

无掩模定域性电沉积-增材制造技术研究进展

贾卫平^{1,2}, 吴蒙华², 贾振元¹, 吴建辉², 周绍安²

(1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

(2. 大连大学, 辽宁 大连 116622)

摘要: 无掩模定域性电沉积-增材制造技术是采用电化学沉积原理、摒弃掩模与支撑、以增材制造方式实现三维金属微结构制造的一种新技术。本文综述了体现该技术核心内容与工艺特征的代表性技术: 介绍了无掩模定域性喷射电沉积-增材制造技术和无掩模定域性直写电沉积-增材制造技术的基本原理和研究现状, 分析了 2 种技术各自的特点、存在的问题和今后的研究发展趋势。

关键词: 无掩模; 定域性喷射电沉积; 定域性直写电沉积; 增材制造; 金属微结构

中图分类号: TQ153.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)02-0693-08

增材制造技术 (additive manufacturing, AM) 是一种采用材料逐渐累加堆积成具有一定结构和功能的实体零件或原型的先进制造技术, 是当前材料制备科学和先进制造技术学科领域的国际前沿研究和竞争热点之一^[1]。电沉积-增材制造技术 (electrochemical deposition-additive manufacturing, ECD-AM) 是采用电化学沉积原理、以增材制造方式获得高深/宽比、具有复杂形状三维金属微结构的一种新技术^[2,3]。通过把常规增材制造技术所特有的 CAD 三维造型、分层切片、数据处理、扫描路径优化与 CNC 控制等技术特点与电沉积在室温下连续进行、沉积层内应力小、加工表面质量好、无热变形、无裂纹缺陷等特点相结合, 既可以避免常规增材制造技术以激光、电子束为热源造成高热残余应力、氧化相变偏析、气孔、裂纹、夹杂、未熔合等缺陷及成形件的力学性能不佳与尺寸精度不高等问题^[4], 也可以发挥在电沉积过程中材料的转移是以离子尺度进行, 可以达到微纳加工精度的优势, 从而实现高精度、高性能、复杂三维金属微结构的加工目标^[5-7]。

由于电沉积-增材制造技术的显著特点, 近年来, 在复杂线条式图案、微型金属零件与三维微结构制造方面, 一直受到国内外研究机构和学者的关注。所采用的技术及开展的相关研究主要包括 LIGA 及其衍生技术、常规掩模板的定域性电沉积-增材制造技术、多层模板叠加的定域性喷射电沉积-增材制造技术和无掩模定域性电沉积-增材制造技

术^[8-13]。目前, 见诸报道的无掩模定域性电沉积-增材制造技术主要有两种: 一种是以小直径喷嘴为阳极的喷射电沉积-增材制造技术, 另一种是以微型探针和微型喷嘴为阳极的直写电沉积-增材制造技术。无掩模定域性电沉积-增材制造过程无需掩模和支撑结构, 以类似于圆锥状探针式、喷嘴式微型阳极在阴极表面的“直写”方式进行, 或以小直径喷嘴为阳极并通过计算机控制微细电解液束流相对于阴极的运动轨迹完成电沉积-增材制造过程, 不存在掩模 (板) 和支撑结构的制作、叠放、去除等工序, 因而具有工艺过程简单且可在导电基板任意位置沉积的优势。由于无掩模定域性电沉积-增材制造技术体现出较大的工艺难度和富有挑战性的研究内容, 使其成为电沉积-增材制造技术领域的研究热点^[14,15]。

1 无掩模定域性电沉积-增材制造技术

1.1 无掩模定域性喷射电沉积-增材制造技术

无掩模定域性喷射电沉积-增材制造技术, 是基于喷射电沉积与一般的快速成形原理成形三维实体结构或金属零件, 具体加工过程为: 在电沉积成形过程中, 电解液从阳极 (喷嘴) 高速喷向阴极 (基体), 阴阳极之间通过电解液形成循环回路; 通常采用较大的极间距 (一般为数 mm) 和较高的电流密度; 数控系统根据读取的数控代码信息来控制喷嘴与阴极的相对移动; 在电场作用下, 被还原的金属离子在电解液射流覆盖区发生

收稿日期: 2018-07-03

基金项目: 国家自然科学基金 (51741501); 辽宁省自然科学基金计划项目 (20180550227)

作者简介: 贾卫平, 女, 1971 年生, 博士生, 大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024, 电话: 0411-87403534, E-mail: jiaweiping_dl@163.com

区域性沉积,有选择地在阴极表面沉积出与三维微结构 CAD 模型“切片”相匹配的各沉积层,经过“多点(沉积斑)成面→多面成层→多层叠加”形成三维实体。

无掩模区域性喷射电沉积-增材制造技术,由于电解液以射流形式高速流动,电化学沉积过程中沉积区域内基本不存在电解液传质问题,但成形过程受喷嘴直径(数百 μm 至数千 μm)、沉积斑尺寸(大于喷嘴直径)、射流冲击、极间距等射流工艺因素限制,成形精度较低且无法成形高深/宽比、结构复杂的三维实体结构或金属零件,主要用于制备纳米晶二维金属基(复合)镀层和制作结构简单且小深/宽比的金属线条式图案、中小型三维金属结构与零件。从严格意义上看,所制备的这种三维金属结构是 2D 或 2.5D 结构。

