

金属离子液束流增材制造研究 现状及其发展*

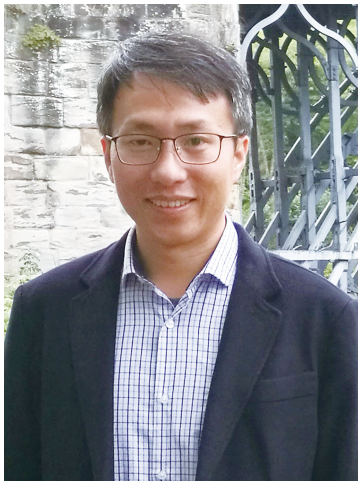
沈理达, 田宗军, 谢德巧, 吕 非

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 金属离子液束流增材制造技术结合了电化学沉积和增材制造的特点, 具有常温金属成形和液束形式加工特征, 受到广泛关注。简要回顾了金属离子液束流增材制造技术的发展溯源, 针对其定域性差、加工效率低的问题, 提出了基于喷射电沉积的金属离子液束流增材制造技术, 并讨论了当前国内研究热点及面向特殊异形件、大型结构件、微细零部件和多功能复合结构的金属离子液束流增材制造发展趋势。

关键词: 金属材料; 增材制造; 液束流; 喷射电沉积; 发展趋势

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.17.028



沈理达

博士、副教授, 南京航空航天大学增材制造研究所副所长。研究方向为增材制造、特种加工新技术、表面工程等。发表论文 60 余篇, 其中 SCI 收录 38 篇。申请发明专利 30 余项, 授权 23 项。获得省部级科技奖励 6 项, 承担国家重点研发计划、国家自然科学基金、军科技委国防科技项目、陆军预研项目等 20 余项课题。

20 世纪 80 年代起, 金属增材制造技术逐渐发展^[1-2], 该技术是一种基于离散/堆积思想的金属成形技术, 其中以激光增材制造技术为典型代表。首先将零件的三维模型进行分层处理, 得到各层截面的二维轮廓信息, 按照轮廓信息进行扫描路径规划, 工作台依据特定路径运动, 逐点、逐线、逐层扫描沉积金属层, 最终实现金属零件的层层堆叠成形^[3-5]。

但是激光增材制造过程中存在的热累积严重、残余内应力大、成形质量难以控制等问题使得该技术有一定的局限性^[6-7], 而电沉积技术具有金属材料逐层累积的特性, 得到的金属材料组织致密、无较大残余应力、表面质量高, 并结合其常温金属成形

及液束形式加工特征受到广泛关注。

本文将电化学沉积技术的层累积思想和增材制造技术的离散/堆积思想相结合, 并综合各自技术的优点^[8-11], 提出了一种新型金属离子液束流增材制造技术。基于电化学沉积的金属离子液束流增材制造技术, 同样首先根据零件的模型求取模型各层的截面形状, 得到二维扫描轨迹后有选择地电化学沉积, 形成零件的一个层面, 层层堆积, 最终得到三维零件。该技术能有效弥补激光增材制造技术的一些缺点, 在特定领域具有良好的应用背景。

本文在简要阐释金属离子液束流增材制造技术工作原理和技术特点的基础上, 介绍了金属离子液束流增材制造研究现状, 另外讨论了金属离子液束流增材制造技术面临的主要问题, 并提出了金属离子液束流增材制造技术的发展趋势, 最后对团队取得的一些成果进行了介绍。

* 基金项目: 国家自然科学基金(联合)项目(U1537105); 国家重点研发计划(2018YFB1105400); 江苏省重点研发计划项目(BE2015161); 江苏省重点研发计划(BE2016010-3)。

发展溯源

金属电化学沉积历史悠久,其理论适用于湿法冶金、精炼、电铸和电镀等电化学过程。近年来,随着国内外研究的不断深入,电化学沉积技术发展迅速^[12-17],并和很多新兴技术(如增材制造技术)相结合,赋予其新的生命,形成了液束流增材制造技术。

国际上已有众多科研机构对金属离子液束流增材制造进行了深入的研究,早在20世纪90年代,美国南加州大学信息科学研究所采用光刻和电化学沉积技术,发明了EFAB (Electrochemical Fabrication)技术,适合于制备复杂结构金属微器件,图1为采用该工艺制备的微细器件^[18]。

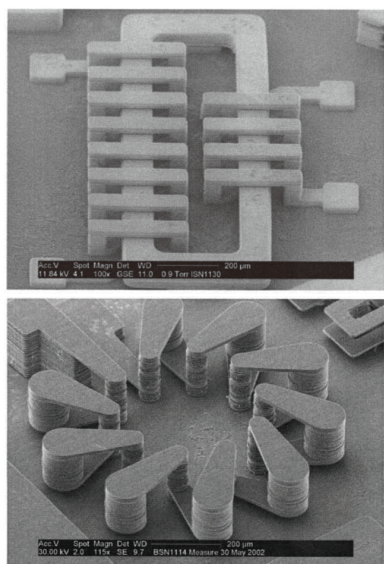
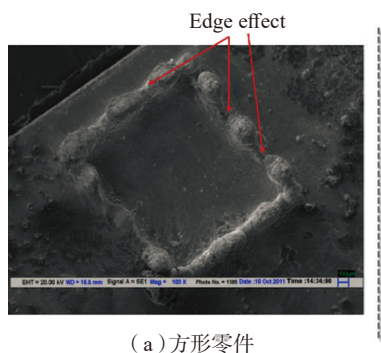
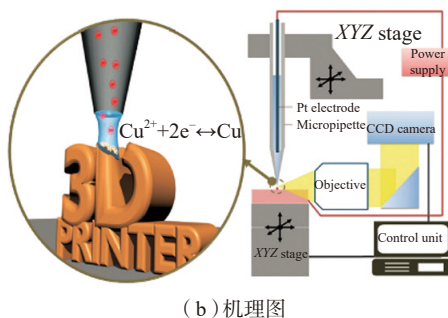


