外加能场辅助无掩模定域性电沉积三维金属微结构的研究进展

吴蒙华[1] 黄志维[1] 贾卫平[2*]
1.广东科技学院机电工程学院，东莞，523083
2.大连大学机械工程学院，大连，116622

摘要：在无掩模定域性电沉积（LECD）过程中引入激光、射流、超声波、磁场等能场，可以克服传统单一电沉积电场加工技术的局限性，满足某些特定性能需求。介绍了激光、流场、超声场、磁场等能场辅助无掩模LECD技术的作用原理、特点、代表性研究成果及其研究进展。业内学者的研究结果表明，在无掩模LECD金属三维微结构过程中，通过严格控制外加能场的强度、作用方向和时间等，合理利用外加能场与电沉积电场协同耦合产生的复合效应，可以减小电沉积缺陷，获得较高的电沉积效率、较好的表面质量、细晶化微（纳）米组织结构、较好的物理机械性能。深入开展外加能场协同下的金属微结构无掩模LECD技术研究，可精益性解决无掩模LECD-增材制造效率、精度、尺度之间的矛盾，拓展无掩模LECD技术的工艺极限。

关键词：外加能场协同；三维金属微结构；无掩模；定域性电沉积
中图分类号：TQ153
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.026 **开放科学（资源服务）标识码（OSID）**：

Research Progress in Maskless Localized Electrochemical Deposition Technology of 3D Metal Microstructures Assisted by External Energy Fields

WU Menghua[1] HUANG Zhiwei[1] JIA Weiping[2*]
1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Science and Technology, Dongguan, Guangdong, 523083
2.School of Mechanical Engineering, Dalian University, Dalian, Liaoning, 116622

Abstract: Introducing energy fields such as laser, jet flow, ultrasonic waves, and magnetic fields into the maskless LECD process can overcome the limitations of traditional electrodeposition and meet certain specific performance requirements. The working principles, characteristics, representative research achievements, and research progress of maskless LECD technique assisted by external energy fields, including laser, flow field, ultrasonic field, and magnetic field were introduced herein. Research results from scholars in the field indicate that in the process of maskless LECD for fabricating 3D metal microstructures, it is possible to reduce electrochemical deposition defects and achieve higher electrochemical deposition efficiency, better surface quality, refined micro/nano-scale grain structures, and improved physical and mechanical properties by strictly controlling the intensity, direction, and duration of the applied energy fields, and rationally utilizing the composite effects generated by the synergistic coupling of external energy fields and the electrochemical deposition electric field. Conducting in-depth research on maskless LECD technology for preparing metal microstructures under the synergy of external energy fields may resolve the conflicts between efficiency, precision, and scale in maskless LECD-additive manufacturing in a refined manner and expand the process limits of maskless LECD technique.

Key words: external energy fields assisted; 3D metal microstructures; maskless; localized electrochemical deposition (LECD)

0 引言

金属微结构无掩模定域性电沉积（localized electrochemical deposition，LECD）技术是近年来快速发展的一种基于电沉积原理、结合增材制造理念的微细电化学加工技术，是近年来国内外先进制造技术学科和材料制备学科领域国际前沿研究和竞争热点之一[1-4]。无掩模LECD技术省略了常规电沉积过程中掩模板与支撑结构的制备和去除流程，具有沉积定域性高、在基底上自由选择沉积位置、成形尺寸与形状多样化、耗材成本较

收稿日期：2026-01-11
基金项目：国家自然科学基金（51875071）；广东省普通高校科研重点专项（2023ZDZX3048）

低、致密成材和精密成形等显著特点，可在低要求环境中实现铜、镍、金等金属复杂微纳结构的成形，沉积体表面质量好，无表面应力、热变形、裂纹缺陷，不存在传统增材制造过程中由于高能量输入导致的高热残余应力、氧化相变偏析、裂纹、孔隙、夹杂、未熔合等焊接缺陷[5-7]。然而传统无掩模LECD技术仅通过微纳电极控制金属生长，受限于扩散控制机制，存在电场分布不均匀、金属沉积定域性差的问题；对沉积效率的追求导致表面粗糙度增大和内部缺陷，影响了微结构成形精度和质量，进而降低结构力学性能[8-9]；复杂非圆形横截面三维特征结构的制造仍面临各种挑战[10]。

外加能场协同机制是一种多物理场耦合、将多种物理场功能整合到同一加工场中的创新加工机制，可以克服传统单一能场加工技术的局限性，使不同能场之间的相互作用产生复合效应[11]。在外加能场作用下，无掩模LECD过程中金属离子会发生迁移、加速，并对微动特性产生影响，进而改变沉积物的最终表面质量；外能量场的加入不仅作用于金属离子，根据能量守恒定律，输入的能量还会使电解质溶液活化，进而影响沉积效果[12]。

近年来，在无掩模LECD过程中引入激光、射流、超声波、磁场等能场，通过一种或几种能场与电场的协同、耦合，严格控制外加能场的强度、作用方向和时间等，以期减小电沉积缺陷，获得较高的电沉积效率、较好的表面质量、细晶化微(纳)米组织结构、较好物理机械性能的金属微结构，达到“1+1>2”的效果或满足某些特定性能需求，已成为国内外业内共识并取得了较多的研究与少量的应用成果[8,10-11]。目前针对外加能场协同下的金属微结构无掩模LECD技术研究还存在外加能场协同作用机理研究不深入具体、数值仿真与验证试验不完善等问题[8,13]。

随着电子信息、高端装备、精密仪器制造等的快速发展，对金属微结构制备技术提出了更高的要求，如制备出的金属三维微结构在具有良好表面形貌、较高形状精度与尺寸精度的同时具有合理微观组织结构和突出的单一或综合物理机械性能等[14-15]。深入开展外加能场协同下的金属微结构无掩模LECD技术研究，对解决LECD-增材制造效率、精度、尺度、智能调控之间的矛盾，持续拓展无掩模LECD技术的工艺极限，具有重要意义。

1 外加能场辅助无掩模LECD技术

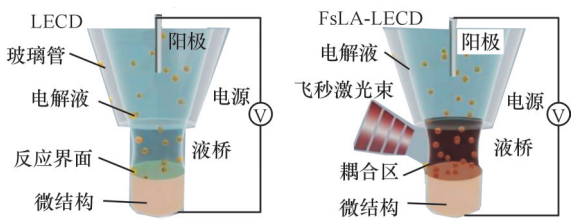
1.1 激光辅助无掩模LECD技术

传统无掩模LECD技术依赖离子扩散控制，效率与质量难以兼得。激光辅助无掩模LECD技术打破了传统扩散限制，通过光热效应与电场耦合，同时提高传质效率与反应动力学。激光作用通过“传质增强+反应加速”双机制，平衡了沉积效率与质量。通过对激光参数的精准调控，可实现“1+1>2”的协同效应[8]。

1.1.1 激光直接辅助无掩模LECD技术

对比常规的无掩模LECD技术，激光直接辅助无掩模LECD的显著特点是：飞秒/纳秒/皮秒激光直接辐照的热效应作用可以显著提高辐射区内临界电流值和阴极表面极限电流密度，增加电解液内能，加快金属离子还原反应速率，进而提高激光辐照区金属沉积速率，显著减小电沉积的晶粒尺寸[8,16-17]。近年来部分学者开展了关于激光直接辅助LECD三维金属微结构的研究并取得一定的研究成果，代表性研究如下。

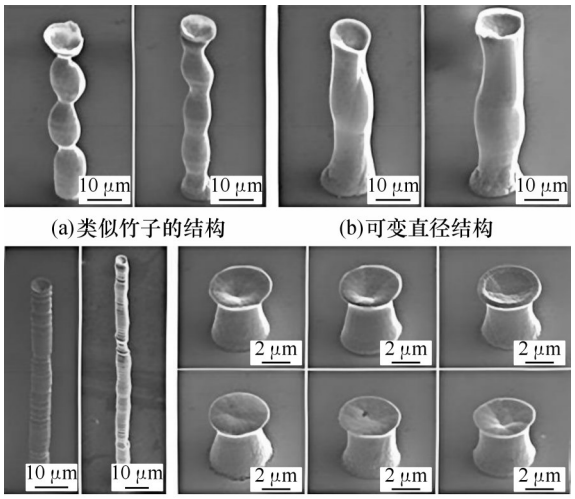
ZOU等[8]提出了一种飞秒激光直接辅助(Fs-LA)定域电化学沉积(FsLA-LECD)技术，其原理如图1所示。该团队探究了激光作用提高电化学沉积效率的机理：激光对阴极表面电子的热效应促进了金属离子的还原过程，加速了金属离子消耗；同时激光诱导的马兰戈尼效应以0.2 m/s的速率增强了电解液流动，保障了反应界面金属离子的及时补充；激光作用使电化学沉积过程电流显著增大，从而提高加工效率。从“点-面-体”演化全过程揭示了激光辅助对LECD传质过程、成核动力学及晶粒生长的作用机制。通过将飞秒激光辐照与电化学沉积微区精确耦合，利用激光在反应微环境中诱导的马兰戈尼效应增强微区电解液补充能力，使沉积电流密度显著提高，最终实现15.47 $\mu m^3/s$的体积沉积速率；同时，脉冲激光能量驱动阶梯式电流增大，从而在铜微结构内诱导纳米孪晶形成，使其屈服强度达到1.08 GPa，显著超越传统电化学沉积材料；通过激光调控沉积速率，成功制备出图2所示的等直径、竹节状及沙漏形等多种微结构，同步实现了高性能复杂金属微结构的高效制造。



