

DOI: 10.3901/JME.2008.08.195

高深宽比微细结构电铸时传质过程数值分析*

明平美^{1,2} 朱 荻² 胡洋洋² 曾永彬²

(1. 河南理工大学机械与动力工程学院 焦作 454000;
2. 南京航空航天大学机电工程学院 南京 210016)

摘要: 针对高深宽比微细结构电铸时存在严重传质受限的问题,以微深槽特征为分析对象建立液相传质两种数学模型——维扩散模型和二维对流—扩散模型,并分别用 Matlab 专用工具箱和 Fluent 6.2 流体仿真软件进行数值求解,依次分析以扩散、强制对流—扩散、复合对流(强制对流和自然对流)—扩散等为主导传质模式作用下微细电铸时,流场和离子浓度场的空间变化规律及其对液相传质效果的影响,并进行试验验证。结果表明:微细结构电铸时,单一扩散作用仅能用于深宽比小于 2 且电流密度小于 2 A/dm^2 的液相传质场合;槽外强制对流只能对深宽比小于 2 的微槽内电解液产生一定搅拌作用;强化槽内自然对流作用并与槽外强制对流协同配合时,槽(深宽比为 5)内可形成独特的单个或多个占据整个槽空间的涡流循环胞,涡流流速约为强制对流流速的 $1/20 \sim 1/2$,明显改善传质效果,试验结果与此相印证。

关键词: 微细电铸 对流—扩散传质 高深宽比 微细结构

中图分类号: TG662

Numerical Analysis on Mass Transport in Micro Electroforming of Micro Structures with High-aspect-ratio

MING Pingmei^{1,2} ZHU Di² HU Yangyang² ZENG Yongbin²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: Aiming at the problem of mass-transport limitation in the electroforming of microstructures with high-aspect-ratio (HAR), two kinds of numerical models of mass-transport (1-D diffusion model and 2-D diffusion-convection model) are developed. Distribution of flow field and ion-concentration field inside the micro-trench and their effect on mass transport efficiency governed by diffusion, forced convection-diffusion, and complex convection (forced convection and nature convection)-diffusion, respectively, are simulated and analyzed by using Matlab toolbox and Fluent 6.2 fluid simulation software, followed by some experiments to validate the numerical analysis results. The results indicate that diffusion-transport or forced convection transport outside the cavity does well only under the conditions of smaller HAR value (<2) and lower current density ($<2 \text{ A/dm}^2$); one or more vortex cells that occupy the whole cavity space can be formed in the cavity (aspect ratio = 5) when the natural convection inside the cavity is strengthened and collaborated with the forced convection outside the cavity. The vortex flow rate is about $1/20 \sim 1/2$ of the forced convection flow rate, which results in a remarkably better transport efficiency; and experimental results agree well with numerical analysis results.

Key words: Micro electroforming Convection-diffusion transport High-aspect-ratio Microstructure

0 前言

微型机电系统(Micro electromechanical system, MEMS)和微细加工是近年来学术界和产业界的研

究热点。高深宽比金属微细结构的制造一直是微细加工领域的技术瓶颈,也是关注重点。微细电铸是制造微细金属结构器件的主要技术手段之一,也是X射线光刻电铸成型技术(Lithographie galvanofornung abfornung, LIGA)、二维LIGA 等高深宽比微结构技术的核心工艺步骤和技术难点。铸件针孔、麻点或积瘤等缺陷多、凹凸不平及表面粗糙等问题一直

