

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.03.05

增材制造换热设备无损检测能力建设研究

王宇阳^{1,2}, 冯元^{1,2}, 田雅婧^{1,2}, 何戈宁^{1,2*}

1. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213
2. 核能增材制造四川省重点实验室, 四川 成都 610213

摘要: 增材制造技术是极具战略价值的先进智能制造技术, 被誉为将是引领第四次工业革命的核心技术之一。基于增材制造技术的换热设备具有紧凑性、轻量化、自由成形的颠覆性优势, 但无损检测技术仍是制约增材制造换热器产品质量保证的关键瓶颈之一。本文首先系统性梳理增材制造产品的典型缺陷类型, 将其划分为平面缺陷与体积缺陷两大类并明确其形成机制; 其次, 针对核级换热设备的服役特性, 开展传统表面检测(目视检测等)、传统体积检测(射线检测等)及新型无损检测方法(声发射等)的适用性研究, 分析各类方法在缺陷检测灵敏度、材料适配性及核工况适应性等方面的表现; 最后, 设计基于激光粉末床熔融(L-PBF)工艺的预设缺陷试块(以未熔合、气孔为典型缺陷), 通过 X 射线-胶片法与数字射线(DR)联合检测, 建立预设缺陷与实际缺陷的定量关系, 确定检测灵敏度阈值, 为核级增材制造产品无损检测评价体系的构建及产品质量保障提供了关键技术支撑。

关键词: 增材制造; 无损检测; 核级换热器; 预设缺陷

中图分类号: TH87 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)03-0038-06

Research on Capacity Construction of Non-Destructive Testing for Additive Manufacturing Heat Exchange Equipment

WANG Yuyang^{1,2}, FENG Yuan^{1,2}, TIAN Yajing^{1,2}, HE Gening^{1,2*}

1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China
2. Nuclear Power Additive Manufacturing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610213, China

Abstract: Additive manufacturing(AM) technology is an advanced intelligent manufacturing technology of great strategic value, hailed as one of the core technologies that will lead the Fourth Industrial Revolution. Heat exchange equipment based on additive manufacturing boasts disruptive advantages such as compactness, lightweight design, and freeform fabrication. However, non-destructive testing (NDT) technology remains one of the key bottlenecks restricting the quality assurance of additive manufactured heat exchangers. Firstly, this paper systematically sorts out the typical defect types of additive manufactured products, classifies them into two categories—planar defects and volumetric defects—and clarifies their formation mechanisms. Secondly, targeting the service characteristics of nuclear-grade heat exchange equipment, it conducts applicability research on traditional surface testing methods (such as visual testing), traditional volumetric testing methods (such as radiographic testing), and new non-destructive testing methods (such as acoustic emission testing), analyzing the performance of each method in terms of defect detection sensitivity, material adaptability, and nuclear service condition compatibility. Finally, preset defect test blocks (with lack of fusion and porosity as typical defects) based on the laser powder bed fusion (L-PBF) process are designed. Through the combined detection of X-ray film method and digital radiography (DR), the quantitative relationship between preset defects and actual defects is established, and the detection sensitivity threshold is determined. This research provides key technical support for the construction of the non-destructive testing evaluation system and the assurance of product quality for nuclear-grade additive manufactured products.

Keywords: AM; NDT; nuclear-grade heat exchanger; predefined defects

收稿日期: 2026-01-31 修回日期: 2026-03-08

作者简介: 王宇阳(1995—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事核能增材制造研究。E-mail: 1004639876@qq.com。

通讯作者: 何戈宁, E-mail: 851621488@qq.com。

引用格式:王宇阳,冯元,田雅婧,等.增材制造换热设备无损检测能力建设研究[J].电焊机,2026,56(3):38-43.

Citation:WANG Yuyang, FENG Yuan, TIAN Yajing, et al. Research on Capacity Construction of Non-Destructive Testing for Additive Manufacturing Heat Exchange Equipment[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(3): 38-43.

