

绝对检验参考镜误差分析与热变形模型建立

陈 旭^{1,2} 袁文全¹ 冯玉涛³ 王 平¹ 刘伟奇¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033
²中国科学院研究生院, 北京 100049
³中国科学院西安光学精密机械与物理研究所, 光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 绝对检验是提高菲佐(Fizeau)型干涉仪参考面面形精度的重要方法。研究了过程中温度、重力和夹持力对绝对检验精度的影响。采用 Gram-Schmidt 拟合方法对参考面面形的变形量进行了拟合, 分析了 K9、融石英和微晶材料的参考镜均匀温度变化下的热变形及由于热变形导致的相应泽尼克(Zernike)系数的变化。最后, 分析了变形量对应的面形误差, 建立了每种材料的热变形模型。结果表明, 经过重力、夹持力和温度三者的叠加耦合, 温度变化产生的变形量与温度变化量仍呈近似的线性关系。在相同的外界条件下, 融石英材料产生的整体变形量最小; 而微晶材料产生的热变形量最小。微晶参考面由于热变形产生的面形变化量均方根为 0.37 nm/°C。

关键词 绝对检验; 热变形模型; 泽尼克拟合; Gram-Schmidt 拟合

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0212002

Study of the Error of the Reference Lens in Absolute Spherical Testing and the Thermal Deformation Model Establishment

Chen Xu^{1,2} Yuan Wenquan¹ Feng Yutao³ Wang Ping¹ Liu Weiqi¹

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Physics, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract Absolute measurement is an important method to improve the accuracy of the Fizeau interferometer. To achieve the high accuracy of the reference wave front in absolute spherical testing, the influence of environmental factors including temperature, gravity and damping force was studied. The Gram-Schmidt fitting was used to fit the deformation of the reference surface in representation of the Zernike coefficients. The contribution of the thermal deformation by temperature change and the change in Zernike coefficients caused just by temperature change were compared. The model of the thermal deformation was created and the corresponding aberration mode of the reference surface was analyzed which make the separation of the deformation caused by temperature possible so that the test accuracy can be enhanced. The result indicates that the deformation of fused silica is smaller than that of K9 and zerodur on the whole while the deformation of zerodur is smaller than that of K9 and fused silica in just temperature change. When the temperature takes one degree change, the root mean square of the zerodur surface reaches 0.37 nm.

Key words absolute spherical testing; thermal deformation model; Zernike fitting; Gram-Schmidt fitting

OCIS codes 120.3180; 120.4800; 120.6650; 120.6780

收稿日期: 2010-06-24; 收到修改稿日期: 2010-09-15

基金项目: 国家科技重大专项项目(08Q03FQ085)资助课题。

作者简介: 陈旭(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事光学设计和光学检测等方面的研究。E-mail: chxu2009@126.com

导师简介: 刘伟奇(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事 193 光刻中用于光学检测的点衍射干涉仪和菲佐干涉仪制造方面的研究。E-mail: liuwq@cio.mp.ac.cn

1 引 言

菲佐干涉仪主要通过参考面与被测面反射光的波像差相干产生的干涉条纹的偏离量来检测被测面的面形变形情况。参考面精度是干涉仪面形检测精度提高的关键限制因素。只有当参考面面形精度大于被测镜的面形精度至少一个数量级时,干涉测量结果被认为准确。当被测镜的面形精度与参考面面形精度相近时,直接采用干涉判读已经不能视参考面为理想的无偏差的面,需要采用绝对检验方法提供更高精度的参考面面形分布,从而提高干涉测量的精度^[1]。

绝对检验的关键在于精确获得具体使用环境下参考面和被测样板面之间的面形误差。在具体使用环境下的绝对检验标定过程中,由于灰尘、振动、气流等都会增加额外的光程差,给绝对检验标定结果带来误差;材料的均匀性和稳定性、温度、重力以及装夹结构等引起的面形变形影响参考面和测试样板面面形精度。关于绝对检验面形变形标定问题, Karl Edmund Elssner 等^[2]研究了干涉噪声在绝对检验中引入的参考面相位误差的去除方法; Maurizio Vannoni 等^[3,4]对菲佐干涉仪绝对检验中参考面在 3 点支撑方式下的重力和温度变形进行了详尽的分析;对重力变形分析 Maurizio Vannoni 应用泽尼克(Zernike)拟合,采用迭代算法对实验数据进行了进一步处理,分析了重力变形影响,但是拟合过程只采用了 26 项泽尼克项数拟合,而对温度变形分析 Maurizio Vannoni 深入研究了融石英参考镜在九年内温度随时间变化而导致的面形变形情况; Vincenzo Greco 等^[5]则研究了 3 平板绝对检验标定过程中轴向温度梯度对材料为融石英的参考镜径向面形变形的影响,但是没有应用泽尼克拟合,所获得的变形面没有与光学像差对应。当绝对检验标定过

