

文章编号: 1003-501X(2009)03-0135-05

一种 SiC 非回转对称非球面的加工与检测

闫 锋^{1,2}, 范 镒¹, 张斌智^{1,2}, 殷龙海^{1,2}, 李锐刚¹, 张学军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对一种 SiC 材质的非回转对称非球面元件, 本文介绍了该元件的加工和检测方法。该实验件的理想面形方程为 $z=3\lambda(x^3+y^3)$ (x, y 为归一化坐标, $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$), 镜胚材料为 $\Phi 150\ \text{mm}$ 的 SiC, 加工方式为数控机床和手工研抛相结合。在加工过程中为提高加工效率缩短加工时间, 选择平面作为最接近表面并认为去除了面形中的倾斜项。去倾斜之前最低点的材料去除量为 $3.8\ \mu\text{m}$, 而去倾斜后则为 $2.06\ \mu\text{m}$ 。本文提出了一种新的基于数字模板的非零位检测方法。直接采用 Zygo 平面干涉仪检测工件, 检测结果可以分为三部分: 工件实际面形与理想面形的误差, 工件理想面形与平面波前的误差和非共路误差。其中第二部分可以事先计算出来并转换为系统误差文件在检测过程中自动去除。通过在相同条件下检测一个已知的球面样板验证了非共路误差对于检测结果的影响可以忽略不计。由此在一次测量中可直接得到面形误差。实验结果表明, 基于这种检测手段最后测得实验件的面形精度 PV 达到 0.327λ , RMS 优于 0.025λ , 达到设计要求。

关键词: SiC; 非回转对称; 非球面; 非零位检测; 数字模板; 面形精度

中图分类号: O439

文献标志码: A

Manufacturing and Testing of a SiC Unrotational-symmetric Aspherical Optics

YAN Feng^{1,2}, FAN Di¹, ZHANG Bin-zhi^{1,2}, YIN Long-hai^{1,2}, LI Rui-gang¹, ZHANG Xue-jun¹

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: It is presented that a SiC unrotational-symmetric aspherical optics whose surface equation is $z=3\lambda(x^3+y^3)$ (where x, y is normalized coordinate, $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$, $\Phi 150\ \text{mm}$) has been manufactured. Both digital-controlled polishing and hand working are used to modify the surface figure. The tilt component is subtracted to minimize the material removal without any effect on the surface figure in the polishing process. The material removal of the lowest point on the surface is $3.8\ \mu\text{m}$ before subtracting tilt, while the removal is $2.06\ \mu\text{m}$ after subtracting tilt. A non-null testing method based on digital mask is proposed to test this surface. The Zygo interferometer with flat reference wavefront is applied. The testing result can be divided into three parts: the derivation between the actual surface figure and the ideal one, the derivation between ideal surface figure and the reference wavefront, and the non-null error. The second part can be calculated ahead and made the system error of testing process with the transforming tool of Metropro. Thus, it can be eliminated automatically in the testing process. The third part is proven to have little effect on testing result by an experiment of testing a known sphere model, so it can be ignored. Thereby, the surface figure error (the first part) can be obtained within single measure. The final surface figure is 0.327λ (PV) and 0.025λ (RMS) by means of the non-null testing

收稿日期: 2008-10-16; 收到修改稿日期: 2008-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60178037)

作者简介: 闫锋(1981-), 男(汉族), 吉林长春人。博士研究生, 主要研究工作是光学加工, 光学检测。E-mail: greatyf@mail.nankai.edu.cn。

method, which achieves the prospective goal.

