

增材制造小缺陷的显微 CT 检测

涂 旺^{1,2}, 王文强^{1,2}, 陈佳慧^{1,2}, 黄 瑶², 金翠娥², 危 荃², 郭广平³

(1. 上海神剑精密机械科技有限公司, 上海 201600; 2. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600;
3. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 通过高精度金属增材制造技术设计制造了两组不同类型的缺陷试件, 并基于显微 CT 检测技术和缺陷解剖金相检测方式, 研究显微 CT 对增材制造小缺陷的实际检测能力。试验结果表明, 显微 CT 在体素尺寸 $5 \mu\text{m}$ 下能有效检出尺寸为 $20 \mu\text{m}$ 的人工缺陷; 金相检测与 CT 检测结果基本一致, 缺陷尺寸测量差小于 $10 \mu\text{m}$; 由于部分体积效应的影响, 更小尺寸缺陷的尺寸测量结果误差更大。

关键词: 增材制造; 显微 CT; 缺陷检测; 尺寸测量

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2024)05-0050-06

Micro-CT detection of small defects in additive manufacturing

TU Wang^{1,2}, WANG Wenqiang^{1,2}, CHEN Jiahui^{1,2}, HUANG Yao², JIN Cui'e², WEI Quan², GUO Guangping³

(1. Shanghai Shenjian Precision Machinery Technology Co., Ltd., Shanghai 201600, China;
2. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China;
3. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: In this paper, two groups of different types of defective specimens were designed and manufactured through high-precision metal additive manufacturing technology. Based on the micro-CT detection technology and the defect anatomical metallographic detection method, the actual detection ability of micro-CT on small defects of additive manufacturing was studied. The research results showed that micro-CT can effectively detect the artificial defects of $20 \mu\text{m}$ under the voxel size of $5 \mu\text{m}$; metallographic detection and CT detection results were basically the same, and the difference in the measurement of the defect size was less than $10 \mu\text{m}$; the defects of smaller sizes were more inaccurate due to the influence of the partial volume effect of the dimensional measurement results.

Key words: additive manufacturing; micro-CT; defect detection; dimensional measurement

增材制造技术与传统金属构件制造技术相比, 具有无需刀具和模具、材料利用率高、产品制造周期短、可实现复杂结构制造等优势, 广泛应用于汽车、船舶、武器装备和航空航天等领域的复杂金属结构件的快速成型制造中^[1-3]。随着增材制造构件向复杂化、精细化方向发展, 传统的检测技术已经不能满足复杂增材制造构件的检测要求, X 射线计算机层析扫描(Computed tomography, CT)技术在复杂构

件检测方面的优势逐渐凸显^[4]。

显微 CT 是一种具有高分辨率的计算机层析扫描技术, 其最高分辨率能够达到微米甚至亚微米级。使用显微 CT 系统对增材制造小缺陷进行检测、表征与量化分析, 有助于增材制造加工工艺的改进及材料疲劳寿命的评估^[5]。张祥春等^[6]通过设计制造对比试件, 验证了 CT 对增材制造中孔洞和裂纹缺陷的检出能力, 检出最小缺陷为 $100 \mu\text{m}$ 。KING 等^[7]通过显微 CT 对增材制造构件的检测结果进行研究, 发现锁孔孔洞形状不规则, 尺寸较大, 可达 $100 \mu\text{m}$ 以上。PANWISAWAS 等^[8]利用显微 CT 对钛合金增材制造构件进行检测, 研究增材制造过程中锁孔和孔隙的形成。

目前, 增材制造技术朝着高精度、高性能方向发

收稿日期: 2023-11-10

基金项目: 上海市产业发展项目(射线快速三维成像与智能识别技术研究及装备推广 HCXBCY-2022-045)

作者简介: 涂 旺(1998—), 男, 硕士, 主要研究方向为无损检测

通信作者: 郭广平(1969—)博士, 研究员, 主要从事航空材料与结构测试与评价工作, guangping.guo@139.com

展,其中缺陷的大小、形状和分布会严重影响其材料力学性能和使用寿命,小缺陷的检测变得尤为重要。文章基于显微 CT 检测能力设计了两组不同类型的增材制造缺陷试件,其中最小缺陷为 $20 \mu\text{m}$,通过显微 CT 检测和缺陷解剖金相检测结果,分析显微 CT 对增材制造小缺陷的实际检测能力。

