

表面光整加工技术及其应用（上）

中国航空精密机械研究所 （北京 100076） 荣烈润

经过切削加工或非切削加工的机械零件，总会在零件加工表面上留下表面凹凸不平、棱边残缺、飞边毛刺、磕碰划伤、微观裂纹等不同程度的粗糙表面及各种表面缺陷。零件的表面质量对零件的使用性能、寿命和可靠性均有很大的影响，与产品整机的性能及寿命也有非常大的关系。随着科学技术和现代生产技术水平的进步和提高，许多产品正在向着大型化（或微型化）、高速高效化、精密化（或超精密化）、专用化（或柔性化）、集成化、模块化、自动化、智能化、数字化、网络化及绿色化等方向发展，对零件的表面质量（包括表面几何特征、表面物理力学性能等）也提出了越来越高的要求。作为提高零件表面质量的表面光整加工技术已经成为改善零件和产品的使用性能、提高可靠性、延长使用寿命的重要途径之一。

例如，对LL480QB型柴油机的17种摩擦副零件，采用表面光整加工方法进行光整加工后，零件

很大程度上决定了数控机床的性能。数控机床的最高移动速度、跟踪速度、定位精度等重要的指标都取决于伺服系统的动态和静态特性。

另外，航空航天、发电设备等产品外形曲线的复杂化，致使制造技术不断升级，不同加工工序及工艺的复合加工促进了生产效率的不断提高，制造过程自动化程度不断提高。未来机床不仅能完成通常的加工功能，还具备自动上下工件、自动测量、自动诊断、自动误差补偿、进线和联网等功能，形成包括工业机器人、物流系统组成的数字化、智能化制造系统，上述功能的实现都需要依靠全数字高档数控装置。MW（全文完）

（收稿日期：20120510）

的表面质量获得了改善，通过整机性能测试对比，经过全面光整加工后的摩擦副零件的整机性能得到提高，按磨合指标要求，整机出厂磨合时间减少近50%，试车燃油消耗率减少 $3\text{g/kw}\cdot\text{h} \sim 4\text{g/kw}\cdot\text{h}$ ，噪声降低1dB。

一、表面光整加工技术概念

表面光整加工技术是指在机械工中旨在提高零件表面质量的各种加工方法、加工技术。

目前，在保证零件表面质量的多种加工方法中，有些是着重于改善零件表面的几何特征（为降低表面粗糙度值和去除毛刺、划痕）；有些是着重于改善零件表面的物理力学性能（为提高表面硬度和改变应力状态）；还有些加工方法，在改善表面几何特征和改善物理力学性能两个方面，都能同时赢得良好的效果。

近年来，零件表面加工技术发展很快，学科体系逐渐形成，其中常被作为终加工工序的表面光整加工和去毛刺技术得到迅速发展。它是一门集机械加工、材料学、物理学、化学、电磁学、流体力学等多学科为一体的新型边缘学科，日益受到人们的重视。

二、表面光整加工技术的主要特点

无论是传统的光整加工方法，还是近年来出现的新工艺、新技术，都具有以下主要特点：

（1）光整加工的加工余量很小，原则上只是前道工序公差带宽度的几分之一。一般只能改善表面质量，不会影响原有的加工精度。反之余量太大，不仅生产效率低，有时还会导致工件的原有精度下降。

(2) 用于光整加工的设备, 不需要很精确的成形运动, 但工件与磨具之间的相对运动应尽量复杂。因为光整加工只要保证磨具(细粒度的磨料)与工件加工表面能具有较多的随机性接触(微量磨削过程), 就能使表面误差逐步均化到最终消除, 从而获得很高的表面质量。

