



# 团 体 标 准

T/CAMDI 140—2025

## 增材制造 选区激光熔融金属成形件内部缺陷超声 检测方法

Additive manufacturing-Ultrasonic testing for metal parts produced by selective  
laser melting

2025-1-3 发布

2025-1-5 实施

中国医疗器械行业协会 发布

## 目 次

前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 原理	1
5 试验环境	2
6 人员	2
7 仪器设备	2
8 样品	2
9 对比试块	3
10 基准灵敏度校准	3
11 试验步骤	3
12 检测结果的评定	4
13 检测报告	5
附录 A	6
附录 B	7
参考文献	8

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国医疗器械行业协会增材制造医疗器械专业委员会提出并归口。

本文件归属于中国医疗器械行业协会增材制造医疗器械专业委员会团体标准化技术委员会。

本文件起草单位：上海市医疗器械化妆品审评核查中心、熠品（贵阳）质量科技有限公司、上海三友医疗器械股份有限公司、上海昕健医疗技术有限公司。

本文件主要起草人：楚霜、马晓飞、何海红、余学、周伟星、刘非。

本文件指导专家：卢秉恒、戴尅戎、王迎军、杨华勇、冷劲松、王玲（组长）、刘莉（组长）、刘歆、姜歆、袁曦、姚天平、刘永辉、李修往、陈军建。

## 引 言

选区激光熔融（Selective laser melting, SLM）是金属材料增材制造中应用最成熟的一种技术途径之一，它能直接成型出结构复杂且力学性能良好的金属零件。在制造过程中，激光功率、扫描速度等工艺参数设置不合理可能会造成未熔合等内部缺陷。该类缺陷会在成形件内部产生应力集中现象，导致裂纹萌生并降低材料的承载能力，影响产品的疲劳性能和最终使用寿命。因此，需要对金属材料增材制造成形件进行内部缺陷检测及评价。目前，行业内通常采用 CT 检测进行内部缺陷评价，但该方法存在成本高、检测设备较难配备、辐射安全等问题。本文件选用目前增材制造医疗器械常用的钛合金粉末作为原材料，建立超声内部缺陷的检测方法，为选区激光熔融工艺确认提供一种更为便捷、低成本的内部缺陷评价手段。

选区激光熔融金属成形件的主要缺陷有气孔、未熔合、裂纹和高密夹杂。气孔尺寸一般不超过 100  $\mu\text{m}$ ，高密夹杂缺陷尺寸一般为几十微米。气孔和夹杂类缺陷均小于 100  $\mu\text{m}$ ，超出了常规超声检测的能力。未熔合缺陷以单个未熔合、链状未熔合和层状未熔合等不同的形态存在。单个未熔合尺寸一般超过 100  $\mu\text{m}$ ，链状未熔合由一串单个未熔合组成，长度可达几毫米至几十毫米，层状未熔合尺寸通常可达毫米量级，分布在熔融层间。当量尺寸大于 0.4 mm 的未熔合或裂纹缺陷适用于本文件的超声检测方法。

# 增材制造 选区激光熔融金属成形件内部缺陷超声检测方法

## 1 范围

本文件描述了选区激光熔融工艺制备的钛合金成形件内部缺陷的水浸超声检测方法,包括检验原理、试验环境、人员、仪器设备、样品、对比试块、基准灵敏度校准、试验步骤、检测结果的评定、检测报告。

本文件适用于选区激光熔融工艺制备的钛合金成形件。

本文件适用于选区激光熔融工艺制备的厚度为 6 mm-50 mm 的样品。其他厚度的样品可参考本文件。本文件不适用于当量尺寸小于 0.4 mm 的缺陷。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证

GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测

GB/T 35351 增材制造 术语

JB/T 10061 A型脉冲反射式超声波探伤仪通用技术条件

## 3 术语和定义

GB/T 12604.1及GB/T 35351界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

内部缺陷 Internal defects

通常指实体试样内部结构中存在的未熔合或裂纹等缺陷。

### 3.2

选区激光熔融 Selective laser melting; SLM

利用高能量的激光束,按照预定的扫描路径,扫描预先铺覆好的金属粉末,将其完全熔化,再经冷却凝固后成型的一种技术。

[来源:YY/T 1702-2020, 3.1]

### 3.3

当量尺寸 Equivalent size

将试样缺陷回波幅度与对比试块中同声程的人工反射体回波幅度相比较,两者相等时以该人工反射体尺寸作为缺陷当量尺寸。

## 4 原理

声源产生的超声波进入到被检实体试样中后,若材料是均质的,则超声波以一定方向和速度向前传播,当遇到两侧声阻抗有差异的界面时部分声波被反射。这种界面可能是材料中某种缺陷(不连续),

