

复杂表面光学元件的超精密磨削加工及其在位砂轮精密修整技术*

郭 兵¹,赵清亮¹,陈 冰²,王金虎³,张春雨¹,吴明涛¹,潘永成¹

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 湖南科技大学智能制造研究院, 湘潭 411201;

3. 浙江工业大学超精密加工研究中心, 杭州 310014)

[摘要] 微米级的面形精度和纳米级的表面粗糙度, 以及由其表面结构所引起的加工干涉、轨迹限制、工具磨损、效率低下等一系列问题, 都严重制约着复杂表面光学元件的实际应用。针对此, 对多种典型复杂表面光学元件的超精密磨削加工技术进行了系统研究, 提出了多种针对复杂表面磨削用金刚石砂轮的在位精密修整技术, 并开发了一系列的超精密磨削工艺。磨削加工后的单晶硅非球面表面粗糙度 $R_a < 5\text{nm}$, 面形精度 PV 值 $< 527\text{nm}/140\text{mm}$; 蓝宝石保形整流罩面形精度 PV 值 $< 2.5\mu\text{m}/50\text{mm}$; 无结合剂碳化钨微结构表面粗糙度 $R_a < 70\text{nm}$ 。

关键词: 复杂表面; 光学元件; 超精密磨削加工; 在位精密修整; 金刚石砂轮

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.09.024



郭 兵

工学博士, 副教授, 主要研究方向为复杂功能表面的超精密加工技术、结构化精密磨削工具等; 发表学术论文 90 余篇, 其中 SCI 论文 40 余篇; 获 2017 年黑龙江省科学技术一等奖, 国家发明专利 10 余项; 先后承担国家自然科学基金、航空科学基金等项目。

复杂表面光学元件是指具有复杂拓扑几何形状的光学元件。与传统球面及平面光学元件相比, 复杂表面光学元件能够显著减小光学系统的重量和体积, 并且有利于光学系统的集成化, 因此能够实现普通光学元件难以达到的新功能^[1-2]。因此, 无论是在高端民用领域, 还是在现代国防科技领域, 其中特别是航空航天领域, 复杂表面光学元件都具有重要的应用价值和广阔的应用前景。比如, 复杂表面光学元件目前在航空航天领域的典型应用包括: 高性能飞行器的保形整流罩、红外成像系统中的自由曲面及非球面镜、新型微光学系统中的微透镜阵列、菲涅尔透镜和减反射光栅等, 如图 1 所示。

* 基金项目: 国家自然科学基金(51875135、51705148、51805484); 黑龙江省科学基金(E2018037)。

复杂表面光学元件的特殊表面结构使其与传统光学元件相比具有不可比拟的性能优势, 但这也给其超精密加工带来了极大的困难和挑战。亚微米级的复杂面形精度和纳米级的均匀表面粗糙度, 以及由其表面结构所引起的加工干涉、轨迹限制、工具磨损、效率低下等一系列问题, 都严重制约着复杂表面光学元件的实际应用^[3-4]。因此, 复杂表面光学元件的超精密加工技术是高端制造业中的前沿性科学问题。

对于复杂表面光学元件的设计者和制造者来说, 传统的铣磨-抛光制造工艺, 或能量束加工技术(如激光、等离子体等)已很难满足现有复杂表面光学元件的设计加工要求。而超精密磨削技术与以上加工技术相比, 在面对复杂表面光学元件的高精度加工需求时具有很多的优势, 比

如不受表面结构限制能够加工真正的三维结构,且能够加工大深宽比特特征的复杂光学表面;加工后光学元件的面形精度可以达到微米甚至亚微米量级,同时在保证面形精度的同时还能实现加工后的表面具有纳米级的粗糙度;基本不受材料性能,如导电性、硬脆性、化学性的影响,能够适合于多种材料的超精密加工。此外,超精密磨削加工技术与其他加工技术相比,还具有加工效率高、加工成本低等优势^[5-6]。

金刚石砂轮的在位精密修整

高精度的砂轮是实现超精密磨削加工过程的重要因素之一,是能否获得超精密加工精度的关键因素^[7]。为了实现复杂表面光学元件的超精密磨削,以获得良好的面形精度及表面质量,在磨削前必须进行砂轮的在位精密修整。在实际加工过程中,不同的磨削方法对砂轮有着不同的尺寸精度和轮廓精度要求。对于表面具有离散性复杂结构特征的光学元件,如微结构光学表面,在进行超精密磨削加工时,通常采用仿形磨削,因此砂轮既要求具有较高的尺寸精度,又要求具有较高的形状精度。而对于表面具有连续性复杂结构特征的光学元件,比如非球面及自由曲面等,其超精密磨削通常利用砂轮运动包络轨迹来控制最终元件的面形轮廓,此时的砂轮尺寸可以在磨削程序中进行补偿,因此对砂轮的形状精度要求更高。本文将对3种应用于不同复杂表面超精密磨削加工用的典型金刚石砂轮的在位精密修整技术进行研究,为后续超精密磨削提供工具保障。

1 圆弧形金刚石砂轮的在位精密修整

圆弧形金刚石砂轮是低陡度(小长径比)非球面和自由曲面超精密磨削加工中最常用的磨削工具,如航空光学系统中典型的非球面透镜及反射镜、柱面镜、三反镜等。针对圆

弧形金刚石砂轮提出了一种简易、高效的在位精密修整技术,即旋转绿碳化硅(GC)修整棒在位精密修整技术^[7-9]。

旋转绿碳化硅修整棒在位精密修整技术是利用绿碳化硅修整棒对金刚石砂轮的结合剂进行机械去除,从而实现金刚石砂轮的在位精密修整。修整时先将绿碳化硅修整棒安装在超精密机床的工件主轴上随主轴旋转,然后使磨削主轴上待修整的圆弧形金刚石砂轮在旋转的同时,绕绿碳化硅修整棒进行圆弧修整运动。由于在修整过程中绿碳化硅修整棒自身也会发生磨损,因此在完成一次圆弧修整过程后应使金刚石砂轮沿绿碳化硅修整棒的轴向方向偏移一

定距离,然后再次重复上述圆弧修整运动,以实现金刚石砂轮的圆弧轮廓修整。此外,在实际修整过程中,仅需通过数控程序调整圆弧修整运动的轨迹半径即可实现具有不同圆弧半径的金刚石砂轮的在位精密修整,具体修整原理如图2所示。

从图2可知,修整时,旋转的绿碳化硅修整棒沿同样旋转的圆弧形金刚石砂轮的圆弧轮廓进行圆弧修整运动,其中圆弧修整运动的轨迹半径为 a 。由于绿碳化硅修整棒在修整过程中也会发生磨损,为了保证最终的修整精度,因此在绿碳化硅修整棒的半径由磨损发生显著改变后(通常为修整2~3次后),使圆弧形金刚石砂轮沿绿碳化硅修整棒的径向方

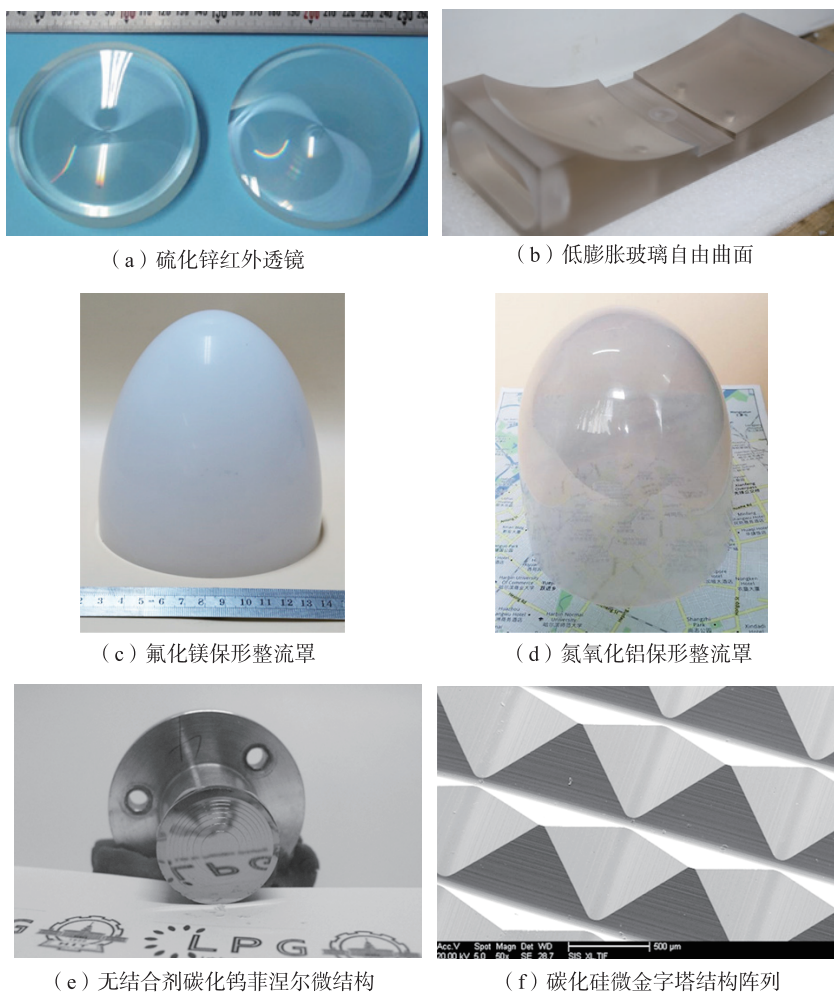


图1 典型复杂表面光学元件(超精密磨削加工)

