<del>᠉※※※※※※※※※</del> ∛材料、机械工程 ∦

\*\*\*\*\*\*\*

**文章编号:**1000-8608(2015)05-0478-06

# UV-LIGA 工艺制作微注塑模具型腔

马雅丽<sup>1</sup>,刘文开<sup>\*1</sup>,路学成<sup>1</sup>,刘 冲<sup>2</sup>

(1.军事交通学院 军事物流系,天津 300161;
2.大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

**摘要:**设计并制作了微注塑模具型腔.利用无背板生长法,采用 UV-LIGA 套刻技术和掩膜腐蚀技术,直接在合金钢基底上制作具有微阵列结构、微注塑浇口、微排气通道、排气孔、聚合物熔体流道等结构的微注塑模具型腔.对 SU-8 厚胶的光刻工艺参数进行优化,给出厚度 350  $\mu$ m的 SU-8 胶的建议工艺条件:固定边框厚度进行刮胶;梯度升温前烘,自65 ℃至85 ℃ 每隔5 ℃间歇式升温,且85 ℃的烘焙时间为5.5~6.0 h;紫外光接触式曝光,剂量630 mJ/ cm<sup>2</sup>;85 ℃ 中烘15 min,显影20 min.针对 Ni 微细电铸过程中产生节瘤现象分析原因并改善工艺参数,将电流密度和 pH 分别控制在 3 A/dm<sup>2</sup> 以下和 3.8~4.4.最终成功获得高质量的 微注塑模具型腔.

**关键词:** UV-LIGA 技术;SU-8 胶;微细电铸;微注塑模具型腔 **中图分类号:**TH16;TN305 **文献标识码:**A **doi**:10.7511/dllgxb201505005

## 0 引 言

随着 MEMS 加工技术的发展,对微注塑件的 需求量不断上升,例如:微流控芯片<sup>[1]</sup>、微齿 轮<sup>[2-4]</sup>、微光学透镜<sup>[5-6]</sup>等,使微注塑模具型腔的设 计制作成为了研究的热点和关键.目前,微注塑模 具的加工方法主要有光制作技术和微机械加工技 术,但后者仅适用于加工结构简单的零件,且表面 粗糙度难以达到要求,需后续加工,导致其使用范 围受限.例如娄燕等[7]利用微型数控铣床制作的 微型腔,需用金刚石研磨膏对成型表面进行抛光. 而光制作技术,如UV-LIGA适于制作高深宽比、 结构复杂且精度和形状自由度高的微模腔. 它是 利用光刻机的深紫外光对 SU-8 胶进行光刻,各 国学者对这种传统光刻进行改进,结合多层掩膜 套刻、牺牲层技术、倾斜/移动承片台等工艺方法 形成 SU-8 胶模,再进行微细电铸得到微模腔,拓 展了 UV-LIGA 的应用范围,使其在微型模具的 制造中发挥重要作用.

目前,微注塑模具材料主要为硅和金属材料. 卢振等<sup>[8]</sup>设计并制作的微注塑模具是利用硅 MEMS加工技术,在硅片上制得微零件型腔、流 道及浇口,但硅材料的脆性影响其使用寿命,仅适 用于中小批量生产.杜立群等<sup>[9]</sup>利用 UV-LIGA 无背板生长工艺在 45 #钢基底上制作微齿轮注 塑模具镶块,但其结构简单且厚度只有 80 μm. Shen 等<sup>[10]</sup>利用改进的 UV-LIGA 工艺制作出喷 墨打印机喷头的微注塑模具型腔.该型腔集喷嘴、 墨汁通道及墨汁储液池于一体,省去了装配过程, 使产品实现高精度、低成本、大批量生产,但工艺 最后需要通过溶解种子层将微注塑模具与 Si 基 底分离,工艺烦琐.

