

文章编号 1004-924X(2017)01-0093-07

ALON 高陡度薄壁保形非球面的超精密磨削工艺

郭 兵^{1*}, 张春雨¹, 王金虎¹, 赵清亮¹, 陈洪许², 孙金霞², 于 欣³

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院 精密工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;

3. 哈尔滨工业大学 航天学院 光电子技术研究所, 哈尔滨 黑龙江 150080)

摘要: 为了实现新型红外陶瓷 ALON 高陡度薄壁保形非球面的超精密磨削加工, 首先根据 ALON 的材料属性和高陡度薄壁保形非球面的结构特性, 进行了其超精密磨削加工工艺性分析, 并基于有限元计算方法, 完成了面向 ALON 高陡度薄壁保形非球面的精密夹具的设计以及关键参数的优化。然后完成了 ALON 的超精密磨削工艺实验, 工艺实验结果表明减小工件转速和砂轮粒度都会降低 ALON 的平均表面粗糙度 R_a 值, 但砂轮粒度对磨削后 ALON 的表面粗糙度影响更显著。最后实现了 ALON 高陡度薄壁保形非球面的超精密磨削加工, 磨削后的 ALON 高陡度薄壁保形非球面的面形精度 PV 值为 $2\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度 R_a 值可达 $8.6\ \text{nm}$ 。

关键词: 高陡度薄壁结构; 保形非球面; ALON; 超精密磨削; 夹具设计

中图分类号: TG580 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0093

Ultra-precision grinding process of high-gradient thin conformal aspheric on ALON ceramic

GUO Bing^{1*}, ZHANG Chun-yu¹, WANG Jin-hu¹, ZHAO Qing-liang¹,

CHEN Hong-xu², SUN Jin-xia², YU Xin³

(1. Center for Precision Engineering, School of Mechatronics Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

3. Institute of Opto-Electronics, School of Astronautics,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: guobing@hit.edu.cn

Abstract: In order to realize the ultra-precision grinding of high-gradient thin conformal aspheric on ALON infrared ceramic, the material property of ALON and the structured feature of high-gradient thin conformal aspheric was analyzed firstly. The precision jig was design and the main dimensions were optimized by finite element method. Secondly, the ALON grinding experiments were implemented. The results indicated that although the roughness would reduce with the decrease of workpiece spindle speed and wheel abrasive size, the effect of abrasive size on roughness was more significant. Finally, the ultra-precision grinding procedures were established for ALON high-gradient

收稿日期: 2016-06-05; 修订日期: 2016-07-20.

基金项目: 航空科学基金资助项目 (No. 20140177003); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2015T80337).

thin conformal aspheric. The form accuracy PV value of ground ALON workpiece was $2\ \mu\text{m}$, while the surface roughness was $8.6\ \text{nm}$.

Key words: high-gradient thin structure; conformal aspheric; ALON; ultra-precision grinding; jig design

1 引言

保形红外窗口以其卓越的空气动力学性能而受到了日益广泛的关注。相对于传统的平面或球面窗口,保形窗口可显著降低飞行器的飞行阻力,改善飞行器周围的空气流场,减小气动光学效应对红外成像质量的影响,从而大幅提高飞行器的性能^[1-3]。

保形红外窗口的非常规形状与传统窗口相比具有较大优势,但这也给其超精密加工带来了极大的困难和挑战,特别是飞行器前端的高陡度薄壁保形非球面窗口。其不但要求具有较高的表面光洁度以提高透光率,而且其面形精度也要求能够达到微米甚至亚微米级用以保证其内部红外光学系统的成像质量^[4-6]。此外,为了抵抗飞行器在高速飞行时承受的巨大冲击,飞行器前端的保形窗口材质正在向具有高强度、高硬度、易成型的新颖红外陶瓷发展,如氮氧化铝(ALON),这为其超精密加工提出了更高要求。

目前,面向高陡度保形窗口的超精密加工技术主要有化学气相沉积法、金刚石车削技术和超精密磨削加工技术等。化学气相沉积法通过沉积直接产生最终精度的光滑表面,但受材料限制,目前主要针对 ZnS 和 SiO₂^[7]。金刚石车削技术能直接加工出表面粗糙度达 $10\ \text{nm}$ 的光学表面,但会在工件表面留下周期性波纹,对成像质量有较大的影响,而且对于 ALON 等红外陶瓷材料,由于刀具磨损过快,还无法适用^[8]。超精密磨削加工技术可以实现多种材料和面形光学零件的高精度加工,对于 ALON 红外陶瓷材料,超精密磨削加工技术是目前唯一有效的加工方法^[9-10]。

