

增材制造技术在机械零部件焊接修复中的应用与实践

史 猛

石家庄海山实业发展总公司 河北石家庄 050208

摘 要：增材制造技术凭借其快速成型、材料利用率高、可定制化等优势，在机械零部件焊接修复领域展现出巨大潜力。本文系统综述了增材制造技术在焊接修复中的应用现状、关键技术挑战、实际案例及未来发展趋势。首先介绍了激光熔覆、电弧增材、电子束熔覆等主流增材制造技术的原理与特点，分析了其在不同行业中的应用场景。其次，重点讨论了热变形控制、残余应力、材料兼容性、微观结构调控等关键技术问题，并结合具体案例阐述了解决方案。最后，展望了增材制造技术在智能化监控、多材料协同修复、标准化认证等方面的发展方向，为推动该技术在机械零部件修复中的广泛应用提供参考。

关键词：增材制造；焊接修复；激光熔覆；残余应力；智能化监控

一、研究背景

机械零部件在服役过程中，由于磨损、腐蚀、疲劳等原因不可避免地出现损伤，传统修复方法如堆焊、喷涂等存在效率低、成本高、材料浪费严重等问题。增材制造技术（Additive Manufacturing, AM），又称3D打印，通过逐层堆积材料的方式实现复杂结构的快速成型，为机械零部件的高效修复提供了新途径。近年来，增材制造技术在航空航天、汽车、能源等领域的焊接修复中取得了显著进展，但在实际应用中仍面临诸多技术挑战。本文旨在系统梳理增材制造技术在机械零部件焊接修复中的应用与实践，为相关研究和工程应用提供参考。

二、增材制造技术在焊接修复中的应用现状

1. 激光熔覆技术

激光熔覆是目前应用最广泛的增材制造修复技术之一，其原理是利用高能量密度的激光束将合金粉末与基材表面快速熔化，形成冶金结合的熔覆层，从而恢复零部件的几何形状和性能。该技术具有能量密度高、热影响区小、熔覆层质量好等优点，尤其适用于高温合金、钛合金等难加工材料的修复。

（1）航空航天领域

在航空航天领域，激光熔覆技术被广泛应用于涡轮叶片、发动机机匣等关键部件的修复。例如，单晶涡轮叶片在高温、高压环境下服役时，易出现磨损、烧蚀等损伤。李应红院士团队通过激光熔覆技术，结合外延生长理论，成功实现了单晶叶片的修复，修复区的微观组

织与基材保持连续，力学性能达到原始水平的90%以上。此外，激光熔覆还可用于修复航空发动机中的裂纹缺陷，通过优化激光功率、扫描速度等工艺参数，有效控制熔池凝固过程，减少热裂纹的产生。

（2）能源领域

在能源领域，激光熔覆技术可用于修复汽轮机叶片、水轮机浆叶等大型设备部件。例如，南通国昂激光科技有限公司开发的轨道式移动激光熔覆成套装备，成功应用于某火电厂汽轮机叶片的修复，修复后的叶片耐磨性和耐腐蚀性显著提高，延长了设备的使用寿命。此外，激光熔覆还可用于修复石油化工设备中的泵类零部件，通过在表面制备耐磨涂层，提高其抗磨损性能，降低维护成本。

2. 电弧增材制造技术

电弧增材制造以电弧为热源，通过熔化焊丝逐层堆积形成修复层。该技术具有沉积速率高、设备成本低、材料适应性广等优点，尤其适用于大型金属结构件的修复。

（1）汽车与模具制造

在汽车与模具制造领域，电弧增材制造技术可用于修复锻造模具、发动机缸体等零部件。武汉理工大学团队将电弧增材制造技术与智能机器人技术相结合，通过三维重构与机器人轨迹规划，实现了锻造模具的自动化修复，仿形精度达到 $\pm 2\text{mm}$ ，效率提升50%，材料利用率提高30%，成本降低20%。此外，电弧增材制造还可用于制造汽车轻量化零部件，如铝合金车身框

架,通过优化焊接路径和工艺参数,提高零部件的强度和刚度。

(2) 船舶与海洋工程

在船舶与海洋工程领域,电弧增材制造技术可用于修复船舶螺旋桨、轴类部件等。例如,某船舶螺旋桨因长期在海水中服役出现腐蚀损伤,采用电弧增材制造技术进行修复,通过选择合适的焊丝材料和焊接工艺,修复后的螺旋桨性能满足使用要求,且成本仅为更换新螺旋桨的30%。此外,电弧增材制造还可用于制造船舶大型结构件,如船体分段,通过多机器人协同作业,提高制造效率和精度。

3. 电子束熔覆技术

电子束熔覆技术利用高能电子束作为热源,在真空环境下实现材料的熔化与堆积。该技术具有能量密度高、真空环境下无氧化、可修复高熔点材料等优点,尤其适用于航空航天领域的精密零部件修复。

