



DOI: 10.12086/oe.2020.200147

## 复杂曲面铝反射镜超精密制造现状

徐超<sup>1,2</sup>, 彭小强<sup>1,2\*</sup>, 戴一帆<sup>1,2</sup><sup>1</sup>国防科技大学装备综合保障国防科技重点实验室, 湖南长沙 410073;<sup>2</sup>国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073

**摘要:** 由于复杂曲面铝反射镜所具有的独特优势, 其在光学系统中的应用越来越广泛。但是只采用超精密车削加工的光学反射镜精度受到超精密车削加工“误差复映”的限制, 只能满足红外系统应用需求, 其应用的进一步推广遭遇瓶颈。采用超精密车削、磁流变抛光、计算机控制表面成形(CCOS)的组合加工工艺, 并结合复杂光学曲面的计算全息图法(CGH)面形检测技术, 可以进一步提升铝反射镜的面形精度, 满足可见光系统的应用需求, 为复杂曲面铝合金反射镜的推广奠定了制造基础。

**关键词:** 复杂曲面; 铝反射镜; 超精密车削; 抛光; 计算全息图法(CGH)

**中图分类号:** TH74; TH161

**文献标志码:** A

**引用格式:** 徐超, 彭小强, 戴一帆. 复杂曲面铝反射镜超精密制造现状[J]. 光电工程, 2020, 47(8): 200147

## Current status of ultra-precision manufacturing of complex curved aluminum reflectors

Xu Chao<sup>1,2</sup>, Peng Xiaoqiang<sup>1,2\*</sup>, Dai Yifan<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;<sup>2</sup>College of Intelligent Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract:** Due to the unique advantages of complex curved aluminum mirrors, its application in optical systems is becoming more and more widespread. However, the accuracy of optical mirrors that are only processed by ultra-precision turning is limited by the "error reflection" of ultra-precision turning, which can only meet the application requirements of infrared systems, and its further promotion and application have encountered bottlenecks. The combined processing technology of ultra-precision turning, magnetorheological polishing, and computer-controlled surface forming (CCOS), combined with the computational hologram method (CGH) of the complex optical curved surface (CGH) surface shape detection technology, can further improve the surface shape accuracy of the aluminum reflector, to meet the application requirements of visible light systems, and lay the foundation for the promotion and application of complex curved aluminum alloy mirrors.

**Keywords:** complex curved surface; aluminum mirror; ultra-precision turning; polishing; computer-generated hologram (CGH)

**Citation:** Xu C, Peng X Q, Dai Y F. Current status of ultra-precision manufacturing of complex curved aluminum reflectors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 200147

收稿日期: 2020-05-06; 收到修改稿日期: 2020-06-28

基金项目: 国防基础科研科学挑战专题项目(TZ2018006); 国家自然科学基金重点项目(51835013)

作者简介: 徐超(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事超精密加工技术的研究。E-mail: wjsxcr@126.com

通信作者: 彭小强(1977-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事智能装备精密工程、现代光学制造、超精密加工技术的研究。

E-mail: pengxiaoqiang@nudt.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

## 1 引言

复杂光学曲面能够简化光学系统结构、减轻系统质量、提供更加灵活的系统布局、拥有更高的设计自由度,用少数复杂曲面元件就能够代替多个传统回转对称光学曲面元件,因此复杂曲面成为反射镜面发展的重要方向<sup>[1]</sup>。相较于熔石英、光学玻璃、单晶硅和碳化硅等传统的光学材料,铝及其合金用作光学元件具有许多优点<sup>[2-3]</sup>:1)材料可加工性好、易于实现复杂曲面制造。铝反射镜能够使用已有的车削、铣削等成熟制造工艺,快速加工出镜体的基体结构,充分发挥铝材料易于成型的优势。2)可实现高轻量化率。铝合金材料不但密度低,且有着良好的可加工性。利用车削铣削就可以快速准确地完成对常规减重孔的加工制造,实现高轻量化率。3)无热化的光机一体结构设计。光学系统的安装支撑结构和反射镜镜体可采用同种铝合金材料,避免了传统光机系统中使用多种材料导致材料膨胀系数不一致带来的热应力和应变,对保持光学系统性能的长期稳定有重要意义。尤其适合在温差变化较大的环境下工作的光学系统。此外,铝合金特别是铝反射镜材料还有价格低廉、采购方便等优点。

因此,复杂曲面铝反射镜在光学系统的应用中具有十分广阔的前景。例如,由英国航天技术中心(UK Astronomy Technology Center, UKATC)设计的 SCUBA-2 红外相机,其光学系统一共采用了九块自由曲面铝镜,相比于其前一代产品 SCUBA-1 结构更加紧凑,扫描速度提高了上千倍,相机视场角提升了 12 倍<sup>[4-5]</sup>。2015 年德国夫琅和费应用光学和精密机械研究所(IOF)研制的离轴反射光学系统中的反射元件均为自由曲面铝反射镜,工作于长波红外波段( $6\ \mu\text{m}\sim 13\ \mu\text{m}$ ),成像质量达到衍射极限<sup>[6]</sup>。2018 年国防科技大学李信磊针对加工复杂曲面铝反射镜时抛光工具与被加工曲面难以贴合、材料去除不可控等问题,制定了复杂曲面铝反射镜抛光的工艺路线,最终加工得到面形精度  $PV\ 0.247\lambda$ 、表面质量  $RMS\ 0.040\lambda(\lambda=632.8\ \text{nm})$  的自由曲面铝反射镜<sup>[1]</sup>。

复杂曲面铝反射镜促进了光学系统的快速发展,但同时也给制造与检测带来了挑战。特别是高质量的复杂曲面铝反射镜,加工与检测技术的相对滞后阻碍了其进一步发展。本文对国内外复杂曲面铝合金反射镜超精密加工技术和检测方法等研究成果进行了介绍与分析,为今后复杂曲面铝反射镜的研究提供了借鉴和思考。

## 2 复杂曲面铝反射镜 SPDT 车削技术

复杂曲面光学元件的广泛应用,对光学元件加工技术的快速发展起到了极大的促进作用。上世纪 60 年代美国的 Union Carbide 公司制造了一台配备金刚石刀具的超精密车削机床,其对于一个直径为  $101.6\ \text{mm}$  的铝合金半球面进行加工,得到的形状精度  $0.6\ \mu\text{m}$ 、表面粗糙度  $Ra\ 25\ \text{nm}$  这也是首次步入微米精度的加工。此后,美国的 Moore 公司、Precitech 公司,德国的 LT 公司,荷兰的 Phillips 公司等相继开发了配备金刚石刀具的超精密车削机床,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)研制的 DTM-3 大型超精密机床可以加工  $\Phi 2100\ \text{mm}$ ,质量  $4500\ \text{kg}$  的工件<sup>[7]</sup>。在铝合金反射镜的加工中,超精密车削加工常采用单点金刚石车削(single point diamond turning, SPDT)技术,SPDT 技术是在超精密车床上采用单点金刚石刀具,通过精确控制车床上各轴的运动来实现对各类复杂曲面的加工。SPDT 车削包括快刀伺服(fast tool servo, FTS)车削与慢刀伺服(slow tool servo, STS)车削。

