

仪器、设备、技术

一种超光滑表面抛光装置的研制*

叶 梅 叶虎年 张思团

(华中科技大学仪器系高教所 湖北武汉 430074)

摘 要:针对“非探针超分辨光学显微镜”对光学元件表面提出的超光滑要求,发展了一种新颖的用于超光滑表面加工的经济装置。该装置为仅用一个单轴驱动工作盘,而随动聚四氟乙烯抛光盘的拟浴式抛光系统。加工件的原子力显微镜 AFM 测试结果表明该装置加工出的光学表面的粗糙度可优于 1nmSq 值,满足纳米分辨率光学测量系统对元件的要求及探测单个细胞或微生物样本时对载片的表面要求。

关键词:超光滑表面;超精密加工;拟浴式抛光;单轴驱动;浮置抛光盘

1. 引言

受到衍射极限的限制,传统的光学显微镜只能获得由辐射场携带的约为波长一半的结构信息。新近发展起来的高分辨率近场光学显微镜中,传统光学仪器中的镜头被细小的探针代替,其尖端的直径远小于光的波长。当把这样的亚波长结构放置在距离物体表面近场区域时,可以探测到丰富的亚波长光学信息,而这些精细结构信息仅仅存在于物体表面附近的非辐射场内。由于这个非辐射场随着离开表面距离呈指数式衰减,使得近场探测极困难,要实现近场光学成像,须采取恒高逼近网状逐点扫描技术才能获取物体的形貌像。在扫描过程中,十分关键的问题是如何保证探针和样品之间处于恒定的高度。为解决此问题,贝尔实验室的 E. Betzig 等人采用切变力探针-样品间距调控法,实现了针尖和样品间间距的有效控制和近场定位,推动了近场光学显微镜的发展。尽管 E. Betzig 的出色工作推进了探针型近场光学显微镜,但是实际上真正实现探针对软样品的精确纳米级定位和扫描仍是一项艰巨的工作。为研究无探针的超分辨显微镜,近年来人们大量开展了各种方案的研究:美、英合作研究了“远场”方案;德国人研究了“中场”方案(均在 2005 年公开发表);而我们则在 2000 年 SPIE 上报告了“近场”方案^[1]。上述这些方案中都有多个超光滑平面出现,以便组成实际系统。

基于以上要求,我们研制了一种用于加工超光滑表面的小型经济型实验室抛光装置。本文介绍该装置超光滑抛光机制、总体结构和实验结果等。

2 超光滑表面的抛光机理与技术

一般原子直径小于 0.13nm ,而超光滑表面的微观起伏的均方根值为几个原子的尺寸,因此实现超光滑表面加工的关键在于实现表层材料原子量级的去除。由于表层原子的结合能低于内部原子的,所以表层原子较易于去除。当抛光时,磨料颗粒与工件表层原子碰撞,进一步削弱了表层原子的结合能。当发生下一次碰撞时,表层原子会脱落。所以抛光是由依赖磨料精细度的磨削即利用物理方法去除工件表面原子,和利用化学方法削弱表层原子结合能去除工件表面原子共同形成加工过程。

在硬脆性材料的超光滑表面抛光中,磨料的机械作用也表现在以塑性的方式产生切屑。T. G. Bifano 提出了塑性磨削理论,他认为如果将磨削深度控制在几十纳米到几个纳米之间,硬脆性材料在磨削过程中的去除机理由脆性崩裂变为塑性流动。因此柔性接触方式是超光滑表面加工的首选,使工件与抛光盘在抛光时不发生接触,仅用抛光液冲击工件表面,靠抛光液的运动产生动压,在磨盘与工件间留有数微米厚的间隙,磨料在此间运动,对工件表面不断碰撞,以获得精确面型的光滑表面。非接触抛光方法的去除量极小,所获得的超光滑表

* 国家自然科学基金资助项目 (No. 30170276, No. 30627001, No. 60672058)