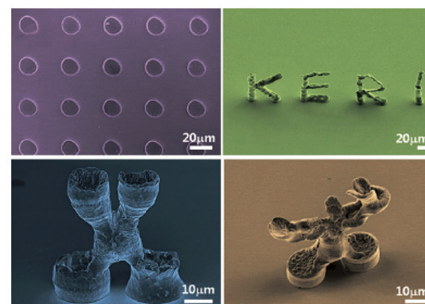
图1 EFAB技术制备器件SEM图片
Fig.1 SEMs of typical EFAB structures



(a) 方形零件



(b) 机理图



(c) 不同形状的金属结构

图2 喷射电沉积3D打印成形金属结构研究
Fig.2 Research on metal structure of 3D printing based on jet electrodeposition

2000年,德国Fritz-Haber研究所选择纳秒级超短脉冲电流电源,并结合极间间隙实时监控等技术,将极间间隙减小到了微米级,实现了液束流技术在微米级精度上的进一步突破^[19]。

2008年,Benea等^[20]在制备Ni-Al₂O₃纳米复合沉积层过程中不断搅动工作液,分析所获沉积层的电化学阻抗并研究其腐蚀行为,认为沉积层致密的组织结构和纳米粒子的隔绝作用是改善复合沉积层耐蚀性的主要原因,体现了液束流增材制造技术在再制造领域的应用。

澳大利亚昆士兰理工大学采用基于电铸技术的液束流增材制造制备出形状复杂的电火花铜电极,并论证了铜电极应用于电火花加工的潜力,结果表明,采用液束流增材制造技术制备的铜电极能满足电火花放电加工的需求^[21]。

2015年,Rajput等^[22]利用喷射电沉积开展了具有一定厚度的微细三维结构的打印研究,获得了柱、框等结构。同年,韩国研究团队^[23]在Small上发表了采用该方法进行的复杂形状的增材制造成形研究,通过利用喷嘴的表面张力效应,获得了无须支撑的悬臂金属微细铜结构,如图2所示^[23]。

2016年,Kamaraj等^[24]对基于电沉积的液束流增材制造进行了仿真研究,得到了工艺参数如电极尺寸、极间间隙和电压等对离子液束扩

散特性影响程度的仿真结果。结果表明,加工过程需要保持一个合适的极间间隙以保证最高定位精度和最快离子扩散速率,电压降低和极间间隙增大削弱电压对离子扩散程度的影响效果。图3为试验方案和仿真结果^[24]。

2017年,帝国理工学院Chen等^[25]基于喷射电沉积原理搭建了一台小型的电沉积成形设备,并定义为Electrochemical Additive Manufacturing (ECAM),认为这是一种常温下的低成本金属打印方法,如图4所示^[25]。

国内金属离子液束流增材制造研究起步较晚,但经过近几十年的发展,国内金属离子液束流增材制造技术在材料应用、成形质量控制和加工效率等各个方面均取得长足的进步,并且已经在航空航天等高端高精制造领域实现了初步应用^[26]。目前国内开展金属离子液束流增材制造研究较多的机构主要有南京航空航天大学、香港大学、浙江理工大学及华中科技大学。

2000年,华中科技大学研究了基于电铸技术的增材制造,分别选择了涂覆导电层、电弧喷涂和化学镀3种液束流技术,试验后分析总结了其应用于增材制造的特点;2007年,大连理工大学充分吸收增材思想,基于化学镀和电铸技术,实现了金属离子液束流增材制造技术在电火花电极制备方向的应用^[27-30]。