程中温度发生变化时,导致参考面或者被测样板面面形发生变化,测量结果相应发生变化,最终导致不能达到测量精度要求。要提高绝对检验测量结果的可信度,对其使用前除需要重新标定以外^[6],还应分析绝对检验过程中误差引入的面形变形量的变化规律。

本文研究对象为正置立式球面干涉仪的凸凹形球面弯月镜,对绝对检验标定过程中温度对参考面面形的影响进行了研究,得到了温度变化导致的面形变形的规律。采用有限元软件建立透镜模型,施加载荷,提取变形量,采用 Gram-Schmidt 方法进行变形波面的泽尼克多项式面形拟合,建立了 3 种材料的热变形模型。热变形模型的提出使温度变化导致的变形量量化,从而使温度变化导致的面形变形规律在检测中成为已知,实现了温度在绝对检验过程中引起的系统误差的标定。对绝对检验的检测数据结果减去由于系统误差引起的变形可以在一定程度上提高检测的精度。

2 参考镜变形分析理论

2.1 菲佐干涉仪检测基本理论

图 1 为菲佐干涉仪的原理图。球面干涉仪的标准透镜为会聚透镜与参考镜构成的透镜组。镜头的最后一个表面为标准参考面。参考镜为一个上下表面具有曲率比较接近的弯月透镜^[7],其尺寸的选择依据被检测元件的特点而定。设计干涉仪的镜头时,参考镜的曲率半径选取依据标准镜头整体优化后得到设计结果而定。参考面反射回的 4% 的反射光作为参考波面。测试凸球面时,要求镜头的后截距大于被测面的曲率半径。对于凹球面,测试距离为被测面曲率半径与参考面曲率半径之和^[8-11]。干涉仪中被测样品的曲率半径与通光孔径的比值 R 数须小于等于球面标准镜的 F 数。