(a)LECD原理　(b)飞秒激光辅助LECD原理

图1 LECD与FsLA-LECD技术的原理[8]

Fig.1 The principles of LECD & FsLA-LECD technology[8]



(a)类似竹子的结构　(b)可变直径结构

(c)高纵横比微柱　(d)沙漏形结构

图2　制备的复杂铜微观几何特征[8]

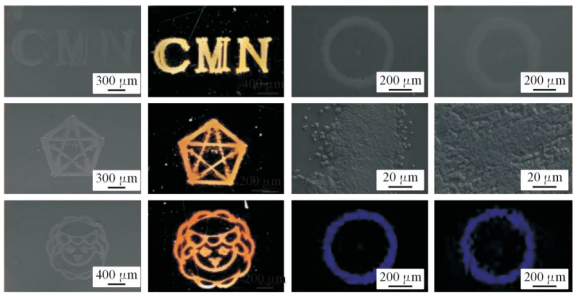
Fig.2　Manufacturing of complex copper micro-geometrical features[8]

1.1.2　激光间接辅助无掩模LECD技术

激光间接辅助无掩模LECD技术主要体现为飞秒/皮秒激光诱导LECD过程与LECD前的超快表面修饰处理。如：为LECD提供局部增强的电场和沉积位点、抑制LECD过程中的尖端效应等。其特点是利用激光热效应加热特定区域内的溶液至合适温度，并在加工路径附近的溶液中形成微区搅拌，提高微区域内的阴极电流密度和阴极的局部过电位，促进金属的LECD过程，显著提高电化学沉积速率[18-20]。近年来较多学者开展了关于激光间接辅助LECD的研究并取得较多的研究成果，以制备大面积准三维金属图案为主，代表性研究如下。

WEI等[18]通过开展飞秒激光诱导LECD技术研究，在不锈钢、钛、镍基底上高效制备出图3所示的不同铜质图案。实验结果显示，飞秒激光照射下的阴极电流比没有飞秒激光照射时增加了28%，最大体积沉积速率达到6.61×10^3 μm³/s，涂层厚度为9.8 μm，硬度为1.42 GPa，弹性模量为72.85 GPa。研究结果表明，飞秒激光的引入显著提高了目标区域内的阴极电流密度和阴极的局部过电位。由于飞秒激光具有较小的热影响区，故电解质对激光能量的吸收以及随后阴极的温度升高，大大促进了铜的定域性电沉积过程，为大面积多金属图案提供了一种新的制造解决方案。

XU等[19]采用超快激光表面修饰处理与无掩模LECD相结合的方法，通过使用聚焦的超快激光(波长1030 nm、脉冲重复频率1 MHz)，在抛光处理的304不锈钢基板表面烧蚀出多个纳米级浮雕结构，为电化学反应提供了局部增强的电场和

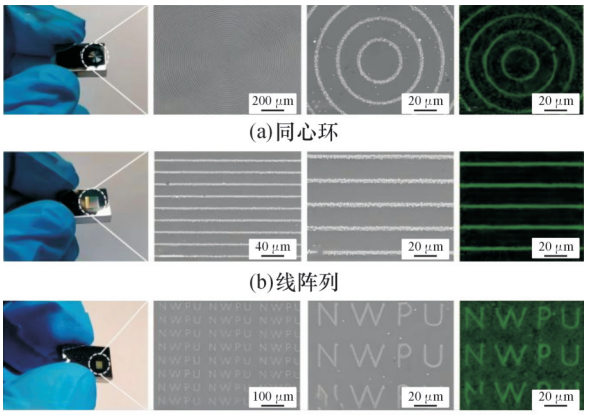


(a)沉积在不锈钢基底上图案的SEM图像　(b)沉积在不锈钢基底上图案的OM图像　(c)沉积在Ti基底上的铜质圆环图案的SEM和EDS图　(d)沉积在Ni基底上的铜质圆环图案的SEM和EDS图

图3　制备的字母“CMN”、星形、卡通羊和圆环图案铜质涂层[18]

Fig.3　Deposited copper patterns of “CMN”, star, cartoon sheep, and circular ring coatings[18]

沉积位点，使得微区域的电化学沉积速率显著提高。利用Comsol软件构建了激光结构化不锈钢基板表面电流密度分布及电化学沉积过程的仿真模型。通过数值模拟，从电场强度和Cu^{2+}通量分布的角度讨论了激光辅助无掩模LECD的机理，在较短时间(<10 min)里制备出图4所示的尺寸为16 mm²的微阵列Cu结构。



(a)同心环

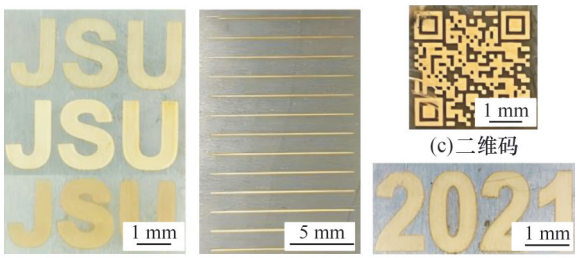
(b)线阵列

(c)NWPU阵列

图4　制备的浮雕结构(SEM和EDS)[19]

Fig.4　Images of the prepared relief structures (SEM & EDS)[19]

孙诗成等[20]在无掩模LECD过程中通过引入皮秒激光持续扫描工件(Cu，预先经过激光刻蚀)整个表面，利用激光热效应加热特定区域内的溶液至合适温度，并在加工路径附近的溶液中形成微区搅拌，在一定程度上抑制了电沉积过程中的尖端效应，进而控制Ni纳米锥结构的定域生长；常温(60 ℃)下制备的Cu微米锥和Ni纳米锥表面经化学改性后实现了超疏水表面(接触角为163°±2°，滚动角为1°±0.5°)。GUO等[21]采用单脉冲能量为6 μJ的激光诱导无掩模LECD方法制备出图5所示多种图案的准三维Au涂层。研究

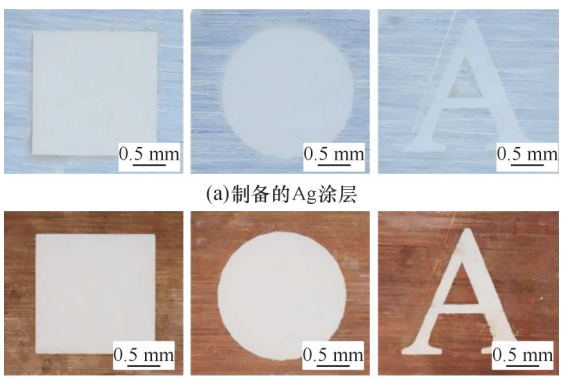


(a)字母“JSU” (b)直线条 (c)二维码 (d)数字“2021”

图5 制备的典型Au涂层表面图案[21]

Fig.5 Preparation of typical surface patterns[21]

结果表明：激光辐照的热效应可提高阴极极限电流及金析出电位，电沉积速率随着激光单脉冲能量增加而提高（达0.167 mg/min）；激光的热效应使金属离子在阴极的成核概率保持一致，减少了表面缺陷；激光照射会对金属基材表面产生清洁和平整的效果，从而减小涂层粗糙度值（Sa=0.98 μm）；使用适当的单脉冲能量可减小涂层尺寸公差，提高涂层的密度并使之具有更好的耐腐蚀性（自腐蚀电位φ_{corr}=−0.3059 V，自腐蚀电流密度j_{corr}=5.066×10^{-5} A/cm^2）。LENG等[22]在预镀Ag的Cu基板上进行激光诱导LECD准三维Ag涂层的实验研究，采用单脉冲能量为93 μJ的激光以交叉线扫描方式获得图6所示的平坦涂层（厚0.23 μm），具有较高尺寸精度（宽度标准差约7 μm）及良好的结合力和最大的电荷转移电阻（8.49×10^4 Ω/cm^2）；此外，还利用Comsol软件模拟了激光照射下压力场的空间分布，分析研究了激光照射下瞬态温度场的空间分布。研究结果表明：激光的热效应使得辐照区域的电位升高，导致辐照区域发生电化学反应；随着电位的增加，辐照区域的沉积速率远高于未辐照区域。此外，激光中心辐照区域与周围区域之间的热梯度形成了压力场，微区内产生的强烈搅拌为电沉积的持续进行提供了条件。



(a)制备的Ag涂层

(b)预镀层退镀后的Ag涂层

图6 激光单脉冲能量为93 μJ时制备的图案[22]

Fig.6 Patterns were prepared at a laser single pulse energy of 93 μJ[22]

CHIZARI等[23]以电压驱动LECD过程，通过将激光聚焦在目标基板的表面上，将纳米Au粒子的沉积限制在微小的空间范围，获得金质微型螺旋弹簧结构。研究结果表明，激光辅助LECD过程受施加电势区域带电物质传质速率的限制，通过使用辅助LECD的空间光调制器可以在一定程度上提高定域性电沉积的沉积速率。