如裂纹、层间未熔合等，通过检测和分析反射回的超声波信号的幅度、位置等信息，可以确定缺陷的存在，并评估其大小、位置。

## 5 试验环境

工作场所应无强电磁干扰，并保持清洁。避免灰尘及外来杂物污染而破坏检测条件。

## 6 人员

检测人员应符合 GB/T 9445 的相关要求，此外还需掌握选区激光熔融增材制造成形工艺及缺陷相应知识。

## 7 仪器设备

### 7.1 超声波检验仪

脉冲反射式超声波检验仪应能够产生、接收和显示所需频率和能量要求的高频电脉冲，可以在频率 0.5 MHz~25 MHz 带宽之间工作。闸门、距离-波幅修正曲线、报警系统、记录仪及其他检测和处理的电子辅助设备可以根据需要使用，其他性能应满足 JB/T 10061 的要求。

### 7.2 探头

根据实体试样的特点如几何形状、厚度、表面状况及检测要求等内容进行探头类型、尺寸及工作频率的选择。探头适用的检测方法和推荐被检产品见表 1。

表 1 探头与推荐被检产品及检测方法

探头类型	探头直径 (mm)	探头工作频率 (MHz)	检测方法	推荐被检产品
聚焦探头	6~20	5~15	水浸法检测	厚度为 6 mm~50 mm 的平面试样

### 7.3 耦合剂

水浸法检测时，可采用水作为耦合剂，水中可以添加湿润剂等添加物，但水中不应有干扰超声检验的可见气泡或悬浮物。

### 7.4 检测系统

水浸法检测时，检测系统应保证检测过程中水距的变化不超过  $\pm 6$  mm；入射角变化范围不超过  $\pm 1^\circ$ ；对同一规则反射体多次重复性检测时偏差不得超过  $\pm 1.5$  dB。

## 8 样品

8.1 被检样品的检验面应清洁、光滑、平直。

8.2 被检样品的表面粗糙度  $Ra \leq 3.2 \mu m$ 。

注：对于检测要求更高的样品，可能需要提出更高的表面粗糙度要求。

8.3 随炉打印的样品应与产品生产保持一致的生产工艺。

## 9 对比试块

9.1 采用与被检样品声学性能和表面状态相同或相近的材料制作，两者之间的声传输特性差应 $\leq 12$  dB，并在检测时应增加仪器灵敏度以补偿声传输特性差。若声传输特性差大于 12 dB，则应更换成符合要求的对比试块。

9.2 对比试块应能代表被检样品的特征，其形状及尺寸可依据被检试样的形状、厚度及探头类别等内容确定。对比试块中反射体的埋藏深度及数量应根据被检试样的外形及横截面厚度来确定。纵波校准时，反射体采用平底孔。

9.3 检测平面样品时，使用平面对比试块。对比试块加工技术条件，应符合附录 A 的规定。

9.4 对比试块的表面粗糙度与被检实体试样的表面粗糙度相近。

## 10 基准灵敏度校准

10.1 灵敏度应能保证检测到要求的最小缺陷的尺寸。

10.2 每次检测前、检测后或连续工作 2 h，进行灵敏度校准检查。检测期间如设备状态有任何变化，立即对设备重新进行校准。在校准灵敏度高于原检测灵敏度 2 dB 的情况下，应对上次校准以来发现缺陷的样品重新检测。在校准灵敏度低于原检测灵敏度 2 dB 的情况下，应重新检测上次校准以来所测所有样品。

10.3 采用适当的对比试块来校准仪器时，使试块中人工缺陷的反射信号幅度在满屏高度的 40%~80% 范围内。

10.4 选择与被检样品相同成形方向的对比试块设定基准灵敏度。

## 11 试验步骤

11.1 一般采用纵波法进行检测。

### 11.2 选择检测面及声束入射方向

应依据被检样品的形状及检测方向厚度等信息进行检测面的选择，具体由制造商确定。纵波检测，调节声束入射角，使入射面的反射信号幅度达到最大，从而使纵波与入射面垂直。

### 11.3 选择检测频率

依据被检样品的厚度、需检出的最小缺陷及被检材料的声衰减进行检测频率的选择。

### 11.4 设定扫查间距

扫查间距应能确保对所检测区域的全覆盖扫描。水浸法采用的扫查间距应不超过探头焦点尺寸的三分之一。

### 11.5 设定扫查速度

扫查速度不大于能分辨出对比试块中的平底孔的扫描速度。

## 11.6 设定水距

根据探头和检测时的金属声程选取最佳水距。

## 11.7 检测灵敏度调整

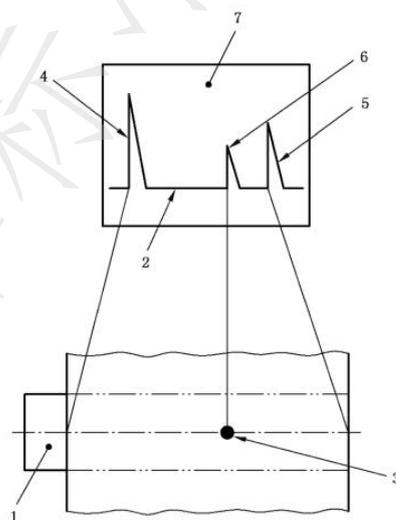
采用适当的对比试块调整检测灵敏度，应使对比试块中平底孔的反射信号幅度在满屏高度的40%~80%范围内，以保证被检测的样品能按标准要求进行检测。