为了实现 ALON 高陡度薄壁保形非球面的超精密磨削加工,本文首先针对其材料属性和结构特性,分析其超精密磨削加工工艺性,并基于有限元计算方法对 ALON 高陡度薄壁保形非球面用的精密夹具进行设计以及关键参数的优化。然后针对工件转速和砂轮粒度进行 ALON 的超精

密磨削工艺实验研究。最后基于工艺实验结果,制定适用于 ALON 高陡度薄壁保形非球面的磨削加工工艺路径,并对磨削后的 ALON 高陡度薄壁保形非球面进行面形精度和表面粗糙度的检测。

2 磨削实验系统设置

2.1 ALON 材料性能

ALON(Al₂₃O₂₇N₃₅)是一种各向同性的均质透红外多晶陶瓷材料,具有优异的光学、力学及热物理性能,其强度和硬度与蓝宝石相近,但制造成本则低于蓝宝石,而且 ALON 通常为由粉末压制烧结而成,其毛坯件的制备效率远高于蓝宝石,因而它是高马赫数飞行器红外光学窗口的优选材料。如表 1 所示为 ALON 的主要材料参数^[11]。

表 1 ALON 的材料性能^[11]

Tab. 1 Materials property of ALON

参数	单位	数值	参数	单位	数值
透过范围	μm	0.33~5.1	密度	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.71
透过率	%	85	断裂韧性	$\text{Mpa}\cdot\text{m}^{-0.5}$	1.4
折射率		1.74	硬度	Mpa	16 000
泊松比		0.24	熔点	$^{\circ}\text{C}$	2 140
杨氏模量	Gpa	317	热导率	$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	12.6
抗弯强度	Mpa	300	热膨胀率系数	$1/^{\circ}\text{C}$	5.8×10^{-6}

2.2 ALON 高陡度薄壁保形非球面的磨削工艺分析

为了在红外光学性能的前提下有效改善飞行器的空气动力学性能,飞行器前端的红外光学窗口通常都为高陡度薄壁保形非球面,其长径比一般大于 0.8。传统的面向于球面的铣磨-抛光加工工艺,以及针对于低陡度非球面透镜的磨削加工方法都不能很好的适用于这种高陡度薄壁保形非球面的超精密磨削加工。由于针对的高陡度薄壁保形非球面的结构尺寸大($120\ \text{mm}$ 口径)、壁厚薄(厚度为 $3\sim 4\ \text{mm}$)、材料硬度高(ALON 硬

度为 16 000 Mpa),且为大陡度非球面(最大陡度为 87°),因此,在选择磨削加工方法时应该重点考虑两个方面,一方面应有利于抑制砂轮磨损,保证 ALON 高陡度薄壁保形非球面的面形精度;另一方面应在机床磨削尺寸能力范围内避免发生干涉。

实验所使用的磨床是一台三轴联动超精密加工机床,机床具有在位测量与误差补偿功能,机床 X 轴和 Z 轴成 T 形分布,Y 轴安装在 X 上,X 轴和 Z 轴的行程为 350 mm。工件主轴安装在 Y 轴上,最高转速为 10 000 rpm,主轴径向跳动小于 20 nm。磨削主轴则垂直放置在 Z 轴工作台上。一方面能够避免加工干涉,另一方面尽量选用大尺寸的砂轮从而抑制砂轮修整精度和磨损对磨削后工件面形精度的影响。综合考虑,最终选择直径为 75 mm 的圆弧形碟片金刚石砂轮,采用 Cross 磨削法进行磨削加工,如图 1 所示。

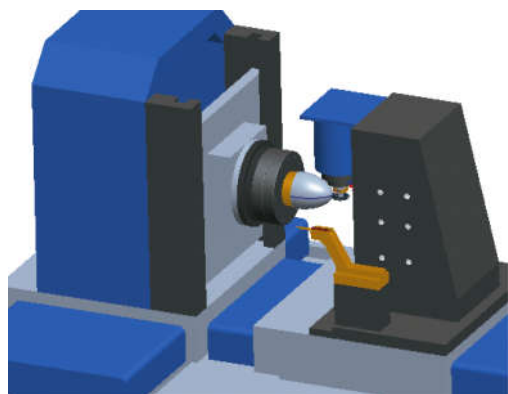


图 1 ALON 高陡度薄壁保形非球面的磨削加工方法
Fig. 1 Grinding methods of ALON high-gradient thin conformal aspheric

