• 工艺技术 Technology •

DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.004

激光增材制造金属构件内部缺陷控制与无损检测特性研究

张吴双

(沈阳飞机工业(集团)有限公司，辽宁 沈阳 110034)

摘　要：高性能大型金属构件激光增材制造技术，以其突出制造优势为航空航天领域等高端装备中大型复杂关键金属构件的短周期、低成本制造提供了新途径。研究激光增材过程中的内部缺陷是实现激光增材制造金属构件在关键承力结构工程应用的前提。以某钛合金主承力构件激光增材制造为例，总结激光增材制造金属构件中气孔、未熔合、夹杂物和微裂纹 4 种典型内部缺陷的基本特征，分析出 4 种内部缺陷形成的机理，提出了可以有效控制内部缺陷的工艺。此外，介绍了金属增材制造的无损检测特性。

关键词：激光增材制造；大型金属构件；冶金缺陷；气孔；未熔合

中图分类号：TG249　　文献标识码：A　　文章编号：1000-8365(2021)05-0346-04

Study on Internal Defect Control and Nondestructive Testing Characteristics of Metal Components Formed by Laser Additive Manufacturing

ZHANG Wushuang

(Shenyang Aircraft Company, Shenyang110034, China)

Abstract: Laser additive manufacturing technology for high performance large scale metal components provides a new way for short cycle and low cost manufacturing of large complex key metal components in high-end equipment such as aerospace field due to its prominent manufacturing advantages. The research on the internal defects in laser additive manufacturing process is the premise of realizing the application of laser additive manufacturing metal components in key load-bearing structure engineering. Taking laser additive manufacturing of a titanium alloy main load-bearing component as an example, the basic characteristics of four typical internal defects in laser additive manufacturing of metal components, such as porosity, unfusion, inclusion and microcrack, were summarized, the formation mechanism of four internal defects was analyzed, and an effective process to control internal defects was proposed. In addition, the nondestructive testing characteristics of metal additive manufacturing were introduced.

Key words: laser additive manufacturing; large metal components; metallurgical defects; pore; unfused

先进战机、大型飞机、重型运载火箭和高、超音速飞行器等航空航天领域新一代高端装备对高效能、轻量化、低成本等技战术指标要求日益提升，致使其高强钢、高强铝合金、钛合金、高温合金等关键金属构件趋向大型化、整体化、复杂化，对制造技术提出了更高要求。金属构件激光增材制造技术(俗称 3D 打印技术)，以金属粉末 / 丝材为原材料，基于三维零件 CAD 模型切片生成的二维运动轨迹，通过高能束激光熔化 / 凝固逐点逐层沉积，直接实现全致密高性能金属构件的近净成型制造。与传统铸造加后续机械加工制造技术相比，在制备上述高性能金属大型复杂整体关键构件时具有①无需大型铸锻工业设备、成型工艺简单；②材料利用率高、周期短、成本低；③快速凝固组织细小、力学性能优异；④对零件结构尺寸和复杂程度几无限制。激光增材制造技术复杂，大型整体关键金属构件的低成本、短周期制造提供了变个性的技术途径，也为发展大型复杂整体轻量化结构设计新理论和新方法创造提供了巨大的空间。

由于其突出的变革性和颠覆性，高性能金属激光增材制造技术近 20 年一直是国际材料加工工程与先进制造技术学科交叉领域的前沿研究热点方向之一。

激光增材制造关键金属构件内部缺陷控制一直是该技术工程应用需要突破的瓶颈技术之一，长期制约着该技术的应用发展。基于激光增材制造逐点

收稿日期：2021-01-07

作者简介：张吴双(1987—)，满族，辽宁锦州人，工程师. 主要从事产品质量控制方面的工作. 电话：13940340930，Email：782688576@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

扫描熔化、逐线扫描搭接、逐层累积的制造工艺原理金属材料在光粉交互作用、粉末熔化、液态熔池对流、快速凝固的超常冶金过程中经历复杂的热力学和动力学过程，其内部质量易受粉末原材料、激光增材工艺参数和外部环境等诸多因素影响，导致缺陷的产生，最终影响构件使用性能。

本文作者综合国内外相关研究报道，总结了激光增材制造大型钛合金构件内部缺陷的主要类型、形成原因，并简要分析了内部冶金缺陷的无损检测特性。

1　内部冶金缺陷的基本特征

综合大量国内外研究报道，在高功率激光束长期循环往复逐点扫描熔化–逐线扫描搭接 - 逐层凝固堆积的大型金属构件激光熔化沉积增材制造过程中，主要存在未融合、气孔、夹杂物和微裂纹 4 种典型的内部缺陷，4 种缺陷的基本特征如下。

