

超精密研磨抛光方法

上海市静安区职工大学 荣烈润

摘要：介绍了几种近代超精密研磨抛光方法的加工原理、特点、加工对象和应用。

关键词：超精密研磨；弹性发射加工；机械化学研磨；磁力研磨；超声研磨

1 概述

超精密加工技术标志着一个国家机械制造业的水平，在提高光机电产品的性能、质量、寿命和研发高科技产品等方面具有十分重要的作用。当前，超精密加工是指加工误差小于 $0.01\ \mu\text{m}$ 、表面粗糙度小于 $Ra0.025\ \mu\text{m}$ 的加工，又称之为亚微米级加工。现在，超精密加工已进入纳米级，称之为纳米加工。

在超精密加工中，超精密切削、超精密磨削的实现在很大程度上依赖于加工设备、加工工具以及其它相关技术的支持。并受其加工原理及环境因素的影响和限制，要实现更高精度的加工十分困难。而超精密研磨抛光由于具有独特的加工原理和对加工设备、环境因素要求不高等特点，故它可以实现纳米级甚至原子级的加工，已成为超精密加工技术中的一个重要部分。

2 几种超精密研磨抛光方法

2.1 基于机械作用的超精密研磨抛光方法

基于机械作用的超精密研磨抛光方法是依靠微细磨粒的机械作用对被加工表面进行微量去除，达到高精度的加工表面。

2.1.1 弹性发射加工

弹性发射加工是一种可以获得较高的加工精度和较低的表面粗糙度的超精密研磨方法。其加工原理如图 1 所示（图 1 略）。

加工时使用聚氨脂球作加工头，在高速旋转的加工头与被加工工件表面之间加上含有微细磨粒（ $0.1\sim 0.01\ \mu\text{m}$ ）的研磨液，并产生一定的压力。通过高速旋转的加工头所产生的高速气流及离心力，使磨粒冲击或擦过工件表面，产生弹性破坏物质的原子结合，从而去除工件表面的材料。它可使材料内部不产生错位和缺陷，但又可以产

生微量的“弹性破坏”（即无干扰的加工），从而实现原子级加工。并可获得非常优良的表面。在加工硅片时，可获得相当于腐蚀加工一样的无缺陷表面。

如果对聚氨脂球和工作台采用数控装置，则能对工件进行曲面加工。它既可实现原子级弹性去除，又可获得最佳几何形状精度。图 2 为数控弹性发射加工装置（图 2 略）。整个装置是一个三坐标数控系统，聚氨酯球装在数控主轴上，由变速电动机带动旋转，其负载为 2N。在加工硅片表面时，用直径为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的氧化锆微粉，以 100m/s 速度及水平面成 20° 的入射角向工件表面发射，其加工精度可达 $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ ，表面粗糙度 $Ra0.0005\ \mu\text{m}$ 以下。

2.1.2 浮动研磨抛光

浮动研磨抛光的加工原理图如图 3 所示（图 3 略）。它利用流体力学原理使抛光器与工件浮离，在抛光器的工件表面做出了若干楔槽，当抛光器高速旋转时，由于油楔的动压作用使工件或抛光器浮起，其间的磨粒就对工件表面进行抛光。浮动抛光能够加工出平面度很高的工件表面，没有端面塌边及变形缺陷。浮动抛光可以用于计算机磁头磁隙面。光学零件及功能陶瓷材料基片的超精密加工，通过选择合适的抛光液和化学添加剂可防止出现晶界差，即使是多晶体材料也能获得表面粗糙度为 $Ra0.002\ \mu\text{m}$ 的表面。使用极软的石墨和溶于水的 LiF 来抛光很硬的蓝宝石 {0001}。其表面粗糙度可达到 $Ra0.00008\ \mu\text{m}$ 。采用浮动研磨抛光，不需使用夹具，端面塌边半径可小至 $0.01\ \mu\text{m}$ 。经过浮动研磨抛光的表面具有良好的结晶特性，同时加工表面没有残余压力。

2.1.3 磁力研磨

磁力研磨是利用磁场作用进行研磨加工的新方法，它能高效、快速地对各种材料、尺寸和结构的零件进行超精密加工，是一种投资少、效率高、用途广、质量好的研磨加工方法。

（1）磁性浮动研磨。它是通过在磁场作用下形成的磁流体（由磁性颗粒、表面活性剂和液相载体如水、油组成）使悬浮其中的非磁性磨料在磁流体的流动和浮动作用下压向旋转的工件进行研磨及抛光，从而提高精整加工的质量和效率。它可以获得 $Ra \leq 0.01\ \mu\text{m}$ 的无变质层加工表面，并能研抛表面形状复杂的工件。

