

金属增材制造制件无损检测方法指南

1 范围

本文件规定了定向能量沉积及粉末床熔融增材制造技术及其制造的钛合金、铝合金、高温合金、钢等金属制件的典型缺陷、无损检测的一般要求、无损检测方法的选择及实施要点等。

本文件适用于定向能量沉积及粉末床熔融增材制造技术制造的钛合金、铝合金、高温合金、钢等金属制件无损检测方法的选择。本文件适用于成形态及后处理（表面处理、热处理、机械加工等）后金属增材制造制件的检测，不适用于成形过程中的在线监控。其他金属增材制造制件无损检测方法的选择可参照使用。

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 26643 无损检测 闪光灯激励红外热像法 导则
- GB/T 26644 无损检测 声发射检测 总则
- GB/T 29069 工业计算机层析成像(CT)系统性能测试方法
- GB/T 29070 无损检测 工业计算机层析成像(CT)检测 通用要求
- GB/T 35351 增材制造 术语
- GB/T 36439 无损检测 航空无损检测人员资格鉴定与认证
- T/CSTM 00269 激光选区熔化制造结构工业CT尺寸测量
- HB 20158 磁粉检测
- HB 20159 变形金属超声检测
- HB 20160 X射线照相检测
- HB 20193 涡流检测
- HB 30048 金属熔融沉积增材制造制件超声检测方法
- HB/Z 61 渗透检验

3 术语和定义

GB/T 35351 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

成形态 as-built

采用增材制造工艺成形之后和后处理（表面处理、热处理、机械加工等）之前，已移除成形平台、去除支撑和/或去除多余原材料而成形的实体。

3.2

缺陷 defect

原材料或制件中源于制造工艺不当,或与服役条件有关的连续性或致密性的缺欠、物理结构或外形的间断。尺寸、形状、取向、位置或性质不能满足指定的验收标准而导致制件被拒收的缺陷可称为超标缺陷。

3.3

孔隙 porosity

在制件中存在的小空隙,使其不完全致密。

3.4

气孔 gas pore

由于原始金属粉末颗粒中的气体未完全逸出、或熔池周围环境中的惰性气体卷入而产生的球形孔隙。

3.5

匙孔 keyhole

成形过程中随着熔池的快速移动,熔池底部内壁易发生塌陷,导致熔池底部气体在金属凝固前来不及逸出而形成的凹陷,是孔隙的一种。

3.6

未熔合 lack of fusion (LOF)

一种由成形工艺参数控制不当形成的孔隙,粉末或丝材原材料没有完全熔化或熔合在前一层沉积的基体上。

3.7

夹杂 inclusion

混入粉末或丝材原材料中的外来金属或非金属材料。

3.8

球化 balling

金属粉末熔化后未能均匀地铺展,而是形成大量彼此隔离的金属球的现象。

3.9

困粉 trapped powder

粉末床熔融工艺特有的缺陷类型,指非用于零件的未熔化粉末被困在零件空腔内。

3.10

沉积方向 deposition direction

与增材制造成形面垂直的方向,即逐层堆积生长的方向。

3.11

复合制造 hybrid manufacturing

在零件制造过程中,结合一种或多种增材制造、等材制造或减材制造技术,完成零件或实物制造的工艺。

3.12

复合制造制件 hybrid manufacturing product

采用复合制造工艺成形的制件,在本文件中特指采用定向能量沉积/粉末床熔融结合锻造工艺成形的增材/锻造复合制造制件,包含增材成形区、锻造成形区以及增材/锻造过渡区三部分。过渡区指复合制造制件中增材成形区和锻造成形区之间的结合面及其热影响区,过渡区宽度一般为1mm~2mm。

4 金属增材制造技术

4.1 概述

金属增材制造是以合金粉末或丝材为原材料,通过高功率激光或电子束原位冶金熔化并快速凝固逐层堆积,直接从零件数字模型一步完成全致密、高性能金属制件的直接近净成形制造。

4.2 金属增材制造技术分类

本文件涵盖的金属增材制造技术主要包括定向能量沉积及粉末床熔融两类,根据填充材料方式(送粉、送丝、铺粉)和高能束种类(激光束、电子束)的不同,可细分为激光定向能量沉积、电子束熔丝沉积、激光选区熔化、电子束选区熔化4种金属增材制造工艺。