## 11.8 检测

按照设定的检测参数对被检件进行检测。从垂直和平行两个方向对被检试样进行检测，如条件限制，不能从两个方向进行检测时，应注明。检测过程中，在被检件相互平行的表面监测底波的衰减量，用底波高度下降的dB值表示。允许的本底噪声应不超过对比试块中参考平底孔反射高度的50%。否则，改变检测工艺重新检测。

## 12 检测结果的评定

12.1 如图1所示，当被检样品中不存在缺陷时，超声检测图像中仅有发射脉冲和底面回波两个信号，而当被检样品中存在缺陷时，在发射脉冲和底面回波之间将出现来自缺陷的回波。通过观察缺陷回波的高度对缺陷的大小进行评估，通过观察缺陷回波距发射脉冲的距离，可得到缺陷的埋藏深度。



说明：

1——直探头；  
2——时基线；  
3——反射体；  
4——发射脉冲指示；

5——底面回波；  
6——反射体回波；  
7——A扫描显示。

图1 超声检测原理示意图

## 12.2 缺陷当量尺寸的评定

缺陷当量的评定采用试块对比法，即将样品缺陷波幅度直接与对比试块中人工反射体回波幅度相比较。若缺陷的埋深与平底孔的埋深相同，可将缺陷反射波高与平底孔的反射波高直接比较。此时，若缺陷反射波高与平底孔的反射波高相同，则该平底孔的尺寸即为缺陷的当量尺寸。若缺陷反射波高与平底

孔的反射波高不相同，应记录两者的分贝差。若缺陷的埋深与所有试块中的平底孔的埋深均不相同，则可用两个埋深与之相近的试块，用插入法进行评定。

### 12.3 缺陷指示长度的评定

对于面积大于声束截面或长度大于声束截面直径的缺陷，根据可检测到缺陷的探头移动范围来确定缺陷的大小，即缺陷指示长度的测定。将探头置于待评定缺陷上方，并找到反射信号幅度最大的位置，调节灵敏度使缺陷反射信号幅度达到满刻度的 80%，保持此灵敏度作为评定缺陷长度时的灵敏度；将探头置于缺陷一端使信号幅度达到满刻度的 40%，沿缺陷长度方向移动探头使信号幅度重新达到 40%，记录两个位置探头的中心距离即为缺陷的指示长度。

12.4 表 2 给出了参考的检测结果评定等级，制造商也可根据选区激光熔融增材制造医疗器械产品特点制定产品实体部分内部缺陷的接收要求。任何一个缺陷的反射信号应不大于与该缺陷相同深度的参考平底孔的反射信号。