FTS 车削使用有高分辨率、高刚度和高动态特性的辅助刀架,典型的 FTS 系统由精密车床、控制系统以及快速进刀装置三大部分构成,其中控制系统和快速进刀装置是 FTS 加工特有的功能模块。FTS 加工原理如图 1 所示,将工件面形的三维坐标( $x, y, z$ )转换为柱面坐标( $r, \theta, Z$ ),加工过程中刀具在  $Z$  向上产生快速精密的进刀运动,通过与  $C$  轴回转运动和  $X$  轴径向进给运动相结合,来实现复杂面形的加工<sup>[8]</sup>。但 FTS 车削存在滞后问题造成跟踪性能下降、主轴位置误差引起加工轮廓混淆、短行程限制了其加工范围等缺陷<sup>[9]</sup>。

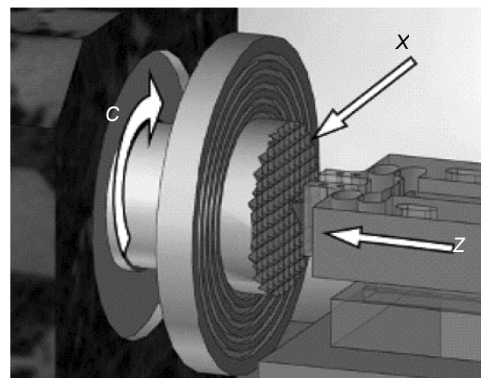


图 1 快刀伺服加工示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of fast knife servo processing<sup>[8]</sup>

STS 车削技术依靠 X、Z、C 三轴联动来实现对复杂曲面的加工。图 2 为典型的 STS 车削机床布局<sup>[9]</sup>，与 FTS 车削机床布局相似，STS 车床的 X 轴与 Z 轴也呈 T 字形分布。工件主轴 C 轴安装在 X 轴上，X 轴运动方向与 C 轴轴线方向相互垂直。切削刀具安装在 Z 轴上，其运动方向与 X 轴垂直，与 C 轴旋转轴线平行。加工工件安装在 C 轴上，随 C 轴转动。金刚石刀具根据工件处于的角度  $\varphi$  和径向位置  $x$  在工件表面作相对运动。对 X 轴、Z 轴和旋转轴 C 轴均进行位置精确控制，并且 Z 轴能够以较高频率精确地进行往复运动。STS 车削的运动行程范围较大，能够对尺寸较大的工件进行加工，加工时间较短，能加工出高精度高质量的光学元件，获得较高的尺寸和形状精度以及较好的表面粗糙度。但是，由于 X 轴与 Z 轴的频响比较低，致使其加工效率不是特别高，同时 STS 加工对机床与控制系统的硬件和处理数据能力有着很高的要求，使得 STS 车削机床的成本较为高昂。

STS 加工与 FTS 加工的工件都安装在 C 轴上且随

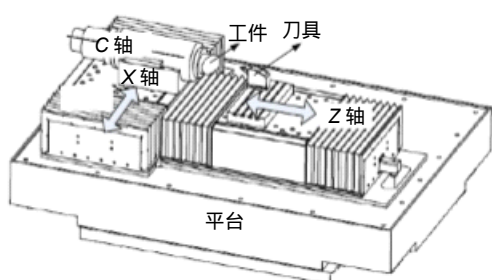


图 2 慢刀伺服车削机床布局<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Layout of slow tool servo turning machine<sup>[9]</sup>

C 轴转动，刀具按照工件的轴向和径向位置相对于工件表面作切削运动。STS 加工与 FTS 加工的相异之处为：STS 加工时只使用 Z 轴带动刀具运动，不采用任何附加伺服装置；STS 加工较于 FTS 加工来说，行程更长但是其加速度相对较低，适用于加工非回转对称连续表面，而 FTS 有较大的加速度，更加适合非连续表面的加工；另外，STS 中 C 轴采用精密位置伺服控制模式，而在 FTS 技术中只是将圆光栅测到的 C 轴位置信息给快刀伺服单元使用；STS 技术采用 C、X、Z 三轴联动的方式进行加工，三轴联动由同一数控系统进行控制，简化了控制系统的结构<sup>[9]</sup>。总的来说，STS 技术在复杂曲面车削加工中拥有显著的优势和巨大的发展潜力。

2005 年德国 Jena Optronik 公司和夫琅和费(IOF)开发的 JSS-56 空间相机中的光学系统是离轴的三反射消像散系统(three-mirror anastigmat, TMA)，其三个反射镜均采用铝合金材料。图 3 是该系统的离轴非球面三镜，在采用 STS 切削加工后，三镜面形精度达到 PV 600 nm，表面质量达到 RMS 8.7 nm<sup>[10-11]</sup>。如图 4 所示是我国航天 508 所与国防科技大学联合设计制造的口径为  $\Phi 300$  mm 红外空间相机，该相机的镜面与支架均采用铝材料制造，镜面采用 SPDT 技术进行加工<sup>[12]</sup>。2010 年 IOF 联合 Holota 公司研制的一款用于中波长红外的全铝 TMA 光学系统的光机结构图，该系统具有三个非球面镜(M1、M2、M3)和一个平面折叠镜(FM)，反射镜及支撑结构均采用铝合金材料，如图 5 所示，系统中的 M2/M3 镜与 M1/FM 镜分别安装在同一基板上。反射镜及安装支架上各安装基准面都采用 SPDT 一次加工成型，简化了系统的装调且能够很好地保证位置精度<sup>[13-14]</sup>。使用铝材料制造反射镜与支

