doi: 10. 11933 / j. issn. 1007-9289. 20220331001

定域性电化学增材制造三维微螺旋构件工艺*

潘佳宝 贾卫平 吴蒙华 苏晓冰 刘 涛 (大连大学机械工程学院 大连 116622)

摘要: 针对电化学增材制造已有较多探究,但研究内容多为工艺参数对柱体成形质量的影响,工艺参数对微螺旋构件的影响 尚缺乏系统研究。通过单因素试验法研究极间电压、脉冲占空比和初始极间隙对微螺旋结构直径、体沉积速率和表面形貌的 影响,采用数字显微镜及扫描电镜对微螺旋构件进行检测,得出极间电压为 4.0~4.4 V 时,可以制备出直径均匀、形状规整 的微螺旋结构,微螺旋结构体沉积速率由 210 μm³/s 增长至 5 728 μm³/s;而电压增至 4.6 V 时,微螺旋结构出现大量瘤状沉 积。当初始极间隙从 5 μm 增加到 20 μm 时,微螺旋结构平均直径由 128 μm 增长至 163 μm。极间电压为 4.2 V、初始极间隙 为 10~20 μm 时,随着初始极间隙的增大,微螺旋结构底部明显变粗,直径波动较大。研究结果表明,采用三轴联动控制阳 极运动轨迹,定域电化学增材制造三维微螺旋构件,是三维金属微结构一种可行的技术方法。试验优化参数为极间电压 4.2 V、 脉冲占空比 60%和初始极间隙 5 μm 时,得到微观形貌质量较好、直径均匀的微螺旋构件(圈数为 2 圈、螺距为 400 μm)。 关键词:增材制造;定域电沉积;微螺旋结构;初始极间隙;极间电压;脉冲占空比 中图分类号: TQ153

Process for Localized Electrochemical Additive Manufacturing of Three-dimensional Micro-spiral Components

PAN Jiabao JIA Weiping WU Menghua SU Xiaobing LIU Tao (College of Mechanical Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: Localized electrochemical additive manufacturing technology has long always been a research hotspot in the field of additive manufacturing, because of its advantages such as deposition on a variety of materials, electrodeposited high- precision complex structures, and production of the micro- and nanoscale metal parts. Most studies have focused on the influence of process parameters on microcylinder electrodeposition; their influence on microspiral parts has yet to be investigated systematically. In this study, micronickel spiral parts with a height of approximately 1 mm were successfully manufactured using localized electrochemical additive manufacturing technology. Single-factor experiments were carried out to investigate the effects of the electrode voltage, pulse duty cycle, and initial interelectrode gap on the diameter of spiral parts, rate of deposition and surface morphology. An electrochemical deposition experimental platform was built with a tapered platinum wire and copper plate as the anode and cathode, respectively. The electroplating solution flowed from the microgap between the anode and diversion cavity down to the surface of the copper substrate, applying the voltage. A three-axis linkage platform was used to control the trajectory of the anode. The microspiral parts were electrodeposited by the precise point-to-point matching path of the anode to the deposition structure. The microscopic morphology and cross-sectional diameters of the bottom, middle, and tip of the microspiral component were investigated by scanning electron microscopy and digital microscopy. The results show that the electrode voltage, initial electrode gap, and duty cycle are the key parameters that determine whether the spiral structure can be formed. The spiral microcomponent is divided into three parts: the bottom part deposited on the copper substrate plane, the middle rotating part, and the tip of the spiral structure. The electrodeposited bottom structure tends to be conical, which is the tip effect at the end of the shape. When the electrode voltage is between 4.0 V and 4.4 V, the microspiral parts display a uniform and regular structure, and a large number of nodular deposits up to 4.6 V. The deposition rate increased from 210 μ m³/s to 5 728 μ m³/s when the voltage increased from 4.0 V to 4.6 V, which tends to grow