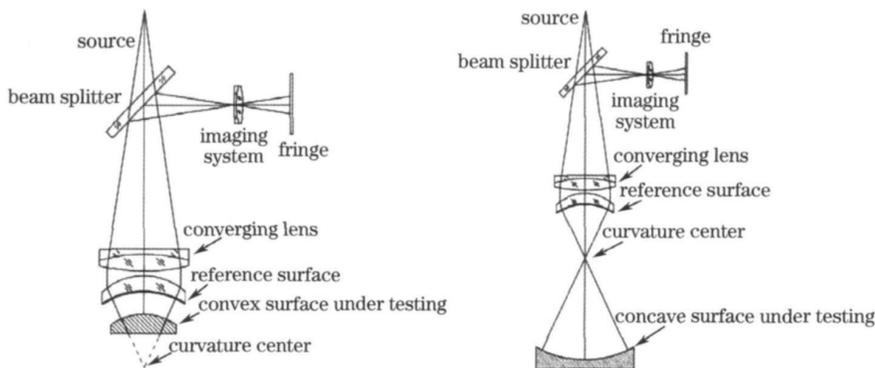


图 1 菲佐干涉仪原理图

Fig. 1 Principle of Fizeau interferometer

以下是菲佐干涉仪两种绝对检验方案

1) Harris 提出的采用 3 个球面镜 A, B, C 的两两组合, 如图 2 所示。

但是实际检测中需要考虑 C 透镜的玻璃光学均匀性误差, 而且凹凸面曲率半径相近时较难实现

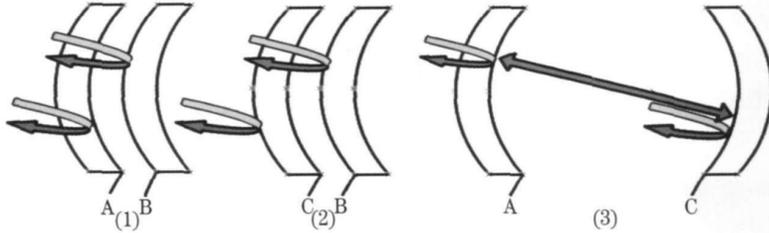


图 2 Harris 提出的绝对检验模型

Fig. 2 Model of absolute measurement advanced by Harris

非接触干涉测量。故一般采用 Schulz 的绝对检验方法进行球面绝对检验, 如图 3 所示。

2) Schulz 等^[12]提出的采用两个球面镜的球面绝对检验方法, 也进行 3 次测量: (1) 基本位置; (2) 旋转位置; (3) 猫眼位置。

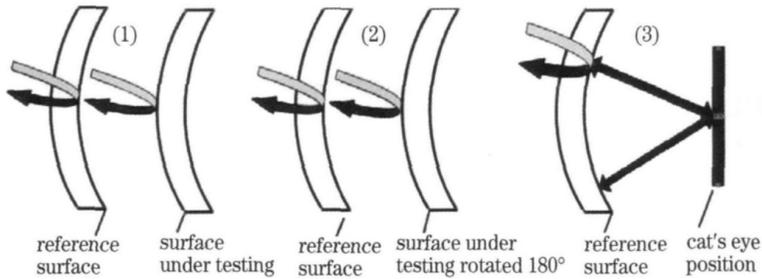


图 3 Schulz 提出的绝对检验模型

Fig. 3 Model of absolute measurement advanced by Schulz

采用不同的绝对检验方法, 获得参考面和被测面的波前分布的算法不尽相同^[12-17]。主要研究在绝对检验两次测量中参考面温度不完全相同及由于温度随空间位置变化造成的分层从而导致参考面和被测面温度有差异而引入的面形变形量的分布情况。

2.2 面形拟合

由有限元软件(如 Ansys, Patran)分析得到的镜面内的节点坐标和对应的变形数据为离散点集合的形式, 而泽尼克多项式在离散圆上不正交, 需要采用拟合算法进行数据处理^[18]。拟合算法主要有 4 种: 最小二乘法、Gram-Schmidt 方法、Householder 算法和协方差法。拟合过程需要将笛卡儿坐标转换为极坐标^[19-22]。

泽尼克拟合过程是在归一化圆上进行, 选择了 Daniel Malacara 提出的 Gram-Schmidt 方法来拟合泽尼克系数^[23]。

泽尼克多项式的表达形式为

$$Z_n^m(\rho, \theta) = \sqrt{2(n+1)} R_n^m(\rho) \begin{cases} \cos m\theta \\ \sin m\theta \end{cases} \quad (1)$$

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left[\frac{n+m}{2} - s \right]! \left[\frac{n-m}{2} - s \right]!} \rho^{-2s}, \quad (2)$$

式中 $n-m \geq 0$ 且为偶数。 n 为径向级次, m 为方位角频率。 $\cos m\theta$ 项对应对称的多项式, $\sin m\theta$ 项对应非对称的多项式。在拟合过程中需要对坐标进行归一化和单位转换^[24]。拟合采用 49 项泽尼克多项式, 选用了 Jame C. Wyant^[25]提出的极坐标表达式的泽尼克基底形式。

2.3 热变形理论

温度对于面形的影响方式有 3 种: 温度、温度梯度、温度随空间位置变化造成的分层。镜面热变形理论计算公式为

$$\Delta l = \alpha \Delta T, \quad (3)$$

式中 α 为线膨胀系数; ΔT 为温度变化量; Δl 为材料轴向长度变化量。当环境温度变化时, 镜子内部也产生温度变化, 由于玻璃热交换不均匀, 镜子内部产生的热应力导致不均匀热膨胀, 使镜面变形。当工作平台的热容量与周围环境相同, 环境温度各向同性变化时, 由 (3) 式可以看出镜面的变化项应该为与 ρ 有关

的项。计算微晶、融石英、K9 三种材料在轴向长度 20 mm, 长度方向变化 1% 波长时的温度容限, 得到结果如下: 由公式 $T < 0.01\lambda(D\alpha)$ 得到微晶的温度容限 6.328 °C; 融石英的温度容限 0.575 °C; K9 的温度容限 0.0904 °C。即微晶温度变化 ±3.164 °C, 融石英温度变化 ±0.288 °C, K9 温度变化 ±0.0452 °C, 参考面由于温度变化导致的轴向长度变化量为 6.328 nm。

2.4 参考镜几何模型的建立

参考镜如图 4, 5 所示, 对于正置立式干涉仪, 参考面为镜片的下表面, 装夹结构采用轱边的形式, 结构为全胶结结构。夹持力 $F = 50$ N; 支撑方式选用底部殷钢 6 点均匀支撑, 底部支持力起支反作用。镜框材料为殷钢 4J45; 胶粘剂为某环氧树脂胶。镜片组件的边界条件均为底面外缘 6 点均匀支撑, 环向 3 点均匀装夹, 重力及均匀温升。

