

doi: 10.7690/bgzdh.2026.03.005

金属增材制造技术在武器装备维修中的应用

黎小辉¹, 伍铭佳¹, 陈丽杰²

(1. 佛山大学机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528255;

2. 中集海洋工程有限公司绿氢研究院, 广东 深圳 518000)

摘要: 为提高装备可靠性和服役寿命, 对增材制造技术在军事装备关键部件修复领域的应用进行研究。分析选区激光熔化 (selective laser melting, SLM)、电子束熔化 (electron beam melting, EBM)、激光熔融沉积 (laser melting deposition, LMD) 等增材制造技术, 介绍不同的增材制造工艺及其在不同零件修复场景中的应用实例。结果表明: 增材制造技术不仅能有效修复和强化军事装备的关键部件, 而且通过优化工艺参数, 显著提升装备的机械性能和服役可靠性, 为军事装备的维护和升级提供支持, 具有广阔的应用前景。

关键词: 金属材料; 增材制造; 武器装备修复; 强化关键部件

中图分类号: TJ59 **文献标志码:** A

Application of Metal Additive Manufacturing Technology in Weapon Equipment Maintenance

Li Xiaohui¹, Wu Mingjia¹, Chen Lijie²

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528255, China;

2. Green Hydrogen Research Institute of CIMC Offshore Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: In order to improve the reliability and service life of military equipment, the application of additive manufacturing technology in the repair of key components of military equipment was studied. Additive manufacturing technologies such as selective laser melting (SLM), electron beam melting (EBM) and laser melting deposition are analyzed, and different additive manufacturing processes and their application examples in different parts repair scenarios are introduced. The results show that additive manufacturing technology can not only effectively repair and strengthen key components of military equipment, but also significantly improve the mechanical performance and service reliability of equipment by optimizing process parameters. It provides support for the maintenance and upgrading of military equipment, and has broad application prospects.

Keywords: metal materials; additive manufacturing; weapon equipment repair; strengthening key components

0 引言

军事装备领域中, 航空发动机、舰艇火炮、坦克装甲等核心装备在服役过程中常因关键部件遭受断裂、磨损和腐蚀等损伤而失去价值。特别是火炮身管和航空发动机叶片等装备, 其生产制造依赖于特种材料和特殊工艺, 这使得其经济与时间成本都相对较高。一旦这些装备在服役过程中受损, 将造成巨大的损失, 因此, 开展有效的修复工作尤为重要。从经济角度来看, 对武器装备进行修复能够大幅降低因更换新部件而产生的费用, 显著节省军费开支。同时, 修复工作还有助于减少同类装备的现场储存量, 提高武器装备的在岗数量和完好率。这不仅提高了武器装备的使用效率, 而且确保能够快速恢复战斗力, 进而延长武器装备的使用寿命。同

时, 原位修复还能降低后勤补给需求, 进一步提高武器装备的在役时间。综上所述, 武器装备的修复在提升装备经济性、使用效率及延长使用寿命等方面具有重要意义, 并展现出巨大的应用潜力。

金属增材制造技术无需模具、减少制造工序、缩短制造周期, 能够实现复杂构件的轻量化、结构一体化设计和制造, 满足武器装备对高性能、高精度零部件的需求, 为武器装备的制造和修复提供了新方法。各国政府通过政策引导、资金支持等措施, 积极推动增材制造技术在武器装备领域的应用和发展。工信部等部门联合印发了《增材制造产业发展行动计划(2017—2020年)》, 明确提出了增材制造产业的发展目标, 详细阐述了重点任务和保障措施, 并着重强调了军民协同、开放合作的重要性。

收稿日期: 2024-11-08; 修回日期: 2024-12-08

基金项目: 广东省自然资源厅科技计划项目

第一作者: 黎小辉(1982—), 男, 湖南人, 博士

通信作者: 陈丽杰(1983—), 女, 内蒙古人, 博士。

美国国防部也发布了《增材制造技术路线图》等一系列战略规划,详细阐述了增材制造技术在国防领域的发展目标和路径,旨在提升增材制造技术的成熟度。覆盖从零件制造、维修到快速创新与逆向工程应用,再到作战单位及前线基地快速制造零件、新部件和系统的制造与构建等广泛应用场景。基于此,笔者将增材制造技术应用到军事装备关键部件修复领域。