Fig.1 Typical complex surface optical elements (by ultra-precision grinding)

向移动一定距离(通常为5~10mm),用以消除由绿碳化硅修整棒磨损而引起的误差。圆弧修整运动的轨迹半径 a 可通过以下公式计算得到:

$$a=R_{GC}+r_{arc} \quad (1)$$

式中, R_{GC} 为绿碳化硅修整棒的圆柱半径; r_{arc} 为圆弧形金刚石砂轮的截面圆弧半径。在修整过程中,绿碳化硅修整棒的圆柱半径可通过千分尺等测量工具实际测量获得,因此,根据式(1),只需改变绿碳化硅修整棒的修整轨迹半径,即可实现不同圆弧半径金刚石砂轮的在位修整,以应对不同非球面及自由曲面的磨削加工要求。

依据旋转绿碳化硅修整棒在位精密修整原理,在超精密机床上搭建在位精密修整系统,如图3所示。

图4为采用本修整技术对树脂基D3圆弧形金刚石砂轮在位修整的形状精度结果。其数据由激光测微仪测量获得,并通过MATLAB分析结果。试验中激光测微仪的测量范围为圆弧形砂轮截面轮廓中心区域3mm范围内(实际超精密磨削过程中砂轮的常用工作区)。修整前由于砂轮制造及安装误差的存在,圆弧形金刚石砂轮的径向圆跳误差较大,为35~50 μm 。而通过旋转绿碳化硅修整棒在位精密修整后,砂轮径向圆跳误差降为2~4 μm 。此外,从图4中还可看出,修整前圆弧形金刚石砂轮的形状误差(圆弧轮廓误差)约为37 μm ,而通过旋转绿碳化硅修整棒在位精密修整后,砂轮的形状误差减为2.5 μm 。

随后分别对不同粒度、不同结合剂的金刚石砂轮(包括树脂基D3和D7金刚石砂轮,以及金属基D15金刚石砂轮)进行修整试验。结果表明,本文所提出的旋转绿碳化硅修整棒在位修整技术均显示出较好的修整效果,且在修整过程中,圆弧形金刚石砂轮的圆弧轮廓半径可被有效控制,修整后圆弧形金刚石砂轮的实际圆弧轮廓半径与期望半径的尺寸

误差<5%。圆弧形金刚石砂轮的圆弧轮廓误差可控制在2.5~3.2 μm 间。金刚石砂轮的径向圆跳误差由修整

前的25~45 μm 减小到1.6~3.1 μm ,修整效果显著。

图5为修整后金刚石砂轮的微

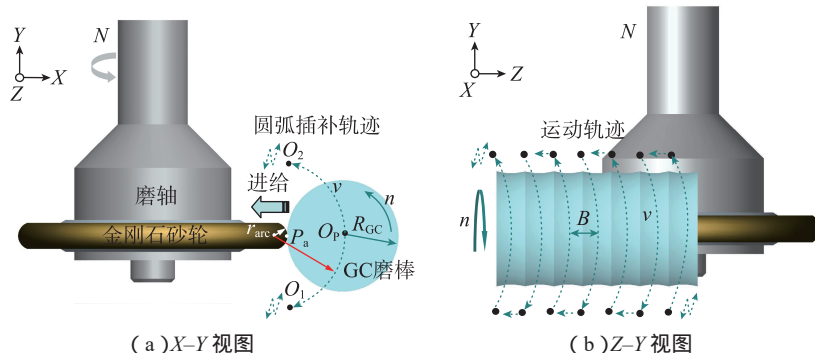


图2 圆弧形金刚石砂轮的旋转绿碳化硅修整棒在位精密修整原理

Fig.2 Principle of on-machine truing with rotary GC rod for arc-shaped diamond grinding wheels

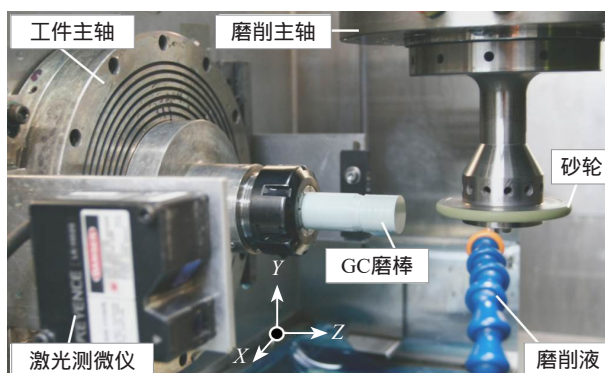


图3 旋转绿碳化硅修整棒在位精密修整系统

Fig.3 On-machine truing experimental setup with rotary GC rod

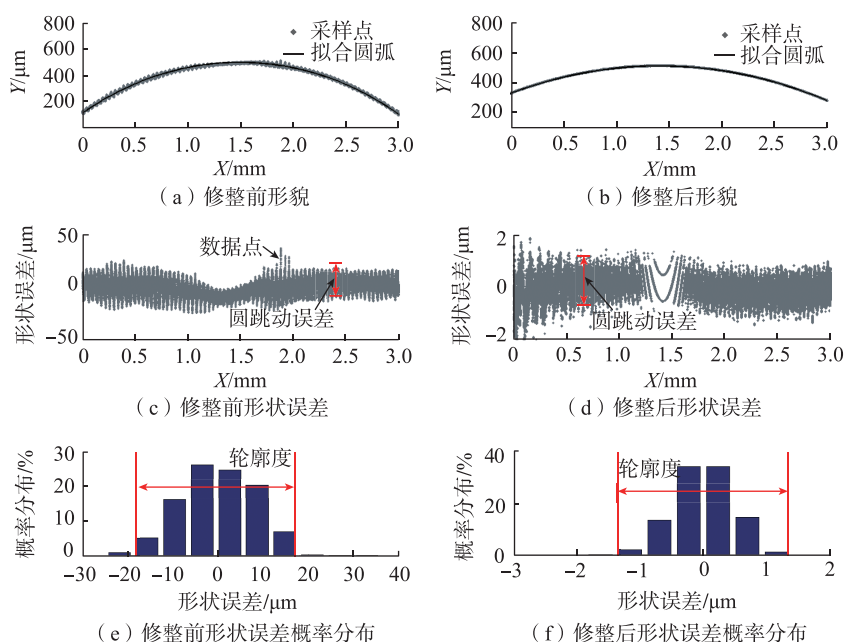


图4 D3树脂基圆弧形金刚石砂轮的修整精度分析

Fig.4 Analysis of truing accuracy of D3 resin bonded diamond wheel

观形貌。可以看出,修整后的金刚石砂轮表面具有较好的形貌特征,金刚石磨粒突出明显,没有剥落和破损现象。

2 球形金刚石砂轮的在位精密修整

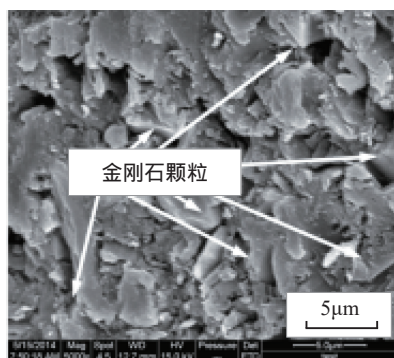
由于空间及运动轨迹的限制,在加工高陡度(大长径比)非球面及自由曲面时,常采用球形砂轮进行超精密磨削加工,如保形光学系统中的整流罩和窗口及各类深腔元件等。球形砂轮用于高陡度复杂连续表面的