综上所述，激光辅助LECD技术的显著特点是其热效应，目前激光辅助LECD技术的研究多聚焦于二维（准三维）结构的纳秒/皮秒激光辅助电沉积，或是分步加工工艺。在复杂三维结构飞秒激光辅助LECD技术研究方面，虽然体现出了沉积精度和沉积效率的优势，但飞秒激光增强金属离子光-电化学协同还原沉积、晶界演化微观调控机制仍不清楚，复杂微结构成形、力学性能提高调控方法仍缺乏，金属微纳阵列结构一体化制造能力仍受限[8,17]。

1.2 流场辅助无掩模LECD技术

1.2.1 射流电化学沉积技术

从定域性电化学沉积基本过程的角度出发，射流电化学沉积（jet electrochemical deposition，Jet-ECD）可被视作是一种特别的无掩模定域性电化学沉积技术[10-11]。其基本原理为：喷嘴中高速流动的电解液以一定速度和压力喷射到板状阴极上，按照由CAD模型经分层切片处理后提取数据生成的扫描数控代码，由计算机控制小孔喷嘴（阳极）的扫描运动，在两极间施加的电场作用下实现金属离子选区沉积。

Jet-ECD加工高度依赖于电解液射流的流体动力学特性（或传质速率分布特性）以及阴极上的电流密度分布特性。为了阐明加工机理并进一步提高Jet-ECD加工能力，多年来业内学者已围绕区域冲击射流的质量传递特性、数值计算模拟阴极电流密度分布、建立仿真模型计算阴极表面及电解液射流内部电势分布梯度、建立数值模型预测沉积速率与沉积定位特性、通过引入若干关键量纲一参数来建立描述局部沉积层厚度与沉积中心厚度比值的经验函数关系等核心内容开展了多种理论研究[10-11]，代表性研究如下。

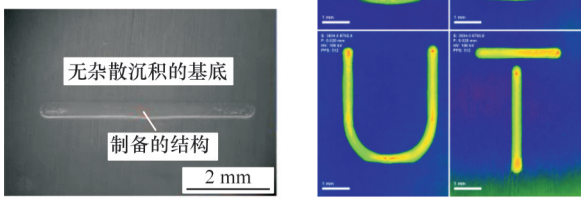
CHEN等[24]建立了用于分析电解质与二氯甲烷两相流流场特征的液-液两相流动模型：

$$\rho\left(\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{u}\right)=-\nabla\boldsymbol{p}+\nabla\cdot\mu(\nabla\boldsymbol{u}+\nabla\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}})+\rho g+F_{\mathrm{st}} \quad (1)$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0 \quad (2)$$

式中：ρ为流体密度；$\boldsymbol{u}$为流体速度；t为时间；$\boldsymbol{p}$为电解液流动压力；μ为电解液的动力黏度；g为重力加速度；F_{st}为表面张力。

该团队通过将二氯甲烷作为第二液相用于约束和调控电解质的流场分布，来避免电解质扩散及由此产生的电场扩散，提高电沉积的定域性，通过采用优化的工艺参数制备出图7所示的准三维直线和曲线微图案，与传统喷射电沉积工艺相比，沉积定位精度提高了约43.84%。



(a)直线(宽500 μm、高40 μm)　(b)字母“GDUT”(宽500 μm、高60 μm、半径2~2.5 mm)

图7　采用优化Jet-ECD工艺参数制备的微图案[24]

Fig.7　The micro patterns deposited with optimized parameters of Jet-ECD processes[24]

ARSHAD等[25]通过开展Jet-ECD沉积机理研究、表面形貌表征和工艺电流分析，在不锈钢基材上制备出致密且无孔隙的条带状Cu结构，材料沉积速率达16.06 μg/s，样件最小表面粗糙度*Sa*为(0.38±0.02) μm。

1.2.2　流场辅助无掩模LECD技术

流场辅助无掩模定域性电化学沉积(Flow field-LECD)技术是Jet-ECD技术的拓展与延伸。在Flow field-LECD过程中，高速流动电解液在两极间形成微液柱导体，通过发挥同轴压缩气流或同心环状液流、喷射流-冲洗流等流场的辅助作用来提高微区域内的传质速率、沉积速率，加快金属晶成核速度，减小有效扩散层平均厚度及沉积体缺陷，改善流场和电场分布及金属三维微结构成形精度[26-33]。目前在Flow field-LECD方面取得了较多的研究成果，代表性研究如下。

钱宁开等[26]以制备图8所示微Ni柱(直径50 μm、高500 μm)为例，开展了不同脉冲电压幅值下电解液流动状态对无掩模LECD微Ni柱影响的研究。结果表明：相同电压(3.8~4.4 V)下，微Ni柱的平均沉积直径和速率会随着电解液流动状态的变化而发生改变；电解液流速越大，则LECD微区域内的传质速率越大、沉积速率越高，最高可达5600 $\mu m^3/s$；随着电解液流速的增大，Ni晶成核速度加快，晶粒尺寸减小；大流量喷射(0.25 mm^3/s)条件下，微Ni柱表面更平整致密。

SPEIDEL等[27]指出，在Flow field-LECD过

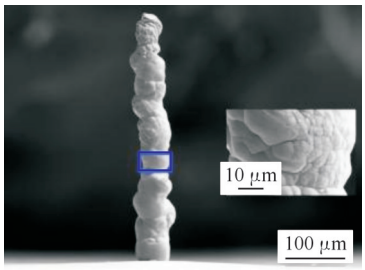
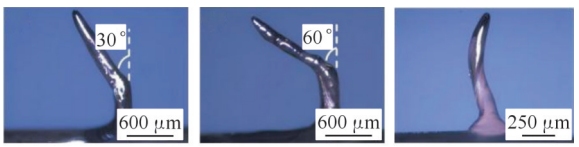


图8　制备的微Ni柱(SEM)[26]

Fig.8　SEM images of nickel column deposited[26]

程中，金属阳离子的类型、化学添加剂种类及其浓度均会不同程度影响沉积物的成分、机械性能和表面粗糙度，尤其是化学添加剂对实现改善沉积物的表面粗糙度、沉积密度、细化晶粒结构至关重要；受电解质中金属阳离子特性的限制，采用电解液高速流动流场辅助LECD技术制备出典型毫米/微米尺度金属三维微结构，其中，单金属微铜柱直径约100 μm、高约800 μm；表面光滑、结构致密的双弧镍微柱直径为(352±12) μm、高24.7 mm、长39 mm、表面粗糙度值*Ra*为0.15~0.18μm；U形镍悬臂直径为187~203 μm、表面粗糙度值*Ra*为0.16~0.2 μm。

WU等[28]提出了一种基于Flow field-LECD的自动步进阶跃延迟方法，通过调整载物台的移动时间和两个连续步骤之间的延迟时间，实现了载物台移动与时间上非线性电沉积速率之间的一致性，成功制备出图9所示的Cu三维悬挂结构和螺旋结构。实验结果表明，沉积速率可达25 μm/min，沉积Cu的平均晶粒尺寸小至0.5 μm且无择优取向，孔隙率小于0.1%，弹性模量范围为3~20 GPa。



(a)悬挂角度为30°　(b)悬挂角度为60°　(c)螺旋结构

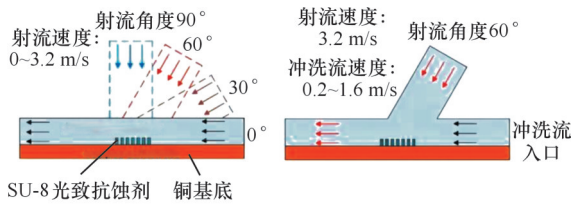
图9　制备的悬挂结构与螺旋结构[28]

Fig.9　The automatically fabricated overhangs and helical structure[28]

LI等[29]提出了图10所示的混合(喷射流-冲洗流)Flow field-LECD技术，用于制造深宽比大于3的亚毫米阵列结构。采用仿真模型研究了不同流场形式对亚毫米尺度掩模内传质的影响，建立了如下层流模型(电解液流动截面在仿真中为非圆形)：

$$Re=\frac{4Av_{ave}}{\chi\upsilon} \tag{3}$$

式中：Re为雷诺数；A为电解液流通的横截面积；v_{ave}为通过该截面的平均流速；χ为截面上电解液接触的总周长；υ为电解液的运动黏度。



(a)射流流场　　(b)射流-冲洗流混合流场[29]

图10　混合流场示意图

Fig.10　Schematics diagram of mixed flow field

该团队的研究结果表明，喷射流显著减小了电解质的有效扩散层厚度，冲洗流提高了亚毫米级掩模内的传质均匀性；采用优化参数制备出的亚毫米级铜阵列结构如图11所示，混合(喷射流-冲洗流)Flow field-LECD过程中有效扩散层平均厚度减小74%，尺寸标准误差控制在7 μm以内。

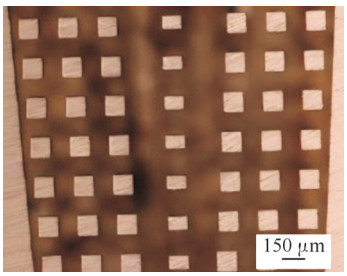


图11　制备的亚毫米级铜阵列结构[29]

Fig.11　The prepared submillimeter-scale copper array structure[29]

