

激光增材修复技术在发动机修复中的应用综述： 现状、挑战与展望

张财伟¹, 曹家洛², 刘士伟³, 侯星宇¹, 曹楠¹, 赵宇辉^{4, 5}, 汤广全¹

1. 中国科学院金属研究所 辽宁沈阳 110016
2. 中国人民解放军93156部队 辽宁沈阳 110010
3. 空装驻辽阳地区军事代表室 辽宁沈阳 110010
4. 中国科学院沈阳自动化研究所 辽宁沈阳 110016
5. 广州工业智能研究院 广东广州 511458

摘要：发动机作为机械设备关键核心部件，其性能、可靠性和使用寿命受到广泛关注。激光增材修复技术以其高精度、低热输入和操作灵活等显著特点，在发动机修复领域展现出巨大的应用潜力和价值。介绍激光增材修复技术在发动机不同部件（如叶片、燃烧室、缸体）中的应用现状、技术特点、研究成果，以及面临的挑战和未来发展趋势。特别关注了修复工艺优化、材料适配性、质量控制与标准化等关键问题，并探讨了智能化、环保化等未来发展方向。

关键词：激光增材修复；发动机修复；高精度修复；可靠性

A review of laser additive repair technology in engine restoration: current status, challenges and perspectives

ZHANG Caiwei¹, CAO Jiaming², LIU Shiwei³, HOU Xingyu¹, CAO Nan¹, ZHAO Yuhui^{4, 5}, TANG Guangquan¹

1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China
2. Chinese People's Liberation Army Unit 93156, Shenyang 110010, Liaoning, China
3. Office of the Airborne Military Representative in Liaoyang Region, Shenyang 110010, Liaoning, China
4. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, Liaoning, China
5. Guangzhou Industrial Intelligence Research Institute, Guangzhou 511458, Guangdong, China

Abstract: As a key core component of machinery and equipment, the performance, reliability and service life of the engine have been widely concerned. Laser additive repair technology, with its remarkable features such as high precision, low heat input and flexible operation, shows great application potential and value in the field of engine repair. This paper reviews the current status of the application of laser additive repair technology in different engine components (e.g., blades, combustion chambers, cylinder blocks), technical characteristics, research results, as well as the challenges and future development trends. Special attention is paid to key issues such as repair process

基金项目：广东省重点领域研发计划项目（2023B0909020002）。

作者简介：张财伟，硕士，工程师，主要从事向增材制造与修复工艺技术研究，E-mail: zhangcaiwei1018@163.com。

通信作者：赵宇辉，研究员，主要从事金属零件激光增材制造及修复等方面的研究工作，E-mail: yhzhaos@sina.cn。

汤广全，助理研究员，主要从事增材修复粉末制备方面的工作，E-mail: gqtang@imr.ac.cn。

optimization, material suitability, quality control and standardization, and future development directions such as intelligence and environmental protection are discussed.

Keywords: laser additive repair; engine repair; high-precision; reliability

1 序言

发动机作为机械设备的关键部件,其性能、可靠性和耐久性日益受到重视。在航空航天、汽车制造、船舶运输等多个关键领域,发动机的高效稳定运行对于整个系统的安全性和经济效益具有决定性影响^[1]。然而,发动机在长期运行过程中,经常面临高温、高压、腐蚀及磨损等恶劣工况,这些条件极易导致零部件损伤和失效,例如叶片裂纹、磨损,涡轮盘的热疲劳损伤,以及燃烧室的烧蚀等问题^[2]。这些故障不仅会削弱发动机的性能,还有可能触发严重的安全事故,同时造成维修成本的增加和资源的浪费^[3]。

激光增材修复技术应运而生并得到了广泛的研究与应用。与传统修复方法相比,激光增材修复技术具有明显的优势^[4]。首先,其能够实现高精度的修复,确保修复区和基体之间能够形成良好的冶金结合,确保修复区的力学性能和微观结构与基体相匹配,能够恢复甚至超过原零部件的性能;其次,由于其低热输入特性,对基体的热影响明显降低,从而降低残余应力和热变形的产生,这对于尺寸精度和材料性能要求极高的发动机关键零部件的修复尤为重要;此外,激光增材修复技术还以其高灵活性、能够修复复杂形状的零部件、缩短修复周期等优势,满足了现代发动机对快速、高效、高质量修复的需求^[5, 6]。

在发动机领域,激光增材修复技术在实际工程中具有十分重要的意义。一方面,这项技术极大

地提升了发动机维修的效率和质量,降低维修成本并缩短设备停机的时间,同时提高了零部件的可靠性。另一方面,通过修复和再利用受损的零部件,减少了对新零部件制造的需求和材料消耗,这既符合可持续发展的理念,同时能够节约资源、保护环境^[7, 8]。因此,深入研究激光增材修复技术在发动机维修领域的应用,对于促进发动机制造与维修技术的革新具有重要意义,同时对提高我国装备制造业的竞争力具有重要的战略价值。