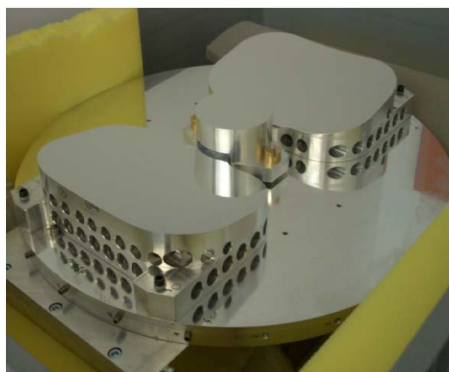


图 3 SPDT 车削后的 JSS-56 TMA 系统三镜<sup>[10]</sup>

Fig. 3 Tertiary mirror of JSS-56 TMA after SPDT<sup>[10]</sup>

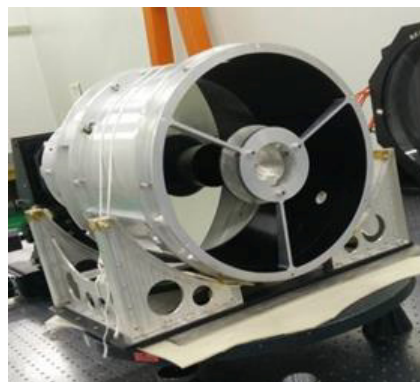
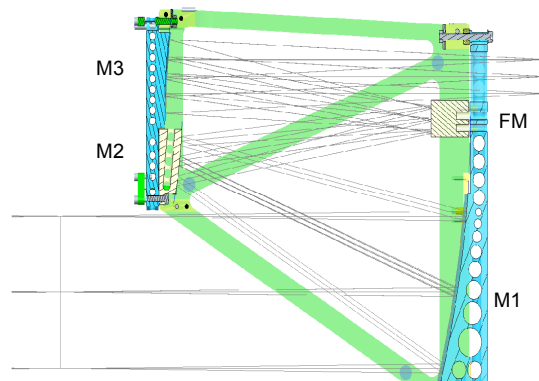


图 4 全铝望远镜系统<sup>[12]</sup>

Fig. 4 Telescope system of all aluminum<sup>[12]</sup>

图5 高光谱 TMA 望远镜的光机设计结构图<sup>[13]</sup>Fig. 5 Optical and mechanical design of the hyperspectral TMA telescope<sup>[13]</sup>

撑结构,在使用 SPDT 技术对铝反射镜进行加工时,可以保证加工共基准,能够一次完成对镜面和安装面的车削加工,更好地保证安装面的精度,降低装调难度<sup>[15-16]</sup>。

虽然通过 SPDT 车削技术加工的反射镜只能满足红外波段的使用需求,但 SPDT 加工技术具有众多优点,其可以直接加工球面、非球面光学元件,一次加工就可以获得纳米级的光滑表面,并且加工重复性好、生产效率高、适合批量生产、加工成本低。采用铝材料时 SPDT 加工技术使整个系统的制造周期与制造成本大大降低,加工的光学元件与安装支架的装配精度足够高、装调简单、校准方便。SPDT 车削技术与其他技术相结合形成组合工艺,还可以获得性能更好的光学元件,在先进光学系统的加工生产中有着极其重要的意义。

### 3 裸铝反射镜抛光技术

采用 SPDT 车削铝反射镜,在获得高精度光学表面时,由于 SPDT 车削的基本原理,会在反射镜表面形成车削纹路,产生光栅效应,且因为误差复映,切削机床以及刀具的精度会影响加工精度;另一方面,铝合金的质地软、硬度较低,在加工过程中容易产生划痕、磨损等机械损伤;同时,铝合金的化学性质比较活泼,在损伤缺陷处易发生腐蚀。以上问题会导致铝反射镜光学系统的性能受到严重影响,因此目前利用 SPDT 技术加工的光学元件成品只能满足红外光谱区域的应用要求。若想要得到满足更高使用要求的复杂曲面铝反射镜,则必须采用后续的抛光形成组合工艺来提高铝反射镜的面形精度以及改善其表面质量。目前比较成熟的对 SPDT 切削加工后的铝反射镜进行

抛光的加工方法主要有计算机控制表面成形 (computer controlled optical surfacing, CCOS) 抛光以及基于 CCOS 技术原理发展而来的磁流变抛光 (magnetorheological finishing, MRF)。

#### 3.1 裸铝反射镜磁流变抛光修形

MRF 抛光是一种基于 CCOS 成型原理的超精密光学加工技术,是一种介于接触与非接触之间的光学表面修形技术,能够对 SPDT 加工复杂光学元件进行确定性修形,可实现微米级甚至纳米级的材料去除加工。MRF 抛光具有抛光过程稳定、易于实现计算机控制、材料的去除效率高、抛光磨头不磨损、可以获得高质量的光学表面等优点。MRF 抛光与 CCOS 抛光技术相比,其突出优势在于去除函数稳定、准确、修形精度高,且对复杂曲面非球面镜面进行抛光时可以很好的适应局部曲率的变化。铝反射镜的 MRF 抛光实际上是一个抛光模对铝反射镜的作用过程,其抛光机理如图 6 所示。磁流变液在磁场的作用下发生流变效应,在几十毫秒内由液体变为硬度、粘度增大的固体柔性抛光模,在柔性抛光模与铝反射镜表面接触时,铁粉在抛光区内规则排列,而抛光磨料会与铝反射镜表面发生反应并形成一层较易去除的氧化层,此时,再由抛光模与铝反射镜表面之间的剪切力对氧化层进行机械去除<sup>[17]</sup>。

在 MRF 抛光的过程中,抛光轮与工件之间的间隙会对去除函数效率分布产生影响,因此保持去除函数的稳定,就是要保持抛光间隙的相对稳定。对于平面和陡度较低的非球面面形而言,进行 MRF 抛光加工时抛光间隙近似不变,采用统一的去除函数就可以实现高精度修形。但是对于复杂曲面面形来说,曲面

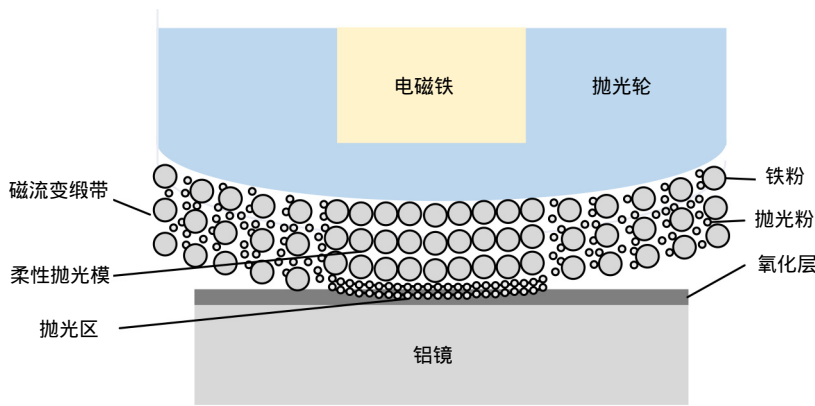


图 6 铝反射镜磁流变抛光机理

Fig. 6 Mechanism of magnetorheological polishing for aluminum mirror

上各点的曲率在不断变化,若采用统一的去除函数会导致抛光间隙发生改变,进而使抛光区域压力和剪切力出现变化,最终使去除函数的形状尺寸及去除效率发生变化,无法实现精确修形。因此,为实现对复杂曲面的高精度、高效率加工,必须准确建立磁流变抛光去除函数的动态模型。