1 显微 CT 检测能力理论分析

1.1 空间分辨率

工业 CT 系统鉴别和区分微小缺陷的能力可用空间分辨率表征,极限空间分辨率即 CT 系统最高空间分辨率,是由系统的截止频率 F_c 决定的。 F_c 与系统有效声束宽度 T_{BW} 的关系为

$$F_c = 1/T_{BW} \quad (1)$$

T_{BW} 与焦点尺寸、探测器像素尺寸及扫描几何结构有关,扫描布置示意如图 1 所示, T_{BW} 可表示为

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

式中: a 为射线源焦点尺寸; d 为探测器像素尺寸; M 为放大倍数, $M=S/L$; S 为射线源到旋转中心的距离; D 为探测器到旋转中心的距离; L 为射线源到探测器的距离。

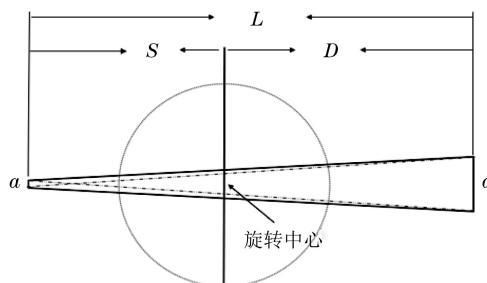


图 1 扫描布置示意

根据式(2)可以看出,空间分辨率主要与射线源焦点尺寸、探测器像素尺寸和放大倍数有关。对于显微 CT 而言,射线源焦点尺寸远小于探测器像素尺寸,为了得到更高的空间分辨率,往往采用放大成像的方法。在实际检测过程中,系统最高空间分辨率受其机械结构限制而较难达到,且更高的空间分辨率意味着更大的噪声,需要更长的扫描时间以降低噪声的影响。一般而言,缺陷最小检测范围为 $2\sim3$ 个体素,尺寸测量则要求更高。

1.2 密度分辨率

密度分辨率可以表示为一定面积范围内能够分辨的细节和基体材料之间能够被识别的最小对比度,其主要受噪声影响。空间分辨率与密度分辨率

是互相对立的,空间分辨率高则噪声随之增加,密度分辨率下降。在实际检测过程中,应根据缺陷性质及检测需求综合考虑,对大尺寸夹杂缺陷进行检测时,需重点考虑密度分辨率;气孔、裂纹缺陷检测和尺寸测量时,空间分辨率更为重要。

2 试件及试验设计

2.1 试件设计

模拟缺陷试件采用粉末激光快速成型制造技术,材料为 316L,粉末颗粒直径在 $20 \mu\text{m}$ 以下,精度可达到 $2\sim5 \mu\text{m}$,表面粗糙度可达到 $0.8\sim1.0 \mu\text{m}$ 。平整铺粉层厚度为 $5 \mu\text{m}$,一次打印成型。

试件设计为圆柱体,在内部设计了两种类型空腔,分别模拟材料中的体积型缺陷和裂纹缺陷。体积型缺陷模拟试件由一个直径为 2 mm ,高度为 7 mm 的检测圆柱和直径为 4 mm ,高度为 2 mm 的底座组成。检测圆柱内部空间由一组直径为 0.4 mm ,高度为 2 mm 和直径分别为 $0.20, 0.10, 0.05, 0.02 \text{ mm}$,高度为 1 mm 的空心圆柱组成,其结构示意如图 2 所示。裂纹缺陷模拟试件与体积型缺陷模拟试件的外观尺寸相同,不同点在于内部结构。该试件内部由长边为 1 mm ,短边为 0.4 mm ,高度为 2 mm 和长边为 1 mm ,短边分别为 $0.20, 0.10, 0.05, 0.02 \text{ mm}$,高度为 1 mm 的长方体的空腔组成,其结构示意如图 3 所示。体积型缺陷模拟试件及裂纹缺陷模拟试件实物如图 4 所示。