本文设计制作的细胞培养器微注塑模具型腔 可以通过微注塑的方法将细胞培养支架和培养基 的输送通道同时注塑成型且封装成一体,实现微 小器件由部分到整体的装配功能.该型腔由形成 细胞培养器的微阵列结构、聚合物填充所需要的 熔体流道、微注塑浇口以及抽真空所需要的微排

收稿日期: 2014-12-06; 修回日期: 2015-07-20.

基金项目:"十一五"国家科技支撑计划资助项目(2006BAF04B13).

作者简介:马雅丽(1983-),女,硕士,助教,E-mail:mayali928829@163.com;刘文开\*(1980-),男,硕士,讲师,E-mail:lwk2003188@ 163.com.

气通道和排气孔等组成,对图形结构的形状、尺 寸、位置精度要求严格,增加了工艺难度和复杂 度.为此,实验中利用无背板生长法,采用 UV-LIGA套刻技术和掩膜腐蚀技术相结合的方法, 直接在 5CrNiMo 合金钢基底上制作出微型腔.重 点对 350 µm 厚的 SU-8 胶提出建议工艺条件,分 别从电流密度和 pH 两个方面对 Ni 的微细电铸 过程中产生的节瘤现象进行分析并改善工艺参 数.

#### 1 实 验

微注塑模具型腔的制作工艺流程如图 1 所示,主要包括两次 SU-8 胶光刻和 Ni 的微细电铸,掩膜腐蚀技术及 SU-8 胶的去除.



#### 1.1 实验材料

实验材料包括美国 MicroChem 公司生产的 SU-8 胶及显影液,5CrNiMo 合金钢基板,氨基磺 酸镍电铸液(成分为 550 g/L 的氨基磺酸镍、10 g/L 氯化镍、35 g/L 硼酸及 0.10~0.15 g/L 的润 湿剂),3 块光刻掩膜板.

#### 1.2 实验过程

(1) 基板处理

将基板研磨抛光后,分别用丙酮和乙醇煮沸, 去离子水冲洗,氮气吹干,烘箱烘烤数小时.

(2)光刻第一层 SU-8 胶

首先在基板表面涂覆化学增附剂以增强基板 与胶层的附着力,再利用文献[11]中提到的方法, 通过固定厚度边框,手工刮胶得到 350 μm 厚的 SU-8 胶. 自平整数小时后进行前烘,曝光是在 BGJ-3 型曝光机上进行的,剂量为 630 mJ/cm<sup>2</sup>. 中烘 85 ℃,15 min,显影 20 min 得到第一层微正 方形阵列 SU-8 胶模.

(3)电铸第一层 Ni 结构

在氨基磺酸镍溶液中进行微细电铸,对电铸 液循环过滤并且搅拌,工作温度 50~55 ℃,pH 3.8~4.4,电流密度 0.5~3.0 A/dm<sup>2</sup>,电铸时间 约 60 h.

(4)光刻第二层 SU-8 胶

旋涂化学增附剂和厚度 50 µm 的 SU-8 胶. 前烘采用梯度式升温的方式,其中 85 ℃的烘焙时 间为 50~60 min. 完全接触式曝光,中烘结束后 采用注射流喷淋的方法显影.

(5)电铸第二层 Ni 结构

电铸工艺参数与电铸第一层 Ni 结构基本相同. 电铸时间约 12 h.

(6)光刻微排气通道

选用耐酸腐蚀性的光刻胶,通过匀胶、曝光、 显影、后烘等工艺制备.

(7)腐蚀微排气通道

利用光刻胶作掩蔽层,通过控制 Ni 腐蚀液中 各种无机酸的配比和腐蚀时间有效控制腐蚀深 度.最终在微阵列结构和排气孔之间得到深度 10~15 μm 的微排气通道.

(8) 去除 SU-8 胶

利用无机酸将电铸金属的 SU-8 胶模煮沸, 其被腐蚀成黏稠状碎片,再用去离子水清洗,获得 微注塑模具型腔.

