存在差异。GB/T 29034—2012指出圆柱体的CT图像数据噪声的标准差可用下式近似:

$$\sigma_d \approx \sqrt{\frac{1}{n \exp[-2\mu_0(\bar{E})R_0]} + \frac{1}{n}} \quad (2)$$

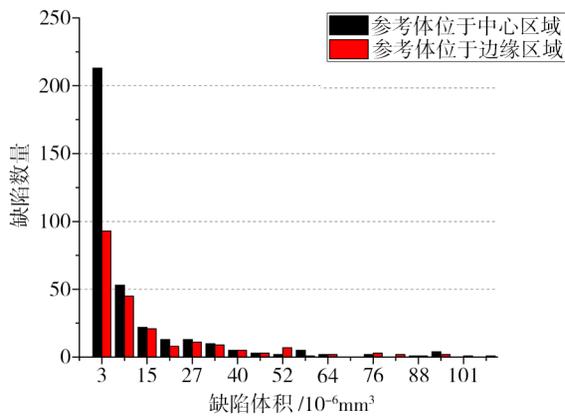
式中, $n$ 为光子数, $\mu_0(\bar{E})$ 为平均能量 $\bar{E}$ 的射线束透射圆柱体的线性衰减系数, $R_0$ 为圆柱体的半径。可以看出图像噪声与样品的旋转半径密切相关,噪声随旋转半径的增大而增加,导致缺陷可检性的下降,这与试验观察结果相符。



(a) 参考体位于中心区域



(b) 参考体位于边缘区域



(c) 统计结果

图7 典型放大倍数下不同区域的缺陷检测效果模拟验证结果

Fig. 7 Results of defect detection in different areas at a typical magnification

### 3 结论

本文针对金属增材制造样品中微米级尺度缺陷工业CT检测灵敏度验证问题,设计并制造了一种包含参考标样的组装结构试块,试块具有良好的微缺陷检测灵敏度验证能力,可有效实现该类零件的工业CT检测工艺的灵敏度评价。其主要优点如下:

(1)可有效代表被测零件的结构特征,开展关注区域工业CT检测效果评价工作,具有微米级缺陷检测灵敏度验证能力。

(2)基于CT技术的检测原理,通常越小的样品可以获得越高的检测分辨率,通过在体积较小的微型块上布置微缺陷,相对于传统的一体式的金属增材制造CT检测对比试块可以更好地实现对缺陷的

尺寸和形貌的标定。

(3)参考标样可重复使用,具有较高的通用性和较低的差异化试块制造成本,此外可通过合理设计组装胚体结合多次测量的方式保证不同检测灵敏度考察区域中的模拟缺陷大小和形貌严格一致。

针对直径10 mm的棒状零件设计制造了两段式组装试块,初步研究了不同放大倍数下及试块不同离心距离下的感兴趣区域的缺陷检测灵敏度变化规律,发现随着检测放大倍数的降低及偏心距离的不断增大,缺陷的不可检缺陷的尺寸逐渐增大,缺陷的可检性及识别的准确率逐渐降低。

### 参考文献

[1] 李怀学,巩水利,孙帆,等. 金属零件激光增材制造技术的发展及应用[J]. 航空制造技术,2012(20):26-31.

LI Huaixue, GONG Shuili, SUN Fan, et al. Development and application of laser additive manufacturing for metal component [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012 (20):26-31.

[2] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. 航空学报,2014,35(10):2690-2698.

WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. ACTA AERONAUTICAET ASTRONAUTICA SINICA, 2014, 35(10): 2690-2698.

[3] CHOREN J A, HEINRICH S M, SILVER-THORN M B. Young's modulus and volume porosity relationships for additive manufacturing applications [J]. Journal of materials science, 2013, 48(15): 5103-5112.

[4] 王增勇,汤光平,李建文,等. 工业CT技术进展及应用[J]. 无损检测,2010,32(07):504-508.

WANG Zengyong, TANG Guangping, LI Jianwen, et al. Development and application of industrial CT [J]. Nondestructive Testing, 2010,32(7): 504-508.

[5] THOMPSON A, MASKERY I, LEACH R K. X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review [J]. Measurement Science and Technology, 2016,27(7): 072001.

[6] 张祥春,张祥林,刘钊,等. 工业CT技术在激光选区熔化增材制造中的应用[J]. 无损检测,2019,41(03):52-57.

ZHANG Xiangchun, ZHANG Xianglin, LIU Zhao, et al. Application of industrial CT technology for additive manufacturing product by selective laser melting [J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(3): 52-57.

[7] SEIFI M, GORELIK M, WALLER J, et al. Progress towards metal additive manufacturing standardization to support qualification and certification [J]. Jom, 2017,69(3):439-455.

[8] 陈博,袁生平,金珂,等. 显微CT技术在航天材料中的应用[J]. 宇航材料工艺,2021,51(02):87-91.

CHEN Bo, RUAN Shengping, JIN Ke, et al. Applications of micro-CT in aerospace material detection [J]. Aerospace

Materials & Technology, 2021, 51(02):87-91.

[9] 曹玉玲, 孙玲霞. 工业CT在复合材料孔隙率分析中的应用[J]. CT理论与应用研究, 2001(04):14-17.

CAO Yuling, SUN Lingxia. Applications of industry CT in porosity analysis of composite material [J]. CT Theory and Applications, 2001, 10(4):14-17.

[10] GARCEA S C, WANG Y, WITHERS P J. X-ray computed tomography of polymer composites [J]. Composites Science and Technology, 2018, 156: 305-319.

[11] 许金才. 国内外超声检测标准关于对比试块声学性能规定的比较[J]. 无损检测, 2014, 36(08):71-75.

XU Jincai. Comparison of similarities of acoustical characteristics for reference blocks in the domestic and foreign ultrasonic testing standard [J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(08): 71-75.

[12] 江柏红, 于士章, 高晓进, 等. 多孔C/SiC复合材料数字射线检测技术研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(7):5.

JIANG Baihong, YU Shizhang, GAO Xiaojin, et al. Research on digital radiographic detection technology of porous

C/SiC composites [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019(7):5.

[13] 华浩然. 红外热成像反射与透射法的缺陷深度定量检测[D]. 南昌航空大学, 2016.

HUA Haoran. Research on quantitative detection of defect depth through reflection method and transmission method of infrared thermal imaging technology [D]. Nanchang Hangkong University, 2016.

[14] Zhao C, Parab N D, Li X, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting [J]. Science, 2020, 370(6520):1080-1086.

[15] 赵春玲, 李维, 王强, 等. 激光选区熔化成形钛合金内部缺陷及其演化规律研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(8):2841~2849.

ZHAO Chunling, LI Wei, WANG Qiang, et al. Investigation on relationship between defects and parameters for titanium alloy fabricated by selective laser melting [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(8):2841~2849.