

基于 LIGA 技术的微细电火花加工

中国科学院高能物理研究所 (北京 100039) 彭良强

随着众多消费产品向“轻、薄、短、小”方向的发展,微细加工技术日益成为新产品研发中的最重要组成之一,基于微细加工技术的微型机电系统(MEMS)已经成为众多研究机构和企业竞相投资的热门领域之一,其产品遍布工业、农业、医疗、通讯、航天、国防等领域。微细加工技术的来源有两类:一类是以微电子工业中的光刻技术为核心发展、引伸出来的,例如体硅加工、表面硅工艺、LIGA 技术等,具有批量化制作的特点,其结果往往是全新产品,如硅压力传感器、汽车安全气囊用的加速度计、喷墨打印机的喷嘴;另一类是由通常的特种加工发展而成,例如激光加工、电火花加工

等,一般为单件加工,其结果常常是对现有产品的改进、提高,如纺织用的喷丝板。

微细电火花加工由于其适应范围广和非接触加工的特点,已日益成为一种有前途的微型机械制造方法。采用 LIGA 技术高精度地批量制造具有复杂形状和高深宽比的微细电火花工具电极,将 LIGA 技术和微细电火花加工技术二者的优点有机结合起来,能够高效率地进行复杂形状的微细电火花加工。本文对 LIGA 技术和基于 LIGA 技术的微细电火花加工技术作一简单介绍。

1. LIGA 技术现状

LIGA 技术一词源自德语 *Li thograph*

作液进入导轮的轴承室,造成导轮早期报废对放电加工产生的不利影响,是综合治理的重中之重。必须改变设计理念,恰如其分地准确定位各元器件的功能、作用,除冗增需,使其各司其职,尽其所能,量力而行,协同运作。

综上所述:①放电能量对 H-WEDM 加工工艺性能的影响重大,控制了放电能量就能更好地控制 H-WEDM 的加工性能。精确控制放电能量,是根据不同材料的固、液、气相变温度,控制放电能量产生的热加工过程,达到最小改变被加工材料理化性能、降低钼丝损耗的目的。②精确控制放电能量是一个系统工程,其工艺性能依存于 H-WEDM 的设计理念、制造水平、关键元器件的质量、钼丝和工作液的品位。

放电能量的计算和控制:

某种工件材料放电加工时所需的热量 Q , 可由下列公式计算:

$$Q = C \cdot W \cdot T$$

式中 C ——工件材料比热容, $4.1868\text{J/kg} \cdot \text{K}$

W ——工件蚀除部分的重量, g

T ——工件蚀除时所需达到的温度, $^{\circ}\text{C}$

由此可得出放电加工所需的电参数值。

在计算中,公式中的“ W ”为单个脉冲一次放电蚀除工件材料的重量,并应随着“表面粗糙度值”调整。还应考虑下列约束条件:

(1) 脉冲电压应为满足放电条件的最小值。工作液中火花——电弧伏安特性曲线示出,极具危害性的长电弧出现的概率与电压的幅值、工作液离子浓度呈正比关系。

(2) 脉冲电流的平均值不应超出钼丝能承受的直流电流值(直径 0.18mm 约为 4A)。

(3) 脉冲宽度越小,极性效应显示的良好状态和“升华”现象越明显。脉冲宽度应依据功率开关器件的性能条件和放电回路分布参数条件选取。

遵循放电能量控制策略研制的 H-WEDM 及其高频脉冲电源,通过加工用量居冷作模具钢首位的 Cr12MoV 等合金钢材料,航空、航天、汽车等制造业大量使用的如 LF、LY、LD、LC 等铝合金材料,IC 模具应用最为广泛的硬质合金(WC)材料,PCD、CBN 等超硬材料,均显示出优良的工艺性能。

(收稿日期:20031114)

Galvanformung und Abformung (意为光刻、电铸和铸塑), 在 20 世纪 80 年代中期由德国 Karlsruhe 原子核研究中心发展起来的。LIGA 技术由同步辐射深度光刻、电铸和铸塑三大主要工艺构成, 是微细加工技术的一个重要分支, 可加工任意形状、横向尺寸在亚微米范围的结构, 能够制造出高度在毫米量级的、高宽比在 100 以上的、结构表面粗糙度在亚微米范围的三维立体结构, 有着其他技术无法实现的优越性能。

自 LIGA 技术诞生以来, 受到广泛重视, 发展非常迅速, 并衍生出许多变种 (准 LIGA 技术), LIGA 技术很快应用于 MEMS 的生产, 已经有微光谱仪、喷墨打印机喷嘴等产品面市。目前美国和德国在 LIGA 技术领域居领先地位, 其他国家如英国、俄罗斯和日本等也非常重视 LIGA 技术的研究并取得了许多重要成果。