2018 年国防科技大学李信磊提出了一种动态去除函数建模方法,实现了对复杂曲面 MRF 抛光去除函数的精确获取,其去除函数动态建模思路如图 7 所示<sup>[1]</sup>。该方法的基本思想是基于实验建模得到的平面

去除函数,通过分析建立其中的理论关系,得到相同条件下加工复杂曲面的去除函数。最后,制定了复杂曲面铝反射镜抛光的工艺路线,并在自由曲面铝反射镜上进行了应用,如图 8 所示<sup>[1]</sup>,最终加工得到的自由曲面铝反射镜镜面面形误差 PV 0.229λ、表面质量 RMS 0.031λ。

在国外,美国雷神公司在 2005 年开发了用于可达到可见光质量(visible quality, VQ)水平的铝反射镜加工技术后,从 2005 年至 2013 年已经在大约 2000 个系统中部署了超过 10000 个 VQ 反射镜,在军事领域中

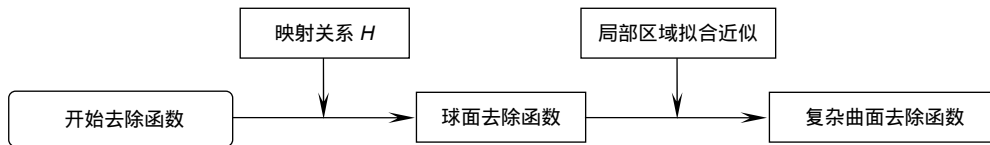


图 7 去除函数动态建模流程<sup>[1]</sup>

Fig. 7 Removal function dynamic modeling process<sup>[1]</sup>



图 8 磁流变、光顺加工后自由曲面铝反射镜<sup>[1]</sup>

Fig. 8 Aluminum mirror with free-form surface after MRF and fairing<sup>[1]</sup>

得到广泛部署。图 9 为雷神公司采用 VQ 技术通过 MRF 修正的离轴自由曲面铝反射镜<sup>[18]</sup>。2013 年 IOF 设计制造了一款 TMA 光学系统,系统中的第三反射镜是一块直径为 320 mm 的自由曲面铝反射镜,在该反射镜采用 SPDT 车削加工后,进行了磁流变抛光,得到的形状偏差 RMS 小于  $\lambda/40$  nm,如图 10 所示<sup>[19]</sup>。2015 年 IOF 制造了一款全铝非焦望远镜,其结构如图 11 所示,四个反射镜镜面均为自由曲面, M1/M3 与 M2/M4 分别布置在同一镜体基板上,制造时可以将多个自由度结合在一起,减少了望远镜装调时的工作量,图 12 为该望远镜中 M2/M4 反射镜在金刚石车削后进行 MRF 抛光<sup>[5]</sup>。

MRF 抛光可以克服接触式抛光技术中的固有缺陷,去除材料利用的是磁流变液与工件之间的剪切力,具有加工过程确定可控、对工件的正压力很小、工件亚表面质量好、加工精度高、面形收敛性好、能显著提高加工精度和加工效率等优势。因此 MRF 抛光技术从出现到现在获得了巨大的发展,表现出优良的发

展潜力和广阔的应用前景。但是抛光距离对 MRF 抛光的影响比较大、且抛光轮的尺寸也较大,因此 MRF 不适宜抛光像保形光学元件之类的高陡度的凹曲面和大长径的内腔元件<sup>[20]</sup>。此外,因为铝材料的化学性质活泼、质地较为柔软,因此铝反射镜在进行 MRF 抛光时还需要保持化学作用与机械作用的平衡,确定合适的磁场强度和磁流变液缎带的压入深度,避免缎带中的铁粉划伤铝反射镜表面。

### 3.2 裸铝反射镜保形光顺抛光技术

化学机械抛光 (Chemical mechanical polishing, CMP) 技术是借助抛光液的化学作用在铝反射镜表面形成一层易去除的氧化层,再利用抛光磨料的机械作用对该氧化层进行去除,在抛光过程中同时存在化学作用与机械作用。该技术可以防止镜面因抛光液的化学作用所产生的腐蚀以及抛光磨料的机械作用所产生的划痕等,从而获得光滑无缺陷的表面<sup>[1-2]</sup>。计算机控制表面成形 (CCOS) 技术是基于 CMP 机理的典型技



图 9 雷神公司通过 MRF 修正的离轴自由曲面铝反射镜<sup>[18]</sup>

Fig. 9 Raytheon's off-axis free-form aluminum reflector modified by MRF<sup>[18]</sup>

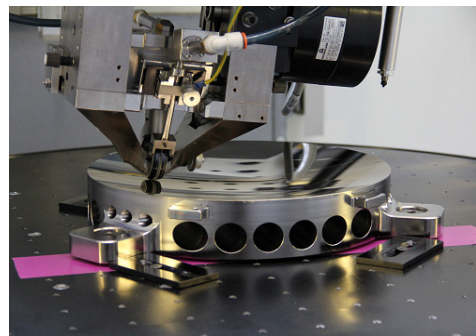


图 10 MRF 加工铝反射镜<sup>[19]</sup>

Fig. 10 MRF processing of aluminum reflector<sup>[19]</sup>

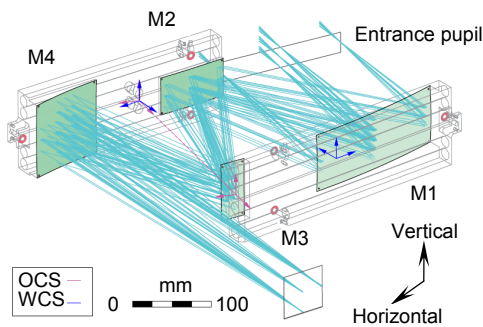


图 11 全铝非焦望远镜系统<sup>[5]</sup>

Fig. 11 A all aluminum focal telescope system<sup>[5]</sup>

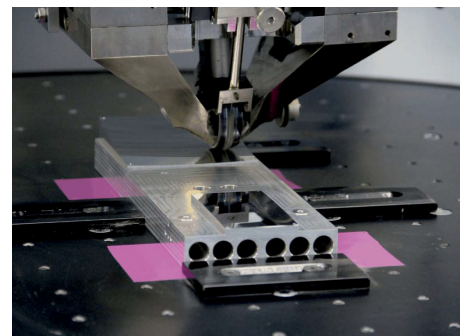


图 12 MRF 加工反射镜 M2/M4<sup>[5]</sup>

Fig. 12 MRF processing mirror M2/M4<sup>[5]</sup>

术,对铝合金反射镜进行 CCOS 抛光的原理如图 13 所示,在铝反射镜 CCOS 抛光过程中同时存在化学作用与机械作用,利用抛光磨料的正压力及相对运动机械去除抛光液产生的化学反应在铝反射镜表面形成的氧化层。铝反射镜表面局部高点处去除效率较高,低点处去除效率较低,长时间抛光后可以使整个表面达到平整状态,从而提升表面质量。CCOS 抛光技术可以在提高面形精度的同时控制表面质量,已广泛应用于各类光学元件的抛光中。