Key words: SiC; unrotational-symmetric; aspherical optics; non-null testing; digital template; surface figure

0 引言

随着光学设计理念的创新和光学加工、检测技术的发展,非回转对称非球面已经在各类光学系统中得到了越来越多的应用。如新兴的“光学-数字”一体化成像技术——波前编码技术^[1],就是通过在光学系统中加入一个含有三次项的非回转对称非球面元件,从而在光瞳函数上引入一个特殊的相位分布,使系统的MTF虽偏离衍射极限但在较大的范围内(可以达到原系统焦深的十倍以上)基本保持不变,再通过后续的数字图像处理技术将直接所得的图像进行复原得到像质良好的最终图像。该技术的应用效果相当于扩大了系统的焦深,并很好的控制离焦以及与离焦有关的误差,因此控制空间相机等空间光学系统的焦面误差是该技术的重要应用方向之一。空间光学系统对光学表面的面形精度极高,而目前含三次项的非回转对称非球面元件的加工精度还较低,如何提高这类元件的面形精度是目前的难点。

由于SiC材料具有较高的弹性模量,适中的密度,低原子系数,较小的热膨胀系数,较高的导热系数和耐热冲击性,因此具有高的比刚度、高热稳定性、高辐射稳定性及高度的尺寸稳定性等一系列优秀的物理性质,具备良好的机械加工和光学加工性能,而且制备时间短、轻量化程度高,是目前空间光学反射镜镜胚的首选材料。但SiC属于多相陶瓷材料,其材质既硬且脆,加工难度很大^[2]。

基于以上两点,本文探讨了SiC非回转对称非球面加工和检测技术,给出了面形方程为 $z=3\lambda(x^3+y^3)$ (x, y 为归一化坐标, $\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$)、 $\Phi 150\text{ mm}$ 的反射式实验件的加工过程,给出了一种基于数字模板的非零位检测手段,并通过实验验证了该方法的精度。

1 加工工艺

工件面形方程为 $z=3\lambda(x^3+y^3)$ (x, y 为归一化坐标, $\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$, $\Phi 150\text{ mm}$),其理想面形如图1(a)所示。可见表面矢高沿箭头方向单调增加,最高点 H_{\max} 与最低点 H_{\min} 的高度差达到了 6λ 。这意味着从基底平面向理想面形修整时最低点 H_{\min} 的材料去除量达到 $3.8\text{ }\mu\text{m}$ 。在相同工艺条件下这必然会延长加工周期。这里通过将理想面形方程进行Zernike拟合进而去倾斜的办法来减少材料去除量。

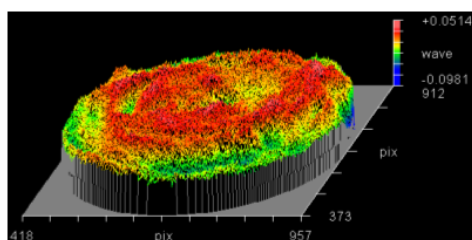


图1 基底平面面形误差

Fig.1 Surface error of the origin plane

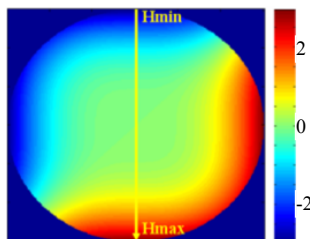


图2(a) 去倾斜前的面形

Fig.2(a) Surface figure before subtracting tilt

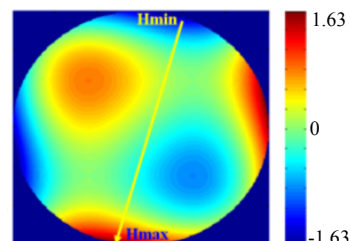


图2(b) 去倾斜后的面形

Fig.2(b) Surface figure after subtracting tilt

根据 $Z_2 = x$, $Z_3 = y$, $Z_7 = 3x^3 + 3xy^2 - 2x$, $Z_8 = 3y^3 + 3yx^2 - 2y$, $Z_{10} = x^3 - 3xy^2$, $Z_{11} = -y^3 + 3x^2y$ 则

$$z = 3\lambda(x^3 + y^3) = 1.5\lambda(Z_2 + Z_3) + 0.75\lambda(Z_7 + Z_8 + Z_{10} - Z_{11})$$