实验制作的微注塑模具型腔如图 2 所示,主要由微阵列结构、微注塑浇口、微排气通道组成,同时又有排气孔和聚合物熔体流道等结构.以上这些结构的形状及相对位置精度由掩膜套刻的对准精度决定,3 层掩膜套刻的对准精度由掩膜板上的 8 个对准标记点保证.电铸后测量铸层表面粗糙度  $R_a=0.075 \ \mu m$ .利用台阶仪测量微型腔中各个结构的尺寸如下:微阵列结构的整体尺寸为1 mm×1 mm,如图 3 所示,用于形成细胞培养器,其中微正方形阵列用于形成细胞培养器支架,其 $L \times W \times H=200 \ \mu m \times 200 \ \mu m \times 300 \ \mu m$ ,间隔为 100  $\mu m$ ;微圆柱阵列用于形成细胞培养基的输送通道,直径 30  $\mu m$ ,高度 50  $\mu m$ .微注塑浇口的

宽度和深度分别为 200 μm 和 50 μm. 微排气通道 将微阵列结构和排气孔连通,深度 10~15 μm. 在 微注塑过程中,利用抽真空装置将型腔中气体排 出,有利于聚合物熔体的流动填充,提高塑件的成 型质量.



图 2 微型腔的 SEM 照片 Fig. 2 SEM photo of micro cavity



图 3 微阵列结构 Fig. 3 Micro array structure

## 2 问题与讨论

对于特定厚度的 SU-8 胶模图形来说,各个 工艺参数都有优化的匹配值.实验中,在合金钢基 底上制作微型腔的 UV-LIGA 工艺过程中有很多 问题,包括第一层 SU-8 胶前烘和曝光参数的选 定,Ni 的微细电铸过程中节瘤产生的原因及参数 的改善.

## 2.1 SU-8 胶的前烘问题

前烘最重要的两个参数为温度和时间,其作 用是去除 SU-8 胶中的部分溶剂以增加光引发剂 的比例.实验中,为避免 SU-8 胶前烘过程中产生 气泡,当采用较低的前烘温度 75 ℃,时间 6 h 时, SU-8 胶在显影过程中直接脱落.分析原因,前烘 时间太短,溶剂挥发少,单位体积内光引发剂比例 小,曝光区域产生的酸催化剂少,后烘交联度低, 胶模脱落.固定温度将时间增至 8~9 h,显影后 胶模结构已出现,但 SU-8 胶仍交联不足,黏度很 高,随着显影的进行,SU-8 胶又进入已显影区域, 如图 4(a)所示.这种钻蚀现象进行到一定程度会 使微结构发生浮动,如图 4(b)所示.



(a) SU-8 胶模坍塌



(b) SU-8 胶模浮动



(c)质量良好的 SU-8 胶模
图 4 SU-8 胶模
Fig. 4 SU-8 photoresist mold

对于本文制作的与基底接触面积少,厚度 350 µm 的胶模图形来说,当采用较低的前烘温度 时,单靠增加前烘时间不能得到 SU-8 胶模.失败 的主要原因是光刻胶交联不足使曝光区域发生坍 塌,故采用提高前烘温度与梯度升温相结合的方 法进行前烘,一方面提高前烘温度能增加光引发 剂在 SU-8 胶中的比例用以增加交联度;另一方 面梯度升温能使溶剂缓慢释放,减轻气泡产生.但 前烘温度不宜超过 95 ℃,因为温度太高会减弱光 引发剂的感光性,反而影响其光化学反应,降低交 联度<sup>[12]</sup>.实验中,前烘最高温度选定为 85 ℃,此 温度既是溶剂分子的挥发温度,又不会影响光引 发剂的化学性能.升温方式为自 65 ℃至 85 ℃每 隔 5 ℃间歇式提升,且 85 ℃的前烘时间为 5.5~ 6.0 h.选定此前烘时间的理由是对于 85 ℃已确 定的前烘温度来说,当前烘时间超过一定值时,溶 剂挥发量趋于饱和,若再延长时间,则中烘交联度 和内应力都会过大,胶模对基底的附着力变小,易 断裂或浮胶.SU-8 胶显影后如图 4(c)所示,胶模 图形的线形与质量明显改善,且与基底结合良好. 此前烘参数与实验初参数比较,在相同的曝光条 件下,可以提高光刻胶的留膜率与抗蚀能力.

