

# 兆声波精密微电铸设备及相关 工艺研究\*

杜立群<sup>1,2</sup>, 翟科<sup>1</sup>, 姬学超<sup>1</sup>, 魏壮壮<sup>1</sup>, 杜成权<sup>1</sup>, 刘旭强<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学辽宁省微纳米及系统重点实验室, 大连 116024;  
2. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024)

**[摘要]** 兆声波具有高声强、低空化、声流扰动的特点, 将其应用于电沉积领域有着明显的优势。设计了一种贴片式双向兆声辐照的兆声波反应器, 组合其他功能模块, 制作了一款集成化的兆声精密电铸设备。以铜基底上镍的电沉积过程为研究对象, 考察了不同兆声波作用形式对铸层厚度均匀性及表面形貌的影响, 对比了无兆声作用、单侧兆声作用、双侧交替兆声作用下的电铸层厚度均匀性及电铸层表面形貌。电铸完成后, 镍铸层的平面度值分别为: 无兆声 15.03  $\mu\text{m}$ 、单侧兆声 15.36  $\mu\text{m}$ 、双侧兆声 10.91  $\mu\text{m}$ 。单侧兆声振动产生的驻波条纹及偏向堆积现象影响了铸层的厚度均匀性及表面形貌。双侧交替兆声辐照克服了单侧兆声作用存在的偏向堆积问题。相对于无兆声作用及单侧兆声作用, 双侧兆声辅助电沉积获得了更均匀的电铸层厚度以及更好的沉积层表面形貌。

**关键词:** 兆声反应器; 声辐射; 微电铸; 均匀性; 表面形貌

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.21.052



杜立群

教授, 博士生导师。近年来主要从事 MEMS 加工工艺方面的研究工作。作为项目负责人承担国家自然科学基金项目 4 项、省部级项目 2 项、合作科研项目 10 余项; 作为主要研究人员参加国家 973 计划项目、863 项目、“十二五”科技支撑计划项目、国家自然科学基金重大/重点项目等。

兆声波具有高声强、低空化、高扰动、指向性好的特点, 可使声波能量进入微纳米结构之间的同时避免兆声作用对工件表面或微结构的二次损伤<sup>[1]</sup>。这就使得兆声技术在微纳米加工领域有着得天独厚的优势以及广阔的应用前景。事实上, 由于兆声波的高频扰动作用能够极大地提高溶液的分散能力, 作为一种高效的功率超声手段, 兆声波已经被应用于纳米颗粒及纳米薄膜制备<sup>[2]</sup>、化学机械抛光<sup>[3]</sup>、光刻胶显影<sup>[4]</sup>、电化学沉积<sup>[5-7]</sup>等领域。

现有的兆声波辅助电沉积工艺通常使用换能器浸入式兆声清洗槽作为声化学反应器。文献[8]在印刷电路板的兆声辅助电沉积填孔工艺中, 采用一种悬挂有 10m × 10m 换

能器的兆声波清洗槽作为声化学反应器。在反应过程中, 兆声扰动虽然有助于填孔深度的提高, 但由于换能器辐射端辐射出的兆声波能量不均匀, 使得电路板上各处填孔深度均匀性较差。文献[9]在兆声辅助微电铸工艺中, 通过将 Sonosys 公司生产的浸入式兆声清洗仪投入至微电铸设备中产生高频扰动来促进电铸液传质, 并通过调整兆声波功率获得了高深宽比金属微结构。然而, 利用换能器浸入式兆声清洗槽构建的简易兆声电沉积反应器往往存在着声能量辐射不均匀, 声辐射效果不稳定的问题。因此, 有必要将现有的兆声技术与微电铸工艺相结合, 开发出一款集成化、能量辐射均匀的兆声波精密电沉积设备。

本文首先考虑了电沉积槽的兆声波加载形式, 设计制作了贴片式兆

\*基金项目: 国家自然科学基金(51375077)。

声槽,并对声源性能进行了测试。在贴片式兆声槽的基础上组合其他功能模块开发了一款双向兆声作用的兆声微电铸设备,利用此设备开展了电铸工艺试验研究,考查了兆声作用方向对电铸层均匀性及表面形貌的影响,并对兆声作用机制进行了分析讨论。