镜片组件的有限元模型采用六面体线性单元建立。引起面形变化的因素包括以下 3 个方面: 重力 ($g = 9.806$ N/kg)、装夹力 ($F = 50$ N) 和均匀温升 ($\Delta T = 1$ °C)。其中, 装夹力作用于镜框外侧母线的

中点, 为 3 点均匀夹持。耦合方式采用序贯耦合解法, 具体步骤如下: 首先计算镜片组件的热应力, 并作为预应力加载到镜片组件上, 然后施加重力及装夹力载荷, 计算出镜片组件的变形状况。

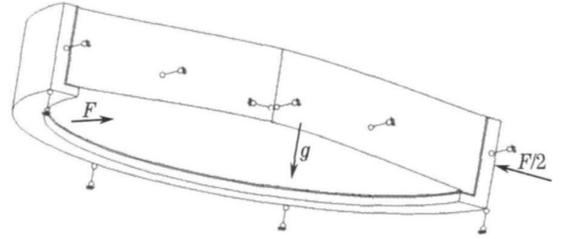


图 4 镜片的力学模型

Fig. 4 Dynamic model of reference lens

透镜非工作区域口径尺寸大小为 $D = 164$ mm, 上下表面曲率半径相近, $R_1 = 476$ mm, $R_2 = 458$ mm, 有效直径分别为 $D_1 = 149$ mm, $D_2 = 130$ mm; 厚度 $H = 26.5852$ mm; 选择的参数与 Zygo transmission sphere 选择系列的 6 inch (1 inch = 2.54 cm), F 数为 3.5 的 6024 0413 参考面样板数据相同。模型图如图 5 所示。

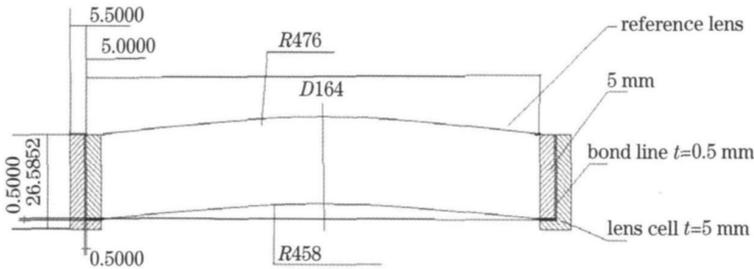


图 5 透镜模型图

Fig. 5 Model of reference lens

通常制造参考镜的材料为 K9、微晶和融石英。对于透镜不同的直径与厚度比值, 重力与夹持力引起的变形量不同。对于同一种透镜材料, 外载荷及约束方式相同时, 直径与厚度的比值越小, 重力与夹持力引起的变形量越大。不同的工况下重力与夹持力引起的变形情况不同, 需要具体问题具体分析。本文主要针对温度变化引起的变形情况进行研究。材料的性质如表 1 所示。

表 1 三种材料的机械性质

Table 1 Mechanical property of three materials

Material	K9	Zerodur	Fused quartz
E / Pa	61.7×10^9	90.6×10^9	74.59×10^9
ν	0.2	0.24	0.16
α / Pa	3.5×10^{-6}	0.05×10^{-6}	0.55×10^{-6}
ρ / (g/cm ³)	2.47	2.53	2.2

3 镜面面形拟合与热变形模型的建立

3.1 三种材料的参考镜在重力、均匀温升、装夹力三者叠加及耦合作用后与只有重力、装夹力作用的表面面形情况比较

通过提取 3 种材料参考面的结点变形数据, 计算了表面变形量的均方根 (RMS) f_{RMS} 与峰谷波像差 (PV) f_{PV} 作为其面形精度评价标准:

$$f_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta z_i - \overline{\Delta z})^2}{n}}; \quad \overline{\Delta z} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta z_j}{n}$$

$$f_{PV} = Z_{max} - Z_{min}, \quad (4)$$

式中 $\overline{\Delta z}$ 为刚性位移, z 为镜面轴向坐标, n 为提取的表面变形节点的数量。由于镜面表面变形量的均方根结果去除了刚性位移, 最终由温度变化产生的镜面表面变形量的均方根应该小于 2.3 节中由热变理论公式计算出的各材料温度变化产生的轴向长度