WANG等[30]首次提出了一种独特的电解液柱定域性电化学沉积技术，采用不同路径规划与控制策略成功制造出图12所示螺旋结构的三维复杂精密微型及介观尺度实体零件。该技术通过维持电解液喷嘴(阳极)与阴极表面之间动态稳定的液柱，利用可受控移动的电解液柱实现金属电沉积的定位与导向，实体零件生长速度达64 μm/min，成形精度≤±8 μm，表面粗糙度Sa≤0.2 μm。通过模拟仿真获得沉积物生长过程中电流密度分布曲线的演变规律，在数值模拟与实验结果基础上揭示了其工作机理。

LI等[31]提出了图13所示的压缩气膜包裹射流流场辅助LECD技术，将压缩气膜同轴叠加在电解液射流上，以改善流场和电场分布、提高电沉积定位和沉积速率的作用，成功制备出图14所示的高精度微镍柱(直径为(370±3) μm、深宽比约为20)。

KIM等[32]在研究Flow field-LECD技术的过程中，利用搭建的实验装置，通过两个外径

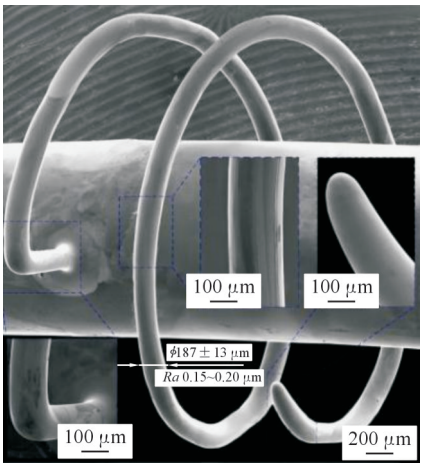


图12　采用直径为240 μm喷嘴制备的螺旋微结构(SEM)[30]

Fig.12　SEM image of spiral microstructure formed with a nozzle diameter of 240 μm[30]

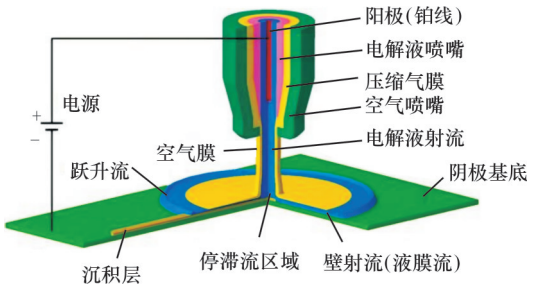


图13　压缩气膜包裹射流流场辅助LECD示意图[31]

Fig.13　Schematic diagram of the compressed air-film encircling Jet-LECD[31]

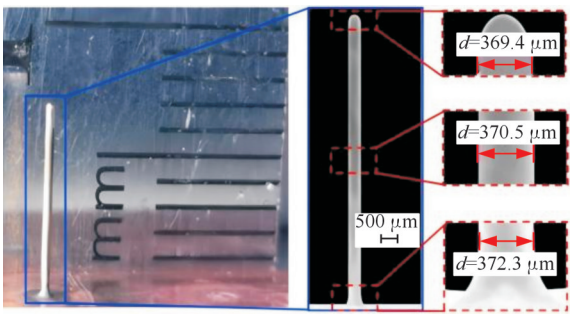


图14　制备的高精度微镍柱[31]

Fig.14　High precision nickel micro-columns prepared[31]

290 μm的同心喷嘴在保持高速液流循环使用的同时控制电解液流动条件(压力80 kPa、间距50 μm、流速50 μm/s)，采用脉冲电流(电流密度0.8 A/dm^2、频率125 Hz、占空比1∶50)来实现高的沉积速率，在聚乙烯、ABS、钠钙玻璃上制备出线宽430 μm、高28 μm、Ra=2.0~7.3 μm的铜质平面线圈和文字。

REISER等[33]在采用电液动氧化还原打印(EHD-RP)过程中，利用高电压使电解液以液滴形式从移液管口喷射至阴极表面并完成金属离子的快速还原沉积，使LECD成形速率提高至2.1 μm/s；制备出间距为500 nm的50×50纳米

Cu柱阵列、长宽比约为400(间距递减且最小间距为250 nm)的Cu墙、宽度小于100 nm的Cu线等三维微观结构。

EHD-RP技术虽然可以在加大电解液流速的情况下以一定速度获得纳米尺度的简单三维微结构，但由于存在沉积速度慢、效率低、工艺过程复杂、影响因素多、设备昂贵等不足，目前开展的相关研究及取得的成果相对较少[3-4,34]。

Jet-ECD和Flow field-LECD(不含EHD-RP)技术具有可选择性局部电沉积，可用电流密度大，电流效率高，金属结晶细化，有利于获得均匀、致密的微米到毫米级准三维和简单三维金属结构，不需要传统微电化学增材制造中所使用的昂贵掩模和复杂弯月面控制技术等优点，已在部分零件的表面局部快速改性、制备表面涂层和小型三维金属结构快速成形等方面得到了一定的应用。然而，由于Jet-ECD和常规的Flow field-LECD技术存在定域性差(成形尺寸在数百微米左右)且在高电流密度分布下沉积金属晶粒结晶不稳定[9,25,34]，高速流流场及沉积电场的均匀性与稳定性较差[24]，易产生突起、结瘤、氢气气泡等缺陷[27]等不足，故在制备复杂结构、高深宽比三维金属结构并追求高性能的过程中，存在较大的局限性。

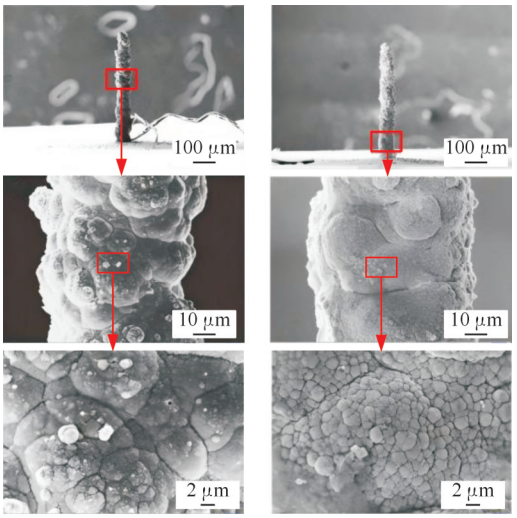
1.3　超声场辅助无掩模LECD技术

超声场辅助无掩模LECD的作用机理主要体现为超声波的空化效应、机械效应和热效应，产生的微湍流、微射流、冲击波和对范德华力的破坏作用是改善传质过程、减小电沉积缺陷、获得较高的电沉积效率和较好的表面质量、细晶化微(纳)米组织结构、消除电解液中颗粒的团聚、改善复合沉积层性能、满足某些特定需求的关键所在[11,35-37]。

近年来，在无掩模LECD过程中引入功率超声波并有效发挥其作用，已在金属基复合涂层、准三维结构制备方面取得了较多的研究与应用成果，代表性研究如下。

COSTA等[38]阐明在LECD过程中利用超声波可改善电解液传质过程、增强电解液中微粒的分散度并降低微粒的团聚程度、细化金属晶粒、提高晶粒生长取向性、改变镀层元素组成和相结构、减小内应力、消除孔隙和缺陷、提高沉积效率和沉积层厚度均匀性等，进而达到改善沉积镀层表面形貌和提高沉积镀层显微硬度、耐摩擦磨损性、耐腐蚀性、导热及导电性等目的。

吴蒙华等[39]结合功率超声的特点，以制备图15所示纳米晶组织的微镍柱(直径60 μm、高480 μm)为例，在无掩模LECD过程中引入与电场方向一致的功率超声波，探究了功率超声对无掩模LECD三维镍质微结构成形过程的影响。结果表明，相较于无功率超声作用，有功率超声作用下无掩模LECD的平均体积沉积速率可提高28%～39%，最高平均体积沉积速率可达15 340.46 $\mu m^3/s$，沉积体的平均晶粒尺寸可达46.37 nm；同时，功率超声作用可在一定程度上改善无掩模LECD微镍柱的微观表面形貌。



(a)无功率超声作用　(b)有功率超声作用

图15　有/无功率超声作用下制备的微镍柱表面微观形貌[39]

Fig.15　Surface micromorphology of micro-nickel columns prepared under/without action of power ultrasonic[39]

LI等[40]研究了超声波对低热膨胀Fe-Ni合金LECD过程的影响规律，制备的Fe-Ni三维掩模表面形貌见图16。结果表明：Fe-Ni合金在不锈钢表面的电沉积遵循“电荷转移控制下三维生长紧随瞬时成核”的机制，由于超声场作用，使得Fe-Ni合金的沉积过程从静态条件下的扩散控制转变为超声条件下的电化学控制。在超声功率密度为0.28～0.35 W/cm^2、电流密度不大于10 mA/cm^2的条件下，超声功率的增大可以获得更大的晶粒尺

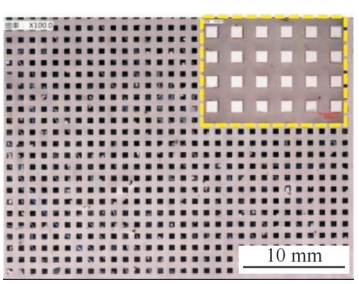


图16　超声辅助LECD制备的Fe-Ni三维掩模表面形貌[40]