该加工工艺起源于 20 世纪 40 年代的美国，经过不断地对其工艺及设备的拓展和完善，并应用有限元法模拟磁性抛光过程，分析磁流体及磨粒在磁感应下的运动特性，

大大地推动了这项工艺的发展的应用。

(2) 磁性磨料的磁力研磨。其原理图如图 4 所示 (图 4 略)。磁力研磨时, 工件放入由两磁极形成的磁场中, 在工件和磁极的间隙中放入磁性磨料。在磁场力的作用下, 磨料沿磁力线方向整齐排列, 形成一只柔软且具有一定刚性的“磁研磨刷”。当工件在磁场中旋转并作轴向振动时, 工件与磨料发生相对运动, “磨料刷”就对工件表面进行研磨加工。

磁力研磨具有下面特点:

(1) 通过改变磁场的强度可以容易地控制研磨压力;

(2) 由于磁极与工件表面之间有加工间隙 (1~4mm), 因此通过“磨料刷”进行柔性研磨, 不但可用于圆柱和平面研磨, 还可以进行异形表面及自由曲面的研磨;

(3) 在磁极结构一定的情况下, 通过磁感应强度, 即可调节磨削力, 加工过程很容易实现自动化;

(4) 磨料沿加工表面不断滚动和更换位置, 使其具有良好的自钝性;

(5) 磁性材料被约束在磁极之间, 不会污染操作环境;

(6) 加工效率高;

(7) 既可磨削铁磁性材料, 也可磨削非铁磁性材料。

磁力研磨适用于精密零件的研磨、抛光和去毛剂, 如轴承的内外滚道、滑阀、齿轮泵、印刷电路板、模具、表壳、叶片等。它不但可用于以铁和碳素钢、合金钢等磁性材料制造的零件, 也适用于黄铜、不锈钢和钛合金等非磁性金属材料, 以及陶瓷、硅片等非金属材料。

由于磁力研磨具有适应性强、应用范围广等优点, 所以它是一种极有前途的超精密加工方法。今后磁力研磨将会向以下两个方向发展:

(1) 研制开发导磁性更好、强硬度更高的新的磁性磨料;

(2) 利用旋转磁场对形状复杂的零件进行研磨加工。

2.1.4 电解磁力研磨抛光

电解磁力研磨抛光是由电化学加工和磁力研磨两种工艺复合而成。其加工原理图如图 5 所示 (图 5 略)。电流电压的阳极接工件, 阴极接工具, 阴极接欲去除毛刺的工件部位。电解液由泵驱动后经阴极流过阳极工件的毛刺部位到达回流槽。工件以一定的速度旋转, 同时作轴向振动。在垂直于工件轴线及电力线的平面方向上加直流强磁场, 在磁场中填入游离状的磁性磨料, 由磁磨料组成的“磨料刷”快速冲击工件表面, 去除突起的毛刺和实现光整加工。

这种复合研磨加工方法适用于高强度、高硬度和高韧性材料的精密去毛刺和光整加工。其效率为磁场力研磨法的 2 倍，并可提高 2 个等级的工件表面粗糙度，加工后不会产生二次毛刺。

2.2 基于机械——化学作用的超精密研磨方法

机械化学研磨是在微粉粒子的撞击和研磨液的化学作用下产生研磨作用，去除工件表面的微量材料。该方法经济性好、生产率高。不仅可达到很高的表面粗糙度等级，而且加工的几何精度也很高，并在被加工表面几乎不产生变质层，这对微电子功能材料的加工有很重要的应用价值。其工作原理图如图 6 所示（图 6 略）。

研磨盘上浇铸有锡层，圆周方向切槽，用金刚石刀具来削研磨盘端面，使其具有较高的平面并呈镜面。研磨盘与工件轴以 20~200r/min 的转速作高精度旋转，工件固定在工件轴上，工件轴与研磨盘主轴的转动方向相同。在液体动压效应的作用下，使工件以几微米的上浮间隙悬浮在研磨盘上，工件在研磨液的化学作用及微粉粒子的撞击下产生研磨作用。由日本名古屋工业技术研究所生产的 SP46 超精密研磨机就是典型的一台基于机械化学作用的超精密研磨机。该机使用 $0.02\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 微粉粒子加工硅片，表面粗糙度可达到 2nm，残余应力几乎为零。在该机上研磨直径为 100mm，厚度为 30mm 的 BK7 光学玻璃，平面度可达到 $0.031\ \mu\text{m}$ ，表面粗糙度 RMS（均方根偏差）可达到 3.8nm。

由于本研磨法对材料的去除率较低，所以要求被加工件的毛坯本身有一定的精度与表面质量。在研磨前，被加工件的精度应控制在：平面度（2~3） μm 、表面粗糙度 RMS（0.1~0.2） μm 的范围内。否则有可能会造成无法实现研磨的恶果，酿成工件的损坏。