各国学者在无掩模喷射电沉积-增材制造技术制备三维金属结构的研究中,针对喷嘴、电沉积工艺参数、辅助工艺方法对成型件制备的影响进行了研究,并制备出多种较简单形状的三维金属结构。

陈劲松^[16]针对喷嘴口径对喷射电沉积速度、成形精度、扫描间隔等参数的影响进行了研究,采用优化的工艺参数制作了三角形、正方形和五角星这类简单形状的金属铜样件。研究发现,喷嘴口径与区域性关系密切,喷嘴口径小,则区域性好、尺寸精度高;制备的简单形状样件在 X、Y 方向的尺寸精度可达到 10 ± 0.1 mm、圆角半径的尺寸精度 < 1.5 mm,样件沉积层组织致密、晶粒均匀,具有纳米晶微观组织结构,平均晶粒尺寸约为 40 nm。

Rajput 等人^[17]在选择性喷射电沉积制作三维微结构的工艺研究中,分析了电压对沉积速率的影响。根据欧姆定律,电压与流过电解质的电流成正比,而由法拉第定律可知,沉积速率取决于流过电解质的电流,所以沉积速率与电压有一定关系。采用直径 137 μm 的圆形喷嘴,将喷嘴和工件之间的距离控制在 2~4 mm,制作出如图 1 所示的平均直径 230 μm、长 1.78 mm 的针状零件和边长 1.5 mm 的正方形零件。实验结果验证了电沉积主要在电解液射流撞击的点周围选择性地发

生。同时研究中发现,与针状类简单轴状特征的零件比较,对于正方形这类具有复杂特征的工件,由于金属离子在工件表面不均匀分布引起电流不均匀进而导致边缘效应,会影响三维微结构的成形精度。

Haan 等人^[18]按照电子束蒸发、喷射循环电沉积、化学蚀刻的工艺流程,对在非导电材料(玻璃、塑料、陶瓷)基底上进行无掩模区域性喷射电沉积-增材制造开展了研究。其中,在非导电材料上采用电子束蒸发喷射种子层和化学蚀刻去除种子层并清洁基板。使用外径为 290 μm 的 2 个同心喷嘴电极定域循环喷射电解液以实现快速选择性电沉积,分别在不同基体材料上(PE、ABS、钙钠玻璃)喷镀出线宽宽度为 430 μm、高度为 28 μm 的金属铜图案,如图 2 所示。研究表明,在没有特定掩模情况下,通过调整喷射循环电沉积参数

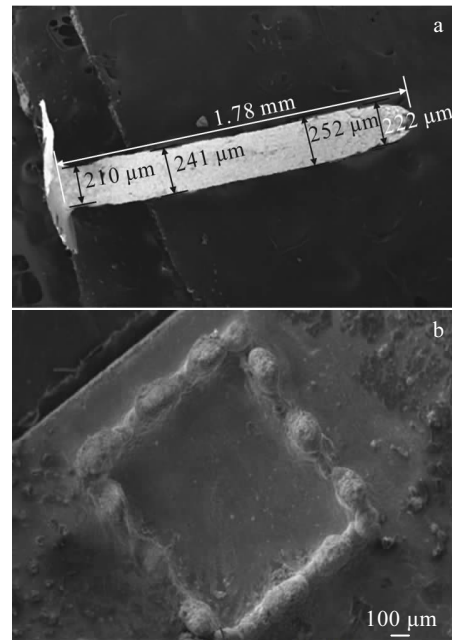


图 1 区域性喷射电沉积制造的针状和正方形铜三维微结构
Fig.1 3D copper microstructure prepared by localized jet deposition: (a) pin-like part and (b) square-shaped part^[17]



图 2 PE、ABS 和钙钠玻璃材料上制备的金属铜图案

Fig.2 Copper pattern metallization on polyethylene (PE) (a), acrylonitrile butadiene styrene copolymer (ABS) (b), and soda lime glass (c)^[18]