* 江苏省自然科学基金资助项目(BK2004214)。20070815 收到初稿, 20080420 收到修改稿

没有得到很好解决,严重影响着电铸微元器件的质量和性能。国内外研究者对此开展了广泛而又深入的研究。已开发或采用了封闭电铸槽抽真空、施加热梯度(体液/沉积面温差 $15\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$)、增大密闭电铸槽大气压、超声振动搅拌(阴极超声振动和溶液超声搅拌)和辅助阳极等多种新型工艺手段来改善微细电铸工艺能力^[1]。此外,喷射给液、叠加磁场、复合机械抛磨作用、采用 CO_2 乳化电解液和施加脉冲电流等工艺措施也时有应用^[1]。这些工艺措施各自在某些方面都起到了一定的积极作用。与常规电铸不同的是,微细电铸的核心制约因素是其液相传质受限问题。尽管有文献[2-6]报道了与此相关方面的研究成果,如美国Sandia国家实验室GRIFFITHS等^[2]利用数值分析和试验等手段对直径为 $1.70\sim 6.35\text{ mm}$ 的深孔电铸时的液相传质过程进行了研究,提出了浮力驱动自然对流是液相传质主导力量的观点;美国XIA^[3]分析了特定深度微槽的流场分布和电化学反应规律,并用前跟踪数学解法数值表征了电沉积过程中流场、电沉积和电充填的动态过程;WANG等^[4]则利用微粒子图像测速法演示了复杂形状微细结构(如微齿轮)电沉积过程中对流-扩散传质物质运输速度变化规律和离子浓度的分布并得出物质运输速度的变化会相应引起Ni-Fe合金成分发生变化的结论。但是,针对处于“微细”尺度范围内的高深宽比结构电铸时的液相传质受限机理及如何增强传质效果等问题,尚在探索之中。

本文则将以典型的高深宽比微槽特征为分析对象,基于“宏观”液相传质模型并经修改完善建立一维扩散模型和二维扩散-传质模型,并分别利用Matlab 6.5数值解算工具箱和Fluent 6.2流体仿真软件平台,结合编程与用户自定义函数,解算并分析扩散、强制对流-扩散、复合对流(强制对流和自然对流)-扩散等为主导传质模式作用下微细电铸时,流场和离子浓度场的空间变化规律及其对液相传质效果的影响,以期探讨高深宽比微细电铸液相传质受限的机理及改善措施,为优化微细电铸工艺提供理论基础。同时,对数值分析结果进行试验验证。

1 液相传质数学模型

对高深宽比微细结构电铸而言,其电极过程主要是由包括电迁移、对流和扩散等三种方式在内的液相传质步骤来控制的,而电迁移的传质量通常很小。所以对流和(或)扩散往往承担着微细电铸电极

过程的主要传质任务。为了弄清楚它们的传质机理,将建立两种数值分析模型:一种是描述多物质离子传输的一维扩散模型,以分析电沉积时离子浓度、局部PH值和电沉积速率的空间变化规律;另一种是描述单一离子扩散-对流传质二维模型,以分析电沉积时单一组分在强制对流-扩散、复合对流(强制对流和自然对流)-扩散等传质模式作用下的物质运输情况。

1.1 一维扩散传质模型

为研究问题方便,以图1所示的单一槽特征为分析对象建立数学模型。假设微槽特征顶部 $y \gg h$ 处物质离子浓度为常值(即为体液离子浓度),电解液从左至右匀速流过;边界层内液流速度由微槽特征顶部从零直线递增为液流速度值。忽略液流剪切力对槽内上部电解液的影响,且假设不存在外部强制对流和自然对流的传质作用。也就是说,首先分析只有扩散传质起作用的情况。这样,深宽比 $A = h/w$ 比较大的微结构电铸传质模型是一维的。根据物质(质量、电荷)守恒定律、溶液电中性原理和电化学反应有关方程,并经整理和变换处理,得出以下方程^[1-2]。

在体液中

$$\begin{cases} J_i = -D_i \nabla c_i + e u_i z_i c_i E \\ I_i = F z_i J = -F z_i D_i \nabla c_i + F^2 u_i z_i^2 c_i E \\ u_i = \frac{D_i}{kT} \\ \sum_{i=1}^n z_i c_i = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 J_i —— i 离子流量

D_i —— 扩散系数

c_i —— 中性物质或荷电离子(金属离子和非金属离子)的浓度

e —— 单位电荷量

u_i —— 离子淌度

z_i —— i 离子荷电数

I_i —— 各组分 i 所分配的电流

F —— 法拉第常数

k —— Boltzmann 常数

T —— 电解液温度

在电极面上

$$\begin{cases} J_i = \kappa_i c_i \exp(-\alpha_i F(V - V_i) / RT) \\ V_i = V_{0i} + \frac{RT}{F z_i} \ln \frac{c_i}{c_{0i}} \end{cases} \quad (2)$$

