

# 面向模具修复的电弧增材制造技术研究 现状及发展

卢楚文<sup>1, 2</sup>, 牛犇<sup>2</sup>, 王凯<sup>1</sup>, 易江龙<sup>2</sup>, 王桂茂<sup>3</sup>, 梁航<sup>3</sup>, 董小虹<sup>3</sup>

1. 佛山科学技术学院 广东佛山 5282251

2. 广东省科学院中乌焊接研究所, 广东省现代焊接技术重点实验室 广东广州 510650

3. 广东世创金属科技股份有限公司 广东佛山 5282251

**摘要:** 电弧增材技术 (WAAM) 在修复模具应用中具有极大的发展潜力。介绍了电弧增材制造技术, 探讨了在模具修复需求中加入电弧增材制造技术的优势, 总结了电弧增材制造技术修复模具所需的关键技术发展, 包括成形精度控制策略、三维模型分层切片算法和沉积路径规划方法。根据当前趋势, 对模具修复中电弧增材制造过程中各环节的规划、控制和监控自动化优化等技术的未来发展趋势进行展望。

**关键词:** 电弧增材制造; 成形精度; 分层切片; 路径规划

## Research status and development of arc additive manufacturing technology for mold repair

LU Chuwen<sup>1,2</sup>, NIU Ben<sup>2</sup>, WAN Kai<sup>1</sup>, YI Jianglong<sup>2</sup>, WANG Guimao<sup>3</sup>, LIANG Hang<sup>3</sup>, Dong Xiaohong<sup>3</sup>

1. Foshan University, Foshan 528225, Guangdong, China

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangdong Welding Institute, Guangzhou 510650, Guangdong, China

3. Guangdong Strongmetal Technology Co., Ltd., Foshan 528225, Guangdong, China

**Abstract:** Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) holds significant potential for advancements in the field of mold repair. This paper introduces the WAAM, discussing its advantages in meeting the needs of mold repair. It summarizes the key technological developments required for mold repair using WAAM, including strategies for controlling forming accuracy, algorithms for three dimensional model layer slicing, and methods for deposition path planning. Finally, based on current trends, the paper forecasts the future developments in the planning, control and automation of monitoring in WAAM process, specifically in the context of mold repair.

**Keywords:** WAAM; forming accuracy; layer slicing; path planning

### 1 序言

模具在工业生产中扮演着至关重要的角色,

被广泛应用于机械、汽车、航空、军工和能源等领域, 一个国家的模具制造水平往往反映了其制

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2022A1515010761); 阳江市人才项目 (RCZX2022018);

广东省高校现代陶瓷与铝型材装备重点实验室 (2017KSYS012); 江门市科技项目 (2023780200040009603)。

第一作者: 卢楚文, 硕士研究生, 主要研究方向为电弧增材制造, E-mail: 806204338@qq.com。

通信作者: 王凯, 博士, 教授, 主要研究方向为电弧增材制造, E-mail: hfutwk927@fosu.edu.cn。

造业的实力<sup>[1]</sup>。近年来，中国的模具产业迅速崛起，市场份额已超过1200亿元，年平均增速达到了20%<sup>[2]</sup>。作为大批量生产必备的工艺装备，模具对于行业发展起到关键作用，尤其是近年来对大型、精密、复杂和服役寿命高的高强度模具的需求急剧增加。

模具在工作过程中，大部分模具会因为持续受到周期性的机械和热载荷作用，从而导致服役寿命缩短<sup>[3]</sup>。以热作模具为例，在服役过程中模具不仅要承受高温和大载荷，同时还受到交替急冷急热的作用，因此相对于其他冷作模具和塑料模具更容易发生失效<sup>[4]</sup>。主要的失效形式包括型腔热疲劳、机械磨损、塑性变形和型腔断裂等<sup>[5]</sup>。服役寿命是限制模具零部件快速持续生产的一个关键因素，然而模具的失效是不可避免的<sup>[6]</sup>。与制造全新模具相比，在现有模具基础上将电弧增材制造技术引入热作模具的修复工程中，可以显著提高材料的利用率，并缩短生产周期<sup>[7]</sup>。特别是对于一些高强度特殊性能合金模具，其材料成本高、制造工序复杂、周期长、经济附加值高，若通过电弧增材制造技术进行修复再制造，则可以确保其品质不亚于新品，甚至更优秀，从而延长模具的使用寿命，实现循环利用，达到节能减排和可持续发展的目标。

近年来，国内外陆续展开了多项基于电弧增材制造技术的热作模具修复研究。然而，这些研究成果主要集中在单一或非闭环的技术环节及修复方法上，研究工作相对分散，迫切需要对这些成果进行整合并深入研究，以便为未来的研究提供参考和指导。因此，本文主要梳理了针对热作模具修复的电弧增材制造技术的研究现状，介绍了在修复过程中的成形参数预测、模型分层切片算法以及沉积路径规划方法。本文还总结了电弧增材制造技术在模具修复应用中的实际情况和面临的主要挑战，并对未来的研究趋势和方向进行了展望。

