

# 大口径光学元件微纳加工与检测技术研究与应用

郭隐彪\*, 王振忠, 彭云峰, 杨 炜, 毕 果

(厦门大学 物理与机电工程学院, 微纳米加工与检测联合实验室, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 超精密金刚石砂轮磨削是大口径先进光学元件微纳加工的主要技术, 是实现确定性批量加工的重要保证. 以实现高精度、高效率、高自动化程度加工为目的, 阐述了大口径光学元件微纳加工与检测的加工技术系统, 详细分析高精度加工设备及工艺控制、大尺寸检测、加工环境监测、快速抛光、表面结构化等研究应用情况.

**关键词:** 微纳米加工; 检测; 超精密加工装备; 快速抛光; 加工监控; 表面结构化

中图分类号: TG 58

文献标志码: A

文章编号: 0438 0479(2011)02 0286-07

大口径光学元件通常包括平面及非球面. 非球面一般是指轴对称非球面及非轴对称非球面, 根据光学设计应用需求, 在基本类型的基础上又衍生出几种广义的非球面, 如离轴非球面、楔形非球面等. 光学非球面元件相比球面而言, 能提高光学系统的相对口径比, 因此可简化结构, 同时非球面能消除球面元件在光传递过程中产生的球差、慧差、像差、场曲等不利影响, 减少光能损失, 从而获得高质量的图像效果和高品质的光学特征. 当前非球面广泛应用在航天航空、国防、天文、医疗以及光电等高技术领域, 其中大口径光学非球面元件( $\varnothing 400$  mm 以上)在激光核聚变装置、高能激光、红外热成像、卫星用光学系统、大型天文望远镜、医疗影像设备等国家重大光学工程及国防尖端技术中需求急速增长, 而中小型非球面更多应用于民用光电产品领域, 作为信息传递的关键组件, 在计算机、光通讯、手机、数码照相机以及视听设备等各种最新的电子产品中, 起着极其重要的作用<sup>[1-3]</sup>.

加工技术总是随着需求的增长而发展. 非球面是光学领域的重要发展, 其广泛应用给精密超精密加工技术提出了迫切要求, 尤其是在提高制造精度及效率、降低成本方面, 国内外普遍认为数控加工技术是解决非球面加工难的根本途径. 在传统手工加工技术基础上, 从 20 世纪 80 年代开始在各工业发达国家研究推动下, 一批先进的高精度非球面加工技术已日趋成

熟<sup>[4-7]</sup>: 数控单点金刚石车削, 主要用于大中小口径有色金属及少数光学晶体等材料加工, 加工精度及效率高、重复性好; 非球面复制技术, 包括模压成型及环氧树脂复制, 适合于大批量生产小口径非球面( $\varnothing 100$  mm 以下), 需要高精度模具; 非球面离子束加工, 适用于中小口径非球面局部表面修整, 能获得很好表面质量, 但效率低且加工过程不易控制; 非球面研磨抛光技术, 如数控小磨头抛光、磁流变抛光、电流变抛光等均能实现高精度非球面, 是较为可控的方法; 非球面金刚石砂轮磨削技术, 是非球面加工技术中的关键内容, 其加工对象主要是光学玻璃、黑色金属等硬脆性难切削材料, 随着材料科学发展, 硬脆性材料的非球面应用趋势加强, 因此金刚石砂轮磨削技术在超精密加工领域起着越来越重要的作用.

已开发的非球面加工方法, 基本上解决了各种中小口径非球面镜的加工问题, 并且相应加工设备的总体成套水平较高. 而由于大口径非球面在国防军事等领域的应用, 相关的加工技术及装备开发等各方面研究以国家经费投入较多, 并且国外发达国家均对我国进行严格技术和设备禁运. 从 20 世纪 90 年代以来, 在先进军事及空间光学系统、激光核聚变、大型天文望远镜工程等国家重大光学工程任务的需求牵引下, 大口径非球面, 尤其是大口径光学玻璃非球面的各种新型光学制造和检测技术得到了快速的发展. 就技术发展趋势而言, 超精密金刚石砂轮磨削技术、确定性抛光技术和与加工相配套的大尺寸高精度检测技术是各国研究的重点, 其技术特点以“超精密机械化”、“数字化”、“量化”和“智能化”为标志.