式中 κ_i —— 速度常数系数

α_i —— 电荷分离常数

- R —— 气体常数
- V_{0i} —— 参考电势
- V —— 标准电势
- V_i —— i 离子的电势
- c_{0i} —— 参考离子浓度

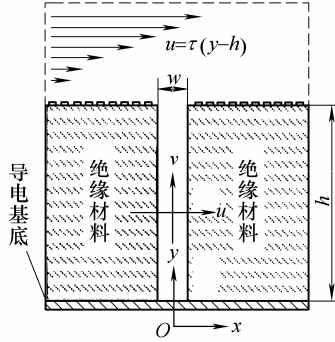


图 1 微细电铸传质过程物理模型

只考虑扩散传质的情况下，无需动量方程。另外，假设溶液各处温度均匀且不变，也无需能量方程。

1.2 二维对流—扩散传质模型

若假设微细电铸液相传质是一个对流—扩散传质过程，由非压缩流体的质量守恒方程并经简化(如采用 Boussinesq 近似法、电解液密度与离子浓度成正比例关系等)和规范化处理，则其数学模型(以图 1 所示的槽特征为物理模型)为^[2]

$$Ra \left(\frac{\partial c^*}{\partial x^*} \cos \phi + \frac{\partial c^*}{\partial y^*} \sin \phi \right) - \frac{\partial^2 \omega^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \omega^*}{\partial y^{*2}} = 0 \quad (3)$$

式中 c^* —— 等效离子浓度， $c^* = c/c_0$

c —— 某离子浓度

c_0 —— 某离子初始浓度

ω^* —— 涡流函数

$$\omega^* = - \left(\frac{\partial^2 \psi^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial y^{*2}} \right)$$

ψ^* —— 流线函数

ϕ —— y 轴偏离垂直方向的角度

Ra —— 浮力驱动强度常数，一般为 $10^5 \sim 10^7$

2 数值求解及结果分析

2.1 一维方程求解及结果分析

电铸在 MEMS 和制造金属微细器件中有较广泛的应用。本文以 0.5 mol/L 氨基磺酸镍基液电铸镍为例来求解数学模型。氨基磺酸镍电解液中有 5 种反应物质： Ni^{2+} ， $NiOH^+$ ， $NH_2SO_3^-$ ， OH^- ， H^+ 。 H_2O 的浓度为 55 mol/L。除了氢氧根离子的扩散系

数 $D_{OH^-} \approx 5 \times 10^{-9}$ 外，其余物质离子的扩散系数 $D_i \approx 1 \times 10^{-9}$ [7]。添加剂的影响通过调节巴特勒—伏尔摩方程的 κ 值来确定。镍电铸时，主要有两种电化学反应： $Ni^{2+} + OH^- \rightleftharpoons NiOH^+$ 和 $H_2O \rightleftharpoons OH^- + H^+$ ，其平衡常数分别为 $K_{Ni} \approx 1.3 \times 10^4 \text{ mol}^{-1}$ 和 $K_{H_2O} \approx 1.0 \times 10^{-14} \text{ mol}$ 。沉积面阴极反应同时涉及两价金属离子和一价氢氧根金属离子的反应。

假设槽内部电解液是静滞的，这样扩散层厚度也就等于边界层的厚度，也就等于槽深。另外，在整个电沉积过程中沉积面的移动速度远小于离子浓度场的变化速度，忽略此对研究空间域内质量守恒的影响。由电化学沉积能量守恒定律可知，Ni 和 H_2 所分配的电流依次为

$$\begin{cases} I_{H_2} = F(J_{H^+} + J_{OH^-} + J_{NiOH^+}) \\ I_{Ni} = 2F(J_{Ni^{2+}} + J_{NiOH^+}) \end{cases} \quad (4)$$