本文旨在全面、系统地梳理激光增材修复技术在发动机修复领域的应用现状、技术特点、研究成果以及面临的挑战和未来发展趋势,为相关领域的科研人员、工程师和决策者提供详细的参考资料,促进激光增材修复技术在发动机修复中的进一步推广与应用,推动发动机再制造产业的发展。

2 激光增材修复在发动机不同部件中的应用

2.1 发动机叶片修复

航空发动机叶片的工作环境十分恶劣,包括高压、高温以及燃气的冲刷,这些因素共同作用导致叶片极易遭受多种损伤,如图1所示。以某发动机叶片为例,在长期服役后,叶片前缘和叶尖部位出现了较为严重的磨损,磨损量达到了0.5~1mm,同时在叶片根部发现了一些细小裂纹,裂纹长度在2~5mm,这些损伤对叶片的强度和性能产生巨大影响,致使降低发动机的使用效率和可靠性^[9]。

沈阳发动机设计研究所与沈阳黎明航空发动机有限公司合作,采用激光增材修复技术对某发动

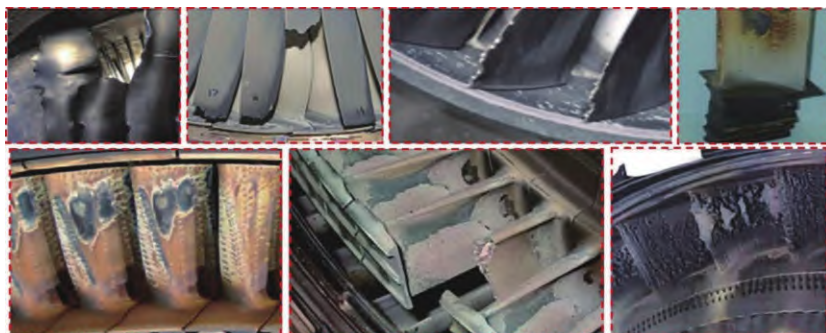


图1 航空发动机涡轮叶片损伤形式

机叶片叶尖裂纹问题开展研究。该技术已顺利通过300h的热冲击试验，能够通过大修叶片故障率的检测，并满足了实际使用的需求^[10]。VURGUN等^[11]采

用能量定向沉积技术，对面向工业工况的高压涡轮叶片进行修复，如图2所示。修复区的微观组织和母材相似度达到95%，且最大修复高度达到2.5mm。

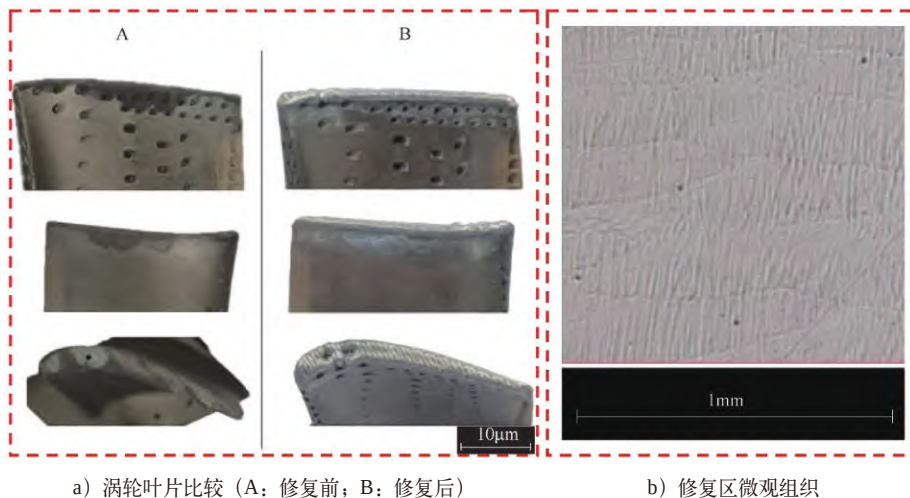


图2 高压涡轮叶片进行修复

WANG等^[12]采用增材修复技术修复受损的镍基涡轮叶片，并对其进行热等静压处理。研究发现，修复界面无裂纹缺陷，与母材相比，修复区显微硬度提高了8.62%，耐磨性也大大提高，修复后的叶片抗拉强度能够达到790MPa。KAIERLE等^[13]将激光熔覆和激光重熔工艺成功地应用于镍基高温合金涡轮叶片修复中（见图3），在CMSX-4和PWA 1426基板上制备出无缺陷的多层熔覆层，并成功在涡轮叶片叶尖上获得了宽度为2584mm、高度为775mm的定向凝固组织。同时使用相同参数，通过单道多层熔覆CMSX-4缺口，修复效果最好。