## 2 模具修复研究现状

### 2.1 模具修复方式

根据待修复模具的类型、尺寸、失效形式以及性能要求等特点，选择合理的模具修复方式才能够保证模具修复的性能和效果，以下是目前行业中较为常用的几类模具修复方式。

(1) 切削减材修复 切削减材修复技术通常用于那些仅发生微小磨损或裂纹的待修复模具，修复原理为将待修复模具进行退火处理，然后在失效区域表面整体切除30~40mm后再进行机械加工<sup>[8]</sup>。然而，这种方法在修复过程中会导致大量模具材料的损耗。在经历多次这样的修复后，模具整体可能会出现无法满足工作要求的缺陷，最终只能被报废处理。因此，这种修复方式主要适用于轻微损坏且急需修复的模具，而不适合大规模应用。

(2) 热喷涂修复 热喷涂修复技术主要应用于因为表面磨损所出现的模具失效修复，如图1所示。该技术是利用等离子或电弧等热源将粉状或丝状金属材料加热至熔融或半熔融状态，然后借助焰流本身或压缩空气以一定速度喷射到预处理过的失效模具表面，使液态金属凝固沉积而形成表面涂层<sup>[9, 10]</sup>。热喷涂修复技术突破了形状和合金材料导电性的限制，具有高效的工艺沉积率。这种技术能够显著提高模具工作面的显微硬度和耐磨性，从而延长修复模具的服役寿命。然而，热喷涂修复技术在应用场景上存在一定的局限性。特别是在修复薄壁或小型模具时，容易出现涂层的热变形问题。因此，这项技术主要适用于对浅表损伤且内腔形态简单的大型模具进行修复，其适用范围相对有限。

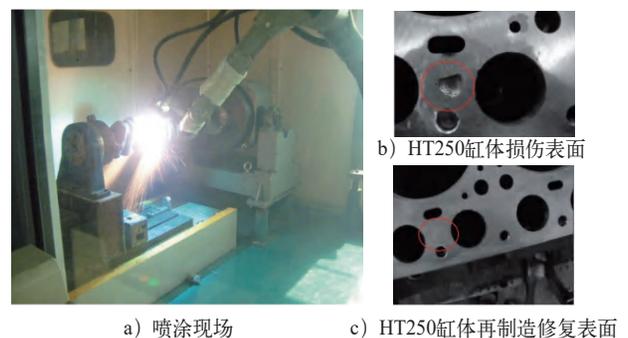


图1 自动化喷涂机器人喷涂发动机缸体<sup>[10]</sup>

(3) 激光增材修复 激光增材修复技术是基于激光粉末沉积技术发展而来的。该技术使用激光束作为热源，快速熔化粉末状金属材料，并将其覆盖在失效模具的待修复区域。当熔融金属凝固后，便在待修复区域形成一层具有极低稀释率的新金属层<sup>[11, 12]</sup>。该修复技术具有多个显著优点，包括高能量密度、低热输入、高效精准、快速响应和优质成形效果。然而，其也存在一些缺点，如设备成本高和能量输入不均匀等。因此，目前这项技术主要应

用于对精度要求高、性能标准严格或尺寸较小的模具修复，如图2所示。

(4) 电弧增材修复 电弧增材修复技术是基于电弧堆焊技术发展而来的，也是最早应用于模具修复工程的热增材修复技术，而且应用范围也极广<sup>[13]</sup>。

该修复技术的原理是通过电弧设备根据待修复模具的需求，将金属丝材用电弧熔化后进行逐层堆积、叠加成形，实现对待修复模具的修复填充<sup>[14]</sup>，如图3所示。与激光增材修复技术相比，电弧增材修复技术不仅同样具备高自动化程度，而且具有设备成本