Fig.16　Surface topography of Fe-Ni 3D mask prepared by ultrasonic-LECD[40]

寸，从而获得低热膨胀系数和高硬度。

ZHAN等[41]采用超声辅助无掩模LECD方法制备出氧化石墨烯增强Cu基复合箔并对其微观结构与性能进行了研究。结果表明：超声波辅助无掩模LECD过程可以细化沉积层平均晶粒尺寸（约为0.26 μm）并显示出强烈的（220）晶向；在超声功率120 W、电解液中GO的质量浓度为0.8 g/L、电流密度9 A/dm^{2}条件下，GO/Cu复合箔中的GO含量从无超声波辅助LECD的0.67 %增加到1.72 %且分散均匀；平均摩擦因数从0.87降低到0.72，抗拉强度提高到239 MPa，伸长率达17%；复合箔的硬度值达到74.6HV$_{0.1}$，热导率达到556.57 W/（m·K）（提高39.8%）。

GUO等[42]采用超声辅助无掩模LECD方法在Cu表面制备了准三维Ni-Co-Fe合金涂层，研究了功率超声对涂层微观组织结构、表面硬度、耐磨性等的影响规律。实验结果表明：超声的特殊作用影响了电沉积过程中的传质和成核，导致合金涂层的力学性能存在差异；在超声功率120 W下制备的Ni-Co-Fe合金涂层具有纳米晶结构，平均晶粒尺寸为50 nm；涂层的最大硬度为652.6 HV，摩擦因数和磨损量分别仅为0.32和0.82 mg；涂层弹性模量达到202.4 GPa，与铜相比，具有良好的韧性、最佳的弹性回复和更好的耐磨性。

AKBARPOUR等[43]采用超声辅助脉冲电沉积方法在低碳钢基体上制备高性能Gr/Ni-Co准三维复合涂层的过程中，研究了超声波对复合涂层的微观结构、Gr分布、表面粗糙度、显微硬度和电化学特性的影响。结果表明：超声波可以促进Co和Gr的共沉积，导致表面粗糙度值增大；随着Ni基体中Co和Gr含量的增加，涂层的显微硬度提高到560HV；共沉积到Ni-Co基体中的Gr通过填充孔隙和减少有效腐蚀表面，提高了复合涂层的耐腐蚀性。

对无掩模LECD过程而言，由于电化学沉积仅局限在两极之间的微区域，超声波影响作用最大的是空化效应，该效应可打断晶粒的正常生长，促进金属离子的还原反应并提高沉积效率[38-39]；其次是热效应，可使极间微区域镀液温度升高，加速金属离子的移动，进而提高极间微区域镀液传质效率[11,39]。通过施加功率超声波可对金属离子及金属原子进行沉积位置引导和定域性电沉积过程强化。目前关于超声辅助无掩模LECD金属三维微结构的研究尚处于起步阶段，需深入开展超声波作用下微尺度空间的无掩模定域性电沉积机理研究、功率超声作用对无掩模LECD过程影响的定量研究等。

1.4 磁场辅助无掩模LECD技术

磁场在电化学沉积中的作用机理是一个多尺度的物理过程：在宏观上，通过洛伦兹力（磁流体力学效应）搅拌溶液，改善传质；在介观上，通过磁场梯度力（磁化力）引导离子，实现精准的微观结构构建；在微观界面，通过对界面结构的影响（双电层结构调制），直接改变电极反应动力学。这些机理的共同作用使得磁场辅助电沉积技术能够有效调控沉积层的织构、成分、表面状态和物化性能，成为一种先进的表面工程和微纳制造技术[11,13,44]。

基于磁场在电化学沉积中的作用机理，在无掩模LECD过程中施加磁场的主要目的是改善沉积速率、沉积体表面形貌和细化沉积体微观晶态组织[13,44]。磁场作用下LECD过程中晶核受微观磁流体动力学（micro-MHD）效应影响，金属离子受磁化力作用并聚合；同时在电化学反应系统中，材料的顺磁性或逆磁性会影响电极附近金属离子的浓度梯度，从而导致电极附近形成感应对流[45-46]。近年来，在磁场辅助无掩模LECD制备金属基复合涂层、准三维结构和简单小深宽比三维结构方面取得了一定的研究成果，代表性研究如下。

吴蒙华等[47]采用图17所示实验装置，以制备直径50 μm、长径比10∶1的微Ni柱为例，研究磁场对无掩模定域性电沉积-增材制造（LECD-AM）金属三维微结构生长模式的作用；在无掩模LECD过程中分别施加一定强度且与电场作用方向相同的顺向磁场和与电场作用方向相反的逆向磁场，通过对比实验探讨磁场对微Ni柱平均体积沉积速率、表面形貌及晶粒尺寸的影响规律。结果表明：相较于无磁场作用，磁场作用可提高无掩模LECD的平均体积沉积速率、细化沉积体的平均晶粒尺寸，而且逆向磁场的作用更显著（平均体

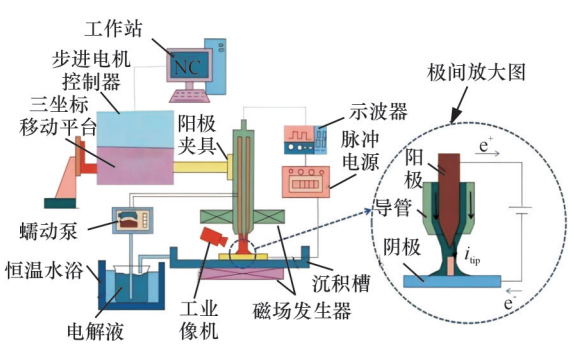


图17 磁场作用下LECD实验装置[47]

Fig.17 MLED experimental setup under the action of magnetic field[47]

积沉积速率提高25%～50%，平均晶粒尺寸达31.52 nm)；磁场作用可在一定程度改善微Ni柱的表面形貌(图18)，且顺向磁场作用的效果更好些。

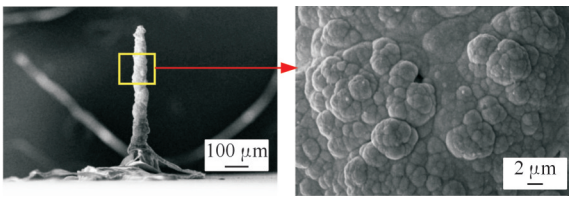
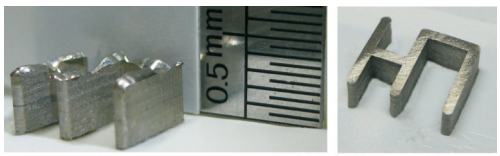


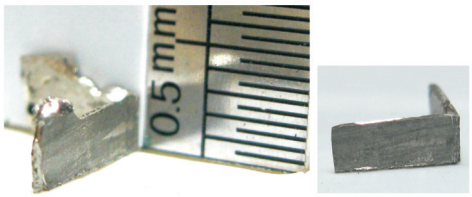
图18　顺向磁场作用下LECD微镍柱的表面微观形貌(SEM)[47]

Fig.18　SEM image of MLED micro-nickel column under the action of cis magnetic field[47]

ZHANG等[48]研究了磁场作用下无掩模LECD过程中高深宽比微腔内的电解液流型和流速变化特性。实验结果表明：在磁流体动力驱动对流与外部强制对流的联合作用下，可在较高电流密度(11 A/dm^2)下实现高宽比不小于7的Ni微结构无掩模LECD成形，在磁场强度0.86 T、电流密度5～6 A/dm^2、阴极表面电解液流速10～130 μm/s的条件下制备的Ni微结构如图19所示；在MHD效应对LECD的传质强化作用下制备的微结构具有更高的显微硬度、更优的表面形貌及更少的缺陷。



(a)宽700 μm，高宽比7，电流密度5 A/dm^2



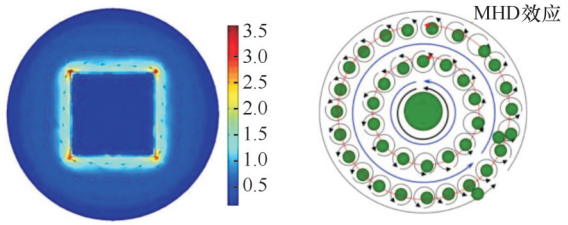
(b)宽400 μm，高宽比7.25，电流密度6 A/dm^2

图19　0.86 T垂直磁场作用下制备的Ni微结构[48]

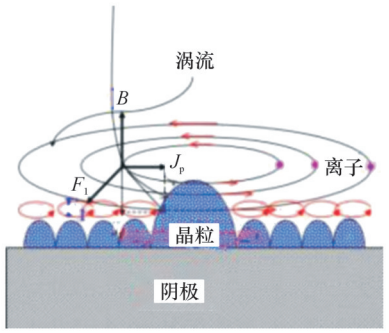
Fig.19　Ni microstructures prepared under a perpendicular magnetic field of 0.86T[48]