这两部分电流直接与镍和氢气的产生有关，其总和为阴极电流密度。这些方程通过电中性条件耦合起来。一维数学模型数值分析的一些常数值如表 1 所示。

表 1 一维数学模型数值分析的一些常数值

参数	取值
气体常数 R	8.314
法拉第常数 F	96 500
温度 T / K	300
Ni^{2+} 电荷分离常数 $\alpha_{Ni^{2+}}$	0.21
$NiOH^+$ 电荷分离常数 α_{NiOH^+}	0.33
H^+ 电荷分离常数 α_{H^+}	0.11
OH^- 电荷分离常数 α_{OH^-}	0.4
过电位 V/V	-0.6
Ni^{2+} 速度系数 $\kappa_{Ni^{2+}} / (\text{pm} \cdot \text{s}^{-1})$	11.6
$NiOH^+$ 速度系数 $\kappa_{NiOH^+} / (\text{nm} \cdot \text{s}^{-1})$	5.9
H^+ 速度系数 $\kappa_{H^+} / (\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3.0
H_2O 速度系数 $\kappa_{H_2O} / (\text{am} \cdot \text{s}^{-1})$	2.3
Ni^{2+} 离子初始浓度 $c_{Ni^{2+}}^0 / (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	0.5
$NiOH^+$ 离子初始浓度 $c_{NiOH^+}^0 / (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	0.65×10^{-6}
H^+ 离子初始浓度 $c_{H^+}^0 / (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	0.1×10^{-3}
OH^- 离子初始浓度 $c_{OH^-}^0 / (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	0.1×10^{-9}

由于已报道的一些对此类方程数值求解的方法都十分繁琐，在此借助 Matlab 软件偏微分方程数值解算工具箱强大的数值求解能力，并通过自定义函数和二次程序开发来求解。选用适合扩散问题的抛物线型偏微分方程组求解模型，其边界条件为槽顶部采用 Dirichlet 条件，底部采用 Neumann 条件，其

他边界 $\partial c/\partial n = 0$ 。

图 2 为扩散传质模式下离子浓度随微槽深度变化规律, 其中槽深 $h = 200 \mu\text{m}$ 、深宽比 $A=5$ 和阴极电流密度 $I=400 \text{ A/m}^2$ 。由图 2 知, 当电流密度为 400 A/m^2 时, 氢氧根离子浓度自槽顶而下急剧递增, 由 $0.1 \times 10^{-9} \text{ mol/L}$ 升高到 $100 \times 10^{-10} \text{ mol/L}$, 增大 99 倍。氢氧化镍离子浓度自顶而下也增加了 2.5 倍, 由 $0.65 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$ 增大到 $22.6 \times 10^{-7} \text{ mol/L}$,