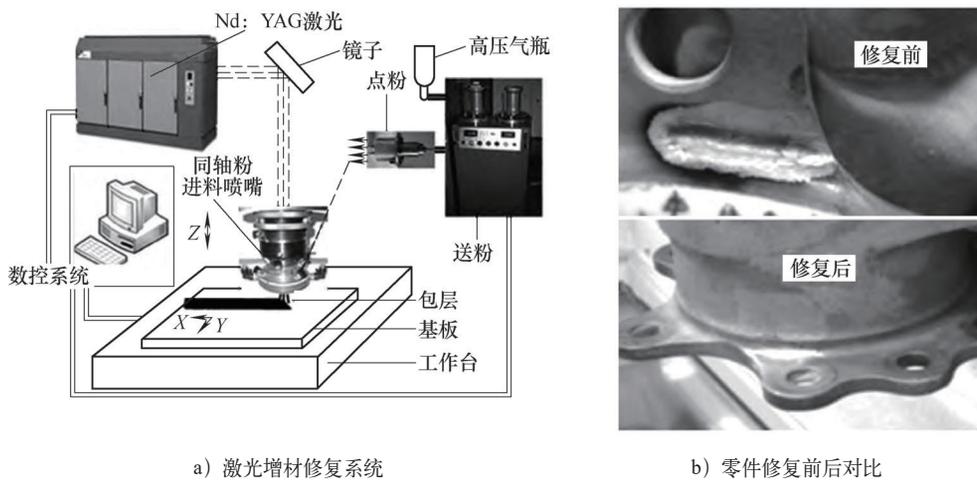


图2 激光增材修复示意<sup>[12]</sup>

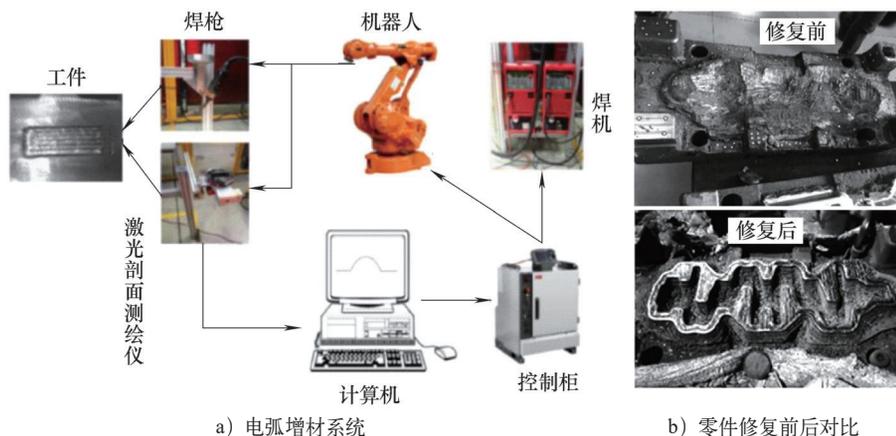


图3 电弧增材修复示意<sup>[14]</sup>

低、修复效率高、操作简便、适用性强及节省焊接材料等优点。但是，由于电弧增材修复技术存在热输入较高、热影响区较大、成形质量难以控制等不足，所以该修复技术不适宜用于精密要求高的模具修复。

结合上述常用模具修复方式的特点分析，对于高温、重载的中大型模具修复需求，电弧增材修复技术的优势尤为突出。因此，对电弧增材修复技术进行合理研究及推广对于模具修复领域意义重大<sup>[15]</sup>。

## 2.2 电弧增材制造修复方式

模具修复的常用修复技术有冷加工方式和热加

工方式，其中热加工方式以电弧增材制造为主要修复技术之一。目前，用于模具修复的电弧增材制造技术方式有人工电弧堆焊修复、多轴机床电弧增材修复及多轴机器人电弧增材修复<sup>[16]</sup>。

(1) 人工电弧堆焊修复 该修复方式以人工技术为主导，不仅受高温恶劣的工作环境限制，还对修复技术的要求较高，因此人力成本偏高。同时，由于其主要修复形式为将待修复模具的腔内以电弧堆焊的方式填充，往往会导致所使用的堆焊材料废弃率较高，因此人工修复技术整体成本偏高，而且无法保证修复后的模具寿命效果及修复工程效率<sup>[17, 18]</sup>。

尽管人工修复技术存在诸多缺点，如高成本、低材料利用率、低修复效率及无法保证修复效果等，但由于国外自动化修复技术的技术壁垒高且引进成本昂贵，国内许多企业仍然采用这种人工修复方案。因此，国内市场对于成本更低、效率更高、材料利用率更优、修复性能更佳的自动化模具修复技术有着迫切需求。自动化和智能化模具修复技术不仅能够显著提高修复后模具的使用寿命，还可以减少企业的生产成本，同时符合绿色环保和节能减排的发展趋势。

(2) 多轴机床电弧增材修复 多轴机床电弧增材修复技术是一种基于多轴数控机床电弧增材制造技术的修复方式，在计算机数控系统的控制下，可以在机床上实现多个坐标轴的联动，一般常用的是控制X、Y、Z轴联动的三轴机床，通过对坐标轴

不同移动方向和速度的控制，实现机床电弧增材制造。河南科技大学韩建等<sup>[19]</sup>提出了利用可编程控制器控制步进电动机和电焊机，以实现三轴机床进行电弧增材制造的自动化控制；PRADO-CERQUEIRA等<sup>[20]</sup>提出通过集成冷金属过渡焊（CMT）焊接设备和三轴数控铣床，开发一种低成本的金属电弧增材制造系统，其实质是将Fronius的CMT焊接设备配置于三轴机床Optimus上，实现以机床控制CMT电弧增材制造；中国石油大学的马驰等<sup>[21]</sup>提出了基于PMAC Clipper、S7-200Smart PLC、交换机及计算机的电气控制，将老旧数控铣床改造为电弧增材制造机床（见图4），目的是能够实现在增材过程中焊接电流与电弧电压的同步采集，提高机床电弧增材制造的成形效果。

多轴机床电弧增材制造修复方式相对于人工电



图4 机床电弧增材设备构成<sup>[21]</sup>

弧堆焊修复方式，在自动化和智能化上有了质的提升，不仅大大减轻了人工作业强度，还大幅度减少了修复工程的成本，提高了模具电弧增材制造修复的效率和质量<sup>[22]</sup>，但是其存在运动路径单一和可调整空间局限等缺点，导致该方式在应对具有复杂腔体的模具时会受到极大限制。因此，如何解决焊枪受限问题、保证复杂模具修复效果，是该修复方式的一个极为重要的难点。

(3) 多轴机器人电弧增材修复 多轴机器人电弧增材修复技术是利用多轴机器人与电弧增材制造技术相结合，由多轴工业机器人带动电弧增材制造焊枪在模具的待修复区域进行逐层堆积、累加成形，从而达到修复失效模具的形貌、尺寸和性能。相比于上述的人工电弧堆焊修复和多轴机床电弧增材修复方式，多轴机器人电弧增材修复技术具有高自由度、高灵活度。高控制精度的多轴工业器

人，能够使电弧增材制造修复技术更具智能化、数字化，且其修复效率和性能效果显著提高，尤其是面对复杂且不规则的失效模具拥有较大的优势<sup>[23]</sup>。武汉理工大学的吴强等<sup>[24]</sup>利用该校开发的一套机器人电弧增材修复系统对热锻模具进行修复，可节省焊接材料30%~40%、节约工作时间50%以上、提高修复效率20%以上，以及降低模具修复成本30%以上。刘德建等<sup>[25]</sup>提出了采用弧焊机器人结合增材制造技术修复超大型模具的方法（见图5），通过有限元对模具受力状态分析，设计了具有梯度结构的焊接修复层，能够有效解决超大型模具的缺陷修复问题。