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51875071)。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51875071). 20220331 收到初稿, 20220915 收到修改稿

linearly. The average diameter of the microspiral structure increased from 128 μ m to 163 μ m when the initial interelectrode gap increased from 5 μ m to 20 μ m. The bottom of the microspiral structure became thicker and the diameter fluctuations increased. The spiral structure has regular shape and uniform diameter when the pulse duty ratio is between 50% and 60%. When the pulse duty cycle increased to 70–80%, the spiral structure appeared as large tumor-like deposits. Finally, the microspiral component (two turns; pitch of 400 μ m) with good micromorphology and uniform diameter was obtained under the following optimized experimental parameters: interelectrode voltage of 4.2 V, pulse duty cycle of 60%, and initial electrode gap of 5 μ m. This study demonstrates the feasibility of using localized electrochemical additive manufacturing technology to produce three-dimensional metal microspiral structures. **Keywords:** additive manufacturing; localized electrodeposition; micro-spiral; initial gap; electrode voltage; pulse duty cycle

0 前言

近年来,机械制造领域不断向着精密化、小型 化及紧凑化方向发展^[1-2]。目前,MEMS产品在航空 航天、生物医疗、精密仪器、机器人及军事等领域 得到广泛应用^[3]。而现有的 MEMS 技术仍有一些局 限性,如零件形状现仅限于二维,难以满足在一些 形状精度要求较高的器件上,比如涉及到一些有曲 率、斜率的平面及微尖形阵列、悬臂梁及螺旋线等 的空间三维微细结构^[4-7]。为此学者们在不断寻求新 的解决办法,试图通过不同的加工工艺使微构件具 有更优的性能。

定域性电化学增材制造技术不仅拥有增材制造 技术可在多种材料上沉积、精度高和复杂结构成形 制造的优势,还能制造宏微观甚至微纳米尺度金属 零件的特点,并且这两种方法均无需支撑结构便可 以快速成形,所以定域性电化学增材制造一直以来 是增材制造领域不可或缺的研究热点^[8-11]。HU 等^[12]使用半月板约束电沉积以直接书写的方式,制 作出锯齿形和正弦形的螺旋线三维结构,并且为了 改变螺旋线的螺旋角,利用扫描探针的三维电沉积 方法制备了新的微管结构。LIN 等^[13]用间歇式 MAGE(即微阳极引导电镀)来定义 LECD(定域 性电化学沉积)过程,制作出微米级的铜弹簧。 MURALI等^[8, 14]采用无掩模定域性电化学增材制造 技术,根据 CAD 模型制造镍微结构的增材制造 (Additive manufacturing,AM)系统,成功地利用 尖锥状微型电极制作出30层厚(每层厚度约10μm) 的"C"形微结构和一个高度和悬突约600μm的镍 质三维自由悬挂构件,另外通过仿真与试验,探索 了电沉积过程中工艺参数的变化对输出沉积结构尺 寸的影响。由上可知,电化学增材制造的构件多为 圆柱体,研究内容为工艺参数对柱体成形质量的影 响,尚很少有提高微螺旋构件精度的研究^[15-18]。

本文利用微型尖锥形探针式铂阳极来引导电沉 积,通过控制三坐标移动工作台的精确运动,基于 定域性电化学增材制造技术,在铜基板上制备微镍 螺旋结构,研究了电极间初始极间隙、脉冲占空比 和极间电压对微镍螺旋构件微观形貌、体沉积速率 和直径的影响,为定域性电化学增材制造三维复杂 微构件提供参考。