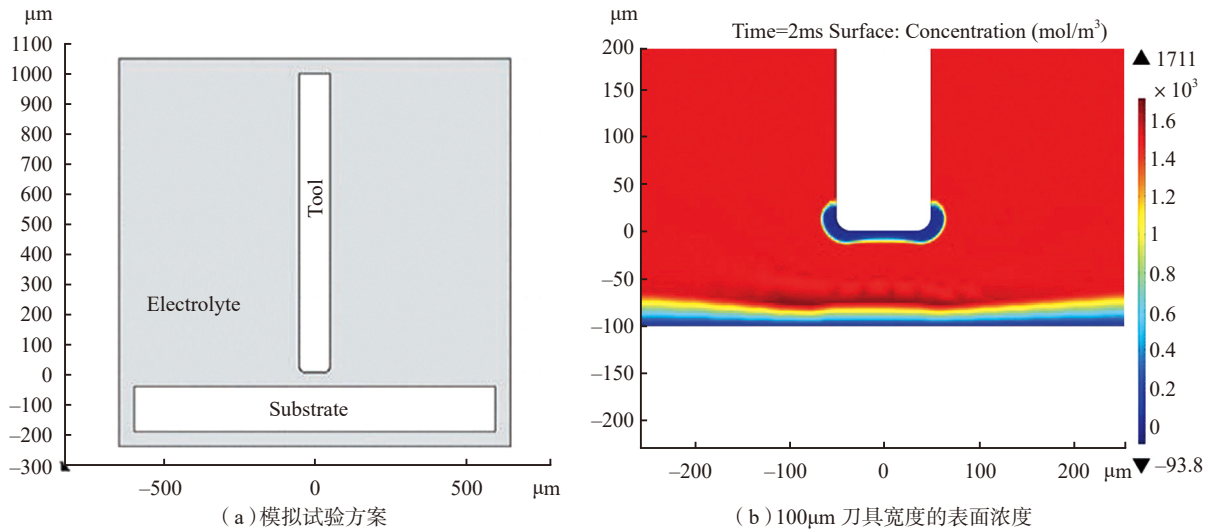


图3 试验方案和仿真结果

Fig.3 Experimental scheme and simulation results

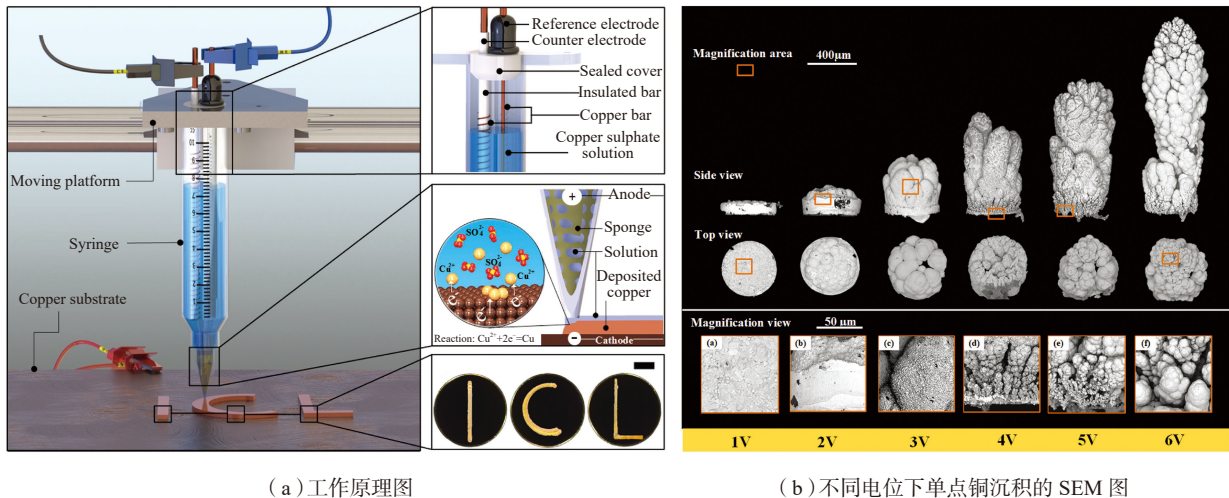


图4 帝国理工学院研究团队ECAM打印金属结构方法

Fig.4 Method of metal structures printed by ECAM

2010年,浙江理工大学李高飞^[31]将增材制造技术、电化学沉积技术和数控技术有机结合,取3者的优势,提出了一种直接制造金属零件的增材制造技术,即基于数控电沉积技术的液束流增材制造技术。

2012年,南京航空航天大学朱本苓^[32]提出了基于摩擦电沉积的金属零件快速成形,探索了摩擦电沉积快速成形金属零件的工艺规律,制备出具有一定厚度、精度和性能的金属铜零件。

2016年,香港大学 Wang 等^[33]

在 *Science Reports* 上论述了喷射电沉积应用于增材制造的研究,通过构建的喷射电沉积数控系统,开展了如图5所示的铜电路沉积打印研究^[33]。

技术难点

电化学沉积过程中,材料的“累加”在离子尺度下进行,金属液中离子尺寸在纳米级甚至更小,同时加工过程中离子液为常温状态,因此基于这个特点形成的金属离子常温微沉积方式使其在高精制造领域有着很大的发展空间。

虽然电化学沉积具有原理性优势,并得到了广泛的应用,但仍存在一些问题。首先加工过程定域性差,定域性(Localization)是指非加工区在加工过程中接受加工的难易程度,电化学沉积过程中,对于浸泡在金属离子液中的材料,当有电流通过,表面就会产生金属沉积现象。这些区域不仅包括加工区,也包括加工区之外,而如果非加工区沉积过多金属,则称为定域性差,在微细加工领域,定域性的好坏对成形质量有着至关重要的影响。徐敏敏^[34]、蔡明霞^[35]等采用激光诱