(电沉积模式、电解液喷射压力和平均电流)可控制沉积图案高度；而喷射压力是影响沉积的重要因素。

在区域性喷射电沉积-增材制造技术中应用辅助工艺可提高沉积层性能。Wang 等人^[19]采用多次喷射电沉积 (MJED) 制备多层膜并实时对沉积层表面进行抛光的无掩模区域性喷射电沉积-增材制造技术, 成功制备出了如图 3 所示的厚达 1.2 mm、具有亚镜面表面和硬度一致性良好的 Ni-Cu 多层膜。对比沉积层实时抛光前后看出, 多层膜的规则性和显微硬度明显提高。分析认为, 这是颗粒的抛光与表面突起的生长之间获得平衡的结果。与纯镍沉积层比较, 多层膜能够折叠成具有良好柔韧性的各种形状; Rajput 等^[20]采用脉冲电源超声波辅助喷射电沉积技术制作纳米晶铜微型件, 针对脉冲电流频率和占空比对沉积层微观组织特征、纳米晶粒尺寸、显微硬度的影响进行了实验研究, 获得了边长约 500 μm 、环宽约 160 μm 的正方形纳米晶铜微器件, 制件的晶粒尺寸在 240~4000 nm 之间, 显微硬度在 800~1220 MPa 之间。研究结果表明: 在超声波辅助喷射电沉积技术中, 通过合理控制脉冲频率和占空比, 能够得到不同晶粒尺寸的零件, 进而能够改善零件的机械性能; Wang 等^[21]采用扫描摆动式无掩模区域性喷射电沉积-增材制造方法, 通过计算机数控控制射流喷嘴运动轨迹, 将树枝状晶体引导在所需方向生长, 制备出了如图 4 所示的具有所需几何形状的块状多孔金属 Ni 和多孔金属 Cu。从图中可看到, 多孔金属呈现非常均匀且一致排列的长孔, 但由于目前尚未实现对凝固过程的有效控制, 因此难以获得均匀分布、尺寸一致的多孔金属。

Rajput 等^[22]针对高速选择性无掩模区域性喷射电沉积-增材制造工艺难以控制的问题, 开展了相关的建模研究并进行了实验验证。结合相关的输入工艺参数 (电压, 金属离子浓度和电极间间隙), 建立了预测沉

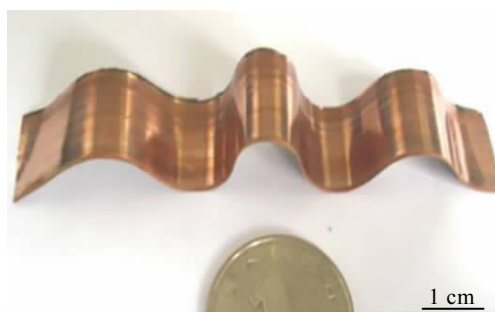


图 3 多次喷射电沉积并抛光制备的 Ni-Cu 折叠多层膜

Fig.3 Ni-Cu folded multilayered deposit prepared by MJED with polishing^[19]

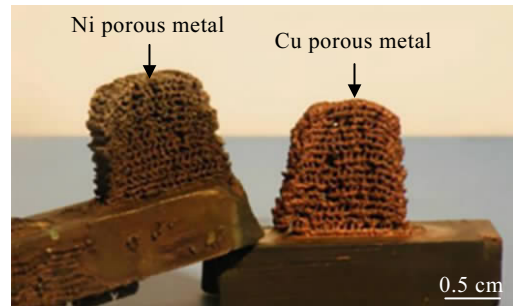


图 4 块状多孔金属 Ni 和 Cu

Fig.4 Bulk porous metal Ni and porous metal Cu^[21]

积速率和沉积高度的数学模型, 该模型还可预测基底表面的电位梯度分布和射流中的电位分布。研究发现, 电压和电极间间隙对射流中的电位分布以及基底表面的电位梯度分布影响明显; 数学模型和实验得到的沉积速率与沉积高度的影响趋势一致。

无掩模区域性喷射电沉积-增材制造技术由于自身工艺特性 (如: 射流沉积斑尺寸相对较大, 存在射流冲击作用, 较大的极间距下定域性不高、存在电沉积“边缘效应”和“尖端效应”等) 所限, 在制作三维实体结构与金属零件方面存在下列主要问题: 1) 定域性差及高电流密度分布下晶粒结晶的不稳定^[23]; 2) 流场及电场的均匀性及稳定性减弱导致电沉积过程无法均匀稳定地持续进行^[24,25]; 3) 可制作简单的连续微结构, 但无法制作出高深/宽比、结构复杂、成形精度高的三维实体微结构与金属零件^[4,17,26]; 4) 无法在高沉积效率基础上大幅度提高制件尺寸精度和形状精度^[23,25]; 5) 影响共沉积过程的工艺参数 (喷嘴和阴极表面的间距、喷嘴在共沉积过程中的移动速率、喷嘴的形状和面积等) 需进一步优化^[27]。今后的研究将集中在如何解决定域性差、晶粒结晶不稳定、复合镀层组织疏松与硬质颗粒分布不均等技术瓶颈, 进一步改进工艺参数并拓展应用范围, 与其它特种加工工艺 (超声、快速成形、柔性摩擦等) 结合形成耦合效应, 提高沉积厚度及其均匀性、硬质颗粒含量及其分布均匀性和制件尺寸精度及形状精度^[28,29]。

1.2 无掩模区域性直写电化学沉积-增材制造技术

无掩模区域性直写电化学沉积-增材制造技术 (即电化学 3D 打印技术) 是一种将区域性直写电化学沉积技术与增材制造技术有机结合的新技术, 其基本原理如图 5 所示^[4]。该技术的核心思想是: 采用 CAD 三维设计软件完成三维结构设计, 再通过专用快速成形软件对模型进行切片处理; 摒弃专用掩模或模板并采