这里 Z_2 、 Z_3 仅表示的是 x 和 y 方向的倾斜,属于调整误差范畴;而Zygo干涉仪的Metropro软件在数据处理时也会将干涉条纹中全部的倾斜成分移除,不管是空间位置的倾斜还是表面自身的倾斜。据此,可以将面形方程中的倾斜量 $1.5\lambda(Z_2+Z_3)$ 舍去。这相当于将基底平面倾斜一个特定的角度,并不影响实际面形。此时新的面形方程变为 $z=3\lambda(x^3+y^3)-1.5\lambda(Z_2+Z_3)$,新面形如图2(b)所示。此时最高点 H_{\max} 与最低点 H_{\min} 的高度差缩小到只有 3.26λ ,即最低点 H_{\min} 的材料去除量只有 $2.06\text{ }\mu\text{m}$ 。可见这种处理有效的减小了材料去除量,缩短了加工周期。

根据加工手段可以将加工流程分为三个阶段:首先通过单轴机对镜胚依次进行粗磨、精磨、抛光,最

后加工出的起始标准平面, 面形精度为 $PV=0.15\lambda$, RMS 优于 0.02λ ; 然后采用我所光学技术研究中心自行研制的 FSGJ-1 四轴联动非球面加工中心进行修磨^[3-4], 磨料为 $0\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 人造金刚石微粉, 数控修磨后工件表面面形如图 3 所示, 此时的面形精度为 $PV=0.982\lambda$, $RMS=0.09\lambda$; 最后进行手工研修 (尤其是表面低点), 最终加工的结果如图 4 所示, 面形精度为 $PV=0.327\lambda$, $RMS=0.023\lambda$ 。

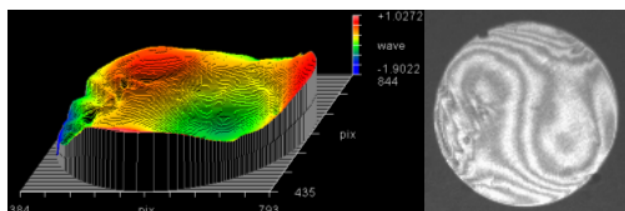


图 3 数控修磨后的工件表面面形

Fig.3 Surface figure after digital-controlled polishing

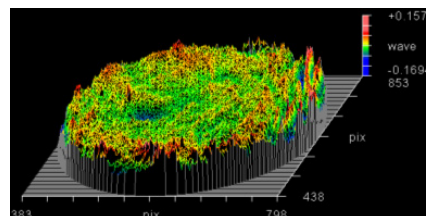


图 4 最终工件面形误差

Fig.4 Final surface figure error

2 面形检测

2.1 检测手段

目前, 比较普遍采用的非球面检测手段是零位补偿法, 即通过由高精度透镜组成的补偿器将理想平面波或球面波转换为与被测非球面吻合的非球面波, 使出射波前与反射波前共路, 实现非球面的高精度检测。但这种方法显然不适合于检测文中的实验件: 零位补偿法要求检测波前的法线在到达被测非球面时与其表面各点的法线一致, 但是普通透射光学元件的表面也是二次曲面, 其组合是不可能将理想平面波或球面波转换成含有三次项的波前与文中工件相吻合^[5]。本文提出了一种新的基于数字模板的非零位检测方法, 并通过实验验证了其检测精度是可以达到要求的。

如果用 Zygo 平面干涉仪直接检测文中提到的工件面形, 直接测量结果可以看作由三部分组成:

$$\Delta w = \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3$$

其中: Δw_1 表示工件实际面形与理想面形的偏差, 即检测中实际关心的部分; Δw_2 表示工件理想面形与理想平面(参考波前)的偏差; Δw_3 表示非零位检测中的非共路误差。由于工件的理想面形已知, 因此 Δw_2 可以通过计算求得。由于检测波前是平面, 因此这里的 Δw_2 其实就是工件的理想面形本身。以 Δw_2 作为数字模板: 通过 Zygo 干涉仪的驱动软件 Metropro 自带的工具将其转换为 data 文件并将其设置为作为 Metropro 中的系统误差项, 同时激活 Metropro 中的去除系统误差功能, 这样这部分误差 Δw_2 就可以在检测过程中自动去除。如果再能确定 Δw_3 , 就可以得到准确的 Δw_1 。显然, Δw_3 与被检工件面形、矢高变化率密切相关, 面形越陡、矢高变化率越大则 Δw_3 的影响就越大。