(1)气孔　如图 1(a)(b)，气孔缺陷三维形貌一般为球形形貌，内部较为光滑，气孔直径尺寸大约为 20~300μ m。气孔缺陷在试样中的一般孤立存在，分布位置较为随机，与成形的相邻层之间和相邻道之间没有明显的关系。

(2)未熔合　如图 1(c)(d)：与气孔明显不同，未熔合缺陷的截面形貌为带有尖角的无规则多边形，具有扁平状近二维几何特征，尺寸大约为几百微米到几毫米，未熔合缺陷经常呈现出连续分布的特征。未熔合缺陷在试样中分布位置一般为相邻两层界面处或者相邻两道的搭接处，与其成形过程的成形工艺有密切关系。

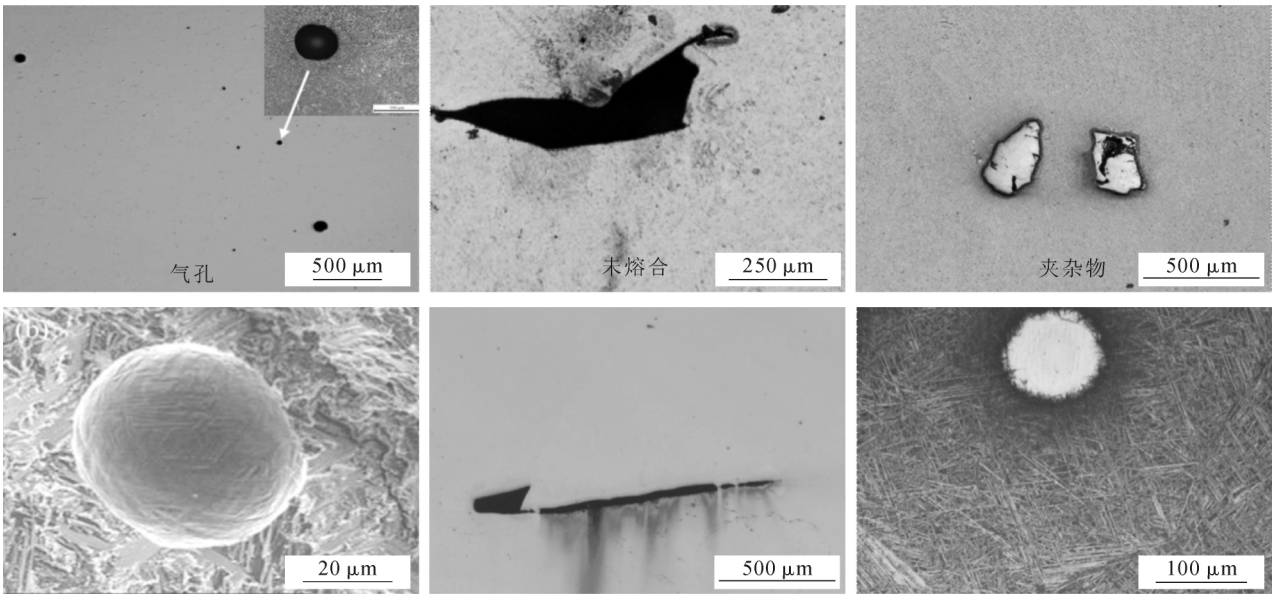
(3)夹杂物　如图 1(e)(f)：一般为高熔点难熔金属(W，Mo 等)或者高熔点难熔氧化物夹杂，截面一般为圆形或不规则块状。夹杂物缺陷在试样中分布位置相对随机。

(4)微裂纹　激光增材制造金属构件的微裂纹通常为凝固裂纹或热裂纹，微裂纹主要出现在沿着增材制造增高方向外延生长的相邻柱状晶晶界处或树状晶间区域，微裂纹截面二维形貌一般为狭长的线状，裂纹长度范围为几十微米到几毫米。

2　内部缺陷的形成机理浅析

在高功率激光束长期循环往复逐点扫描熔化–逐线扫描搭接–逐层凝固堆积的大型金属构件激光熔化沉积增材制造过程中，粉末状态、成形工艺参数、保护气氛、熔池熔体状态的波动和变化、扫描填充轨迹的变换等影响因素，都可能在零件内部沉积层与沉积层之间、沉积层与沉积道之间、沉积道与沉积道之间、单一沉积层内部等局部区域产生各种特殊的内部冶金缺陷(如未熔合、气孔、夹杂物、热裂纹 / 凝固裂纹等）并影响最终成形零件的内部质量、力学性能和构件的服役使用安全。4 种冶金缺陷的形成过程如图 2。