1 增材制造技术

增材制造技术通过熔化材料并逐层堆积的方式,依据设计图纸直接生产工件,具有加工速度快、材料浪费少、环境污染轻等优势,是一种先进且绿色的生产制造及再制造方式^[1]。增材制造直接将粉材或预置的丝材熔化后一层一层地堆积起来形成工件,其近净成型的特性使得它能够直接制造出目标工件的形状,无需过多后续处理即可直接使用。2016年,中国广核集团有限公司采用粉末床熔融(powder bed fusion, PBF)技术打印 316L 不锈钢,成功制造了核电站复杂流道仪表阀的多通道阀体^[2],表面性能优异,表面粗糙度达到 $3.2\ \mu\text{m}$ 且无明显缺陷,其化学成分和基本力学性能均满足国际核电标准 RCC-M 的要求。金属材料的增材制造技术主要可分为 PBF 和直接能量沉积(direct energy deposition, DED) 2 大类。

1.1 选区激光熔化

选区激光熔化(SLM)是在选区激光烧结(selective laser sintering, SLS)技术的基础上发展起来的一种 PBF 增材制造技术。SLM 技术的工作原理是利用高能激光束选择性地熔化金属粉末,通过逐层堆积的方式构建出 3 维实体零件。该技术采用粉床形式进行近净成型加工,激光照射粉床使金属粉末熔化并凝固,形成单层堆积。随后,粉床下降至形成层单层的高度,粉床两侧的补粉滚轴平移至粉床上方以补充金属粉末,然后激光继续加工以完成一个完整的加工周期。加工完成后吹去未熔化的粉末,即可得到所需零件。

特别地,计算机辅助设计(CAD)系统能够基于数据建模,将模型切片分割成一系列界面并自动规划加工路线。通过激光对金属粉末的选择性照射,使其熔化并粘结形成单层截面,随后逐层堆积,最终完成工件的制造。这一过程显著简化了加工流程,降低了硬件损耗^[3];因此,在批量制造小尺寸复杂

零件方面,SLM 技术相比传统制造方式具有显著优势^[4]。与铸件相比,SLM 制造的零件通常展现出更好的机械性能、摩擦性能和耐腐蚀性能^[5]。

1.2 电子束熔化

电子束熔化(EBM)技术与 SLM 技术相似,均属于 PBF 技术范畴。在 EBM 加工过程中,粉末材料在加工台上被高能电子束熔化并逐层堆积,形成工件。该技术采用高能电子束作为能量源,特别适合加工脆性金属材料。加工在真空环境中进行,可以防止材料氧化和电子束偏转。与 SLM 技术相比,EBM 能有效降低工件内应力,减少开裂倾向,并提高层间结合强度。Li 等^[6]采用逐点逐层的沉积方法,在 EBM 过程中建立了独特的热循环,制造了具有微梯度结构晶粒尺寸的高强度和韧性的高速钢,其抗拉强度可达 $1\ 479\ \text{MPa}$ 。

与其他加工热源相比,电子束能更深入地穿透粉末颗粒,其穿透深度取决于材料的原子序数和电子的速度,约为 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ ^[7],而激光束的穿透深度仅为几十纳米,这使得 EBM 加工过程中材料表面温度相对较高,并伴随有强烈的蒸发现象^[8];因此,EBM 不仅有着更高的能源利用率,且制造过程中由于材料表面无反射,进一步减小了能量损失。EBM 的技术优势包括快速控制光束位置、高能量吸收率、低氧化和低污染风险、原位热处理能力,以及由于高预热温度而导致的低热应力和变形。这些优势使 EBM 成为增材制造技术中极具潜力的一种,特别适用于高生产率的全致密金属物体的近净成形制造^[9]。

1.3 激光熔融沉积

激光熔融沉积(LMD)属于 DED 的一种,结合了 SLM 与激光熔覆(laser cladding, LC)的优势。该技术能够根据不同的性能要求和复杂形状表面进行灵活的工艺参数调整,实现精准加工。与 SLM 和 EBM 相比,LMD 不依赖于能量束的轨迹控制,而是通过移动加工机构来完成增材制造。此外,LMD 在材料输送和保护气体设置上也有所不同,这些差异赋予了 LMD 在应用范围、打印精度、成型效率和材料适应性等方面的独特优势。它对沉积层的微观结构、成分、物理尺寸、力学性能和服役性能等关键性能参数的影响较为明确,使得在实际应用中易于控制,从而轻松获得满足目标要求的加工效果^[10]。

在 LMD 加工过程中,激光作用于材料表面形

成熔池。通过向熔池内吹入粉末或预先置入丝材，这些材料熔化并凝固在材料表面形成熔覆层，用于修复或强化。相较于 PBF 技术，LMD 不受粉床限制，适合制造大型工件。其集成的激光振荡器和粉末给料器提供了灵活的 3 维制造能力，能够直接在复杂曲面上制备强化层或进行缺陷修复，特别适用于对零部件缺陷进行修复及特定性能强化层的制备。