0 引言

增材制造技术,又称3D打印技术,是一种基于离散-堆积原理,通过计算机三维模型数据驱动,将材料逐层累加制造出实体产品的先进智能制造技术^[1]。与传统锻造、铸造等制造技术相比,增材制造彻底摆脱了模具与加工工艺的限制,可实现复杂流道、一体化结构精准成形,在核能、航空航天、生物医药、高端装备制造等领域展现出巨大的应用潜力,被公认为引领第四次工业革命的核心技术之一^[2]。

在核级换热设备领域,增材制造技术带来颠覆性变革,可精准成形复杂结构,大幅提升换热面积与传热效果,同时缩减设备体积重量,优势显著。受材料特性、工艺参数、设备精度等因素影响,增材制造成形过程中可能产生缺陷,直接制约设备力学性能、抗腐蚀能力及服役寿命^[3]。为保证设备可靠性和安全性,核级增材制造换热设备对质量控制与无损检测提出极高要求。

增材制造成形过程复杂,其设备缺陷的类型、分布与传统制造产品差异显著,导致传统无损检测方法在适用性、监测灵敏度及缺陷识别准确性上存在诸多挑战^[4]。目前,国内外针对增材制造无损检测的研究多集中于航空航天领域,核级设备相关研究较为匮乏,成熟统一的检测标准与评价体系尚未形成,成为制约核级增材制造换热设备规模化应用的关键瓶颈^[5]。因此,开展相关无损检测能力建设研究,通过缺陷特征分析、检测方法适配性验证及预设缺陷体系构建,对推动增材制造技术在核级换热设备领域的应用具有重要理论意义与工程价值。

1 增材制造缺陷种类及形成机制

增材制造换热设备的缺陷产生与材料特性、成形工艺、设备状态等多种因素密切相关,其缺陷种类、形态及分布具有显著的技术特异性。根据缺陷

的存在位置与形态特征,可将增材制造产品常见缺陷分为平面缺陷与体积缺陷两大类。

1.1 平面缺陷

平面缺陷主要分布于产品表面或层间界面,其形成多与材料熔融状态、层间搭接质量及扫描策略相关,直接影响产品外观质量与结构整体性。典型常见平面缺陷主要包括:

1.1.1 表面粗糙度(Ra)超标

增材制造逐层堆积成形过程中,每层轮廓边缘存在微小的台阶效应,同时材料熔融后冷却收缩易产生表面凹凸不平,导致产品表面粗糙度显著高于传统机加工件^[6]。增材制造产品Ra为5~20 μm,传统机加工件Ra可达<1 μm。该缺陷不仅影响设备的流体力学性能,还会降低后续无损检测的灵敏度(如渗透检测中渗透液残留风险增加)。

1.1.2 层间未熔合

在激光/电子束增材制造中,工艺参数不当、粉末铺展不均匀会导致相邻熔道、相邻层之间或熔池与基体之间无法完全熔融结合,形成层间未熔合缺陷^[7]。该缺陷会破坏产品的结构连续性,显著降低拉伸强度、疲劳寿命及抗腐蚀能力。

1.1.3 飞边与毛刺

在成形过程中,部分熔融材料未完全附着于产品本体,溢出至产品表面形成飞边或毛刺,不仅影响产品的外观质量,还可能在服役过程中脱落,造成流道堵塞或损伤其他部件。

1.2 体积缺陷

体积缺陷主要指存在于增材制造产品内部各类体积缺陷,其隐蔽性强,对产品安全性的影响更为严重。典型常见体积缺陷主要包括:

1.2.1 内部气孔

气孔是增材制造产品最常见的内部缺陷之一。成形过程中,粉末中出现空心颗粒、熔融池内气体未及时逸出、工艺参数不当导致材料未完全致密化等原因,均会在产品内部形成不同尺寸的孔隙^[8]。气孔会降低材料的致密度与力学性能,若分布在增

材制造承压部件关键区域,可能引发应力集中,导致裂纹扩展。

1.2.2 裂纹

根据形成阶段与原因,增材制造产品的裂纹可分为热裂纹、冷裂纹与疲劳裂纹^[8]。热裂纹多因成形过程中温度梯度大、冷却速度过快,导致材料内部产生过大的热应力;冷裂纹则与材料的成分、相变及残余应力相关;疲劳裂纹则是在服役过程中,交变应力作用下由微小缺陷扩展形成。

1.2.3 夹杂

核级增材制造产品成形过程中,外界杂质(如粉尘、油污)混入熔融池,或粉末材料中存在的氧化物、氮化物等非金属夹杂未被完全熔化,最终残留于产品内部形成夹杂缺陷^[8]。夹杂破坏材料成形的连续性,引发应力集中,降低设备的抗疲劳性能。

2 核级增材制造换热设备无损检测方法适用性研究

针对增材制造换热设备的缺陷特征,对表面检测、体积检测及其他新型检测方法的适用性进行研究,旨在筛选出检测灵敏度高、缺陷识别准确、适用于核级增材制造换热器的无损检测技术。

2.1 表面检测

2.1.1 目视检测(VT)

VT是最基础、最直接的表面检测方法,借助放大镜、内窥镜等工具对零件表面进行观察,判断是否存在飞边、毛刺、明显的表面孔隙、裂纹及分层等缺陷^[9]。该方法操作简便、成本低,但对微小缺陷识别能力有限,可适用于初步筛查核级增材制造换热设备的所有可达表面大型缺陷。