2.3 液面研磨抛光

液面研磨抛光又称水面滑行抛光（Hydroplane Polishing）。液面研磨抛光装置如图 7 所示（图 7 略）。该研磨方法的显著特点是不使用磨料，研抛时工件与抛光盘（水晶平板）之间由流体压力形成间隙，利用具有腐蚀作用液体的运动进行研抛，因此，它是一种化学腐蚀加工方法。加工中使用的腐蚀液为甲醇、乙二醇与溴的混合液。主要用来加工 CaAs、InP 基片表面。

2.4 水合研磨抛光

水合研磨抛光是一种积极利用在工件临界面上生成水合化反应的研磨抛光方法。

其主要特点是不使用磨粒和加工液，而加工装置又与目前使用的抛光机相似，只是在水蒸汽环境中进行加工。为此，要尽量避免使用能与工件产生固相反应的材料抛光盘。图 8 为水合抛光装置（图 8 略）。随着抛光盘的旋转，工件保持架在它上边作往复运动。在水合抛光过程中，两个物体产生相对摩擦，在接触区产生高温高压，工件表面上的原子或分子呈活性化。利用过热水蒸汽分子和水作用其表面，使之在基面上形成水合化层。借助过热水蒸汽（不是游离磨粒）从工件表面上将该水合化层分离、去除，去除厚度为零点几个纳米，所以可获得无划痕、平滑光泽无畸变的洁净面。

水合研磨抛光非常适合于要求表面平滑性好、平面度要求高、结晶无畸变和洁净度高的蓝宝石和硒化锌晶体（用于 CO₂ 激光器的光学元件）的超精密加工。另外，作为亲水材料的玻璃、水晶、MgO、Y₂O₃、MgAl₂O₄ 等，也宜用水合抛光。

2.5 超声研磨抛光

超声研磨抛光是一种非接触超精密研磨方法。其加工原理如图 9 所示（图 9 略）。超声振动工具头的端面与工件表面保持一固定的间隙 δ ，并在其间充以微细磨粒工作液，当超声振动工具以一定的频率振动时，带动微细磨粒冲击工件表面，从而对工件表面进行研磨。

超声研磨时，大量的磨粒以与超声振动相同的频率、脉冲式的冲击被加工表面，除去或改造工件表面原有的变质层，并在其下面构成新的变质层（即表面加工层）。如果振幅值、研磨压力、工具转速等工艺参数选择合理，则可使新生成的变质层更薄、更均匀，从而获得几乎无损伤的表面。

超声研磨应用范围广，可加工各种硬脆材料，可以加工平面，也可加工复杂曲面。目前用超声研磨可在 3mm 厚的玻璃上钻出直径为 0.1~1.0mm 的小孔。同时其单位时间内的切除率较高，匀需复杂的技术，所需设备也较简单，故可获得较高的技术经济效果。在许多场合，如在玻璃上钻小孔或加工超薄工件时，超声研磨是一种值得选择的工艺或是唯一能够选择的工艺。

2.6 离子束抛光

与传统的机械抛光方法不同，离子束抛光采用被充电的高能原子或离子（离子的质量较原子质量更大，因而可获得更大的动能），在真空状态下由离子枪射向工件，当带有很高能量的离子撞击工件表面时，在撞击点上材料以原子量级实现去除。材料的去除量取决于离子束在该点的溅射时间。由于离子束抛光是在原子量级上实现材料的去除，因而材料的去除率较低，为此在采用该方法前，工件要经过传统方法的预抛光，

在基本达到精度要求后再采用离子束抛光对工件表面面形（如球面、非球面、非对称的自由曲面等）实现很高精度的修正。虽然离子束抛光制造所需要的设备投资较大，运行成本较高，但对于某些具有特殊高精度要求的光学大型镜面还是必须采用离子束抛光方法。

与传统的光学加工方法相比，离子束抛光方法具有以下几个优点：

- （1）可在原子量级上实现材料确定性的超精密加工；
- （2）通过一次加工过程即可实现对面形误差的完全修正；
- （3）对外界环境的振动、温度变化以及装卡稳定性不敏感；
- （4）由于离子束抛光需在真空中进行，故可将抛光与镀膜过程在同一真空罐中进行；
- （5）工件不会出现塌、翘边的边缘效应。

3 结束语

上述几种超精密研磨抛光方法与传统的研磨方法有本质的区别。其加工原理各不相同，加工特点也均不相同，为此在选用上述超精密研磨方法时，应根据工件材料类型、加工要求及生产效率等情况来慎重选用。这样才能使工件获得良好的加工精度及表面质量，并取得较高的技术经济效果。

今后，随着科技的发展及尖端领域的需要，必将会出现更新、更多的超精密研磨抛光方法。采用复合研磨抛光加工及软质磨料（甚至比工件还要软）加工是未来超精密研磨抛光加工的发展动向。

【摘自《航空精密制造技术》2005年第2期】