### 兆声波加载形式

声化学反应器通常有换能器浸入式、工件振动式、贴片式等不同声源加载方式。由于微电铸槽内具有一定腐蚀性,且正负反应极板置于其中,占有较大空间,在不影响微电铸环境并有利于兆声加载的前提下,本文提出了一种外部贴片式的兆声电铸槽结构。采用基频为兆赫兹的厚度伸缩振动压电陶瓷作为兆声发声元件,使用专用胶着剂将压电陶瓷片粘贴于槽体外部,兆声由压电陶瓷发出并透过槽体的传声结构层作用于槽内电铸液,在铸液中形成兆声扰动,达到兆声调控微电铸电沉积过程的目的。压电陶瓷作为声源器件,当其通入兆声频交流激励信号时,压电陶瓷工作在电谐振状态并产生兆声振动,向电铸槽内辐射兆声波促进电化学反应。贴片式兆声槽原理见图1。

为了满足兆声槽耐腐蚀性能的要求,选择了厚度为3mm的高纯石英作为兆声槽的槽壁,分别在粘贴谐振频率为1MHz的压电陶瓷前后,测量了压电陶瓷端的声源阻抗谱,扫频区间为0.8~1.2MHz,粘贴石英前与粘贴石英后其阻抗谱如图2所示。图2中红色竖直线对应X轴为谐振频率,红色竖直线与蓝线交点对应的Y轴坐标值为声源的最小阻抗值,对比可知,粘贴后声源最小阻抗稍有提高,谐振频率略有下降,声源性能基本不受影响。

由于兆声波具有很好的直线性,声波能量过度集中在声源对应的区域内,单侧声源兆声槽内的声辐射能

量将变的极不均匀。为了能够均匀地控制兆声波在电铸液中的能量分

布,兆声声源系统采用了多组陶瓷阵列布置的形式,如图3所示,在石英

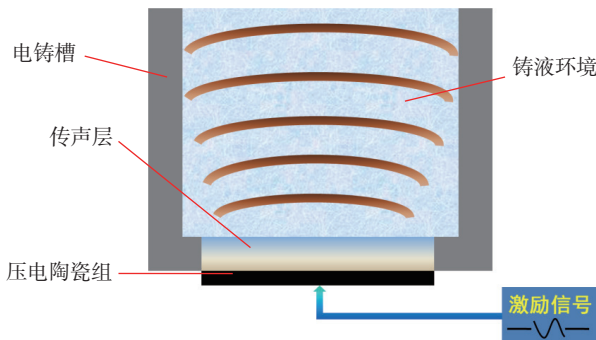
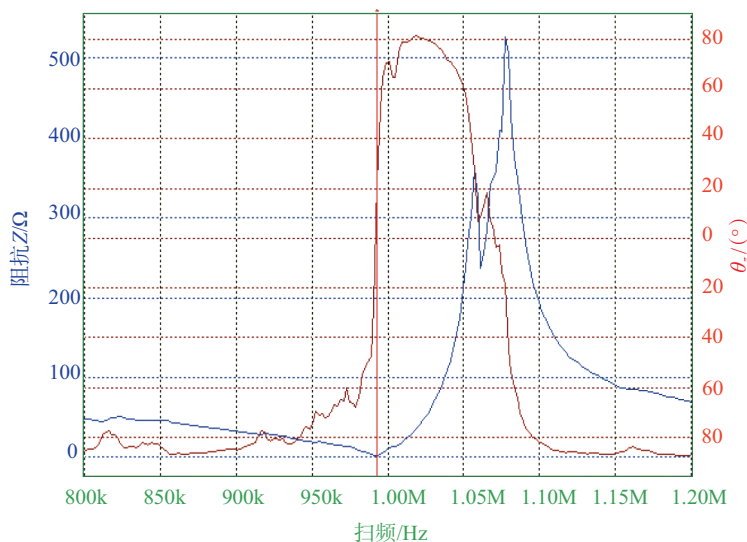
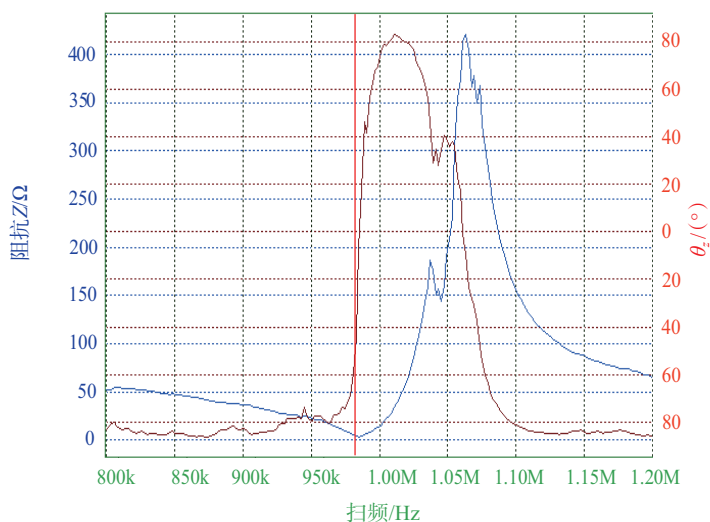