2.1.2 渗透检测(PT)

PT基于毛细作用原理,将含有色染料或荧光剂的渗透液涂覆于产品表面,渗透液通过毛细作用渗入表面开口缺陷中,去除多余渗透液后,施加显像剂,使缺陷中的渗透液被吸附至表面形成清晰的缺陷显示^[9]。该方法同样可适用于核级增材制造换热设备的所有可达表面,但仅能检测表面开口缺陷,同时需注意检测后避免渗透液在产品内残留,检测

后应进行彻底清洗。

2.1.3 磁粉检测(MT)

MT适用于铁磁性材料制成的增材制造产品,利用磁化后在缺陷处产生漏磁场,吸附施加在产品表面的磁粉,形成可见的磁痕,从而判断缺陷的位置与形态^[10]。该方法对产品表面及近表面的裂纹、未熔合等缺陷检测灵敏度较高,检测速度较快,但仅适用于铁磁性材料,对非铁磁性材料(如增材制造常用不锈钢材料、钛合金材料及铝合金材料)不适用。

2.1.4 涡流检测(ET)

ET基于电磁感应原理,当交变电流通过检测线圈时,会在导电材料中产生涡流,产品表面及近表面的缺陷会导致涡流的大小、相位发生变化,通过检测涡流信号的变化即可判断缺陷信息^[10]。该方法可适用于采用导电材料的核级增材制造换热设备表面及近表面缺陷检测,检测速度快。ET检测深度一般 ≤ 5 mm,受产品形状与尺寸影响较大,需结合核级增材制造换热设备结构优化检测线圈布局。

2.2 体积检测

2.2.1 射线检测(RT)

RT利用X射线、 γ 射线等不同源穿透被检产品,通过检测透过产品后的射线强度分布,形成缺陷影像,从而判断内部缺陷的位置、大小与形态^[9]。RT方法对产品内部的孔隙、裂纹、未熔合、夹杂等体积型缺陷具有较好的检测效果,且检测效果直观。该方法可适用于核级增材制造换热设备体积缺陷检测,尤其针对内部复杂流道承压壁面上的体积检测。采用数字射线(DR),通过数字平板探测器替代传统胶片,直接将射线信号转化为数字图像,可实现实时成像检测并开展后期处理,缺陷检出率及检测效率较传统胶片法提升20%以上。

2.2.2 超声检测(UT)

UT利用超声波在材料中的传播特性,通过检测反射波、透射波的信号变化,判断缺陷的存在与否及缺陷的位置、大小。UT对产品内部的裂纹、未熔合等平面缺陷检测灵敏度较高。该方法可适用于核级增材制造换热设备体积缺陷检测,但增材制造换热器形状复杂多变,且原始表面粗糙度较差,超声波的耦合效果不佳,易产生伪信号,影响检测

结果的准确性。相控阵超声检测(PAUT)通过控制超声阵列探头的相位延迟,实现超声波束的聚焦与偏转,可有效提高内部缺陷的检测能力,可适配核级增材制造换热设备复杂结构检测^[11]。

2.2.3 工业计算机断层扫描检测(CT)

CT是一种基于射线检测的三维成像技术,通过围绕被检测件旋转射线源与探测器,获取被检测件不同角度的投影数据,利用计算机重建算法,生成三维断层图像与三维模型,从而清晰、准确地展示零件内部的缺陷分布、形状与尺寸。该方法适用于核级增材制造换热设备内部缺陷检测,尤其是针对气孔及裂纹类等典型缺陷。采用微焦点高能CT,可突破常规CT技术瓶颈,同时实现微米级焦点与高穿透能量,可进一步提高对核级增材制造换热设备内部缺陷的检测能力^[12]。

2.3 其他检测

2.3.1 声发射检测(AE)

AE利用材料在受力、变形或内部缺陷扩展过程中释放弹性波(即声发射信号)的物理特性,通过传感器捕捉信号并分析缺陷的活动性、位置及扩展趋势^[13]。AE对产品内部活动性缺陷(如裂纹扩展、应力腐蚀开裂、孔隙闭合与扩展等)的实时监测能力突出,可动态追踪缺陷的产生与发展全过程。该方法可考虑用于核级增材制造换热设备辅助检测手段,弥补了传统静态检测方法无法捕捉缺陷动态变化的不足。

2.3.2 红外热成像检测(IRT)