磨削即可以有效避免加工干涉,又可以增加砂轮的参与磨削面积,从而均化砂轮磨损,减小由砂轮磨损引起的面形误差。在加工过程中,球形砂轮参与磨削的表面要确保准确的轮廓精度,砂轮的球度及形状误差都会在磨削过程中复制到磨削表面上,引起磨削表面的面形误差,因此其磨削前的在位修整尤为重要。针对球形金刚石砂轮,本文提出了一种基于大磨粒金刚石电镀修整轮的高精度在位修整技术,基于大磨粒金刚石电镀修整轮的高精度在位修整技术的原理如图6所示,修整轴安装在工件主轴侧面,且与磨削主轴的轴线相互垂直,即保证电镀修整轮在球形砂轮的

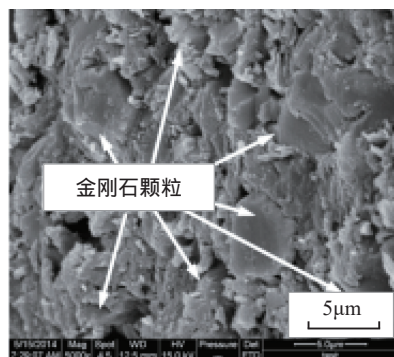
大磨粒金刚石电镀修整轮的磨损极小,因此可以实现较高的修整精度。

图7为树脂基D15金刚石球形砂轮在位修整过程,为了避免加工中球形砂轮的顶点参与磨削过程,因此磨削主轴倾斜放置在机床Z轴的工作台上,根据图6修整原理,修整轴在Y-Z平面也相应倾斜放置,使修整轴与磨削主轴的轴线相互垂直。修整时,电镀修整轮从球形砂轮顶端开始修整,通过机床的数控驱动使电镀修整轮沿球形砂轮的轴心平面上沿球形砂轮的目标轮廓进行修整运动,从而实现球形金刚石砂轮的在位修整。

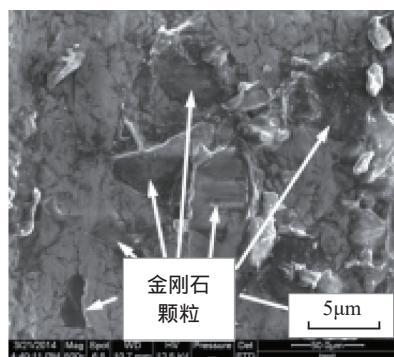
球形金刚石砂轮在位修整前后的轮廓形状采用激光测微仪进行在位测量,以用于评价修整精度,测量结果如图8所示。通过测量结果可以看出,由于砂轮制造误差及安装误差的存在,安装后的球形金刚石砂轮顶部 120° 范围内的形状误差



(a) D3 砂轮



(b) D7 砂轮



(c) D15 砂轮

图5 金刚石砂轮修整后的表面形貌

Fig.5 Diamond wheel surface morphology after truing

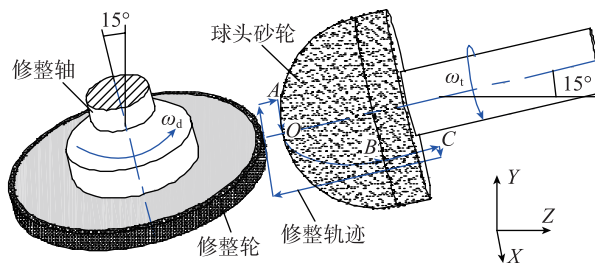


图6 球形砂轮在位修整原理示意图

Fig.6 Schematic diagram of hemispherical wheel dressing

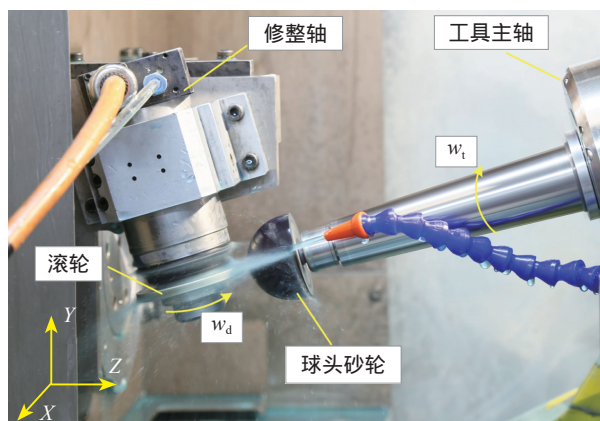


图7 基于电镀金刚石修整轮的球形砂轮在位修整

Fig.7 Hemispherical wheel on-machine truing by electroplate diamond roller

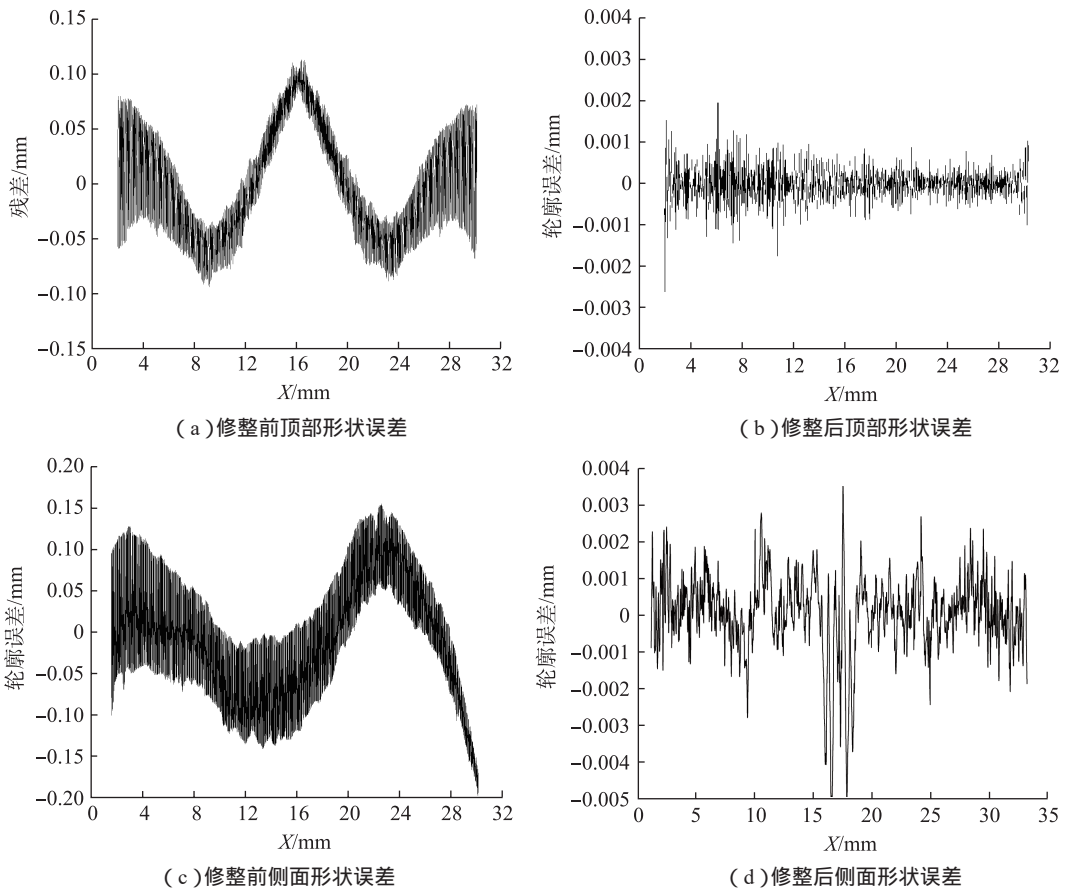


图8 球形砂轮修整前后的形状误差

Fig.8 Profile error of hemispherical wheel before and after truing

>175 μm ,侧面 90° 范围内的形状误差 >310 μm ,且砂轮的跳动误差较大,直接使用会极大影响磨削表面的光洁度和面形精度。而经过基于大磨粒金刚石电镀修整轮的在位修整后,金刚石球形砂轮顶部的形状误差降低到 5 μm 左右,而侧面的形状误差则降低到 2 μm 以内,且砂轮跳动误差减小到 2 μm 以内,修整效果显著。