通过分析各类非球面方程类型, 可知  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴联动的超精密平面磨床通过直线或圆弧包络方法可以

收稿日期: 2010-12-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)重点项目(2008AA042501); 国家自然科学基金项目(51075343, 50905150); 福建省科技重大专项(2006HZ0002-4); 福建省自然科学基金资助项目(2010J05122)

\* 通信作者: guoyb@xmu.edu.cn

实现各类大口径凸面非球面加工, 更具通用性. 根据当前设备水平, 对于大口径光学元件, 通常加工工序为铣磨成型—粗磨—精磨—抛光—精修, 该工序流程中加工精度逐渐提高, 而材料去除率迅速降低, 因此采用高精度平面磨床的粗磨精磨加工精度将制约工件的整个加工周期.

本文以大尺寸光学元件的高精度平面磨削加工技术为主要研究内容, 涉及到光学非球面的加工机床, 以及加工工艺、面形检测、加工监控、表面结构化等关键技术, 阐述实现各类非球面元件高精度、高效率、高自动化程度的磨削加工工艺系统的研究发展情况.

### 1 高精度磨削加工设备

超精密加工经过数十年发展已形成了一整套完整的超精密制造技术系统, 可以说超精密加工是综合的、系统的技术组合. 目前除了超精密加工机床及加工工具外, 实现一个完整的非球面超精密磨削加工过程, 还应该包括的关键配套技术有: 超精密加工工艺控制方法、金刚石砂轮修整及动平衡技术、与加工精度相适应的测量方法及误差补偿、超精密加工环境控制(包括恒温、隔振、洁净控制等). 此外, 加工监控、计算机辅助制造软件系统等也是提高加工精度、效率以及提高自动化程度的必要措施. 因此, 基于高精度平面磨床的加工技术系统如图 1 所示. 从国内现有装备发展水平来看, 目前在大口径非球面等光学元件加工领域, 研制开发相应大尺寸高精度平面磨床及开展加工配套技术研究是重点.

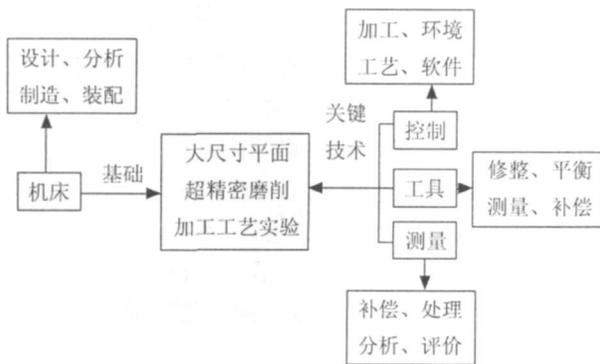


图 1 高精度磨削加工体系

Fig. 1 High precision grinding system

对于平面磨床, 其卧轴矩台布局由于具有精度高和通用性好等特点在精密和超精密平面磨床中得到广泛应用. 在其结构型式上立柱移动式相比磨头移动式,

拖板移动式具有结构简单、总体刚性好、磨削效率高等特点, 且左右和前后的独立运动, 可进一步减少复合误差. 随着制造技术发展, 当前精密与超精密平面磨床的综合性技术趋于成熟, 并形成相应的结构特点: 1) T 形整体布局的模块化设计; 2) 采用液体动静压轴承的主轴单元; 3) 具有液体静压或空气静压平面导轨结构的直线运动单元. 4) 采用光栅尺或激光干涉仪的位置反馈全闭环结构的运动反馈单元; 5) 具有高的编程分辨率(0.1 μm 及以上精度)的数控系统和高精度的伺服控制软硬件环境, 能实现高控制速度(毫秒级响应)、微纳米级轮廓控制与插补; 6) 设计中预先控制的热对称性及热稳定性.