变化量。

3.1.1 重力、均匀温升、装夹力三者叠加及耦合作用后的表面面形情况比较(PV、RMS比较)
采用序贯耦合解法,将热应力作为预应力加载

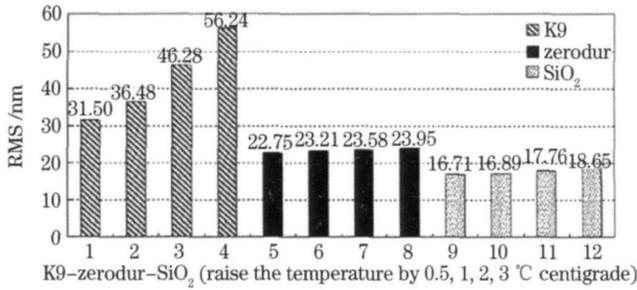


图 6 三种材料的参考面面形 RMS 对比

Fig. 6 RMS of reference surface with different materials

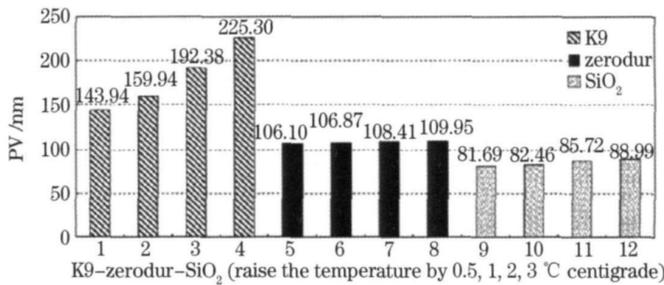


图 7 三种材料的参考面面形 PV 对比

Fig. 7 PV of reference surface with different materials

3.1.2 只有重力和装夹力作用的表面面形情况比较(PV、RMS比较)

图 8 为考虑只存在重力及装夹力载荷情况下 3 种材料的参考面面形的变形情况。

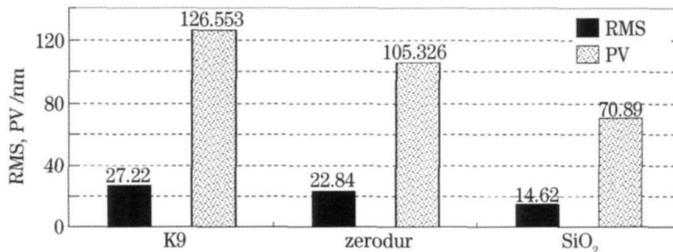


图 8 三种材料的参考面面形 RMS 和 PV

Fig. 8 RMS and PV of reference surface with different materials

3.2 热变形引起的表面变形量

对于 K9 材料,温度每变化 1 °C 时引起参考面的面形变形量 RMS 为 9.96 nm, PV 大于 20 nm; 对于融石英材料,温度每变化 1 °C 时引起的参考面的面形 RMS 变形量为 0.87 nm, PV 变化 3.26 nm; 对于微晶材料,温度每变化 1 °C 时引起的参考面的面形 RMS 变形量为 0.37 nm, PV 变化 1.54 nm。

从所得数据(图 6,图 7 和图 8)中分离出由于温度变化即热变形导致的三种材料参考面面形的变形情况,表示为图 9 形式的对比图。

结果表明,在耦合了重力与夹持力后,温度变化

到镜片上,然后施加重力及装夹力载荷后的面形变形情况。图 6,7 为 3 种材料的参考面在存在重力与夹持力载荷下,均匀温升($\Delta T = 0.5, 1, 2, 3$ °C)后的表面变形量的对比图。

导致的热变形量仍然与温度变化量呈近似线性关系,但热变形量的温度梯度与热膨胀系数不呈线性关系。微晶材料相对 K9 材料与融石英材料在同样的温度变化下,参考面所产生的热变形量最小。