图 9 为初始球形金刚石砂轮和采用在位修整技术修整后的球形金刚石砂轮的表面形貌电镜照片。从图 9 (a) 中可以发现,修整前球形金刚石砂轮表面,树脂结合剂包裹金刚石磨粒的现象比较明显,裸露的磨粒密度较低,且磨粒突出高度较低。而通过电镀金刚石修整轮在位修整后,球形金刚石砂轮表面具有明显的修整痕迹,表面整体相对平整,但金刚

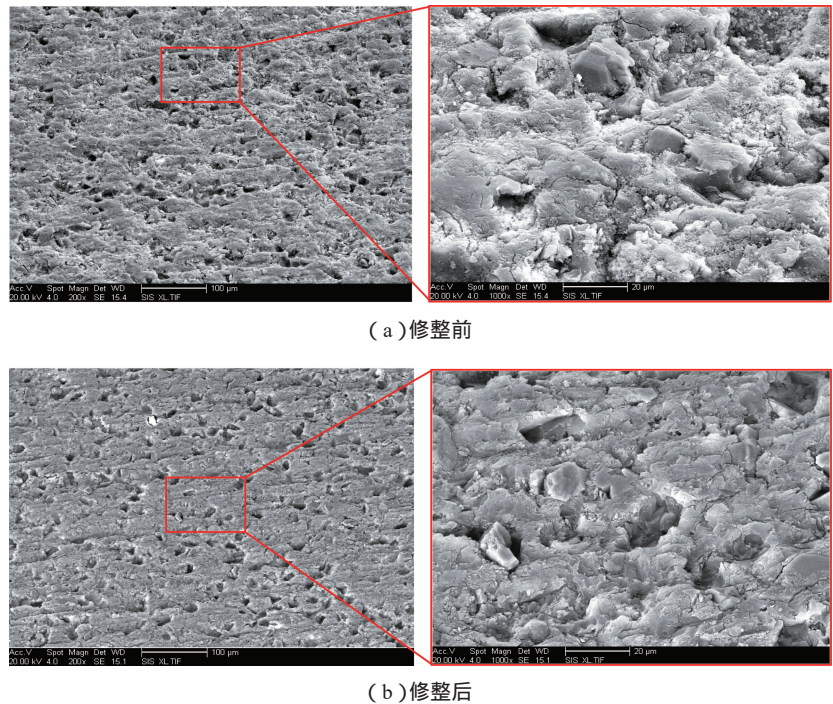


图9 修整前后金刚石球形砂轮的表面形貌

Fig.9 Surface topography of diamond grinding wheel before and after truing

石磨粒的突出高度明显增加。通过进一步放大观测可以看出,虽然砂轮表面具有分布均匀的由金刚石磨粒拔出留下的凹坑,但金刚石磨粒的裸露密度与修整前相比并没有显著降低,表明修整后的球形砂轮仍具有可靠的磨削性能。

3 微小结构金刚石砂轮的在位精密修整

微结构光学功能表面是一种典型的离散型复杂表面,其表面通常由若干相互连接但独立的微小表面组成。在微结构表面的超精密磨削加工中,这些微小表面的连接点或连接线会限制砂轮的几何形状和大小。因此,为了避免干涉现象,从而能够获得满意的微结构表面,用于微结构表面磨削的金刚石砂轮通常要求具有微小精密的特征轮廓,如高精度的V形砂轮,以及微圆弧(圆弧轮廓半径 $<2\text{mm}$)砂轮等。此外,为了解决微小结构金刚石砂轮在磨削过程中极易磨损的问题:一方面需采用高浓度的金属基金刚石砂轮以抑制磨损;另一方面则需进行多次在位修整,以保证微小结构金刚石砂轮的形状精度。然而,高精度的微小结构尺寸和高浓度的超硬磨粒使得对这类砂轮的精密修整远难于传统砂轮的修整。针对此难点,开发了一种针对微小结构金刚石砂轮的在位旋转电极放电修整技术^[10-11],其修整原理如图10所示。

微结构表面磨削用金刚石砂轮的旋转电极放电修整技术是将金刚石砂轮和电极分别连接高频脉冲电源的正负极。金刚石砂轮和电极各自旋转,并且利用机床本身的数控系统将旋转电极沿着金刚石砂轮的轴向轮廓做插补运动。每完成一次插补运动,金刚石砂轮做一次进给运动,靠近电极,利用旋转的电极和金刚石砂轮金属结合剂之间产生脉冲放电来蚀除砂轮的结合剂,从而实现砂轮的在位精密修整。由于在修整

过程中,砂轮表面与旋转电极间的间隙随砂轮的转动不断变化,而脉冲放电火花只会蚀除砂轮与电极的间隙最小处结合剂,因此随着修整过程的持续进行,金刚石砂轮的误差逐渐减小,最终完成砂轮的在位精密修整。而通过改变数控轨迹,就可以实现不同形状微小结构金刚石砂轮的在位修整。

图11为微结构表面用金刚石砂轮的旋转电极放电修整过程照片,从中可以看出,砂轮的修整放电现象非常明显,在砂轮与修整电极之间有放电火花现象产生,同时由于压缩气体的作用,修整过程中的

火花和生成物会随流动空气一起飞离修整放电区。

根据此修整原理,分别对轮廓半径为 1mm 的微圆弧形金刚石砂轮和V形金刚石砂轮进行了在位修整试验研究,两个砂轮的浓度均为 150% 。图12为微圆弧形金刚石砂轮圆度在修整前后的情况。由于砂轮制造误差、安装误差或砂轮磨损的存在,初始的砂轮圆度误差为 $80\mu\text{m}$,而经过修整后,砂轮的圆度误差减小到 $3.5\mu\text{m}$ 。

微圆弧形金刚石砂轮的轮廓形状精度评价指标主要为砂轮轮廓圆弧半径和轮廓面形精度PV值。本试验中,实测初始圆弧形金刚石砂

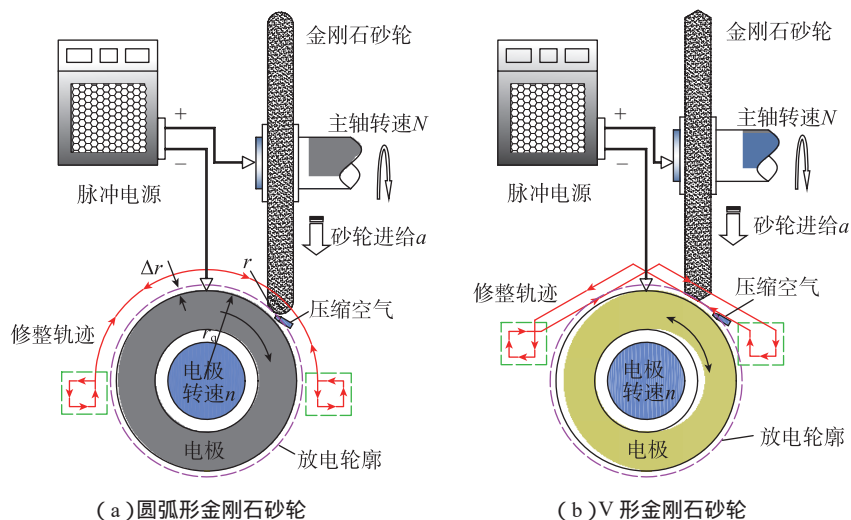


图10 微结构表面用金刚石砂轮的放电修整原理

Fig.10 Discharge truing principle of diamond wheel for microstructures

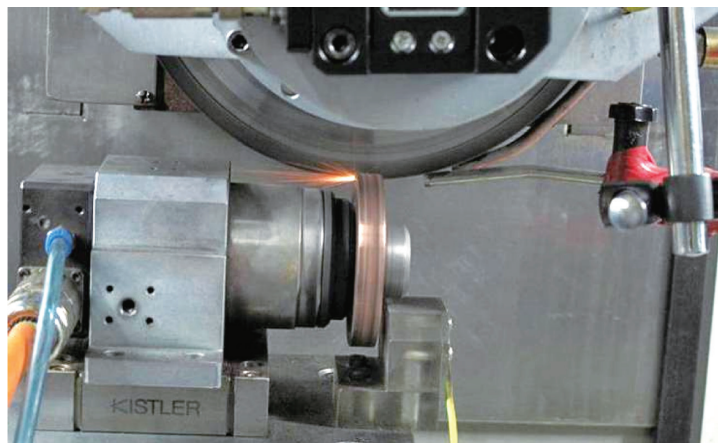


图11 金刚石砂轮的放电修整照片

Fig.11 Discharge truing photo of diamond wheel

轮的轮廓圆弧半径为 1.1856mm, 与理想轮廓圆弧半径 1.0mm 的误差为 18.56%, 轮廓面形 PV 值为 11.4828 μm 。修整后, 圆弧形金刚石砂轮的轮廓圆弧半径为 1.0023mm, 与理想轮廓圆弧半径 1.0mm 的误差 <0.3%。此时轮廓面形 PV 值可达 4.0115 μm , 如图 13 所示为修整后砂轮的面形精度。

