

# 高效、极致——精密超精密加工技术的发展与展望

## High Efficient, Perfection —— Development Trend of Ultra-Precision Machining Technology

北京航空精密机械研究所精密制造技术航空科技重点实验室 杨辉



杨辉

博士, 研究员, 中航工业集团公司精密超精密及微细加工技术首席专家。研究方向为精密超精密基础元部件及加工检测设备设计制造技术、精密超精密加工工艺技术等。

### 精密超精密加工技术的发展历史

精密超精密加工技术的起源从一定意义上可以上溯到原始社会: 当原始人类学会了制作具有一定形状且锋利的石器工具时, 可以认为出现了最原始的手工研磨加工工艺; 到了青铜器时代后人类制作了

当前精密超精密加工技术在不断研究新理论、新工艺以及新方法的同时正向着高效、极致等方向发展, 并贯穿零部件整个制造过程或整个产品的研制过程, 向精密超精密制造技术发展。

各类表面光滑的铜镜, 这种制作方式就是研磨及抛光工艺。但是到了近代才出现了真正意义上的精密加工, 最典型的例子就是精密镗床的发明。1769年瓦特取得实用蒸汽机专利后, 汽缸加工精度的高低就成了蒸汽机能否提高效率并得到实际应用的关键问题。1774年英国人威尔金森发明了炮筒镗床, 可用于加工瓦特蒸汽机的汽缸体。1776年他又制造了一台更为精确的汽缸镗床, 加工直径为75inch (1inch=2.54cm)的汽缸, 误差还不到一个硬币的厚度。加工精度的提高促使了蒸汽机的大规模应用, 从而推动了第一次工业革命的发展。

20世纪60年代初期, 随着航天、宇航的发展, 精密超精密加工技术首先在美国被提出, 并由于得到了政府和军方的财政支持而迅速发展。到

了20世纪70年代, 日本也成立了超精密加工技术委员会并制定了相应发展规划, 将该技术列入高新技术产业, 经过多年的发展, 使得日本在民用光学、电子及信息产品等产业处于世界领先地位。

近年来, 美国开始实施了“微米和纳米级技术”国家关键技术计划, 国防部成立了特别委员会, 统一协调研究工作。美国目前至少有30家公司研制和生产各类超精密加工机床, 如国家劳伦斯利佛摩尔实验室(LLNL)、摩尔(Moore)公司等在国际超精密加工技术领域久负盛名。同时利用这些超精密加工设备进行了陶瓷、硬质合金、玻璃和塑料等材料不同形状和种类零件的超精密加工, 应用于航空、航天、半导体、能源、医疗器械等行业。日本现有20多家超精密加工机床研制公司, 重点开发民

用产品所需的超精密加工设备,并成批生产了多品种商品化的超精密加工机床,日本在相机、电视、复印机、投影仪等民用光学行业的快速发展与超精密加工技术有着直接的关系。英国从60年代起开始研究超精密加工技术,现已成立了国家纳米技术战略委员会,正在执行国家纳米技术研究计划,德国和瑞士也以生产精密加工设备闻名于世。1992年后,欧洲实施了一系列的联合研究与发展计划,加强和推动了精密超精密加工技术的发展。

国内真正系统地提出超精密加工技术的概念是从20世纪80年代~90年代初,由于航空、航天等军工行业的发展对零部件的加工精度和表面质量都提出了更高的要求,这些军工行业投入了资金支持行业内的研究所和高校开始进行超精密加工技术基础研究。由于当时超精密加工技术属于军用技术,无论从设备还是工艺等方面,国外都实施了技术封锁,所以国内超精密加工技术的开展基本都是从超精密加工设备的研究开始。由于组成超精密加工设备的基础是超精密元部件,包括空气静压主轴及导轨、液体静压主轴及导轨等,所以各单位也正是以超精密基础元部件及超精密切削加工用的天然金刚石刀具等为突破口,并很快就取得了一些进展。哈尔滨工业大学、北京航空精密机械研究所等单位陆续研制了超精密主轴及导轨等元部件,并进行了天然金刚石超精密切削刀具刃磨机理及工艺研究,同时陆续搭建了一些结构功能简单的超精密车床、超精密镗床等超精密加工设备,开始进行超精密切削工艺实验。

非球面曲面超精密加工设备的研制成功是国内超精密加工技术发展的里程碑,非球面光学零件由于具有独特的光学特性在航空、航天、兵器以及民用光学等行业开始得到应用,从而简化了产品结构并提高了产