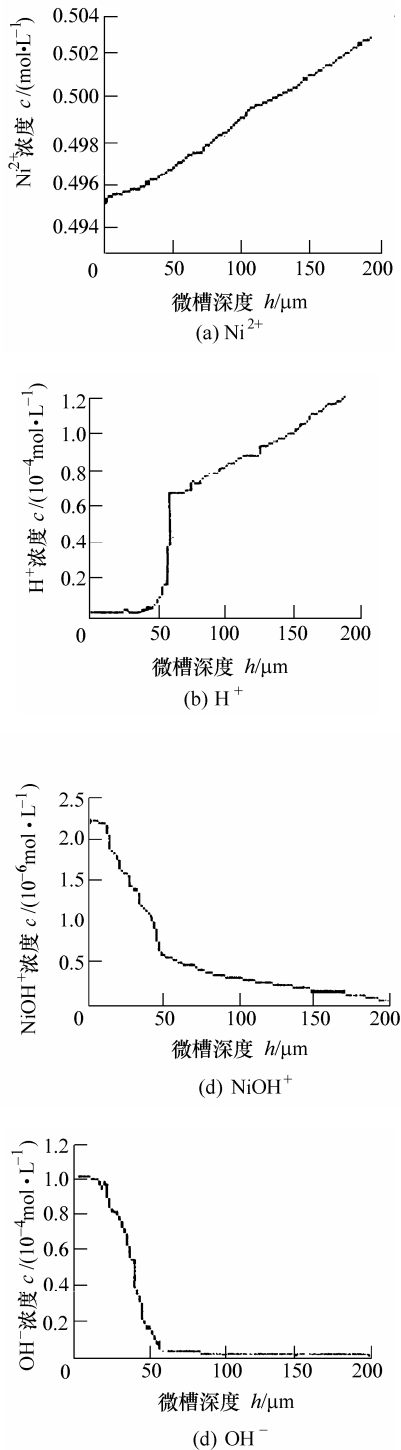


图 2 扩散传质模式下离子浓度随微槽深度变化规律

特别是深宽比超过 4 后, 离子浓度的增大更快。相反, 氢离子浓度自槽顶而下持续降低, 由体液处的 $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 降到 $0.01 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$, 浓度降低了 99 倍, 特别是深宽比超过 3.5 以后, 下降幅度更大, 也就是说 PH 值由原来 4 升高到 6。镍离子浓度变化不明显。这些离子浓度的变化趋势与文献[2]所报道的基本相同, 但各离子浓度(除镍离子外)的变化速度更大, 且浓度突变点更靠近槽顶方向。这主要是因为, 槽的宽度($w=40 \mu\text{m}$)比后者(槽宽大于 1.7 mm)要小得多, 使得溶液的表面张力可能成为阻碍离子运输的重要因素。这样, 一方面, 由于参与离子还原反应的金属离子可能来自二价镍离子也可能来自一价的氢氧化镍根金属离子, 使得氢氧根离子的来源更广, 产生氢气的可能性更大, 从而可能对金属沉积层的成分和表面形貌产生很大影响。另一方面, 氢离子浓度的急剧增大并积聚, 严重恶化了沉积面附近电化学沉积环境, 氢气极易产生。

在电迁移传输的物质流量不足传质总量 10% 的情况下^[7], 单纯由扩散作用来完成微细电铸的传质任务是不可能的。下面对有对流参与的复合传质模式进行分析。

2.2 二维方程求解及结果分析

求解时, 以流体力学模拟仿真专业软件 Fluent 6.2 为计算分析平台。规范化边界条件和初始条件均由用户自定义函数给定。求解区域为图 1 所示的 T 型区域, 代表深度为 h 、宽为 w 的 UV-LIGA 槽特征。由于槽侧壁是电绝缘的, 电沉积仅在底部导电基底上进行。槽上部的区域代表体液部分或供给新鲜电解液的通道。求解时的初始条件和边界条件如表 2。

表 2 初始条件和边界条件

位置	初始条件或边界条件
入口处	平行于槽深方向(自左向右为正): 流入 离子浓度与体液浓度相同 流出 $c^*=1$ 或 $\partial c^*/\partial y^*=0$
	垂直于槽深方向(自左向右为正): $\partial \psi^*/\partial x^*=0$ 和 $c^*=1$
固体边界	$\psi^*=0$ 和 $\partial c^*/\partial \eta^*=0$ 各侧壁液流速度分量为零
电沉积面	$\partial c^*/\partial y^*=K^*c^*$ ($y^*=0$)

2.2.1 强制对流—扩散传质

为探讨外部强制对流对传质过程的影响及贡献程度, 先不计及自然对流和扩散传质作用。通过调整槽入口处液流的流向及流速, 数值分析出不同外力搅拌强度时, 对传质过程的影响。

图 3 为 $A=3$, $w=200\ \mu\text{m}$ 的微槽类在不同外部强制对流模式的流场分布情况。由图 3 可以看出, 不管是常规搅拌模式或高速冲液模式, 还是强力喷射给液模式, 它们所产生的对流作用对微槽类特征内部溶液的影响只能主要集中在槽的上部分。但其影响度(自顶而下影响作用所能达到深度)随对流强度的增大而增大。一般机械搅拌强度($u=0.1\ \text{m/s}$)和高速冲液($u=2.0\ \text{m/s}$)时, 影响深度分别约为槽宽度的 0.667 倍和 2 倍; 而强力喷射给液时, 液流束所及区域的影响深度都小于槽宽, 最大的约为槽宽的 0.8 倍。