定域性电化学增材制造微螺旋结构 的成形原理



定域性电化学增材制造成形原理如图1所示。



Fig. 1 Forming principle of localized electrodeposition additive manufacturing

电镀液以射流方式流到阴极表面, 阴、阳极与射 流电镀液构成电沉积体系。射流而下所形成的流体界 面,从外向内分为外围区和中间滞留区,由于电镀液 以连续、匀速的方式进行喷射,理论上滞留区中心部 分的相对流速为零,反应相对稳定。在射流覆盖区, 阳极与阴极基板通过电镀液构成回路,电镀液源源不 断流向阴极基板表面,由于电流束内的电场线在阴极 基底与阳极尖端正对微区域内产生较大的电流密度, 加工电流通过该区域发生电化学反应将电镀液中的 金属阳离子(Ni²⁺)通过迁移、扩散、对流作用还原 为金属 Ni 单质沉积,而其他部位因没有电流束通过 使得电流密度较小,则不会沉积或发生少量沉积。采 用三轴联动工作平台连接阳极进行沉积,通过阳极路 径与微螺旋结构点对点的精确匹配便形成螺旋结构 的沉积。因此,定域性电化学增材制造不仅有较快的 液相传质过程,而且具有选择性沉积的优点,这就让 电化学增材制造三维微结构成了可能。

定域性电化学增材制造的电沉积与过电位值有 一定关系,而过电位值会受极间电压、脉冲占空比、 初始极间隙综合作用的影响,因此选择适当的电沉 积工艺参数可以增材制造微螺旋结构^[19-20]。

2 试验

2.1 试验平台

定域电沉积增材制造试验平台如图2所示。







微型阳极通过阳极夹具装配在三坐标工作平台 (三英精控,SYMC-10)上,阴极铜基板固定在电 沉积槽中,阴阳极通过导线连接到电流表然后连接 到高频智能双脉冲电源(成都星同力,GKD12-5CVC),PMC 步进电机控制器(三英精控, PMC400-3)CNC 软件控制三轴联动工作平台的精 确移动。镀液通过蠕动泵带动导流管中的电镀液进 行循环,循环系统装有温控搅拌装置保证恒温电镀 液的连续进给。

2.2 试验工艺参数

电镀液是以氨基磺酸盐为主要成分的溶液, 镀 液配方及工艺参数见表 1, 将配制好的镀液放入 45~50 ℃的超声槽中水浴加热并搅拌 50 min。 30 mm×10 mm×2 mm 的铜片作为阴极基板,基板 的前处理过程为:打磨抛光—除油—水洗—除锈— 水洗—活化。铂丝作为阳极,用砂纸将铂丝顶端打 磨成尖锥状,尖端圆角直径小于 15 μm; 然后将打 磨过后的阳极放入质量分数为 30%的稀盐酸溶液中 活化处理,常温下活化时间为 3~5 min;最后在阳 极外部加置套筒,套筒壁上连接导通镀液的导流管, 阳极尖端应伸出套筒约 200 μm。采用单因素试验 法,同一参数下制备 3 个试样。

表1 电镀液成分和配比及工艺参数

Table 1 Composition of electroplating solution and

process parameters	
Composition	Content
$Ni(NH_2SO_3)_2 \bullet 4H_2O / (g \bullet L^{-1})$	300
$NiCl_2 \bullet 6H_2O / (g \bullet L^{-1})$	30
$\mathrm{H_{3}BO_{3}}/(\mathrm{g}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{L^{-1}})$	30
Flow velocity of plating solution / (ml \cdot min ⁻¹)	30
Deposition height / µm	1 000
Temperature / °C	45-50
Pulse frequency / kHz	10
Duty cycle / %	50, 60, 70, 80
Inter-electrode gap / µm	5, 10, 15, 20
Pulse voltage / V	4.0, 4.2, 4.4, 4.6
PH value of electroplating solution	4

2.3 检测方法

采用扫描电子显微镜(ZEISS, EVO18)观察 微螺旋结构的微观形貌。采用数字显微镜 (OLYMPUS, DSX1000)测量微螺旋结构各截面 直径。 测量微螺旋构件底部与微螺旋结合部分直径 (\bar{D}_1)、中间微螺旋结构旋转部分直径(\bar{D}_2)和微 螺旋结构尖端直径(\bar{D}_3)三个部分截面直径。微螺 旋结构直径(\bar{D})计算方法为:将微螺旋结构三个 特殊部分均匀取 n 个测量点,各截面直径取平均 值,即:

$$\overline{D}_i = \frac{1}{n} \sum_{k_i=1}^n D_{k_i} \tag{1}$$

$$\bar{D} = \frac{1}{3} \left(\bar{D}_1 + \bar{D}_2 + \bar{D}_3 \right)$$
(2)