4.3 金属增材制造工艺特点

激光定向能量沉积和电子束熔丝沉积工艺主要用于成形框、梁类大型金属制件,激光选区熔化和电子束选区熔化工艺具有成形尺寸精度高、表面光洁度好等特点,适合于成形复杂薄壁以及异型空腔结构制件。上述4种常用金属增材制造工艺的技术特点对比见表1。

表1 常用金属增材制造工艺的对比

特点		定向能量沉积		粉末床熔融	
		激光定向能量沉积	电子束熔丝沉积	激光选区熔化	电子束选区熔化
输出热源		激光	电子束	激光	电子束
材料形式		粉末	丝材	粉末	粉末
工作环境		惰性气体	真空	惰性气体	真空
技术特点	零件尺寸	大中型	大型	中小型	中小型
	复杂程度	较复杂	较复杂	极复杂	极复杂
	表面质量	一般	差	优异	良好
	后续加工	少量加工	少量加工	几乎零加工	几乎零加工
	制造效率	高	最高	低	中
	成形精度	良	中	高	高
	专用模具	无	无	无	无

4.4 金属增材制造工艺对无损检测的影响

4.4.1 显微组织的影响

由于成形工艺的特殊性,金属增材制造制件中经常出现特殊的显微组织。在制件检测时应考虑显微组织对检测的影响。例如,定向能量沉积工艺中易形成沿沉积方向外延生长且贯穿多个熔覆层的粗大柱状晶,进行超声检测时,粗大晶粒可能会不同程度地增加超声波衰减。图1所示为激光定向能量沉积成形钛合金制件中的典型柱状晶组织。又如,金属增材制造制件不同成形方向的显微组织不同,导致超声检测时不同方向的声速和材料噪声存在差异。图2所示为激光选区熔化铝合金制件不同成形方向的显微组织。

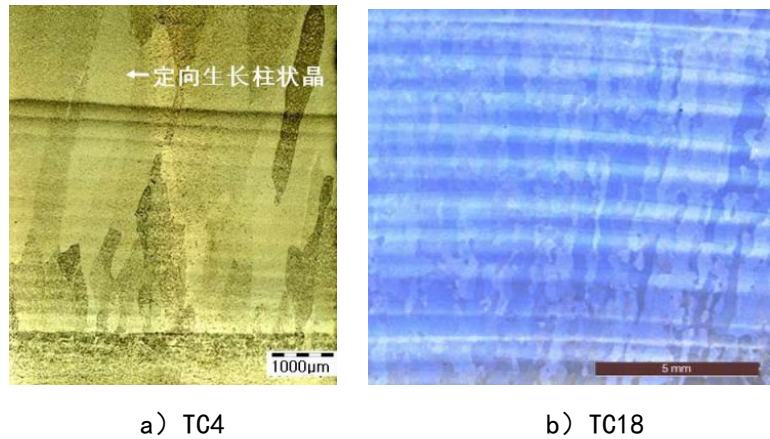


图1 激光定向能量沉积成形钛合金制件中的柱状晶组织

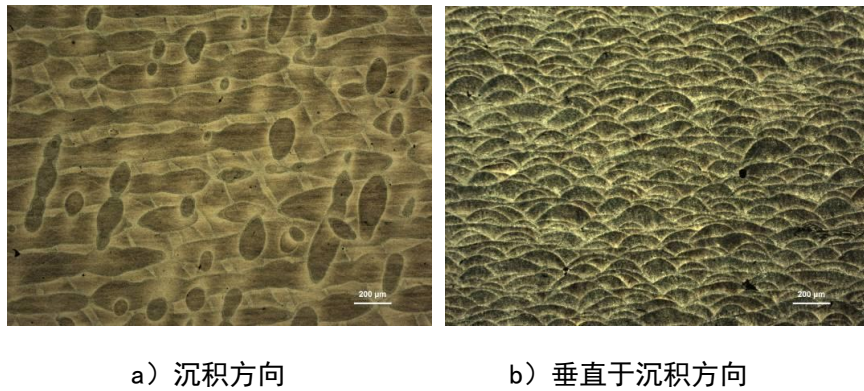


图2 激光选区熔化铝合金制件不同成形方向的显微组织

4.4.2 缺陷各向异性的影响

由于增材制造技术逐层沉积的工艺特点，金属增材制造制件中部分缺陷具有各向异性特征。例如未熔合缺陷一般位于熔覆层间，且其主平面垂直于沉积方向，这对无损检测过程将产生明显影响。图3所示为激光定向能量沉积成形钛合金断口处的层状未熔合缺陷。