图1 贴片式兆声槽原理示意图

Fig.1 Patch type megasonic principle diagram



(a) 粘贴前阻抗



(b) 粘贴后阻抗

图2 陶瓷条粘贴石英槽前后阻抗谱

Fig.2 Impedance spectrums of the megasonic source

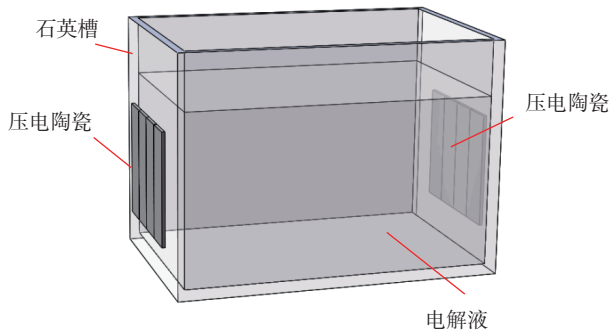


图3 双侧声源电铸槽槽体结构  
Fig.3 Bidirectional megasonic source quartz tank

电铸槽的两侧分别布置4组压电陶瓷片,8组陶瓷并联控制,通过时间继电器控制两个方向的压电陶瓷依次振动,达到兆声能量在铸槽内均匀分布的目的。

### 兆声波精密微电铸设备研发

在确定兆声贴片形式及铸槽材料结构的基础上,对精密电铸机的其他部分进行了详细设计,包括:极板搅拌、铸液循环、水浴加热、设备钣金外壳等部分。整合各个功能模块,进行详细设计制作并装配,开发出了ME1000型兆声微电铸设备。兆声精密电铸机如图4所示,其中兆声频率为1MHz,连续可调功率范围0~200W。

### 兆声波对电铸层均匀性及表面形貌的影响

阴极上金属铸层厚度分布的均匀性是铸层性能的一个重要评价指标,直接关系到电铸层的后处理进程以及后处理效果。利用上述开发的兆声设备,以铜基底上镍的电沉积过程为研究对象,开展了不同兆声波作用形式对铸层均匀性影响的研究,对比了双侧兆声辐照与单侧兆声辐照以及无兆声作用下的铸层厚度均匀性,不同形式的兆声作用如图5所示。试验中使用的电铸液为氨基磺酸镍电铸液,电铸区域面积为16mm×12mm,兆声电铸工艺参数

见表1。

图6为铸层厚度分布测试结果。由图6可见,单侧兆声辐照使铸层出现了近兆声源侧厚度低,远兆声源侧厚度高的偏向堆积现象,铸层厚度分布很不均匀。在16mm×12mm的电铸区域内,厚度均值为15.80μm,厚度均方差值为4.09μm,平面度PV值15.36μm,甚至不及无兆声作用的情况,无兆声作用铸层厚度均值16.37μm,厚度均方差为3.88μm,PV值为15.03μm。声源改为双侧兆声辐照的形式后,很好地克服了单侧兆声作用下电铸层的偏向堆积现象,

铸层厚度均匀性也得到了相应改善。双侧交替兆声辐照下获得的电铸层厚度值为16.13μm,厚度均方差为3.04μm,PV值为10.91μm。双侧交替振动匀化了兆声在铸槽内的能量分布,使得电铸层更加均匀。