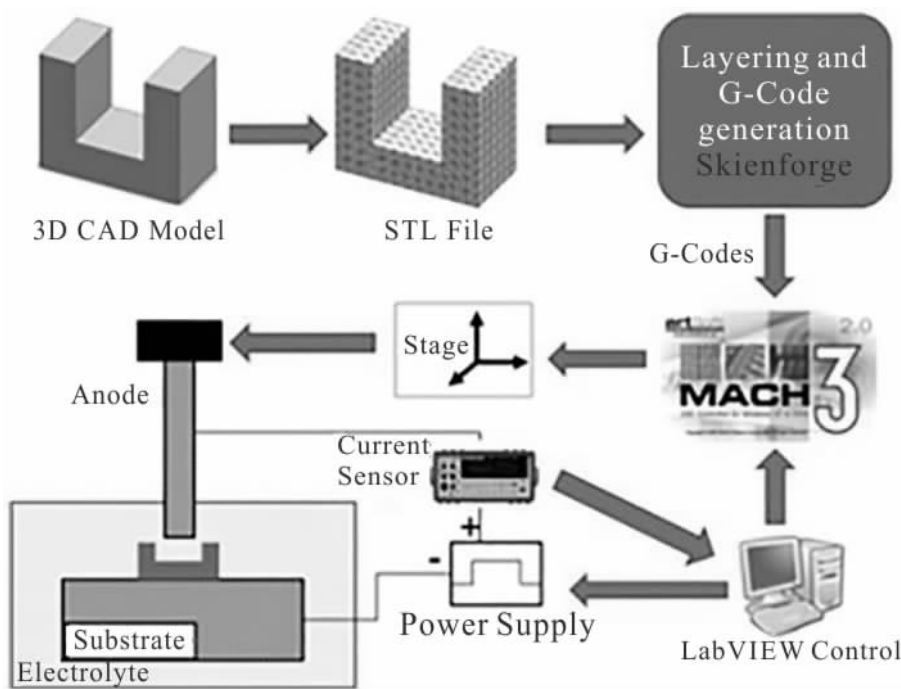


图 5 无掩模区域性直写电沉积-增材制造技术的基本原理图

Fig.5 Basic principle diagram of maskless localized direct writing ECD-AM^[4]

用区域性直写电化学沉积方式，在计算机指令控制下连续电化学沉积出与模型各“切片”形状及厚度一致的金属薄层，逐层累加，最后形成三维实体。在电化学沉积成形过程中，采用头部圆角半径为数微米的尖锥状探针式微型阳极或喷嘴式微型阳极、微小的极间距（一般为数十微米以内）和一定的电流密度，由阳极尖端与阴极基板之间微区域内流动的高浓度电解液形成回路，在两极间微区域中产生的强电场作用下，通过“尖端效应”，电解液中被还原的金属离子被“限定”在阳极尖端对应的微区域发生沉积；数控系统根据读取的数控代码信息控制微型阳极头部相对于阴极按照设定的轨迹移动，以“直写”方式进行连续电化学沉积，实现“多点成线→多线成面→多面成层”、由下至上逐层生成与三维微结构的第 1、第 2、…、第 n 个 CAD 模型“切片”相匹配的分层轮廓实体，最后获得与模型相一致的三维实体结构或金属零件。

由于无掩模区域性直写电化学沉积-增材制造过程是在室温电解液中进行，不存在常规增材制造中高热形成的各种缺陷；电化学沉积是离子级沉积方式且发生在微电极尖端对应的微区域，使得形成微纳结构成为可能；电化学沉积过程无需掩模和支撑结构，以类似于微型阳极尖端在阴极表面的“直写”方式进行，具有可在导电基板任意位置沉积的优势。可利用该技

术实现较高成形精度、高深/宽比、结构复杂的三维金属微结构的制作。

根据对目前公开报道的有关文献资料分析，各国有关学者所开展的无掩模区域性直写电化学沉积-增材制造技术研究，尚处于初期探索研究阶段，研究内容及其成果主要体现在电沉积增材制造过程有限元仿真、数值模拟研究、主要工艺参数（极间间隙，阳极结构，脉冲电压，脉冲电流等）对电化学沉积过程的影响方面，也有对提高沉积速率的增材制造实验系统进行的改进研究。

Sundaram 等^[4]利用实验系统内置的 CNC 系统与电化学体系，根据相应 CAD 模型生成 STL 文件，使用尖锥状微型电极，逐层进行区域性电化学沉积，成功制做出如图 6 所示的高度和悬突都约为 600 μm 的镍质三维自由悬挂构件；以及利用实验系统内置的 CNC 系统与电化学体系，根据相应 CAD 模型生成 STL 文件，经过约 5 h 逐层区域性电化学沉积，制做出由 30 层沉积层叠加而成，每层厚度为 10 μm 的字母“C”微型结构。