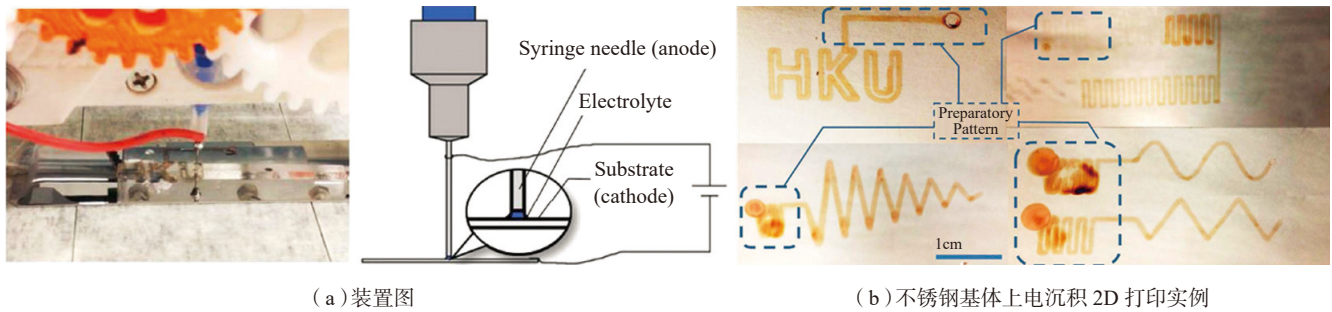


图5 喷射电沉积2D打印沉积
Fig.5 2D deposition of jet electrodeposition

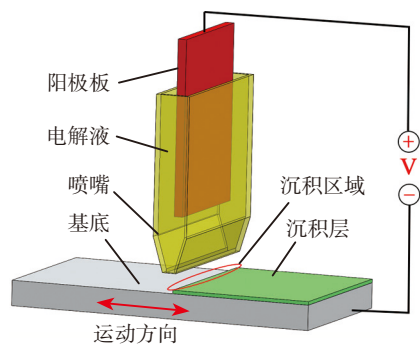
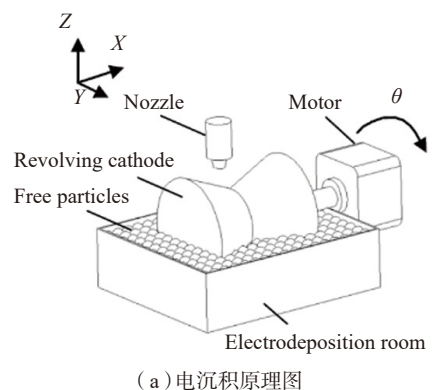
导的方式提高电化学沉积加工的定域性,但是仍存在成本高、激光热效应难以消除等问题。除此之外,电化学沉积过程由于受到如脉冲电源特性、离子液浓度等多种因素的影响,阴极电流密度低,因此沉积速度慢、加工效率低。针对电化学加工过程中存在的问题,笔者所在团队提出了基于喷射电沉积(Jet Electrodeposition)的金属离子液束流增材制造。

喷射电沉积与普通电化学沉积的原理基本相同,都是在外加电源作用下,金属盐溶液中的阳离子迁移到阴极表面,获得电子发生还原反应,完成在阴极表面沉积的过程^[8]。两者的不同点主要在于液相传质过程存在较大的差别,且喷射电沉积的沉积区域具有选择性^[9-10]。相比于普通电化学沉积,喷射电沉积优点多^[36],主要包括扩散层厚度低、浓差极化低、镀层均匀性好、沉积效率高及定域性强等。普通槽镀制备材料晶粒尺寸为23.07nm,而喷射电沉积制备材料的晶粒尺寸仅为9.18nm^[37]。在喷射电沉积加工过程中,磁力泵抽取离子液并经喷嘴喷射到阴极表面,此时阳极(喷嘴)与阴极(工件)在电场作用下通过离子液束构成闭合回路,从而产生局部沉积,其他没有电流通过的区域则不产生沉积,见图6(a)。由流体力学知识可知,喷射液流在遇到阻碍时,不同区域的流体会产生不同的流动性质,据此可以将喷射沉积过程中的液流分为3部分:自由射

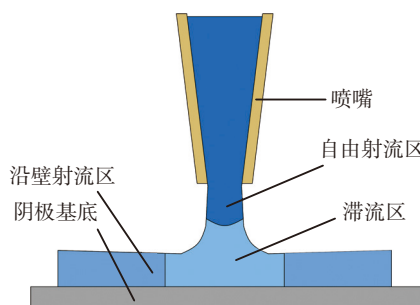
流区、滞流区和沿壁射流区^[38],如图6(b)所示。同时由于电解液的高速流动,使其在物质传输率和极限电流密度方面远高于普通电化学沉积,因而极大地提高了喷射电沉积的金属沉积速度^[39-40]。普通电化学沉积沉积速率一般在1.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ 左右^[41],而采用喷射电沉积沉积速率可达到40 $\mu\text{m}/\text{min}$ ^[42]。