### 2.3 电弧增材修复应用研究

使用电弧增材制造技术修复模具主要包括3个步骤：获取工艺参数；进行三维模型的分层切片；规划沉积路径。首先，在获取工艺参数方面，为了更



a) 焊接设备



b) 增材过程

图5 多轴机器人电弧增材<sup>[25]</sup>

高效和便捷地获得所需参数，目前主流的方法是通过数字化和智能化技术构建各种预测模型，以实现对手工艺参数的智能预测。其次，实现高精度且无缺陷的几何零件制造的关键在于运用三维分层切片算法和编程软件。这些工具能为特定零件的三维模型生成精确的机器人运动路径和焊接参数。根据三维分层切片的结果，针对使用材料、工作条件或者成形性能，设计高效率、高精度的自动化沉积路径规划和工艺优化，以规避潜在的工艺引起的缺陷。为提高电弧增材模具修复技术的应用可行性，国内外学者通过优化电弧增材制造工艺、优化模具三维结构、集成多种智能化设备等对电弧增材修复技术的工艺及设备不断进行优化<sup>[26]</sup>，在保证修复工程的高效率、高质量、低成本及低损耗的基础上，能够显著提高修复后模具的性能和使用寿命。

### 3 模具电弧增材修复工艺研究

电弧增材制造修复过程主要包括失效模具修复前的预处理、模具修复成形预测及工艺参数优化、三维扫描获取待修复模具的三维模型、通过布尔运

算获取待填充区域的三维模型、对三维模型进行分层切片、沉积路径规划、生成机器人控制程序，以及实现修复区域逐层堆叠的修复填补<sup>[27]</sup>。其中，最为核心的环节往往是成形预测及工艺参数优化、三维模型的分层切片及沉积路径的规划。模具电弧增材修复工艺流程如图6所示。

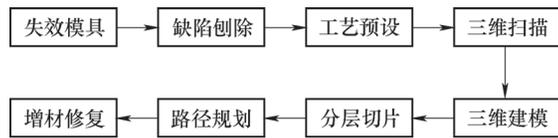


图6 模具电弧增材修复工艺流程

#### 3.1 成形预测及工艺参数优化研究现状

模具修复中的电弧增材制造是一个涉及多参数耦合的复杂过程。这一过程包含了多个复杂的工艺参数，它们相互耦合并直接影响着增材成形的形貌和效果。因此，研究电弧增材工艺参数与成形形状之间的关系，以及快速准确地设计最优的电弧增材修复工艺参数，成为提高模具修复质量的关键环节。国内外很多研究者对此进行了相关研究，YANG等<sup>[28]</sup>为获得表面质量和尺寸精度高的成形零件，建立了工艺参数与微珠几何形状之间的数学模型，研究了工艺参数与堆焊层几何形状之间的复杂关系；YIN等<sup>[29]</sup>基于5083铝合金双丝CMT焊接的大量数据，采用深度神经网络技术对焊接工艺参数和焊缝尺寸进行了分析，建立了焊缝成形参数的精确预测模型（见图7），研究了深度神经网络在定量分析电弧焊系统从输入焊接参数到输出焊缝尺寸等方面的高效率和高精度优势；赵鹏等<sup>[30]</sup>基于TIG电弧增材制造平台，研究了焊接电流、焊接速度、送丝速度对焊道熔宽和余高的影响，建立了BP人工神经网络，利用遗传算法对其进行优化得到焊缝尺寸预测模型，其预测性能良好，能较为准确地预测单焊道的尺寸；ROUT等<sup>[31]</sup>提出

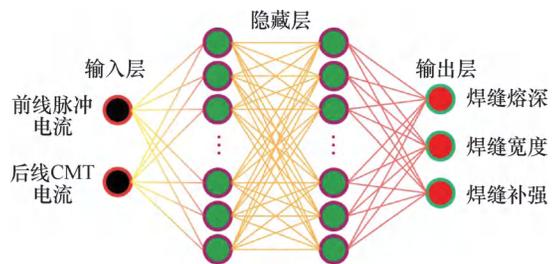


图7 深度神经网络预测模型<sup>[29]</sup>

一种基于模糊回归和粒子群优化的混合优化方法，以获得焊缝强度和尺寸，该方法能够克服现有优化方法的各种局限性，有效分析各工艺参数和性能参数的模糊性和显著性；董海等<sup>[32]</sup>为提升成形零件的尺寸精度，提出一种基于自适应布谷鸟（ACS）算法优化的深度信念神经网络预测模型ACS-DBN，与现有模型相比，该模型能够有效映射电弧增材制造焊道尺寸和工艺参数之间的复杂线性关系，并且具有较高的准确性和稳定性。

上述国内外针对电弧增材制造成形预测及工艺参数优化研究现状表明，运用各种智能算法可以有效解决在电弧增材过程中工艺参数的寻优问题。但是依然存在以下两个问题：一是大部分预测模型考虑的输入工艺参数较少，应该涵盖大部分电弧增材制造过程中影响成形效果的工艺参数，才可以提高模型的合理性；二是现有模型所用算法大多对于输入参数的规模具有依赖性，容易因为样本量过少而导致降低寻优结果的准确性，只有以大量的试验数据作为支撑，才能够保证模型的训练性能。因此，研究一种可以合理、准确、快速且稳定的智能预测模型，对于电弧增材制造的成形预测及工艺参数优化具有巨大的应用前景。