品的性能。当时加工设备只有美国、日本及西欧等少数国家能够生产,国内引进受到严格限制而且价格昂贵,国家从“九五”开始投入了人力物力支持研发超精密加工设备。到“九五”末期,北京航空精密机械研究所、哈尔滨工业大学、北京兴华机械厂、国防科技大学等单位陆续研制成功代表当时超精密加工最高技术水平的非球面超精密切削加工设备,彻底打破了国外的技术封锁。之后其他各类超精密加工设备,如超精密磨削设备、小计算机数控磨头抛光设备、磁流变抛光设备、离子束抛光设备、大口径非球面超精密加工设备(如图1所示)、自由曲面多轴超精密加工设备、压印模辊超精密加工设备等也陆续研制成功,缩小了超精密加工技术国内外的差距。同时由于有了超精密加工设备的支撑,在超精密加工工艺方面也有了很大进展,如ELID超精密镜面磨削工艺、磁流变抛光工艺、大径光学透镜及反射镜超精密研抛及测量工艺、自由曲面的超精密加工及测量工艺、光学薄膜模辊超精密加工工艺,超精密加工技术的应用领域也从军工行业转向了民用行业。

超精密加工技术的发展随着时代的进步其加工精度也不断提高,目前已经进入到纳米制造阶段。纳米级制造技术是目前超精密加工技术的巅峰,其研究需要具有雄厚的技术基础和物质基础条件,美国、日本及欧洲一些国家以及我国都在进行一些研究项目,包括聚焦电子束曝光、原子力显微镜纳米加工技术等,这些加工工艺可以实现分子或原子级的移动,从而可以在硅、砷化镓等电子材料以及石英、陶瓷、金属、非金属材料上加工出纳米级的线条和图形,最终形成所需的纳米级结构,为微电子和微机电系统的发展提供技术支持。

## 精密超精密加工技术的作用

### 1 精密超精密加工技术可促进现代基础科学和应用基础科学的发展

量子力学和相对论是近代物理学和其他基础科学的核心,20世纪30年代已经建立,但是其中一些理论还未得到实验验证,例如爱因斯坦的广义相对论中的2个预言,即重力场弯曲效应和惯性系拖曳效应,这些理论在天文学、空间探测等方面有着重要的指导意义。例如航天器围

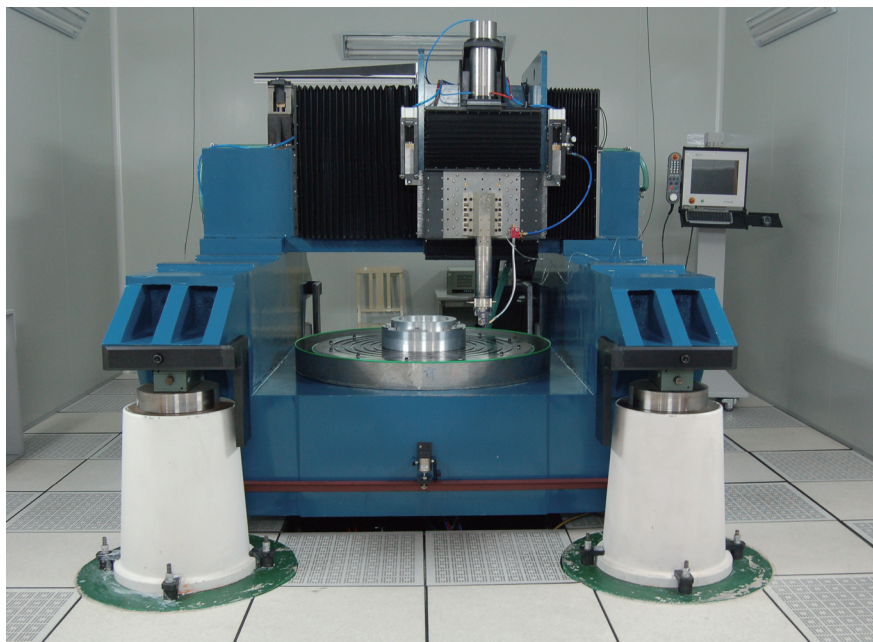


图1 国内第一台大型( $\phi 1000\text{mm}$ )光学元件金刚石超精密切削加工设备(LODTM)