在实施检测前，应充分了解制件的成形工艺、沉积方向，在此基础上确定检测方案，尤其当缺陷的检测能力与检测方向密切相关时。



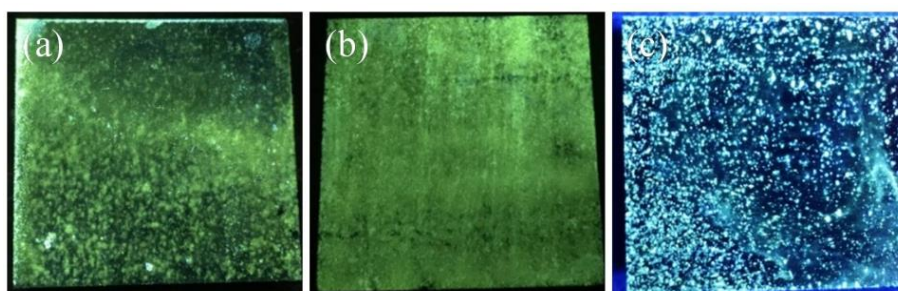
图3 激光定向能量沉积成形钛合金断口处的层状未熔合缺陷

4.4.3 表面粗糙度的影响

4.4.3.1 增材制造制件的表面粗糙度与成形工艺和表面处理方式相关。例如，粉末粒度、扫描功率、扫描速度、层厚、层宽、熔池表面张力等诸多因素均会影响表面粗糙度。成型态增材制造制件的表面粗糙度一般高于传统制造制件。

4.4.3.2 增材制造制件的表面粗糙度对无损检测过程将产生明显影响。例如，超声检测时粗糙表面将影响声波进入制件内部，X射线检测时表面纹理会干扰像质计上孔的清晰度，渗透检测时粗糙表面在清洗后会残留渗透液造成多余背景显示，影响缺陷的判断。图4所示为不同表面状态的激光选区熔化铝合金制件的荧光渗透显示。

4.4.3.3 成形过程中，应通过优化成形工艺尽可能降低表面粗糙度以满足无损检测对于表面状态的要求。采用选定的无损检测方法进行检测时，由制件表面状态引起的响应应尽可能均匀一致。



a) 成型态 b) 吹砂后 c) 机加工后

图4 不同表面状态激光选区熔化铝合金制件的荧光渗透显示

5 金属增材制造制件中的典型缺陷

5.1 缺陷类型

按照缺陷形成原因及形貌特征分类，增材制造制件中的主要缺陷类型包括气孔、未熔合、匙孔、夹杂、裂纹、困粉、球化、残余应力、尺寸精度差等。

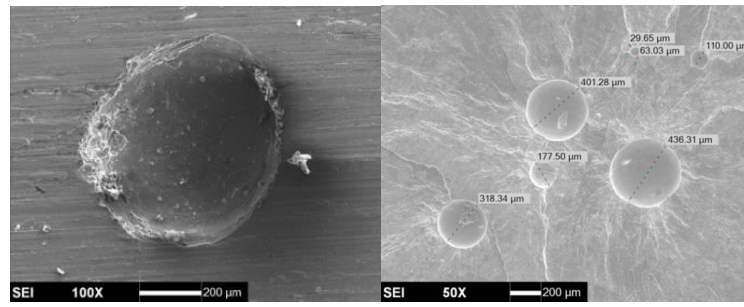
5.2 缺陷的成因及特征

典型缺陷的形成原因及其尺寸、形貌、分布等特征见表2，典型缺陷形貌见图5~图10。

表2 缺陷成因及特征

成因及特征 缺陷类型		形成原因	尺寸及形貌	分布位置
气孔（图5）		由于空心粉、随粉末或丝材带入熔池的气体残留在组织内、以及成形过程中保护气体卷入熔池形成	尺寸约为几十微米至几百微米，以单个或多个密集气孔形式存在； 粉末床熔融成形制件中气孔尺寸一般小于100微米	随机分布于制件内部、表面及近表面
未熔合	单个未熔合（图6 a）	由于成形工艺参数控制不当，从而使搭接部位未形成致密冶金结合而产生	定向能量沉积成形制件中的单个未熔合尺寸通常可达毫米量级，形貌不规则； 粉末床熔融成形制件中的	多分布在熔覆层间或熔道间的搭接区，也有可能跨层生长