2 增材制造技术在武器装备维修中的应用

在武器装备领域，增材制造技术主要用于生产制造过程^[11]。例如，Coltelli 等^[12]使用增材制造技术制造了水下机器人的外骨骼及肌肉结构，以提升其机动性和耐久性。Minsu 等^[13]则通过增材制造技术制造了枪支及其零件，有效减轻了后勤支持的负担。近年来，由于其快速制造能力、精确控制服役性能以及对成型面形状限制较小的优势，增材制造技术开始被用于关键部件的修复。Brandt 等^[14]使用 LMD 对汽轮机的低压涡轮叶片进行了原位修复，如图 1 所示，标志着增材制造技术在涡轮叶片修复领域的商业化开端。



图 1 LMD 修复涡轮叶片^[14]

PBF 技术在制造中具有中高复杂度几何特征，其在小批量替换零件方面展现出显著优势。在航空领域，采用 EBM 生产航空发动机零件已成为一种充满潜力的制造方法。与此同时，直接能量沉积技术源自传统焊接技术，最初设计用于连接、熔化、涂覆和修复，特别适合对局部区域进行针对性的修复和改性处理。这些技术已经与 CAD 软件无缝集成，并越来越多地与在线视觉系统、计量检测系统和参数设计系统等系统集成，促进了增材制造技术的快速发展。随着军事技术发展、武器成本和制造周期上升，核心零部件损伤限制战术灵活性，因此，增材制造技术维修极具战略价值。

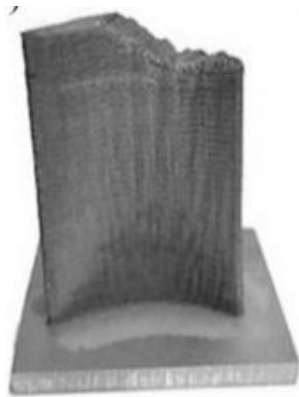
2.1 关键部件修复

与传统修复技术相比，利用增材制造技术进行原位修复在提高材料利用率、延长全生命周期、提升修复层冶金结合质量等方面有着显著优势。特别地，LMD 在结构件和整体机构的修复方面取得了突破性进展，美国海军水下作战中心与宾夕法尼亚州立大学应用研究实验室及海军 MANTECH 计划小组合作，开发了一种专门针对铝制部件的激光熔覆修复技术。该技术已成功应用于鱼雷壳体、鱼雷发动机缸体和潜艇垂直发射系统导弹发射管等关键部件的修复^[15]，证明了其在实际应用中的高效性与可靠性。Bergan 等^[16]进一步拓展了 LMD 的应用范围，成功修复了受损的海军铝制武器部件，如鱼雷弹、靶弹和鱼雷发动机气缸筒。

在部件修复领域，增材制造技术因其在保持修复部件形状一致性、机械性能和微观结构方面的独特优势而受到重视。特别是，基于 PBF 技术的 SLM 和 EBM 等先进制造方法，为构件再制造提供了强大的能力，确保了卓越的界面粘接、足够的机械性能和无缺陷修复。Tao 等^[17]创造性地应用 EBM 技术修复镍基航空发动机叶片，针对不同程度的损伤和复杂形貌特征区域，成功制造出单晶修复层，有效解决了单晶镍基高温合金因“不可焊接”特性导致的修复难题，展现了增材制造技术在高难度材料修复中的潜力。Nowotny 等^[18]对受火药烧蚀和弹丸挤压变形的枪管进行了 LMD 损伤修复，在 CoCrMo 材质的枪管内壁精确沉积了 TiC 涂层，以恢复枪管的服役性能。利用 TiC 的耐蚀性和与钴合金良好焊接性能及韧性，显著提高了枪管内壁的抗侵蚀、冲击、疲劳和抗烧蚀的能力。Wilson 等^[19]使用激光直接沉积 (laser direct deposition, LDD) 技术修复燃气轮机叶片，如图 2 所示，修复后的叶片与原始叶片的几何形状相匹配，平均精度达到了 0.030 mm。



(a) 通过 DED 工艺生产的涡轮叶片



(b) 损坏的涡轮叶片



(c) 通过 DED 修复的叶片^[19]

