

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.02.012

## 电镀青铜的镀层工艺性能研究

嵇海\*, 程纪华, 姚峰林, 陈晨

(中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 电镀青铜工艺在提升基体表面硬度、耐蚀性和耐磨性等方面效果显著, 但受限于当前工艺及零件的复杂结构, 特别是深腔区域, 电镀青铜难以达到预期的镀层厚度, 经常出现膜层分布不均、厚度不足等问题。本研究旨在利用电镀仿真技术改变传统的“经验设计-现场试制-纠错”开发模式, 通过模拟电镀过程, 优化工艺参数和工装设计, 显著提升了电镀零件的膜厚分布均匀性, 进而提高了生产效率, 减少了资源浪费。

**关键词:** 电镀青铜; 仿真技术; 均匀性

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

## Research on coating properties of electroplated bronze

Ji Hai\*, Cheng Jihua, Yao Yilin, Chen Chen

(AVIC Jincheng Nanjing engineering institute of aircraft system, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The electroplating bronze technology is very effective in enhancing the surface hardness, corrosion resistance and wear resistance of the substrate. However, due to the limitations of current technology and the complex structure of parts, especially in deep cavity areas, it is difficult for electroplating bronze to achieve the expected coating thickness. Common problems such as uneven distribution and insufficient thickness of the film layer often occur. This study aims to utilize electroplating simulation technology to change the traditional development model of "empirical design-field trial-correction". By simulating the electroplating process, the process parameters and fixture design are optimized, which significantly improves the uniformity of film thickness distribution of electroplated parts, thereby increasing production efficiency and reducing resource waste.

**Keywords:** electroplated bronze; simulation technology; uniformity

液压驱动泵作为液压系统中最核心、技术难度最大的组成部分, 在航空航天领域得到了广泛应用。其中, 关键摩擦副的润滑和摩擦磨损性能对驱动泵的性能和寿命具有重要影响。在这些关键摩擦副中, 柱塞缸与配流盘组成的配流副以及柱塞与柱塞腔组成的柱塞副尤为重要。提升摩擦副的润滑性能、降低摩擦磨损是提高柱塞泵机械效率、可靠性,

延长柱塞泵寿命的关键因素。

表面处理仿真技术作为一种计算仿真工具, 将实际电镀过程转移到计算机中进行模拟。利用多离子迁移模型、欧姆定律、拉普拉斯方程、泊松电力方程等公式构建的仿真模型, 可以通过仿真软件进行参数设置、工装设计以及零件在镀槽中的排布。通过仿真, 可以获取零件电镀后的表面电流分

收稿日期: 2024-05-14

修回日期: 2024-06-21

通信作者: 嵇海(1994—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为表面处理、腐蚀与防护, email: 1057595883@qq.com

引用信息: 嵇海, 程纪华, 姚峰林, 等. 电镀青铜的镀层工艺性能研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(2): 82-88.

Ji Hai, Cheng Jihua, Yao Yilin, et al. Research on coating properties of electroplated bronze[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(2): 82-88.

布、镀层厚度分布和镀层组成等特性。借助仿真技术,能够在较短时间内获得有效的工艺优化方案,从而提高镀层的质量和均匀性。

## 1 实验方法

试验选取的示意零件(如图1)按设计要求需对零件内孔电镀青铜,内孔镀层 $300\text{ }\mu\text{m}$ ,由于孔径比 $\geq 10$ ,现有的工艺无法满足内孔镀层 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的技术要求。镀青铜工艺难点:(1)青铜合金电镀属于合金共沉积体系,溶液置换不充分导致镀层出现成分不均匀的现象<sup>[1]</sup>;(2)镀层深度能力较弱,对于孔径比较小的深孔无法实现大尺寸镀覆<sup>[2]</sup>。