绕地球旋转,在牛顿的宇宙模型中指针会指向同一方向,而在爱因斯坦的模型中,由于地球对周围时空的扭曲和拖拽,陀螺仪指针会倾斜一个非常小的角度(一年内指针仅移动6000mas),这就是所谓的重力场弯曲效应和惯性系拖曳效应,这两种现象十分微弱,通过实验室验证是不可想象的。

美国航空航天局(NASA)为了验证爱因斯坦广义相对论的上述2项预言从1963年开始计划,但直到2004年才发射了一个利用高精度陀螺仪的测量装置——引力探测器,用于检测地球重力对周围时空影响。其中陀螺仪的核心部件——石英转子( $\phi 38.1\text{mm}$ )的真球度达到了7.6nm,若将该转子放大到地球的尺寸,要求地球表面波峰波谷误差仅为2.4m,如此高的加工精度可以说将超精密加工技术发挥到了极限,最终陀螺精度达到了0.001角秒/年。

20世纪80年代以前,太赫兹(THz)波段(介于微波与红外之间)的研究结果和数据非常少,主要是受到有效太赫兹产生源和灵敏探测器的限制。随着80年代一系列新技术、新材料、新工艺的发展,使得太赫兹技术得以迅速发展。近年来由于

太赫兹的独特性能将给宽带通信、雷达、电子对抗、电磁武器、天文学、医学成像、无损检测、安全检查等领域带来了深远的影响,太赫兹基础及应用基础技术已经逐渐成为研究热点。

太赫兹技术在航空领域的重要应用是太赫兹雷达可用于隐身飞行器探测,其中束控元件是太赫兹探测系统的重要功能部件,其透镜主要采用硅基远红外透射材料,反射元件面形有抛物面、椭球面、离轴非球面以及赋形曲面等,采用铝等金属基材料。我国正研的主反射元件尺寸已有 $\phi 300\text{mm}$ 、 $\phi 800\text{mm}$ 、 $\phi 1000\text{mm}$ 等,面形精度要求已要求达微米级,表面质量为镜面,并且要求零件精度质量具有良好的稳定性。我国中期发展的太赫兹系统拟采用 $\phi 4\sim 5\text{m}$ 的主镜,远期主镜直径将达30m或更大,太赫兹系统束控主反射元件面形也将采用主动控制的拼接式平面、离轴非球面等形状。基于上述要求,需要大型单点金刚石超精密车削设备、复杂曲面超精密加工工艺技术、大型复杂曲面的高精度三坐标测量技术等支撑。

## 2 精密超精密加工技术是现代高新技术产业发展的基础

国家目前非常重视交通、能源、

信息、生物医药等高新技术产业的发展,但是目前这些产业的核心技术国内还没有掌握,关键设备或零部件仍然依赖进口。如高性能轴承是飞机发动机、高铁、风电等产品的关键,但由于目前国内材料、工艺等方面的原因,其使用寿命远远不能满足要求,其他一些承受高频载荷的部件同样面临这些问题。近年国内开始研究的抗疲劳制造技术则是以被加工件的抗疲劳强度及疲劳寿命为判据,其中的核心技术之一是精密超精密加工工艺,可提高表面质量、改善表面应力状态,从而提高零件的疲劳寿命,这不仅要求具有超精密加工设备,而且还需研制材料及零部件的疲劳寿命精密测试设备(如图2所示)。

新能源产业(如太阳能)国内虽然发展很快,但核心技术还是掌握在国外,如硅片切割、研磨、抛光、刻划设备,高倍聚光菲涅尔透镜模具超精密加工设备等等与国外还存在较大差距。信息产业的发展推动了芯片、存储等发展,随着存储密度越来越大,对磁盘的表面粗糙度以及相应的读写设备的悬浮高度及磁头的上下跳动量的要求大大提高,目前国外已经把磁头、磁盘的相对间隙最高控



图2 滚动接触疲劳寿命测试设备

制在 1nm 左右。在医疗器械行业,超精密加工技术也起着很大的作用,人造关节采用钛合金或其他贵金属材料,这些高精度零件的表面处理对清洁度、光整度和表面粗糙度具有极高要求,需要进行超精密研抛,形状要根据个人的身体结构定制,国外价格昂贵,而国内无论从使用寿命和安全性等方面存在较大差距。其他如微型内窥镜中的微小透镜及器件、心脏搭桥及血管扩张器、医用微注射头阵列等国内现在还无法生产。