式中, \bar{D} 表示直径; \bar{D}_i 为任意部分截面的直径;i取 1、2、3; D_k 为任意截面的直径;n取 5。

微螺旋结构沉积速率(v)计算方法为:用沉积体积与沉积时间的比值来表示,同一参数条件下制备试样的沉积速率取平均值。其中体积计算方法为:将微螺旋结构平均分成足够多段,基于微元思想应用 MatLab 把测量各截面直径分段体积求和。

$$v = \frac{V}{t} \tag{3}$$

式中,v表示沉积速率;V表示制备微螺旋结构的体积;t表示沉积时间。

3 结果与讨论

3.1 定域电沉积微螺旋结构的工艺

定域电沉积微螺旋结构试验采用三轴联动工 作平台控制微阳极路径,使其与微螺旋结构点对 点地精确匹配,制备高度为1 mm 的微镍螺旋结 构。通过试验探索得到能否成形螺旋结构主要与 极间电压、脉冲占空比和初始极间隙这三个工艺 参数有关。

初始极间隙与脉冲占空比为定值时,极间电

压值低,电流密度小,沉积效率低;极间电压增 大,电流密度变大,但同时析氢反应剧烈,产生 氢气增多,不能进行有效电沉积;若极间电压与 脉冲占空比或极间电压与初始极间隙为定值,初 始极间隙或脉冲占空比过大也不能进行电化学成 形构件。

极间电压主要影响加工区域的电场、加工过程 和加工速度,从而影响加工质量。过低的极间电压 难以使微螺旋结构生长,过高的极间电压会引起沉 积表面质量低、大量大晶胞凸起。脉冲占空比主要 影响加工区域的离子浓度,从而影响加工速度。过 低的脉冲占空比使得开启时间过短,主要影响生长 速度,过高的脉冲占空比使得开启时间过短,主要影响生长 速度,过高的脉冲占空比使得开启时间过长,导致 生长过程中消耗的离子不能得到及时补充,进而影 响沉积质量。初始极间隙主要影响加工区域的电场 分布,过大的初始极间隙使得电场分布过于分散, 导致沉积质量过差甚至不能沉积成形;过小的初始 初始极间隙使得电场分布过于密集导致尖端优势现 象明显、沉积过程难以控制。

螺旋形微构件主要分为底部与微螺旋结合部 分、中间螺旋旋转部分和螺旋结构尖端三个部分。 观察各个螺旋结构底部与螺旋结构结合部分,如 图 3a 所示,发现工艺参数的不同决定着结合部分 过渡的是否平滑,而且底部的沉积趋近于圆锥状, 这是因为在光滑平整的基板上进行电沉积,从铂 阳极尖端流到阴极基板上的电解液,其电场的分 布状态呈尖锥状分布,这就是形状末端的"尖端 效应"。观察各个螺旋结构的中间部分,如图 3b 所示,发现工艺参数也决定着螺旋结构旋转部分 沉积是否产生分支,结构是否紧凑。观察各个微 螺旋结构尖端部分,如图 3c 所示,发现工艺参数 还决定着顶部是否有较大瘤状沉积。因此,只有 选择适当的电沉积工艺参数才可以用电化学增材 制造成形微螺旋结构。