(3) 在光整加工时, 由于磨具相对于工件的定位基准没有确定的位置, 所以一般不能修正加工表面的形状和位置误差, 其形位精度须靠上道工序保证。

三、表面光整加工技术的分类

目前光整加工技术的工艺方法很多, 有按光整加工的主要功能分类的; 有按光整加工的机理分类的; 有按光整加工时所需能量提供方法分类的。约有30多种。如图1所示。

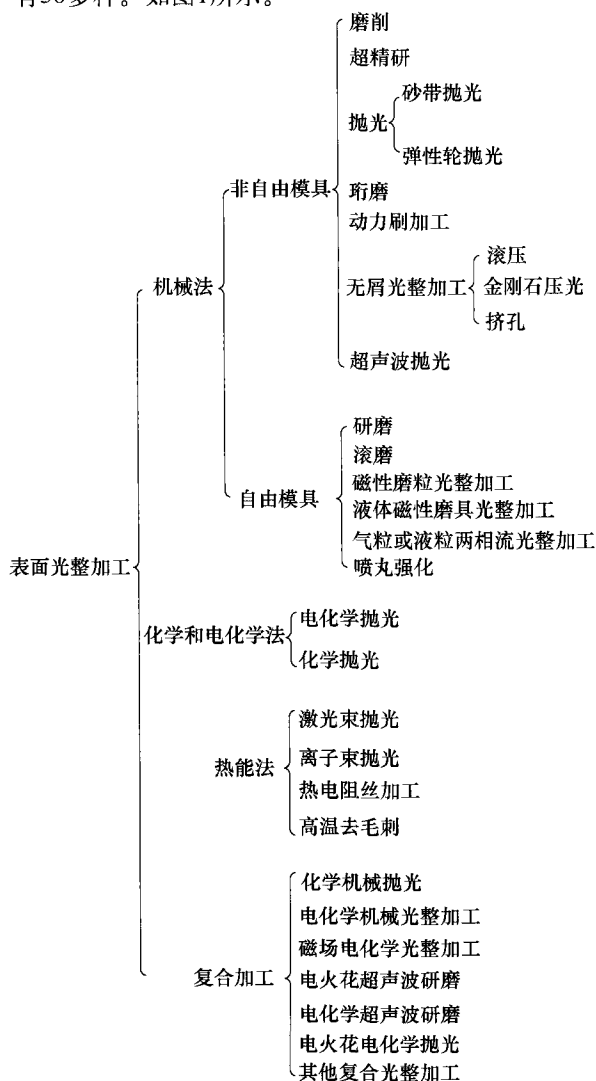


图1 按加工时所需能量划分的表面光整加工方法

光整加工方法种类繁多, 生产应用也很广泛, 但没有一种光整加工方法可以替代所有的光整加工方法。随着科学技术的发展及制造水平的不断提高, 光整加工技术在不断地完善、发展, 不断地推陈出新。面对诸多复杂的零件表面质量问题, 面对各种各样的光整加工方法, 正确地选用确实可行、行之有效的光整加工方法, 是首当解决的问题。

四、表面光整加工技术发展现状及趋势

1. 发展简史及现状

对于毛刺技术(或毛刺工程)重要性的真正认识, 始于美国Bendix公司的研究人员, 他们在1974年的SME(美国制造工程师学会)成立毛刺技术分会会议上发言时, 首先提出了“毛刺技术”这个技术术语, 一直沿用至今。从而使精密零件表面光整加工去毛刺技术受到了多个工业发达国家的普遍重视。后来便于技术上的交流, 将这个分会正式改名为毛刺、棱边和光整技术分会(Burr Edge & Surface Finishing Technique, BEST)。1975年ISO(国际标准化组织)举办了第一届关于去毛刺、飞边的国际学术会议。之后, 美国、日本、西德、苏联等国先后设立了专门研究机构及产品开发部门, 进行了大量富有开拓性的研究工件, 开发了许多实用的光整加工及去毛刺工艺方法及相应设备, 尤其是于1997年成立的国际BEST组织, 在世界范围内对这一战略性技术进行了积极的推广和应用。之后, CIRP(国际生产工程协会)也在其学术年会上, 相继发表了有关去毛刺及表面光整加工方面的论文。这项技术于20世纪90年代开始在机械工业和电子工业中占据了重要的地位, 已得到各国的普遍重视。

我国于20世纪90年代初, 才先后成立了“中国仪表工艺学会光整技术研究会”和“中国机械工程学会光整技术研究会”。光整加工及去毛刺技术的发展起步较晚。近几年, 液压行业、轴承行业、纺机行业、内燃机行业等诸多行业推广光整技术的研讨会已举行多次。目前, 我国已经形成每两年举办一次国际光整加工技术及表面工程学术会议的机制, 很多新理论、新工艺、新技术、新装备层出不穷, 整个光整加工技术的研究及应用呈现了加速发展的良好态势。