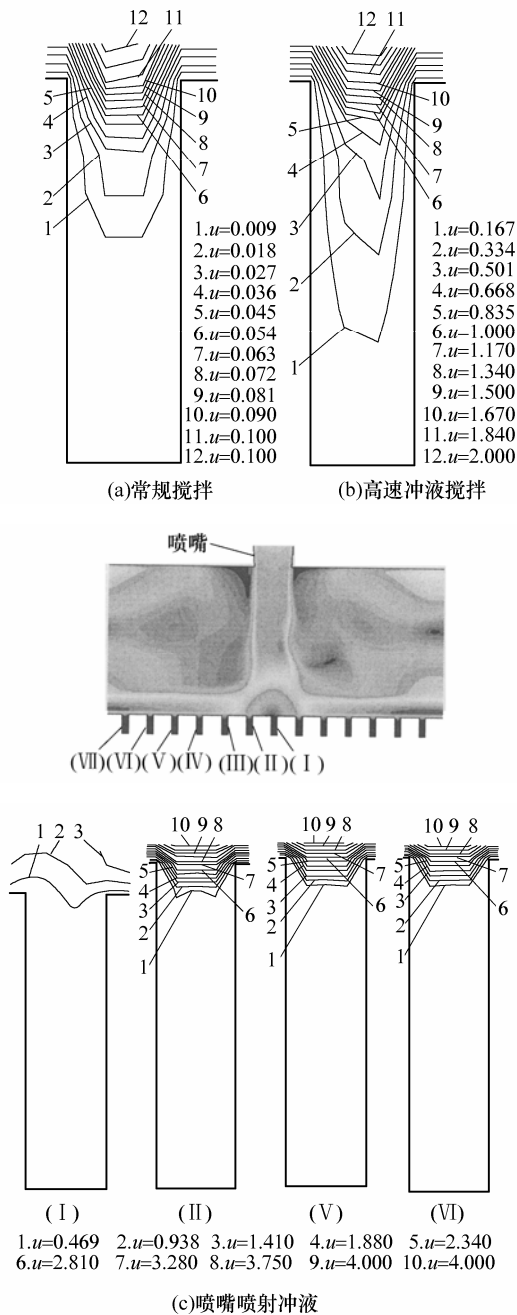


图 3 $A=3$, $w=200\ \mu\text{m}$ 的微槽类在不同外部强制对流模式的流场分布情况(m/s)

这种单一的外部强制对流作用对微结构内部电解液的搅拌效果是十分有限的, 自顶而下 2 倍槽宽深度下空间的电解液基本处于静滞状态; 单纯的外部强制对流作用无法实现反应参与物在深宽比大于 2 的深槽内顺利可靠运输。这与文献[2]的研究结论相同。这种单一由强制对流主导作用的传质模式同样不能满足高深宽比微细结构电铸的要求。

电铸时, 电沉积面附近电解液离子的大量消耗若得不到及时补充, 其密度将大幅度减小, 从而使上下电解液层形成较大密度梯度。这样, 在重力的作用下, 上层电解液向下运动, 下面的电解液由于浮力作用向上运动, 产生自然对流现象。这种不可避免的自然对流运动对常规电铸传质的量的贡献往往是很小的。但对微细电铸而言, 尚无相关研究结论报道。下面将数值分析强制对流、自然对流和扩散传质共同作用下, 微细电铸过程流场的分布规律及其对传质过程的影响。

2.2.2 对流(强制对流和自然对流)一扩散传质

图 4 为不同程度外部强制对流和槽内浮力驱动自然对流复合作用时, 深宽比为 5 微槽(槽宽 $200\ \mu\text{m}$)内流场的分布情况。流经槽顶自左向右的液流速度依次为 $0.1\ \text{m/s}$ 、 $0.3\ \text{m/s}$ 和 $2.5\ \text{m/s}$, 代表不同程度的外部强度对流, 电流密度为 $4\ \text{A/dm}^2$ 。由图 4 可知, 与强制对流单独作用不同的是, 在自然对流和强制对流的共同作用下, 各槽内液流都形成了一个或多个逆时针循环的涡流单元胞。这样, 新鲜的电解液能随着循环涡流顺槽壁向下及时被输送到沉积面附近, 在该处通过扩散作用参与电化学反应并进行物质交换, 随后反应产物顺循环涡流沿槽壁的另一侧向上运动输送到体液中, 高效完成物质传输。这是因为, 一方面, 槽顶处高速流动体液对临近槽内电解液的较强剪切力作用, 为电解液的循环运动提供外部驱动力; 另一方面, 由于槽底沉积面附近“重”金属离子的大量消耗, 电解液密度大幅度减小, 形成一个自下而上密度递增的电解液层, 因电解液层间的物质交换会形成较强的自然对流运动。于是, 在外因和内因的综合作用下, 槽内电解液形成了有利于物质运输的循环涡流, 尽管其循环流速往往较低(涡流流速随外部对流强度的增大而增大), 一般仅为外部强制对流体液流速的 $1/20\sim 1/2$ 。因此, 无论外部强度对流作用强弱如何, 整个微槽空间均充满流动的电解液, 传质过程主要由对流来完成, 物质交换效果明显改善。同时, 随着外部强制对流速度的增大, 单一的循环涡流单元胞逐步分裂为两个或三个几乎自成封闭的涡流单元胞, 单元