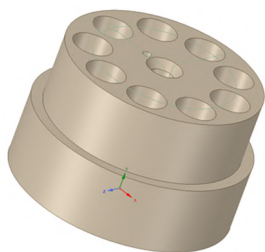


图 1 转子零件-摩擦副

Fig.1 Rotor parts - friction pair

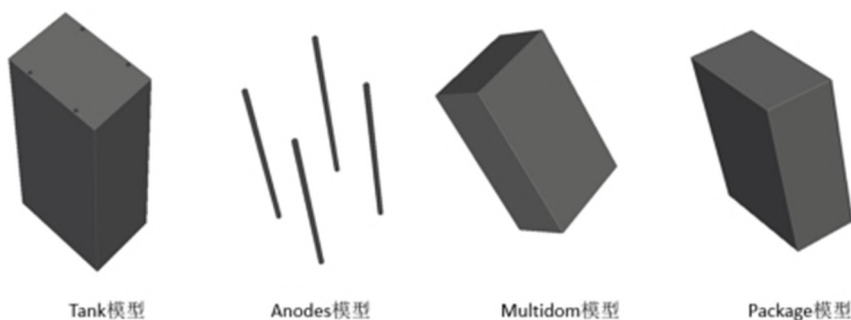


图 2 槽体模型

Fig.2 Tank model

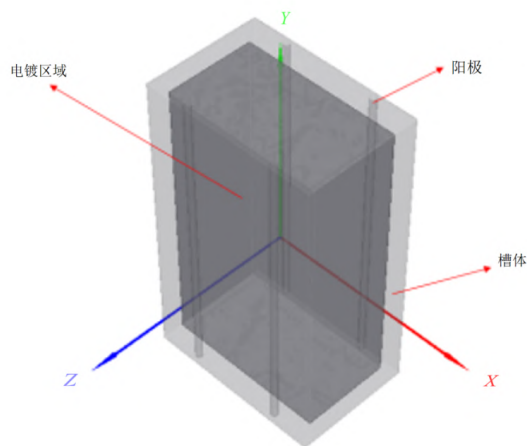


图 3 电镀槽模型

Fig.3 Model of plating tank

PlatingManager电镀仿真软件是基于真实的生产线和电镀槽液对电镀过程进行模拟仿真的软件。实际测量得到电镀槽的几何尺寸以及电镀液的电化学和物理性能参数,转换成仿真软件的基础数据,还原生产线模型。通过建立生产线模型,输入电镀生产线尺寸、电镀电化学反应和零件3D模型以及工艺参数等数据,经过一系列数值计算和方程求解,最终可以获得零件表面的镀层厚度分布<sup>[3]</sup>。

### 1.1 生产线建模

#### 1.1.1 槽体建模

电镀槽是电镀设备中最为基础的配套,为了配合仿真计算的进行,需要对电镀槽信息进行收集,包括镀槽的长宽高,主阳极的尺寸及摆放位置,然后利用三维建模软件根据收集的信息进行建模,建模内容包括Tank、Anodes、Multidom、Package4个模型,Tank为电镀槽体模型,Anodes为阳极,Multidom为镀液空间模型,Package则用于界定有效区域,以保证零件在实体槽中的位置不受干涉,如图2。将4个模型导入到Elsyca Line Generator软件进行生成数据库,形成如图3所示的槽体数据库。

#### 1.1.2 建立槽液数据库

槽液数据库是通过电镀槽液实验采集,利用三电极体系<sup>[4]</sup>,探测溶液的电化学特性<sup>[5]</sup>(电流效率、伏安特性),通过标准方法生成特定溶液的数据库以支撑Elsyca Plating Manager的电化学仿真。电镀槽液电化学特性采集与电镀仿真槽液数据库建模实验流程如图4所示。

实验装置为三电极体系,其中各个电极名称分别为工作电极(WE)、对电极(CE)和参比电极(RE),如图5所示。整个实验装置的实物搭建如图6所示。

整个系统分为工作系统、电源控制系统、检测控制系统和辅助系统4部分。下文将分系统介绍器材设备准备和搭建方法。



图4 实验流程图

Fig.4 Experimental flow chart

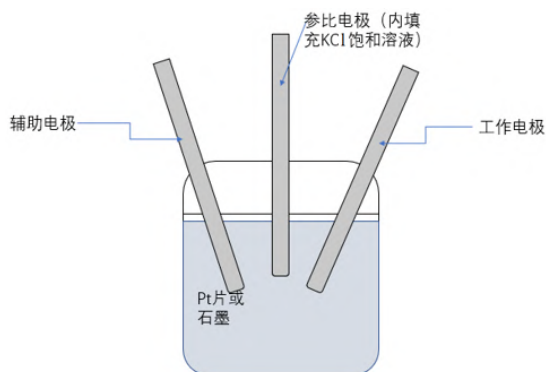


图5 三电极体系

Fig.5 Three-electrode system



图6 三电极体系实验装置实物搭建图

Fig.6 The scene drawing of test device with three-electrodes

实验的基本要点和方法是:

- 1)整个工作站是在辅助系统的支持下搭建;
- 2)三电极体系中的工作电极,对电极和参比电极与槽液形成一个小电流回路体系<sup>[6]</sup>;
- 3)工作电极是一个可控转速的旋转电极,用电极的旋转等效实际槽液的循环与对流;
- 4)使用检测控制系统的软件,将前期试验设计得到的电流电压程序,发送指令给电源控制系统,电源控制系统按程序输出对应的电流/电压和旋转参数<sup>[7]</sup>;
- 5)工作系统在给定的电压/电程序程和转速下进行电镀过程;
- 6)检测系统根据设定的频率检测和记录并最终储存和输出实际的电流、电压和电流密度等数据;
- 7)最后得到的数据经过标准化处理方法,用

Paint Analyzer软件生成槽液数据库,如表1。

表1 槽液数据库

Tab.1 Tank liquor database

电压/V	电流密度/(A·m <sup>-2</sup> )	沉积效率/%
-0.390	0	0.0
-1.043	-30	63.0
-1.107	-60	65.0
-1.150	-90	68.0
-1.213	-120	71.0
-1.555	-150	74.0
-1.785	-180	77.0
-2.105	-200	80.2
-2.245	-240	83.0
-2.475	-300	86.0
-2.864	-500	89.0
-5.065	-1 000	92.0
-8.266	-1 500	93.0
-13.607	-3 000	93.5
-15.868	-4 000	94.0
-20.169	-5 000	94.5
-22.470	-6 000	95.0
-23.771	-7 000	95.5
-24.674	-8 000	96.0
-25.373	-9 000	96.5
-26.074	-10 000	97.0
-26.775	-11 000	97.5
-27.476	-12 000	98.0

## 2 仿真及结果

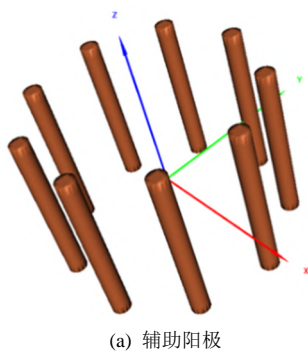
### 2.1 仿真计算结果

表面处理工艺过程中,为达到膜厚的均匀性分布或者满足技术要求,对于形状复杂的零件需要增加工装设计,比如遮蔽、辅助阳极、电流窃取等<sup>[8]</sup>,目前传统的表面处理工艺开发模式下,比较依靠现场工程师的经验,同时需要在现场进行多轮试制-纠错-验证流程,给生产带来极大的人力物力浪费。Plating Manager电镀仿真软件可以让这一过程在软件端进行,在软件中进行工艺参数的调整、零件排

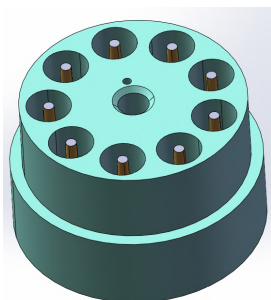
布的优化以及精确化工装设计。针对本项目,为了达到客户要求,利用Plating Manager电镀仿真进行了数十轮的迭代,结合工装加工可行性、零件上挂的方便性、以及现场生产过程中的槽液流动等因素<sup>[9]</sup>,最终确定最佳的工装设计方案和工艺参数。

### 2.1.1 第一轮优化仿真计算

根据现场零件排布方式及工艺参数以及实际数据,因内孔较小,现有工艺内腔基本无法满足内腔300  $\mu\text{m}$  镀层厚度,为解决腔内电场分布较弱的情况,设计如图7的辅助阳极,改善腔内的电场分布,然后利用Plating Manager仿真软件进行计算



(a) 辅助阳极



(b) 辅助阳极与转子零件相对位置

图 7 辅助阳极

Fig.7 Auxiliary anode

从图8仿真结果的膜厚分布来看,内腔膜厚基本满足 $\geq 300 \mu\text{m}$ 要求,但是内腔底部膜厚处于300  $\mu\text{m}$ 要求的临界值,有提升的空间,为了增加内腔底部膜厚,对该辅助阳极方案进行优化。