目前, 垂直、横向最小进给量 0.1 μm 的大型超精密平面磨床在国际上已相当普遍, 在超精密磨削加工领域, 具有代表性的如日本长濑工机公司的 N<sup>2</sup>C-C、N<sup>2</sup>G-U 及 SGC 系列, 冈本公司的 UPG 及 PSG 系列, 德国保宁的 Profimat 系列. 从国外应用情况来看, 美国、德国等国家在大口径光学元件加工技术的开发计划中都提出并实现了大型超精密多轴机床来完成从玻璃毛坯到高精度光学表面的直接磨削成型加工. 因此针对国家重要光学工程需求, 本课题组研制了如图 2 所示的立柱移动式数控卧轴矩台平面磨床 MGK7160, 工作台加工范围 800 mm × 600 mm, 各轴分辨率 0.1 μm, 主轴最高转速 3000 r/min, x 轴移动速度最大 20 m/min, y、z 两轴移动速度最大 5 m/min. 机床整体采用模块化结构, 机械结构部分由床身工作台、立柱、底座、磨头、砂轮修整装置、动平衡系统、外围防护罩、电磁吸盘等组成; 电气及辅助部分主要有电气及数控系统、光栅反馈系统、液压系统、冷却系统、过滤系统、润滑系统、空气净化装置等.

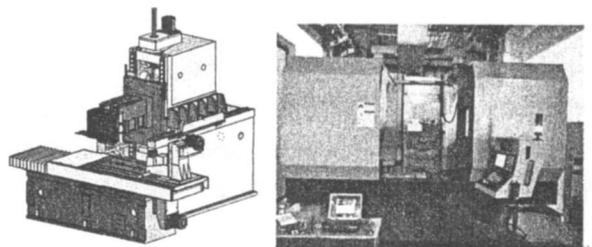


图 2 精密磨削机床 MGK7160

Fig. 2 Precision grinding machine tool MGK7160

### 2 先进光学加工工艺

大口径光学元件金刚石砂轮磨削加工是利用数控

机床对工具运动轨迹的精密复写来保证面形的. 一个完整的大口径光学元件加工体系应包括超精密加工机床、加工工具及修整等配套系统、加工环境、测量系统、工件材料、夹具系统、磨削液、计算机辅助制造软件、操作人员等要素. 在加工对象确定的情况下, 除了机床之外, 要实现高精度高效加工, 加工工具及配套技术等应达到较高要求. 金刚石砂轮对硬脆材料的加工具有较好的形状精度及加工效率, 在加工中必须保证金刚石砂轮处于良好的加工状态, 则其加工表面的修整及检测方法也是影响砂轮磨削性能的重要因素. 为了适应日趋精密的工作精度需求及不断追求的高效率和高自动化的目标, 高精度动平衡可控制砂轮振动在  $0.1 \mu\text{m}$  以下, 动平衡已成为非球面磨削加工中必不可少的关键手段.

为保证磨削得到的加工精度及充分发挥数控机床精度特性, 根据不同类型光学表面和具体机床结构方式, 选择合理有效的加工规划控制方法是关键, 即在机床机械系统特性基础上实现数控轨迹规划的高精度化. 以提高大口径光学元件加工精度及优化工艺为目的, 提出大口径非球面加工误差分离及补偿、砂轮均匀磨损与速度控制技术, 在精密磨床上实现了高精度加工; 深入优化了金刚石砂轮修整技术参数, 极大提高修整效率; 研究了精密磨床中整体平衡技术, 并实现加工状态监控; 建立了磨削过程微小振动对加工精度的影响模型, 实现了通过选用合理加工参数来提高表面精度<sup>[8-10]</sup>.

开发加工设备、研究加工原理和改善加工精度方法等目的就是要应用于实际加工中. 目前非球面的加工大多采用超精密数控机床, 用于提高加工精度和效率. 数控技术的核心是由计算机(主要是软件)实现对加工过程中的信息进行处理和控制, 实现加工过程自动化. 要满足当前对大口径光学元件日益增长的需求, 关键是实现以高精度加工设备配套高自动化程度的计算机辅助制造软件为核心的高效磨削技术. 如图 3 所示, 本课题组所开发的计算机辅助制造软件系统, 包括磨削工艺过程分析、加工方式选择、参数输入、数学处理、程序编制及校验、仿真、加工管理等过程, 直接输出机床各类加工所需的数控代码程序<sup>[11-12]</sup>.