激光增材制造移动熔池在非平衡快速凝固过程中气体来不及溢出形成气孔，此外气体在高温液态熔池内部溶解度较高，随着熔池的冷却温度降低，溶解度较小增加了气体残留的可能。研究者关于高温移动熔池液态中的气体来源尚无明确结论，主要包



(a)(b)气孔　　(c)(d)未融合　　(e)(f)夹杂物

图 1　激光增材制造钛合金构件典型内部冶金缺陷

Fig.1　Typical internal metallurgical defects of titanium alloy components by laser additive manufacturing

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

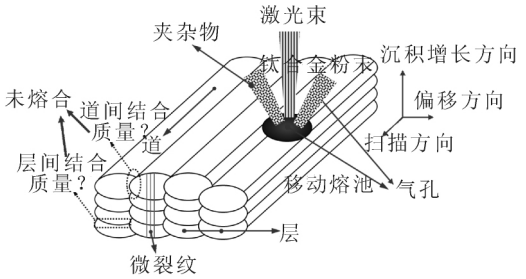


图 2 激光增材制造金属构件内部冶金缺陷形成过程示意图
Fig.2 Schematic formation process of metallurgical defect in metal components by laser additive manufacturing

括以下几种可能。

(1)金属粉末原材料的空心粉末,粉末经强对流作用卷入熔池内部熔化时气体直接溶于液态熔池中,如图 3。

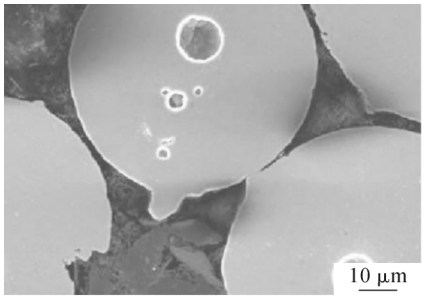


图 3 钛合金粉末空心粉典型照片
Fig.3 Typical titanium alloy hollow powder

(2)同轴输入惰性气氛或成形腔环境中惰性保护气氛在接触到熔池表面后被强对流的熔池卷入。

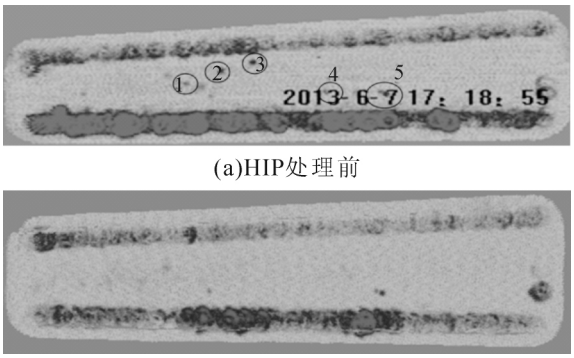
(3)一些低熔点的金属元素挥发形成金属蒸汽。

(4)水蒸气等形成的氢气孔,这一点目前学者公认为铝合金中气孔缺陷的主要来源。

未熔合的冶金缺陷的形成过程较为简单,与焊接熔合不良缺陷的形成十分相似,在激光增材制造金属构件逐点扫描熔化–逐线扫描搭接–逐层凝固堆积扫描过程中,前一沉积层表面经常出现凸起、粘结粉末、熔体卷边等特征,高温移动熔池未能将前一沉积层或相邻沉积道充分重熔而形成了局部熔合不良,正因如此未熔合缺陷经常呈现出连续分布的特征。

夹杂物缺陷一般是由于金属粉末原材料或者外部环境污染熔池等因素导致高熔点难熔的合金元素或氧化物颗粒进入到熔池中无法熔化,凝固形成了夹杂物缺陷,通过严格控制粉末质量和成形环境可以完全消除难熔夹杂物缺陷。而微裂纹缺陷是在激光增材制造快速凝固中,最后凝固的糊状区在凝固收缩应力和热应力作用下被拉开凝固的凝固裂纹 / 热裂纹。因此合金的化学成分对激光增材制造金属构件的微裂纹影响很大,高强铝合金、镍基高温合金等合金化程度高、凝固温度区间大的合金形成微裂纹的倾向较大,而常见的 TC4 等近 α、$\alpha+\beta$ 型钛合金一般不会出现凝固裂纹。

因此激光对增材制造金属构件,后续进行热等静压处理也可在一定程度上降低气孔和未熔合冶金缺陷数量和尺寸。被加工件在高温、高压的共同作用下,各向均衡受压导致发生高温蠕变和塑性变形等作用使得内部冶金缺陷尺寸减小甚至消失,从而提高构件的致密度和均匀性,如图 4。