### 3 精密超精密加工技术是现代高技术战争的重要技术支撑

超精密加工技术对国防武器装备的发展具有重大影响,掌握超精密加工技术并具备相应的生产能力是国防工业涉入现代国防科技和武器装备尖端技术领域的必要手段,20世纪90年代初,美国就将其列为21项美国国防关键技术之一。

超精密加工技术的发展对飞机、导弹等惯性器件的发展做出了突出贡献。美国1962年就研制成功了激光陀螺,但因未突破硬脆材料的陀螺腔体和反射镜的超精密加工技术,使激光陀螺在飞机上的应用整整延迟了20年,超精密车削、磨削、研磨以及离子束抛光等工艺的相继突破才使激光陀螺投入了批生产,并将陀螺性能指标提高了2个数量级。半球谐振陀螺仪中半球谐振子采用超精密振动切削工艺达到了精度和性能指标。激光加工和离子刻蚀等超精密加工技术是制造硅微型惯性传感器的重要工艺,这将对飞机和导弹惯性系统的小型化起重要作用。采用超精密铣削工艺及超精密研抛工艺提高了惯性传感器中挠性件的精度和尺寸稳定性。此外,飞控系统液压零件采用超精密磨削及研磨抛光、超精密清洗工艺,对提高飞机的可靠性、可维修性和寿命起到了至关重要的作用。

发动机喷嘴零件(如旋流槽、微

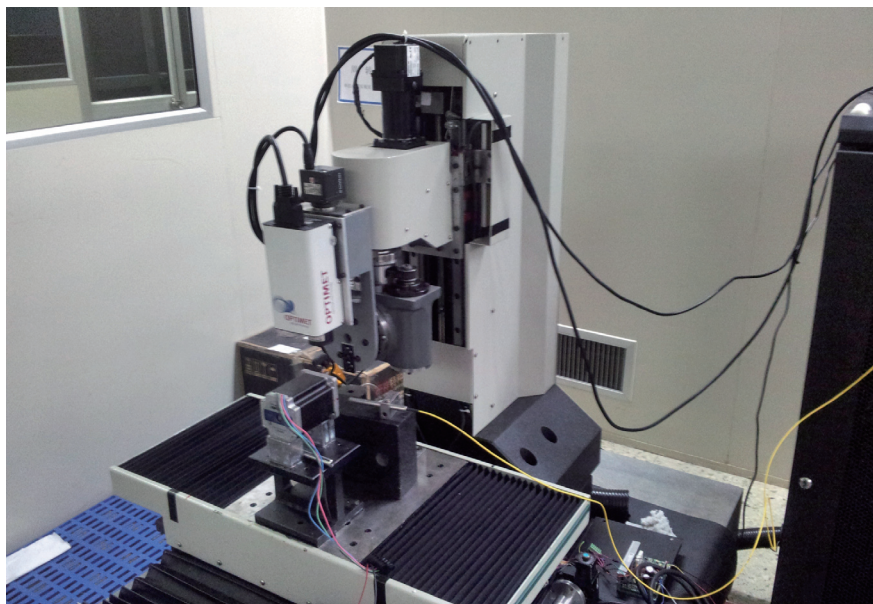


图3 发动机零部件五轴非接触精密测量设备

小孔等特征)的精密加工与检测技术、发动机叶片型面及进排气边的精密加工与检测技术、整体叶盘的精密加工与检测技术等发展为航空发动机零部件的加工与检测提供了可靠保证,促进了航空发动机性能的提升。图3为发动机零部件专用五轴非接触扫描精密测量机。

超精密加工技术使导弹关键元器件的精度和质量产生了飞跃,进而大大提高了导弹的命中率。例如导弹头罩形状由球形向适应空气动力学的复杂形状发展,材料由红外材料向蓝宝石乃至金刚石发展,这也对超精密加工设备和超精密加工工艺提出了新的要求。

### 4 精密超精密加工技术是衡量一个国家制造水平高低的重要标志

制造技术不断追求的目标是质量和效率,其中质量就是精度和性能,也就是超精密加工技术水平的评价指标。前面提到美国、日本、德国、瑞士等国家的精密超精密加工技术具有很高的水平,同时这些国家的制造业水平在全球处于绝对领先地位,而我国虽然近年来由于国家和政府的重视及人力物力的投入,制造业已经有了长足的进步,但是目前我国还