3 精密夹具的有限元设计

ALON 高陡度薄壁保形非球面由于其高陡度和壁厚薄的结构特性,无法进行光学非球面加工中常用的直接真空吸附装夹或中空黏结装夹。如果简单地采用 ALON 工件的内表面与夹具表面完全贴合的装夹形式,ALON 工件内表面和夹具表面都不可避免地具有一定的面形误差,因此二者的贴合面不可避免的为局部接触甚至点接触,在磨削力的影响下将导致受力变形,而且局部的应力集中很可能导致 ALON 工件表面的崩碎,造成局部损伤。因此需对其精密夹具进行有

限元设计,从而保证磨削后非球面的面形精度。

3.1 精密夹具工作高度的设计

精密夹具工作高度的变化,主要影响的是 ALON 高陡度薄壁保形非球面与夹具未接触部分在法向磨削力作用下的总变形量。将 ALON 工件顶部未与夹具相接触部分单独取出进行 ANSYS 静力学分析,通过改变 ALON 工件的悬空高度,获得在不同夹具工作高度下的最大受力变形量。设定 ALON 工件厚度为 3 mm,将 ALON 工件悬空部分的环形底面进行自由度约束,分别在 ALON 工件的顶部和悬空部分的 1/2 高度处施加 100 N 法向磨削力,如图 2 所示。

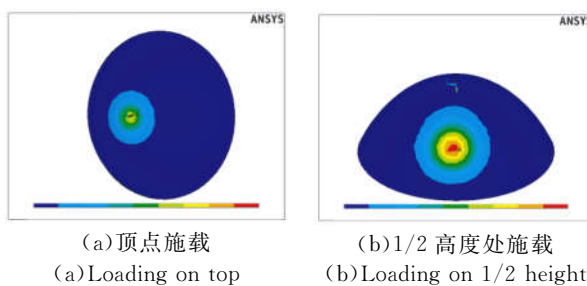


图 2 不同施载位置下的仿真

Fig. 2 Simulation with different loading position

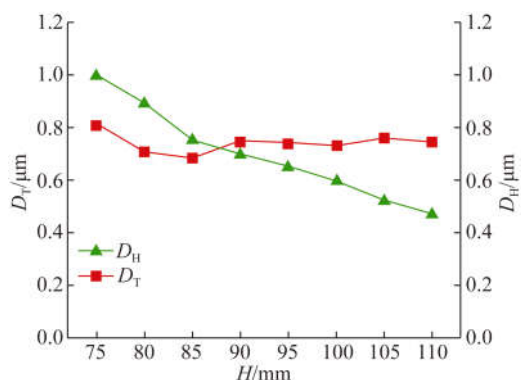


图 3 夹具工作高度对变形量的影响

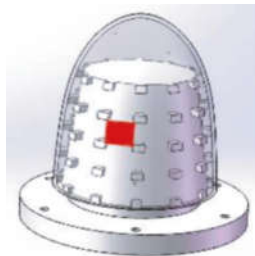
Fig. 3 Effect of jig working height on deformation

图 3 所示为夹具工作高度对 ALON 高陡度薄壁保形非球面磨削受力变形量的影响规律。当法向磨削力的施载处为 ALON 工件的顶点时,随着夹具工作高度由 110 mm 减小到 75 mm,ALON 工件的最大变形量并未发生明显变化,而当法向磨削力的施载处为 ALON 工件悬空部分的 1/2 高度处时,随着夹具工作高度由 110 mm 减小到 75 mm,ALON 工件的最大变形量逐渐增

大。综合考虑,选择夹具工作高度为 80 mm,保证 ALON 工件的悬空部分在磨削过程中由受力变形而产生的误差在 1 μm 以内。

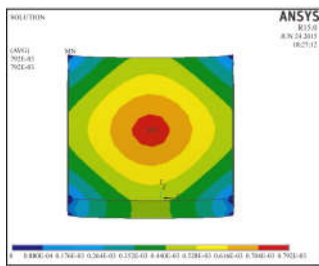
3.2 精密夹具表面沟槽宽度的设计

为了进一步减小由 ALON 工件和夹具间局部接触所引起的受力变形,夹具表面采用蜂窝状结构,蜂窝状接触区之间的交叉槽尺寸决定了 ALON 工件的悬空面积大小。对其尺寸进行有限元仿真,交叉槽优化尺寸为 10 mm×10 mm~25 mm×25 mm,将由此引起的 ALON 工件局部悬空部分的四角进行自由度约束,在悬空部分中心施加 100 N 法向磨削力,如图 4 所示。