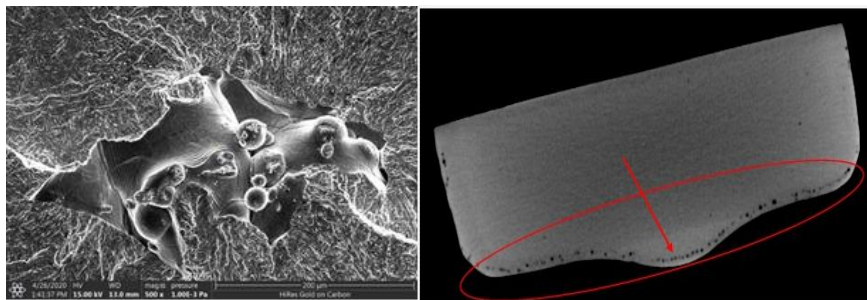
			单个未熔合尺寸一般超过100微米，形貌不规则，常含有未熔化粉末	
	链状未熔合 (图6 b))	一般由于表面成形工艺选用不当形成	尺寸多在几毫米至几十毫米长度范围内	多位于制件近表面
	层状未熔合 (图6 c))	由于成形工艺参数控制不当，从而使熔覆层间未形成致密冶金结合而产生	尺寸通常可达毫米量级，形貌不规则	多分布在熔覆层间
	匙孔 (图7)	随着熔池的快速移动，熔池底部内壁易发生塌陷，导致熔池底部气体在金属凝固前来不及逸出而形成	尺寸较小，一般在几十微米量级	多在熔池底部形成，分布于制件内部及近表面
	夹杂 (图8)	通常由于成形用粉末或丝材中的杂质带入制件引起	尺寸一般在几百微米范围内	在制件内随机分布，包括高密和低密夹杂
	裂纹 (图9)	由于熔体冷却速率快，在冷却过程中应力得不到释放而保留在制件内，当应力集中超过材料屈服强度时产生裂纹	组织内部的微观裂纹尺寸一般在微米量级，宏观裂纹尺寸可达毫米量级	在制件内部、表面及近表面均可能存在
	困粉 (图10)	粉末床熔融工艺特有，非用于制件的未熔化粉末被困在精细流道、内腔及夹层结构中，由于结构设计或工序设置不合理而无法清除	尺寸从几十微米到几毫米	精细流道、内腔及夹层结构中
	球化	由于扫描速度过快、能量输入不足、粉末层厚度增加或氧含量过高，导致熔体与下层基体之间缺乏润湿而形成球形颗粒	分为大尺寸球化和小尺寸球化	在制件内部及表面均可能存在
	残余应力	由于熔体快速冷却使制件的某些区域（具有高温梯度区域）处于预应力状态，从而降低可施加在制件上的有效载荷，造成薄弱区域	/	在制件内部及表面均可能存在
	尺寸精度差	由台阶效应、残余应力释放及翘曲、熔融后冷却导致的快速收缩等引起	/	/