1. $\mu=0.013$	1. $\mu=0.032$	1. $\mu=0.260$
2. $\mu=0.026$	2. $\mu=0.061$	2. $\mu=0.520$
3. $\mu=0.039$	3. $\mu=0.092$	3. $\mu=0.780$
4. $\mu=0.052$	4. $\mu=0.130$	4. $\mu=1.000$
5. $\mu=0.065$	5. $\mu=0.160$	5. $\mu=1.300$
6. $\mu=0.079$	6. $\mu=0.190$	6. $\mu=1.600$
7. $\mu=0.092$	7. $\mu=0.220$	7. $\mu=1.800$
8. $\mu=0.098$	8. $\mu=0.260$	8. $\mu=2.100$
9. $\mu=0.100$	9. $\mu=0.290$	9. $\mu=2.300$
10. $\mu=0.100$	10. $\mu=0.300$	10. $\mu=2.500$
11. $\mu=0.100$	11. $\mu=0.300$	11. $\mu=2.500$

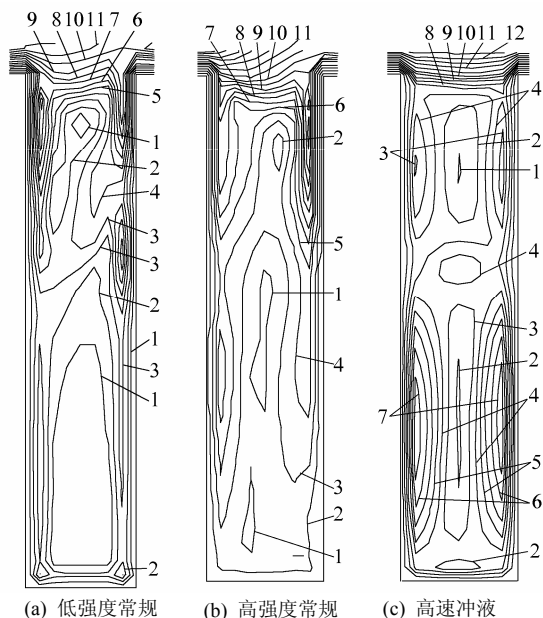


图4 $A=5$ 时复合对流-扩散传质流场分布图(m/s)

胞之间的物质交换主要靠扩散作用来完成, 这好像在物质运输的通道上增设了“瓶颈”, 一定程度上降低了传质效率。高深宽(径)比微结构电铸时电极过程传质需要靠外部强制对流与浮力驱动自然对流的协同传质来完成。最大限度提高这种协同传质作用是减少微细电铸件各种沉积缺陷的关键。

3 微细电铸试验与结果分析

深槽微细电铸时阴极板放置方式(水平放置和竖直放置)显著影响着浮力驱动自然对流与外部强制对流的协同效果。由前面数值分析结果可知, 在外部强制对流既定的情况下, 自然对流参与与否直接决定着微细电铸液相传质的主导模式。阴极板竖直放置时, 重力方向(或浮力方向)与物质浓度梯度方向垂直, 因电解液浓度差形成的自然对流运动严重受限, 无法形成良好的复合电流-扩散传质模式。而水平放置时, 浮力驱动自然对流产生条件充分。为此, 通过变换阴极板放置方式, 来试验分析浮力驱动自然对流的作用, 进而验证数值分析的结果。基础液组分与工艺条件如表3所示。采用可

编程直流电源(精度为 0.001 A)供电, 用 1 L 烧杯作电铸槽。

表3 基础液组分与工艺条件

参数与条件	取值
氨基磺酸镍(浓缩液)添加量 $V_{\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2}$ / (ml · L ⁻¹)	420
氯化镍添加量 m_{NiCl_2} / (g · L ⁻¹)	6
硼酸添加量 $m_{\text{H}_3\text{BO}_3}$ / (g · L ⁻¹)	37.5
润湿剂	适量
电流密度 I / (A · m ⁻²)	300
电解液温度 θ / °C	60
搅拌方式	磁力搅拌