面,具有极低的表面粗糙度和优良的边缘几何形状,适用于加工强调高面形精度和极低的粗糙度值的光子学和光电子学元件^[2,3,4]。

3. 抛光机的主体结构

根据上述抛光机理和技术经验,我们研究了一种介于聚四氟乙烯抛光方法和浴式抛光方法之间的抛光装置,如图1所示。



图1 超声浴式抛光装置

图中左侧为驱动控制器,右侧为抛光台。抛光台上部黑色部分为电机;透明浴缸内连在电机轴上的暗色圆盘为主动盘;主动盘下白色圆盖为聚四氟乙烯随动盘;随动盘下的白色圆柱为支撑座。工件附在主动盘下表面,待磨表面向下,电动机驱动主轴使工件盘和工件旋转,磨盘因为工件盘和工件带动液体运动作用而被动地绕自身轴作异步旋转。磨盘与工件均浸于抛光液中。磨盘材料选择具有抗老化、耐磨损、磨光性好、可长时间保持面形等优点的聚四氟乙烯。聚四氟乙烯盘厚度约20mm、直径为80mm,磨具的直径是工件的3~5倍,磨盘悬置于另一固定的聚四氟乙烯座的环形支撑面上,以获得极低的自摩擦系数和平稳的空间运动。工件的面形精度主要由磨盘的面形精度决定,聚四氟乙烯盘是这样制造的,参照澳大利亚NML的方法直接在聚四氟乙烯板表面切出纵横交错的井字槽,将锐边倒角,再研磨聚四氟乙烯表面,不断减小研磨用的磨料粒度,这样聚四氟乙烯表面愈来愈光滑,最后可以用干涉法检查其平面度,得到平整的聚四氟乙烯表面。

工件盘由导热性好的铝制成,工件盘与主轴固联,主轴可在10~3000rpm范围内无级变速。被加工的工件固定在铝盘表面,与铝盘表面吻合。铝盘下方有一个悬架框,悬架上有一个固定孔用来安装聚四氟乙烯底座和抛光盘,调整磨盘高度、方位等位置参数。装置的底座配有可拆换的液框,用于构成容器,以进行液中抛光及防止抛光时液体外流。

抛光的驱动采用单转轴系统。抛光盘和工件间保持几微米厚的间隙以容纳抛光液。抛光过程中,抛光液随工件盘旋转,由于液体运动产生动压,既作用于工件也作用于处于偏心位置的抛光盘,使抛光盘获得异步随动旋转,并使工件受抛光液的作用更具随机性。工件与磨盘之间形成一层数微米厚的液层使得工件和磨盘保持软接触。

在对工件进行超光滑抛光前,必须对工件用常规方法进行预抛光,达到一定的要求后再进行精细抛光。

4. 可控驱动系统

超光滑表面抛光的精度主要由三个方面保证,盘片面形、磨料和轴系。其中盘片面形与磨料已介绍。轴系则由驱动系统决定其精度。近年来,新型功率开关器件、专用集成电路和控制算法的发展,使交流驱动电源、交流伺服系统的性能大幅提高,它除克服了步进电机或直流伺服电机本身的不足,还具有功能强大、控制方式灵活、技术性能好和可靠性高等特点。因此,交流伺服电机构成的驱动装置用于超光滑表面抛光机是精密机械加工不断向前发展的趋势。

交流伺服驱动装置由交流伺服电机以及与其配套的驱动器组成。采用日本松下公司的MSMA永磁交流伺服电机(小惯量型)及MSDA交流伺服驱动器。MSMA交流伺服电机的主要特点是惯量小,转矩大,控制精度高,可方便地获得与频率成正比的可变速度,在低速运行时无爬行、无震动,调速范围宽,力矩——频率特性好,同时该电机轴上自带有高分辨率的位置旋转编码器,可方便地将电机轴的实际转角反馈给驱动器,在位置环方式下构成一个闭环位置控制。MSMA交流伺服电机结构简单,体积小,运行可靠,无需维护。适当的设计和装调可以使与主轴固联的工件盘在低速10~200rpm时盘边缘的轴向摆动控制在设计范围内,保证被加工面与聚四氟乙烯盘面间的数微米间隙。

5. 超光滑表面的测量结果和讨论

原子力显微镜AFM是一种新型扫描探针显微镜,它是将一个探针及其悬臂放置在样品表面并处于原子分离的位置,使得探针针尖和样品表面的原子呈现原子间势能的排斥状态。当探针沿表面扫描时,它会沿着表面形貌而起伏,通过测量探针的位移,就可以描绘出具有原子分辨率的表面形貌。AFM最突出的优点是对于非导电材料也能进行粗