(a) 蜂窝状夹具表面

(a) Alveolate jig surface



(b) ALON 悬空部分施载

(b) Loading on unsupported ALON

图 4 蜂窝状夹具表面仿真设置

Fig. 4 Simulation setup for alveolate jig surface

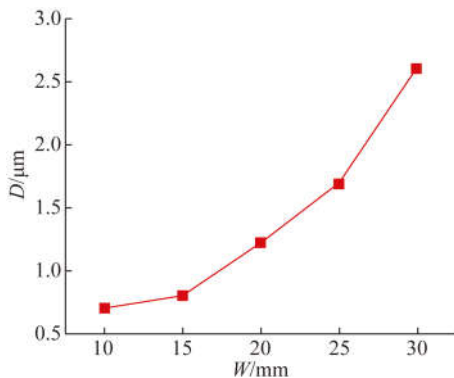


图 5 夹具表面沟槽宽度对变形量的影响

Fig. 5 Effect of jig groove width on deformation

图 5 所示为夹具表面沟槽宽度对 ALON 高陡度薄壁保形非球面磨削受力变形量的影响规律。随着夹具表面沟槽宽度由 10 mm 增加到 30 mm, ALON 工件的最大变形量逐渐增大。为了保证 ALON 工件在磨削过程中由受力变形而产生的误差在 1 μm 以内,选择沟槽宽度为 15 mm。

3.3 精密夹具厚度的设计

为了在保证夹具刚度的前提下减轻其重量,对夹具采用中空设计,对其夹具厚度进行有限元仿真。假设在磨削过程中砂轮施加在 ALON 工件上的正压力全部传递到蜂窝状夹具的一个矩形接触单元上,分别在夹具的上、中、下 3 个接触单元上施加 100 N 法向磨削力,并在夹具底面施加约束,如图 6 所示。

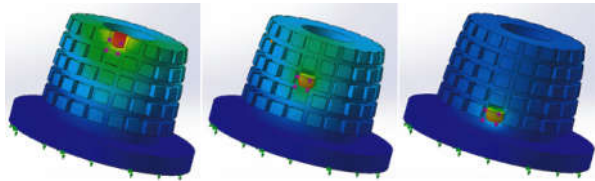


图 6 夹具厚度仿真的施载位置

Fig. 6 Loading position in thickness simulation

图 7 所示为夹具厚度对夹具受力变形量的影响规律。随着夹具厚度由 10 mm 增加到 30 mm,夹具的最大变形量逐渐减小。为了保证夹具在磨削过程中有足够的刚度,从而保证 ALON 工件由此产生的受力变形误差在 1 μm 以内,选择夹具厚度为 15 mm。

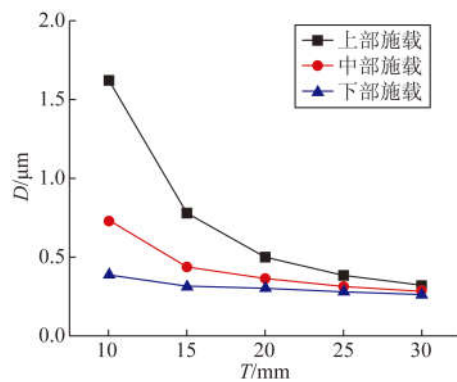


图 7 夹具厚度对夹具变形量的影响

Fig. 7 Effect of jig thickness on jig deformation

根据设计结果,制备的 ALON 高陡度薄壁保

形非球面用精密夹具及装夹后的工件如图 8 所示。装夹时首先将夹具放置在一个手动转台上,通过激光测微仪保证夹具中心与转台中心一致,然后将 ALON 工件套在夹具上,通过激光测微仪分别检测工件中间部分和底部的圆跳,从而调整工件的倾斜,保证工件的中心轴与夹具中心轴平行,然后用低应力胶在工件底部与夹具进行胶连固定完成装夹。