a) 单个气孔

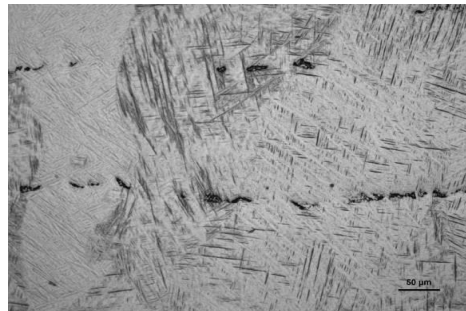
b) 多个气孔

图5 典型气孔缺陷形貌



a) 单个未熔合

b) 链状未熔合



c) 层状未熔合

图6 典型未熔合缺陷形貌

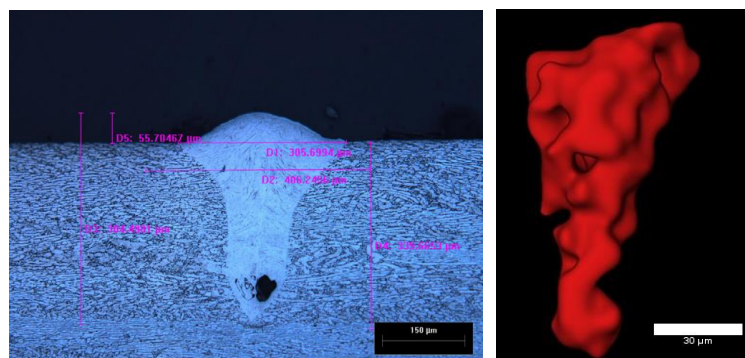


图7 典型匙孔缺陷形貌

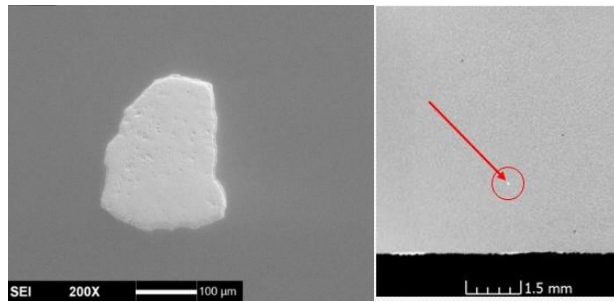


图8 典型夹杂缺陷形貌（高密夹杂）

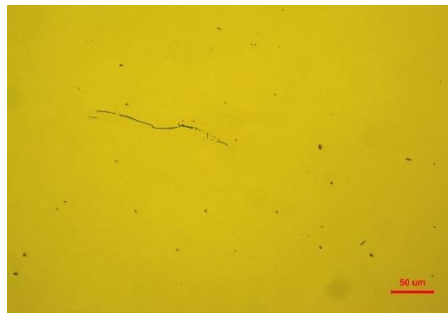


图9 典型裂纹缺陷形貌

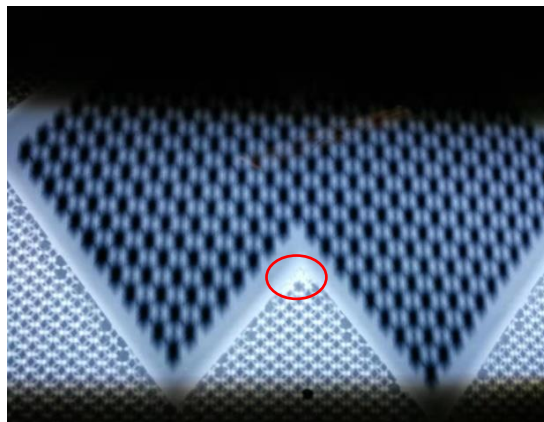


图10 困粉缺陷的 X 射线底片

6 金属增材制造制件无损检测的一般要求

6.1 检测人员

检测人员应按 GB/T 36439、GB/T 9445 或特定行业无损检测人员资格认证要求取得技术资格证书，并从事与专业技术资格等级相适应的工作，还应熟悉金属增材制造工艺及缺陷特征。

6.2 环境条件

6.2.1 超声检测不应在影响正常工作的强磁、震动、高频、灰尘大、有腐蚀性气体及噪音大的场地进行。工作场地光线应满足仪器使用要求。

- 6.2.2 X射线检测场所、暗室、评片室、底片存放室等应满足 HB 20160 中规定的要求。
- 6.2.3 工业 CT 检测的环境条件应满足 GB/T 29070 中规定的要求。
- 6.2.4 渗透检测场所及暗室等应满足 HB/Z 61 中规定的要求。
- 6.2.5 涡流检测的环境条件应满足 HB 20193 中规定的要求。
- 6.2.6 磁粉检测场所应满足 HB 20158 中规定的要求。
- 6.2.7 红外热像检测环境中应避免干扰检测的热辐射源，检测环境温度及湿度控制在仪器、设备及材料允许范围内。
- 6.2.8 声发射检测场所应满足 GB/T 26644 中规定的要求。

6.3 检测设备

- 6.3.1 超声检测用仪器、探头及探头操纵和机械扫查装置应满足 HB 20159 中规定的要求。探头与仪器的组合性能，应满足整个检测范围灵敏度和分辨力的要求。水浸自动检测采用的检测设备和相应的操作软件应能实现被检件的超声 C 扫描成像。
- 6.3.2 X射线检测用设备及相关器材应满足 HB 20160 中规定的要求。
- 6.3.3 工业 CT 系统的空间分辨力、密度分辨率等指标应进行定期检定，每年不应少于一次，推荐按照 GB/T 29069 进行测试。
- 6.3.4 渗透检测用设备及相关器材应满足 HB/Z 61 中规定的要求。
- 6.3.5 涡流检测用设备及相关器材应满足 HB 20193 中规定的要求。
- 6.3.6 磁粉检测用设备及相关器材应满足 HB 20158 中规定的要求。
- 6.3.7 红外热像检测用设备及相关器材应满足 GB/T 26643 中规定的要求。
- 6.3.8 声发射检测用设备及相关器材应满足 GB/T 26644 中规定的要求。