### 3 大尺寸检测

无论哪种加工方法, 都因为存在加工误差, 如加工点和坐标系统的误差、机床的运动误差、工具的形状误差、砂轮直径的测量误差、加工力及热变形误差等, 使

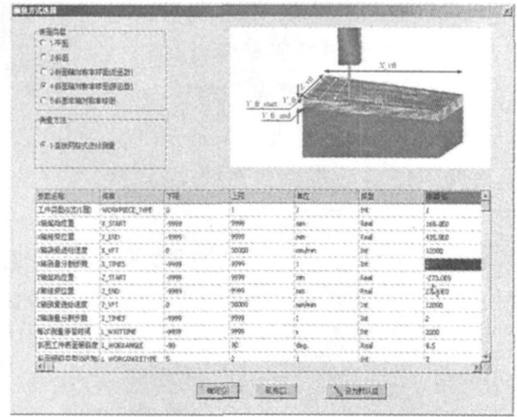


图 3 加工控制系统软件  
Fig. 3 Machining control software

得第一次加工后工件精度很难达到要求, 实际加工无法完全按照理想加工曲线加工. 为保证非球面磨削各个阶段的加工精度, 检测技术成为先进光学元件制造技术的关键. 非球面测量一般有两方面内容, 一是粗精加工阶段的在位测量, 为补偿加工提供数据, 该阶段特点是工件表面较粗糙, 不能用常规的方法检测, 如刀口阴影法、激光数字干涉仪等进行检测; 二是加工完成后工件加工质量的离线检测及评价. 在位测量通常是在机床主轴上安装接触式或非接触式高精度传感器, 如激光位移传感器、电感测微仪、长度计等, 利用机床的运动机构按规划好的测量路径进行.

离线测量方法很多, 接触式中最常用的就是三坐标测量机和轮廓仪, 测量精度高, 量程较大. 该类设备十分昂贵、维护和使用环境要求很高, 尤其是测量精度  $1 \mu\text{m}$  以下. 已有商业化三坐标测量机空间精度  $0.6+L/600 \mu\text{m}$ , 探测精度  $0.6 \mu\text{m}$ . 轮廓仪方面以 Taylor Hobson 公司的 PGI1240 非球面测量系统最为出色, 具有  $200 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm}$  的测量范围、 $0.8 \text{ nm}$  的传感器分辨率. 在各种非接触式测量方法中, 干涉法以其灵敏度高, 加之补偿镜、计算全息、移相、外差、锁相、条纹扫描等先进技术的出现, 一直成为非球面检测的主要途径. 该领域世界知名企业, 英国 Taylor Hobson、美国 Zygo 和 Veeco、日本三鹰光器等公司均有亚纳米级激光干涉系统产品, 用于非球面的非接触式三维测量. 伴随着非球面加工技术的发展, 近年来在原有的非球面零位检验基础上, 相继出现了一些新的检测技术, 可应用于高精度大口径非球面的离线测量, 如: 计算全息检测技术、子孔径拼接干涉法、数字莫尔条纹法等.