铸层的表面形貌是体现铸层质量的又一重要性能指标。本文利用扫描电子显微镜对3种兆声作用形式下的铸层表面形貌进行观察,如图7所示。无兆声作用的电铸层表面



图4 兆声电铸设备  
Fig.4 Megasonic electroforming equipment

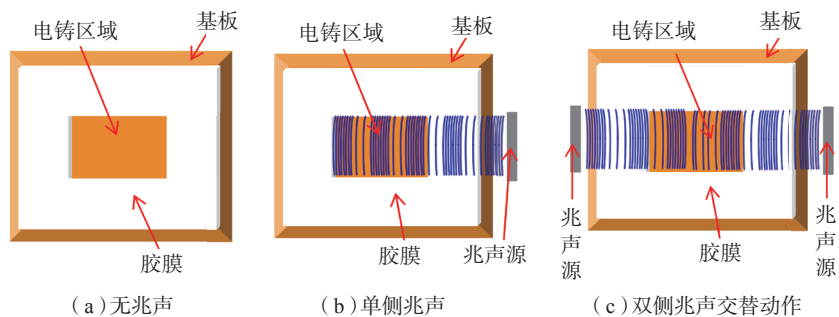


图5 不同形式的兆声辅助电沉积示意图

Fig.5 Schematic of megasonic agitating directions of electroformings arears

表1 兆声电铸工艺因素及工艺参数

Table 1 Electroforming process factors and parameters

| 试验    | 兆声作用形式        | 兆声频率 / MHz | 兆声功率 / W | 兆声声强 / (W·m <sup>-2</sup> ) | 电流密度 (A·dm <sup>-2</sup> ) | 电铸时间 / h |
|-------|---------------|------------|----------|-----------------------------|----------------------------|----------|
| 试验(a) | 无兆声           | 0          | 0        | 0                           | 1                          | 2        |
| 试验(b) | 单侧兆声          | 1          | 80       | 2.5                         | 1                          | 2        |
| 试验(c) | 双向交替兆声 (0.1s) | 1          | 80       | 2.5                         | 1                          | 2        |

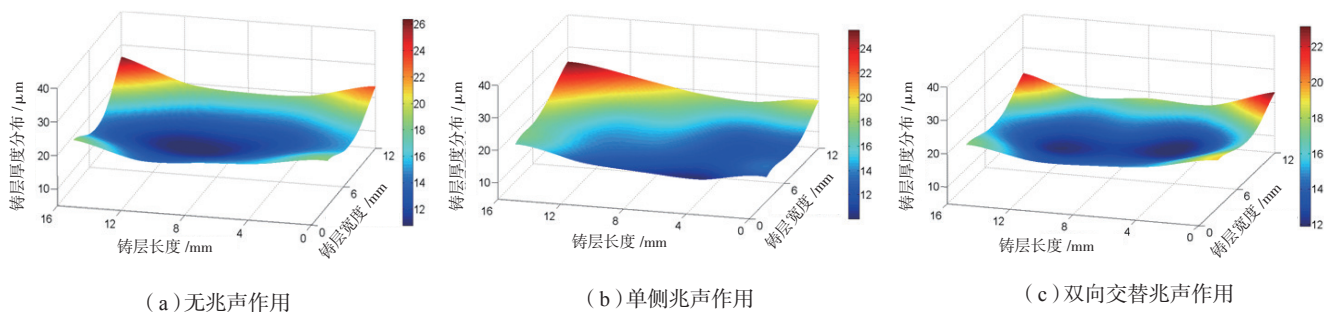


图6 不同兆声作用形式的电铸层均匀性分布

Fig.6 Thickness uniformity of electroformed layers with different type megasonic irradiation

可见若干麻点缺陷,如图7(a)所示;相较于无兆声作用的电铸层,单侧兆声作用的铸层表面形貌反而更差,且存在兆声导致的褶皱条纹及小而密的针孔麻点缺陷,如图7(b)所示;双侧兆声交替作用可以消除褶皱以及麻点等缺陷,使铸层细致,表面形貌更佳,如图7(c)所示。