(a) Part attached to the spiral structure

(b) Rotating part of the middle spiral structure



(c) Part at the tip of the spiralstructure

(d) Overall shape of spiral structure

图 3 微螺旋结构各部分及整体的微观形貌

Fig. 3 Micromorphology of each part and the whole of the micro-spiral structure

3.2 极间电压对镍微螺旋结构形貌、直径及沉积速 率的影响

不同极间电压下电化学增材制造微螺旋结构的

光学图像如图 4 所示。工艺条件为脉冲占空比 60%、 初始极间隙 5 μm,极间电压分别为 4.0、4.2、4.4、 4.6 V。



(a) 4.0 V

(b) 4.2 V



(c) 4.4 V



图 4 不同极间电压下微螺旋构件图像

Fig. 4 Pattern of microspiral components at different inter-electrode voltages

在极间电压 4.0V 时, 沉积构件如图 4a 所示, 其表面质量最好,形状规整,但是对比极间电压 为 4.2~4.6 V 的沉积过程,在其他微螺旋结构已 经开始成形旋转结构时,极间电压为 4.0 V 下的 微螺旋结构才刚刚成形,并且表现为正态分布状 的基底, 致使在此电压下沉积微螺旋结构需要更 长的沉积时间。当极间电压为 4.2 V 时, 如图 4b 所示,其表面质量良好且结构紧密,均匀致密且 旋转部分圆滑,顶部无较大瘤状沉积。当极间电 压增加到 4.4 V 时, 如图 4c 所示, 开始出现少量 较大瘤状沉积, 使得螺旋结构的直径变化有所波 动。当极间电压大到 4.6 V 时, 如图 4d 所示, 出 现大量不规则的瘤状沉积使得其表面不平整,这 使得螺旋结构的直径波动变大,由于过大的极间 电压导致沉积定域性变差,致使螺旋结构出现形 状不规则和部分结构粗大的现象。

极间电压与微螺旋结构平均直径、沉积速率 的关系分别如图 5、6 所示。当极间电压在 4.0~ 4.2 V时,平均直径变化明显,而在 4.2~4.4 V时变 化趋于平缓,平均直径由 77 µm 增长至 153 µm; 当极间电压在 4.0~4.6 V 时,体沉积速率趋于 线性增长,体沉积速率由 210 μ m³/s 增长至 5 728 μ m³/s。

对极间电压对微螺旋结构形貌和成形的影 响,分析认为,极间电压较低时,电流密度小, 电场分布较为均匀,体沉积速率相对较低,所以 扩散到微区域的 Ni²⁺能完全满足还原反应所消耗 的离子,因此沉积的微螺旋结构表面质量良好, 结构趋于紧密,尖端部分光滑,形状规整。随着 极间电压的增大,电流密度随之增大,电场强度 也随之增强,尖端效应开始变得明显,沉积容易 在中间部分进行反应而屏蔽两边,使得微螺旋结 构有从下至上直径逐渐变小的趋势,并且开始出 现少量瘤状结构。在沉积过程中,由于沉积不断 进行,锥状微型阳极与阴极基板不断远离,但与 沉积微螺旋结构的距离始终不变, 使得阳极与阴 极之间的电场线分布范围随着极间电压的增大而 不断变得更大,所以微螺旋结构的直径也随之变 大。当极间电压值持续增大到 4.6 V 时,脉冲电 源工作阶段消耗的 Ni²⁺难以从电解液中得到充分 的补充,不能及时扩散到沉积微区域,另外在沉 积过程中还会发生析氢反应。氢气从阴极中分离 出来后,在电解液内部形成一些气泡,这些气泡 总是附着在阴极表面,会阻碍镍离子在该位置的 沉积。由于施加的电位与电流成正比,当电位增 大时,沉积微螺旋结构表面形貌粗糙,结构粗大。 此时螺旋结构表面瘤状沉积明显,已经接近电沉 积的极限极间电压,当极间电压超过 4.6 V时, 将不会再沉积出形状规则的螺旋结构。



图 5 极间电压与微螺旋结构平均直径的关系 Fig. 5 Relationship between electrode voltage and average diameter of micro-spiral structure



图 6 极间电压与微螺旋结构体沉积速率的关系 Fig. 6 Relationship between electrode voltage and deposition rate of micro-spiral structure

3.3 脉冲占空比对镍微螺旋结构形貌、直径及沉积 速率的影响

不同脉冲占空比下电化学增材制造微镍螺旋结构的光学图像如图 7 所示。工艺条件为:在极间电压为 4.2 V、初始极间隙为 5 μm,脉冲占空比分别为 50%、60%、70%、80%。