大口径光学元件的检测难点在粗精加工阶段, 即相应精度等级的在位检测, 可为大口径元件补偿加工提供数据, 或指导工件进入后续抛光工艺, 从而缩短工

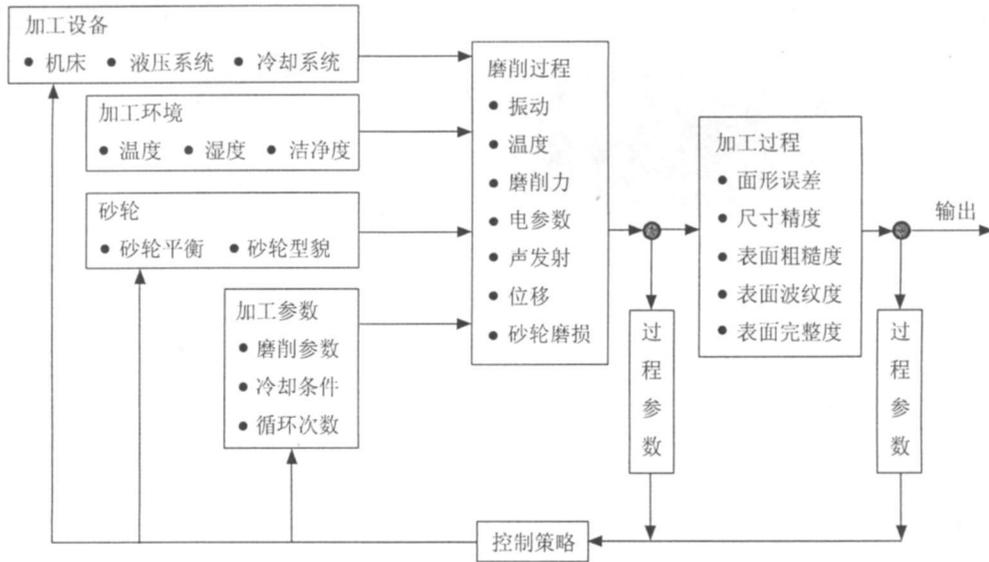


图 4 精密加工环境监控

Fig. 4 Precision machining environment monitoring

件整个加工周期. 在位检测可免除离线检测时由于定位基准变化所带来的误差, 即工件加工完成后不从机床上拆卸下来, 直接在机床上测量, 不受工件口径大小影响, 结果更接近实际加工情况. 非球面检测的另一方面内容是加工完成后工件加工质量的离线检测及评价. 从提高加工效率来讲, 粗精磨削阶段的面形精度收敛是关键, 即要实现磨削阶段的精确在位检测, 从而减少补偿加工次数. 合理的检测方法以及数据处理方法对评价光学元件面形质量以及提高补偿加工的精度起着很大的影响.

因此根据在位测量的特点, 课题组开发了由数据预处理, 误差补偿和数据处理三大部分组成的数据处理流程. 首先通过标度变化、剔除奇异项、平滑处理等操作实现预处理, 然后进行坐标系不重合等误差补偿, 最后数据处理部分中当需要进行补偿加工或反求光学元件表面方程时, 应选择曲线/面拟合, 曲线/面拟合采用非线性最小二乘法. 当需要评价非球面光学元件的表面质量时, 应选择曲面插值, 曲面插值主要利用分片三次插值多项式方法进行二元三次样条曲面构造, 得到实际加工的面形, 再与理想的非球面面形相比较, 从而求出非球面的面形误差函数和各种像差参数等. 对于在位测量系统及数据处理方案的有效性和可靠性检验, 采用基于标准件的误差分离与校正<sup>[13-14]</sup>.

### 4 精密加工环境监测与控制

为了适应日趋精密的工作精度需求及不断追求的

高效率和高自动化的目标, 加工环境控制措施可保证超精密加工体系外的支撑环境影响最小, 这已成为非球面磨削加工中必不可少的关键手段.

加工环境通常是指机床工作空间环境和整个加工工艺体系与技术人员之外的各个外部支撑环境. 如图 4 所示, 磨削加工系统是一个多输入、多输出的闭环反馈控制系统. 系统输入主要包括加工设备、加工环境、砂轮和加工参数 4 个方面. 机床与辅助设备运行状态的变化, 温度、湿度、洁净度等加工环境参数的变化, 砂轮动平衡与修整状态, 以及磨削参数、加工次数以及冷却条件等加工参数的改变, 都会引起磨削加工中各类过程变量的特征变化, 从而最终影响到工件的加工质量.

具体而言, 磨削加工环境监控系统就是通过对加工过程中的振动、温度、电参数、磨削力、声发射、位移量等连续物理量以及工件尺寸精度、面形精度、表面粗糙度等离散数据进行在线采集与特征提取, 利用信息融合技术得到控制参数和控制决策, 通过反馈控制实现加工设备健康运行、砂轮适时修整、加工参数优化和加工质量稳定. 利用先进信号处理手段识别掩埋在众多干扰中的微弱特征, 同时特征提取需要满足实时性要求, 以适应在线监测<sup>[15-17]</sup>. 如图 5 为已开发的精密加工振动监控系统.