由于兆声槽是一个类似房间的立方体,由简正声波相关理论<sup>[10]</sup>可知,在稳态声波辐射作用下,铸槽内将产生驻波声场,单侧兆声作用下,铸槽内形成了稳态声场,如图8(a)所示。在阴极板上刚刚沉积的镍铸层依旧比较质软,在逐渐沉积的过程中,铸槽内的驻波扰动逐渐复现在软质的铸层上,形成驻波图案,并且,在驻波波腹区域内的兆声波稳态空化作用累积了大量气泡,气泡在驻波内稳态振荡不能排除,随着沉积过程的进行,形成了随驻波条纹复现的规律性麻点缺陷,如图7(b)所示。此外,在单侧兆声作用下,单向的声辐射力使软质铸层被推积,铸层出现了向一个方向积累的“偏向推积”现象,即图6(b)中出现的情况。

双向交替兆声作用时,交替作用周期为0.1s,铸槽内的声波传播如图8(b)所示,一个方向的声波在铸槽内形成的稳态振荡被接踵而至的另一方向的声波破坏,在原来驻波区域内稳态振荡的气泡被摧毁并脱离铸层表面。兆声波不断地双向交替振动,电铸层在沉积过程避免了由于驻

波效应导致的缺陷,获得了较好的铸层表面形貌,如图7(c)所示。并且,液体中双向交替的声辐射力,将刚刚沉积的新鲜软质铸层不断地向铸层中间区域推积,由此,在双向交替兆声作用下,铸层不均匀的马鞍形形貌较之无兆声作用也得到了一定程度的改善,如图6(a)、(c)所示。

可见,较之单侧声源辐照及无兆声辐照,双侧声源的电铸槽槽体结构在电沉积工艺中具有更大的优势。

## 结论

(1) 本文设计了一种双向贴片

式兆声槽,槽体选用石英材质,粘贴压电陶瓷后,对兆声槽的声学性能进行了测试。测试结果表明,此兆声槽具有系统阻抗小、谐频偏移少、辐射效率高的特点。

(2) 将兆声槽与其他电铸模块组合,设计并制作了一种新型、集成化的兆声波微电铸设备。

(3) 研究了无兆声作用、单侧兆声作用、双侧兆声作用下的铸层厚度均匀性与表面形貌。结果表明,双侧扰动匀化了兆声的能量分布,获得了厚度更加均匀,表面形貌更加优良的电铸层。

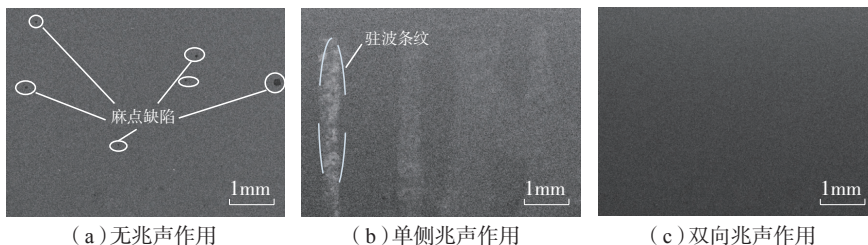


图7 不同兆声作用形式下沉积层表面SEM形貌

Fig.7 Sediment surface SEM morphology under different types of megasonic irradiation