Luca Hirt 等^[30]使用中空的 AFM 扫描探针作为微型阳极，电沉积过程中采用低电势电位（-0.7 V，相对于银参比电极），电解液在 $(1\sim 16)\times 10^2$ Pa 压力下流经中空悬臂并从探针（阳极）尖头部流出；利用（由

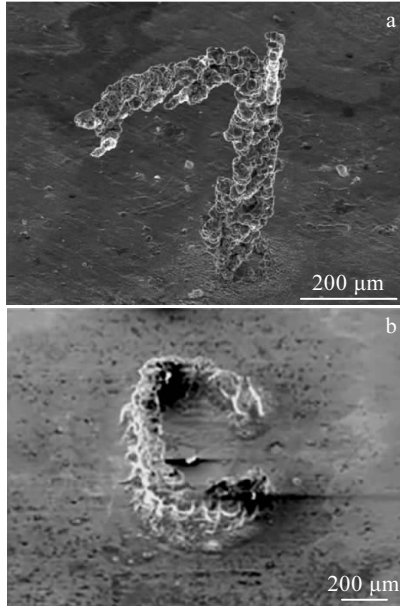


图 6 镍质自由悬挂微结构和 C 型微结构

Fig.6 Nickel microstructure: (a) free hanging microstructure and (b) C type microstructure^[4]

AFM 激光束检测的)扫描探针中空悬臂实时偏转信号对微电化学沉积进行原位控制, Z 方向打印速度 $\approx 250\sim 500\text{ nm/s}$, 制作出组织致密、机械稳定性好、高深/宽比的三维金属(铜)微结构:深/宽比达 75:1、单柱直径 $0.3\sim 1\ \mu\text{m}$ 的微圆柱阵列,厚 $1\ \mu\text{m}$ 、高 $15\ \mu\text{m}$ 的简单壁结构,如图 7 所示;除此之外,还制造出内部空心的花瓶及 90° 和 100° 角的臂状悬垂结构,实现了较复杂三维金属微结构的无掩模区域性电沉积增材制造。

Brant 等^[31]针对 CAD 模型直写方式制造金属结构,提出用定域电化学沉积工艺参数作为建模输入参数的元素分析方法。该研究从三维微型结构几何特征出发建立 CAD 模型,同时考虑与图形特征相对应的电沉积工艺参数共同结合,获取数据信息开展有限元仿真研究;并通过仿真与实验,探索电沉积过程中工艺参数的变化及边界条件的改变对“微构件”质量和性能的影响。发现电极直径、电极间隙、电压、电解质浓度和占空比 5 个参数对沉积层质量影响的主次关系,其仿真模型预测与电沉积实验的误差率为 $8\%\sim 30\%$;另外,所在团队^[32]开展以纳米尺度制造复杂 3D 零件的纳米电化学增材制造研究,提出了分子动力学和量子力学电子力场相结合的计算架构,研究纳米尺度电沉积增材制造过程的基本特性,描述了临界极间距与电沉积的关系。研究发现,当极间距小于临界值时,会发生无法通过减小电流来解决的电子隧道行为,

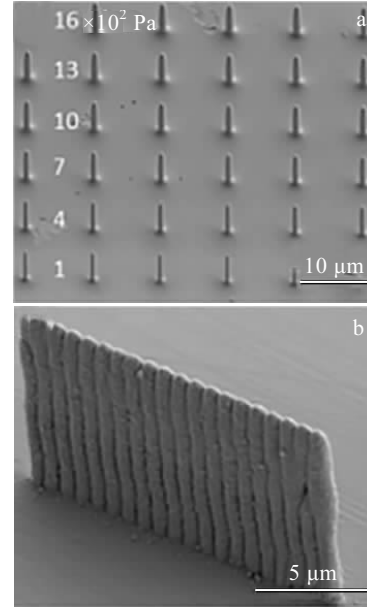


图 7 微圆柱阵列和简单壁状铜质三维微结构

Fig.7 3D copper microstructure: (a) microcylindrical array and (b) simple wall structure^[30]

这种电子隧道效应意味着电子不能引起电解液中的金属离子沉积到阴极基底上。同时研究发现,纳米尺度电沉积增材制造过程存在一个合理的电解液浓度值,以获得较好的沉积速率和沉积效率。

Kamaraj 等^[15]在开展区域性电沉积过程数值研究中,通过模拟电沉积过程中超微电极附近离子团的迁移研究其扩散特性,以了解工艺参数(电极尺寸,极间间隙和电压)的影响规律。研究表明:极间间隙值对控制电沉积过程中离子迁移/扩散现象有显著的影响,较小的间隙可形成较高的电流密度,但由于离子完全耗尽区的形成,会导致不均匀沉积现象。