为确定非共路误差的影响, 这里采用这种非零位检测方法对一个球面样板进行了检测。该平面顶点曲率半径为 $4\ 092.5\ \text{mm}$, 直径为 $10\ \text{mm}$, 由此可以计算出该球面边缘处与理想平面的最大偏离量为 4.826λ , 最大矢高变化率为 $1.74\ \lambda/\text{mm}$ 。采用正常零位检测的结果(即 Δw_1)如图 5(a)所示, 面形精度为 $PV=0.091\lambda$, $RMS=0.008\lambda$ 。在相同条件下采用非零位检测方法的结果(相当于 $\Delta w_1+\Delta w_3$)如图 5(b)所示, 面形精度为 $PV=0.089\lambda$, $RMS=0.008\lambda$ 。这里的 Δw_2 为该球面的标准面形与理想平面的偏差, 即该球面的标准面形本身

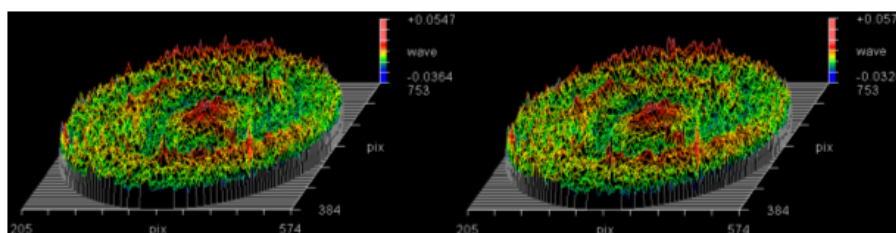


图 5(a) 表明常规方法检测的结果

图 5(b) 文中得到的非零位检测的结果

Fig.5(a) Result of traditional testing

Fig.5(a) Result of non-null testing proposed in the paper

(如图 6 所示)。比对两种检测手段的结果, RMS 完全相同, PV 值的差别为 0.002λ (多次重复测量 PV 值的最大差别为 0.005λ), 且这种误差是加性的, 不随 PV 值的增大而增大。对于一般精度的检测(要求 PV 精度达到 0.1λ , RMS 精度达到 0.02λ), 这个量级的误差是完全可以忽略不计的。这种非共路误差主要与被检工件位置、被检工件的陡度有关, 陡度越大则非共路误差越大。而实际被检工件的直径为 150 mm, 最大矢高变化率不大于 $0.05\lambda/\text{mm}$, 远小于球面样板的最大矢高变化率。因此当检测条件与检测球面样板一致时(主要是实际被检工件与干涉仪标准镜距离要与标定非共路误差时球面样板与干涉仪标准镜的距离一致), 非共路误差对检测结果的影响可以忽略。

基于以上的结论, 以被检工件的理想面形(如图 2(b)所示)与理想平面的偏差作为系统误差, 直接进行检测的结果就应该是工件的面形误差。应用这种检测方法, 最终测得工件面形误差 $PV=0.327\lambda$, $RMS=0.023\lambda$, 检测结果如图 7 所示。