图 2 LDD 修复燃气轮机叶片

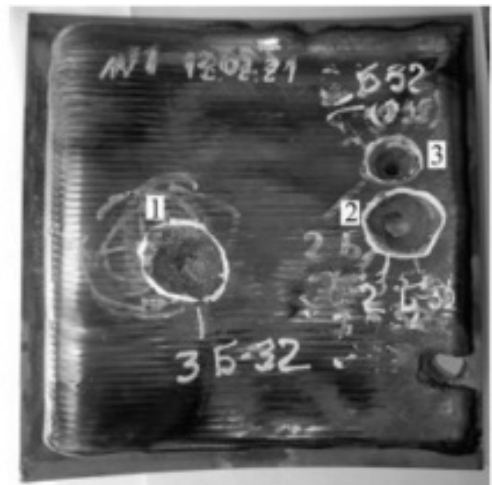
机械测试结果表明：LDD 修复的 Inconel 625 高温合金样品不仅展现了优异的延展性，而且在强度上也表现出色，证明了 LDD 技术在高温合金部件修复中的高效性与可靠性。

2.2 部件的局部改性

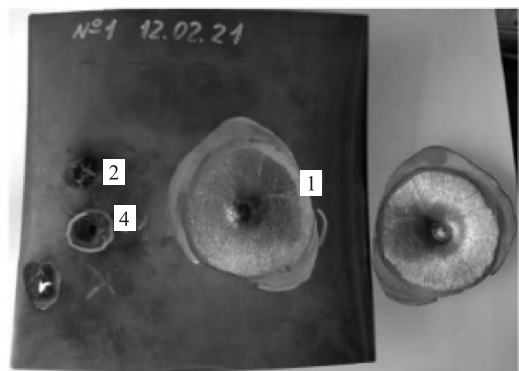
为了降低装备更换成本和时间，对关键服役部件进行局部改性是关键。传统升级策略通常聚焦于对通用装备进行定制化调整，通过加强关键性能指标或薄弱环节，以平衡作战使用和换装期间的战斗力^[20]。新装备实装后，需要较长时间进行装备部件的磨合、装备间配合和人员训练。通过改性关键部件，可以加速这一进程，使部队更快形成战斗力^[21]。以复合层装甲为例，增材制造技术的应用提高了结构的致密度与固结度，有效解决了传统层压金属装甲的分层与脱粘问题^[22]。Rahmani 等^[23]将 SLM 与电火花放电等离子烧结 (spark plasma sintering, SPS) 技术相结合，开发出具有抗冲击与穿甲能力的复合材料层压板。这些材料在弹丸穿透实验中表现出了优异的穿透阻力和屈服强度，不仅证明了局部改性策略的有效性，而且揭示了其在快速适应不同作战环境方面的潜力。这种强化方法通过改变装甲表面

性能，不影响其装具模式，缩短了更换防护装甲的时间，只需在原有装甲上根据服役要求添加相应的强化层。

在对不同材料表面进行增材制造改性时，可以极大缩短武器装备的研发和装具进程。通过针对不同任务需求进行模块化设计和改装，可以精确地制造并替换关键部件，实现武器装备性能的定向提升。Zhou 等^[24]利用激光增材制造 (laser additive manufacturing, LAM) 技术开发了一种液相烧结技术，成功制备出大尺寸钨合金，解决了穿甲弹制造中钨与基体结合力不足的难题。他们制备的致密强化层，其屈服强度和抗拉强度分别达到 1 031 和 1 374 MPa。Markovsky 等^[25]通过增材制造技术在 Ti-6Al-4V 装甲表面制备了复合结构，结合了柔软的 CP-Ti 与 Ti-6Al-4V 特性，形成了具有高硬度表面和高延展性夹层的复合装甲板。这种设计在抵御穿甲燃烧弹时表现出优异的抗弹道性能和韧性如图 3 所示，有效减少了弹道穿透深度，并抑制了装甲开裂倾向。



(a) 装甲板正面



(b) 装甲板背面^[25]

图 3 弹道试验后的 Ti-6Al-4V 板总体视图

Costas 等^[26]使用 SLM 技术，成功制造出马氏

体时效钢装甲板，这不仅实现了复杂几何形状的精确成型，而且显著增强了装甲的防弹效能和减轻了重量。在防御穿甲弹攻击时，其韧性与延展性的损失较低，提供了卓越的防护效果。Kristoffersen 等^[27]采用增材制造技术制备了 AlSi10Mg 铝装甲板，并运用有限元分析比较了其抗弹道穿透能力与常规工艺制造的马氏体时效钢压铸板性能差异。分析显示，增材制造的灵活性与定制化为装甲设计的进一步优化提供了广阔空间。Szachogłuchowicz 等^[28]使用选区激光熔化制造 M300 马氏体时效钢装甲，并经过 820 °C 的固溶退火处理，有效提升了装甲的冲击韧性和拉伸强度。在弹丸穿透测试中，该装甲表现出极高的硬度与优异的防护性能。