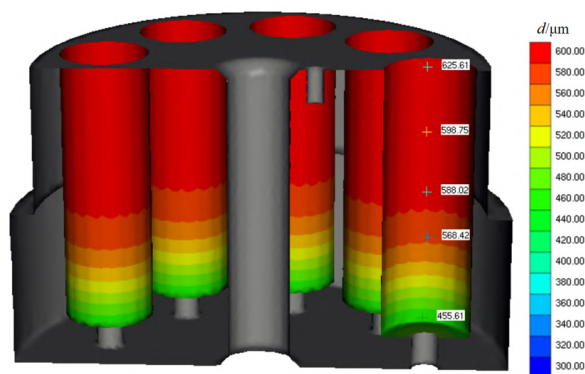


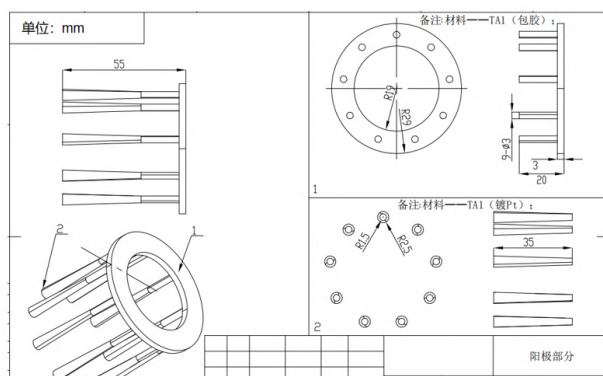
图 8 首次仿真优化方案镀层分布云图

Fig.8 The first simulation optimization scheme plating distribution cloud image

### 2.1.2 第二轮仿真优化

结合首次优化的方案、仿真结果及现场工艺条件,增加内孔的辅助阳极并通过工件的往复运动改善孔内槽液流动<sup>[10]</sup>,工装设计图及工装实物如图9,同时适当调整工艺参数,电流密度为 $2.37 \text{ A/dm}^2$ ,电镀时间为2 440 min,将零件进行虚拟装挂和排布,并进行仿真计算。

优化方案在增加内孔的辅助阳极并增加孔内槽液流动情况下,可以有效改善零件内孔镀层无法满足300  $\mu\text{m}$ 的问题,使得零件电镀区域膜厚分布更均匀,满足技术要求,可以进行现场试制,工装仿真及结果如图10、11所示。



(a) 设计图



(b) 实物图

图 9 工装设计图和工装实物

Fig.9 Tooling design drawing and tooling physical object



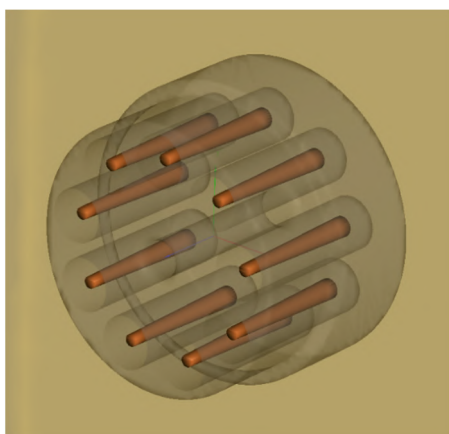


图 10 转子工件与工装组合后仿真模型

Fig.10 Simulation model after rotor workpiece and tooling combination

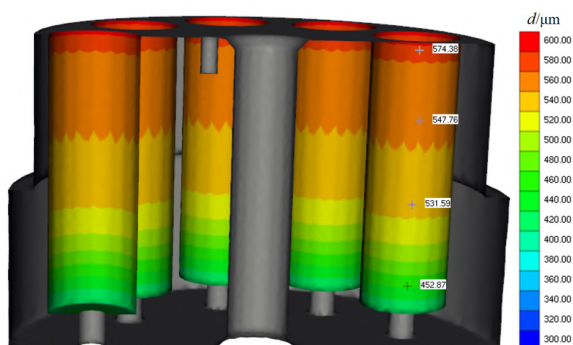


图 11 带工装镀件镀层厚度仿真云图

Fig.11 Simulation cloud image of coating thickness with tooling plating parts

## 2.2 现场试制

根据Plating Manager优化方案进行工装制作，制作完的工装如图12所示，协调生产时间后进行现场试制，并通过金相法测量仿真方案的膜厚数据<sup>[11]</sup>。