目前,虽然传统光整加工技术(固结磨料和游离磨料)在制造业中已经获得了广泛应用。但传统光整加工技术在加工异型表面、自由曲面类零件、型腔内表面时有一定的困难,甚至无法加工。为了解决传统光整加工在应用中的局限性,各国研究人员在致力于研究进一步提高传统光整加工表面质量、加工精度及生产率的同时,也开始研究非传统光整加工技术及复合光整加工技术。目前研究人员和企业已取得了很多研究成果,并且已经在化学抛光、电化学抛光、电化学机械复合光整加工、磁性磨粒光整加工、超声波光整加工、表面滚磨光整加工等一些领域中获得了成功的应用,取得了较好的效果。

2. 新的要求

随着机械制造向更高层次的发展,对光整加工技术也提出了新的要求,其需求主要有以下几个方面:

(1) 要求解决光整加工中一直未能很好解决的对大中型零件,复杂型面、内部型腔及细小管内壁的优质高效光整加工难题。

(2) 要求解决难加工材料、脆性材料(为陶瓷材料等)以光整加工难题。

(3) 要求光整加工技术立竿见影向更精密层次发展,实现从微米、亚微米光整向纳米级光整加工的发展。另外,要使光整加工后的工件表面形貌更加合理,物理力学性能更加优良,加工过程更加方便经济。

3. 发展趋势

(1) 继续加强对光整加工机理作系统深入的研究和探索。

(2) 为何充分发挥各种光整加工方法的优势,扬长避短,实现大中型零件、复杂型面及难加工材料的高质量、高效率的光整加工,已经成为各国研究者努力探求的目标。

(3) 在继续致力于研究进一步提高传统光整加工表面质量、加工精度及生产率的同时,各国研究者也在积极探求新型的光整技术、光整工艺,并将更多精力和时间投向非传统光整加工技术和复合光整加工技术的研究。近些年来,已提出了很多新的加工理论与工艺,为弹性发射加工、液体动力抛

光、表面滚磨光整加工、两相流光整加工、电化学机械光整加工、磁场电化学光整加工、旋振复合式表面滚磨光整加工等等。

(4) 随着光整加工技术在生产中的推广应用,对光整加工自动化提出了新的要求。近年来,工业发达国家都投入了大量的人力和物力进行开发研究,现已研制出多种不同形式的光整加工系统及自动化装置,为数控光整加工系统及加工设备,光整加工机器人、柔性光整加工单元和柔性光整加工生产线等。这些光整加工自动化设备及加工系统已在汽车、拖拉机、坦克及飞机制造等行业获得应用。

五、新型光整加工技术及其应用简介

近年来,表面光整加工工艺及去毛刺技术得到迅速发展,涌现出许多新工艺、新技术。这些工艺方法不仅能有效地降低零件表面粗糙度值,改善表面应力状态,而且还可以消除毛刺,棱边倒圆,提高了零件表面质量。

1. 化学机械抛光

化学机械抛光(Chemical mechanical polishing CMP)指化学作用和机械作用复合的加工方法。图2所示为硅晶片的CMP设备示意图。化学机械抛光时,旋转的工件以一定的压力压在旋转的抛光垫上,而由亚微米或纳米磨粒化学溶液组成的抛光液在工件与抛光垫之间流动,在工件、抛光液及抛光垫之间产生化学反应,形成化学反应膜,然后由磨粒及抛光垫的机械摩擦作用去除在工件表面形成的化学反应膜,即加工过程在化学成膜和机械去膜的交替过程中进行,从工件表面去除极薄的一层材料,因而可以获得超光滑,无损伤、高平整度的工件表面。

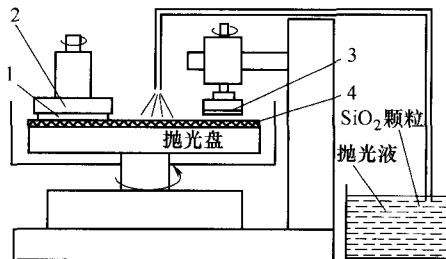


图2 硅晶片化学机械抛光设备示意图

1.晶片 2.晶片夹持器 3.衬垫修整器 4.抛光衬垫

20世纪60年代以前, 半导体基片抛光还大都是采用机械抛光技术(此技术常会在工件表面留下很大的加工变质层), 1990年, IBM公司首先提出了CMP全局平坦化技术, 并于1991年成功应用于64MB的DRAM生产中。之后, CMP技术获得迅速发展。目前CMP是超大规模集成电路制造过程中应用最广的平坦化技术。CMP技术不但应用于单晶硅基片的抛光, 而且主要用于半导体工业中的层间介质、绝缘体、金属导体(Al、Au、Cu)、多晶硅、硅氧化物及氮化物等的平坦化。可用于半导体器件和集成电路衬底、硬盘存储器的薄膜硬盘和磁头、微电子机械系统(MEMS)元件、机械模具、精密阀门等加工领域。