3 结束语

增材制造技术在军事装备领域的应用标志着一场革命性的变革，以其独有的灵活性与高效性，逐步成为军事领域不可或缺的一部分。

1) 基于不同的形状尺寸、工艺要求和机械性能，选择合适的增材制造工艺，可以有效修复金属零件的缺陷，从而延长武器装备的使用寿命。无论是批量生产零部件还是损伤修复，增材制造都能根据缺陷情况进行修复，使武器装备或系统恢复服役能力。

2) SLM、EBM 和 LMD 技术各有特点，适用于不同的制造和修复场景。SLM 和 EBM 作为 PBF 技术的代表，在小批量生产、复杂构件方面具有优势，适合补充易损件与消耗件。而 LMD 作为 DED 技术的代表，擅长于大型、复杂自由曲面的修复，因此在实际工作中应根据具体情况和需求选择合适的工艺。

参考文献：

- [1] HE S, GUO S, XU Y. Anisotropic stress rupture properties-microstructure relationships in SLM Inconel 718 alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2023, 54(5): 1776-1791.
- [2] AZIZ N A, ADNAN N A A, WAHAB D A, et al. Component design optimisation based on artificial intelligence[J]. Cleaner Production, 2021, 296: 126401.
- [3] 杨青峰, 高士鑫, 陈平, 等. 核电用 316L 不锈钢粉末增材制造研究现状[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 209-219.
- [4] BRACKETT D, ASHCROFT I, HAGUE R. Topology optimization for additive manufacturing[J]. Materials & Design, 2011, 32(8): 4248-4255.
- [5] ANDERSSON O, GRAICHEN A, BRODIN H, et al. Developing additive manufacturing technology for burner repair[J]. Engineering for Gas Turbines and Power, 2017, 139(3): 031506.
- [6] LI Y, WANG Y, LIU S, et al. Improvement of mechanical property of M2 high-speed steel with hetero-microstructure tailored via electron beam melting[J]. Materials Science and Engineering, 2024, 895: 146209.
- [7] KLASSEN A. Simulation of evaporation phenomena in selective electron beam melting[M]. Boca Raton: FAU University Press, 2018.
- [8] KLASSEN A, BAUEREIB A, KÖRNER C. Modelling of electron beam absorption in complex geometries[J]. Applied Physics, 2014, 47(6): 065307.
- [9] FU Z, KÖRNER C. Actual state-of-the-art of electron beam powder bed fusion[J]. Materials, 2022, 2(1): 54-116.
- [10] 彭浩, 高椿明, 张萍, 等. 激光选区熔化熔池视频监控与评价[J]. 兵工自动化, 2022, 41(3): 63-67+73.
- [11] 杜永强, 王磊, 郑坚. 4D 打印技术在舰炮武器装备维修保障中的应用[J]. 兵工自动化, 2024, 43(2): 7-10.
- [12] COLTELLI M A, CATTERLIN J, SCHERER A, et al. Simulations of 3D-Printable biomimetic artificial muscles based on microfluidic microcapacitors[J]. Sensors and Actuators, 2021, 325: 112700.
- [13] MINSU K, SOOCHAN K, AHN N. Study of rifle maintenance and parts supply via 3D printing technology during wartime[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 39: 1510-1516.
- [14] BRANDT M, SUN S, ALAM N, et al. Laser cladding repair of turbine blades in power plants[J]. International Heat Treatment and Surface Engineering, 2009, 3(3): 105-114.
- [15] 岳灿甫, 吴始栋. 激光熔覆及其在水中兵器修复上的应用[J]. 鱼雷技术, 2007(1): 1-5.
- [16] BERGAN P. Implementation of laser repair processes for navy aluminum components[C]//Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortages Conference. Ponte Vedra Beach, Florida, NASA, 2000.
- [17] TAO S, GAO R, PENG H, et al. High-reliability repair of single-crystal Ni-base superalloy by selective electron beam melting[J]. Materials & Design, 2022, 224: 111421.
- [18] NOWOTNY S, SPATZIER J, KUBISCH F, et al. Repair of erosion defects in gun barrels by direct laser deposition[J]. thermal spray technology, 2012, 21: 1173-1183.
- [19] WILSON J M, PIYA C, SHIN Y C, et al. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis[J]. Cleaner Production, 2014, 80: 170-178.
- [20] 张春, 雷红飞, 邢士勇, 等. 关于现役高炮武器系统升级改造的思考[J]. 火炮发射与控制学报, 2021, 42(4): 97-100.