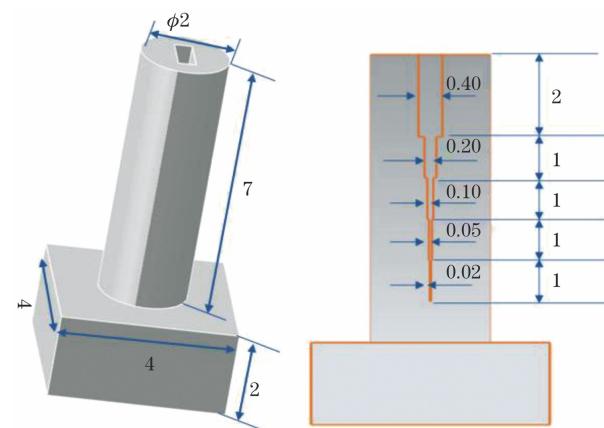


图 2 模拟体积型缺陷试件结构示意

2.2 CT 试验设计

试验采用 GE 公司的 Phoenix v|tome|x m 微纳 CT 设备,其实物如图 5 所示。该设备配备了一根 $300 \text{ kV}/500 \text{ W}$ 微米管和一根 $180 \text{ kV}/15 \text{ W}$ 纳米焦点射线管,可实现双源单探功能。其中,纳米管为开管透射靶,微米管为开管反射靶。其最佳细节

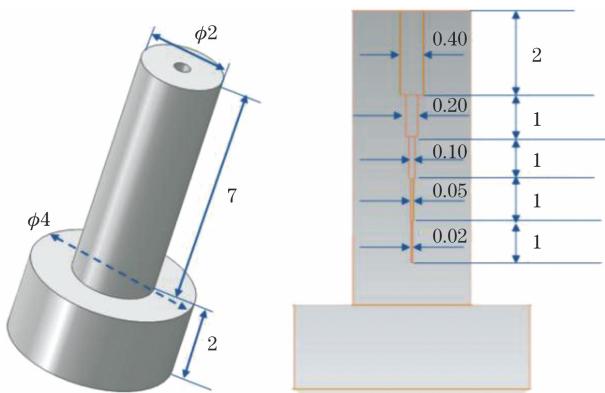


图 3 模拟裂纹缺陷试件结构示意



图 4 体积型缺陷模拟试件及裂纹缺陷模拟试件实物

分辨力小于 $1 \mu\text{m}$, 测量精度可以达到 $4 + L / 100 \mu\text{m}$ 。探测器为平面探测器, 其尺寸(长×宽)为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$, 探元数量为 2000×2000 , 单个像素尺寸为 $200 \mu\text{m}$ 。



图 5 Phoenix v|tome|x m 高分辨 CT 设备实物

此次试验对象为直径为 2 mm 的钢, 为了获得更好的检测效果, 选用 $180 \text{ kV}/15 \text{ W}$ 纳米焦点射线管, 焦点大小为 $5.2 \mu\text{m}$ 。电压选用 120 kV , 滤波片选用 0.5 mm 的铜, 用以过滤掉低能量的射线, 增加射线等效能量。电流设为 $180 \mu\text{A}$, 功率达到了 21.6 W , 积分时间为 500 ms , 根据 DR 实时成像灰

度直方图数据计算, 射线透射率为 14% 。根据采样定理, 最小采样幅数近似等于 1.5 倍的被检测物体投影图像最大长度所覆盖的探测器像元数量, 计算得到最小采样幅数为 600 张。因此, 采样幅数选取为 1 000 张, 工件旋转一周, 采样角度为 360° , 为了不增加扫描时间不进行帧平均。

模拟缺陷试件最小缺陷为 $20 \mu\text{m}$, 根据空间采样频率极限, 大于两个体素的特征才能够有效表征, 实际上小于两体素的缺陷也能发现但会降低缺陷对比度。试验放大倍数选为 40, 体素尺寸为 $5 \mu\text{m}$ 。CT 扫描时, 试件竖直放置, 如图 6 所示。