### 3.2 三维模型分层切片算法研究现状

模具电弧增材修复技术基于“离散-堆积”原理进行。其中，“离散”主要指的是将三维数字化模型通过不同算法从“体”转换为“面”，即进行离散切片处理。因此，三维模型的分层切片成为电弧增材修复技术中处理三维模型数据的核心关键步骤<sup>[33, 34]</sup>。这一步骤影响着模具修复过程中的变量控制和精度。当前，国内外学者的研究重点主要集中在针对不同三维模型文件格式的切片算法开发、分层切片厚度的设定选取，以及切片效率的优化等方面。针对不同数据结构模型的分层处理，HAN等<sup>[35]</sup>提出了一种新的基于STEP格式模型的直接切片算法，该算法基于非均匀有理B样条（NURBS）曲面描述三维模型，采用离散跟踪算法对NURBS曲面进行分层，解决了CAD模型直接切片无法解决复杂曲面零件高精度切片的问题；ZHANG等<sup>[36]</sup>针对STL格式三维模型，提出一种稳定的分层算法，其可以处理具有百万个具有拓扑信息三角形的高精度STL模型，还可以自动识别外轮廓和内轮廓，大幅提高

了分层切片效率；丁华峰等<sup>[37]</sup>为提高STL模型切片方法的准确性和稳定性，提出一种基于MATLAB的STL文件分层切片算法，能够快速准确地找到与当前切平面相交的三角面片，运用MATLAB强大的运算能力能够有效提高切片算法的稳定性和精确性；XU等<sup>[38]</sup>基于逆向工程获得的点云模型，提出了点云投影识别的数学建模和处理方法，并引入新的权重函数，考虑了点云偏移距离在切片轮廓绘制中的影响，实现了点云的投影识别和分层轮廓的精确构造（见图8）；针对近年来由于求解效率高而备受关注的体素化模型切片方法，牛其华<sup>[39]</sup>研究了应用于电弧增材制造的体素化模型曲面分层方法，提出了体素模型的曲面偏置和基于生长线的曲面切片算法，成形试验表明，该算法能显著降低焊接过程中的热量积累，可弱化“阶梯效应”，提高零件表面质量。

通过国内外对三维模型分层切片算法的研究进展可看出，针对不同三维模型文件格式的分层切片算法研究各具特点，但是追求数据结构稳定、切片方法简单在未来较长一段时间内仍然是主流研究重点，但是一味针对三维文件模型特质进行切片算法研究，不考虑电弧增材制造实际应用情况，所开发的切片算法容易存在与电弧增材制造系统不兼容等困难，针对适用电弧增材制造系统和成形零件精度控制的切片算法，应该在考虑合适的三维模型格式的基础上结合电弧增材制造特性研究开发自适应层厚切片算法，为实现模具的电弧增材修复技术提供良好的理论与技术支持。

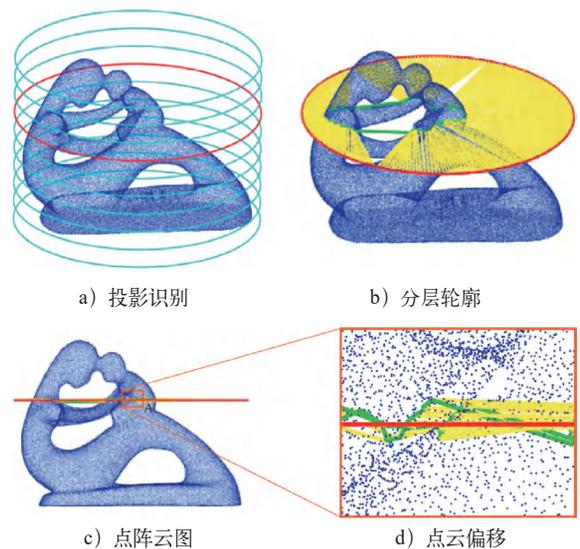
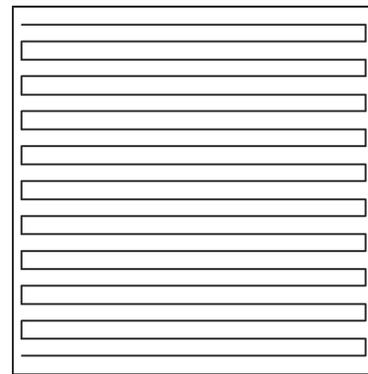