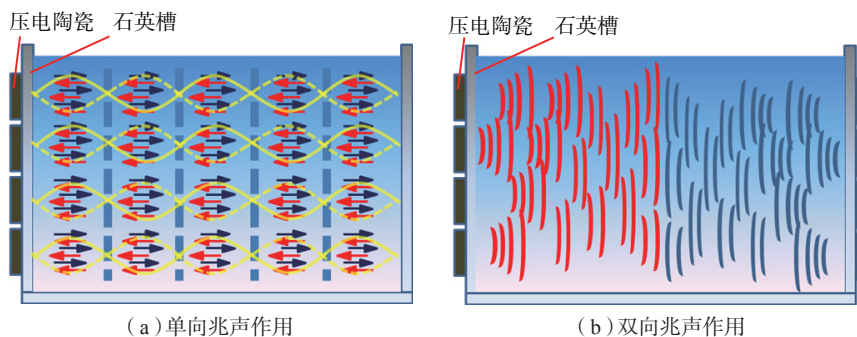


图8 兆声波在铸槽内的不同作用形式

Fig.8 Different types of megasonic agitation in the quartz tank

参考文献

- [1] NIEMCZEWSKI B. Observations of water cavitation intensity under practical ultrasonic cleaning conditions[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2007, 14(1): 13-18.
- [2] 杨强, 黄剑锋. 超声化学法在纳米材料制备中的应用及其进展[J]. 化工进展, 2010, 29(6): 1091-1095.
- YANG Qiang, HUANG Jianfeng. Developments and applications of sonochemical method in preparation of nanomaterials[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(6): 1091-1095.
- [3] 翟科, 任奕, 何勃. 液固耦合传递兆声振动复合化学机械抛光研究[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(6): 416-420.
- ZHAI Ke, REN Yi, HE Bo. Research on solid-liquid coupling megasonic vibration assisted chemical mechanical polishing[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2016, 14(6): 416-420.
- [4] WILLIAMS J D, WANG W. Using megasonic development of SU-8 to yield ultra-high aspect ratio microstructures with UV lithography[J]. Microsystem technologies, 2004, 10(10): 694-698.
- [5] KAUFMANN J G, DESMULLIEZ M P Y, TIAN Y, et al. Megasonic agitation for enhanced electrodeposition of copper[J]. Microsystem Technologies, 2009, 15(8): 1245-1254.
- [6] TIAN Y, LIU C, HUTT D, et al. High density indium bumping using electrodeposition enhanced by megasonic agitation[C]// Electronics Packaging Technology Conference. Singapore, 2009.
- [7] 张勇强, 卢长春. 镀金用微型超声波发生器的研制和应用[J]. 机电元件, 1994(2): 15-17.
- ZHANG Yongqiang, LU Changchun. Development and application of micro-ultrasonic generator for gold plating[J]. Electromechanical components, 1994(2): 15-17.
- [8] COSTELLO S, STRUSEVICH N, FLYNN D, et al. Electrodeposition of copper into high aspect ratio PCB micro-via using megasonic agitation[J]. Microsystem Technologies, 2013, 19(6): 783-790.
- [9] LIU G, HUANG X, XIONG Y, et al. Fabricating HARMS by using megasonic assisted electroforming[J]. Microsystem Technologies, 2008, 14(9): 1223-1226.
- [10] 谢爱云, 黄雅婷, 冯涛, 等. 高频超声清洗中声场分布的仿真及实验研究[J]. 河北科技大学学报, 2014, 35(4): 324-329.
- XIE Aiyun, HUANG Yating, FENG Tao, et al. Simulation and experiments research of acoustic field distribution in high frequency ultrasonic cleaning[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014, 35(4): 324-329.

通讯作者: 杜立群, E-mail: duliqun@dlut.edu.cn.

## Research of Megasonic Assisted Micro Electroforming Process Based on a Novel Megasonic Reactor

DU Liquan<sup>1,2</sup>, ZHAI Ke<sup>1</sup>, JI Xuechao<sup>1</sup>, WEI Zhuangzhuang<sup>1</sup>, DU Chengquan<sup>1</sup>, LIU Xuqiang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**[ABSTRACT]** Megasonic has obvious advantages in overcoming the limitations of micro-electroforming process because of its low cavitation effect, high sound intensity and acoustic streaming. In this work, a bidirectional surface mount device (SMD) megasonic electrolytic bath was designed. And an integrated megasonic electroforming equipment was designed and made considering of other components of an electroforming reactor. Single directional megasonic assisted electrodeposition and bidirectional megasonic assisted electrodeposition was investigated, respectively. Besides, a traditional deposition of nickel was conducted as the control group. The results show that the planeness value (PV) of electrodeposited layer is 15.03 $\mu\text{m}$  without megasonic wave, and the PV of nickel electrodeposited layer is 15.36 $\mu\text{m}$  with single directional megasonic assisted. The bidirectional megasonic wave assisted electrodeposition has a planeness value 10.91 $\mu\text{m}$ , which obtained the most uniform electrodeposited layer among these three different electrodeposition conditions. Besides, bidirectional megasonic wave assisted electrodeposition can achieve better surface morphology than other conditions.

**Keywords:** Megasonic reactor; Acoustic radiation; Electroforming; Planeness value; Surface morphology

(责编 大漠)