#### 2.2 SU-8 胶的曝光问题

SU-8 胶的各个工艺参数的选定都会对后续 的工艺步骤和胶模的制备有着直接影响. SU-8 胶 前烘不足时,易造成曝光工艺失败. 一是 SU-8 胶 的高黏度使其在光刻过程中与掩膜板有粘连,无 法进行良好对板. 二是接触式曝光时,胶面与掩膜 板处于顶紧状态,二者存在挤压,前烘不足的 SU-8 胶在压力作用下会缓慢流动,部分已被曝光的 SU-8 胶被挤压流动到不需要曝光的区域,即需要 显影掉的区域,而这些区域的 SU-8 胶已不能显 影出精确的胶模图形. 如图 5 所示,9 个微正方形 窗口都只能显影掉左侧小部分 SU-8 胶,右侧大 部分不能完全显影掉. 原因是曝光时已经曝光的 SU-8 胶被挤压流动到微正方形窗口处,而中烘的 交联反应使其不能完全显影.



图 5 SU-8 胶具有流动性时的曝光结果 Fig. 5 Exposure result of SU-8 photoresist with fluidity

曝光的重要参数为曝光剂量,其大小直接影响胶模质量.实验初,考虑到 SU-8 胶模较厚且大部分需要显影掉,根据经验选定较小的曝光剂量 420 mJ/cm<sup>2</sup>,由于实验中曝光光源固定,只需要确定曝光时间为 8 min,显影时,SU-8 胶易显影 但同时胶模图形易脱落,增加中烘时间仍不能得 到胶模.这是因为剂量太小,即使在适当的中烘条 件下,SU-8 胶交联度也低,显影后胶模图形分辨 率差,黑边严重,图形相互黏结.又由于本文制作 的细胞培养器与基底接触面积只有 0.64 mm<sup>2</sup>,若 曝光剂量太大,则胶模内应力大,其对基底附着力 小且易断裂,成品率低.实验中延长曝光时间至 12 min,即选定曝光剂量为 630 mJ/cm<sup>2</sup>.如图 4(c)所示,胶模图形无应力裂纹,无黑边,证明曝 光剂量和中烘参数选定恰当,利用台阶仪测量胶 模中微正方形的线宽尺寸,接近 200 μm×200 μm,而实验初采用的曝光剂量得到的胶模中微正 方形线宽尺寸只有约165 μm×165 μm,因此该曝 光剂量有利于减小胶模图形与掩膜板图形的线宽 差,图形复制精度高.

#### 2.3 第一层 Ni 的微细电铸问题

实验中,微正方形阵列在电铸结束后,表层有 很多节瘤,如图 6(a)所示.



(a) 铸层中的节瘤



(b) 调整后的电铸层图 6 Ni 电铸层Fig. 6 Ni electroforming deposit

分析节瘤产生的原因并调整工艺参数如下: 一方面由于微型腔需要大面积电铸且厚度达 350 μm,为了加快电铸速度,后期对电流密度调 节过大,约4 A/dm<sup>2</sup>,但对于任何电铸液都存在一 个获得良好铸层的电流密度范围,当超过允许的 上限值时,由于电极表面附近反应物或反应产物 的扩散速度小于电化学反应速度,从而产生浓差 极化,使得阴极附近缺乏金属离子,造成其电沉积 过程受阻,出现局部尖端放电效应,加剧了局部电 铸,使铸层中产生节瘤.所以实验中控制电流密度 在 3 A/dm<sup>2</sup> 以下.另一方面由于电铸过程中 pH 会升高,当超过 5 时,导致氢氧化镍沉淀并夹杂在 铸层中使其内应力升高,晶粒粗大,铸层粗糙.电 铸液中硼酸为缓冲剂,能减缓电铸槽中阳极区溶 液 pH 的增加,但其含量过多会降低电流效率.故 当长时间电铸时,这种缓冲剂的作用是有限的.同 时,电铸液的主盐是分散能力较好的氨基磺酸镍, 因此实验过程中通过添加氨基磺酸将电铸液 pH 控制在 3.8~4.4 较优.如图 6(b)所示,通过调整 电铸过程中的电流密度和 pH,铸层中节瘤消失, 铸层质量提高.