作者所在团队前期在多个国家自然科学基金项目资助下,于该方向积累了较好的增材制造成形研究基

础。例如,结合特定辅助手段,可成形20nm晶粒尺度的结构零件^[14-15],如图7^[14-15]的纳米晶块体结构成形。



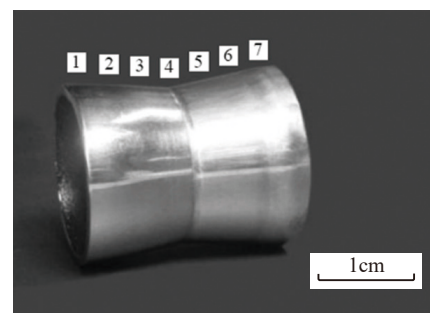
(a) 原理图



(b) 区域分布

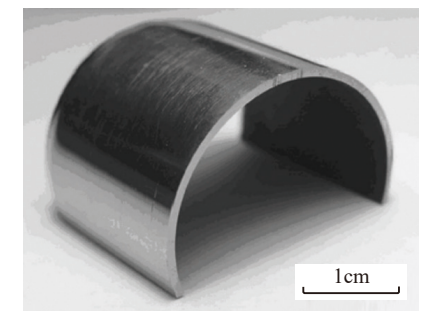
图6 喷射电沉积加工原理

Fig.6 Principle of jet electroplating



(a) 电沉积原理图

(b) 镍薄壁件



(c) 1mm厚的镍沉积层

图7 直接成形纳米晶零件

Fig.7 Nanocrystal parts manufacturing

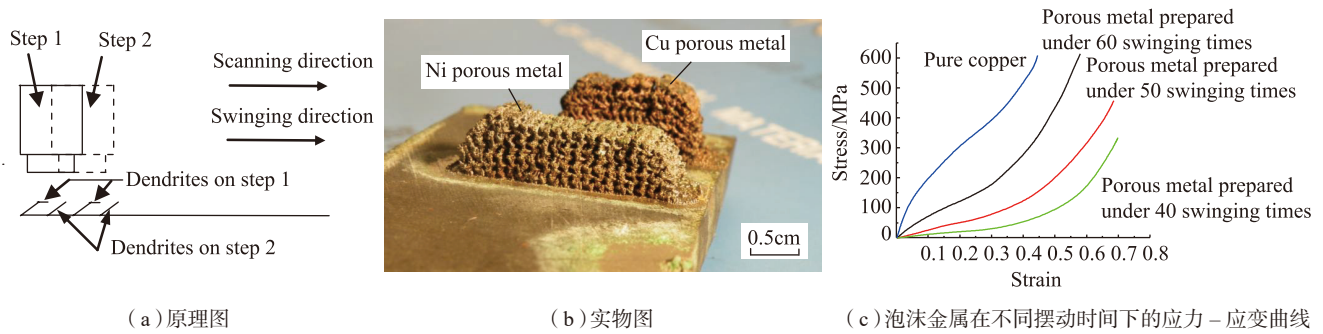


图8 直接成形泡沫金属
Fig.8 Porous metal manufacturing

结合喷射电沉积流场的特殊控制, 多孔泡沫金属^[16]的多孔结构可控生长, 具有典型多孔金属力学特性, 如图8^[16]所示的泡沫金属成形。

发展趋势

目前, 金属离子液束流增材制造技术的发展根据其产品类型及应用主要体现在4个方面, 即特殊异形件、大型结构件、微细零部件和多功能复合结构的液束流增材制造。

金属离子液束流增材制造技术从原理上属于精密制造技术, 其通过金属离子的逐个“堆积”来成形零件, 具有复制精度高的特点, 能够广泛应用于一些复杂形状的特殊异形件制造, 图9为英国Rotoplas Ltd以电铸技术为基础的金属离子液束流增材制造制备的一组形状复杂的零件。

航空航天领域, 金属离子液束



图9 特殊异形件的液束流增材制造
Fig.9 Special-shaped parts fabricated by ionic liquid beam additive manufacturing

流增材制造技术在大型结构件制造中发挥着重要作用, 其中最典型的应用便是火箭发动机推力室身部。南京航空航天大学朱增伟等^[43-44]成功制造出光亮平滑、壁厚均匀且带冷却通道的火箭发动机推力室身部样件。图10(a)为美国制造的航天飞机用氢氧主发动机, 图10(b)为Ariane 5型Vulcain 2火箭发动机的推力室身部^[45], 二者的制造均结合了金属离子液束流增材制造技术。

金属离子液束流增材制造技术工作过程是以离子的方式进行, 离子尺度下的制造方式使其在微细零部件制造领域的应用成为可能, EFAB技术^[46-49]便是基于离散/堆积原理研发出来的金属微细零部件液束流增材制造技术, 其克服了以往电化学沉积技术只能加工简单平面的缺点, 实现了复杂三维图形的加工。Kim等^[50]提出了一种新的选择性铜增材制造技术, 该工艺分为3个阶段: 通过电子束蒸发在各种材料上形成电沉积的铜种子层, 在种子层上采用喷射电沉积制备微细金属图案, 再去除种子层, 从而制备各种形状的铜图案, 如图11所示^[50]。