俞庆华^[33], Chen 等^[34]基于传统的金首饰电镀工艺,用装有电解质的注射器替代熔融沉积造型 3D 打印机热端,实现电化学 3D 打印,改进后的电化学 3D 打印装置如图 8 所示。通过装载有铜离子溶液注射器的微型喷嘴(阳极)将金属离子溶液以微小的液滴沉积到导电基板(阴极)上,注射器管中装有多孔海绵,多孔海绵能够为液压头提供足够的背压稳定弯液面,然后施加外部电压将溶液中的金属铜离子还原成基本成分并沉积在导电基板上,通过控制微型喷嘴(即打印头)逐步移动,以电化学 3D 打印(增材制造)方式逐层构建金属部件。改进后的 3D 打印装置沉积速率提高了 3 个数量级,解决了电化学增材制造沉积速度局限性的问题。

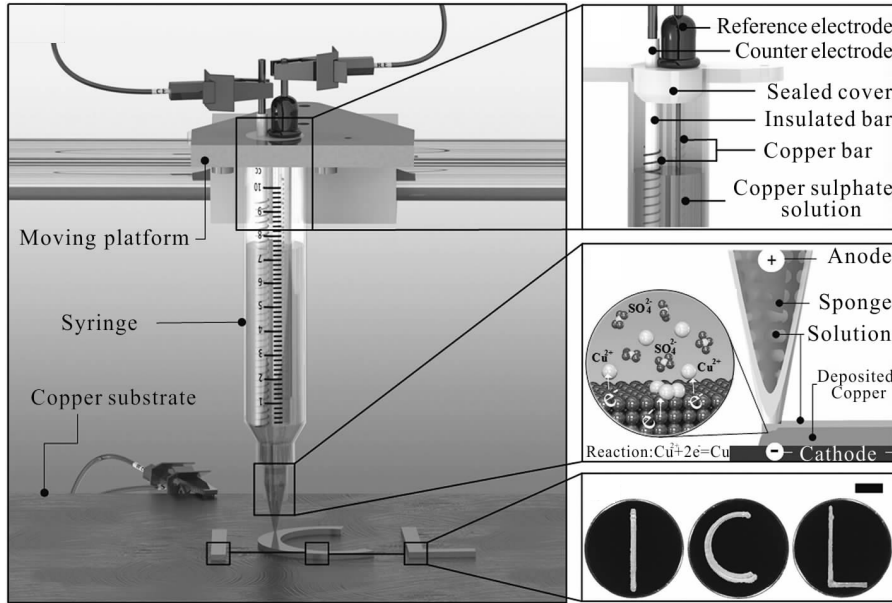


图 8 电化学 3D 打印装置示意图

Fig.8 Schematic illustration of the electrochemical 3D printer^[34]

Hu 等^[35]将直写电化学沉积增材制造技术应用于电子工业中连接集成芯片与电路板所用的引线键合工艺的实验研究。实验中采用极间间隙为微纳米尺度的弯月形电解液团作为电化学微反应池,在微移液管(内含作为阳极的不溶性导电微丝体、出口直径 100 nm 至数微米)出口与阴极间形成连续稳定的微液桥,在电场作用下,微液桥内的金属离子还原为原子并堆积在阴极上,并使电化学沉积局限于微池内以成形三维金属微结构。在电化学沉积过程中,通过实时控制出液量、电流量、移液管三维微移动方向与移动量等参数,使微型喷嘴以与沉积速度相匹配的速度作微量和精确的空间运动,获得了具有微/纳米级集成芯片铜/铂微连接线,如图 9 所示。该方法能实现复杂微纳线状结构的成形,具有较好的灵活性及相对较低的成本,但该技术对微型喷嘴的空间微小运动速度与电化学沉积速度相匹配程度的要求极高,实施条件苛刻且加工速度极慢^[36]。

聂昕等^[37]在电化学沉积过程中引入同步脉冲激光,研究了脉冲激光效应对电沉积晶粒和表面形貌的影响。研究发现,脉冲激光的冲击作用能够形成独特的搅拌效应,可有效改善电化学沉积微区域液相传质环境,增大阴极过电位,细化晶粒明显,进一步减少沉积体内部的气孔。并且采用无掩模区域性直写电化学沉积-增材制造技术方式,在 304 不锈钢板上逐层堆积得到由 75 层沉积层构成的铜基圆环状沉积体(高度

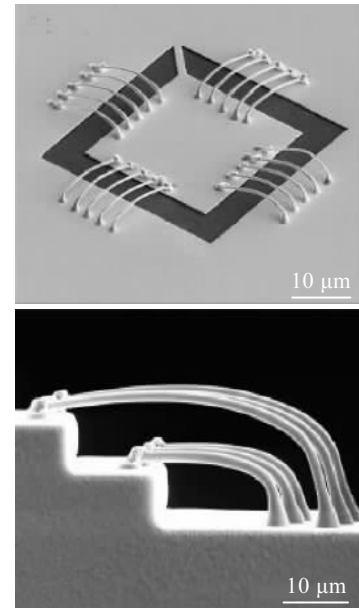


图 9 微/纳米级金属集成芯片微连接线

Fig.9 Micro/nano metal integrated chip connection lines^[35]