IRT基于材料的热传导特性,通过加热或冷却被检件,使产品表面产生温度场分布,若内部存在缺陷,会影响热传导过程,导致缺陷区域与正常区域出现温度差异,利用红外热像仪捕捉这种温度差异,即可判断缺陷的位置与范围^[14]。该方法仅适用于检测增材制造产品内部的大面积缺陷,对微小缺陷的检测灵敏度较低,缺陷的定量分析能力有限。

3 预设缺陷能力建设

为建立科学缺陷评价体系,开展增材制造预设缺陷能力建设研究。基于增材制造换热设备的常见缺陷类型、形态特征及实际生产工艺特点,确保

预设缺陷能够真实模拟实际缺陷的分布与形态,获得预设缺陷尺寸与实际缺陷尺寸关系。

3.1 预设缺陷试块方案

结合核级增材制造换热设备的具体参数,综合评估承压特性和传热性能,一般情况下,通道壁厚取值在1~2 mm左右。依据第2章研究结果,以未熔合作为典型平面缺陷,以气孔作为典型体积缺陷,建立预设缺陷试块。

试块呈圆柱体,直径4 mm,材料为316H不锈钢,采用激光粉末床熔融(L-PBF)工艺制备而成,打印方向为竖直方向,对于未熔合,从上至下预设 $\varnothing 0.7$ mm、 $\varnothing 1.3$ mm作为典型平面缺陷,厚度分别为0.24 mm和0.48 mm;从上至下预设直径0.7 mm、1.0 mm、1.3 mm的气孔作为典型体积缺陷。两类预设缺陷都位于试块内部,导致内部粉末无法被清出,故此类缺陷还可模拟夹杂类缺陷。每种类型的缺陷设3组平行试块,确保试验数据的可靠性。缺陷设置示意如图1所示。



图1 预设缺陷试块方案示意

Fig. 1 Schematic diagram of the predefined defects test block scheme

3.2 预设缺陷无损检测

基于第3章结果,考虑到预设缺陷试块体积较小,为保证得到预设缺陷实际尺寸准确性,采用RT检测X射线-胶片法及X射线-数字射线(DR)对预设缺陷试块实际尺寸进行联合确认。两种方法管电压都为100 kV,管电流都为5 mA。

胶片法检测结果见图2,DR检测结果见图3,两者实际检测结果得较为相似。针对试块的预设未熔合缺陷,厚度方向上预设0.24 mm的缺陷实际无法识别。分析原因为预设缺陷厚度较小,被L-PBF熔深熔透,故无法检测出。厚度方向上预设0.48mm的缺陷可以识别,检测的其余两个未熔合缺陷实际

尺寸从上到下分别为 $\varnothing 0.63$ mm、厚度为0.26 mm； $\varnothing 1.11$ mm，厚度为0.27 mm。

针对试块的预设气孔类缺陷，从上到下缺陷实际尺寸为 $\varnothing 0.50$ mm、 $\varnothing 0.82$ mm、 $\varnothing 1.11$ mm。由检测结果得，由于L-PBF成形工艺限制，气孔类预设缺陷上部无支撑，打印结果较平，气孔类预设缺陷更偏向椭球型。



图2 RT检测结果-胶片法

Fig. 2 RT results of predefined defects by film method



图3 RT检测-DR法

Fig. 3 RT results of predefined defects by DR

3.3 小结

根据试块预设缺陷方案及无损检测的预设缺陷实际尺寸，可获得两者间关系为：采用L-PBF打印工艺，在1~2 mm的尺度下，打印平面的打印收缩量约为0.2 mm。沿竖直打印方向上，无损检测灵敏度阈值可初步判定为0.26 mm，即厚度 ≤ 0.26 mm以下的未熔合缺陷会被熔深熔透而无法检出。

4 结论

本研究聚焦增材制造换热设备无损检测能力建设核心目标，构建了缺陷特征解析—检测方法适配—预设缺陷验证的完整研究路径。首先，研究增

材制造产品平面与体积两大类缺陷的形态及成因，为检测方案设计奠定基础；再通过系统分析VT、PT等表面检测方法，RT、UT、CT等体积检测方法以及AE、IRT等新型技术的适配性，提出传统与新型方法协同使用的检测思路，提升核级设备检测的全面性与精准度。最后，以316H不锈钢为材料，采用L-PBF工艺制备含未熔合、气孔（模拟夹杂）的预设缺陷试块，经RT胶片法与DR联合检测，明确打印收缩量及检测灵敏度阈值，建立预设与实际缺陷的定量关系，为核级增材制造产品无损检测评价方法的落地提供了直接的数据支撑与实操参考。