裸铝反射镜镜面在磁流变修形抛光后,表面粗糙度会有所降低,如何在保证铝镜反射面面形精度的前提下提升其表面粗糙度,是铝合金反射镜抛光的另一关键,CCOS 技术可用于对 MRF 抛光后的铝反射镜进行保形光顺抛光,提高其表面质量。例如,2018 年 IOF 参与位于智利的超大型望远镜上使用的低温高分辨率红外成像仪(CRIRES)的升级改造,加工了 CRIRES 中必须在低温或常温环境下工作的铝反射镜。这些铝反射镜在使用单点金刚石车削加工后,采用磁流变抛光技术进行形状修正,最后进行 CCOS 保形光顺抛光得到光滑表面,加工的铝反射镜的微粗糙度在 RMS 1 nm 到 RMS 5 nm 之间,形状偏差小于 RMS 35 nm。升级后该仪器测量精度和测量能力得到极大的提高,观测效率提高了近 10 倍<sup>[21]</sup>。

CCOS 技术既可用于 MRF 抛光铝反射镜后的保形光顺抛光,也可用于完成 SPDT 加工的铝反射镜的直接抛光。2009 年,美国犹他州立大学空间动力学实验室(Utah State University Space Dynamics Lab,SDL)和美国 L-3 公司联合设计制造了大带宽红外望远镜(wide-field infrared survey explorer, WISE),图 14 为其主镜抛光后镀反射膜前的状态<sup>[22-23]</sup>。该光学系统采用全铝设计,铝合金反射镜安装在铝制框架和支撑结构上。其铝合金反射镜采用 SPDT 技术切削成形,然后使用裸铝抛光工艺进行抛光,最终达到了成品面形和表面质量要求。2005 年德国 Jena Optronik 公司和夫琅和费(IOF)开发的 JSS-56 空间相机中的 TMA 望远镜,要求该望远镜的铝反射镜具有光滑表面且可应用于可见光范围<sup>[10-11]</sup>。因为铝合金表面硬度相对较低,抛光性能较差且易于氧化,进行直接抛光难度较大,因此采用的加工方法是在进行 SPDT 技术进行加工成形后,在镜面镀上一层厚的 NiP 膜层,之后再使用 SPDT 和后抛光技术组合加工,由此获得高精度铝反射镜镜面。图 15 是 M3 镜完成抛光后的成品,在表面 2.5 mm×2.5 mm 的视场内,测得其微表面粗糙度 RMS 值由抛光前的 8.7 nm 降低到抛光后的 0.6 nm。虽然在铝反射镜表面镀膜可以解决表面难抛光的问题,但是所镀膜层与铝基体的热膨胀系数不同,在温度发生变化

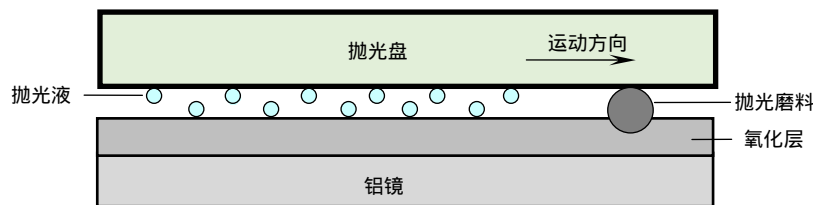


图 13 铝反射镜 CCOS 抛光机理  
Fig. 13 CCOS mechanism of aluminum mirror



图 14 WISE 光学系统主镜实物图<sup>[22]</sup>  
Fig. 14 Physical drawing of main mirror of wise optical system<sup>[22]</sup>



图 15 JSS-56 TMA 系统第三反射镜成品<sup>[10]</sup>  
Fig. 15 Finished product of Jss-56 TMA system three mirror<sup>[10]</sup>

时会产生“双金属效应”，尤其是在温差变化大的环境中，更会对系统的光学性能造成不良影响。

在国内，2014年国防科技大学张艺等使用无规则沟槽阻尼布制作的抛光盘以及自己研发的碱性抛光液，对SPDT车削后的Al6061铝合金反射镜进行直接抛光实验，抛光后的铝反射镜表面局部粗糙度值可以达到Ra 2.6 nm<sup>[2]</sup>。2014年天津大学潘龙等人采用羊毛轮抛光轮和金刚石油性悬浮液抛光液，进行了铝反射镜平面抛光实验，工件的表面粗糙度由抛光前的Ra 144.59 nm提升到了抛光后的Ra 6.03 nm<sup>[24]</sup>。2017年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的张继真等设计了一种用于可见光的TMA光学系统，如图16所示<sup>[25]</sup>。该系统的三个反射镜及系统的支撑部件皆由铝材料制成，主镜(PM)和第三反射镜(TM)都是离轴非球面反射镜。其TM镜在经过SPDT车削加工成形以及在其表面镀了一层非晶态NiP镀层后，再经过SPDT车削加工及后抛光进一步改善表面质量，得到的反射镜面形误差优于RMS 1/30λ(λ=632.8 nm)，表面粗糙度优于Ra 4 nm。

此外，国防科技大学的赵陶对铝反射镜抛光过程中镜面表面产生结晶影响表面质量的问题，研究了影响结晶的主要因素，通过改进抛光工艺，成功地抑制了铝反射抛光过程中的结晶现象，提升了抛光质量<sup>[26]</sup>。英国Huddersfield大学的学者使用工业机器人对球面和非球面铝反射镜抛光进行了探索，设计了部署在工业机器人上的非牛顿抛光盘以及一种特殊的随机刀具轨迹算法，在400 mm的正方形自由曲面铝反射镜上进行了试验验证<sup>[27-28]</sup>。IOF针对由自由曲面铝反射镜镜面基底尺寸不稳定引起的镜面质量恶化等问题，进行了变形补偿理论研究，对光学表面的热弹性表面形状偏差(热不稳定性)进行预测和修正，可显著提高未

在工作温度下制造的自由曲面铝反射镜的性能<sup>[28]</sup>。

随着科学技术的进步，CCOS技术也得到了不断的发展和丰富，虽然CCOS技术在光学加工中已经得到了广泛应用，但其在加工高精度复杂光学曲面方面仍然存在着诸多缺陷与不足。随着CCOS抛光的进行，用于抛光的磨头会发生磨损，致使去除函数不能保持稳定，影响光学元件的加工精度和面形收敛效率。在加工过程中，由边缘效应、误差复映效应等导致的中高频误差会对光学元件的质量和加工效率产生严重的不良影响，因此仅采用单一磨头加工的方法来制造高精度高质量的复杂光学曲面元件仍然存在困难。