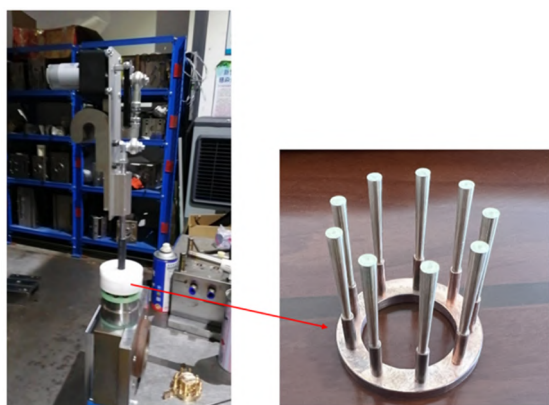


图 12 工装实物图

Fig.12 Tooling physical image

### 2.2.1 试制结果分析

根据图13所示，试件的表面镀层质量良好，未观察到漏镀等缺陷。随后，对孔口位置、孔中间位置以及孔底部位置进行厚度和硬度测量，其位置分别对应图14中A、B、C位置，厚度和硬度取多个位置测量后取均值。从图15对镀层厚度的测量中，可以发现孔口位置厚度在620 μm左右，孔中间位置厚度在580 μm左右，孔底部厚度在440 μm左右，整体厚度均≥300 μm，满足了技术要求，且结果与仿真结果匹配度≥90%。镀层硬度测试结果如表2所示，硬度结果都较为接近，约为155 HV。



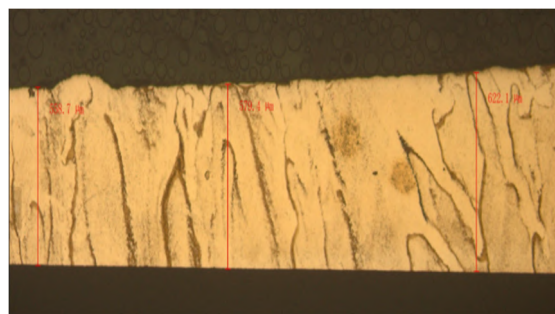
图 13 零件电镀后外观

Fig.13 Appearance of the part after electroplating



图 14 零件测量点

Fig.14 Measuring point of the part



(a) 孔口位置

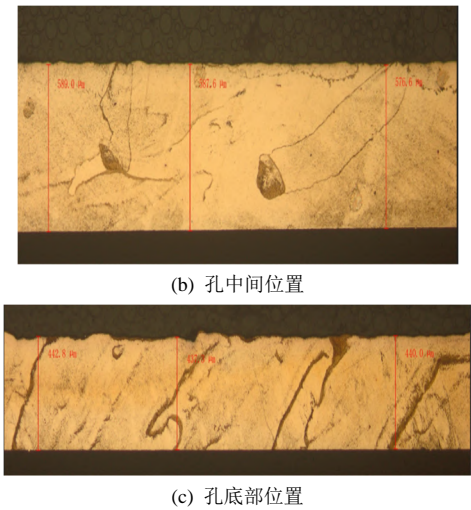


图 15 镀层厚度

Fig.15 Plating thickness test

如图16所示,通过扫描电子显微镜(SEM)采用能谱(EDS)分析,选取典型面进行面扫,统计元素的质量分数成分如表3,Cu元素的质量分数约为92.35%,Sn的质量分数约为7.65%。满足电镀青铜的成分要求。

如图17所示,采用SEM对电镀层表面进行微观形貌的观察,镀层表面呈现细密、多孔结构,整体表面连续、平整,无明显断层。

对镀层进行残余应力测试,残余应力检测设备为Proto iXRD便携式残余应力分析仪,测试按照GB/T7704—2017无损检测X射线应力测定方法进行,采用同倾法。测试时设置参数为:Cr靶K $\alpha$ 辐射,准直器:圆形1 mm;管电压:20 kV;管电流4 mA;曝光时间3 s;曝光次数10次;衍射角:−25 °~25 °。