(a) 50%

(b) 60%







可以看出,当脉冲占空比在 50%~60%时,螺旋结构形状规整、直径均匀。当脉冲占空比增至 70%时,如图 7c 所示,螺旋结构顶端开始出现较大的瘤状晶胞,表面比较粗糙;当脉冲占空比增至 80%时,如图 7d 所示,螺旋结构直径不均匀,表面更为粗糙,顶端出现大量瘤状沉积,且旋转部分有出现横向生长的趋势。

脉冲占空比对微螺旋结构平均直径和体沉积速 率影响,分别如图 8 和图 9 所示。由图可知,螺旋 结构平均直径呈增大趋势,当脉冲占空比在 50%~ 70%时,螺旋结构直径随着脉冲占空比的增大而增 大,当脉冲占空比增至 70%及以上时,螺旋结构直 径增大趋势开始变得缓慢,当脉冲占空比从 50 %增 大到 80%时,平均直径由 116 µm 增长至 152 µm。 螺旋结构体沉积速率趋于线性增大,当脉冲占空比 达到 80%时,螺旋结构体沉积速率趋于平缓不再增 大,达到 2 774 µm³/s;当脉冲占空比为 50%时体沉 积速率最低为 629 µm³/s。 对脉冲占空比对微螺旋结构形貌和成形的影响,分析认为,脉冲占空比越小时,脉冲关断时间越长,电镀液中的金属 Ni²⁺可以扩散到电沉积 微区域内及时补充消耗。因此,当脉冲占空比不大于 70%时,沉积的螺旋结构表面光滑、形状规







图 9 脉冲占空比与微螺旋结构沉积速率的关系



- 整。当脉冲占空比大于 70%时,脉冲关断时间较
- 短,金属 Ni²⁺难以及时扩散到沉积微区以补充消
- 耗;同时,平均电流密度随着脉冲占空比的增大

而增大,高的电流密度会促进氢气析出,从而导 致沉积螺旋结构直径不均匀、形貌粗糙,结构粗 大。当脉冲占空比在 50%~70%时,随着脉冲占 空比的增大,单位沉积区域内平均电流密度随之 增大且脉冲电流作用时间更长,所以体沉积速率 增大;但当占空比大于 70%时,脉冲关断时间短, 容易产生浓差极化现象,降低法拉第电流效率, 同时较短的关断时间会使析氢作用产生的氢气不 能及时排出,降低电镀液的导电能力,造成体沉 积速率下降。

3.4 初始极间隙对镍微螺旋结构形貌、直径及沉积 速率的影响

初始极间隙不同时,电化学增材制造微镍螺旋 结构的光学图像如图 10 所示。工艺参数为:极间电 压 4.2 V、占空比 60%,初始极间隙分别为 5、10、 15、20 μm。



(a) 5 µm

(b) 10 µm



(c) 15 µm

(d) 20 µm



Fig. 10 Pattern of micro-spiral components under different initial electrode gaps

当初始极间隙 δ ($\delta \leq 10 \mu m$)较小时,沉积的 微螺旋结构整体形状均匀、直径无大突变;当初始 极间隙 δ 较大 (10 $\mu m < \delta \leq 20 \mu m$)时,螺旋结构 体开始出现较多瘤状晶胞。当初始极间隙 δ 增至 20 μm 及以上时,不能形成螺旋结构。

初始极间隙与沉积成形微螺旋构件的平均直径 和体沉积速率的关系,如图 11、12 所示。当初始 极间隙 δ 为 5~20 µm 时,随着初始极间隙的增大, 螺旋结构的平均直径增大,体沉积速率减小,其平 均直径由 128 µm 增大至 163 µm,体沉积速率由 1 323 µm³/s 减小至 1 089 µm³/s。