3.3 三种材料的变形泽尼克拟合系数

根据提取出的表面变形数据,对变形波面进行泽尼克多项式拟合,并画图比较各种材料泽尼克系数的大小。

通过对参考面数据的提取和处理,得到 3 种材料的参考面在存在立式重力情况下温度变化 0.5 °C, 1 °C, 2 °C, 3 °C 时泽尼克系数的变形拟合曲

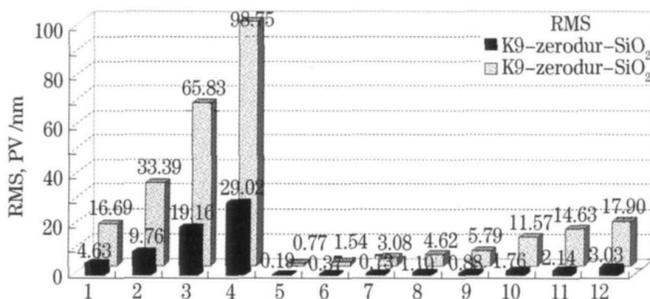


图 9 三种材料参考面的面形变形 RMS 与 PV 对比情况

Fig.9 Deformation RMS and PV of reference surface with different materials

线图如图 10 所示。图 10(d) 为微晶表面变形示意图。

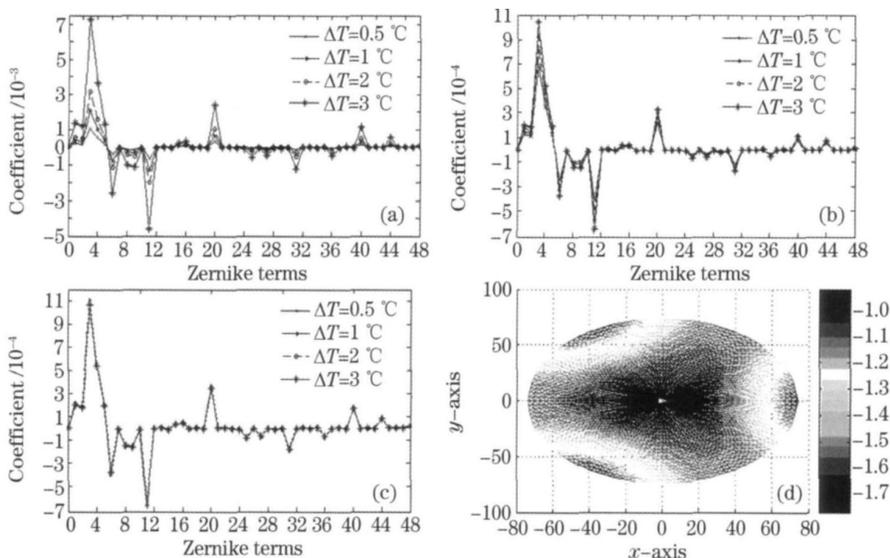


图 10 三种材料参考镜面形的变形 RMS 与 PV 对比情况。(a) K9, (b) 融石英, (c) 微晶材料和(d) 微晶表面示意图

Fig.10 Deformation RMS and PV of reference surface with different materials. (a) K9, (b) SiO₂, (c) zerodur and (d) the map of zerodur

对 K9、微晶和融石英 3 种材料参考面的各节点处重力、均匀温升、装夹力、3 者迭加及耦合作用后的变形量与只有重力、装夹力作用的变形量两者相减得到一组新的变形量集合, 这组变形量初步认为主要是由温度变化导致的参考面热变形量。对新的变形量集合重新进行泽尼克系数拟合, 得到温度变化 0.5 °C, 1 °C, 2 °C, 3 °C 时泽尼克系数的变形曲线图如图 11 所示。随着温度变化量的增大, 泽尼克系数幅值增大。图 11(d) 的纵坐标为泽尼克项对应的变形量(泽尼克系数与对应项表达式的乘积), 其单位为 nm。其中变化较大的项: 3(离焦)、4(0 方向像散)、8(初级球差与离焦)、11(二级 0 方向像散)、15(二级球差)、20(三级 0 方向像散)、24(三级球差)、31(四级 0 方向像散)、35(四极球差)、44(五级 0 方向像散)、47(Y 轴五级彗差)。可见对于文中分析的透镜, 热变形主要导致产生球差与 0 方向像散。

通过分析泽尼克系数, 可以建立变形模型; 通过分析像差形式, 可以研究热变形引起的主要像差变化项。这样有利于根据每项泽尼克代表的像差有针对性地分析变形波面产生的像差种类, 并根据变形趋势提取变形模型。

由提取的分析结果, 可知温度的变化量与温度变化导致的热变形量仍然呈近似的线性关系。但热变形量的温度梯度与热膨胀系数不呈线性关系。

为了进一步证实温度与变形量的线性关系, 提取了温度变形的绝对变形量的模型如图 12, 13 所示。图 12 为温度变化 2 °C 与温度变化 1 °C [分为 $(\Delta T_3 - \Delta T_2) / \Delta T_1$; $\Delta T_2 / \Delta T_1$ 两种情况] 时泽尼克系数的变化量的相对比值。