V 形金刚石砂轮的轮廓形状精度评价指标主要为 V 形砂轮轮廓夹角和尖锐部分的锐利度(即最小圆弧半径)。实测初始 V 形金刚石砂轮的轮廓夹角角度为 120.481929°, 与理想夹角角度 120° 的误差为 0.4%, V 形砂轮尖锐部分的圆弧半径为 203.2 μm 。经过修整后, V 形金刚石砂轮的轮廓夹角角度改善为 120.033360°, 夹角角度误差 <0.03%。V 形砂轮尖锐部分的最小圆弧半径为 22.5 μm (砂轮磨粒平均直径为 20 μm)。

图 14 为在位修整后的微小结构金刚石砂轮的表面形貌, 可以看出, 修整后金刚石砂轮表面形貌均一, 砂轮表面不同位置上, 结合剂的重铸现象、金刚石磨粒的裸露密度和突出高度, 以及磨粒脱落形成的凹坑均没有明显差别, 修整效果显著。

复杂表面光学元件的超精密磨削工艺

复杂表面光学元件具有多样性, 不同应用目的, 其结构形式、材料属性及精度要求都不同, 因此其相应的超精密磨削工艺也不同。一个合理的磨削工艺方案是实现复杂表面光学元件高效、高精度加工的关键。本文以航空领域应用中 3 类典型的复杂表面光学元件为例, 包括非球面透镜、保形整流罩及微结构光学功能表面, 依据待加工复杂表面光学元件的结构尺寸特征, 研究复杂表面光学元件的超精密磨削加工工艺。

1 非球面透镜的超精密磨削加工

非球面透镜是现代光学系统中的关键元件, 通常采用铣磨-抛光加工方法, 效率低、精度差^[12-13]。本文采用超精密磨削方法进行加工, 加工流程如图 15 所示。

(1) 首先对毛坯的圆周面进行磨削加工, 以确定基准。

(2) 考虑到凹面相对于凸面更易装夹, 因此磨削完外圆面基准后, 先进行非球面凹面的超精密磨削加工。加工前采用上文中介绍的圆弧形砂轮精密在位修整技术对金刚石砂轮进行在位修整, 修整后砂轮在垂直方向的位置即可确定。然后采用试磨的方法完成砂轮 X 轴方向的对刀和

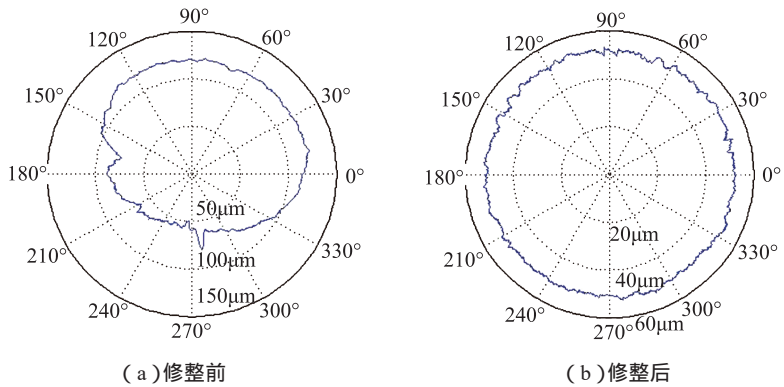


图12 修整前后金刚石砂轮的圆度
Fig.12 Roundness of diamond wheel

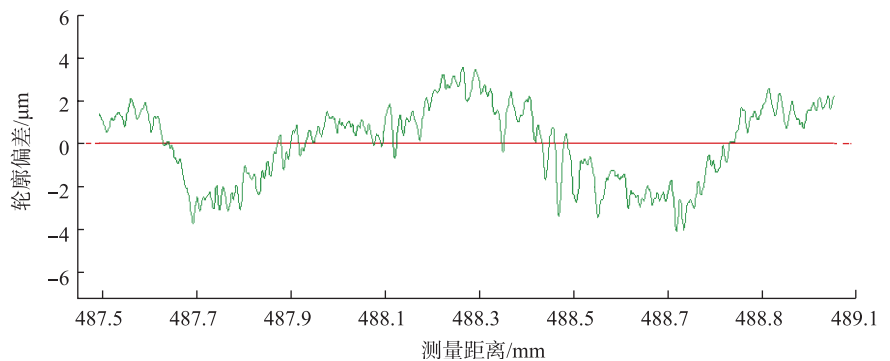


图13 修整后圆弧形金刚石砂轮的面形精度
Fig.13 Profile error of arc-shape diamond wheel after truing

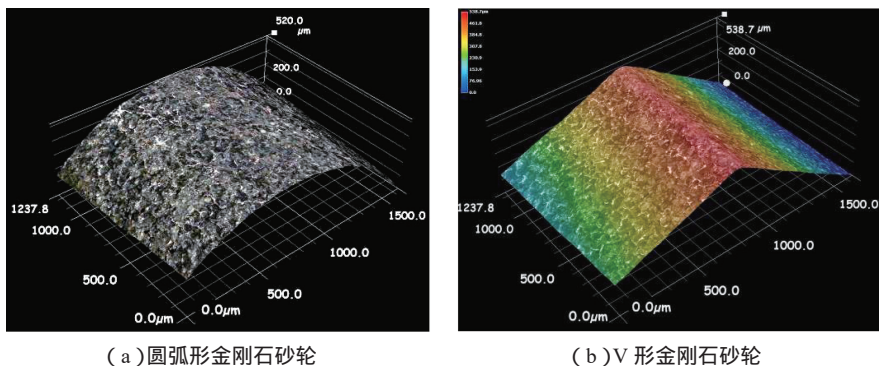


图14 金刚石砂轮放电修整后表面形貌
Fig.14 Surface morphology of diamond wheel

砂轮直径误差补偿,然后进行凹面的超精密磨削加工。

(3)凹面加工完成后进行凸面的超精密磨削加工,加工前由于存在砂轮磨损现象,因此同样需要进行金刚石砂轮的在位修整及砂轮直径误差补偿,然后进行其凸面的超精密磨削加工,磨削工序与凹面相同。

根据上述非球面透镜的超精密磨削流程对单晶硅透镜进行超精密磨削加工,加工前对单晶硅材料先进行磨削加工工艺参数优化^[14-15],最终采用优化后的加工参数进行磨削加工,如图16所示。

超精密磨削后的单晶硅透镜采用LVDT在位检测设备进行面形精度检测,结果如图17所示。结果表明,单晶硅透镜的面形精度PV值分别可达527nm和480nm。

使用Talysurf PGI 1240轮廓仪对加工后的单晶硅透镜表面质量进行离线线检,测量范围为140mm。检测结果表明,单晶硅非球面透镜的表面粗糙度 $R_a < 5\text{nm}$, $R_z < 23\text{nm}$ 。图18为超精密磨削加工后的单晶硅透镜。

2 保形整流罩的超精密磨削加工

保形整流罩是一种典型的航空光学元件,能够在不影响光学系统性能的前提下显著改善飞行器的空气动力学性能,极大减小飞行器在高速飞行过程中的空气阻力,但其高陡度、大深宽比的结构特征使其超精密磨削加工极为困难。考虑到保形整流罩的复杂表面结构,在其超精密磨削加工过程中首先需要对其磨削表面纹理进行有效抑制。明显的磨削纹理会恶化磨削表面质量,增大后续抛光难度。磨削加工时由于砂轮圆度误差、磨粒突出高度不同及磨削主轴径向跳动等因素的影响,在双转轴的情况下会在工件表面留下磨削纹理,这种纹理在高陡度结构的磨削加工中尤为显著。从宏观角度看,砂轮表面不同突出高度的金刚石磨粒在磨削表面的生成过程中起到了决定