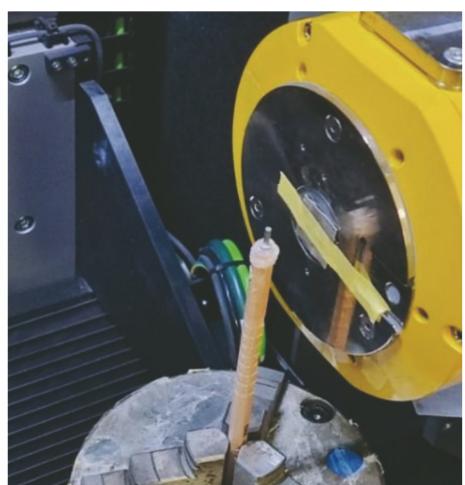


图 6 CT 扫描布置图

3 试验结果及分析

3.1 模拟体积型缺陷的检出能力

体积型缺陷试件的 CT 检测三维渲染图如图 7 所示。三维渲染图是基于灰度数据将每个体素映射到一个颜色和透明度值, 然后通过光线投射算法生成的图像, 反映被检试件射线衰减系数的差异。从图 7 中可以看出, 直径为 $200 \mu\text{m}$ 和 $400 \mu\text{m}$ 的体积型缺陷边界清晰、轮廓完整, 直径 $100 \mu\text{m}$ 以下的缺陷三维形状部分缺失、结构不完整, 该现象是粉末残留导致的。

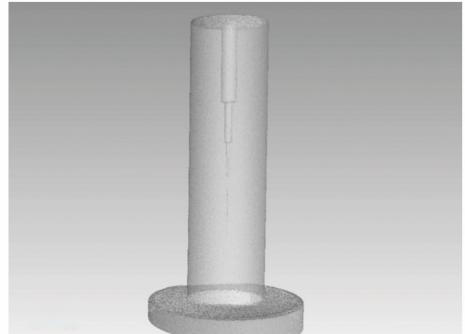
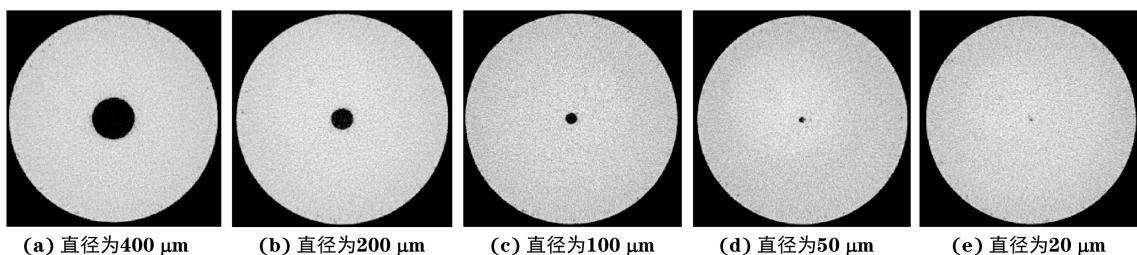


图 7 体积型缺陷模拟试件的 CT 检测三维渲染图

体积型缺陷模拟试件的 CT 检测结果如图 8 所示。由图 8(a)可以看出,各个大小的缺陷在图像中都能够清楚识别,直径小于 100 μm 的缺陷内部存在灰度不一致的情况,为了更好表征缺陷内部情况,放大试件中直径为 20~100 μm 的缺陷部分,如图 8(b)所示,可以看出,直径为 50 μm 和 100 μm 缺陷内部存在粉末残留,直径为 20 μm 的缺陷内部连接的地方已经无法分清是粉末残留还是在增材制造过程中已经融为一体。

不同直径体积型缺陷的 $x-y$ 平面二维切片结果如图 9 所示,可见,直径大于 100 μm 的缺陷边缘轮廓清晰,内部无粉末残留,直径小于 100 μm 的缺陷受粉末残留和部分体积效应的影响,缺陷形貌模糊。在试件的边缘和基体材料与模拟缺陷交接处能

图 9 不同直径体积型缺陷的 $x-y$ 平面切片图

在不同大小的缺陷中间部位的同一位置拉一条长度为 0.6 mm 的线段,统计该线段上的灰度分布。其测量示意如图 10 所示,其中红线表示选取的线段。测量材料的灰度和缺陷的灰度,在材料靠近中间部位取一个感兴趣区域(长 \times 宽为 200 $\mu\text{m} \times$ 200 μm),测量区域像素点灰度标准偏差,即为图像噪声值。根据灰度直方图使用半高宽度法测量其尺寸,测量结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,直径 100 μm 及以上缺陷,缺陷灰度值更低,对比度更高,缺陷尺寸测量误差更小,