图8 基于点投影的分层轮廓方法<sup>[36]</sup>

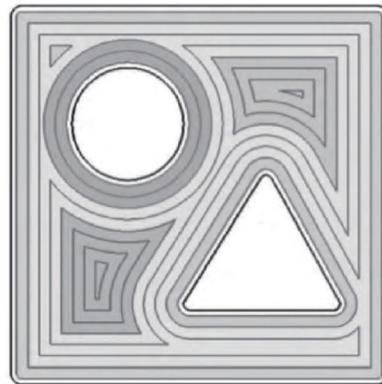
### 3.3 沉积路径规划方法研究现状

通过三维模型分层切片处理后得到离散二维截面，针对每一层截面结构、材料性质及成形质量选择合适的沉积路径规划方法，是保证模具修复结果的精度控制和性能质量的核心环节<sup>[40]</sup>。因此，国内外研究者围绕二维截面的沉积路径规划算法开展了大量研究，主要涉及控制成形质量和沉积速率两方面。为提高电弧增材制造成形零件的表面质量和强度，方力等<sup>[41]</sup>提出了一种复合路径规划算法，将多种增材制造路径规划算法相结合，实现了单空洞截面的填充，减少了空行程，提高了成形效率（见图9）；针对目前已有的扫描路径算法的不足，邵坦等<sup>[42]</sup>在轮廓偏置扫描路径填充算法和分区扫描路径填充算法的基础上提出了一种改良的基于偏置轮廓特征的分区扫描路径填充算法，在一定程度上改善了成形质量和成形效率；MICHEL等<sup>[43]</sup>提出一种模块化路径规划解决方案（MPP），旨在将基于特征设计的模块化融入到传统的分层策略中，可以根据几何图形调整路径规划，从而提高复杂几何构件的成形效率；针对多边形截面零件的几何中心和拐角搭接处容易出现孔洞的问题，LIU等<sup>[44]</sup>提出了一种复合路径规划方法和拐角修正策略，由锯齿路径和等高线偏置路径组成的复合路径，用于填充多边形截面零件的几何中心，可解决中心孔洞问题，通过修正外轮廓路径中的拐角搭接点，实现拐角孔洞问题，从而改善复杂多边形构件的表面形貌和成形质量；对于复杂表面上的曲面沉积，由于重力作用出现的沉积面凹凸不平的问题，HU等<sup>[45]</sup>提出了一种基于区域的机器人电弧增材制造路径规划方法（CL-WAAM），该方法可以在复杂表面的任意区域保持水平焊接位置，最大限度地减少重力的不利影响，保证了沉积面的均匀形貌，可广泛用于热锻模具、水轮叶片等耐磨表面零件的修复和制造。

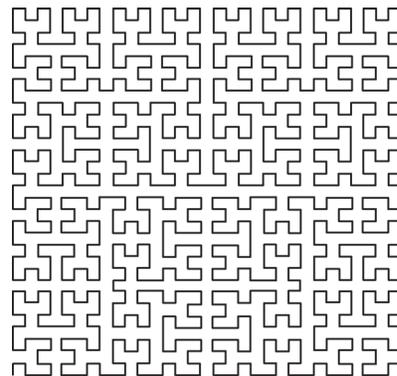
从国内外研究者对沉积路径规划方法的研究现状来看，对于结构简单的零件，可以选择一些固定的沉积路径规划方法。然而，对于几何特征复杂的大型零件，特别是带有空腔的零件，单一的沉积路径通常难以有效保证成形的质量和效率。因此，根据具体情况，综合考虑零件的几何特征、残余应力及热量积累等因素，设计结合多种增材制造路径的复合路径规划方法，对于确保模具电弧增材修复的



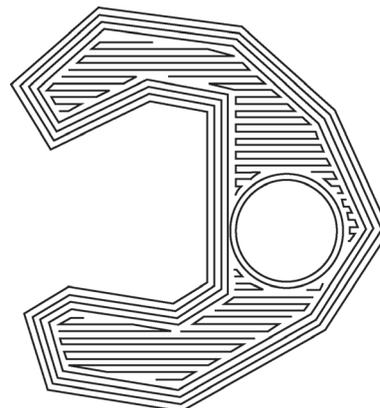
a) 扫描线填充路径



b) 轮廓偏置填充路径



c) 分形线填充路径



d) 复合填充路径

图9 电弧增材填充路径规划<sup>[38]</sup>

质量和效率至关重要<sup>[46,47]</sup>。

#### 4 模具电弧增材修复发展趋势

随着模具产业规模的持续增长，行业越来越倾向于追求高精度、高耐蚀性、高耐磨性和长使用周期等特性。这些趋势导致了模具修复工程量的增加，同时修复的技术要求也在不断提升。在对比重铸模具与修复模具的优劣时，修复模具在成本控制和工程效率等方面表现出明显优势。因此，发展模具的电弧增材修复技术不仅能为未来模具行业带来巨大的经济效益，还拥有广阔的应用前景。针对面向模具修复的电弧增材修复技术，从提出应用以来，各个方面的研究都取得了许多成果，随着国内外研究者对该技术的进一步拓展研究，未来的发展趋势将会向以下几个方面推进。

1) 向预测成形件残余应力、变形情况以及优化成形路径的方向发展。在电弧增材修复模具过程中，关于所用金属材料的性质变化机理的研究主要围绕成形件的内部性能、微观组织进行，目前的研究更多是停留在简单的组织分析和性能规律的描述，比如单层单道、单层多道、单道多层以及多层多道等典型成形构件的组织性能状态，然而电弧增材制造技术不能只考虑最终成形的静态结果，对于电弧增材过程中的动态性能变化的研究也尤为重要，因此对电弧增材逐层堆积的过程监测、实时反馈、数据分析等方面的研究将会由一般性规律研究转为深入研究理论和机理。同时，在电弧增材过程中，由于后一层的热输入和前一层的热积累所形成的一个热量循环作用，导致每一次沉积都会出现后一层沉积层对前一层沉积进行一次难以避免的回火作用，所以如果不对成形过程中的热量循环及应力变化进行控制，则会直接影响最终的成形效果。因此，需对电弧增材过程中的温度场、应力场进行模拟仿真，预测成形件的变形，研究相应的消除残余应力方式以及成形路径的优化策略。