性作用,与磨削纹理特征息息相关。为了分析抑制这种磨削纹理,利用单颗粒磨削仿真来预测最终纹理分

布,即在每转磨削过程中,都会由砂轮表面磨粒的最高点在工件表面上留下一个磨削痕迹,最终组成磨削

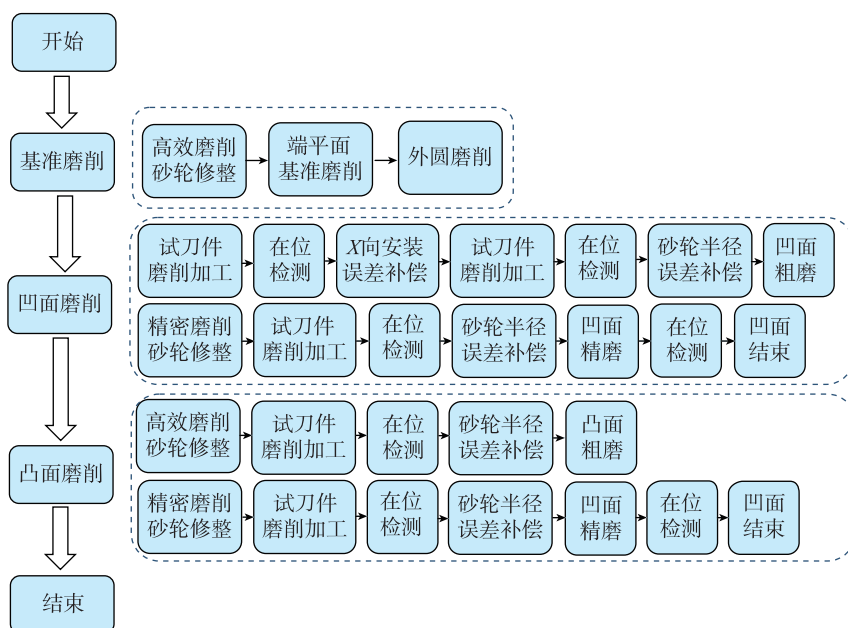


图15 非球面的超精密磨削加工流程图

Fig.15 Flow chat of ultra-precision grinding aspheric surfaces

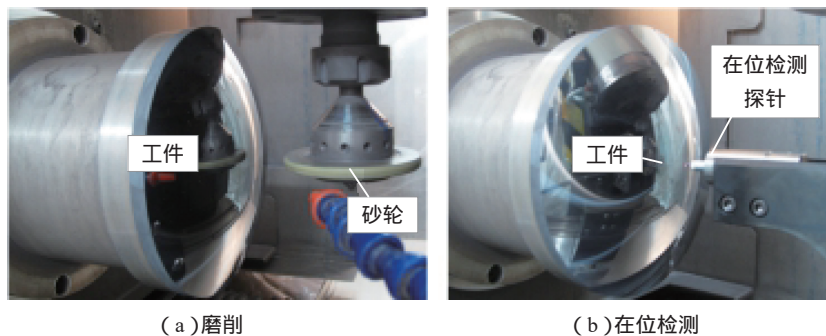


图16 单晶硅透镜的超精密磨削加工

Fig.16 Ultra-precision grinding of silicon lens

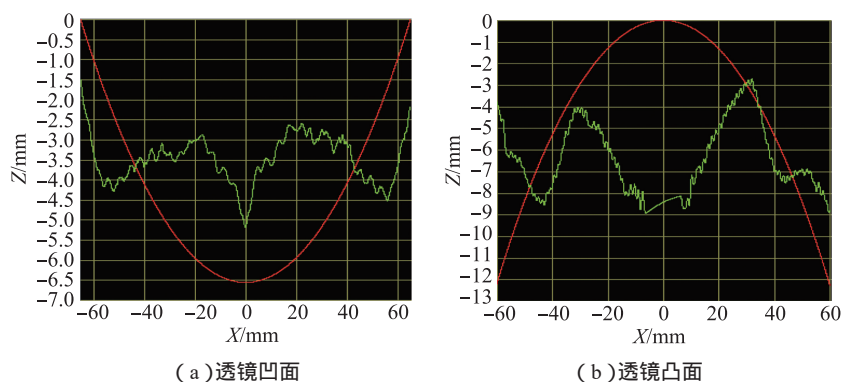


图17 工件磨削后的面形精度

Fig.17 Form accuracy of ground surfaces

纹理^[16-17]。图19所示为保形整流罩内表面超精密磨削加工时采用不同工件转速情况下(其他磨削参数相同),典型磨削纹理分布特征的预测结果。

从图19可以看出,当砂轮转速与工件转速分别设定为12420r/m和64r/m时,磨削点在高陡度非球面表面分布呈散射型,间隔较大的条纹在实际磨削过程中会构成表面中频波动,增加后续抛光难度。当砂轮转速为12300r/m、工件转速为62r/m时,则磨削条纹几乎完全消失。由此可知,磨削表面纹理的分布可以通过对工件转速或砂轮转速在小范围内进行调整、匹配进行弱化。

图20(a)~(c)分别对应内表面磨削、定位面磨削和外表面磨削过程。磨削过程中对保形整流罩面形精度影响最大的两个因素分别为砂轮、工件的对刀精度和砂轮的轮廓精度^[18-20]。磨削前需准确地确定砂轮、工件相对位置以及修整后砂轮的尺寸。磨削过程中,砂轮磨损对工件面形误差造成的影响通过“修整—磨削—检测”这一过程的迭代消除。最终磨削完成后,采用LVDT直线位移传感器的接触式测量系统进行面形精度的在位测量。图20(d)为保形整流罩外表面面形误差原位测量过程,测量结果显示,其内外表面顶部 $\phi 50\text{mm}$ 部分轮廓的面形误差分别为 $2.47\mu\text{m}$ 和 $1.7\mu\text{m}$ 。最终磨削的蓝宝石保形整流罩如图21所示。表面粗糙度采用Talysurf PGI 1240轮廓仪进行离线检测,磨削后的蓝宝石保形头罩表面粗糙度 $R_a < 30\text{nm}$ 。

3 微结构表面的超精密磨削加工

微结构表面光学元件在现代航空领域备受关注,可增加有效载荷、减小自身体积和提高导航精度,如利用微结构光学功能元件优化导引头凝视焦平面阵列成像系统,以及利用微结构光学表面改善折-衍射混合系统的结构。但微结构表面通

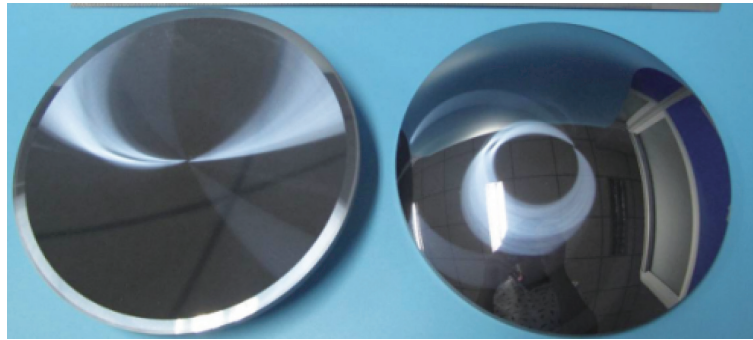
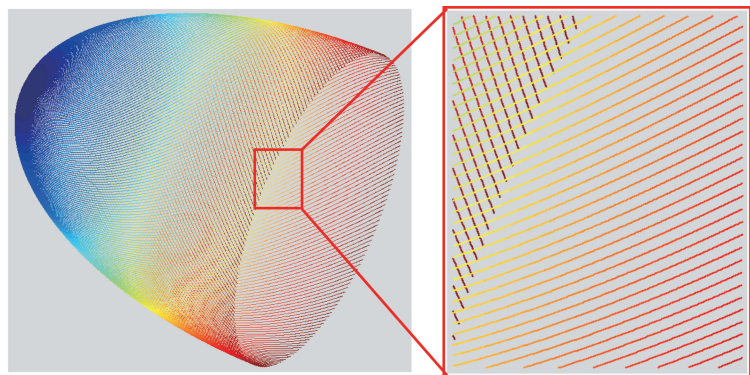
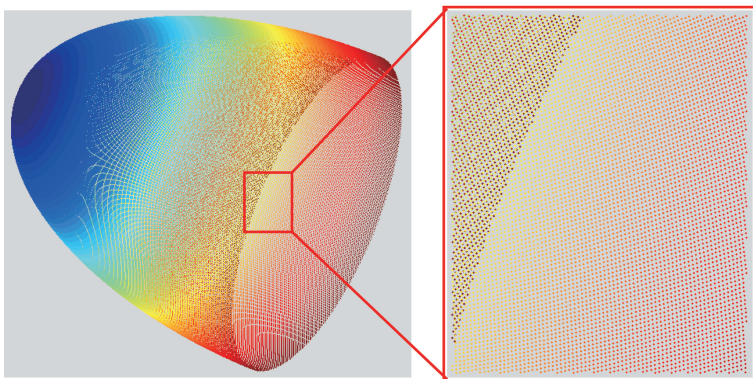