对初始极间隙对微螺旋结构形貌和体沉积速 率、平均直径的影响,分析认为,当初始极间隙 δ 较 小($\leq 10 \mu m$)时,在沉积微区域的极间电场线分 布集中且均匀,沉积状态相对稳定,所以螺旋结 构整体形状均匀、直径无较大突变。当初始极间 距 δ 较大(10 $\mu m < \delta \leq 20 \mu m$)时,极间电场线分 布相对发散,能够维持电沉积的电场线分布范围 广,阳极尖端对应的电化学沉积微区域扩大,所 以电沉积螺旋结构的底部直径较大。随着沉积进 行,尖端效应越来越明显,使得尖端单位区域内 电流密度逐渐增加,电场线分布趋于集中,所以 沉积螺旋结构的直径会逐渐变小。初始极间隙增 大时,极间电场线发散且电场强度减弱,两极间 的工作电阻变大,会降低单位区域内的电流密度, 造成体沉积速率下降。

4 结论

合理控制阳极运动轨迹,基于电沉积增材制造 技术制备三维微螺旋构件,探究了不同工艺参数(极 间电压、脉冲占空比、初始极间隙)对微螺旋结构 的影响规律,可得出如下结论:

(1)极间电压为 4.0~4.4 V时,可以制备出形状规整、直径较为均匀的微螺旋结构,但电压继续增大到 4.6 V后,成形质量较差。随极间电压增加,微螺旋结构的沉积速率和直径随之增大。

(2)初始极间隙δ≤10 µm 时,沉积微螺旋结构 直径趋于均匀,表面光滑;当初始极间隙为10 µm< δ≤20 µm 时,随着初始极间隙增大,微螺旋结构的 沉积速率减小,直径明显增大。

(3) 脉冲占空比在 50%~60%时, 螺旋结构形 状规整、直径均匀。当脉冲占空比增至 70~80%时, 螺旋结构出现较大的瘤状沉积。

所得结果可为三维微螺旋构件的制备提供一定的技术支持。后续将继续对所制备的三维微螺旋结构的力学性能进行探究,完善工艺参数对三维微螺旋构件影响规律的探究。

参考文献

- GHOSHAL B, BHATTACHARYYA B. Electrochemical micromachining of microchannel using optimum scan feed rate[J]. Journal of Manufacturing Processes. 2016, 23(8): 258-268.
- [2] 曹云,席占稳,王炅,等. UV-LIGA 工艺误差对 MEMS 万向惯性开关性能的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(9): 1815-1823.

CAO Yun, XI Zhanwen, WANG Jiong, et al. Effect of UV-LIGA process error on the performance of MEMS universal inertia switch[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(9): 1815-1823. (in Chinese)

2023年

[3] 朱宁莉. 航空 MEMS 推进器发展现状及趋势[C]//第六 届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第四 十二届技术交流会 2021 航空发动机技术发展高层论坛 论文集(第六册)成都, 2022-04-07. 中国科协航空发 动机产学联合体, 2021.

ZHU Ningli. Development status and trend of aero-MEMS thrusters [C]//Proceedings of the Sixth Joint Conference on Aerospace Power and the 42nd Technical Exchange Conference 2021 Aero-Engine Technology Development Forum (Volume 6), Chengdu, 2022-04-07. Aeroengine Industry. University Consortium of China Association for Science and Technology, 2021. (in Chinese)

- [4] PATRIK S, RAJAPRAKASH R, LASZLO P, et al. Additive manufacturing by template-assisted 3D electrodeposition: nanocrystalline nickel microsprings and microspring arrays[J]. Applied Materials Today, 2019, 18: 100472.
- [5] DINH C Q, 徐宁, 李成园, 等. 电铸参数对铜基平面 微弹簧疲劳性能的影响[J]. 兵工学报, 2016, 37(7): 1252-1257.
 DINH C Q, XU Ning, LI Chengyuan, et al. Effect of

electroforming parameters on fatigue performance of copper base plane micro-spring[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(7): 1252-1257. (in Chinese)