HUANG等[49]在利用磁场辅助电沉积以获得锥形结构铁磁层的研究中，探讨了在无掩模LECD过程中，磁场对促进平面电极上局部锥体生长的作用规律。对毫米尺度锥形结构的分析和数值研究结果表明：除了洛伦兹力外，铁磁阴极附近磁场变化所产生的磁梯度力可显著地促进锥体的生长；在不同间隔距离的锥体阵列中，邻近的锥体通常会减弱磁力所驱动的流动。

LONG等[50]综述了磁场对无掩模LECD技术的作用机理及对电沉积涂层性能的影响，包括传质、涂层结构改性、电化学反应和晶体取向。研究结果表明，洛伦兹力引起的MHD效应(图20)和磁化效应是主要因素，磁场会显著影响基质材料和电解液离子的顺磁性或反磁性。目前关于磁场作用下LECD的研究主要集中在1T磁场强度以下，关于高磁场(>10 T)对电化学过程影响及对沉积层性能的作用机制需要进一步探索。



(a)用COMSOL软件模拟10 T磁场作用下的MHD效果　(b)阴极表面MHD效应示意图



(c)阴极侧MHD效应示意图

图20　平行磁场中电沉积诱导的MHD效应[50]

Fig.20　MHD effect induced by electrodeposition in parallel magnetic field[50]

MA等[51]以Q235钢为基体，在LECD制备Ni-SiC复合材料的过程中施加0.5 T的垂直磁场和平行磁场。对比实验结果表明：磁场的施加大大改善了LECD效果，将Ni晶粒的优选取向从(200)晶面改变为(111)晶面，尤其是垂直方向磁场作用下制备的Ni-SiC复合材料具有较好的表面形貌(粗糙度值Ra=84 nm)、致密的微观结构(Ni晶粒平均尺寸72.3 nm)、较高的显微硬度(901.2HV)和SiC含量(质量分数12.31%)、较好的耐磨性(摩擦因数0.24、磨损率0.17 mg/min)和耐腐蚀性(腐蚀电流最低为0.466 μA/cm^2)。

JIANG等[52]将磁场引入射流电沉积过程中，成功制备出镶嵌纳米晶的非晶态NiCoP合金薄膜。实验结果表明：磁场辅助射流电沉积可有效改善合金薄膜的表面形貌，获得更为平整均匀的表面，并能相对抑制气孔和瘤状物的生长，从而赋予薄膜优异的耐腐蚀性；磁场辅助射流电沉积加速了薄膜非晶相中纳米晶的细化过程，有效改变

了NiCoP合金薄膜的微观结构与性能，制备的NiCoP合金薄膜表现出优良的软磁性能，其饱和磁化强度高达201.43 A·m²/kg，矫顽力极低；此外，磁场辅助射流电沉积技术还能显著增强薄膜与基体的结合力，最高结合力可达33.7 N。

陈亚[53]在制备超疏水选区沉积层的工艺研究过程中，通过引入磁场强度100 mT的平行磁场并与射流电沉积的电场和流场耦合，使电解液中添加的少量具有铁磁性的纳米Ni颗粒在磁场吸附作用下附着在铜基底表面；同时，射流流场为电沉积带来源源不断的Ni^{2+}，在磁场吸附和电沉积加工“尖端放电效应”的双重作用下，电解液中的Ni^{2+}优先在距离喷嘴最近的磁感线附近沉积，在加工区域形成分布均匀的微纳突起结构；随着电沉积的持续进行，最终在Cu基阴极表面逐层形成阵列分布且结构大小均匀、具有微纳尺度粗糙分级结构的Ni沉积层。

尚中昇等[34]在平行磁场辅助射流电沉积Ni制备疏水表面的研究中，通过分析平行磁场作用下微纳表面结构Ni镀层的生长机理指出，Ni颗粒所受外磁场的磁作用力和两个Ni颗粒间的磁相互作用力是磁场控制Ni颗粒分散的主要驱动力，其中，两个大小相同Ni颗粒（磁偶极子）间的磁相互作用力F_{ij}可表示为

$$F_{ij}=\frac{3\mu_0 m^2}{4\pi r_{ij}^4}(1-3\cos^2\beta) \tag{4}$$

式中：μ_0为真空磁导率；m为镍颗粒的磁矩；r_{ij}为两镍颗粒之间的距离；β为磁矩方向与颗粒间相对位置的夹角。

该团队的研究结果表明，磁场与电场的尖端效应共同作用有利于构建均匀的粗糙表面，粗糙表面的气腔起到托起水滴的作用，进而增强表面的疏水性和耐蚀性。实验结果表明：当磁感应强度为200 mT时，在316L不锈钢表面制备的Ni沉积层表面缝隙最多，凸起分布最均匀，面粗糙度Sa达2.94 μm，水接触角达到147.5°，疏水性较好。

LUO等[46]讨论了磁场对电化学沉积系统的影响机制并指出：磁电化学高度融合了电化学、流体力学和磁学学科知识，洛伦兹力和开尔文力是研究磁效应的基础和主导；在电沉积系统中施加磁场，对改善传质过程、提高电子（离子）传质效率有着重要作用；MHD以三种方式作用于电化学反应过程，即基于对流的气泡去除、修正对流的传质和磁吸引；MHD促进了传质，其中洛伦兹力和开尔文力可以加速传质并改变沉积结构，但磁场也可以吸引带电或顺磁性物质，从而限制其扩散；磁场在调节电化学双电层方面也起着积极作用。

综上，研究表明：磁场的引入能加快沉积金属离子向阴极表面迁移并使LECD过程中呈负数的磁吉布斯自由能变（$-\Delta G_M$）值更小（即$|\Delta G_M|$更大），使得体系产物的总能量更低，从而促进电沉积还原反应的发生，显著提高沉积速率；能够抑制LECD过程中沉积金属原子的堆垛，减小金属晶形核尺寸，提高形核率，进而获得纳米级晶粒的晶态组织；磁场作用下较高的沉积速率及较强的沉积金属原子的磁取向效应，使得晶粒尺寸更小且分布更加均匀；磁场与电流交互作用产生的微观MHD效应增强并将顺磁性金属磁化，可在一定程度上改善LECD三维微结构的微观表面形貌。目前关于磁场辅助LECD金属三维微结构的研究尚处于初期阶段，相关文献报道较少，关于磁场作用下微尺度空间的无掩模定域性电沉积机理研究、磁场作用对LECD过程影响的定量研究等尚不深入。

2 不同能场辅助无掩模LECD作用效果的对比与总结

激光、流场、磁场、超声波场辅助LECD作用效果的对比结果如表1所示，可知，近年来相关的研究多以制备微米及毫米尺度、微纳米组织结构的简单三维单金属（Ni/Cu/Au/Ag等）微结构和准三维Ni/Cu基复合涂层为主，通过合理利用激光与电场耦合形成的热-电耦合、流体-电场耦合、光-晶体生长耦合等效应，高速流场与电场耦合形成的改变电解液物性、重塑电场分布、强化传质过程、维持界面电流等效应，超声场与电场耦合形成的强化传质过程、调控成核与生长机制、清洁与活化电极表面、影响复合沉积中的颗粒分布等效应，磁场与电场耦合形成的MHD效应、影响电极/溶液界面（双电层）、磁场梯度力效应、霍尔效应等效应，实现提高成形精度、沉积速率（速度）、细化晶粒，提高显微硬度、耐蚀性、耐磨性，改善表面形貌及粗糙度等单项或多项指标。但开展的工作涉及工艺过程研究较多，涉及数值建模分析、模拟与仿真的机理研究相对较少；针对单项或多项技术与性能指标提高与改善的定量分析与验证较多，针对多能场协同耦合机理研究分析不足。虽有较多相关技术与性能指标达到较理想的数值或得到不同程度的改善与提高，对相关作用机理的定性分析描述较为具体，但在“能场-电沉积”耦合的物理化学本质及能场之间耦合效应的定性与定量研究方面，仍有较多不完善和不具体之处，仍需深入开展大量研究工作。