只能称作制造大国,为了向制造强国转变,必须提高精密超精密加工技术的水平。

超精密加工及纳米制造技术体现了一个国家制造业的综合实力。纳米机械加工由于具有效率高、可靠性好、成本低等特点,被认为是最有发展潜力的纳米精度制造方法之一,但由于材料去除是在纳米尺度,传统的加工理论不再完全适用,发展受到了一定的限制。近年来我国科技工作者经过不断努力已经在该领域取得了长足的进步。2013年,世界制造领域的最高学术组织——国际生产工程科学院(CIRP)公布了于2012年8月开展的历时一年的国际精密制造技术对比结果,其微工程工作委员会对通过初选的世界各地11个研究小组提出了具体的对比样件及指标,各研究小组完成指定的样件加工后隐去样件来源信息,由德国物理技术研究院进行测量和评估,主要内容包括加工精度、表面质量、微小尺度、复杂形状等,最终仅有2个研究小组加工试件满足全部5项评价指标,我国天津大学的纳米制造技术研究小组是其中之一,这在一定程度上也反映了我国近年来在这方面的进步。

## 精密超精密加工技术发展趋势

### 1 超精密加工技术基础理论和实验还需进一步不断发展

所谓超精密加工技术基础理论,是指在了解并掌握超精密加工过程的基本规律和现象的描述后才能驾驭这一过程,取得预期结果。例如上世纪 90 年代初,日本学者用金刚石车刀在 LLNL 的 DTM3 上加工出最薄的连续切屑的照片,当时认为达到了 1nm 的切削厚度,已成为世界最高水平,并至今无人突破(如图 4)。那么超精密切削极限尺度是多少、材料此时是如何去除的,此外超精密加工工艺系统在力、热、电、磁、气等多物理量/场复杂耦合下的作用机理是什么、此时系统的动态特性、动态精度及稳定性如何保证等都需要得到新理论的支持。

随着计算机技术的发展,分子动力学仿真技术从 20 世纪 90 年代开始在物理、化学、材料学、摩擦学等领域得到了很好的应用,美国、日本等国首先应用该技术研究纳米级机械加工过程,国内从 21 世纪初在一些高校开始应用分子动力学仿真技术对纳米切削及磨削过程进行研究,可描述原子尺寸、瞬态的切削过程,在一定程度上反映了材料的微观去除

机理,但这一切还有待于实验验证。

### 2 被加工材料和工艺方法也在不断扩展

钛合金是航空最常用的材料之一,氢作为有害杂质元素对钛合金的使用性能有极其不利的影 响,如会引起钛合金氢脆、应力腐蚀及延迟断裂等,但是近年来研究表明通过合理有效地控制渗氢、相变及除氢等过程,获得钛合金组织结构的变化,从而可以改善其加工性能,提高加工表面质量和效率。同样通常认为黑色金属是无法利用天然金刚石进行超精密切削加工的,多年来也一直在进行各种工艺研究,如利用低温流体(液氮或二氧化碳)冷却切削区进行低温冷却车削、采用超声振动切削黑色金属、采用金刚石涂层刀具等,采用离子渗氮和气体渗氮工艺对模具钢进行处理,但上述方法到目前为止还无法工程化应用。近年来通过离子注入辅助方式改变被加工材料表层的可加工性能,实现硅等硬脆材料复杂形状的高效超精密切削。

抗疲劳制造技术的发展为超精密加工技术提出了新的发展方向,超硬材料的精密加工工艺要求控制表层及亚表层的损伤及组织结构、应力状态等参数,如航空发动机轴承材料 M50NiL 表面处理后硬度超过了 HRC70。随着单晶涡轮叶盘和单晶

涡轮叶片在航空发动机上的应用,要求被加工材料没有重融层和变质层,从而对精密加工工艺提出了新要求。随着导弹马赫数的增加,要求头罩材料的抗耐磨性提高,已从红外材料向蓝宝石材料头罩乃至金刚石材料发展,形状也从球形向非球面乃至自由曲面发展,对超精密加工设备、工艺及检测技术提出了新的要求。