#### 4 复杂曲面 CGH 检测

复杂曲面的检测技术是复杂曲面光学元件制造过程中的重要步骤，是制约复杂曲面光学元件精度向更高方向发展最为关键的因素之一。计算全息图(computer generated hologram, CGH)检测法在复杂曲面光学零件检测领域具有独特的优势，其抵抗外界干扰及噪声的能力非常强，测量不确定度可以达到纳米量级。CGH是一种衍射光学元件，几乎能通过衍射产生任何形状的波前，这种技术很早就被用来对非球面面形的光学元件进行检测。由于CGH在设计和制作上不限于旋转对称方式，因此很适合用来实现复杂光学表面的零位补偿检测，利用CGH检验复杂曲面的示意图如图17所示<sup>[30]</sup>，当干涉仪出射光照射到CGH元件时，就会产生与待测复杂曲面相匹配的参考波前，从而实现复杂曲面面形的零位干涉检测。在这种干涉装置中，CGH被放置在干涉仪出口和被测表面之间，为了获得可靠的表征结果，CGH与被测表面的对准要求很高。如果操作不当，测量结果中会包含与对准相关的波前误差。

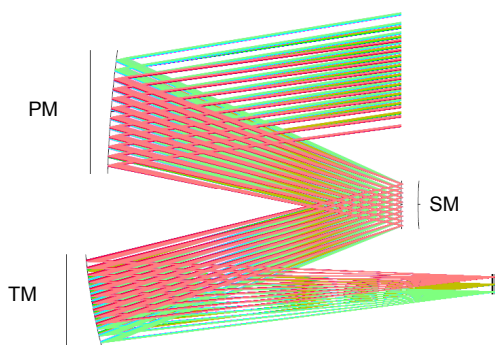


图 16 用于可见光成像的 TMA 光学系统<sup>[25]</sup>  
Fig. 16 TMA optical system for visible light imaging<sup>[25]</sup>

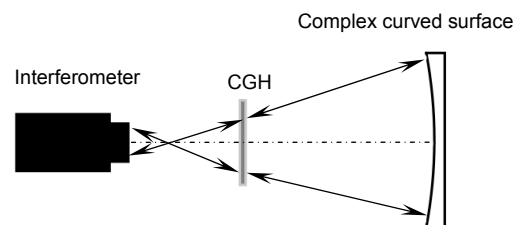


图 17 CGH 检验复杂曲面示意图<sup>[30]</sup>  
Fig. 17 Schematic diagram of CGH inspection complex surface<sup>[30]</sup>



当 CGH 检验校准技术应用于复杂曲面时，主要有三个关键的技术问题需要解决：CGH 相位补偿面的设计；全息微结构的高精度制造以及 CGH 检测波前的不确定度评价<sup>[31]</sup>。

CGH 相位补偿面的设计一般采用正向优化设计和逆向追迹两种方案。正向优化设计法是最常用的 CGH 设计方法，但会产生一定的设计剩余像差。逆向追迹设计以离散相位的形式设计 CGH 相位补偿面，理论上可消除设计剩余像差。在 CGH 设计的过程中，还需要考虑 CGH 装调敏感度、衍射多级次的“鬼像”干扰以及最小线宽的加工能力<sup>[32]</sup>。

基于设计的 CGH 相位补偿面，按照特定的算法可生成全息条纹图案。针对全息条纹微结构的制备而言，通常采用如图 18 所示的工艺流程方案<sup>[33]</sup>，经过激光直写或电子束直写以及湿法刻蚀的工艺流程后，即可得到振幅型 CGH。在此基础上，再通过干法刻蚀即可得到相位型 CGH。电子束直写技术具有很高的分辨率，但加工效率低下。而激光直写技术相比于电子束直写技术而言，具有成本较低、效率高等优势，是大口径 CGH 的主要加工手段。

全息条纹微结构的制造精度影响 CGH 的使用性能，制造误差包括基底误差和 CGH 微结构刻蚀误差，是影响干涉检测准确度的主要因素。为保证 CGH 元件的检测准确度，需要对这些制造误差进行准确的评价或标定。CGH 基底误差包括基板的面形误差和折射率均匀性误差。在利用 CGH 进行复杂曲面检验校准时，这部分误差会作为系统误差叠加到被测面上，从而影响面形检测准确度。基底误差可在检测光路下进行标定，对于全息条纹刻蚀误差也有许多相关研究。从当前的研究情况来看，CGH 的设计方法已经基本成熟，其制造工艺的优化及波前精度的评定方法将会成

为今后研究的热点<sup>[31]</sup>。

2013 年 IOF 报道了一种金属光学元件干涉测量时的对准方法，使用自由曲面车削或金刚石微铣削将对准元件直接制造在透明孔外部的光学表面上，测量自由形状金属镜的形状偏差，被测自由曲面镜和 CGH 基板上的新对准特征允许在所有六个自由度中将被测表面精确地对准 CGH<sup>[34]</sup>。2015 年 IOF 制造的全铝非焦望远镜中，四个自由曲面反射镜 M1/M3 与 M2/M4 分别布置在同一镜体基板上，IOF 设计制造了可在单个测量设置中同时测量两个自由曲面的 CGH，如图 19 所示<sup>[5]</sup>。

在国内，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的黎发志等人利用 CGH 实现了离轴非球面、自由曲面等光学零件的高精度面形检测<sup>[30]</sup>；中国科学院光电技术研究所的谢意等人用 CGH 校验了口径为 140 mm 的凹抛物面，面形测量结果为 PV 0.406λ、RMS 0.062λ<sup>[35]</sup>；国防科技大学甘子豪等人在自由曲面测试中提出了一种新的 CGH 离散化方法，并且实现了对加工条纹的编码，基于新的离散化方法的 CGH 波前精度均方根值为 2.363 nm，满足高精度光学测试的应用要求<sup>[36]</sup>。

随着现代光学系统的不断升级发展，高新技术装备对于复杂曲面光学零件提出了更高的要求，由于曲面复杂性的增加，对检测装置的对准和精度要求非常高，这使得面形检测在复杂曲面光学元件高精度、高效率制造中的影响更加突出。CGH 检测法基于衍射理论，可生成任意形状的参考波前，可补偿各种类型的像差，能够克服其他检测方法的缺陷，其设计灵活多变、适用范围广，因此能够满足各类复杂面形的检测需求，在复杂曲面光学零件装备计量领域具有极好的应用前景。