图 8 精密夹具及装夹后的 ALON 工件毛坯
Fig. 8 Precision jig and chamfered ALON workpiece

4 超精密磨削加工工艺实验

4.1 工艺实验设计

在进行 ALON 高陡度薄壁保形非球面的超精密磨削加工前先进行磨削工艺实验研究。工艺实验中采用的 ALON 样件直径为 20 mm,砂轮采用直径为 75 mm 的圆弧形碟片金刚石砂轮,砂轮圆弧半径为 6 mm。磨削前采用绿碳化硅棒对圆弧形碟片金刚石砂轮进行在位精密修整^[12]。具体工艺实验方案如表 2 所示。磨削后分别采用 Tayler Hobson 探针式轮廓仪和扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM)对样件的表面粗糙度和表面形貌进行测量。

表 2 磨削工艺实验方案

Tab. 2 Scheme of grinding experiments

金刚石砂轮	50%浓度的树脂基砂轮
砂轮粒度	D3, D7, D15, D20
砂轮转速/rpm	6 000
工件转速/rpm	39, 57, 93, 137
进给速度(mm·min ⁻¹)	5
磨削深度/μm	1
磨削液	水基磨削液

4.2 ALON 的磨削工艺分析

图 9 所示为工件转速对磨削后 ALON 表面粗糙度的影响规律。随着工件转速从 137 rpm 降低到 39 rpm, ALON 样件的平均表面粗糙度 R_a 值逐渐减小,由 27 nm 减小到 15 nm。这主要是由磨削过程中的未变形磨屑厚度变化引起的,通常来讲,表面粗糙度会随未变形磨屑厚度的增加而增加^[13]。更高的工件转速意味着更大的未变形磨屑厚度,也就会导致平均表面粗糙度的增大。但需要注意的是,工件转速在 59 rpm 时,平均表面粗糙度 R_a 值为 16 nm,仅比 39 rpm 时提高了 1 nm。

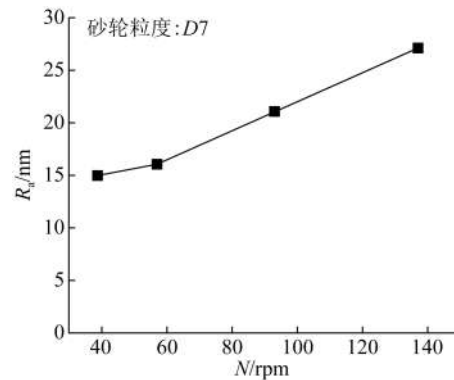


图 9 工件转速对 ALON 表面粗糙度的影响

Fig. 9 Effect of workpiece spindle speed on roughness

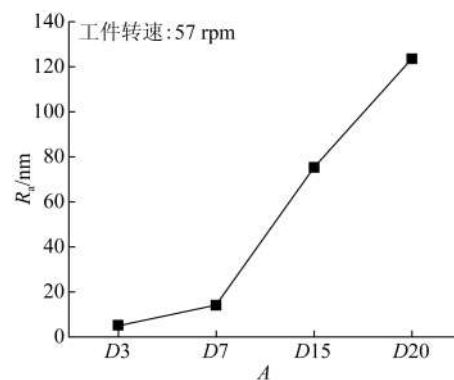


图 10 砂轮粒度对 ALON 表面粗糙度的影响

Fig. 10 Effect of abrasive size on roughness

图 10 所示为砂轮粒度对磨削后 ALON 表面粗糙度的影响规律。与工件转速相比,砂轮粒度对磨削后 ALON 样件的平均表面粗糙度 R_a 值的影响更为明显。随着树脂基金刚石砂轮粒度的减小,ALON 的表面粗糙度急剧减小,当砂轮粒度为 D20 时,ALON 样件的表面粗糙度 R_a 值为 123 nm;当粒度减小为 D15 时,ALON 的 R_a 值

为 75 nm;而当砂轮粒度进一步减小为 D7 时, ALON 的 R_a 值减小到 16 nm;最后当选用 D3 粒度的金刚石砂轮时, ALON 的 R_a 值仅为 5 nm。