符素宁等^[14]针对航空发动机高压涡轮工作叶片叶尖位置采用激光熔覆技术进行修复，经过调整修复工艺，热影响区的宽度和熔深展现出了良好的一致性，内部晶粒的生长方向和尺寸更加均匀。对数十台高压涡轮叶片进行批量修复后，通过X射线检测，合格率超过了99%，有效控制了故障情况，确保了修复质量的高标准。美国、英国和法国研究所^[15]均对航空发动机涡轮叶片和燃气轮机叶片的激光熔覆修复工艺进行了深入研究，并成功实现了定向晶叶片的修复。卢朋辉等^[16]在航空发动机涡轮叶片的修复过程中，采用了激光成形技术。研究表明，从基体到修复区， γ '相的尺寸、数量和形态均呈现不同的特征。修复区的裂纹主要是与液膜有关的结晶裂纹，这些裂纹沿着枝晶晶界扩展。通过一系列的试

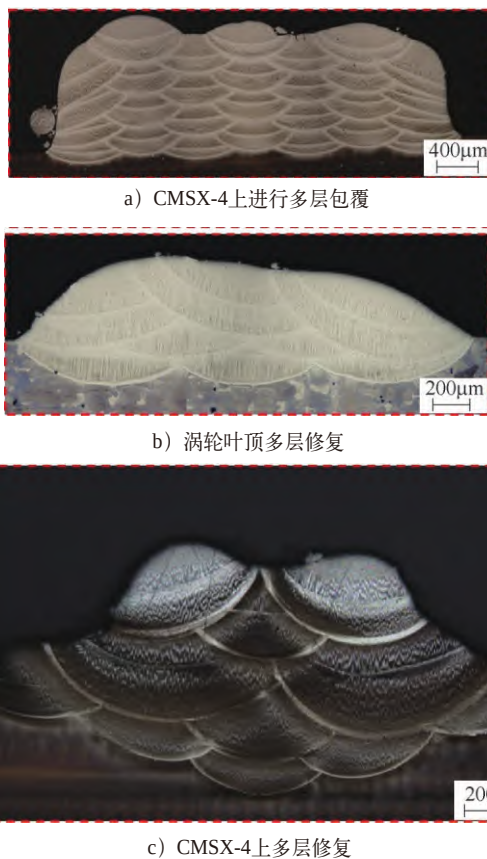


图3 镍基高温合金涡轮叶片修复形貌

验，优化激光修复K418合金的工艺参数，从而显著降低了开裂倾向。徐翔宇等^[17]采用激光熔覆技术对TC4钛合金叶片进行了表面修复。研究发现，基体与熔覆区之间能够实现良好的冶金结合。进一步分

析发现,熔覆区及其与基体的过渡区在力学性能上对温度极为敏感,且在不同方向(横向与纵向)展现出细微的性能差异,如图4所示。值得注意的是,过渡区在冲击韧度方面优于熔覆区,表现出更卓越的抗冲击性能,熔覆区和过渡区的力学性能均满足航空钛合金的应用标准。

LI等^[18]在DED-L技术制造的K465合金中证实了液相薄膜的存在及其在液化裂纹扩展中的作用。研究揭示了具有一定宽度的裂纹起源于热影响区,并沿着晶界或枝晶生长方向扩展至修复区域。类似

于凝固裂纹,液化裂纹同样倾向于沿着高角晶界扩展,这一发现对于理解增材制造过程中裂纹的形成机制和控制策略具有重要意义。YUSHCHENKO等^[19]对增材修复镍基高温合金的组织性能进行了评估,并模拟了工业条件下航空发动机叶片边缘的修复过程,研究证实了激光增材修复在发动机修复领域的可行性,修复后的发动机叶片能够满足实际工程中的应用。

2.2 发动机燃烧室修复

航空发动机燃烧室的工作环境十分恶劣,高温

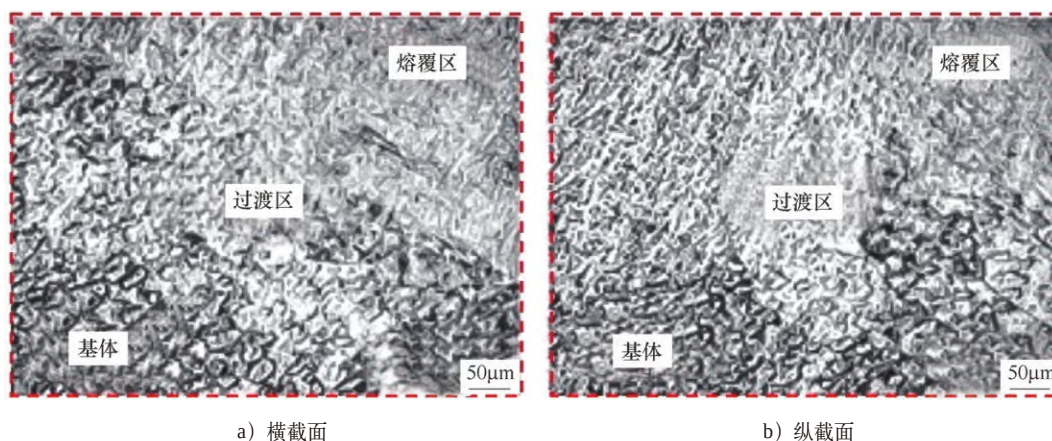


图4 基体与激光熔覆材料过渡区组织试样照片

和高压等恶劣因素作用导致燃烧室极易遭受损伤,发生故障。某发动机燃烧室在长期工作后,内壁出现了局部烧蚀现象,烧蚀深度达到1~2mm,同时在燃烧室头部发现了一些细小裂纹,裂纹长度在5~10mm,这些损伤严重影响了燃烧室的密封性和燃烧效率,进而导致发动机的推力下降、燃油消耗增加以及排放超标等问题^[20]。