表1　不同能场辅助无掩模LECD作用效果的对比

Tab.1　Comparison of the effects of different energy field-assisted maskless LECD

	所制备微结构的特征尺寸	精度(表面粗糙度)	沉积速率(度)	微观组织	结构特征	主要优缺点
激光辅助无掩模LECD技术	Cu质微米尺度三维微结构最大深宽比8∶1，Cu质微米尺度涂层、图案，Cu质微米尺度阵列，Ni质微米尺度线条、沉积层，Au质微米尺度线条，Ag质微米尺度涂层，Au质微米尺度螺旋弹簧。	nm级、μm级，线宽变化量7～30 μm。	15.47～6610 $\mu m^3/s$、0.167 mg/min	微米晶、纳米(孪)晶	简单、复杂三维微结构，准三维图案、涂层，微阵列	优点：可提高屈服强度、沉积效率、硬度、弹性模量、阴极电流，微结构表面平整、耐腐蚀性强、成形精度高，具有大规模增材制造的优势。缺点：工艺过程复杂。
流场辅助无掩模LECD技术	Cu质微米尺度线条与字母，Ni质微米尺度圆柱最大深宽比22∶1，Cu质微米尺度圆柱最大深宽比8∶1，Ni质毫米尺度双弧圆柱最大长径比110∶1，Ni质毫微米尺度U形悬臂、30°～60°悬挑，Cu质微米尺度，Ni质微米尺度螺旋结构，深宽比＞3的亚毫米、纳米Cu柱阵列。	线宽变化量≈30 μm，尺寸误差≤7 μm，Ra=0.18～7.3 μm、面粗糙度Sa=0.2～0.38 μm，微柱直径变化量±3～±12 μm，精度≤±8 μm。	5600 $\mu m^3/s$、16 μg/s、16.6～126 μm/min	Ni微米晶、Cu纳米晶和微米晶	准三维结构，简单三维微结构，复杂三维精密微结构	优点：定域性电沉积定位精度和沉积速率高，微结构表面光滑、结构致密、孔隙率小、弹性模量大、具有较高的显微硬度和深宽比，可有效减少扩散层平均厚度。缺点：微结构垂直度差、成形精度不高、工艺过程复杂。
超声辅助无掩模LECD	Ni质微米尺度圆柱最大深宽比8∶1，GO/Cu复合箔厚100 μm，Ni-Co-Fe合金涂层面积50 mm×30 mm、厚60 μm，Gr/Ni-Co复合涂层面积20 mm×20 mm、厚45 μm。	GO/Cu箔Ra=36 nm。	15 340 $\mu m^3/s$、1.0～2.5 μm/min	纳米晶、微米晶	简单三维微结构，准三维结构	优点：沉积速率高，微结构具有较高的导热系数和显微硬度、较低的摩擦因数和较小的磨损量与腐蚀速率。缺点：微结构垂直度差、表面粗糙。
磁场辅助无掩模LECD	Ni质微米尺度圆柱最大深宽比10∶1，Ni质微米尺度微结构深宽比≥7，毫米尺度的Fe、Cu锥形结构，微米尺度的Ni-SiC复合层、NiCoP合金薄膜，微纳尺度粗糙分级结构的Ni沉积层。	成形精度达μm级，Ra=84 nm、面粗糙度Sa=2.94 μm。	13 800 $\mu m^3/s$、0.67 μm/min	纳米晶、微米晶	简单三维微结构，准三维结构	优点：沉积速率高，微结构具有较高显微硬度和饱和磁化强度、较低的摩擦因数和较小的磨损率与腐蚀电流。缺点：微结构表面粗糙、影响因素多。

3　结论与展望

3.1　结论

在无掩模LECD过程中引入激光、射流、超声波、磁场等能场，可以达到“1＋1＞2”的效果或满足某些特定性能需求；对所制备金属三维(或准三维)微结构而言，可进一步改善其表面形貌、提高成形精度与尺寸精度、细化微观组织结构，获得突出的单一或综合物理机械性能。

激光辅助无掩模LECD过程中，激光辐照的热效应作用可以显著提高辐射区内临界电流值和阴极表面极限电流密度，增加电解液内能，加快金属离子还原反应速率，进而提高激光辐照区金属沉积速率，大大减小电沉积的晶粒尺寸。

流场辅助无掩模LECD过程中，电解液高速流动可显著减小电解质的有效扩散层厚度，显著改善流场和电场分布、提高电沉积定位和沉积速率；随着电解液流速增大，镍晶成核速度加快，晶粒尺寸减小，金属结晶细化，有利于获得均匀、致密的金属组织结构。

超声场辅助无掩模LECD过程中，超声波产生的微湍流、微射流、冲击波和对范德华力的破坏作用，可以进一步改善电解液传质过程，消除电解液中颗粒的团聚，获得较高的电沉积效率；同时可进一步减小电沉积缺陷、细晶化微(纳)米组织结构、改善复合沉积层性能和表面质量。

磁场辅助无掩模LECD过程中，洛伦兹力引起的微观磁流体力学(micro-MHD)效应和磁化效应可强化传质过程、提高电子(离子)传质效率，外加磁场会显著影响基质材料和电解液离子的顺磁性或反磁性，进而提高沉积速率、改善沉积体表面形貌和细化沉积体微观晶态组织。

3.2　展望

在今后的外加能场辅助无掩模LECD三维微结构研究中，尚需进一步完善如下研究内容：激光增强金属离子光-电化学协同还原沉积、晶界演化微观调控机制，复杂微结构成形、力学性能提高调控方法，金属微纳阵列结构一体化制造能力的拓展；射流定域性的提高，高速流流场及沉积电场的均匀性与稳定性，在高电流密度分布下沉积金属晶粒结晶的稳定性，突起、结瘤、氢气气泡等缺陷的消除，制备复杂结构、高深宽比三维金属结构的局限性；超声波辅助作用、磁场辅助作用下微尺度空间的无掩模LECD机理，功率超声作用、磁场(强度＞1T)作用对无掩模LECD过程影响的定量研究，“外加能场-电沉积”耦合的物理化学本质及能场之间耦合效应定性与定量研究，有效利用COMSOL、ANSYS等专用软件进行数值仿真等辅助分析等。以期精益性解决定域性电沉积增材制造效率、精度、尺度、智能调控之间的矛盾，持续拓展无掩模LECD技术的工艺极限，满足电子信息、高端装备、精密仪器制造等领域对金属微结

构的特殊要求。

参考文献：

[1] SUNDARAM M，BRANT A，RAJURKAR K. Electrochemical Additive Manufacturing of NiCoFeCuMo High Entropy Alloys Using a Combined Dissolution-deposition System[J]. CIRP Annals，2022，71(1)：153-156.

[2] ZOU Z，XU J，REN W，et al. A Comprehensive Research on Polyethylene Glycol Assisted Localized Electrodeposition Micro Additive Manufacturing Method for Fabricating High-quality 3D Structures[J]. Journal of Manufacturing Processes，2025，135：269-278.

[3] REN W，XU J，LIAN Z，et al. Localized Electrodeposition Micro Additive Manufacturing of Pure Copper Microstructures[J]. International Journal of Extreme Manufacturing，2022，4(1)：015101.

[4] PANDEY A M，KAPIL S，DAS M. Experimental Investigation of Localized Electrochemical Deposition-based Micro-additive Manufacturing Process[J]. Materials and Manufacturing Processes，2024，39(3)：343-355.

[5] MENG X，WU X，SHEN X，et al. Self-adjusting Voxelated Electrochemical Three-dimensional Printing of Metallic Microstructures[J]. International Journal of Extreme Manufacturing，2025，7(1)：015102.

[6] ZOU Z，XU J，REN W，et al. Additives Induced Localized Electrodeposition Manufacturing of High Quality Copper Micro-rectangular Solid Structures[J]. Journal of Materials Processing Technology，2023，321：118152.

[7] WANG Y，XIONG X，JU B，et al. Voxelated Meniscus-confined Electrodeposition of 3D Metallic Microstructures[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2022，174：103850.

[8] ZOU Z，REN W，XU J，et al. A Novel Strategy for Electrochemical Additive Manufacturing：Femtosecond Laser-assisted Localized Electrochemical Deposition[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2025，211：104319.

[9] 朱荻，房晓龙，王登勇，等. 电化学制造新进展[J]. 机械工程学报，2023，59(19)：330-347.
ZHU Di，FANG Xiaolong，WANG Dengyong，et al. New Developments in Electrochemical Manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering，2023，59(19)：330-347.

[10] LI X，MING P，AO S，et al. Review of Additive Electrochemical Micro-manufacturing Technology[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2022，173：103848.

[11] BISWAL H J，KAUR J J，VUNDAVILLI P R，et al. Recent Advances in Energy Field Assisted Hybrid Electrodeposition and Electroforming Processes[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology，2022，38：518-546.

[12] XU J，REN W，LIAN Z，et al. A Review：Development of the Maskless Localized Electrochemical Deposition Technology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2020，110(7)：1731-1757.

[13] WU M，JIANG B，XIAO Y，et al. Effect of Magnetic Field on Maskless Localized Electrodepositing Three-dimensional Microstructure of Nano Nickel Crystals[J]. Materials，2024，17(2)：386.

[14] BHUIYAN M E H，WANG C，ARELLANO-JIMENEZ M J，et al. Electrical Property-microstructure of Copper Interconnects Printed by Localized Pulsed Electrodeposition (l-PED)[J]. Materials Letters，2023，330：133364.

[15] SHEN C，MO Y，ZHU D. Sub-microscale 3D Printing Based on Cold-constrained Local Electrodeposition[J]. Virtual and Physical Prototyping，2024，19(1)：e2292700.

[16] WU Y，XU K，ZHANG Z，et al. Study on Application of Laser in Maskless Localized Electrodeposition and Surface Quality Enhancement[J]. Optics & Laser Technology，2021，143：107383.

[17] XU K，LIU K，LIU J，et al. Thin Au Film Deposition by Laser-induced Electroless Deposition：Mechanism，Interfacial Bonding，and Performance[J]. Langmuir，2025，41(8)：5060-5070.

[18] WEI H，REN W，XU J，et al. Femtosecond Laser-induced Localized Electrodeposition of Two Dimensional Metal Patterns[J]. Optics & Laser Technology，2025，187：112854.

[19] XU J，ZHANG G，LV J，et al. High-efficiency Localized Electrochemical Deposition Based on Ultrafast Laser Surface Modification[J]. Surface and Coatings Technology，2023，471：129923.