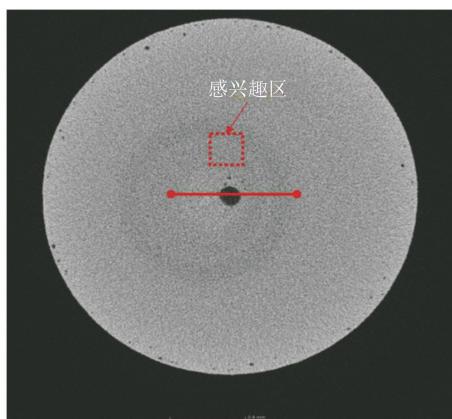


图 10 灰度测量示意

够看到增材制造过程中产生的气孔缺陷,测量得到其直径为 5~15 μm 。

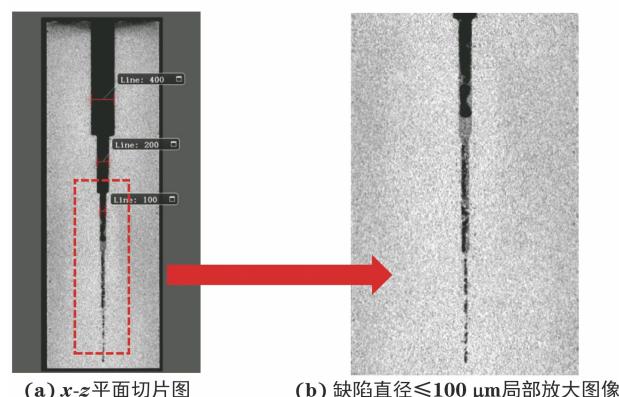
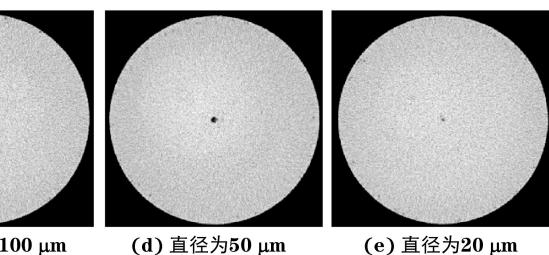


图 8 体积型缺陷模拟试件的 CT 检测结果

表 1 体积型缺陷 CT 检测结果灰度
测量与统计值

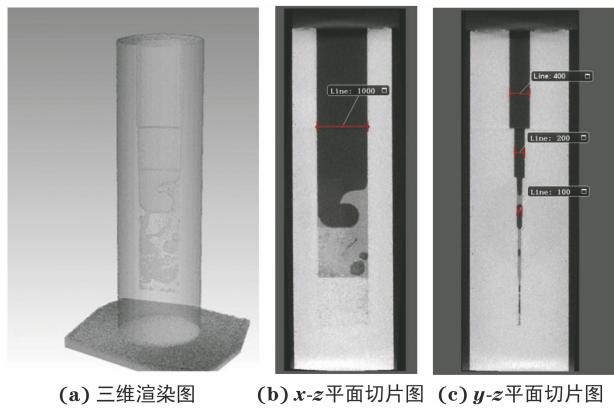
缺陷直径/ μm	材料 灰度值	缺陷 灰度值	对比度	噪声	信噪比	尺寸测量 值/ μm
20	44 976	26 500	41 %	2 437	18	30
50	44 567	25 431	43 %	2 572	17	45
100	45 307	23 247	49 %	2 457	18	100
200	43 894	22 022	50 %	2 493	18	200
400	44 363	23 650	47 %	2 478	18	400

这可能是因为更小的缺陷受到的部分体积效应影响更大,缺陷对比度更低。

3.2 模拟裂纹缺陷的检出能力

裂纹缺陷模拟试件的 CT 检测结果如图 11 所示。由图 11(a)可以看出宽度为 400 μm 和 200 μm 的裂纹缺陷内部灰度较为均一,从宽度为 100 μm 的缺陷开始,粉末的残留导致其内部灰度不一致,在三维示意图中出现了内部结构缺失的情况。从图 11(b),(c)的 $x-z$, $y-z$ 平面切片来看,粉末与基体材料存在灰度差异,相较于同直径的体积型缺陷其表征更为清晰。