图5、6分别为阴极板竖直放置和水平放置时电铸微线圈形貌。可以看出, 阴极竖直放置电铸出的微线圈表面比水平放置时的要粗糙得多, 针孔和积瘤也较后者多。还注意到, 阴极板竖直放置时, 微线圈边界沿竖直方向各处针孔和积瘤要比其他位置多一些, 形成一个针孔积瘤带。而阴极板水平放置时, 针孔和积瘤分布并没有这种方向性和定域性。电铸件表层形貌是微线圈各断面层微观形貌的累积反映和综合表现, 也是微细电铸传质效果优劣的重要衡量指标。阴极板竖直放置时, 微细电铸的传质效果不如水平放置的。这说明自然对流参与下的复合对流-扩散传质起到了十分重要的作用, 与前面数值分析结果相一致。

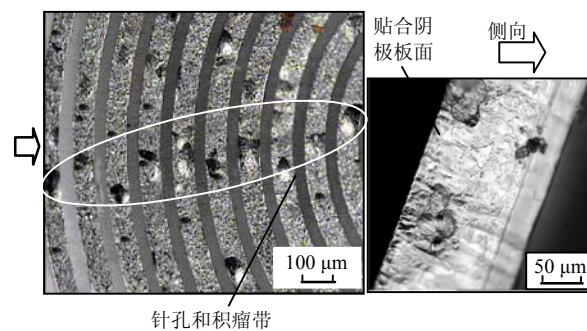


图5 阴极板竖直放置时电铸微线圈形貌

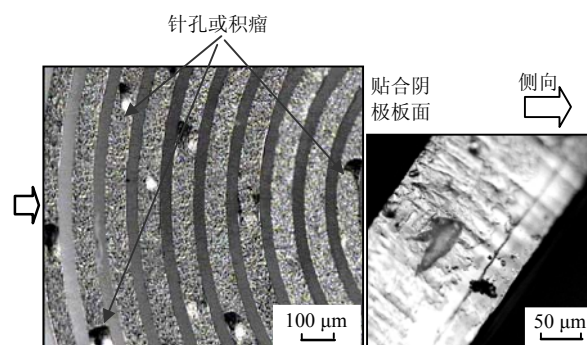


图6 阴极板水平放置时电铸微线圈形貌

4 结论

(1) 单一扩散作用仅能用于深宽比小于 2, 且电流密度小于 2 A/dm^2 的液相传质场合。

(2) 槽外强制对流只能对深宽比小于 2 的微槽内电解液产生一定搅拌作用, 单纯靠外部强制对流作用无法实现高深宽比微细结构的高效传质。

(3) 强化槽内自然对流作用并与槽外强制对流协同配合时, 槽内可形成独特的单个或多个占据整个槽空间的涡流循环胞, 明显改善传质效果, 试验结果与数值分析结果相吻合。

(4) 外部强制对流和内部自然对流的协同作用是高深宽比微细结构电铸液相传质的重要保证。

参 考 文 献

- [1] 明平美. UV-LIGA—微细电火花加工组合制造技术基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
MING Pingmei. Fundamental research on UV LIGA-MicroEDM technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [2] GRIFFITHS S K, NILSON R H, BRADSHAW R W, et al. Modeling electrodeposition for LIGA microdevices fabrication[J]. *Microsystems Technologies*, 1998, 4(2): 98-101.
- [3] XIA C M. Simulation of electrodeposition in ultra-deep micro cavities [D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2001.
- [4] WANG W H, LEITH S D, SCHWARTZ D T. Convective diffusive mass transfer inside complex micro-molds during electrodeposition[J]. *Journal of Micro Electromechanical Systems*, 2002, 11(2): 118-124.
- [5] GRANDE W C, TALBOT J B. Electro deposition of thin films of nickel-iron, II. modeling[J]. *Journal of Electrochemical Society*, 1993, 140(3): 675-681.
- [6] NILSON R H, GRIFFITHS S K. Natural convection in trenches of high aspect ratio[J]. *Journal of Electrochemical Society*, 2003, 150(6): 401-412.
- [7] 李荻. 电化学原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989.
LI Di. *Electrochemical principles*[M]. Beijing: BUAA Press, 1989.

作者简介: 明平美, 男, 1974 年出生, 博士后, 副教授。主要从事特种加工和微型机械机电系统等方面的研究工作, 发表论文近 20 篇。
E-mail: mpm@hpu.edu.cn