根据燃烧室的工作温度和力学性能要求,常选用耐高温、抗氧化和耐腐蚀的镍基高温合金。DENG等^[21]基于激光增材技术制备用于发动机燃烧室的高温镍基合金,增材技术制备的高温合金具有非常细小的胞状-枝晶组织,并发现水平成形的试样比垂直成形的试样表现出更高的抗拉强度和塑性。WANG等^[22]对激光增材技术制备IC10高温合金的组织性能进行探究,如图6所示。研究发现, γ - γ' 共晶是由于热影响和成分共同作用形成的,随着沉积高度的增加,受成分过冷和微观偏析的影响,Al和Ti在枝晶间富集,然后在合适的冷却速率下发生共晶反应。由此得出结论,通过调节增材制造过程中

的冷却速度可以制备出不含共晶组织的镍基高温合金。

WANG等^[23]研究了激光熔化沉积制备的GH3230高温合金,通过固溶处理优化其显微组织并增强力学性能。研究发现,固溶温度升到1320℃时,碳化物含量急剧下降,碳化物的尺寸从0.85μm减小到0.8μm,同时提高了试样的极限抗拉强度和伸长率。ANASTASIA等^[24]研究发现,修复后的燃烧室密封性良好,泄漏率相比于修复前降低了90%以上,有效恢复了燃烧室的正常工作压力环境。在耐高温性能方面,修复后的燃烧室在高达1200℃的温度下持续工作100h后,修复区域无明显的烧蚀和变形现象,熔覆层与基体结合牢固,各项性能指标稳定。此外,发动机整机性能测试结果显示,修复后的燃烧室,发动机的推力恢复到了设计水平的98%以上,燃油消耗率降低了5%~8%,排放指标也符合相关标准要求,充分证明了激光增材修复技术对航空发动机燃烧室的有效修复能够显著提升发动机的整体性能和可靠性,为航空发动机的安全、高