另外,电铸结束后发现,流道、排气孔周围存 在突起的边缘,这说明铸层的高度不均匀性与胶 模的深宽比有关,当微结构深宽比较小,即待铸区 域的开口尺寸较大时,电流在该区域的再分布不 充分,靠近胶模边缘的电流密度将明显高于中心 部位,使铸层形成边缘高而中间低的厚度分布规 律.所以若要中间部位的高度达到 350 μm,流道、 排气孔等胶模周围的铸层将明显高于胶模.

### 3 结 语

本文根据细胞培养器的功能及结构特点,同 时结合微注塑成型过程中一些工艺要求对微注塑 模具型腔进行设计制作.将 UV-LIGA 套刻技术 和掩膜腐蚀技术相结合的工艺方法应用到细胞培 养器微注塑模具型腔的加工中.实验中,就 SU-8 厚胶的光刻工艺参数进行优化,给出 350 μm 厚 的 SU-8 胶前烘采用梯度升温的方式,自 65 ℃至 85 ℃每隔 5 ℃间歇式升温,且 85 ℃的烘焙时间 为 5.5~6.0 h,紫外光接触式曝光,剂量 630 mJ/ cm<sup>2</sup>,85 ℃中烘 15 min,显影 20 min,得到的胶模 图形质量良好.针对 Ni 微细电铸过程中产生节瘤 现象分析原因并将电流密度和 pH 分别控制在 3 A/dm<sup>2</sup> 以下和 3.8~4.4,提高了铸层质量.获得 的微型腔满足微注塑的生产要求,但对于微注塑 大批量产业化生产,高密度的充型、脱模,铸层与 基底的结合力仍需要提高,这是无背板生长法的 缺陷.该模具型腔的微正方形阵列结构已实现微

注塑制造,而微圆柱阵列尚在试验中.此研究为 UV-LIGA 技术制造微注塑模具型腔提供了有力 依据.

# 参考文献:

- [1] 宋满仓,刘 莹,祝铁丽,等. 微流控芯片基片与盖片一体化注塑成型研究[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(1):13-17.
  SONG Man-cang, LIU Ying, ZHU Tie-li, et al. Research on incorporate injection molding of the cover sheet and the substrate sheet for microfluidic chip [J]. Materials Science & Technology, 2013, 21(1):13-17. (in Chinese)
- [2] 康红梅,肖陶康,王玉丹.微齿轮注塑成型工艺模拟 分析[J]. 机械设计与制造,2013(8):237-239, 242.

KANG Hong-mei, XIAO Tao-kang, WANG Yudan. Micro-gear injection molding process simulation analysis [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(8):237-239, 242. (in Chinese)

[3] 李燃灯,秦宗慧,周 嘉.基于 UV-LIGA 技术的双层微齿轮模具镶块工艺[J].微纳电子技术,2012,49(2):129-133.

LI Ran-deng, QIN Zong-hui, ZHOU Jia. Insert process of the double-deck microgear mold based on the UV-LIGA technology [J]. Micronanoelectronic Technology, 2012, 49(2):129-133. (in Chinese)

- [4] 巫少龙,楼白杨. 微齿轮注射成型数值模拟及正交优化[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(2):43-46.
  WU Shao-long, LOU Bai-yang. Injection molding micro-gear orthogonal numerical simulation and optimization [J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(2):43-46. (in Chinese)
- [5] 郑 辉,仇中军,路瑞军,等.菲涅尔透镜的微注塑 实验研究[J]. 工程塑料应用,2011,39(12):39-42.