### 5 快速抛光

抛光是精密、超精密磨削的重要后续工序, 主要为

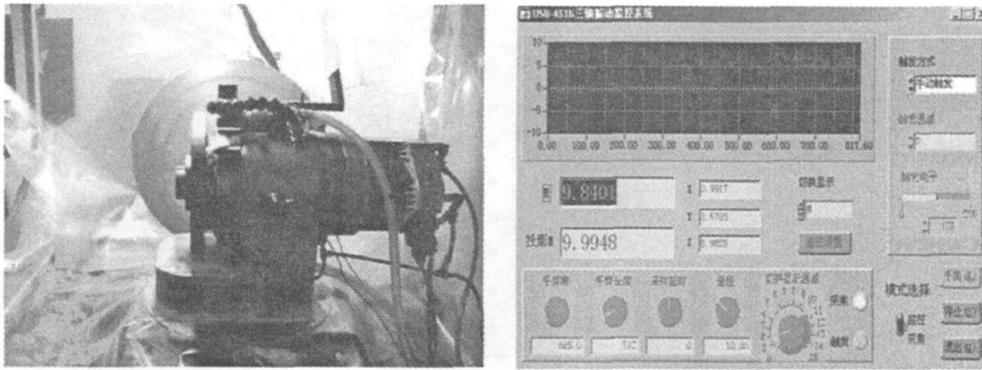


图 5 精密加工振动监控系统

Fig. 5 Vibration monitor system in precision grinding

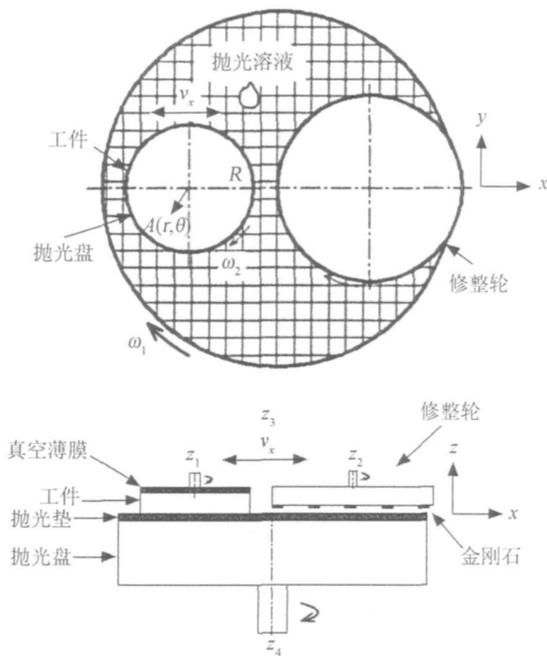


图 6 快速抛光简化模型

Fig. 6 Fast polishing model

获得超光滑表面。工件在经过精密磨削阶段后,要求经过抛光,以提高工件表面精度、降低表面粗糙度和亚表面缺陷。传统的初抛和环形抛光可以满足这些要求,但是需要熟练工程师操作,而且耗费较多时间,降低了生产效率。快速抛光技术被提出用于改进初抛和环形抛光工艺,以期能使快速抛光技术全面取代初抛,部分取代环形抛光,减少抛光加工时间,实现光学元件批量生产。

如图 6 所示为快速抛光模型。工件被真空薄膜吸附,通过 4 个夹具固定,在  $z_1$  轴驱动下以角速度  $\omega_2$  自转;同时  $z_1$  轴可升降,通过升降高度来控制对工件中心所施加的压力;抛光垫由强力胶粘贴在大理石抛光盘上,抛光盘在  $z_4$  轴驱动下以角速度  $\omega_1$  自转;同时被

加持的工件在  $z_3$  轴驱动下以  $v_x$  速度沿  $x$  轴横向移动;含有  $CeO_2$  抛光颗粒和去离子水的抛光溶液通过喷管均匀喷洒在工件和抛光垫表面,借助工件和抛光垫的相互运动进行扩散;金刚石修整轮在  $z_2$  轴驱动下,根据加工需要每隔一段时间可对抛光垫表面进行修整,以保持抛光垫的面型精度和表面粗糙度。

基于快速抛光机床,本课题组已建立材料去除率和工件加工面型的数学模型;依据机械学和摩擦学理论,从外界施加压强和相对速度入手,研究快速抛光 3 种不同加工方式的去除机理;依据流体力学理论和弹性力学理论,研究工件和抛光垫的接触模式和接触状态;研究微观下单颗抛光颗粒的受力情况、抛光颗粒材料切除机理;以抛光颗粒、工件、抛光垫之间的塑性形变为研究对象,建立快速抛光材料去除微观模型;建立工件和抛光垫接触区压强分布表面模型,解决压强分布不均匀的问题;建立实现大口径非球面光学元件、大口径平面光学元件抛光加工系统;研制各种加工和检测方式,提高各类元件的生产效率及加工柔性,满足光学元件批量生产的目标<sup>[18-20]</sup>。

## 6 高精度表面织构化

硬脆性材料元件如玻璃、陶瓷、SiC 等基板或晶片具有稳定的物理化学性质,可工作于特殊工况环境条件下,但加工困难。织构化表面是指具有呈周期性重复出现微结构的表面。织构化表面具有优越的机械、力学和物理化学性能,在磨擦学、MEMS 和生物工程领域具有巨大的应用前景,如图 7 所示为正弦织构化表面。目前常用的织构化表面加工技术主要有硅基微加工技术、激光织构技术和电子束织构技术等。但这些加工技术具有的材料局限性和物理化学缺陷严重制约了织构