金属离子液束流增材制造技术通过更换不同的离子液能够实现多材料成形, 而多材料复合加工将会极大带动各种结构功能一体化潜在应

用。但是在成形过程中准确快速地更换不同种类的离子液以成形复合结构仍有待研究。



(a) 航天飞机用氢氧主发动机



(b) 火箭发动机的推力室身部

图10 火箭发动机大型结构件
Fig.10 Large structural parts of rocket engine

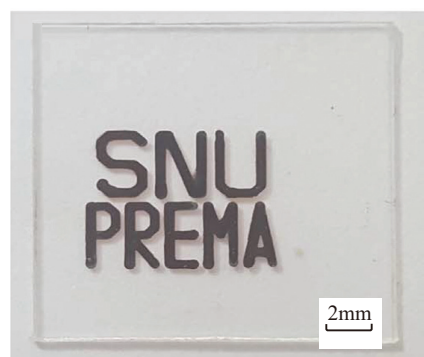
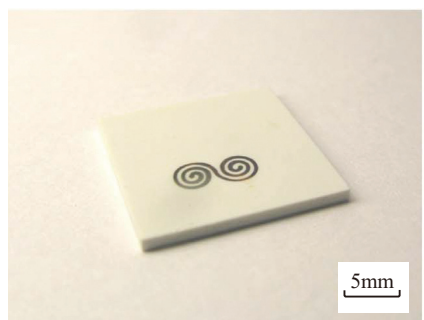
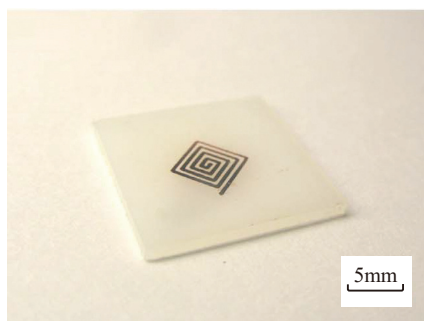


图11 微细铜图形

Fig.11 Micro copper pattern metallization

结论

本文对金属离子液束流增材制造技术在金属材料成形方面应用研究进行了综述分析,金属离子液束流增材制造技术结合电化学沉积技术的层沉积思想和增材制造技术的离散/堆积思想,具有常温金属成形及液束形式加工特征。并分析了液束流增材制造技术研究现状及发展趋势,在此基础上,介绍了团队在金属离子液束流增材制造领域现有的研究基础。未来金属离子液束流增材制造技术将向着4个方向发展,即特殊异形件、大型结构件、微细零部件和多

功能复合结构的液束流增材制造。虽然该领域的研究已经取得了一定的进展,但仍有一系列关键问题如工艺优化、材料体系等有待进一步深入研究。

参考文献

[1] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打印)技术发展[J].机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.

LU Bingheng, LI Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4.

[2] GRIFFITH M L, SCHLIENGER M E, HARWELL L D, et al. Understanding thermal behavior in the LENS process[J]. Materials & Design, 1999, 20(2/3): 107-113.

[3] ARCELLA F G, FROES F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming[J]. JOM, 2000, 52(5): 28-30.

[4] KEICHER D M, SMUGERESKY J E, ROMERO J A. Using the laser engineered net shaping (LENS) process to produce complex components from a CAD solid model[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1997, 2993: 91-97.

[5] 田宗军,顾冬冬,沈理达,等.激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J].航空制造技术,2015,58(11):26-31.

TIAN Zongjun, GU Dongdong, SHEN Lida, et al. Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 26-31.

[6] 王霄,王东生,高雪松,等.轻合金构件激光增材制造研究现状及其发展[J].应用激光,2016(4):478-483.

WANG Xiao, WANG Dongsheng, GAO Xuesong, et al. Research status and development in laser additive manufacturing of light alloy component[J]. Applied Laser, 2016(4): 478-483.

[7] 王东生,田宗军,沈理达,等.激光熔覆技术研究现状及其发展[J].应用激光,2012(6):85-91.

WANG Dongsheng, TIAN Zongjun, SHEN Lida, et al. Research status and development

of laser cladding technology[J]. Applied Laser, 2012(6): 85-91.

[8] 朱保国,王振龙.电铸技术的发展及应用[J].电加工与模具,2006(5):1-6.

ZHU Baoguo, WANG Zhenlong. Developments and applications of electrodeposition[J]. Electromachining & Mould, 2006(5): 1-6.

[9] MA C Y, YU W Y, JIANG M Z, et al. Jet pulse electrodeposition and characterization of Ni-AlN nanocoatings in presence of ultrasound[J]. Ceramics International, 2018, 44(5): 5163-5170.

[10] 韩东生.喷射电沉积纳米晶镍的阴极极化行为及其微观组织结构[D].秦皇岛:燕山大学,2004.

HAN Dongsheng. Cathodic polarization of jet electrodeposition of nano-crystalline Ni and its microstructure[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2004.

[11] 郭忠诚,朱晓云,杨显万.电沉积法制备多功能复合材料研究动态与发展趋势[J].中国工程科学,2004,6(4):86-94.

GUO Zhongcheng, ZHU Xiaoyun, YANG Xianwan. Research and development trends of electrodeposited multifunctional composite materials[J]. Engineering Science, 2004, 6(4): 86-94.

[12] 许姣姣,司云森,余强,等.电化学沉积技术的新发展[J].南方金属,2007(2):21-23.