ZHENG Hui, QIU Zhong-jun, LU Rui-jun, et al.
Experimental investigation on micro injection molding for Fresnel lens [J]. Engineering Plastics
Application, 2011, 39(12):39-42. (in Chinese)

[6] 杨 灿,尹晓红. 微注塑保压时间对平面透镜相对 折射率的影响[J]. 中国机械工程,2013,24(2): 158-162.

> YANG Can, YIN Xiao-hong. Effects of packing time on relative refractive index of microinjection

molded plano-lenses [J]. China Mechanical Engineering, 2013, **24**(2):158-162. (in Chinese)

 [7] 娄 燕,裴九龙,何培乾,等.基于分子链段长度的 微观黏度模型研究[J].深圳大学学报理工版, 2013,30(6):629-635.

> LOU Yan, PEI Jiu-long, HE Pei-qian, *et al*. Research on a micro-viscosity model based on the molecular chain length [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2013, 30(6): 629-635. (in Chinese)

[8] 卢 振,张凯锋. 微结构与微型零件的微注射成型
 [J]. 中国机械工程,2006,18(15):1865-1868.
 LU Zhen, ZHANG Kai-feng. Micro injection

molding of micro-structured parts and micro parts [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 18(15): 1865-1868. (in Chinese)

[9] 杜立群,秦 江,刘海军,等.基于 UV-LIGA 技术 的微注塑金属模具的工艺研究[J]. 微细加工技术, 2006(5):51-54.

> DU Li-qun, QIN Jiang, LIU Hai-jun, et al. Study on process of microinjection metal mold based on

UV-LIGA technology [ J ]. Microfabrication Technology, 2006(5):51-54. (in Chinese)

- [10] Shen S C, Pan C T, Wang Y R, et al. Fabrication of integrated nozzle plates for inkjet print head using microinjection process [J]. Sensors and Actuators, A:Physical, 2006, 127(2):241-247.
- [11] 马雅丽,刘文开,刘 冲,等. UV-LIGA技术在制作 细胞培养器微注塑模具型腔中的应用[J]. 光学精 密工程,2013,21(5):1228-1233.
  MA Ya-li, LIU Wen-kai, LIU Chong, *et al.* Application of UV-LIGA technology to machining micro-injection mold cavity of cell culture device [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(5):1228-1233. (in Chinese)
- [12] 张立国,陈 迪,杨 帆,等. SU-8 胶光刻工艺研究
  [J]. 光学精密工程, 2002, 10(3):266-269.
  ZHANG Li-guo, CHEN Di, YANG Fan, et al.
  Research on SU-8 resist photolithography process
  [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(3):266-269. (in Chinese)

# Machining micro-injection mold cavity by UV-LIGA process

MA Ya-li<sup>1</sup>, LIU Wen-kai<sup>\*1</sup>, LU Xue-cheng<sup>1</sup>, LIU Chong<sup>2</sup>

(1. Department of Military Logistics, Military Transportation University, Tianjin 300161, China;

2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract**: A micro-injection mold cavity is designed and manufactured. By the method of no back plate growing technology, the micro-injection mold cavity with micro-array structure, micro-injection gate, micro-exhaust passage, exhaust vent and polymer melt flow channel is directly manufactured on an alloy steel substrate applying overlay UV-LIGA technology and mask etching technology. The optical lithography parameter of SU-8 thick photoresist is optimized and the proposed fabrication process for 350  $\mu$ m SU-8 photoresist is given as follows: scraping photoresist by fixing the thickness of frame, prebaking by gradient heating-up and temperature rising every 5 °C from 65 °C to 85 °C, at 85 °C for 5.5-6.0 h, UV contacting exposure with dose of 630 mJ/cm<sup>2</sup>, post-baking at 85 °C for 15 min and development for 20 min. The causes for generating nodules in the process of Ni microelectroforming are analyzed, and the process parameter is improved by controlling current density and pH respectively under 3 A/dm<sup>2</sup> and 3. 8-4. 4. As a result, the micro-injection mold cavity of good quality is gained successfully.

Key words: UV-LIGA technology; SU-8 photoresist; micro-electroforming; micro-injection mold cavity