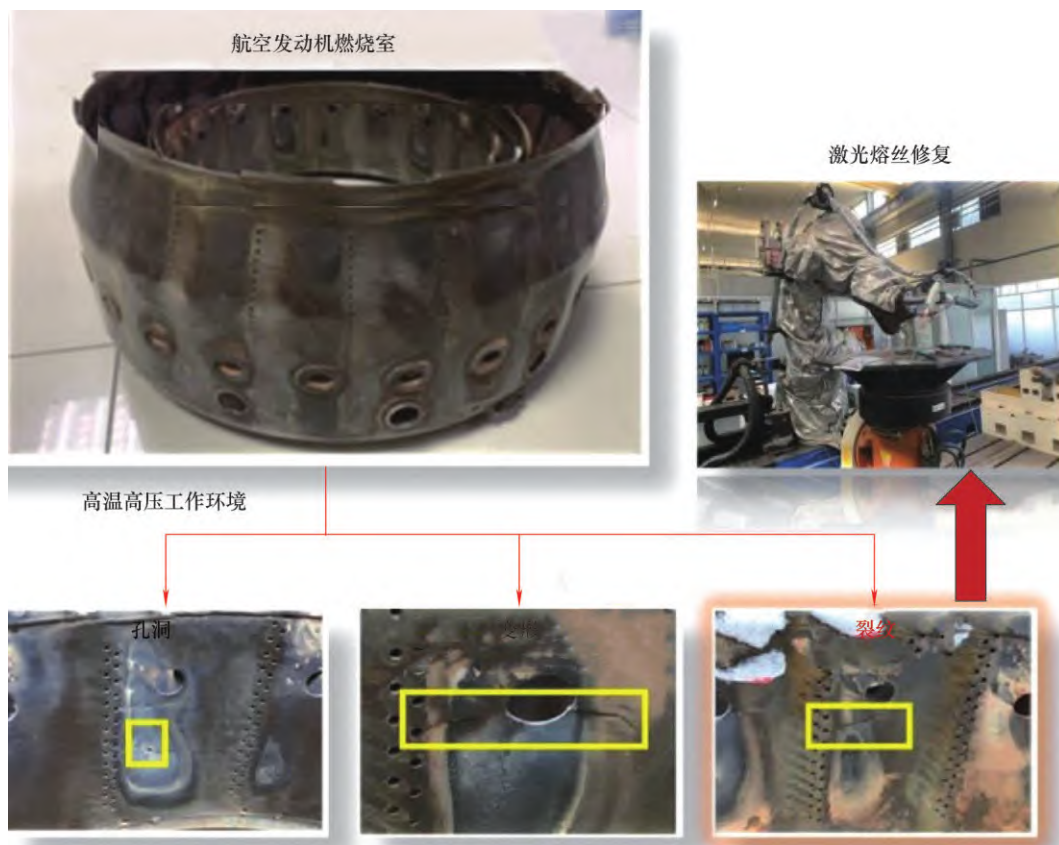


图5 某型报废燃烧室上的不同损伤类型

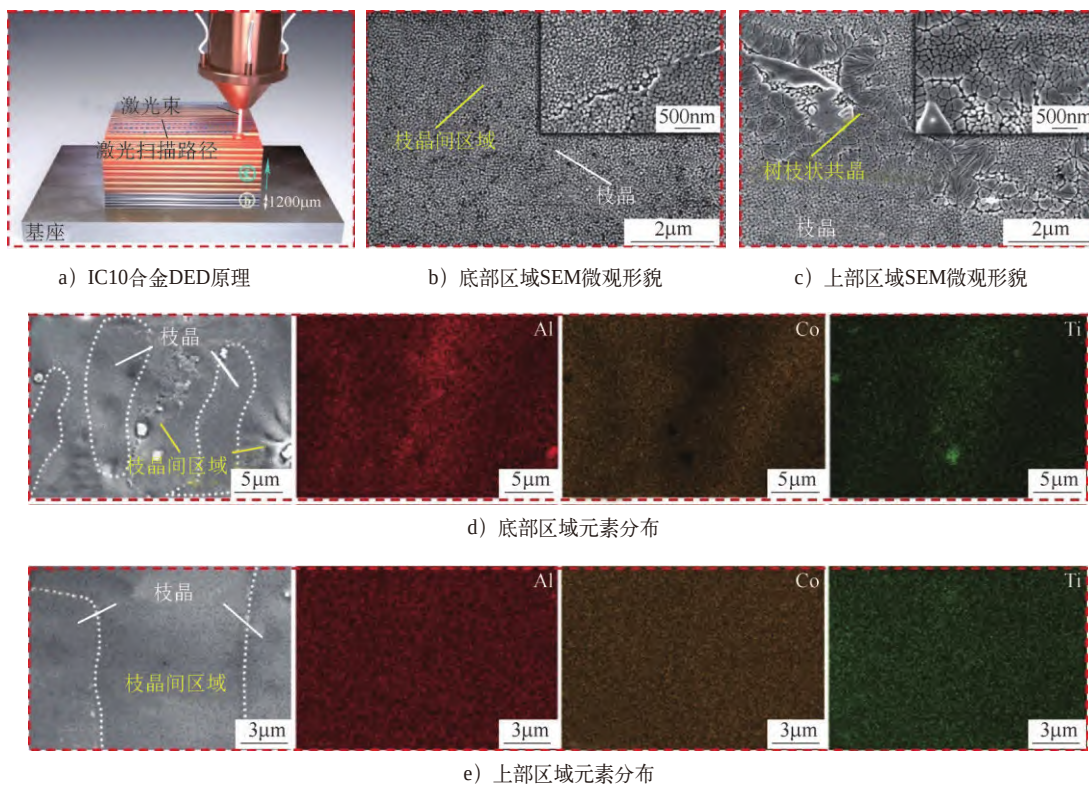


图6 IC10沉积策略、试样显微组织和EDS检测

效运行提供了有力保障。

2.3 发动机缸体修复

发动机缸体在长期使用过程中，由于活塞与缸壁之间的往复摩擦、高温高压燃气的作用以及润滑不良等因素，缸体内壁易出现磨损、拉伤等问题。

刘世贵等^[25]利用激光增材修复技术，对磨损后的航空活塞式发动机缸体工作面制备出耐高温、耐磨损且具有自润滑等功能的复合涂层，修复的发动机缸体不仅能够恢复其初始尺寸，而且在综合耐磨性能上实现了显著提升，这一改进极大地增强了发动机缸体的可靠性，同时显著延长了其使用寿命。SABOORI等^[26]通过激光熔覆技术对某船用发动机曲轴进行了成功修复，实现了基体区和熔覆区具有优异的冶金结合。修复后的曲轴顶部和底部均展现出良好的状态，如图7所示。

刘欢等^[27]对利用增材制造技术来修复和强化废旧缸体零件的失效表面，修复后的发动机缸体强度、耐磨等性能能够满足实际工程应用，在成功延长产品生命周期的同时，实现了能源的节约，并带来了显著的经济效益与社会效益。郑旭等^[28]提出一种创新的缸体修复技术，该技术基于激光熔覆原理。对这项技术的可行性及其修复效果进行了深入