约 0.45 mm, 直径约 2 mm)。

无掩模区域性直写电化学沉积-增材制造技术存在的主要问题如下: 1) 实验获得的三维微结构其尺寸精度及形状精度与 CAD 模型相比存在较大差别; 2) 针对无掩模区域性直写电化学沉积-增材制造技术研

究所涉及的基础理论(如:微区域电极反应动力学机理及其特征,极间微区域电解液传质过程及特性,微区域电流分布特性,无掩模区域性电沉积增材制造过程特征)尚未形成,仍需对其开展全面、深入、系统的研究;3)开展无掩模区域性直写电沉积-增材制造的关键技术(如:阴极表面微区域电流分布均匀性控制,极间微区域电流密度一致性控制,极间间隙与电流稳定性控制,微区域电解液高效传质过程控制,沉积层厚度均匀性与沉积速度一致性控制,三维微结构尺寸精度与形状精度控制、制件表面的在线光整技术等)尚未得到有效解决;4)有关无掩模区域性直写电沉积-增材制造技术的相关工艺研究内容(如:与电沉积工艺特征相适配的三维微结构CAD模型建立与切片处理、工艺特性与主要工艺参数的内在关系,沉积体致密晶态组织形成机制与性能分析,微型阳极设计与制造,CNC系统-电沉积体系设计等)仍需完善。

2 结语与展望

1) 无掩模区域性电沉积-增材制造过程无需掩模和支撑结构,不存在掩模(板)和支撑结构的制作、叠放、去除等工序,因而具有工艺过程简单且可在导电基板任意位置沉积的优势。

2) 无掩模区域性喷射电沉积-增材制造技术具有可用电流密度大、电流效率高,金属结晶细化的优点,同时电沉积过程中沉积区域内基本不存在电解液传质问题,有利于获得均匀、致密的纳米晶镀层和金属零件。但由于自身工艺特性所限,适于制作成形精度要求不高、结构简单的三维实体结构与金属零件或制备均匀、致密的金属基纳米晶复合镀层。

3) 无掩模区域性直写电沉积-增材制造技术的研究虽然目前处于初期探索阶段,实验获得的三维微结构其尺寸精度及形状精度与CAD模型相比还存在较大差别,其基础理论、关键技术及相关工艺研究内容尚需进一步解决与完善,但由于其特有的微区域内“直写”连续电沉积方式,该技术更适于制作较高成形精度、高深/宽比、结构复杂的三维金属微结构,具有更好的发展前景。

4) 无掩模区域性喷射电沉积-增材制造技术今后的研究发展趋势将集中在如何解决区域性差、晶粒结晶不稳定、复合镀层组织疏松与硬质颗粒分布不均等技术瓶颈,以及如何进一步提高沉积厚度均匀性和制件尺寸精度及形状精度。无掩模区域性直写电沉积-增材制造技术今后的研究发展趋势将集中在如何形成公认的基础理论、有效地解决微区域内“直

写”式连续电沉积所涉及的关键技术问题及如何进一步完善相关工艺研究内容。

参考文献 References

- [1] Kuo Chilchuan, Chen Weihua, Li Jainfu *et al.* *Int J Adv Manuf Technol*[J], 2018, 94(1-4): 1533
- [2] Braun Trevor M, Schwartz Daniel T. *The Electrochemical Society Interface*[J], 2016, 25(1): 69
- [3] Hernández P, Campos D, Socorro P *et al.* *Procedia Engineering*[J], 2015, 132: 655
- [4] Kamaraj Abishek B, Sundaram Murali M, Kumar Varun S. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2015, 137(2): 021006-1
- [5] Barnal Shama F, Ramanathan Arun, Jacobs Kyle E *et al.* *Procedia Manufacturing*[J], 2017, 10: 641
- [6] Wei Lei(魏雷), Lin Xin(林鑫), Wang Meng(王猛) *et al.* *Aeronautical Manufacturing Technology(航空制造技术)*[J], 2017, 13: 16
- [7] Omar Fergani, Steven Liang, Mohamed Elmansori *et al.* *ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference*[C]. Los Angeles: ASME Publishing, 2017, 2: V002T01A007
- [8] Derevyanko D I, Shelkovnikov V V, Orlova N A *et al.* *Physics Procedia*[J], 2017, 86: 122
- [9] Du Liqun(杜立群), Tao Yousheng(陶友胜), Li Yuanqi(李爱琪) *et al.* *Aeronautical Manufacturing Technology(航空制造技术)*[J], 2017, 14: 24
- [10] Habib Mohammad Ahsan, Rahman Mustafizur. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2016, 24: 78
- [11] Wang Guifeng, Tian Zongjun, Liu Zhidong *et al.* *Int J Electrochem Sci*[J], 2015, 10(8): 6844
- [12] Shailendar Shiv, Sundaram Murali M. *Procedia Manufacturing*[J], 2016, 5: 132
- [13] Brant Anne, Sundaram Murali M. *Procedia Manufacturing*[J], 2016, 5: 928
- [14] Lv Hui(吕辉), Jiang Bingyan(蒋炳炎), Weng Can(翁灿) *et al.* *Journal of Central South University, Science and Technology(中南大学学报,自然科学版)*[J], 2017, 48(5): 1211
- [15] Kamaraj Abishek, Lewis Spenser, Sundaram Murali. *Procedia CIRP*[J], 2016, 42: 788
- [16] Chen Jinsong(陈劲松). *Journal of Materials Science & Engineering(材料科学与工程学报)*[J], 2012, 30(4): 508
- [17] Rajput Mridul S, Pandey Pulak M, Jha Sunil. *Int J Adv Manuf Technol*[J], 2015, 76: 61
- [18] Kim Haan, Kim Jang Gil, Park Jong Wuk *et al.* *Precision*