德国从事 LIGA 技术研究的专门研究机构有两个: IMM (Institute of Microparts Minz) 和 IMT (Institute of Microsystem Technology)。他们与其他研究机构和企业有着广泛的合作。例如, IMT 与 MicroParts 公司密切合作, 从事 MEMS 产品市场开发, 并通过了 ISO9001 认证。目前这两个研究机构已研制出微电机、过滤器、红外滤波器、加速度传感器、微型涡轮、喷墨打印机喷嘴和光纤连接器等多种微器件, 以及微加速度计 ($\pm 5g$)、微光谱仪 (效率 25%, 分辨率 $0.2\text{nm}/\mu\text{m}$)、微泵 ($220\mu\text{L}/\text{min}$) 等微机电系统。

美国在 MEMS 研制方面一直保持国际领先地位。20 世纪 80 年代初期, 主要是利用 IC 工艺, 80 年代末, 开始了 LIGA 技术的研究, 成立了 DXRL (Deep-X-ray Lithography) 委员会。DXRL 在劳伦斯—伯克利国家实验室的 Advanced Light Source (ALS), 斯坦福直线加速器中心的 Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL), 布鲁克海文国家实验室的 National Synchrotron Light Source (NSLS) 和路易斯安娜大学的 Center for Advanced Microstructures and Devices (CAMD) 等同步辐射装置上都建立了用于 LIGA 技术研究的设备, 并为从事 LIGA 技术研究的机构服务。此外, 从事 LIGA 技术研究的还有喷气实验室和 Wisconsin-Madison 大学等近十所大学。这些研究机构已经制造出一些实际应用的产品, 如离子准直

器、质谱仪、微电机等。美国 LIGA 技术研究的特点是军事应用背景很强, 许多研究工作与美国国防部密切合作; 直接开发满足军事上特殊需要的产品。

我国台湾近几年投入了大量的人力、物力和财力开展 LIGA 技术的研究, 其起步虽比大陆晚, 但现在已经超过了大陆。台湾新竹的同步辐射研究中心 (SRRC) 正与台湾大学、清华大学 (新竹)、台湾交通大学、工业技术研究院等单位联合开展 LIGA 技术研究, 致力于喷墨打印机喷嘴、喷丝板、光纤连接器等具有明确应用目标的产品研制和生产, 微邦公司的喷墨打印机喷嘴已经达到 50 万件/月的产量。

中国大陆现有两台同步辐射光源, 分别是位于中国科学院高能物理所的北京同步辐射装置 (BSRF) 和位于合肥中国科技大学的国家同步辐射实验室 (NSRL)。从 20 世纪 90 年代开始, 高能物理所、长春光机所和中国科技大学等研究单位开展了 LIGA 技术研究, 上海交通大学的微纳米中心也以 LIGA 技术作为他们的研究重点之一。这些研究得到了来自科技部、科学院、国防科工委、自然科学基金委等部门的国家攀登计划、863 计划、知识创新工程等项目支持, 取得了一定的进展。目前的 LIGA 技术成果主要是在高能所的装置上取得的, 最大厚度为 2mm, 最小尺寸为 500nm, 深宽比最高达 100, 合肥的装置正在改造, 预计不久将对外开放。图 1~4 是在北京同步辐射装置上获得的几