### 3 微纳结构功能表面的超精密加工技术

微结构功能表面具有特定的拓扑形状,结构尺寸一般为 10~100 $\mu\text{m}$ ,面形精度小于 0.1 $\mu\text{m}$ ,其表面微结构具有纹理结构规则、高深宽比、几何特性确定等特点,如凹槽阵列、微透镜阵列、金字塔阵列结构等,这些表面微结构使得元件具有某些特定的功能,可以传递材料的物理、化学性能等,如粘附性、摩擦性、润滑性、耐磨损性,或者具备特定的光学性能等。例如在航空、航天飞行器宏观表面加工出微纳结构形成功能性表面,不仅可以减小飞行器的风阻、摩阻,减小摩擦,还可以避免结冰层形成,提高空气动力学和热力学功能,从而达到增速、增程、降噪等目的,同时表面特定的微结构特征还能起到隐身功能,增强突防能力。

在民用方面最典型的例子是游泳运动员的泳衣表面增加了一些微结构,俗称鲨鱼皮泳衣,结果使运动员的成绩有了大幅度的提高,使国际泳联不得不禁止使用这种高科技的泳衣。此外微结构功能表面在光学系统、显示设备、聚光光伏产业、交通标志标牌、照明等领域被广泛应用,如 LCD 显示器的背光模组的各种光学膜片,背光模组关键件—导光板、扩散板、增光膜等,聚光光伏太阳能 CPV 系统的菲涅尔透镜,道路标示用微结构光学膜片、新一代 LED 照明用高效配光结构等。

在未来零部件设计与制造将会增加一项功能表面结构的设计与制

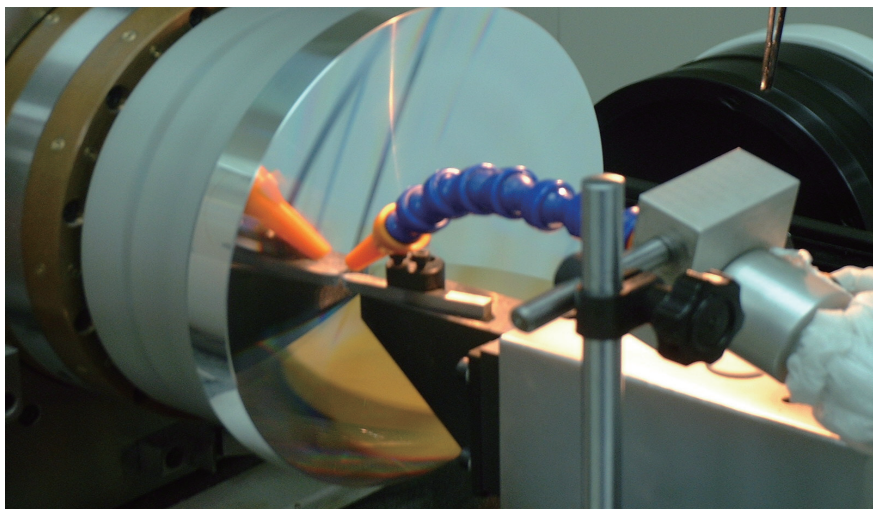


图4 单点金刚石超精密切削加工

造,通过在零件表面设计和加工不同形状的微结构,从而提高零部件力学、光学、电磁学、声学等功能,这将是微纳制造的重要应用领域,2006年成立的国际纳米制造学会经专家讨论并认同,纳米制造中的核心技术将从目前以 MEMS 技术逐步转向超精密加工技术。

#### 4 超精密加工开始追求高效

超精密加工技术从发展之初是为了保证一些关键零部件的最终精度,所以当初并不是以加工效率为目标,更多关注的是精度和表面质量,例如一些光学元件最初的加工周期是以“年”为加工周期。但是随着零件尺寸的进一步加工增大和数量的增多,目前对超精密加工的效率也提出了要求。例如为了不断提高观察天体范围和清晰度,需不断加大天文望远镜的口径,这就同样存在天文版的摩尔定律,即每隔若干年,光学望远镜的口径增大一倍,如建于 1917 年位于美国威尔逊山天文台的 Hooker 望远镜的口径为 2.5m,是当年全世界最大的天文望远镜;到 1948 年被 Hale 望远镜取代,其口径达到了 5m;1992 年新建成的 Keck 望远镜的口径达到了 10m,目前仍在发挥着巨大的作用。目前正在计划制造的巨大天文望远镜 OWL 主镜口径达到 100m,由 3048 块六边形球面反射镜组成,次镜由 216 块六边形平面反射镜组成,总重约 1~1.5 万 t,按照目前现有的加工工艺,可能需要上百年的时间才能完成。此外,激光核聚变点火装置(NIF)需要 7000 多块 400mm 见方的 KDP 晶体,如果没有高效超精密加工工艺,加工时间也无法想象。为此需要不断开发新的超精密加工设备和超精密加工工艺来满足高效超精密加工的需求。