(1) 航空航天精密部件修复

电子束熔覆技术可用于修复航空发动机中的高温合金涡轮盘、燃烧室等精密部件。例如,某航空发动机涡轮盘因长期服役出现疲劳裂纹,采用电子束熔覆技术进行修复,通过精确控制电子束的能量和扫描路径,实现了裂纹的完全填充,修复后的涡轮盘疲劳性能显著提高。此外,电子束熔覆还可用于修复卫星结构件中的复杂内腔缺陷,通过逐层堆积的方式,实现了缺陷的高精度修复。

(2) 核工业领域

在核工业领域,电子束熔覆技术可用于修复核反应堆中的放射性部件。由于修复过程在真空环境下进行,可有效避免放射性物质的泄漏,保障操作人员的安全。例如,某核反应堆中的不锈钢管道因腐蚀出现泄漏,采用电子束熔覆技术进行修复,通过选择耐腐蚀的焊丝材料和优化焊接工艺,成功实现了管道的密封修复。

4. 其他增材制造技术

除上述主流技术外,超声波增材制造、等离子弧增材制造等技术也在机械零部件焊接修复中得到了一定应用。超声波增材制造技术利用超声波振动促进材料界面的固态结合,具有低残余应力、环保等优点,可用于修复铝合金等轻质材料部件。等离子弧增材制造技术具有能量密度高、沉积效率高的特点,可用于修复大型金属结构件,其沉积率可达1.8kg/h,设备成本仅为激光熔覆的2%。

三、关键技术挑战与解决方案

1. 热变形控制

增材制造过程中,由于局部快速加热和冷却,易产生热应力和变形,影响修复精度和质量。为解决这一问题,研究人员提出了多种方法:

(1) 工艺参数优化

通过调整激光功率、扫描速度、层厚等工艺参数,控制热输入量和温度梯度,减少热变形。例如,采用脉冲激光熔覆技术,通过峰值电流与基值电流的交替变化,分散焊接过程的热积累,减小热影响区宽度。

(2) 预热与后处理

在修复前对基材进行预热,可降低温度梯度,减少热应力;修复后进行热处理(如退火、时效等),可消除残余应力,改善微观组织性能。例如,Inconel 718合金激光熔覆后经热处理,晶粒细化,屈服强度和抗拉强度显著提高。

(3) 智能监控与反馈控制

利用红外相机、熔池监测系统实时监测熔池温度和形貌,结合机器学习算法,动态调整工艺参数,实现热变形的闭环控制。例如,中科煜宸开发的在线监控系统RC-IPM,通过机器视觉和PID控制方法,实时监测熔池形貌,降低打印过程中的不稳定因素,提高沉积质量。

2. 残余应力控制

残余应力是增材制造修复中另一个关键问题,其存在可能导致零部件变形、开裂甚至失效。

(1) 数值模拟与仿真

通过有限元分析等数值模拟方法,预测残余应力的分布和大小,优化修复工艺参数。例如,麻教授团队开发的JWELD软件,可模拟焊接和增材制造过程中的热-冶金-力学耦合行为,预测残余应力并提出优化方案。

(2) 应力释放技术

采用振动时效、超声冲击等方法,对修复后的零部件进行应力释放处理。例如,振动时效通过施加周期性的振动载荷,使材料内部的残余应力得到松弛,降低应力峰值。

(3) 材料优化

选择具有良好抗应力开裂性能的材料,或通过合金化设计,提高材料的韧性和抗疲劳性能。例如,南京理工大学团队开发的增材专用镍基合金,通过优化成分和微观结构,显著降低了修复过程中的开裂倾向。

3. 材料兼容性与界面结合

(1) 材料选择

根据基材的化学成分和性能要求，选择匹配的修复材料。例如，修复铝合金部件时，可选择与基材成分相近的焊丝或粉末，以确保良好的冶金结合。

(2) 界面处理

在修复前对基材表面进行预处理，如打磨、清洗、喷涂过渡层等，可提高界面结合强度。例如，采用激光清洗技术去除基材表面的氧化膜和污染物，可改善修复材料与基材的润湿性。

(3) 工艺优化

通过调整焊接参数（如电流、电压、送粉速度等），控制熔池的温度和凝固过程，促进修复材料与基材的元素扩散和冶金结合。例如，在激光熔覆过程中，适当提高激光功率和扫描速度，可增加熔池深度，提高界面结合强度。

4. 微观结构与性能调控

增材制造修复后的微观结构（如晶粒尺寸、相组成、缺陷分布等）直接影响零部件的力学性能和使用寿命。

(1) 工艺参数优化

调整工艺参数，控制熔池的冷却速率和凝固过程，实现微观结构的调控。例如，在激光熔覆过程中，提高扫描速度可增加冷却速率，细化晶粒，提高材料的强度和硬度。

(2) 热处理工艺

修复后进行适当的热处理（如固溶处理、时效处理等），可改善微观结构，提高性能。例如Ti-6Al-4V合金激光熔覆后经时效处理，析出强化相，提高材料的屈服强度和抗拉强度。