XU Jiaojiao, SI Yunsen, YU Qiang, et al. A review on electrodeposition[J]. Southern Metals, 2007(2): 21-23.

[13] VALIZADEH S, GEORGE J M, LEISNER P, et al. Electrochemical synthesis of Ag/Co multilayered nanowires in porous polycarbonate membranes[J]. Thin Solid Films, 2002, 402(1/2): 262-271.

[14] WANG G F, SHEN L D, HUANG Y H. Jet electrodeposition of bulk nano crystalline nickel with real-time polishing[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2012, 7: 10818-10824.

[15] HUANG D Z, SHEN L D, CHEN J S, et al. The influence of cathode surface velocity on friction aided jet electrodeposition[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2014, 67(3): 351-357.

[16] WANG G F, SHEN L D, DOU

- L M, et al. Porous metal and method for preparation by the scanning and swinging jet electrodeposition[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2014, 9: 3319–3326.
- [17] SHEN L D, WANG Y H, JIANG W, et al. Jet electrodeposition multilayer nickel on the surface of sintered NdFeB and corrosion behaviours[J]. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 2017, 52(4): 311–316.
- [18] EVANS J D, BANG C. A demonstration of EFAB™ as a fundamental shift in the way microdevices are manufactured [C]// *Proceedings of ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. New Orleans, 2002.
- [19] KIRCHNER V, CAGNON L, SCHUSTER R, et al. Electrochemical machining of stainless steel microelements with ultrashort voltage pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(11): 1721–1723.
- [20] BENE L, MAGDA L V, DRAGAN V, et al. Electrochemical impedance spectroscopy and corrosion behaviour of Al₂O₃-Ni nano composite coatings[J]. *Electrochimica Acta*, 2008, 53(13): 4557–4563.
- [21] YARLAGADDA P K D V, CHRISTODOULOU P, SUBRAMANIAN V S. Feasibility studies on the production of electro-discharge machining electrodes with rapid prototyping and the electroforming process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 89–90(8): 231–237.
- [22] RAJPUT M S, PANDEY P M, JHA S. Micromanufacturing by selective jet electrodeposition process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(1–4): 61–67.
- [23] SEOL S K, KIM D, LEE S, et al. Electrodeposition-based 3D printing of metallic microarchitectures with controlled internal structures[J]. *Small*, 2015, 11(32): 3896–3902.
- [24] KAMARAJ A, LEWIS S, SUNDARAM M. Numerical study of localized electrochemical deposition for micro electrochemical additive manufacturing[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 42: 788–792.
- [25] CHEN X L, LIU X H, CHILDS P, et al. A low cost desktop electrochemical metal 3D printer[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, 2(10): 1700148.
- [26] 王华明. 航空高性能金属结构件激光快速成形研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2005, 48(12): 26–28.
- WANG Huaming. Progress of laser rapid prototyping for high performance metal structures in aviation[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2005, 48(12): 26–28.
- [27] 郭东明, 王晓明, 赵福令, 等. 面向快速制造的特种加工技术 [J]. *中国机械工程*, 2000, 11(S1): 206–211.
- GUO Dongming, WANG Xiaoming, ZHAO Fuling, et al. Rapid manufacturing oriented non-traditional machining technology [J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(S1): 206–211.
- [28] 吴安德, 王帮峰, 吕益艳, 等. 一种新的快速成形技术—选择性电铸 [J]. *中国机械工程*, 2000, 11(S1): 81–82.
- WU Ande, WANG Bangfeng, LÜ Yiyang, et al. Selected electroforming: a new rapid prototyping technique[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(S1): 81–82.
- [29] 黎建军, 李湘生, 梁天长, 等. 数控选区电化学沉积快速成型的基础试验 [J]. *机械设计与研究*, 2009(8): 100–102.
- LI Jianjun, LI Xiangsheng, LIANG Tianchang, et al. Fundamental investigation on rapid prototyping of numerical selective composite electrodeposition[J]. *Machine Design and Research*, 2009(8): 100–102.
- [30] 姜笃山. 精密电铸法制造复杂薄壁零件的工艺研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- JIANG Dushan. Study on precision electroforming technology of complex thin-walled parts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [31] 李高飞. 数控选区电沉积快速成型的成型质量研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2010.
- LI Gaofei. Research on forming quality of numerical-controlled selective electrodeposition rapid prototyping[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2010.
- [32] 朱本苓. 摩擦电沉积快速成形金属零件的基础研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHU Benling. Basic research on rapid prototyping and electrodeposition with friction[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [33] WANG P, ROBERTS R C, NGAN A H W. Direct microfabrication of oxide patterns by local electrodeposition of precisely positioned electrolyte: the case of Cu₂O[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27423.
- [34] 徐敏敏, 梅金华, 姚建林, 等. [BMIm]BF₄/Pt 电极界面激光诱导电沉积 Cu 基材料研究 [J]. *电化学*, 2016, 22(6): 577–581.
- XU Minmin, MEI Jinhua, YAO Jianlin, et al. Investigation on laser induced deposition of Cu-based materials at [BMIm]BF₄/Pt electrode interface[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2016, 22(6): 577–581.
- [35] 蔡明霞, 张朝阳, 姜雨佳, 等. 激光辅助局部电化学沉积的试验研究 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 46(5): 769–773.
- CAI Mingxia, ZHANG Chaoyang, JIANG Yujia, et al. Experiment of laser-assisted localized electrochemical deposition[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 46(5): 769–773.
- [36] 王桂峰. 平整、多元、交织射流电沉积形态控制技术的基础研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- WANG Guifeng. Basic research on deposit morphology control technologies in jet electrodeposition by smoothing, muticomponenting and interlacing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [37] 乔桂英, 荆天辅, 高明, 等. 高速喷射电沉积块体纳米晶 Co-Ni 合金 [J]. *材料热处理学报*, 2004, 25(1): 61–65.
- QIAO Guiying, JING Tianfu, GAO Ming, et al. Study on high speed jet-electrodeposition bulk nanocrystalline Co-Ni alloy[J]. *Transactions of Materials & Heat Treatment*, 2004, 25(1): 61–65.
- [38] 赵阳培, 黄因慧, 刘志东, 等. 扫描喷射电沉积纳米晶铜的试验研究 [J]. *电加工与模具*, 2004(5): 26–29.
- ZHAO Yangpei, HUANG Yinhuai, LIU Zhidong, et al. Experimental investigation of nanocrystalline copper prepared by scanning jet electrodeposition[J]. *Electromachining & Mould*, 2004(5): 26–29.