2) 向研究结合工艺参数与性能评估的预测模型方向发展。研究工艺参数之间的相互作用以及工艺参数对成形结果的影响，一直是国内外学者的研究重点，但是电弧增材制造过程是一个多参数耦合的过程，其中包括焊接电流、焊接电压、电弧长度、摆动频率、送丝速度、焊接速度、干伸长及保护气

配比等多种工艺参数，为保证成形质量和精度，不能局限于几种工艺参数的预测模型研究，应深入剖析输入参数对输出参数的影响，确定成形效果对不同工艺参数之间的受影响灵敏度，建立更为全面的工艺参数预测模型，以合理控制显著影响成形效果的工艺参数。同时为保证模具修复结果的适时性、高效性，还应分析模具修复的精度及力学性能指标，建立模具性能评估体系，结合工艺参数预测模型和模具失效机理分析，建立模具服役寿命和可靠性的预测模型。

3) 向一体化、智能化集成设计方向发展。目前，对于三维扫描、模型分层切片、沉积路径规划等电弧增材制造技术的各个核心环节都有许多的研究成果，但是缺乏一个高度集成的模具修复电弧增材制造系统。随着基础研究及相关领域技术的发展，高度集成的商业设备和配套软件将会逐渐被推出，结合先进的材料技术、三维数据处理技术、智能控制技术、云计算技术、机器视觉传感技术，以及各种先进智能技术，将实现从材料、功能、结构、工艺设计到增材成形一体化的高度自动化与智能化电弧增材模具修复流程。

#### 5 结束语

面向模具修复的电弧增材制造修复技术具有诸多优点，对我国模具行业的发展具有极为重要的战略意义，由于其低成本、高修复效率、低丝材消耗率、短工作时长、少量零件限制及高适应性等特性，特别适用于中大型模具的大面积失效区域修复。尽管经过多年的发展，国内外在模具修复的电弧增材制造技术方面进行了大量研究，但目前研究多集中于单一环节，缺乏对不同环节先进成果的整合，以实现电弧增材修复技术的高度集成应用。同时，在模具修复材料、寿命评估、修复精度及性能保证方面仍存在诸多问题待解决。随着先进制造技术的发展，融合电弧增材制造技术、智能闭环控制技术及精密减材技术的复合形增减材技术，将成为未来制造业的主要发展趋势。因此，模具修复的电弧增材制造技术未来必将走向多学科交叉、智能化、数字化及并行化制造的道路。

#### 参考文献：

[1] 中国模具工业协会. 模具行业“十二五”发展规划

- [J]. 模具工业, 2011, 37 (1) : 1-8.
- [2] 喻红梅, 刘海琼, 周红梅, 等. 模具修复再制造技术研究应用现状[J]. 电焊机, 2014, 44 (11) : 150-153.
- [3] 温家浩, 丁永春, 赵智奎. 增材修复技术应用现状及展望[J]. 应用激光, 2023, 43 (1) : 109-118.
- [4] 巩喜宝. 工程机械再制造及其关键技术[J]. 化工管理, 2018 (21) : 138-139.
- [5] 夏鹏成, 陈蕴博, 葛学元, 等. 热作模具钢热疲劳性能的研究现状与发展趋势[J]. 金属热处理, 2008, 33 (12) : 1-6.
- [6] 胡随芯, 秦训鹏, 胡泽启, 等. 热作模具堆焊修复再制造技术发展现状与趋势[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (5) : 10-16.
- [7] 朱胜, 柳建, 殷凤良, 等. 面向装备维修的增材再制造技术[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28 (1) : 81-85.
- [8] 夏玉峰, 滕海灏, 廖海龙, 等. 热锻模具电弧增材再制造技术研究进展[J]. 材料热处理学报, 2021, 42 (8) : 1-13.
- [9] 辛蔚, 王玉江, 魏世丞, 等. 热喷涂制备高熵合金涂层的研究现状与展望[J]. 工程科学学报, 2021, 43 (2) : 170-178.
- [10] 李方义, 李振, 王黎明, 等. 内燃机增材再制造修复技术综述[J]. 中国机械工程, 2019, 30 (9) : 1119-1127, 1133.
- [11] 谭超林, 周克崧, 马文有, 等. 激光增材制造成型马氏体时效钢研究进展[J]. 金属学报, 2020, 56 (1) : 36-52.
- [12] 徐进军, 张浩, 高德晰, 等. 军用飞机金属零件激光增材修复技术的研究进展[J]. 航空材料学报, 2023, 43 (1) : 39-50.
- [13] 田彩兰, 陈济轮, 董鹏, 等. 国外电弧增材制造技术的研究现状及展望[J]. 航天制造技术, 2015 (2) : 57-60.
- [14] 刘小军, 陈伟, 黄志江, 等. 电弧增材制造航空钛合金构件组织及力学性能研究现状[J]. 精密成形工程, 2019, 11 (3) : 66-75.
- [15] 张建生, 肖贵乾, 邓长勇. 热锻模具自动化电弧增材再制造工艺[J]. 锻压技术, 2020, 45 (7) : 165-171.
- [16] 曹勇, 朱胜, 李萍, 等. 备件增材再制造成形中的颠覆性技术应用分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2015, 29 (2) : 97-101.
- [17] 王孟, 宝志坚. 汽车轴类热锻模具的失效形式与分析[J]. 中国工程机械学报, 2008 (3) : 364-369.
- [18] 王树奇, 崔向红. 热锻模具的韧性要求[J]. 中国机械工程, 2004 (8) : 90-93.
- [19] 韩建, 朱锦洪, 李兴霞. PLC控制步进电动机在自动堆焊中的应用[J]. 制造技术与机床, 2006 (4) : 41-43.
- [20] PRADO-CERQUEIRA J L, DIÉGUEZ J L, CAMACHO A M. Preliminary development of a wire and arc additive manufacturing system (WAAM) [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 13: 895-902.
- [21] 马驰, 燕昱昊, 李常龙, 等. 电弧增材制造数控机床电气控制与策略[J]. 电加工与模具, 2022 (2) : 61-66.
- [22] 张建生, 董旭刚, 张普, 等. 大型电弧熔丝增材装备研究进展及现状[J]. 锻压装备与制造技术, 2020, 55 (1) : 7-10.
- [23] 田根, 王文字, 常青, 等. 电弧增材制造技术研究现状及展望[J]. 材料导报, 2021, 35 (23) : 23131-23141.
- [24] 吴强, 邓庆文, 胡泽启, 等. 热锻模电弧熔丝增材修复与再制造技术[J]. 表面工程与再制造, 2018, 18 (5) : 27-32.
- [25] 刘德建, 孙朝远, 李蓬川, 等. 基于弧焊机器人结合增材制造技术修复超大型模具的可行性分析[J]. 大型铸锻件, 2021 (2) : 28-31.
- [26] 刘元伟, 元翔, 魏训青, 等. 热作模具的堆焊修复技术[J]. 精密成形工程, 2016, 8 (3) : 68-73, 77.
- [27] 李岩, 苏辰, 张冀翔. 电弧熔丝增材制造综述: 物理过程、研究现状、应用情况及发展趋势[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2022 (1) : 14-20.
- [28] YANG T, XIONG J, CHEN H, et al. Modeling of weld bead geometry for rapid manufacturing by robotic GMAW[J]. International Journal of Modern Physics B, 2015, 29 (10n11) : 1540033.
- [29] YIN L, WANG J, HU H, et al. Prediction of weld formation in 5083 aluminum alloy by twin-wire CMT welding based on deep learning[J]. Welding in the World, 2019, 63 (4) : 947-955.