研究，结果表明，经激光熔覆修复后的缸体表面与原始未受损部位在外观和内部组织上几乎无异，且其力学性能达到了机械作业的要求，如图8所示。

3 激光增材修复技术在发动机修复应用中面临的挑战

3.1 修复工艺优化难题

目前，激光增材修复工艺在发动机修复应用中仍存在一些亟待解决的问题，尤其是在熔覆层的均匀性、精度控制以及修复效率提升等方面面临着诸多挑战。

为了解决这些问题，研究人员正在积极探索各种方法来优化激光增材修复工艺，实现更均匀的能量分布和更稳定的熔覆过程；改进送粉方式，研发更加稳定、精确的送粉系统来提高熔覆层质量和均匀性；开发新型修复工艺来提高修复效率和质量，采用多光束激光增材修复技术，可以同时使用多个激光束对不同区域进行修复，可大大提高修复速度。此外，研究人员也致力于探索一些新型的熔覆材料，希望通过设计和优化这些材料的成分，以显著提高熔覆层的成形精度和力学性能，减少后续的加工处理工序，从而提高修复效率^[29, 30]。

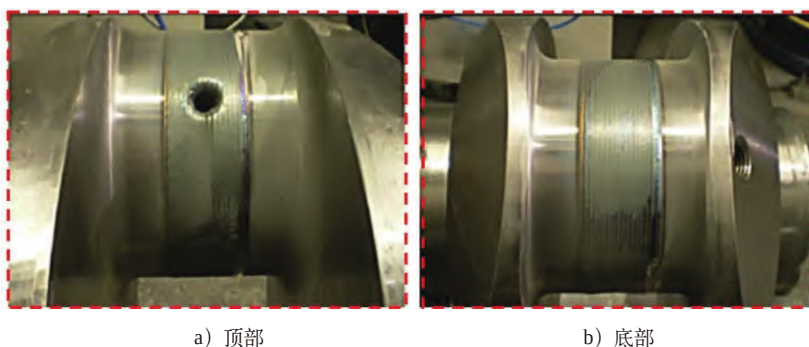


图7 增材修复后的曲轴

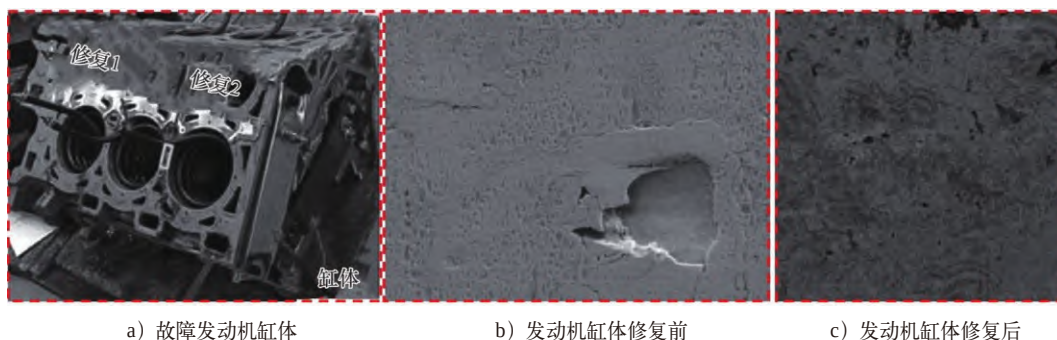


图8 发动机缸体修复

3.2 材料适配性问题

在激光增材修复发动机的过程中,材料适配性对发动机修复质量有重大的影响。热膨胀系数的匹配、化学成分的相容性以及力学性能的协调性是材料适配性的3大关键因素。热膨胀系数差异较大会导致裂纹的产生,化学成分不相容可能形成脆性相,而力学性能不协调可能引起应力集中和裂纹扩展。为解决这些问题,科研人员正在开发与基体材料更匹配的新型合金粉末,并采用过渡层技术以提高修复质量。未来,材料研发将更加精准化和定制化,利用计算模拟技术设计合金成分,开发具有特定性能的新型材料,满足高性能发动机修复的各项要求,提高修复部件的可靠性和耐久性^[31, 32]。

3.3 质量控制与标准化

激光增材修复技术在发动机修复应用中的质量控制与标准化至关重要,这会对修复后发动机的外形尺寸、使用性能和可靠性产生直接影响。然而,目前在这方面仍面临一系列挑战和问题,需要通过长期研究来解决。

目前,存在激光工艺关键参数波动、保护气氛控制、人为因素以及质量检测标准不统一等问题。未来,需加强基础研究、在线监测、国际合作和操作人员培训,并建立完善的质量控制体系和标准化规范,确保激光增材修复技术的健康发展和发动机的高效运行^[33, 34]。

4 结束语

未来,激光增材修复技术将不断攻克复杂形状零部件的修复难题,如具有内部复杂冷却通道的涡轮叶片、多层结构的燃烧室等,实现对这些零部件各种复杂损伤(如内部裂纹、多层材料剥落、异形面磨损等)的精确修复。同时,针对一些新型发动机材料和特殊工艺制造的零部件损伤修复,如复合材料发动机部件、采用增材制造技术直接制造的发动机零部件等,也将通过技术创新和工艺优化,实现有效的激光增材修复,进一步拓展该技术的应用范围和适应性。

激光增材修复的智能化是一个重要挑战,未来将采用人工智能和机器学习来优化制造参数、实现实时质量控制,并适应不同材料和复杂几何形状的要求,以实现高度灵活和自适应的生产过程,发展