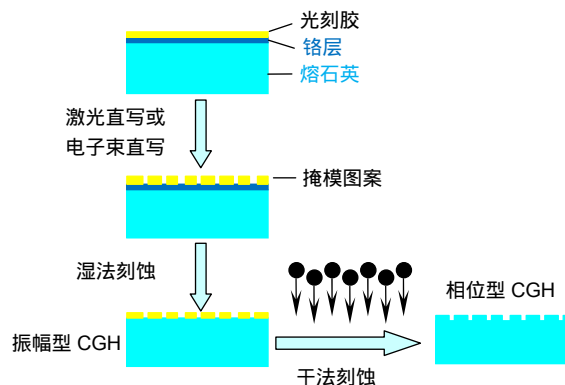


图 18 CGH 衍射微结构制造的工艺流程<sup>[33]</sup>

Fig. 18 CGH diffraction microstructure manufacturing process<sup>[33]</sup>

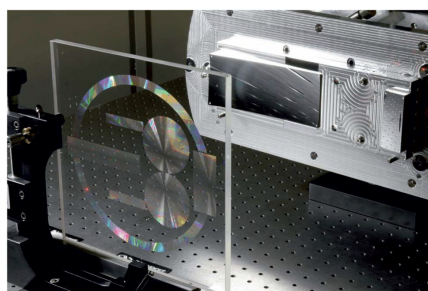


图 19 在洁净室中的 CGH 测量装置  
Fig. 19 CGH measuring device in clean room

## 5 结 论

在光学系统中采用复杂曲面光学元件是未来光学系统发展的重要趋势，但目前复杂曲面光学元件在光学系统中的应用还存在很多困难。主要原因就在于复杂曲面光学元件的超精密制造与检测评价技术还存在较多还未解决的难题。随着应用需求的不断提高，面形复杂程度、加工精度及形位公差、表面质量等要求会更为苛刻，对复杂光学曲面的加工及检测提出新的挑战。采用超精密伺服车削成形、磁流变抛光确定性修形、保形光顺抛光和 CGH 面形检测等技术形成组合工艺，是解决未来光学复杂曲面铝反射镜制造难题的有效方案。

## 参考文献

- [1] Li X L. Research on the key technology of magnetorheological polishing of complex curved aluminum mirror[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018: 1–51.  
李信磊. 复杂曲面铝反射镜磁流变抛光关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018: 1–51.
- [2] Zhang Y. Research on the key technologies of direct optical polishing of metal aluminum mirrors[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014: 1–59.  
张艺. 金属铝镜直接光学抛光关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2014: 1–59.
- [3] Zhang D G, Fu Y T. Development and application of aluminum mirrors in optical system[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(10): 814–823.  
张东阁, 傅雨田. 铝合金反射镜的发展与应用[J]. *红外技术*, 2015, **37**(10): 814–823.
- [4] Saunders I J, Ploeg L, Dorrepaal M, *et al.* Fabrication and metrology of freeform aluminum mirrors for the SCUBA-2 instrument[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5869**: 586905.
- [5] Atad-Ettedgui E, Peacocke T, Montgomery D, *et al.* Opto-mechanical design of SCUBA-2[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6273**: 62732H.
- [6] Beier M, Hartung J, Peschel T, *et al.* Development, fabrication, and testing of an anamorphic imaging snap-together freeform telescope[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(12): 3530–3542.
- [7] Li R B, Kong L B, Zhang Z H, *et al.* An overview of ultra-precision diamond machining of microstructured freeform surfaces[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, **49**(19): 144–155.  
李荣彬, 孔令豹, 张志辉, 等. 微结构自由曲面的超精密单点金刚石切削技术概述[J]. *机械工程学报*, 2013, **49**(19): 144–155.
- [8] Wang G L, Zhu D C, Dai Y F. Machining characteristics and route planning of complex optical surface by using fast tool servo[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **47**(15): 175–180.  
王贵林, 朱登超, 戴一帆. 复杂光学表面的快刀伺服加工特性与路径规划[J]. *机械工程学报*, 2011, **47**(15): 175–180.
- [9] Guan C L. Study on the technology of slow tool servo ultra-precision diamond turning for complex optical surface[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010: 1–132.  
关朝亮. 复杂光学曲面慢刀伺服超精密车削技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010: 1–132.
- [10] Kirschstein S, Koch A, Schöneich J, *et al.* Metal mirror TMA, telescopes of the JSS product line: design and analysis[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5962**: 59621M.
- [11] Risse S, Gebhardt A, Damm C, *et al.* Novel TMA telescope based on ultra precise metal mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7010**: 701016.
- [12] Deng J Q. Study on the key techniques of ultra-precision polishing of aluminum alloy mirrors[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017: 1–71.  
邓金球. 铝合金反射镜超精密抛光关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017: 1–71.
- [13] Scheiding S, Damm C, Holota W, *et al.* Ultra-precisely manufactured mirror assemblies with well-defined reference structures[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7739**: 773908.
- [14] Risse S, Scheiding S, Gebhardt A, *et al.* Development and fabrication of a hyperspectral, mirror based IR-telescope with ultra-precise manufacturing and mounting techniques for a snap-together system assembly[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, **8176**: 81761N.
- [15] Long B, Xing T W, Liao S. Design of stress-relief support of aluminum mirrors and assembly assisted by SPDT[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41**(3): 1–6.  
龙波, 邢廷文, 廖胜. 铝镜消应力支撑及 SPDT 辅助装配设计[J]. *光电工程*, 2014, **41**(3): 1–6.
- [16] Liu M, Zhang L Z, Li X, *et al.* Design of flexure support of space compact reflector subassembly and dynamic analysis[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(5): 170686.  
柳鸣, 张立中, 李响, 等. 空间轻小型反射镜柔性支撑设计与动力学分析[J]. *光电工程*, 2018, **45**(5): 170686.