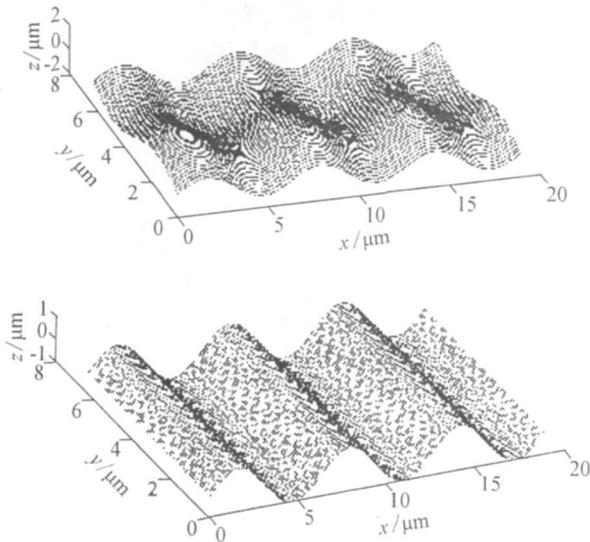


图 7 正弦结构化表面

Fig. 7 Sine textured surface

化表面加工质量的提高。

为获得超高精度的表面和完整性, 必须掌握硬脆性材料超微量切除的机理. 针对硬脆性材料超微量切除的超精密切削加工, 国际上普遍认为在控制硬脆性材料去除量的基础上, 可实现硬脆性材料的延性域加工, 从而得到高完整性的表面. 在基于断裂力学的基础上, 学者们提出了硬脆性材料超精密切削加工的临界切削深度模型, 认为当超精密切削加工的名义切深小于临界切深时, 材料的去除为延性域模式, 反之则为脆性域模式. 超精密机械切削加工借助刀具去除工件表层材料, 精度可达纳米级, 能获得更精确和高质量的几何外形, 具有加工材料局限性小和易于实现加工过程控制等特点, 是一种非常理想的结构化表面制造加工技术. 目前已有利用超精密车削加工结构化表面的研究, 但利用超精密磨削加工技术实现结构化表面尚未见报道. 本课题组充分发挥超精密磨削加工技术的优势, 将其应用到结构化表面的加工中, 以实现单晶硅微细沟槽结构化表面的高精度和无亚表面裂纹微磨削加工为目标, 首先研究单晶硅微细沟槽结构化表面的微磨削加工理论, 建立其无亚表面裂纹微磨削加工的临界磨削参数预测模型; 其次自行设计切刃可替换的单刃金刚石砂轮和微磨削加工实验装置, 研究单刃金刚石砂轮的动平衡方法和微细沟槽结构化微磨削加工的精确进给控制技术; 最后, 根据微细沟槽结构化表面的结构特点, 规划其微磨削加工工艺, 进行单晶硅微细沟槽结构化表面的微磨削加工实验, 并对其加工质量进行检测和评价. 所研究的微细沟槽结构化表面的微磨削加工理论和方法, 丰富了结构化表面的制造加工技

术, 可获得无亚表面裂纹的高精度单晶硅微细沟槽结构化表面, 在表面工程领域具有巨大的应用前景和经济价值<sup>[21]</sup>.

## 7 结束语

大口径光学元件微纳加工与检测技术研究与应用是一项综合性系统工程, 它涉及机床、控制、工具、检测、材料、环境控制等成果. 针对具体的加工对象, 高精度高性能的加工设备及工具、最优配套工艺技术相结合, 才能充分发挥出磨削加工的优势. 经过数十年的努力, 微纳加工日趋成熟, 随着与其相应的金刚石工具、测量及环境控制等技术水平的不断提高, 达到纳米级尺寸的加工已经实现. 而提高加工效率, 研究开发加工检测一体化技术将是研究重点. 随着新材料开发的发展, 仍需不断探索新型微纳加工方法及其机理; 同时在微纳加工与检测应用日趋广泛的同时, 必然将向大型化、微型化方向发展.