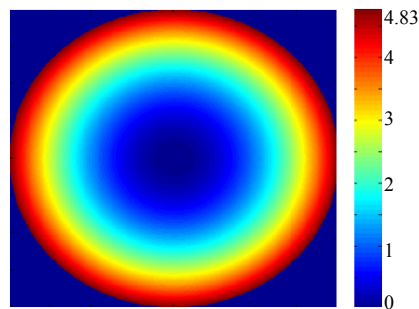


图 6 球面样板非零位检测中的系统误差

Fig.6 System error in non-null testing of the sphere model

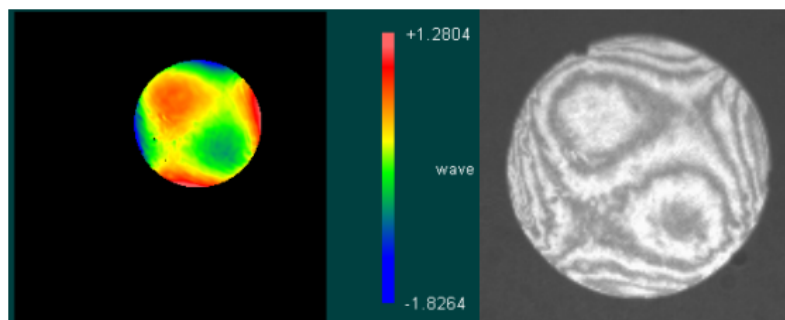


图 7 工件的最终面形

Fig.7 Final surface figure

2.2 误差分析

在 2.1 中通过对标准球面样板的非零位检测可以看到, 在一定情况下非共路误差的量级远小于工件的实际面形误差, 因而对检测精度的影响可以忽略不计。可以说, 实际检测结果是在干涉仪测量原理误差范围内的高精度近似, 或者说这种非零位检测合理利用了干涉仪动态范围。主要原因有以下两个方面。一是只有当被检工件的面形与其理论面形完全一致且不存在位置误差时, 参考光与检测光才能完全共路。但工件的面形总要存在这样或那样的误差, 位置误差也不可能被完全消除, 因此在实际工件的检测中绝对的零位条件不可能被满足。但理论和实践都表明, 在零位检测中由于干涉仪直接测得的被检工件面形误差是比较精确的, 由被测光与参考光非共路引入的误差完全可以忽略不计。二是在大多数非零位检测中, 参考光与被测光的非共路误差会对检测结果造成显著的影响, 因此需要反向光线追迹(reverse ray-tracing)来计算非共路误差的贡献并在检测结果中予以去除^[6-7]。但反向光线追迹需要干涉仪光学系统的精确参数作为输入条件, 而对于目前广泛使用的商用干涉仪这些参数是几乎无法得到, 因而通过反向光线追迹的办法来去除非共路误差对检测结果的影响是行不通的。基于以上的两点考虑, 这里对文中非回转对称非球面的非零位检测可以看作是对“带有特殊面形误差”的平面的零位检测。由于该“特殊面形误差”的 PV 及其斜率均较小, 处于干涉仪测量原理的允差范围之内, 因此其非共路误差可以忽略不计(前面已有证明), 而没有必要进行反向光线追迹。

由于检测是在恒温(20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 、恒压(一个大气压)实验室的气浮平台上进行, 因而外部温度变化及气流扰动对检测精度的影响不大。除非共路误差外, 影响检测结果的主要因素为工件的定位精度。作为空间刚体, 工件的位置包含 6 个自由度, 沿 z 轴(光轴方向)的平动 Δz , 沿 x 、 y 轴(确定垂直于 z 轴平面, 且与 z 轴两两