不同宽度的裂纹缺陷 $x-y$ 平面二维切片结果如图 12 所示,可见,每个宽度的裂纹缺陷都可以观察到,其中宽度为 100 μm 和 50 μm 的裂纹缺陷



内部存在大量粉末残留且与基体材料有明显差异,宽度为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的裂纹缺陷内部粉末与基体几乎连为一体,在试件边缘发现了气孔缺陷的存在,其直径为 $5\sim15\text{ }\mu\text{m}$ 。

测量材料的灰度,缺陷的灰度,图像噪声值,根据灰度直方图使用半高宽度法测量其尺寸,测量结果如表 2 所示。从表 2 中数据可以看出,宽度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 及以上的裂纹缺陷,缺陷灰度值更低,对比度更高,缺陷尺寸测量误差更小,这与体积型缺陷的 CT 检测结果较为一致。

图 11 裂纹缺陷模拟试件的 CT 检测结果

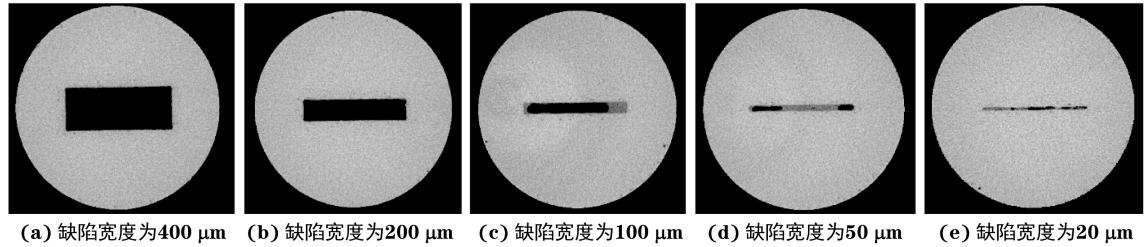
图 12 不同宽度的裂纹缺陷的 $x\text{-}y$ 平面切片图

表 2 裂纹缺陷 CT 检测结果灰度测量与统计值

缺陷宽度/ μm	材料 灰度值	缺陷 灰度值	对比度	噪声	信噪比	尺寸 测量值/ μm
20	37 883	21 222	44 %	1 192	32	28
50	37 200	22 483	40 %	1 142	33	45
100	37 940	21 180	44 %	1 139	33	100
200	38 496	20 286	47 %	1 151	33	200
400	37 430	19 479	48 %	1 070	35	400

4 模拟缺陷的金相和 CT 检测结果比较

为了进一步验证 CT 检测能力,通过线切割的方式以缺陷中心线为基准进行剖面切割取样,使用金相显微镜(放大倍数 $100\times$)观察和测量缺陷剖面结构。将金相显微镜下的缺陷剖面图像和显微 CT 检测的 $x\text{-}z$ 平面切片图像进行对比,结果如图 13,14 所示。