表2 检测结果评定等级

等级	平底孔当量直径 (mm)
AAA	≤0.4
AA	0.4~0.8

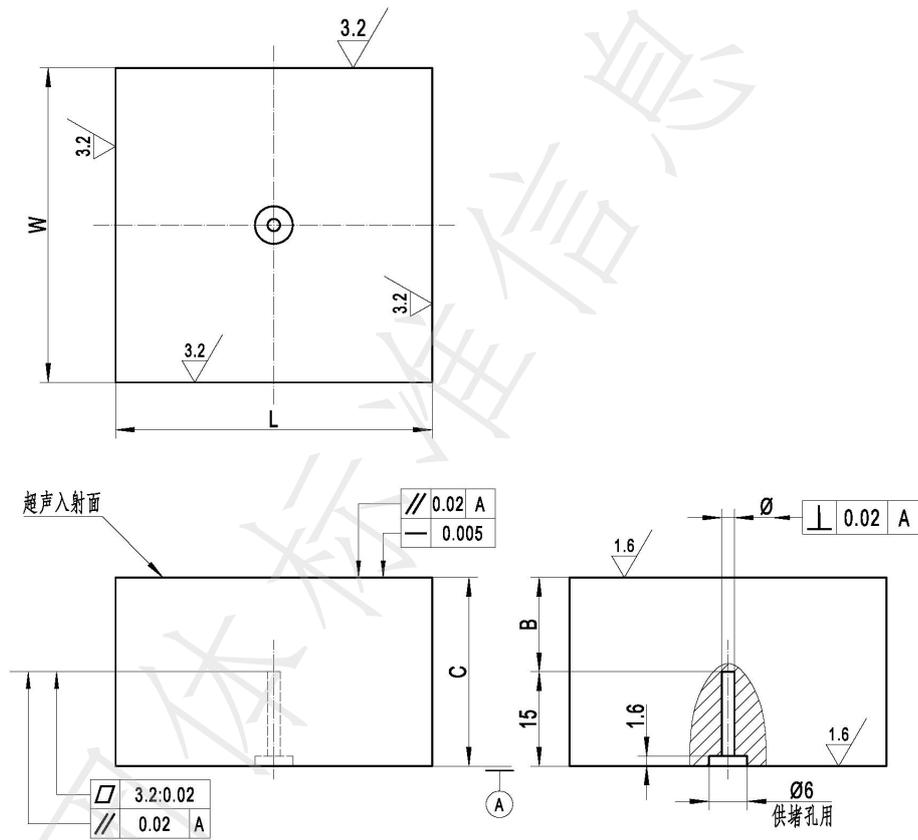
## 13 检测报告

### 13.1 检测报告包括下列信息：

- a) 被检试样特征（如材质、尺寸、成形方向、批次等）；
- b) 检测地点、检测日期；
- c) 超声波检测仪器型号、探头规格；
- d) 对比试样尺寸、形状及平底孔尺寸（孔径、埋藏深度）；
- e) 耦合剂；
- f) 检测质量要求；
- g) 检测区域、尺寸及检测面，必要时附图说明；
- h) 灵敏度设定；
- i) 检测结果需说明评定等级；
- j) 检测人员签字等。

附录 A  
(规范性)  
对比试块要求

加工对比试块的尺寸公差要求见图 A.1。



说明:

A——平底孔加工面

B——金属声程 (平底孔埋深)

C——试块高度

L——试块长度

W——试块宽度

$\phi$ ——平底孔直径。 [ $\phi \leq 1.6 \text{ mm}$ , 偏差为 $\pm 0.013$ ,  $\phi > 1.6 \text{ mm}$ , 偏差为 $\pm 0.03$ ]。

图 A.1 对比试块外形尺寸和公差图

附录 B  
(资料性)  
水浸超声检测与 CT 检测结果的对比

水浸超声检测结果（见表 3）。

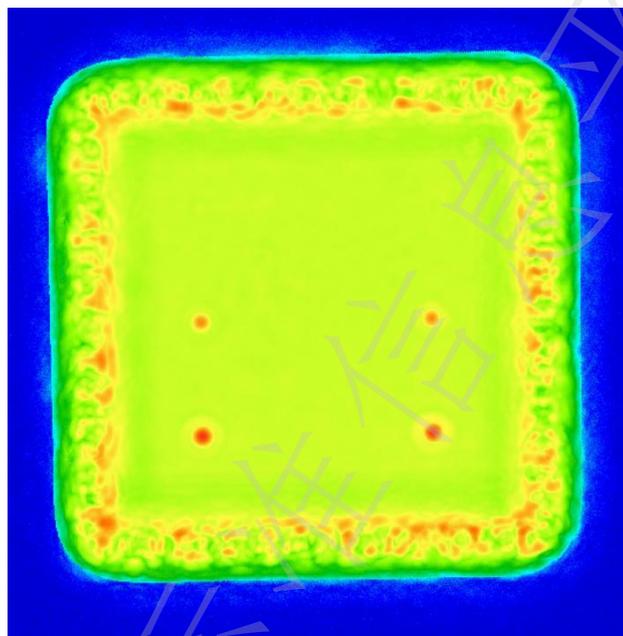


图 A：水浸超声 C 型扫描检测图

注 1：缺陷样品第一排 2 个检出缺陷（尺寸为  $\phi 0.4$ ）从左到右编号分别为 1、2，第二排 2 个检出缺陷（尺寸为  $\phi 0.6$ ）从左到右编号分别为 3、4。

注 2：水浸超声 C 型扫描检测图中亮度表示检测信号幅度大小。

表 3：CT 检测结果和超声检测结果对比

缺陷编号	CT 检测结果	水浸超声检测结果（缺陷当量）
1	$\phi 0.4$	$\phi 0.4-1.2\text{dB}$
2	$\phi 0.4$	$\phi 0.4-0.6\text{dB}$
3	$\phi 0.6$	$\phi 0.4+5.4\text{dB}$
4	$\phi 0.6$	$\phi 0.4+6\text{dB}$

参考文献

- [1] YY/T 1702-2020 牙科学 增材制造 口腔固定和活动修复用激光选区熔化金属材料
- 

全国团体标准信息平台