图18 工件实物图
Fig.18 Photos of workpieces



(a) 砂轮转速 12420r/m、工件转速 64r/m



(b) 砂轮转速 12300r/m、工件转速 62r/m

图19 不同转速匹配关系下的磨削点分布特征

Fig.19 Grinding point distribution characteristics under various speed matching relation

常具有很强的离散性和结构性,其表面形成机理和材料去除机理受表面几何结构变化的影响,磨削工况(如磨削轨迹、未变形磨屑厚度、磨削力和材料去除率等)处于不稳定状态,磨削加工后的微结构表面质量及亚表面损伤分布具有不均一性。同时不稳定的加工状态也使得在相同情

况下,磨削后的微结构表面比平面和曲面等传统连续表面更难获得良好的表面质量^[21-23]。为了解决以上问题,将超声振动引入微结构表面的超精密磨削加工过程中,研制了适合微结构表面磨削用的超声振动系统^[24-25],如图22所示。

以微金字塔矩阵为例(顶角为

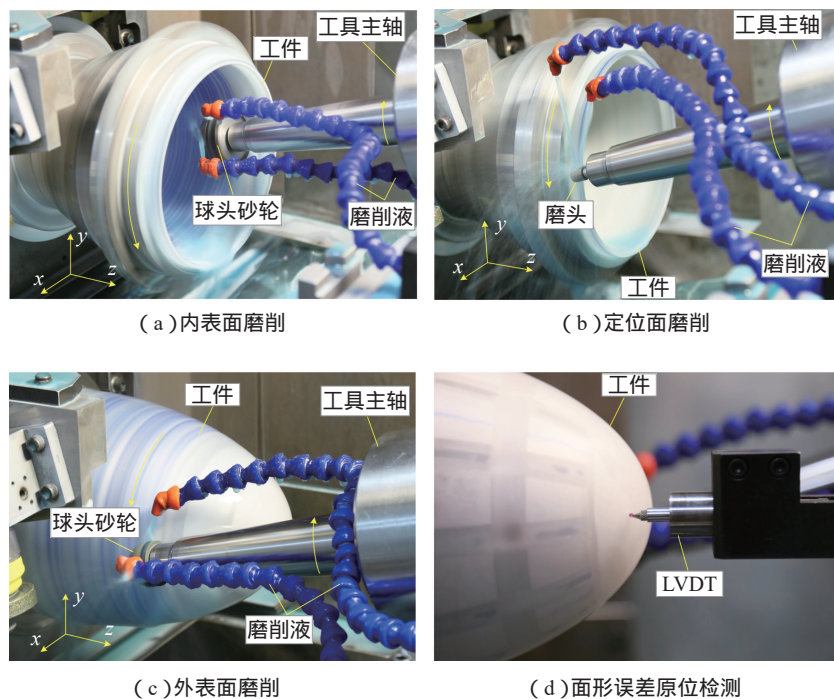


图20 保形整流罩精磨

Fig.20 Fine grinding of conformal dome

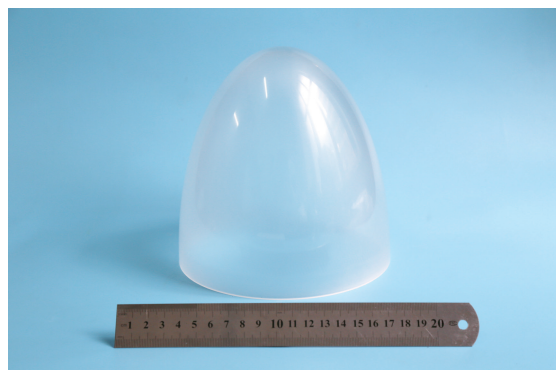


图21 精磨后的保形整流罩(蓝宝石)

Fig.21 Conformal dome after grinding

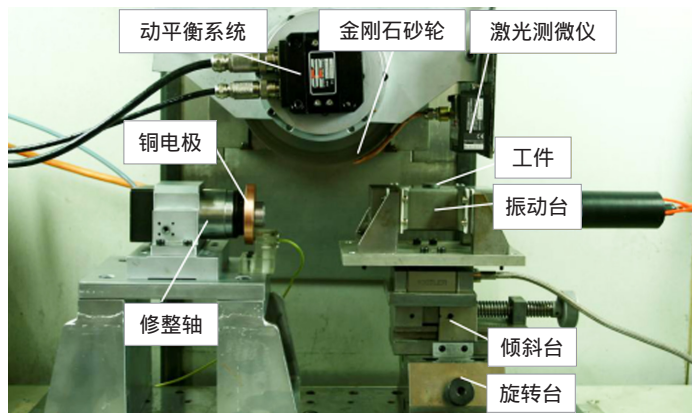


图22 微结构表面超声振动辅助磨削系统

Fig.22 Ultrasonic vibration grinding system for micro-structured surface

120°, 尺寸为 1.0mm × 1.0mm, 工件材料为无结合剂碳化钨 CW500 和碳化硅陶瓷) 进行微结构表面加工试验。磨削加工金字塔微结构矩阵时, 首先在工件表面进行一个方向上的线性槽加工。当槽全部磨削完后, 旋转工件, 使磨削后的线性槽垂直于砂轮进给方向, 然后磨削另一个方向的槽。两个垂直方向的槽交汇处即为金字塔微结构矩阵^[26-28]。加工的微金字塔矩阵如图 23 所示。可以看出, 无论是在微金字塔的顶角还是底部, 都没有脆性破碎现象以及明显的裂纹产生, 微结构表面结构规整清晰, 每个金字塔结构之间保持了较好的一致性。采用 Talysurf PGI 1240 轮廓仪对加工后的 CW500 微金字塔矩阵微结构表面进行离线检测, 测量结果表明其底部内角圆弧半径 $45\mu\text{m}$, 顶角以及侧边的尖锐部分圆弧半径均 $1\mu\text{m}$, 与 SEM 成像结果相符, 平均表面粗糙度 $R_a < 70\text{nm}</math>。而碳化硅陶瓷微金字塔矩阵的底部内角圆弧半径 $50\mu\text{m}$, 顶角以及侧边的尖锐部分圆弧半径均 $1.5\mu\text{m}$, 平均表面粗糙度 $R_a < 0.2\mu\text{m}</math>。$$

结论

本文对复杂表面光学元件的超精密磨削加工技术进行了系统的研究, 提出了一系列面向典型航空领域复杂表面光学元件的加工解决方案, 开发了具有自主知识产权的超精密磨削加工技术。

(1) 针对 3 种应用于不同复杂表面超精密磨削加工用金刚石砂轮, 分别开发了旋转绿碳化硅修整棒精密在位修整技术、基于电镀修整轮的高精度在位修整技术和旋转电极放电在位修整技术, 实现了圆弧形金刚石砂轮、球形金刚石砂轮和微小结构金刚石砂轮的在位精密修整, 为后续其超精密磨削加工提供了工具保证。