进一步采用 SEM 对不同砂轮粒度下获得的 ALON 磨削表面进行成像,如图 11 所示。当选用 D20 砂轮磨削,磨削后其表面表现为大面积脆性断裂去除,实验中减小磨削参数(进给速度 1 mm/min 和磨削深度 $0.5 \mu\text{m}$)再一次对 ALON 进行磨削,结果表面磨削后的 ALON 表面形貌变化不大,仍然存在大面积脆性崩碎。产生这种现象的原因为:氮氧化铝是一种多晶硬脆材料,实验选取高温烧结法制备的氮氧化铝,材料本身晶界间以及晶粒内部存在较大的应力以及缺陷,在砂轮粒度较大的磨削过程中,砂轮金刚石颗粒与材料表面相互作用力较大,极易造成晶粒脆性断裂以及晶粒拔出等影响。减小砂轮粒度,采用 D15 砂轮磨削后的 ALON 表面塑性域去除和脆性域去除两种现象同时存在,脆性去除部分呈现微崩碎特点。进一步采用 D7 粒度的金刚石砂轮,磨削后工件表面质量有明显的改善,并且材料的脆性去除逐渐消失,仅有少量微崩碎存在。当采用 D3 粒度砂轮进行磨削后,ALON 磨削表面质量得到了极大提高,ALON 材料去除表现为塑性域去除,脆性崩碎完全消失。采用较大的磨削参数(进给速度 10 mm/min 和磨削深度 $2 \mu\text{m}$)使用 D3 粒度砂轮再次进行磨削,结果表面磨削后的 ALON 表面形貌变化不大,同样为塑性域磨削。但当进一步提高磨削参数后,磨削过程由于砂轮去除能力的不足而发生砂轮表面烧伤现象,实验中断。

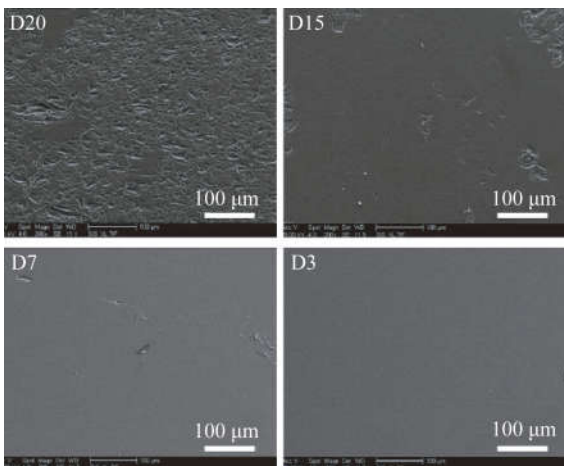


图 11 不同砂轮粒度的 ALON 表面形貌

Fig. 11 ALON morphology by different abrasive size

4.3 ALON 高陡度薄壁保形非球面的超精密磨削

ALON 高陡度薄壁保形非球面的超精密磨削过程如图 12 所示。综合考虑工艺研究结果,首先对装夹后的 ALON 工件进行粗加工,砂轮采用 D20 粒度的金刚石砂轮。为了获得较高的磨削效率,粗加工选用的磨削工艺参数为:磨削深度为 $20 \mu\text{m}$,磨削主轴转速为 6 000 rpm,工件主轴转速为 57 rpm,砂轮进给速度为 20 mm/min。粗加工后采用粒度为 D7 的金刚石砂轮进行半精加工,磨削工艺参数为:磨削深度为 $5 \mu\text{m}$,磨削主轴转速为 6 000 rpm,工件主轴转速为 57 rpm,砂轮进给速度为 10 mm/min。最后采用 D3 金刚石砂轮进行精加工,精加工选用的磨削工艺参数为:磨削深度为 $1 \mu\text{m}$,磨削主轴转速为 6 000 rpm,工件主轴转速为 57 rpm,砂轮进给速度为 5 mm/min。



图 12 ALON 高陡度薄壁保形非球面的磨削过程照片

Fig. 12 Photo of ALON high-gradient thin conformal aspheric grinding process

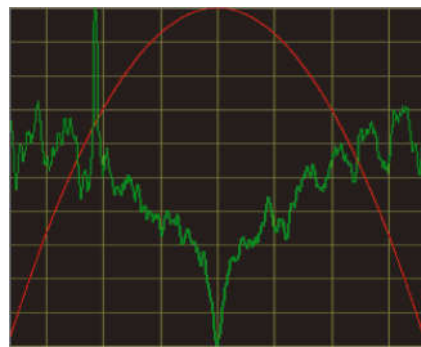


图 13 ALON 工件的面形精度检测结果

Fig. 13 Form accuracy of ALON workpiece

ALON 高陡度薄壁保形非球面磨削加工完成后分别采用机床自带的在位检测系统和 Tayler Hobson 探针式轮廓仪对其面形精度和表面粗糙度进行检测分析。ALON 高陡度薄壁保形非球面的面形精度 PV 值检测结果为 $2 \mu\text{m}$ (测