#### 5 超精密加工技术将向极致方向发展

随着科技的进步,对超精密加工技术已经提出了新的要求,如要求极

大零件的极高精度、极小零件及特征的极高精度、极复杂环境下的极高精度、极复杂结构的极高精度等。

欧洲南方天文台正在研制的超大天文望远镜 VLT 反射镜为一块直径 8.2m、厚 200mm 的零膨胀玻璃,经过减重后重量仍然达到了 21t。法国 REOSC 公司负责加工,采用了铣磨、小磨头抛光等加工工艺,加工周期为 8~9 个月,最终满足了设计要求,目前许多新的超精密加工工艺如应力盘抛光、磁流变抛光、离子束抛光等出现为大镜加工提供了技术支持。前面提到的微纳结构功能表面结构尺寸小到几个微米,如微惯性传感器中的敏感元件挠性臂特征尺寸为 9 $\mu$ m,而其尺寸精度却要求  $\pm 1\mu$ m。

美国国家标准计量局研制的纳米三坐标测量机(分子测量机)是实现如何在极复杂环境下的极高精度测量的典型例子,该仪器测量范围 50mm $\times$ 50mm $\times$ 100 $\mu$ m,精度达到了 1nm,对环境要求及其严格,最内层壳温度控制  $17\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ ,次层壳采用主动隔振,高真空层工作环境保持  $1.0\times 10^{-5}\text{Pa}$ ,最外层壳用于噪声隔离,最后将整体结构安装在空气弹簧上进行被动隔振。自由曲面光学曲面精度要求高、形状复杂,有的甚至无法用方程表示(如赋值曲面),但由于其具有卓越的光学性能近年来应用范围不断扩大,但自由曲面光学零件的设计、制造及检测等技术还有待于进一步发展。

#### 6 超精密加工技术将向超精密制造技术发展

超精密加工技术以往往往是用在零件的最终工序或者某几个工序中,但目前一些领域中某些零部件整个制造过程或整个产品的研制过程都要用到超精密技术,包括超精密加工加工、超精密装配调试以及超精密检测等,最典型的例子就是美国的美国国家点火装置(NIF)。

为了解决人类的能源危机,各国

都在研究新的能源技术,其中利用氘、氚的聚变反应产生巨大能源可供利用,而且不产生任何放射性污染,这就是美国国家点火工程。我国也开始了这方面的研究,被称为神光工程。NIF 整个系统约有 2 个足球场大小,共有 192 束强激光进入直径 10m 的靶室,最终将能量集中在直径为 2mm 的靶丸上。这就要求激光反射镜的数量极多(7000 多片),精度和表面粗糙度极高(否则强激光会烧毁镜片),传输路径安装调试精度要求极高,工作环境控制要求极高。对于直径为 2mm 的靶丸,壁厚仅为 160 $\mu$ m,其中充气小孔的直径为 5 $\mu$ m,带有一直径为 12 $\mu$ m、深 4 $\mu$ m 的沉孔。微孔的加工困难在于其深径比大、变截面,可采用放电加工、飞秒激光加工、聚焦离子束等工艺,或采用原子力显微镜进行超精密加工。系统各路激光的空间几何位置对称性误差要求小于 1%、激光到达表面时间一致性误差小于 30fs、激光能量强度一致性误差小于 1% 等。如此复杂高精度的系统无论从组成的零部件加工及装配调试过程时刻都体现了超精密制造技术。

#### 结束语

从大到天体望远镜的透镜,小到大规模集成电路等微纳米尺寸及特征零件的制造,超精密加工技术从发展之初一直面临着不断的挑战。当前精密超精密加工技术在不断研究新理论、新工艺以及新方法的同时,正向着高效、极致等方向发展,并贯穿零部件整个制造过程或整个产品的研制过程,向精密超精密制造技术发展。随着我国精密超精密技术的不断发展和进步,必将实现从制造大国向制造强国的飞跃。

致谢:感谢哈尔滨工业大学精密工程所董申教授为本文提供了部分资料。(责编 亿霖)