- [6] 孟香茗, 宋振兴, 卜路霞, 等. 电沉积法制备纳米线阵列的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(6): 35-40.
 MENG Xiangming, SONG Zhenxing, BU Luxia, et al. Research progress of producing nanowire arrays by electrodeposition[J]. Electroplating and Finishing, 2021, 43(6): 35-40. (in Chinese)
- [7] ERIC M D, RYAN W. Multiprocess 3D printing forincreasing component functionality[J]. Science, 2016, 6307(353): 1512-1520.
- [8] MURALI M S, ABISHEK B K, VARUN S K. Maskless electrochemical additive manufacturing a feasibility study[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, 137(2): 021006.
- [9] 张衡,杨可. 增材制造的现状与应用综述[J]. 包装工程 2021, 42(16): 9-15.
 ZHANG Heng, YANG Ke. Review on status and application of additive manufacturing[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(16): 9-15. (in Chinese)
- [10] LU B H, LI D C, TIAN X Y. Development trends in additive manufacturing and 3D printing[J]. Engineering, 2015, 1(1): 85-89.

[11] 明平美,李欣潮,张新民,等. 电化学三维微沉积技术 及其研究进展[J]. 中国科学:技术科学,2018,48(4): 347-359.

MING Pingmei, LI Xinchao, ZHANG Xinmin, et al. Research progress of electrochemical three-dimensional micro-deposition technology[J]. Sci Sin Tech, 2018, 48(4): 347-359. (in Chinese)

- [12] HU J. Interfacial physics in meniscus-confined electrodeposition and its applications for fabricating electronic structures[D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011.
- [13] LIN J C, CHEN Y S, HUANG C F, et al. Mechanical properties of copper micrometer pillars fabricated by intermittent MAGE process[J]. International Journal of Electrochemical Science. 2011, 6(8): 3536-3549.
- [14] NAREK M, ABISHEK K, MURALI S. Localized electrochemical deposition using ultra-high frequency pulsed power[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 139(34): 197-204.
- [15] WANG K, PAN W H, SONG J L. Simulation of re-entrant structures fabricated by electrochemical deposition[C]// International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation, Tianjing 2020-06-26. Institute of Electrical and Electronics Inc., 2020: 547-550.
- [16] 孙月花,彭超群,王小锋,等.直写成形技术:一种新型微纳尺度三维结构的制备方法[J].中国有色金属学报,2015,25(6):1525-1537.
 SUN Yuehua, PENG Chaoqun, WANG Xiaofeng, et al. Direct ink writing: A novel avenue for engineering micro-/nanoscale 3D structures[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(6): 1525-1537. (in Chinese)
 [17] 邹淑亭,兰红波,钱垒,等. 电流体动力喷射 3D 打印
- [17] 邹淑亭, 三红波, 钱坐, 等. 电流体动力喷射 3D 打印 工艺参数对泰勒锥和打印图形的影响和规律[J]. 工程 科学学报, 2018, 40(3): 373-380.
 ZOU Shuting, LAN Hongbo, QIAN Lei, et al. Influence of process parameters on taylor cone and printed graphics and its law in 3D printing by electro-hydrodynamic injection [J]. Journal of Engineering Science, 2018, 40(3): 373-380. (in Chinese)
- [18] YONG J C, YEAN R H, JING C L, et al. Comparison of simulation and experimental results for the deposition orientationin localized electrochemical deposition[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 37(3): 393-397.

- [19] 杨涛. 基于 3D 打印和微电铸技术的微零件制造工艺研究[D]. 太原:太原科技大学,2019.
 YANG Tao. Research on manufacturing process of microparts based on 3D printing and microelectroforming technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [20] WANG X, SHEN L D, QIU M B, et al. Effect of friction on preparation of NdFeB nickel coating by jet

electrodeposition[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018, 13(7): 7706–7717.

作者简介:潘佳宝,男,1996年出生,硕士研究生。主要研究方向为 电化学增材制造。

E-mail: 1227971847@qq.com

贾卫平(通信作者),女,1971年出生,博士,副教授。主要研究方向 为电沉积加工和电化学增材制造。

E-mail: 770818158@qq.com