(a)HIP处理前

(b)HIP处理后

图 4 热等静压对激光增材制造 TC4 钛合金内部冶金缺陷的影响
Fig.4 Effect of HIP on internal metallurgical defects of TC4 titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing

3 内部缺陷的无损检测特性

激光增材制造金属构件的显微组织以及内部缺陷特点均不同于传统铸造 / 锻造组织,其在射线、超声等外加能场中的无损检测特性也会有所不同,因此需要研究专门针对激光增材制造金属构件的无损检测工艺。目前,激光增材制造金属构件的无损检测技术主要包括超声检测、射线检测和荧光检测。

激光增材制造钛合金构件的超声无损检测信噪比极低甚至优于传统锻件,可检性强,这可能与其小熔池冶金、快速凝固成形的超细均匀显微组织有关。如图 5 所示,激光增材制造 TA15 钛合金构件的超声无损检测信噪比大于 ϕ0.8~18.0db,可检测大于 ϕ0.8~12.0db 的缺陷,可检性非常优异。

激光增材制造金属构件的未熔合缺陷缺陷对 X 射线比较敏感,可见性良好,但零件厚度过大时,X 射线检测的分辨率降低、不宜采用该方法检验。荧光检测对激光增材制造金属构件与锻件并无明显差别,未熔合缺陷、气孔、微裂纹等内部冶金缺陷若露出表面均能很好地在荧光检验中显示,可探测性好、探测灵敏度较高(可显示出 0.1 mm 细小缺陷)。因此,总体而言激光增材制造金属构件的无损检测可

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

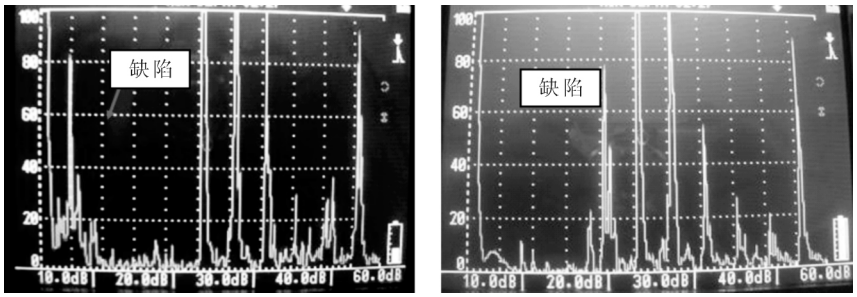


图 5　激光增材制造钛合金构件的超声无损检测信号图

Fig.5　Ultrasonic nondestructive testing signal diagram of titanium alloy components

检性良好。

4　结语

讨论了激光增材制造关键金属构件的内部缺陷问题，总结了激光增材制造金属构件中主要存在气孔、未熔合、夹杂物和微裂纹四种类型并对其基本特征进行了分析；分析了 4 种冶金缺陷的形成机理，介绍了激光增材制造关键金属构件的无损检测特性，内部缺陷的可检性良好。

参考文献：

[1]　张讯，葛建彪. 激光成形技术在飞机大型钛合金部件上的制造应用[J]. 应用激光，2018，38(2):202-206.

[2]　巩水利，锁红波，李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术，2013(13):66-71.

[3]　王华明，张述泉，王韬，朱言言. 激光增材制造高性能大型钛合金构件凝固晶粒形态及显微组织控制研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版)，2018，37(4):9-14.

[4]　林鑫，黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学:信息科学，2015，45(9):1111-1126.

[5]　李永涛. 钛合金激光增材制造缺陷研究 [D]. 大连：大连理工大学，2017.

[6]　任慧娇，周冠男，从保强. 增材制造技术在航空航天金属构件领域的发展及应用[J]. 航空制造技术，2020，63(10):72-77.

2021年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，中文核心期刊，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，被20余家数据库收录。中国标准连续出版物号：ISSN1000-8365/CN 61-1134/TG，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、实用工艺技术、生产管理经验以及铸造行业发展动态。内容涵盖铸造成型工艺和铸造材料研究，并兼顾其他金属材料成型方法。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、装备技术、特种铸造、实用成型技术、材料改性、应力控制与理化测试技术、今日铸造、企业精英人物专访等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造设备、熔炼设备、环保设备、铸造原辅材料、检测仪器以及铸件生产、热处理设备、科研成果转让等相关信息。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价25元，平寄全年300元（含邮费），挂号全年336元，快递全年420元。

海外：每期定价25美元，全年300美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

邮购地址：西安市金花南路5号西安理工大学608信箱（710048）

联系人：李巧凤　　电话/传真：13991824906

网址：www.zhuzaojishu.net　　Email：zzjs@263.net.cn

微信扫一扫 信息快知道

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net