图 13 为温度变化 2 °C 与温度变化 1 °C ($\Delta T_2 / \Delta T_1$) 和温度变化 3 °C 与温度变化 1 °C 时 ($\Delta T_3 / \Delta T_1$) 时泽尼克系数的变化量的相对比值。

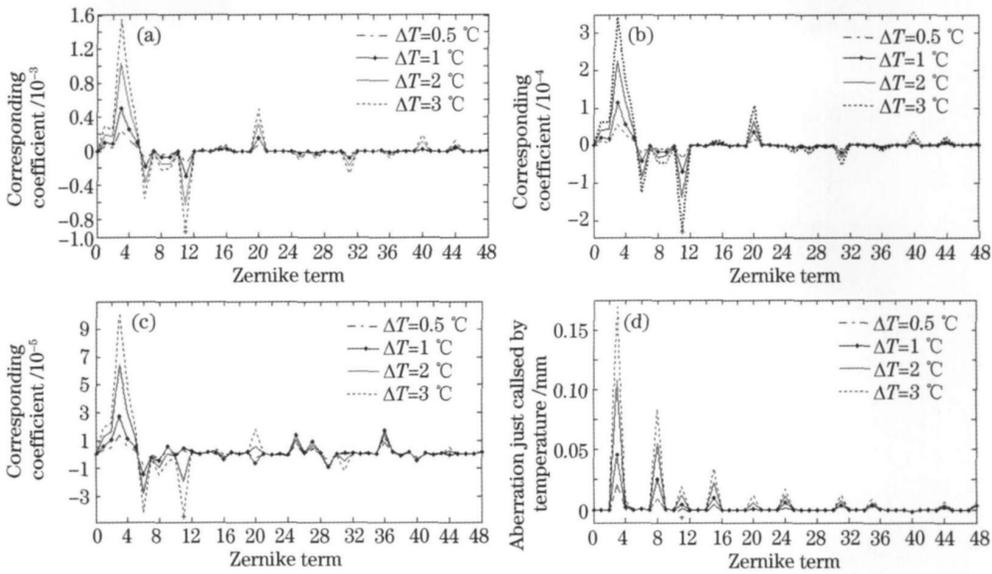


图 11 三种材料参考面面形变形量的 RMS 与 PV 对比情况。(a) K9, (b) 融石英, (c) 微晶材料和 (d) 微晶的变形量
Fig. 11 Deformation RMS and PV of reference surface with different materials. (a) K9, (b) SiO₂,

(c) zerodur and (d) deformation of zerodur

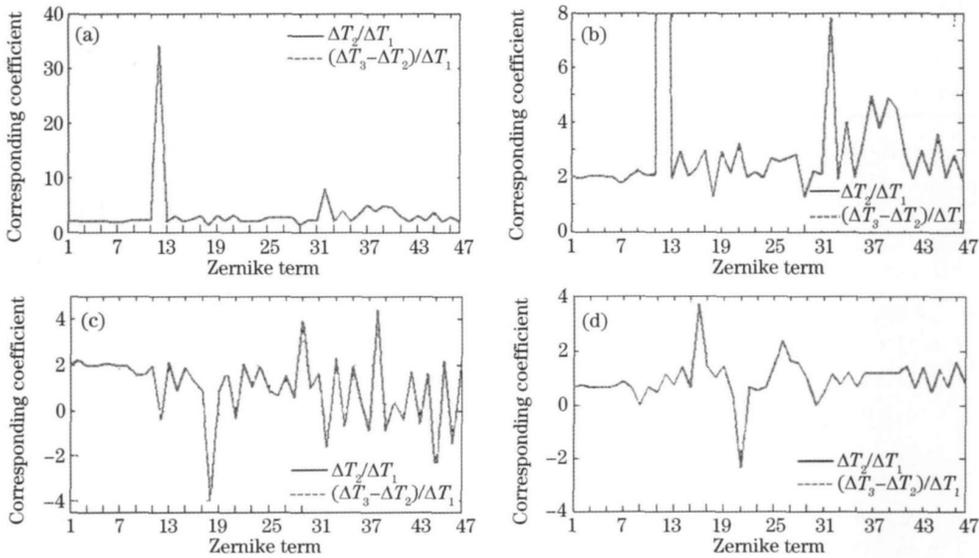


图 12 温度变化 2 °C 与变化 1 °C 时 Zernike 系数变化量的比值。(a) K9, (b) K9, (c) SiO₂, (d) zerodur

Fig. 12 Relative values of the changes of Zernike coefficients among different temperature increments.