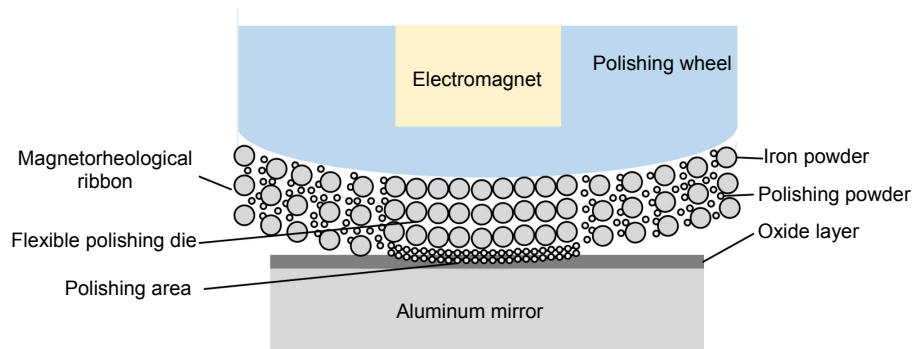
- [17] Ge K G, Li S Y, Hu H. Parameters optimization of surface quality control on magnetorheological finishing for aluminum alloy mirror[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2017, **15**(2): 151–157.  
葛坤鹏, 李圣怡, 胡皓. 铝合金反射镜磁流变抛光表面质量控制的参数优化[J]. *纳米技术与精密工程*, 2017, **15**(2): 151–157.
- [18] Schaefer J P. Advanced metal mirror processing for tactical ISR systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8713**: 871306.
- [19] Beier M, Scheiding S, Gebhardt A, et al. Fabrication of high precision metallic freeform mirrors with magnetorheological finishing (MRF)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8884**: 88840S.
- [20] Zhou L. Study on theory and technology in ion beam figuring for optical surfaces[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 1–112.  
周林. 光学镜面离子束修形理论与工艺研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 1–112.
- [21] Kinast J, Schlegel R, Kleinbauer K, et al. Manufacturing of aluminum mirrors for cryogenic applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, **10706**: 107063G.
- [22] Schwalm M, Akerstrom A, Barry M, et al. Hardware results for the Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) telescope and scanner[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7731**: 77310Y.
- [23] Sampath D, Akerstrom A, Barry M, et al. The WISE telescope and scanner: design choices and hardware results[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7796**: 779609.
- [24] Pan L, Gong H, Fang F Z. Ultra-precision polishing process of large free-form surface aluminum mirror[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2015, **13**(2): 108–112.  
潘龙, 宫虎, 房丰洲. 大尺寸自由曲面铝反射镜超精密抛光工艺[J]. *纳米技术与精密工程*, 2015, **13**(2): 108–112.
- [25] Zhang J Z, Zhang X, Tan S L, et al. Design and manufacture of an off-axis aluminum mirror for visible-light imaging[J]. *Current Optics and Photonics*, 2017, **1**(4): 364–371.
- [26] Zhao T, Hu H, Peng X Q, et al. Study on the surface crystallization mechanism and inhibition method in the CMP process of aluminum alloy mirrors[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(22): 6091–6097.
- [27] Li H Y, Walker D, Zheng X, et al. Advanced techniques for robotic polishing of aluminum mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, **10692**: 106920N.
- [28] Li H Y, Walker D D, Zheng X, et al. Mid-spatial frequency removal on aluminum free-form mirror[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(18): 24885–24899.
- [29] Hartung J, Vov Lukowicz H, Kinast J. Theoretical compensation of static deformations of freeform multimirror substrates[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(15): 4020–4031.
- [30] Li F Z, Zheng L G, Yan F, et al. Optical testing method and its experiment on freeform surface with computer-generated hologram[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 1052–1056.  
黎发志, 郑立功, 闫锋, 等. 自由曲面的 CGH 光学检测方法与实践[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(4): 1052–1056.
- [31] Gan Z H, Peng X Q, Chen S Y. CGH key technology for inspection and calibration of complex surfaces[J]. *China Metrology*, 2019, **24**(6): 80–85.  
甘子豪, 彭小强, 陈善勇. 用于复杂曲面检验校准的 CGH 关键技术[J]. *中国计量*, 2019, **24**(6): 80–85.
- [32] Ma J, Pruss C, Häfner M, et al. Systematic analysis of the measurement of cone angles using high line density computer-generated holograms[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(5): 055801.
- [33] Poleshchuk A G, Korolkov V P, Nasyrov R K, et al. Computer generated holograms: Fabrication and application for precision optical testing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7102**: 710206.
- [34] Scheiding S, Beier M, Zeitner U D, et al. Freeform mirror fabrication and metrology using a high performance test CGH and advanced alignment features[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8613**: 86130J.
- [35] Xie Y, Chen Q, Wu F, et al. Concave aspherical surface testing with twin computer-generated holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1313–1317.  
谢意, 陈强, 伍凡, 等. 用双计算全息图检测凹非球面[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1313–1317.
- [36] Gan Z H, Peng X Q, Chen S Y, et al. Fringe discretization and manufacturing analysis of a computer-generated hologram in a null test of the freeform surface[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(34): 9913–9921.

# Current status of ultra-precision manufacturing of complex curved aluminum reflectors

Xu Chao<sup>1,2</sup>, Peng Xiaoqiang<sup>1,2\*</sup>, Dai Yifan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support,  
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup>College of Intelligent Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China



Mechanism of magnetorheological polishing for Aluminum mirror

**Overview:** The use of complex curved aluminum reflectors can simplify the structure of the optical system, facilitate the manufacture of complex curved surfaces, reduce the quality of the system, provide a more flexible system layout, have a higher degree of design freedom, and can be integrated without heat. Advantages such as design, its application in high-performance optical systems is becoming more and more extensive. Adopt ultra-precision turning processing of complex curved aluminum mirror, one-time processing can obtain a nano-level smooth surface, and the processing repeatability is good, the production efficiency is high, suitable for mass production, and the processing cost is low, but the accuracy is subject to the ultra-precision turning processing error. The limitation of "Review" can only meet the application requirements of infrared system. If you want to get a complex curved aluminum mirror that meets higher requirements, after ultra-precision turning, you must use a subsequent polishing process to improve the surface accuracy of the aluminum mirror and improve its surface quality. At present, the more mature processing methods for polishing aluminum mirrors after ultra-precision turning mainly include computer controlled surface forming (CCOS) polishing and magnetorheological polishing (MRF) developed based on the principle of CCOS technology. CCOS polishing of aluminum alloy mirrors uses the positive pressure of the polishing abrasive and relative motion to mechanically remove the oxide layer formed on the surface of the aluminum mirror by the chemical reaction of the polishing liquid, which can improve the surface accuracy while controlling the surface quality. Magnetorheological polishing is an ultra-precision optical processing technology between contact and non-contact based on the principle of CCOS molding. It can perform deterministic processing of complex curved optical elements. It has a stable polishing process, easy to realize computer control, and materials. The removal efficiency is high, the polishing head is not worn, and high-quality optical surfaces can be obtained. The outstanding advantage of MRF polishing compared to CCOS polishing technology is that the removal function is stable and accurate, and it can adapt to changes in local curvature when polishing aspheric curved mirrors with complex curved surfaces. The use of magnetorheological polishing, computer-controlled surface forming and other post-polishing processing techniques, combined with the current computational hologram (CGH) surface shape detection technology with the highest accuracy in detecting complex curved surface shapes, can further improve the surface accuracy of complex curved aluminum reflector, to meet the application requirements of visible light systems, and lay the foundation for the promotion and application of complex curved aluminum alloy mirrors.

**Citation:** Xu C, Peng X Q, Dai Y F. Current status of ultra-precision manufacturing of complex curved aluminum reflectors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 200147

Supported by Science Challenge Project (TZ2018006) and National Natural Science Foundation of China (51835013)

\* E-mail: pengxiaoqiang@nudt.edu.cn