为更高效、精确的修复方法。

目前,发动机修复行业正积极响应,致力于研发和推广环保型的修复技术和材料,以满足日趋严格的环保法规。展望未来,发动机修复行业将朝着精细化、智能化和绿色化的方向发展,以修复磨损或部分损坏的发动机。

参考文献:

- [1] MARIE N A, AMRITA B. On the fabrication of metallic single crystal turbine blades with a commentary on repair via additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2020, 4 (4) : 101-127.
- [2] ZHANG X, YU F. Damage prediction and failure mode analysis of composite aeroengine blade impacted by the break stone[J/OL]. Aerospace Systems, 2024: 1-7. <https://doi.org/10.1007/s42401-024-00293-2>.
- [3] KVASNYTSKA Y H, IVASKEVYCH L M, BALITSKII A I, et al. Evaluation of the endurance limit of cooled blades of gas-turbine engines made of heat-resistant nickel alloy[J]. Materials Science, 2024, 59 (3) : 340-346.
- [4] DEV SINGH D, MAHENDER T, AVALA RR. Powder bed fusion process: A brief review[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 46 (P1) : 350-355.
- [5] LING W L, WANG X P, LI Y, et al. In-situ investigation on tensile deformation and fracture behaviors of inhomogeneous microstructure during laser repair of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 291: 109538-109552.
- [6] 党苏武, 李青宇, 李素丽, 等. 激光增材Fe314修复1Cr18Ni9Ti不锈钢结合面工艺匹配性研究[J]. 焊接技术, 2024, 53 (11) : 1-7.
- [7] SMITH L, SCOTT-EMUAKPOR O, GOCKEL J, et al. Vibration bending fatigue analysis of Ti-6Al-4V airfoil blades repaired using additive manufacturing[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2024, 47 (4) : 1417-1430.
- [8] 张佩宇, 周鑫, 李应红. 单晶涡轮叶片高能束修复

- 研究进展[J]. 航空学报, 2022, 43 (4) : 154-178.
- [9] 李鹏涛, 左洪福, 肖文, 等. 航空发动机叶片损伤及其修复技术研究与展望[J]. 航空学报, 2024, 45 (15) : 140-167.
- [10] 赵伟, 曲伸, 杨烁, 等. 激光焊接技术在航空制造及修理中的应用[J]. 金属加工 (热加工), 2019 (2) : 5-8.
- [11] VURGUN S, DIRK R, ROBERT B, et al. Single-crystal repair of high-pressure single-crystal turbine blades for industrial conditions[J]. Procedia CIRP, 2022, 111: 233-236.
- [12] WANG D, LIU Z, DENG G, et al. A laser powder bed fusion-based methodology for repairing damaged nickel-based turbine blades: Investigation of interfacial characteristics and hot isostatic pressing treatment[J]. Materials Characterization, 2024, 212: 113948-113960.
- [13] KAIERLE S, OVERMEYER L, ALFRED I, et al. Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2017, 19: 196-199.
- [14] 符素宁, 任寿伟, 邹文, 等. 涡轮叶片薄壁叶尖激光熔覆修复裂纹分析及控制[J]. 现代涂料与涂装, 2024, 27 (7) : 42-45.
- [15] 张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016 (22) : 16-22.
- [16] 卢朋辉, 刘建睿, 薛蕾, 等. 激光成形修复K418高温合金的显微组织与开裂行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41 (2) : 315-319.
- [17] 徐翔宇, 曹阳, 王辉, 等. 激光熔覆修复叶片的过渡区力学性能试验研究[J]. 现代制造工程, 2021 (9) : 118-123.
- [18] LI Q, LIN X, LIU F, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of laser solid formed K465 superalloy[J]. Materials Science & Engineering: A, 2017, 700: 649-655.
- [19] YUSHCHENKO K, YAROVYTSYN O, CHERVYAKOV M, et al. Development of set of requirements for methods of evaluating performance of welded joints 'Base-Overlay Metal' from nickel-based superalloys of ZhS6 and ZhS32 type simulating repairing of aircraft gas turbine engines blade edges under industrial conditions[J]. Metallofiz Noveishie Tekhnol., 2022, 44 (12) : 1679-1696.
- [20] 张国涛. 面向航空发动机燃烧室疲劳裂纹修复的激光焊接工艺参数分析及优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [21] DENG D, PENG L R, BRODIN H, et al. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by selective laser melting: Sample orientation dependence and effects of post heat treatments[J]. Materials Science & Engineering: A, 2018, 713: 294-306.
- [22] WANG J W, WANG H M, GAO H W, et al. Effect of microsegregation behaviors on solidification microstructure of IC10 superalloy fabricated by directed energy deposition[J]. Additive Manufacturing, 2022, 59 (PA) : 103158-103168.
- [23] WANG G, SHEN X F, YANG J L, et al. Microstructure evolution and tensile property of a first-generation single crystal superalloy fabricated by laser melting deposition[J]. Materials Research Express, 2020, 7 (7) : 076511.
- [24] ANASTASIA D, OLGA K, MARINA G, et al. Effect of the laser cladding parameters on the crack formation and microstructure during nickel superalloy gas turbine engines repair[J]. Metals, 2023, 13 (2) : 393-393.
- [25] 刘世贵, 丁发军, 何鹏飞, 等. 航空活塞式发动机缸体摩擦磨损失效及其修复强化技术[J]. 民航学报, 2019, 3 (3) : 104-107.
- [26] SABOORI A, AVERSA A, MARCHESE G, et al. Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair[J]. Applied Sciences, 2019, 9 (16) : 3316-3341.
- [27] 刘欢. 重卡柴油机缸体再制造关键技术研究[J]. 重型汽车, 2019 (4) : 8-9.
- [28] 郑旭, 徐文静. 拖拉机发动机缸体修复技术研究——基于激光熔覆技术[J]. 农机化研究, 2018, 40 (8) : 258-262.
- [29] 王梦璐, 李占明, 孙晓峰, 等. Inconel 718合金激