随着计算机、通信及网络技术的高速发展, 作为其基础的IC的性能要求越来越高, IC不断向高速化、高集成化、高密度化及高性能化的方向发展, 导致其尺寸不断缩小、金属互联结构布线层数不断增加, 这促使人们不断去改进传统CMP技术, 探索适应下一代IC制造新的平坦化技术。

新的平坦化技术, 关键是开发新型的抛光液和各种系统的抛光垫。国外已经开始研发使用不含磨粒抛光液的CMP平坦化技术, 以及研究应用多孔硬抛光垫及固结磨料抛光垫的CMP平坦化技术等。在CMP设备方面, 正在由单头、双头抛光机向多头自动化抛光机发展, 结构逐步由旋转运动结构向轨道抛光方法和线性抛光技术发展。

CMP技术是当前发展最快的超精密的复合加工技术之一。可有效地加工半导体、陶瓷、光学玻璃、单晶蓝宝石和金属等材料。

2. 两相螺旋流内孔表面光整加工方法

珩磨、研磨和滚压等传统的光整加工方法, 因其工艺特点, 使用时都有一定的局限性, 对内腔沟槽、交叉孔、非正圆表面均难以加工。为此, 近年来, 受“龙卷风”、离心泵和旋风分离器等的启发, 研究人员研发了一种“两相螺旋流内孔表面光整加工新工艺, 俗称为“柔性砂轮”, 其工作原理为: 具有一定的压力和流量的流体, 通过特定的螺旋发生装置, 形成具有一定能量的螺旋流, 以其为载体, 带动预先装入工件内孔的自由态磨粒作螺旋运动, 具有一定速度的磨粒在离心力的作用下压向工件内孔表面, 对其产生正压力作用。通过磨粒与

工件之间的相对运动及作用力, 使磨粒对工件表面产生碰撞、滚压及刻划的微量磨削作用, 从而实现对内孔的去光刺和表面光整加工, 改善和提高工件的表面完整性。

两相螺旋流内孔表面光整加工方法的主要特点为:

(1) 由于在内孔表面光整加工时, 磨粒具有充足的能量, 故加工后的表面粗糙度值Ra值可降低(1~2)级, 加工效率高。

(2) 此法属于微量加工, 去除厚度在微米级, 可以很好地保持工件原有的加工精度。

(3) 该工艺对管类零件的长径比要求不很严格, 对大多数有特殊要求的直管类零件均可加工。

(4) 加工时, 由于工件该方向受力均匀, 故对薄壁零件也可加工。

(5) 适合于交叉孔、台阶孔、盲孔等异形内孔表面的光整加工。

(6) 该工艺不仅可用于中小尺寸精密孔表面去毛刺和光整加工(如阀体、油缸、枪管、炮筒等); 也可用于大尺寸孔表面的清理及光整加工(如输油管道、输气管道、化工管道等)。**MW**

(待续) (收稿日期: 20120112)

国家科技部出任中国制博会主办单位

2012年5月, 中华人民共和国科学技术部正式出任中国制博会主办单位。这是继2011年6月份工信部增设为制博会主办单位之后的有一大喜讯, 这对制博会的声誉和国际影响力、促进国际先进企业的交流和合作、提升参展企业的科技含量、全面展示装备制造业制造能力及推动其长远发展具有重要作用。中华人民共和国科学技术部是国务院组成机构, 其主要工作是研究提出科技发展的宏观战略和科技促进经济发展的方针、政策、法规; 研究科技促进经济社会发展的重大问题; 研究确定科技发展的重大布局和优先领域; 推动国家科技创新体系建设, 提高国家科技创新能力; 研究提出科技体制改革的方针、政策和措施; 推动建立适应社会主义市场经济和科技自身发展规律的科技创新体制; 指导部门、地方科技体制改革。

(本刊讯)