7 金属增材制造制件无损检测方法的选择

7.1 概述

进行金属增材制造制件无损检测方法的选择时，宜综合考虑以下因素：

- a) 制件所处的生命周期（即检测时机）；
- b) 缺陷类型以及无损检测方法对于该类型缺陷的检测能力；
- c) 制件尺寸与复杂程度，以及所使用的无损检测方法对待检部位的可达性；
- d) 制件中的特殊显微组织、缺陷各向异性以及表面粗糙度等对所使用无损检测方法的影响；
- e) 检测设备、器材与人员要求，检测时间，经济成本，环境安全性等。

7.2 全生命周期无损检测方法的选择

7.2.1 无损检测技术可用于增材制造制件的全生命周期检测，主要包括以下阶段：

- a) 产品、工艺的设计与优化阶段；
- b) 在线监控（成形过程控制）；
- c) 成形后的检测；
- d) 在役检测；
- e) 健康监测。

7.2.2 在增材制造制件的制造阶段(阶段 b 和 c)，针对不同状态制件进行无损检测的目的是确定和保证制件质量满足使用要求。

7.2.3 增材制造制件安装使用后(阶段 d 和 e)，可实施拆解状态或原位无损检测，具体何种状态取决于待检部位的可达性以及所使用的检测方法和设备等。表 3 概述了常用无损检测方法对增材制造制件全生命周期内不同阶段的适用性。

表3 无损检测方法对增材制造制件全生命周期不同阶段的适用性^{注1}

所处阶段 检测方法	产品、工艺设计 和优化	在线监控	成形后检测	在役检测 (拆解状态)	原位结构 健康监测
CT	Y	P	Y	Y	N
ET	N	P	Y	Y	Y
PT	N	N	Y	Y	N
RT	Y	N	Y	Y	N
UT	N	P	Y	Y	N
MT	N	N	Y	Y	N
IRT	N	Y	Y	Y	N
AE	N	N	Y	Y	Y
MET ^{注2}	N	P	Y	Y	N
PCRT	Y	N	Y	Y	N

注 1：所用缩写：Y=适用(Yes)，N=不适用(No)，P=可能使用但不成熟(Possible)，CT=计算机层析成像(Computed Tomography)，ET=涡流检测(Eddy Current Testing)，PT=渗透检测(Penetrant Testing)，RT=X 射线检测(Radiographic Testing)，UT=超声检测(Ultrasonic Testing)，MT=磁粉检测(Magnetic Particle Testing)，IRT=红外热像检测(Infrared Thermography)，AE=声发射检测(Acoustic Emission)，MET=光学测量(Metrology)，PCRT=过程补偿谐振检测(Process Compensated Resonance Testing)。

注 2：包括使用可见光、结构光、激光的检测方法。

7.3 不同类型缺陷无损检测方法的选择

7.3.1 气孔、匙孔类

7.3.1.1 对定向能量沉积成形增材制造制件中的气孔、匙孔类缺陷，当制件厚度不大于 10mm 时，应优先选择 X 射线检测；当厚度大于 10mm 时，应优先选择沿沉积方向入射的超声检测，当结构不允许沿沉积方向入射时，可采用其它入射方向的超声检测，此时应将灵敏度至少提高 12dB 进行检测，推荐采用水浸聚焦检测。

7.3.1.2 对粉末床熔融工艺成形增材制造制件中的气孔、匙孔类缺陷，当制件厚度不大于 10mm 时，应优先选择 X 射线检测；当厚度大于 10mm 时，在被检件尺寸允许的情况下推荐采用微纳 CT 检测；如被检件尺寸较大导致工业 CT 检测灵敏度不足时，可采用超声检测，但应在信噪比满足检测要求的前提下尽可能提高灵敏度进行检测。

7.3.1.3 对尺寸小、结构复杂、检测灵敏度要求高的制件中的内部气孔、匙孔类缺陷，推荐采用微纳 CT 检测。

7.3.1.4 对表面开口气孔缺陷，推荐采用渗透检测。

7.3.1.5 对近表面气孔、匙孔以及曲面或孔形结构处的表面气孔，优先选择涡流检测，若为铁磁性材料推荐采用磁粉检测。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/528012124053006027>