参考文献：

- [1] 王华明. 增材制造技术变革与高端装备制造创新[C]//2025增材制造产业发展论坛论文集, 2025: 45-52.
- [2] 何勇, 陈雨航, 何雪溢, 等. 核领域增材制造技术的研究进展[J]. 科技视界, 2024, 14(02): 41-46.
HE Y, CHEN Y H, HE X Y, et al. Research Progress of Additive Manufacturing Technology in Nuclear Field [J]. Science & Technology Vision, 2024, 14 (02): 41-46.
- [3] 帅文翰. 金属粉末增材制造中的缺陷形成机制及质量控制策略研究[J]. 中国金属通报, 2025(09): 162-164.
SHUAI W H. Research on Defect Formation Mechanism and Quality Control Strategy in Metal Powder Additive Manufacturing [J]. China Metal Bulletin, 2025 (09): 162-164.
- [4] 吕新峰, 宋辉, 胡娟, 等. 金属增材制造检测技术的应用研究及展望[J]. 电焊机, 2023, 53(10): 1-9.
LV X F, SONG H, HU J, et al. Application Research and Prospect of Metal Additive Manufacturing Detection Technology [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(10): 1-9.
- [5] 周祁杰, 郭丹, 叶志鹏, 等. 国内外增材制造标准建设现状及分析[J]. 电焊机, 2024, 54(04): 1-12.
ZHOU Q J, GUO D, YE Z P, et al. Current Situation and Analysis of Additive Manufacturing Standard Construction at Home and Abroad [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(04): 1-12.
- [6] 徐一飞, 刘福朝, 孙耀宁. 激光增材制造表面完整性理论与控制技术的现状[J]. 材料保护, 2025, 58(05): 1-11.
XU Y F, LIU F C, SUN Y N. Research Status of Sur-

- face Integrity Theory and Control Technology in Laser Additive Manufacturing[J].Materials Protection, 2025, 58(05):1-11.
- [7] 颜江涛,郑雪鹏,石张平,等.金属增材制造检测技术与质量控制研究进展[J].无损检测,2024,46(09):90-100.
YAN J T, ZHENG X P, SHI Z P, et al. Research Progress of Metal Additive Manufacturing Detection Technology and Quality Control[J]. Nondestructive Testing, 2024, 46(09):90-100.
- [8] 石亮,王俊涛,王池权,等.增材制造缺陷检测与评估技术研究进展[J].物理测试,2025,43(01):34-39.
SHI L, WANG J T, WANG C Q, et al. Research Progress of Additive Manufacturing Defect Detection and Evaluation Technology [J]. Physical Testing, 2025, 43(01):34-39.
- [9] 夏卫生,肖阳,张进叶,等.金属增材制造无损检测方法研究进展[J].电焊机,2021,51(08):99-104+180.
XIA W S, XIAO Y, ZHANG J Y, et al. Research Progress of Nondestructive Testing Methods for Metal Additive Manufacturing [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(08):99-104+179-180.
- [10] 季苏苏.金属增材制造表面及亚表面缺陷的高频超声检测技术研究[D].江苏:东南大学,2021.
JI S S. Research on High-Frequency Ultrasonic Detection Technology for Surface and Subsurface Defects in Metal Additive Manufacturing [D]. Jiangsu: Southeast University, 2021.
- [11] 林珊珊,康达,王宏宝,等.增材制造高温合金的相控阵超声检测[J].无损检测,2021,43(04):62-65.
LIN S S, KANG D, WANG H B, et al. Phased Array Ultrasonic Testing of Additive Manufactured Superalloy [J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(04):62-65.
- [12] 苏乾,冒浴沂,高银涛.增材制造316L成形件致密度工业CT定量分析[J].无损检测,2025,47(11):13-21.
SU Q, MAO Y Y, GAO Y T. Quantitative Analysis of Density of Additive Manufactured 316L Formed Parts by Industrial CT [J]. Nondestructive Testing, 2025, 47(11):13-21.
- [13] 张兴武,唐甲锋,谭鲲鹏,等.基于声发射信号的激光粉末床熔融在线监测与内部质量智能判别方法[J].振动工程学报,2025,38(06):1134-1144.
ZHANG X W, TANG J F, TAN K P, et al. On-line Monitoring and Intelligent Internal Quality Discrimination Method of Laser Powder Bed Fusion Based on Acoustic Emission Signals[J]. Journal of Vibration Engineering, 2025, 38(06): 1134-1144.
- [14] 孟杞凤,李卫.3D打印零件缺陷无损检测发展现状[J].网印工业,2025(04):75-77.
MENG Q F, LI W. Current Development Status of Non-destructive Testing for 3D Printed Part Defects [J]. Screen Printing Industry, 2025(04): 75-77.