- Engineering*[J], 2018, 51: 153
- [19] Wang Guifeng, Shen Lida, Dou Linming *et al. Int J Electrochem Sci*[J], 2014, 9(1): 220
- [20] Rajput Mridul S, Pandey Pulak M, Jha Sunil. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*[J], 2014, 228(11): 1338
- [21] Wang Guifeng, Shen Lida, Dou Linming *et al. Int J Electrochem Sci*[J], 2014, 9(6): 3319
- [22] Rajput Mridul Singh, Pandey Pulak Mohan, Jha Sunil. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2015, 17: 98
- [23] Tian Zongjun(田宗军), Wang Guifeng(王桂峰), Huang Yin-hui(黄因慧) *et al. Journal of South China University of Technology, Natural Science Edition*(华南理工大学学报, 自然科学版)[J], 2010, 38(12): 41
- [24] Clare Adam T, Alistair Speidel, Jonathon Mitchell-smith *et al. CIRP Annals-Manufacturing Technology*[J], 2017, 66(1): 201
- [25] Ming Pingmei(明平美), Li Xinchao(李欣潮), Zhang Xinmin(张新民) *et al. Scientia Sinica Technologica*(中国科学: 技术科学)[J], 2018, 48(4): 347
- [26] Ma Shiwei(马世伟), Chen Jinsong(陈劲松), Tian Zongjun(田宗军). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2016, 45(6): 9
- [27] Wang Meng(王 猛), Tan Jun(谭 俊), Wu Di(吴 迪). *Materials Review*(材料导报)[J], 2016, 30(27): 112
- [28] Xia F F, Jia W C, Ma C Y *et al. Applied Surface Science*[J], 2018, 434: 228
- [29] Cui Wei, Wang Ke, Xia Fafeng *et al. Ceramics International* [J], 2018, 44(5): 5500
- [30] Luca Hirt, Stephan Ihle, Zhijian Pan *et al. Advanced Materials*[J], 2016, 28(12): 2311
- [31] Brant Anne, Sundaram Murali M, Kamaraj Abishek B. *ASME J Manuf Sci Eng*[J], 2015, 137(1): 011018-1
- [32] Brant Anne M, Sundaram Murali. *Procedia Manufacturing*[J], 2017, 10: 253
- [33] Yu Qinghua(俞庆华). *Machine Tool and Hydraulic*(机床与液压)[J], 2017, 45(22): 114
- [34] Chen Xiaolong, Liu Xinhua, Peter Childs *et al. Advanced Materials Technologies*[J], 2017, 2(10): 1 700 148
- [35] Hu Jie, Yu Minfeng. *Science*[J], 2010, 329(5989): 313
- [36] Farahani R D, Chizari K, Therriault D. *Nanoscale*[J], 2014, 6(18): 10470
- [37] Nie Xin(聂 昕), Zhang Chaoyang(张朝阳), Liu Gao(刘 皋) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2017, 44(4): 402 013

Research Progress of Maskless Localized Electrodeposition-Additive Manufacturing Technology

Jia Weiping^{1,2}, Wu Menghua², Jia Zhenyuan¹, Wu Jianhui², Zhou Shaoan²

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: Maskless localized electrochemical deposition-additive manufacturing technology is a new technique for manufacturing three-dimensional micro metal structures by applying electrochemical depositing principles and additive manufacturing methods without reliance on support or mask. The representative techniques which embody the core content and process features of the new technology were reviewed in this paper. The basic principles and research progress of the technology of maskless localized jet electrochemical deposition-additive manufacturing (Maskless Jet ECD-AM) and maskless localized direct writing electrochemical deposition-additive manufacturing (Maskless Direct Writing ECD-AM) were introduced. The characteristics, existing problems and future research trends of them were analyzed.

Key words: maskless; localized jet electrochemical deposition; localized direct-write electrochemical deposition; additive manufacturing; micro metal structure

Corresponding author: Jia Zhenyuan, Ph. D., Professor, Mechanical Engineering College, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China, Tel: 0086-411-87406741, E-mail: Jzyxy@dlut.edu.cn