## 参考文献:

- [1] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [2] Shorey A B, Golini D, Kordonski W. Surface finishing of complex optics[J]. Optics and Photonics News (Optical Society of America), 2007, 18(10): 14-16.
- [3] Yan J W, Syoji K, Kuriyagawa T, et al. Ductile regime turning at large tool feed[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121: 363-372.
- [4] Li Y L, Li T H, Jiao G H, et al. Research on micro optical lenses fabrication technology[J]. Optik, 2007, 118: 395-401.
- [5] 张忠玉, 张学军, 牛海燕. 中小口径非球面元件加工技术的探讨[J]. 光学技术, 2001, 27(6): 524-525.
- [6] 李立军, 张飞虎, 董申. 非球面磨削加工设备现状与发展趋势[J]. 机床与液压, 2007, 35(7): 31-33.
- [7] Kim H S, Lee D G. Mirror surface grinding of ceramics using a three axis precision cnc grinding machine[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(10): 1499-1510.
- [8] 郭隐彪, 黄元庆, 田波, 等. 非轴对称非球面平行磨削误差补偿技术研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(5): 118-121.
- [9] 黄浩, 郭隐彪, 王振忠, 等. 轴对称非球面加工进给速度控制技术[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2004(2): 20-24.
- [10] 黄浩, 郭隐彪, 王振忠, 等. 轴对称非球面加工误差分离及补偿技术[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 177-181.
- [11] Huang hao, Guo Yinbiao, Wang Zhenzhong. Research on

- aspheric machining system error compensation and experiment [ J ]. Computer Applications in Technology, 2007, 29(2/3/4): 150-154.
- [ 12 ] Guo Yinbiao, Li zhenwei. Software controlled system of ultraprecision machining axisymmetric aspheric mirror [ J ]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(2): 256-259.
- [ 13 ] 仲进安, 郭隐彪. 高精度非球面表面测量技术研究[ J ]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 176-180.
- [ 14 ] Wang Zhenzhong, Guo Yinbiao, Guo Jiang, et al. Error separation and correction technology of precision measuring system in aspheric fine grinding phase[ J ]. Key Engineering Materials, 2009, 416: 71-76.
- [ 15 ] Zhang Yi, Guo Yinbiao, Katsuo Syoji. Research on effect conditions of micro vibration in ultraprecision grinding of aspheric surface[ J ]. Key Engineering Materials, 2004, 259/260: 430-434.
- [ 16 ] Zou Qin, Guo Yinbiao. Study on an intellectualization CNC system with open architecture[ C ]// Proceedings of Seventh International Conference on Progress of Machining Technology. Beijing: Aviation Industry Press, 2004: 676-681.
- [ 17 ] Zheng Lin, Guo Yinbiao, Wang Zhenzhong. Study on single plane biaxial balance monitor system in ultraprecision grinding[ J ]. Key Engineering Materials, 2006, 304(2): 251-255.
- [ 18 ] Guo Yinbiao, Hu Jianyu, Zheng Xiaoguang, et al. Influence of wheel pattern structure on machining accuracy of ultraprecision plane honing[ J ]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 15(4): 344-347.
- [ 19 ] 杨炜, 郭隐彪, 许乔, 等. 超精抛光中边缘效应对材料去除量的影响[ J ]. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1653-1657.
- [ 20 ] Yang Wei, Guo Yinbiao, Li Yaguo, et al. Pressure and velocity dependence of the material removal rate in the fast polishing process[ J ]. Applied Optics, 2008, 47(33): 6236-6242.
- [ 21 ] Peng Yunfeng, Guo Yinbiao. An adhesion model for elastic plastic fractal surface[ J ]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(5): 3510-3515.

## Research on the Key Technology of Micro/ nano Machining and Measuring

GUO Yinbiao<sup>\*</sup>, WANG Zhenzhong, PENG Yunfeng,  
YANG Wei, BI Guo

( Unite Laboratory of Micro/ nano machining and measuring, School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Ultra precision grinding with diamond wheel is widely used for manufacture of large scale optical lens, especially for batch processing, as the key technology of micro/ nano machining and measuring. This paper presents the technical system of micro/ nano machining and measuring for large scale optical manufacture, and introduces the studies of the research team in Xiamen University in the field of advanced optical machining, precision machine tool, micro/ nano measuring, fast controllable polishing, machining environment monitoring, and textured surface fabricating.

**Key words:** micro/ nano machining; measuring; ultraprecision machine tool; fast polishing; machining monitoring; textured surface fabricating