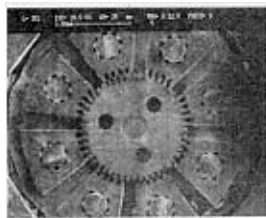


图 1 微型步进电机

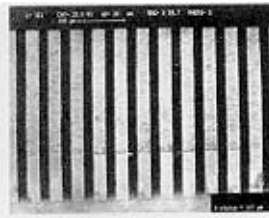


图 2 微型换热器

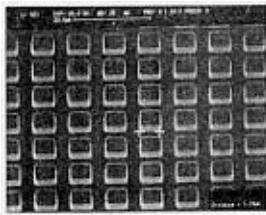


图 3 二维光栅

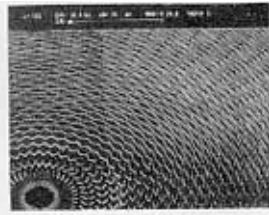


图 4 Gabor 波带片

个典型结果。

2. 微细电火花加工技术

在微细电火花加工技术中,微细工具电极的制作是进行加工的前提和基础。国际上,日本东京大学率先开发出微小电极线放电磨削工艺(WEDG),实现了微小轴(工具电极)的加工,才使微细电火花加工的研究得以开展起来。在国外,微细电火花加工在电火花加工中所占比重正逐年增加,目前已接近10%。在国内,南京航空航天大学 and 哈尔滨工业大学在微细电火花加工技术研究中进行了多方面的探讨。北京市机电研究院和清华大学在北京市自然科学基金的支持下开发出一种采用蠕动式微进给机构的微细电火花加工装置。目前微细电火花加工对象已由简单的圆截面微小轴、孔拓展到复杂的微小三维结构。电火花加工由于其非机械接触加工的特点适合微细加工,能够加工各种导电材料和复杂形状。微细电火花加工由于电流小,亦能够加工硅等半导体高阻抗材料。迄今微细电火花加工的最小特征尺寸已到 $5\mu\text{m}$ 。其批量制作也可以通过模具加工、电铸、注塑等方法实现。

以下的图片分别是清华大学的研究组利用线放电磨削工艺制作的微小电极(图5),制作的圆孔(图6),以及采用扫描方式制作的三维结构(图7、8)。

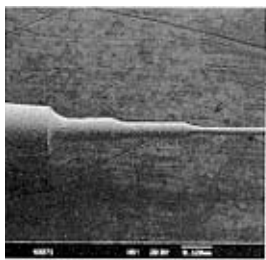


图5 紫铜电极,细端
 $\phi 29\mu\text{m} \times 0.32\text{mm}$

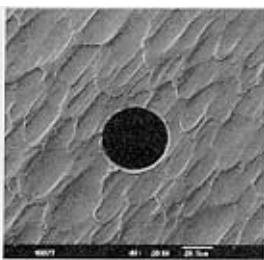


图6 不锈钢工件,圆孔
 $\phi 44\mu\text{m} \times 0.2\text{mm}$

但在至今采用线放电磨削工艺的微细电火花加工中,只能制备圆、外凸多边形等简单截面形状的电极,很难制作复杂形状的微小成形电极。使用简单形状的微小电极,借鉴数控铣削的方法进行微细三维轮廓的加工,原理上可以加工复杂形状,但由于工具电极的损耗,电极形状很难保持,影响加工

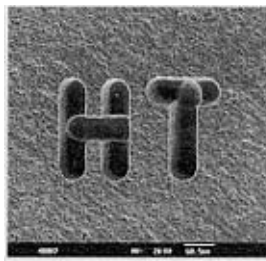


图7 硅工件,字宽
 $58\mu\text{m}$

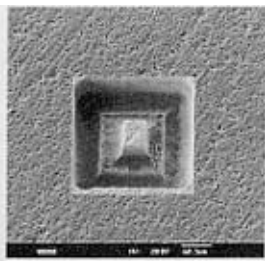


图8 硅工件,中部凸台
 $51\mu\text{m} \times 51\mu\text{m}$

精度,且形状越复杂,加工效率越低。另一方面,即使是简单形状的加工,工业上也常常是需要在一个工件上加工许多小孔,采用线放电磨削工艺制备电极的方法,加工效率将低得无法忍受。因此迫切需要寻求一种新的方法制备大面积复杂形状的电极,由于加工深度的要求和电极在加工过程中存在损耗,为了不影响加工形状精度,该电极还必须同时具有大结构深度和高深宽比。

采用LIGA技术制备电火花的工具电极,较好地解决了复杂图形制作问题,并避免了复杂图形和阵列图形的加工效率低下的问题。日本松下研究所和美国Wisconsin大学合作对采用LIGA工艺制备工具电极的微细电火花加工技术进行了实验研究。我们和北京市机电研究院等单位合作,也开展了基于微细电火花加工技术研究,取得了初步的结果。图9、10分别是采用LIGA技术制作的工具电极、用电火花制作的不锈钢工件。

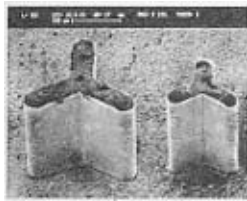


图9 铜工具电极

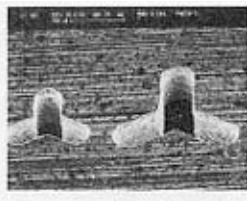


图10 不锈钢工件

LIGA技术、微细电火花加工技术等微细加工技术是新产品开发的关键之一。基于LIGA技术的微细电火花加工技术巧妙地将二者的优点结合起来,拓宽了加工范围,必将在今后的工业生产中发挥作用。

(收稿日期:20031118)