量范围 36 mm),如图 13 所示。表面粗糙度 R_a 值检测结果为 8.6 nm。

5 结 论

本文针对新型红外陶瓷 ALON 高陡度薄壁保形非球面的材料属性和结构特性,进行了其超精密磨削加工工艺性分析。并基于有限元计算方法,完成了面向 ALON 高陡度薄壁保形非球面的精密夹具的设计,将由磨削过程中受力变形而产

生的误差控制在 $1\ \mu\text{m}$ 内。完成了 ALON 的超精密磨削工艺实验,实验结果表明减小工件转速和砂轮粒度都会降低 ALON 的平均表面粗糙度 R_a 值,但砂轮粒度对磨削后 ALON 的表面粗糙度影响更显著。采用 D3 粒度的金刚石砂轮可获得 R_a 值为 5 nm 的表面粗糙度。制定了适用于 ALON 高陡度薄壁保形非球面的磨削加工工艺路径,实现了其超精密磨削加工。最终加工的 ALON 高陡度薄壁保形非球面的面形精度 PV 值为 $2\ \mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 值为 8.6 nm。

参考文献:

- [1] SHANNON R R, MILS J P, POLICOVE H M. Conformal optics technology enables window shapes that conform to an application, not to conventional optical limitations [J]. *Photonics Spectra*, 2001, 35(4):26-34.
- [2] 李圣怡. 保形红外光学元件制造技术[J]. 航空精密制造技术, 2008(24):55-57.
LI SH Y. Manufacturing technology of conformal infrared optical component [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008(24):55-57. (in Chinese)
- [3] 樊会涛,崔颖,天光. 空空导弹 70 年发展综述[J]. 航空兵器, 2016, 2(1):3-12.
FAN H T, CUI H, TIAN G. A review on the 70-year development of air-to-air missiles [J]. *Aero Weaponry*, 2016, 2(1):3-12. (in Chinese)
- [4] DEFISHER S, FESS E, WOLFS F. Freeform and conformal optical manufacturing [J]. *SPIE*, 2013, 8308.
- [5] NELSON J D, GOULD A, SMITH N. Advances in freeform optics fabrication for conformal window and dome applications [J]. *SPIE*, 2013, 8708.
- [6] SCHOEN J. Conformal ogive ALON dome fabrication[R]. COM, 2004, 9, 16.
- [7] GOELA J S, ASKINAZI J, ROBINSON B. Replication of conformal surfaces by chemical vapor deposition [C]. *Proc. of the 8th Electromagnetic Window Symposium, Portland*, 2004, 4:313-326.
- [8] 张发. 热压多晶氟化镁保形头罩加工工艺研究[D]. 长沙:国防科技大学硕士论文, 2009.
ZHANG F. *Research on Processing Technics of Hot-Pressed Poly-Crystal Magnesium Fluoride Conformal Dome* [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [9] SCHAEFER P, EICHHOZ A R, SULZBACH C F. Fabrication challenges associated with conformal optics [J]. *SPIE*, 2001, 4375.
- [10] RUCKMAN L J, FESS M E, POLICOVE H M. Deterministic processes for manufacturing conformal (freeform) optical surfaces [J]. *SPIE*, 2001, 4375:108-113.
- [11] 武琪,王思青,张长瑞,等. 耐高温透明 ALON 陶瓷的研究进展与展望[J]. 硅酸盐通报, 2013, 4(32):657-662.
WU Q, WANG S Q, ZHANG CH R, et al.. Progress and prospect of high temperature transparent ALON ceramics [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 4(32):657-662. (in Chinese)
- [12] CHEN B, GUO B, ZHAO Q L. On-machine precision form truing of arc-shaped diamond wheels [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 223:65-74.
- [13] GUO B, ZHAO Q L. Wheel normal grinding of hard and brittle materials [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(5-8):873-880.

作者简介:



郭兵(1983—),男,吉林延吉人,博士,讲师,2012年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要研究方向为复杂光学表面的超精密加工技术及新型微结构化磨削工具的制备。E-mail: guobing@hit.edu.cn



张春雨(1988—),男,黑龙江五常人,博士研究,主要从事高硬脆红外光学保形元件的超精密加工技术研究。E-mail: zhangchunyu880420@163.com