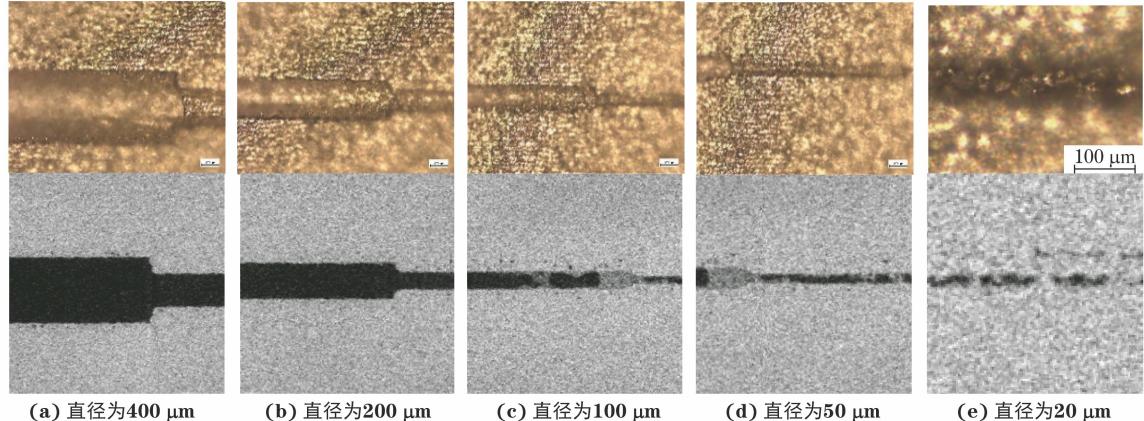


图 13 不同直径体积型缺陷的金相(上面)和 CT 检测(下面)结果对比

从图 13 中可以看出,直径为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 和 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的体积型模拟缺陷的边缘平整、图像锐利并且不同大小缺陷之间的分割明显、过渡区域小;直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 和 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的体积型模拟缺陷边缘粗糙且有少量的粉末残留堆积;对于直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的体积

型模拟缺陷,为了便于观察对图像进行了一定放大,从金相图中可以清晰观察到缺陷的基本轮廓,粉末颗粒和基体材料部分融为一体,部分位置发生黏连。显微 CT 小缺陷的检测结果与金相检测结果基本一致,直径大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的体积型缺陷边缘轮廓清晰,

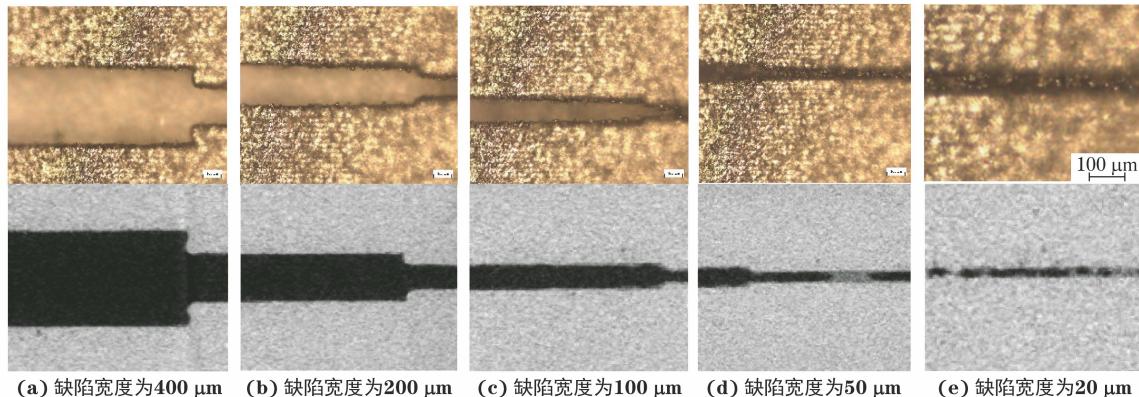


图 14 不同宽度的裂纹缺陷的金相(上面)和 CT 检测(下面)结果对比

缺陷内部均一性较好; 小于 100 μm 的体积型缺陷边缘轮廓较模糊, 内部有粉末残留。

从图 14 中可以看出, 相较于体积型缺陷, 同等宽度下裂纹缺陷的显示更为清晰。宽度不小于 100 μm 的裂纹缺陷, 边缘轮廓清晰、表面状态较好。宽度小于 100 μm 的裂纹缺陷, 内部存在大量粉末颗粒残留并与基体材料部分融为一体。其中, 对于宽度为 20 μm 的裂纹缺陷, 为了便于观察进行了放大显示, 可以看出缺陷形貌基本完整, 缺陷边缘能够分辨, 但部分区域受到粉末颗粒的严重影响有连成一片的趋势。由图 14 显示的 CT 检测结果可清晰看出宽度大于 100 μm 的裂纹缺陷边缘轮廓清晰, 内部均一性好, 与金相检测结果一致。

从图 13 和图 14 所示的对比结果可以看出, 显微 CT 检测技术可以准确识别到尺寸不小于 20 μm 的缺陷且与金相检测结果的缺陷形貌基本一致。对于缺陷内部成片的粉末颗粒(直径为 5~15 μm), 显微 CT 可以很好表征; 但对于单个小颗粒(尺寸小于 5 μm), 受限于空间分辨率, 并不能准确显示出。通过手动测量的方式分别测量金相检测和显微 CT 检测缺陷的尺寸信息, 如表 3 所示。