(2) 面向航空领域的 3 种典型复杂表面光学元件, 即大口径非球

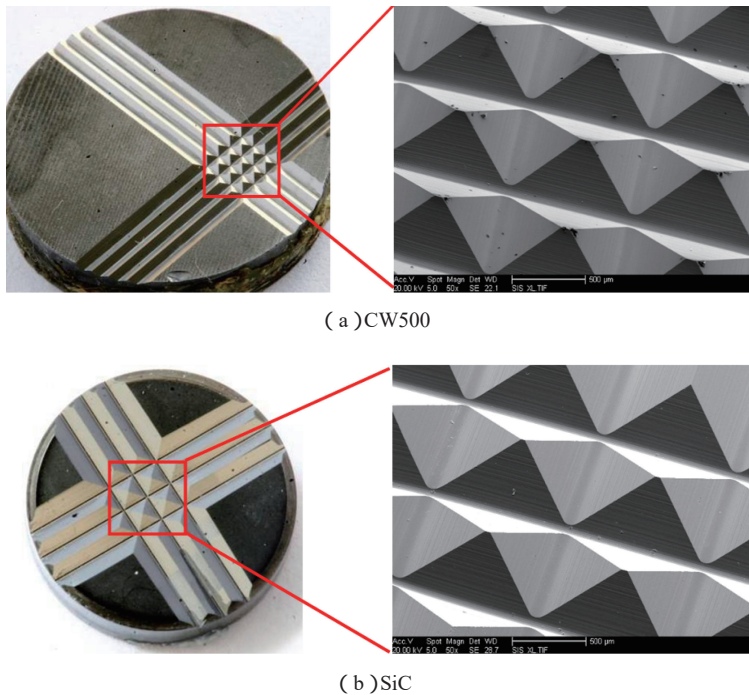


图23 微金字塔结构矩阵
Fig.23 Micro-pyramid array

面、保形整流罩及微结构光学功能表面,依据待加工元件的结构特性及材料属性,提出了具体加工解决方案,实现了其超精密磨削加工,特别是在国内首次实现了高硬度脆材料保形整流罩的精密磨削加工。

参考文献

[1] BRUZZONE A A G, COSTA H L, LONARDO P M, et al. Advances in engineered surfaces for functional performance[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, 57(2): 750-769.

[2] FANG F Z, ZHANG X D, WECKENMANN A, et al. Manufacturing and measurement of freeform optics[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62(2): 823-846.

[3] WEBSTER J, TRICARD M. Innovations in abrasive products for precision grinding[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2004, 53(2): 597-617.

[4] 张春雨, 郭兵, 王金虎, 等. 高硬度保形红外整流罩的加工发展现状[J]. *航空兵器*, 2016(6): 73-79.

ZHANG Chunyu, GUO Bing, WANG Jinhu, et al. Current status in machining of super hard and brittle conformal infrared domes[J]. *Aero Weaponry*, 2016(6): 73-79.

[5] BRINKSMEIER E, MUTLUGUNESA Y, KLOCKE F, et al. Ultra-precision grinding[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59: 652-671

[6] 赵清亮, 郭兵. 微结构光学功能元件模具的超精密磨削加工技术[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(21): 177-185.

ZHAO Qingliang, GUO Bing. Utraprecision grinding technology of microstructured optical functional molds[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(21): 177-185.

[7] WEGENER K, HOFFMEISTER H W, KARPUSCHEWSKI B, et al. Conditioning and monitoring of grinding wheels[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2011, 60(2): 757-777.

[8] 陈冰, 郭兵, 赵清亮, 等. 树脂基圆弧金刚石砂轮的在位精密成形修整技术[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(11): 193-200.

CHEN Bing, GUO Bing, ZHAO Qingliang, et al. On-machine precision form truing of resin bonded arc-shaped diamond wheels[J]. *Journal*

of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 193-200.

[9] CHEN B, GUO B, ZHAO Q. On-machine precision form truing of arc-shaped diamond wheels[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 223: 65-74.

[10] CHEN B, GUO B, ZHAO Q. On-machine truing of diamond wheel and high-efficiency grinding of monocrystal silicon for aspheric surface[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2017, 231(1): 186-192.

[11] GUO B, ZHAO Q. On-machine dry electric discharge truing of diamond wheels for micro-structured surfaces grinding[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 88: 62-70.

[12] GUO B, ZHAO Q. Mechanical truing of V-shape diamond wheels for micro-structured surface grinding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(5-8): 1067-1073.

[13] GUO B, ZHAO Q. Wheel normal grinding of hard and brittle materials[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(5-8): 873-880.

[14] CHEN B, GUO B, ZHAO Q. An investigation into parallel and cross grinding of aspheric surface on monocrystal silicon[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80(5-8): 737-746.

[15] GUO B, ZHAO Q, FANG X. Precision grinding of optical glass with laser micro-structured coarse-grained diamond wheels[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(5): 1045-1051.

[16] GUO B, ZHAO Q, LI H. Utraprecision grinding of TiC-based cermet hemisphere couples[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 73(9-12): 1281-1289.

[17] CHEN B, LI S, DENG Z, et al. Grinding marks on ultra-precision grinding spherical and aspheric surfaces[J]. *International Journal of Precision Engineering and*

Manufacturing-Green Technology, 2017, 4(4): 419–429.

[18] WANG J, GUO B, ZHAO Q, et al. Dependence of material removal on crystal orientation of sapphire under cross scratching[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(6): 2465–2472.

[19] WANG J, GUO B, ZHAO Q, et al. Evolution of material removal modes of sapphire under varied scratching depths[J]. Ceramics International, 2017, 43(13): 10353–10360.

[20] WANG J, GUO B, ZHAO Q, et al. Investigation into the anisotropy of cross-grinding surface quality in C-and M-planes of sapphire[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017: 0954405417718596.

[21] 郭兵, 张春雨, 王金虎, 等. ALON 高厚度薄壁保形非球面的超精密磨削工艺[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 93–99.

GUO Bing, ZHANG Chunyu, WANG Jinhui, et al. Ultra-precision grinding process of high-gradient thin conformal aspheric on ALON

ceramic[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 93–99.

[22] GUO B, ZHAO Q, JACKSON M J. Precision grinding of binderless ultrafine tungsten carbide (WC) microstructured surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(5–8): 727–735.

[23] 郭兵, 赵清亮, JACKSON Mark J, et al. 超硬微结构表面模具的精密磨削加工技术[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 174–179.

GUO Bing, ZHAO Qingliang, JACKSON M J, et al. Investigation of precision grinding process on superhard molds with microstructured surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 174–179.

[24] GUO B, ZHAO Q L, JACKSON M J. Ultrasonic vibration-assisted grinding of micro-structured surfaces on silicon carbide ceramic materials[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(3): 553–559.

[25] GUO B, WU M, ZHAO Q, et al. Improvement of precision grinding performance of CVD diamond wheels by micro-structured surfaces[J]. Ceramics International, 2018, 44(14): 17333–17339.

[26] GUO B, ZHAO Q, YU X. Surface micro-structuring of coarse-grained diamond wheels by nanosecond pulsed laser for improving grinding performance[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(10): 2025–2030.

[27] WU M, GUO B, ZHAO Q, et al. Precision grinding of a microstructured surface on hard and brittle materials by a microstructured coarse-grained diamond grinding wheel[J]. Ceramics International, 2018, 44(7): 8026–8034.

[28] GUO B, ZHAO Q. Ultrasonic vibration assisted grinding of hard and brittle linear micro-structured surfaces[J]. Precision Engineering, 2017, 48: 98–106.

通讯作者: 郭兵, E-mail: guobing@hit.edu.cn.

Ultra-Precision Grinding and On-Machine Precision Truing for Optical Elements With Complex Surfaces

GUO Bing¹, ZHAO Qingliang¹, CHEN Bing², WANG Jinhui³, ZHANG Chunyu¹,
WU Mingtao¹, PAN Yongcheng¹

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Intelligent Manufacturing Institute, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
3. Ultra-precision Machining Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

[ABSTRACT] Micron-scale surface accuracy and nano-scale surface roughness, as well as the processing interference, path limitation, tool wear, and inefficiency caused by their surface structure, restrict the application of complex surface optical components seriously. In order to solve it, the ultra-precision grinding of the typical complex surface optical components was investigated systematically. A variety of on-machine precision truing for diamond grinding wheels was proposed, and the corresponding ultra-precision grinding technologies were presented. As the results, the single crystal silicon aspheric surface with the roughness R_a of less than 5nm, the form accuracy PV of less than 527nm/140mm; the sapphire conformal window with the form accuracy PV of less than 2.5 μ m/50mm; the binderless tungsten carbide micro-structured surface with the roughness R_a of less than 70nm was obtained by ultra-precision grinding.

Keywords: Complex surfaces; Optical elements; Ultra-precision grinding; On-machine precision truing; Diamond grinding wheel

(责任编辑 古系)