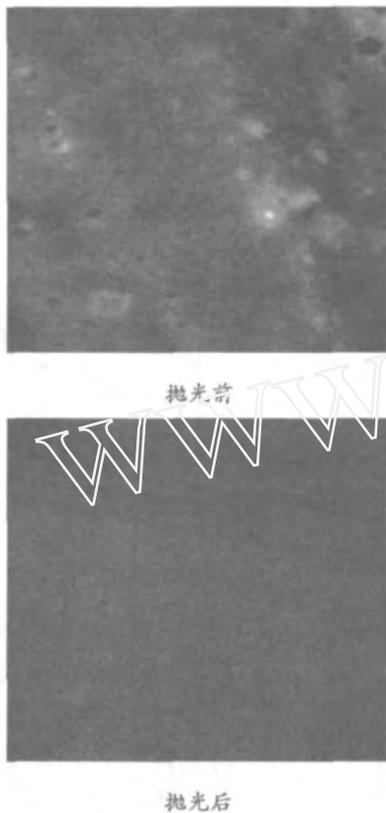


图2 抛光前后的比较

糙度分析和获得 3D 空间形貌,本研究工作使用性能优良的新型本原 CSPM4000 扫描探针显微镜系统在原子力显微镜的轻敲工作模式下测量表面粗糙度,测量区域: $4\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$,采样点 1024×1024 ,分辨率为横向 0.26nm ,垂直 0.1nm (以云母晶体标定)。CSPM4000 测量表面粗糙度时,可以给出测量区的数十个有关表面形貌参数,为突出重点分析,我们仅选表面粗糙度均方根值 S_q 即人们常用的 rms 值;表面峰谷距 S_y 值;表面单位面积凸起数 S_{ds} 对加工出的表面做讨论。

通过对用聚四氟乙烯磨盘超精密抛光耐蚀硼硅酸玻璃的实验,我们获得了在室内普通环境下均方根粗糙度值低达 $\sim 3\text{nm}$,在去尘环境下达到 1nm 的超光滑表面,抛光后的工件边缘几何形状规整,抛光前后的照片如图 2 所示。

讨论:

(1)磨料液的影响:当使用 500nm 的 CeO_2 微粉液时,在主动轴转速 $60 \sim 80\text{rpm}$, $40 \sim 50$ 分钟内样品的表面即可由普通光滑表面 $S_q = 0.1\mu\text{m} \sim 0.08\mu\text{m}$ 迅速降到约 4nm ,峰谷距约为 30nm (S_y),当使用约 30nm 粒径的胶体 SiO_2 浓度约 3% 时,经约 100 分钟, $S_q = 4\text{nm}$ 的光滑样品,则可降到 S_q 约

为 1nm ,峰谷距约为 5nm (S_y),液体 pH 值约为 8 。

(2)当不用搅拌器时,液体旋转时的离心作用使抛光液中粒度稍大的颗粒被甩到四周,并逐渐沉到底部,这样夹在磨盘和工件间的液膜中的磨料越来越精细均匀,被加工光学表面越来越光滑。

(3)以精抛后的玻璃表面 $S_q = 4.2\text{nm}$ 为例分析,其凸起数 S_{ds} 为 $231/\mu\text{m}^2$ 远远小于光洁晶面上蒸镀金属薄膜的 S_{ds} 值。这一方面与材料为非晶态有关,但也与精抛加工有关,抛光粒子的平均粒度尽管并不很小,但削去峰尖的能力仍然客观存在。这样的表面若蒸镀金属膜,因为蒸镀中核或岛的并联有类似液体填充的特点,能使岛间的沟渠或孔洞很快消失,因而有可能获得同类粗糙度的表面。然后去作超光滑加工使其达到 1nm 的 S_q 值。

(4)聚四氟乙烯磨盘的浮置有助于启动和随动的灵活与异步速度多变。因聚四氟乙烯的优良化学稳定性,采用增加液体密度和挖空磨头的方法可使聚四氟乙烯磨头受到一定的浮力,在装有工件的带表面台阶的工件盘转动引起的流体的推力下自动保持磨盘与工件表面间的间隙和间隙大小的随机性波动,可使工件表面各处受浆状液体均匀冲击。

(5)聚四氟乙烯磨盘表面易于修整,一块磨盘可多次修整长时间使用,并有可能做成凹凸曲面去加工回转曲面工件。

6 结论

单轴驱动、全聚四氟乙烯磨盘异步随动机构可实现小工件精密和超光滑平面抛光。浮置的聚四氟乙烯磨盘有利于实现磨盘的启动和异步随动。系统构成的经济性远优于现用的超精密抛光机。

(收稿日期: 2006, 11, 10)

参考文献:

- [1] Ye Hunian, Ye Mei A Study for Imaging Method with Nano-resolution SPIE 4231, 2000: 381 - 383.
- [2] R W Dietz and J M Bennett Bowl feed technique for producing supersmooth optical surface Appl Opt, 1966, 5 (5): 881 - 882
- [3] Siner A J, Thwaite E G et al Polishing study using Teflon and pitch laps to produce flat and supersmooth surface Appl Opt, 1992, 31 (10): 1472 - 1481.
- [3] Gao Honggang, Chen Bin, Cao Jianlin et al A prototype apparatus for flat polishing and initial experiments Optics and Precision Engineering (光学精密工程), 1995, 3 (1): 57 - 60.

第一作者简介:叶梅 (1965 -),女,硕士,工程师,国家自然科学基金项目负责人,主要从事精密光学仪器方面的研究。