正交)的平动 Δx 、 Δy 、绕 z 轴的转动 θ_z 、绕 x 、 y 轴的转动 θ_x 、 θ_y 。由于标准镜为平面,且检测条件与检测标准球面样板时相同,因而 Δz 的影响并不大;由于在检测结果中所有的倾斜成分都要被清除,因此 θ_x 、 θ_y 的影响也不大。在像面上,被检工件形成的干涉条纹区域应该与数字模板完全重合,因此 θ_z 、 Δx 、 Δy 对检测结果影响相对较大。由于采样点比较密集(在工件直径方向的采样点为 450 个点左右,平均工件上每毫米对应 3 个像素点),数字模板上相邻像素的矢高差很小。实验表明,只要 Δx 、 Δy 均小于 1 mm 即实际干涉条纹与数字模板的偏差不超过 3 个像素,检测结果基本保持不变。而使 Δx 、 Δy 均小于 1 mm 是很容易实现的。即使在两次检测过程中干涉条纹区域较原来有较大的偏离,只需要根据偏离量对数字模板在 x 、 y 方向进行简单的坐标平移,不需要任何近似,对检测结果不会有影响。而 θ_z 则是对检测结果影响最大的因素。由于工件面形是非回转对称的,因此在每次检测过程中工件绕 z 轴的转角应与第一次检测时保持一致。实验表明,当 $|\theta_z| \geq 0.5^\circ$ 时,即工件绕 z 轴的转角超过初始值(第一次检测时工件与 z 轴的转角) 0.5° ,其对检测结果的影响就不可忽略不计了,此时与上次检测的结果将不再具有可比性。因此应尽量保证工件绕 z 轴的转角保持不变,即 $|\theta_z|$ 越小越好。同时在加工-检测的工艺循环中应当注意,若调整干涉仪的放大倍率,则需要根据新的干涉图大小重新制作数字模板。

3 结 论

本文讨论了一种面形方程为 $z=3\lambda(x^3+y^3)$ (x 、 y 为归一化坐标, $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$) 非回转对称非球面的加工和检测方法。首先加工出一个较好的基底平面,然后采用非球面数控中心研磨及手工研抛相结合的方式完成最终面形的加工;采用非零位检测的方法对工件进行了检测,并通过相关实验证明了检测过程中的非共路误差对检测精度的影响可以忽略不计。最后工件的面形精度达到了 $PV=0.327\lambda$, $RMS=0.023\lambda$ 。下一步的工作包括加工难度更大的凸非球面上迭加三次项的非回转对称非球面,并考虑采用计算全息图(CGH)实现高精度检测。

参考文献:

- [1] Dowski Edward R, Johnson Gregory E. Johnson. Wavefront Coding: A modern method of achieving high performance and/or low cost imaging systems [J]. *Proc. of SPIE*(S0277-786X), 1999, **3779**: 137-145.
- [2] 范镛, 张忠玉. 碳化硅光学镜面加工 [J]. *硅酸盐学报*, 2003, **31**(11): 1096-1100.
FAN Di, ZHANG Zhong-yu. Optical surfacing of spherical reaction-burned silicon carbide(RB-SiC)mirror [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2003, **31**(11): 1096-1100.
- [3] 李全胜, 成晔. 光学自由曲面数控加工方法 [J]. *光学技术*, 1998, **11**(6): 77-81.
LI Quan-sheng, CHENG Ye. NC fabrication method of optical free-form surface [J]. *Optical Technique*, 1998, **11**(6): 77-81.
- [4] 王贵林, 戴一帆. 光学非球面加工中研抛盘尺寸合理选择的研究 [J]. *机械工程学报*, 2004, **40**(1): 147-150.
WANG Gui-lin, DAI Yi-fan. Research on the determination for the abrasive disk's dimension in aspheric optics machine [J]. *Chinese Journal Mechanical Engineering*, 2004, **40**(1): 147-150.
- [5] Gappinger Robert O, Greivenkamp John E. Non-null interferometer for measurement of aspheric transmitted wavefronts [J]. *Proc. of SPIE*(S0277-786X), 2003, **5180**: 301-312.
- [6] Murphy Oaue E, Brown Thomas G, Moore Duncan T. Interference imaging for aspheric surface testing [J]. *Applied Optics* (S0003-6935), 2000, **39**(13): 2122-2129.
- [7] Greivenkamp John E, Gappinger Robert O. Design of a nonnull interferometer for aspheric wave fronts [J]. *Applied Optics* (S0003-6935), 2004, **43**(27): 5143-5151.