(3) 复合强化技术

通过添加第二相颗粒（如碳化物、氮化物等）或采用梯度材料设计，实现微观结构的复合强化。例如，在镍基合金中添加纳米WC颗粒，可显著提高熔覆层的硬度和耐磨性。

四、实际应用案例

1. 航空发动机涡轮叶片修复

某航空发动机单晶涡轮叶片因高温烧蚀出现局部缺损，采用激光熔覆技术进行修复。修复过程中，通过优化激光功率、扫描速度和粉末成分，实现了修复区与基材的外延生长，微观组织与基材保持连续，无杂晶和裂纹缺陷。修复后的叶片经高温拉伸测试，抗拉强度达到

原始水平的92%，疲劳寿命提高30%以上。

2. 汽车锻造模具修复

某汽车锻造模具因长期使用出现磨损和变形，采用机器人电弧增材制造技术进行修复。通过三维扫描获取模具缺损部位的数字模型，利用机器人轨迹规划算法生成修复路径，采用铝合金焊丝进行逐层堆积。修复后的模具仿形精度达到 $\pm 2\text{mm}$ ，硬度和耐磨性与原始模具相当，修复成本仅为更换新模具的30%，交付周期缩短50%以上。

3. 电力设备紧急抢修

某火力发电厂的电动闸阀阀座因异物损伤出现深度沟槽，采用激光熔覆技术进行现场修复。修复过程中，利用便携式激光熔覆设备，结合实时监控系統，实现了阀座的快速修复。修复后的阀座红丹压线100%接触，且压线居中，密封性能满足使用要求，修复时间仅为传统方法的1/3。

4. 船舶螺旋桨修复

某船舶螺旋桨因海水腐蚀出现局部缺损，采用电弧增材制造技术进行修复。选择耐腐蚀的镍基合金焊丝，通过多道次焊接逐层堆积修复区。修复后的螺旋桨经超声波探伤检测，无气孔、裂纹等缺陷，静平衡性能符合标准要求，修复成本仅为更换新螺旋桨的40%。

五、未来发展趋势

1. 智能化监控与闭环控制

随着传感器技术和机器学习算法的不断发展，增材制造修复过程的智能化监控将成为未来趋势。通过集成熔池监测、温度场监测、应力监测等多源数据，结合深度学习模型，实现修复过程的实时优化和闭环控制，进一步提高修复质量和稳定性。

2. 多材料协同修复与梯度功能材料

多材料协同修复技术可实现不同材料在同一零部件上的集成，满足复杂工况下的性能需求。例如，在修复高温部件时，可采用梯度材料设计，从基材到修复层依次为耐高温合金、隔热层和耐磨层，提高零部件的综合性能。此外，开发具有自修复功能的材料，可在零部件服役过程中自动修复微裂纹等缺陷，延长使用寿命。

3. 标准化与认证体系建设

目前，增材制造修复技术的标准化和认证体系尚不完善，制约了其在工业领域的广泛应用。未来需加强行业标准的制定，包括修复工艺规范、性能测试方法、操

作人员资格认证等。例如，中国正在制定的航空金属增材制造操作人员资格认证标准，将为该领域的规范化发展提供依据。

4. 与其他技术的融合发展

增材制造技术与机器人技术、数控加工技术、逆向工程技术等的深度融合，将推动机械零部件修复向自动化、高精度方向发展。例如，五轴联动增减材复合加工设备可实现修复与精密加工的一体化，提高修复效率和精度。此外，增材制造技术与数字孪生技术的结合，可实现修复过程的虚拟仿真和优化，降低试错成本。

结论

增材制造技术在机械零部件焊接修复中具有显著的优势，已在航空航天、汽车、能源等领域取得了广泛应用。然而，其在热变形控制、残余应力、材料兼容性等方面仍面临诸多挑战。未来，随着智能化监控、多材料

协同修复、标准化认证等技术的不断发展，增材制造技术将在机械零部件修复领域发挥更加重要的作用，为实现制造业的绿色化、智能化发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 孙健. 汽车零部件机械加工精度控制技术研究 [J]. 汽车维修技师, 2025, (08): 104-105.
- [2] 杜晓强, 王舒玮, 刘征宇, 等. 基于3D打印技术的建筑机械零部件快速制造与性能分析 [J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38 (02): 53-55.
- [3] 牟德文. 机械加工工艺对汽车零部件精度的影响与运用研究 [J]. 时代汽车, 2025, (08): 130-132.
- [4] 潘毅. 基于CAD/CAE的农用机械零部件优化设计与加工 [J]. 数字农业与智能农机, 2025, (03): 48-51.
- [5] 陆影. 汽车零部件机械加工技术在中职教育中的应用研究 [J]. 内燃机与配件, 2025, (06): 152-154.