- [39] HUANG D Z, SHEN L D, CHEN J S, et al. The influence of cathode surface velocity on friction aided jet electrodeposition[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2014, 67(3): 351–357.
- [40] 朱军. 摩擦辅助喷射电沉积技术工艺试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- ZHU Jun. Experimental study on friction aided jet electrodeposition[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [41] 邹洁. 氨基磺酸盐镀镍的沉积速率与电流效率的研究[J]. 电镀与环保, 2013, 33(6): 12–14.
- ZOU Jie. An investigation on deposition rate and current efficiency of sulfamate nickel electroplating[J]. Electroplating & Pollution Control, 2013, 33(6): 12–14.
- [42] 熊毅. 纳米晶块体镍的喷射高速电沉积及其微观结构研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2001.
- XIONG Yi. Study on the high speed jet electrodeposition of nano-crystalline bulk nickel and their micro-structure[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2001.
- [43] ZHU Z W, ZHU D, QU N S, et al. Electroforming of revolving parts with near-polished surface and uniform thickness[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(11/12): 1164–1170.
- [44] 章勇, 朱增伟, 高虹, 等. 一种新的电铸阳极轮廓设计方法[J]. 航空学报, 2012, 33(1): 182–188.
- ZHANG Yong, ZHU Zengwei, GAO Hong, et al. New design method of electroforming anode profile[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(1): 182–188.
- [45] 章勇. 大型结构件精密电铸关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHANG Yong. Research on key technology of precision electroforming for large structural parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [46] 朱荻, 王明环, 明平美, 等. 微细电化学加工技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(2): 151–155.
- ZHU Di, WANG Minghuan, MING Pingmei, et al. Micro electrochemical fabrication[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005, 3(2): 151–155.
- [47] 朱荻, 张朝阳, 明平美, 等. 微细电化学加工技术的研究与发展[C]//2005 中国机械工程学会年会. 重庆, 2005.
- ZHU Di, ZHANG Chaoyang, MING Pingmei, et al. Development of micro-electrochemical machining technology[C]// Proceedings of Chinese Mechanical Engineering Society. Chongqing, 2005.
- [48] 隋丽, 石庚辰. EFAB 加工技术及其在微机电系统中的应用[J]. 微计算机信息, 2007, 23(2): 257–259.
- SUI Li, SHI Gengchen. EFAB technology and its applications in MEMS[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(2): 257–259.
- [49] LI C. Electrochemical fabrication of silver dendrites as an excellent platform for surface enhanced Raman scattering application[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2017, 12: 3252–3262.
- [50] KIM H, KIM J G, PARK J W, et al. Selective copper metallization of nonconductive materials using jet-circulating electrodeposition[J]. Precision Engineering, 2017, 51: 153–159.

通讯作者: 田宗军, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为特种加工技术、增材制造(3D 打印技术), E-mail: tianzj@nuaa.edu.cn。

Research Status and Development in Ionic Liquid Beam Additive Manufacturing

SHEN Lida, TIAN Zongjun, XIE Deqiao, LÜ Fei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] The ionic liquid beam additive manufacturing technique combines the characteristics of electrochemical deposition and additive manufacturing. It has received extensive attention due to its characteristics of metal manufacturing at normal temperature and liquid beam processing. The evolution history of ionic liquid beam additive manufacturing technique is reviewed briefly. In view of its poor localization and low manufacturing efficiency, the ionic liquid beam additive manufacturing technique based on jet electrodeposition is proposed. Finally, some research focuses and development prospects which are the ionic liquid beam additive manufacturing for special-shaped parts, large structural parts, micro components and multi-functional composite parts are also pointed out.

Keywords: Metal; Additive manufacturing; Ionic liquid beam; Jet electrodeposition; Development trend

(责编 李丹)