- [30] 赵鹏, 吕彦明, 周文军, 等. 钨极惰性气体保护电弧增材制造单焊道尺寸预测[J]. 机械工程材料, 2020, 44 (11) : 78-82, 91.
- [31] ROUT A, BBVL D, BISWAL B B, et al. A fuzzy-regression-PSO based hybrid method for selecting welding conditions in robotic gas metal arc welding[J]. Assembly Automation, 2020, 40 (4) : 601-612.
- [32] 董海, 高秀秀, 魏铭琦. 基于ACS-DBN的电弧增材制造焊道尺寸预测[J]. 系统仿真学报, 2021, 33 (12) : 2828-2837.
- [33] 郑华林, 王浩宇. 快速成型中有效保留模型特征的自适应分层方法[J]. 应用光学, 2017, 38 (5) : 758-763.
- [34] 王耀, 王春香, 周国勇, 等. 快速成型技术中分层算法的研究综述[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27 (3) : 828-841.
- [35] HAN X, ZHAN Z, SONG X, et al. An additive manufacturing direct slicing algorithm based on a STEP model[J]. Electronics, 2022, 11 (10) : 1582.
- [36] ZHANG Z, JOSHI S. An improved slicing algorithm with efficient contour construction using STL files[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80 (5-8) : 1347-1362.
- [37] 丁华锋, 王卓, 刘婧芳, 等. 一种基于MATLAB的STL文件分层切片算法[J]. 机床与液压, 2018, 46 (5) : 102-105.
- [38] XU J, HOU W, SUN Y, et al. PLSP based layered contour generation from point cloud for additive manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 1-12.
- [39] 牛其华. 基于体素的电弧增材制造曲面分层及路径规划方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [40] 郑冉, 刘芝平, 易兵, 等. 增材制造自适应螺旋加工路径规划方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27 (7) : 2016-2022.
- [41] 方力, 侯智文, 黄俊润, 等. 电弧熔丝增材制造复合填充路径规划算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51 (1) : 98-104.
- [42] 邵坦, 李轶峰, 吴强, 等. 机器人电弧熔丝增材制造扫描路径生成算法研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (5) : 220-225, 230.
- [43] MICHEL F, LOCKETT H, DING J, et al. A modular path planning solution for wire+arc additive manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 60: 1-11.
- [44] LIU H H, ZHAO T, LI L Y, et al. A path planning and sharp corner correction strategy for wire and arc additive manufacturing of solid components with polygonal cross-sections[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106 (11-12) : 4879-4889.
- [45] HU Z, QIN X, LI Y, et al. Welding parameters prediction for arbitrary layer height in robotic wire and arc additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34 (4) : 1683-1695.
- [46] 卢振洋, 田宏宇, 陈树君, 等. 电弧增材复合制造精度控制研究进展[J]. 金属学报, 2020, 56 (1) : 83-98.
- [47] 占宇航, 郭阳阳, 李章张, 等. 工艺参数对电弧增材制造镁合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51 (19) : 26-29.

MW 20240109