(下转第33页)

量由405.4MPa提升至434.9MPa,同时未增加后处理打磨的难度。

参考文献:

- [1] 李亮亮, 槐艳艳, 王晓峰. 激光增材制造仿真过程分析[J]. 制造技术与机床, 2019 (6) : 69-74.
- [2] 姜旭, 周六如, 毕凤阳, 等. 激光选区熔化成形半圆孔悬垂结构变形及残余应力研究[J]. 制造技术与机床, 2023 (8) : 27-31.
- [3] 卢楚文, 牛犇, 王凯, 等. 电弧增材制造封闭路径控制策略研究[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (8) : 104-109.
- [4] 樊永霞, 林彦, 敖庆波, 等. 增材制造Ti-6Al-4V点阵材料的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52 (10) : 3630-3639.
- [5] 靳逸飞, 丁永春, 温家浩. 立体光固化增材制造技术应用现状及展望[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (3) : 18-23.
- [6] 吴代建, 权国政, 白晶斐, 等. 涡轮导向器激光选区熔化成形过程数值模拟分析[J]. 大型铸锻件, 2023 (4) : 6-9, 19.
- [7] 王宏宇, 黄金雷, 陈胜, 等. 基于Cu-Al-Fe合金的粉芯丝材增材制造理论及其温度场分析[J]. 焊接学报, 2023, 44 (4) : 111-119.
- [8] 杨李杰, 陈兴, 孙宝寿. TC4钛合金管振动辅助成形规律的仿真分析[J]. 热加工工艺, 2023, 52 (5) : 102-107.
- [9] 任丽丽, 刘金平, 冯英超. 金属部件送丝增材制

造工艺研究现状[J]. 金属加工 (热加工), 2017 (12) : 64-68.

- [10] 刘伟, 李素丽, 寇丹阳, 等. 不同扫描速度下金属熔丝增材制造应力应变场分析[J]. 焊接技术, 2023, 52 (7) : 1-5.
- [11] 王晓阳, 孙辽, 胡全栋, 等. 打印方向对SLM增材制造点阵结构力学性能的影响分析[J]. 航空制造技术, 2023, 66 (10) : 66-71.
- [12] 安晓龙, 吕云卓, 覃作祥, 等. 同轴送粉金属激光3D打印熔池流动、成分分布以及组织生长数值模拟的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32 (21) : 3743-3753.
- [13] 徐娜, 许路路, 何方成. 各向异性增材制造构件的超声阵列全聚焦成像[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (5) : 1063-1070.
- [14] 马剑雄, 夏张文, 周伟民. 金属增材制造技术的发展与展望[J]. 金属加工 (热加工), 2022 (3) : 22-27.
- [15] LIU G, SU Y G, XIN S W, et al. Enhanced wear resistance of Ti reinforced Inconel 718 superalloy manufactured by laser directed energy deposition[J]. Materials Characterization, 2024, 209: 113736.
- [16] LIU G, SU Y G, PI X Y, et al. Achieving high strength 316L stainless steel by laser directed energy deposition-ultrasonic rolling hybrid process[J]. Materials Science & Engineering: A, 2024, 903: 46665.

MW 20241224

(上接第27页)

光增材修复关键工艺优化[J]. 焊接学报, 2024, 45 (6) : 30-38.

- [30] KAIMING W, ZHENLIN Z, DINGDING X, et al. Research and progress of laser cladding: Process, materials and applications[J]. Coatings, 2022, 12 (10) : 1382-1382.
- [31] TAMANNA N, CROUCH R, NAHER S. Progress in numerical simulation of the laser cladding process[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 122: 151-163.
- [32] ZHU L D, XUE P S, LAN Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. Optics and Laser Technology, 2021,

138: 106915.

- [33] ULLAH Z A, YASIR M K, EHTSHAM R U, et al. A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 225-273.
- [34] LIANG W X, YANG Y, QI K, et al. Quality evaluation of multipath laser cladding coatings based on integrated fuzzy comprehensive evaluation and improved analytical hierarchy process method[J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 427: 127816-127826.

MW 20241123