表 3 不同检测方式对不同类型缺陷的尺寸测量值

缺陷类型	检测方式	缺陷尺寸				μm
体积型缺陷	金相检测	23	47	100	200	400
	CT 检测	30	45	100	200	400
裂纹缺陷	金相检测	24	48	100	200	400
	CT 检测	28	45	100	200	400

表 3 结果表明, 对于尺寸不小于 100 μm 的缺陷, 金相检测结果和 CT 检测结果一致; 尺寸为 50 μm 和 20 μm 的缺陷, 金相检测结果与 CT 检测

结果相差在 10 μm 之内, 缺陷越小结果相差越大。

5 结论

文章采用增材制造技术设计了两种试件, 分别模拟材料中的体积型缺陷和裂纹缺陷, 采用 GE phoenix v|tome|x|m 设备对不同类型缺陷进行评价, 得出以下结论。

(1) 商用显微 CT 设备可以用来检测粉末激光快速成型件中的小缺陷, 在体素尺寸 5 μm 下能有效检出尺寸为 20 μm 的人工小缺陷, 并发现了制造过程中产生的直径为 5~15 μm 的小气孔缺陷。

(2) 显微 CT 检测结果与金相检测结果基本一致, 测量结果差小于 10 μm 。

(3) 缺陷尺寸测量误差决定于显微 CT 系统的体素分辨力, 由于部分体积效应的影响, 更小尺寸的缺陷测量结果误差更大。

参考文献:

- [1] HUANG Y, LEU M C, MAZUMDER J, et al. Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, 137(1):014001.
- [2] YADOLLAHI A, SHAMSAEI N. Additive manufacturing of fatigue resistant materials: challenges and opportunities[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 98:14-31.
- [3] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D 打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程, 2016, 44(2):122-128.
- [4] 杨平华, 高祥熙, 梁菁, 等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(9): 13-21.

(下转第 61 页)

要包括磁敏元件阵列优化及硬件电路设计两个方面,并进行了试验验证。结果表明,该方法能够有效提升损伤信号幅值,并针对不同磁敏元件找出了各自最优的阵列方式。

参考文献:

- [1] 黄松岭,孙燕华,康宜华.现代漏磁无损检测[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [2] 沈功田,王宝轩,郭锴.漏磁检测技术的研究与发展现状[J].中国特种设备安全,2017,33(9):43-52.
- [3] 曹印妮,张东来,徐殿国.钢丝绳定量无损检测现状[J].无损检测,2005,27(2):91-95,106.
- [4] 张宏伟.钢丝绳损伤远程漏磁检测系统研究[D].武

汉:华中科技大学,2022.

- [5] 董文琪.基于嵌入式系统的手持钢丝绳漏磁检测仪[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [6] 谢菲,孙燕华,姜宵园,等.矿井提升钢丝绳在线漏磁无损检测装置[J].无损检测,2019,41(1):34-36.
- [7] 孙燕华,马文家,田晓贺,等.基于STM32F4嵌入式的钢丝绳漏磁检测数据采集系统[J].无损检测,2018,40(9):56-59,67.
- [8] 康宜华,杨克冲,杨叔子,等.基于钢丝绳结构特征的断丝漏磁霍尔效应检测方法[J].华中理工大学学报,1992,20(S1):207-213.
- [9] 杨叔子,康宜华.钢丝绳断丝定量检测原理与技术[M].北京:国防工业出版社,1995.

(上接第 55 页)

- [5] DU PLESSIS A, YADROITSEV I, YADROITSAVA I, et al. X-ray microcomputed tomography in additive manufacturing: a review of the current technology and applications [J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2018, 5(3):227-247.
- [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(3):52-57.
- [7] KING W E, BARTH H D, CASTILLO V M, et al.

Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (12): 2915-2925.

- [8] PANWISAWAS C, PERUMAL B, WARD R M, et al. Keyhole formation and thermal fluid flow-induced porosity during laser fusion welding in titanium alloys: experimental and modelling [J]. Acta Materialia, 2017, 126:251-263.