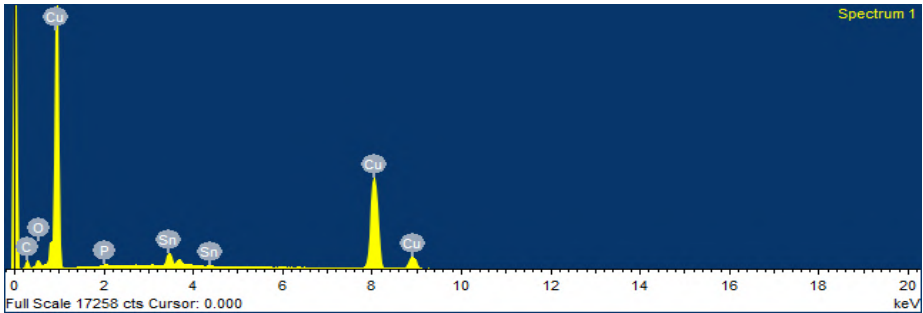


图 16 镀层成分分析

Fig.16 Composition analysis of plating layer

表 2 硬度测试结果

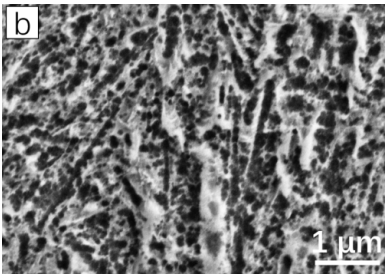
Tab.2 Hardness test results

位置	维氏硬度/HV	洛氏硬度/HR15T
A	147	86
B	158	90
C	163	91

表 3 元素质量分数成分结果

Tab.3 Elemental mass fraction composition results

元素	质量分数/(wt.%)
Cu	92.35
Sn	7.65



(b) 扫描电镜下 6 000 倍

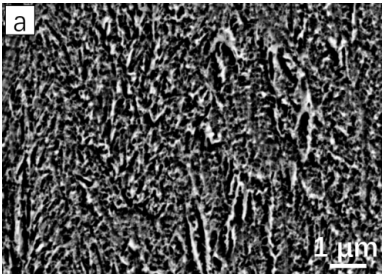
图 17 镀层微观形貌测试

Fig.17 Microscopic morphology test of plating layer

测试结果表明同一位置的残余应力由镀前的177 MPa降低为镀后的33 MPa,残余应力满足技术要求。镀层氢含量低于0.000 3%,镀层没有明显的氢存在,避免了氢脆和氢脆疲劳,电镀效果良好。

### 3 结 论

本文采用电镀仿真技术通过仿真计算设计工装,然后再利用仿真计算的参数进行某转子零件电镀青铜,并研究了该工艺下镀层性能,主要结论



(a) 扫描电镜下 3 000 倍

如下:

(1)厚度: 孔口位置厚度在620  $\mu\text{m}$ , 孔中间位置厚度在580  $\mu\text{m}$ , 孔底部厚度在440  $\mu\text{m}$ , 厚度满足 $\geq 300 \mu\text{m}$ 的技术要求, 且与仿真数据接近;

(2)硬度: A、B、C三处位置硬度分别为86/90/91HR15T, 符合85-95HR15T的技术要求;

(3)成分: 通过EDS能谱分析, Cu含量为92.35 at.%; Sn含量为7.65 at.%, 满足Sn含量7~15 at.%的技术要求;

(4)镀层应平整连续, 无分层现象, 满足技术要求。

## 参考文献

- [1] 郝俊丽. QTi2.5/CU 同基合金磁控电弧离子镀研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
- [2] 刘宇. 微细电火花加工中集肤效应的影响机理及相关技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [3] 罗威. 硅通孔中垂直铜互连成形过程的数值模拟研究

[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.

- [4] 乔永莲, 沙春鹏, 董宇. 线性扫描伏安法测定电镀铬槽液中铬(VI)和铁(II)[J]. 冶金分析, 2016, 36(6): 18-22.
- [5] 于伯浩.  $\text{MnO}_2$  与 CNTs 增强  $\text{PbO}_2$  复合阳极的电沉积制备与电化学特性[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [6] 李飞芳. 构建基于微生物三电极体系的微流控传感芯片研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [7] 翟壮. 基于 STM32 的超声相控阵电源系统研究与设计[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2017.
- [8] 钱建刚, 李彭瑞, 李海婷, 等. 电铸圆锥体的阳极形状和辅助阴极的设计及优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(12): 5.
- [9] 张满栋. 电镀 CBN 硬珩轮珩齿机理及动态仿真分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [10] 刘婷婷. 惯性力作用下金属液滴在变截面微通道内的动态特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [11] 卢继光. 滚子链应用纳米技术的初步研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.

\*\*\*\*\*

\*上接 81 页\*

industrial contaminated water with arsenic and nitrate by mass-produced Fe-based metallic glass: Toward potential industrial applications[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2019, 22: 00126.

- [41] Zhang C Q, Zhang X Y, Zhang S, et al. Ultrafast reductive dechlorination of carbon tetrachloride by amorphous  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  alloy[J]. Results in Physics, 2019, 14: 102523.
- [42] Li Z K, Qin X D, Zhu Z W, et al. Cu-based metallic glass with robust activity and sustainability for wastewater treatment[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(27):

10855-10864.

- [43] Si J J, Gu J L, Luan H W, et al. Porous composite architecture bestows Fe-based glassy alloy with high and ultra-durable degradation activity in decomposing azo dye[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 388: 122043.
- [44] Dai T, Wang N. Study on magnetic properties and degradability of gas atomization Fe-based (Fe-Si-B-P) amorphous powder[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2019, 32(11): 3699-3702.