[20] 孙诗成，张朝阳，吴予澄，等. 激光电沉积复合制备定域微纳结构及其超疏水性能研究[J]. 表面技术，2024，53(13)：64-74.
SUN Shicheng，ZHANG Zhaoyang，WU Yucheng，et al. Fixed Area Preparation and Superhydrophobic Properties of Micro-nano Structures by Laser Electrodeposition Composite Process[J]. Surface Technology，2024，53(13)：64-74.

[21] GUO S，XU K，WU Y，et al. A Study on Preparation of Ultra-thin Localized Au Coating by Laser-induced Electrodeposition[J]. Optics & Laser Technology，2022，154：108283.

[22] LENG Z，XU K，SHEN W，et al. Experimental Investigation on Laser-induced Electrochemical Silver Plating Technology[J]. Langmuir，2023，39(41)：14550-14561.

[23] CHIZARI S，SHAW L A，BEHERA D，et al. Current Challenges and Potential Directions towards Precision Microscale Additive Manufacturing—Part III：Energy Induced Deposition and Hybrid Electrochemical Processes[J]. Precision Engineering，2021，68：174-186.

[24] CHEN X，CHEN J，SAXENA K K，et al. Localization of Jet Electrochemical Additive Manufacturing with a Liquid Confinement Technique[J]. Journal of Manufacturing Processes，2022，81：48-64.

[25] ARSHAD M H，SAXENA K K，SMITH R，et al. Localized and Mask-less Copper Deposition with Free-flow Jet Micro-electrochemical Additive Manufacturing[J]. International Journal of Electrical Machining，2022，27：16.

[26] 钱宁开，吴蒙华，贾卫平，等. 脉冲电压幅值与电解液流动状态对无掩模定域性电沉积微镍柱的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2021，50(3)：918-923.
QIAN Ningkai，WU Menghua，JIA Weiping，et al. Effect of Pulse Voltage Amplitude and Electrolyte Flow States on Micro Nickel Column Prepared by Mask-less Localized Electrochemical Deposition[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2021，50(3)：918-923.

[27] SPEIDEL A，BISTEROV I，SAXENA K K，et al. Electrochemical Jet Manufacturing Technology：from Fundamentals to Application[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2022，180：103931.

[28] WU Y，LIN H，GONG L，et al. A Comprehensive Study on the Jet Electrodeposition Method for Fabricating 3D Structures with Overhangs[J]. Additive Manufacturing，2024，80：103956.

[29] LI T，SHEN C，ZHU Z，et al. Electroforming of Submillimeter Scale Array Structures with a Jet-flush Mixed Flow Field[J]. Journal of Manufacturing Processes，2023，96：99-109.

[30] WANG W, MING P, ZHANG X, et al. Additive Manufacturing of Three-dimensional Intricate Microfeatures by Electrolyte-column Localized Electrochemical Deposition [J]. Additive Manufacturing, 2022, 50: 102582.

[31] LI X, MING P, ZHANG X, et al. Compressed Air-film Encircling Jet Electrodeposition with High Deposition Accuracy[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167 (10): 102502.

[32] KIM H, KIM J G, PARK J W, et al. Selective Copper Metallization of Nonconductive Materials Using Jet-circulating Electrodeposition [J]. Precision Engineering, 2018, 51: 153-159.

[33] REISER A, LINDÉN M, ROHNER P, et al. Multi-metal Electrohydrodynamic Redox 3D Printing at the Submicron Scale[J]. Nature Communications, 2019, 10: 1853.

[34] 尚中昇，阿达依·谢尔亚孜旦，周冠霖. 平行磁场辅助射流电沉积镍制备疏水表面[J]. 电镀与涂饰，2023，42 (1)：53-59.
SHANG Zhongsheng, Xieeryazidan Adayi, ZHOU Guanlin. Fabrication of a Hydrophobic Surface by Parallel Magnetic Field-assisted Jet Electrodeposition of Nickel [J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42(1): 53-59.

[35] ZHANG H, ZHANG N, FANG F. Fabrication of High-performance Nickel/Graphene Oxide Composite Coatings Using Ultrasonic-assisted Electrodeposition [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 62: 104858.

[36] WANG Y, XIAO W, MA K, et al. Towards Development of Anticorrosive $CaCO_3$-coated Passive Layer on Mg Alloy with Ultrasound-assisted Electrodeposition[J]. Corrosion Science, 2023, 224: 111546.

[37] LI A, ZHU Z, XUE Z, et al. Periodic Ultrasound-assisted Electrodeposition of Fe-Ni Alloy Foil [J]. Materials Research Bulletin, 2022, 150: 111778.

[38] COSTA J M, ALMEIDA NETO A F. Ultrasound-assisted Electrodeposition and Synthesis of Alloys and Composite Materials: a Review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 68: 105193.

[39] 吴蒙华，姜炳春，肖雨晴，等. 功率超声对无掩模定域性电沉积三维镍质微结构成型过程的影响[J]. 材料导报，2025，39(1)：239-244.
WU Menghua, JIANG Bingchun, XIAO Yuqing, et al. Effect of Power Ultrasound on Forming Process of Three-dimensional Nickel Microstructure in Mask-less Localized Electrodeposition [J]. Materials Reports, 2025, 39 (1): 239-244.

[40] LI A, ZHU Z, LIU Y, et al. Influence of Ultrasonic in Low Thermal Expansion Fe-NI Electrodeposition Process for Micro-electroforming [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 82: 105894.

[41] ZHAN K, WANG W, LI F, et al. Microstructure and Properties of Graphene Oxide Reinforced Copper-matrix Composite Foils Fabricated by Ultrasonic Assisted Electrodeposition [J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 872: 144995.

[42] GUO J, YAO X. Preparation of Ni-Co-Fe Alloy Coating on Copper by Ultrasound-assisted Electrodeposition and Its Mechanical Property [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2022, 17(7): 220740.

[43] AKBARPOUR M R, GHARIBI ASL F. Fabrication of High-performance Graphene/Nickel-cobalt Composite Coatings Using Ultrasonic-assisted Pulse Electrodeposition [J]. Ceramics International, 2023, 49(9): 13829-13835.

[44] 贾卫平，吴蒙华，贾振元，等. 磁场方向对脉冲电沉积制备 Ni-ZrO_2 纳米复合镀层性能的影响[J]. 表面技术，2019，48(9)：252-259.
JIA Weiping, WU Menghua, JIA Zhenyuan, et al. Effects of Magnetic Field Direction on Properties of Ni-ZrO_2 Nanocomposite Coatings Prepared by Pulse Electrodeposition [J]. Surface Technology, 2019, 48(9): 252-259.

[45] 明平美，吕印定，张燕，等. 磁电化学沉积技术研究进展[J]. 河南理工大学学报(自然科学版)，2011，30(5)：571-576.
MING Pingmei, LYU Yinding, ZHANG Yan, et al. The Research Progress of Magnetoelectrochemical Deposition Technology[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2011, 30(5): 571-576.

[46] LUO S, ELOUARZAKI K, XU Z J. Electrochemistry in Magnetic Fields[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2022, 61(27): e202203564.

[47] 吴蒙华，姜炳春，肖雨晴，等. 磁场对无掩模定域性电沉积-增材制造三维微结构生长模式的影响[J]. 中国机械工程，2024，35(11)：2035-2042.
WU Menghua, JIANG Bingchun, XIAO Yuqing, et al. Effects of Magnetic Fields on Growth Pattern of Three-dimensional Microstructures in MLED-AM [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(11): 2035-2042.

[48] ZHANG X, LI X, MING P, et al. Micro-electroforming High Aspect Ratio Microstructures under Magnetic Field [J]. Microsystem Technologies, 2019, 25(4): 1401-1411.

[49] HUANG M, ECKERT K, MUTSCHKE G. Magnetic-field-assisted Electrodeposition of Metal to Obtain Conically Structured Ferromagnetic Layers [J]. Electrochimica Acta, 2021, 365: 137374.

[50] LONG Q, ZHONG Y, WU J. Research Progress of Magnetic Field Techniques for Electrodeposition of Coating[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15 (8): 8026-8040.

[51] MA C, HE H, XIA F, et al. Performance of Ni - SiC Composites Deposited Using Magnetic-field-assisted Electrodeposition under Different Magnetic-field Directions[J]. Ceramics International, 2023, 49(22): 35907-35916.

[52] JIANG W, LI H, LAO Y, et al. Synthesis and Characterization of Amorphous NiCoP Alloy Films by Magnetic Assisted Jet Electrodeposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 910: 164848.

[53] 陈亚. 超疏水选区沉积层射流电沉积制备工艺研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2021.
CHEN Ya. Study on Preparation Process of Superhydrophobic Selective Deposition by Jet Electrodeposition [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.

（编辑　袁兴玲）

作者简介：吴蒙华，男，1963年生，教授。研究方向为微细电化学加工技术研究与应用。发表论文60余篇。**贾卫平***（通信作者），女，1971年生，教授。研究方向为电化学沉积及材料表面改性。发表论文20余篇。E-mail:770818158@qq.com。

本文引用格式：

吴蒙华，黄志维，贾卫平. 外加能场辅助无掩模定域性电沉积三维金属微结构的研究进展[J]. 中国机械工程，2026，37(10)：2631-2643.

WU Menghua, HUANG Zhiwei, JIA Weiping. Research Progress in Maskless Localized Electrochemical Deposition Technology of 3D Metal Microstructures Assisted by External Energy Fields[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(10): 2631-2643.