(a) K9, (b) K9, (c) SiO₂, (d) zerodur

3.4 热变形模型的建立

依据分析结果, 提取了 $\Delta T = 1\text{ }^\circ\text{C}$ 变形量的泽尼克系数, 对系数保留四位有效数字, 选取像差的主要变化项为 3 到 8 项、11、15、20、24、31、35、44、47, 如表 2 所示。得出 K9 材料、融石英材料、微晶材料在绝对检验过程中由于温度变化导致的参考面面形变形的普适热变形模型:

$$\Delta Z_{\text{material}} = \Delta T (a_3 Z_3 + a_4 Z_4 + a_5 Z_5 + a_6 Z_6 + a_7 Z_7 + a_8 Z_8 + a_{11} Z_{11} + a_{15} Z_{15} + a_{20} Z_{20} + a_{24} Z_{24} + a_{31} Z_{31} + a_{35} Z_{35} + a_{44} Z_{44} + a_{47} Z_{47}). \quad (5)$$

此模型的重要意义是拟合出了参考面由于温度变化产生的系统误差, 利于消除环境温度变化引起的面形的变形量。

根据拟合出的泽尼克系数, 建立了热变形模型。实现了绝对检验过程中环境温度变化导致的热变形量与重力、夹持力变形量的分离。定量标定热变形量后, 通过对测量结果消除环境温度变化导致的热变形量, 可以使所使用的参考面的误差减小, 精度一定程度上得到提高。

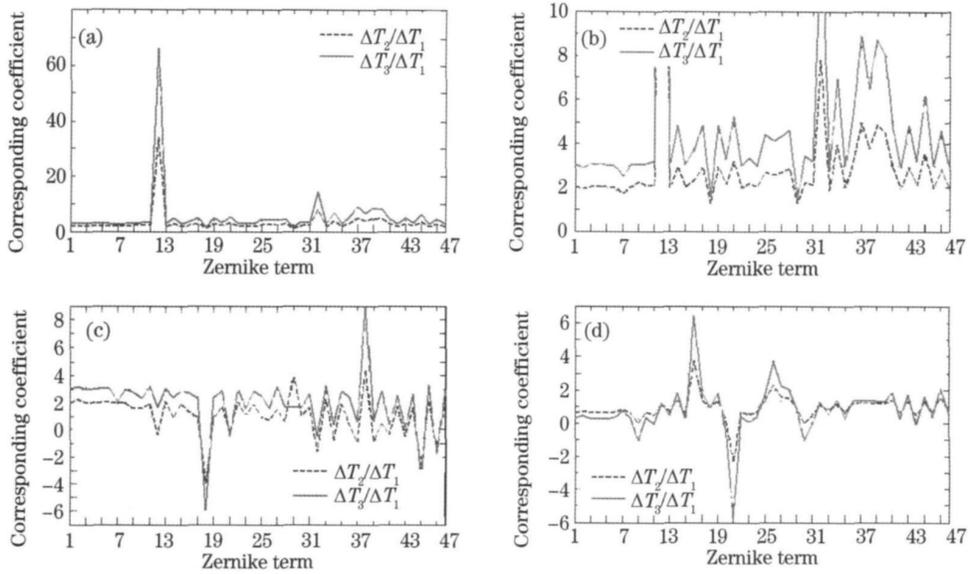


图 13 温度变化 2 °C 与变化 1 °C; 变化 3 °C 与变化 1 °C 时 Zernike 系数的变化量的相对比值。

(a) K9, (b) K9, (c) SiO₂, (d) zerodur

Fig. 13 Relative values of the changes of Zernike coefficients among different temperature increments.

(a) K9, (b) K9, (c) SiO₂, (d) zerodur

表 2 三种材料变形系数

Table 2 Deformation coefficients of three materials

Deformation coefficients	K9	Zerodur	Fused quartz
a_3	- 0.00051	- 0.0001	- 0.00011
a_4	- 0.00025	- 4.8 × 10 ⁻⁵	- 5.7 × 10 ⁻⁵
a_5	- 9.2 × 10 ⁻⁵	- 1.8 × 10 ⁻⁵	- 2 × 10 ⁻⁵
a_6	0.000188	4.16 × 10 ⁻⁵	4.14 × 10 ⁻⁵
a_7	6.74 × 10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻⁶	1.51 × 10 ⁻⁶
a_8	7.18 × 10 ⁻⁶	1.47 × 10 ⁻⁶	1.61 × 10 ⁻⁵
a_{11}	0.0003	4.33 × 10 ⁻⁵	7.03 × 10 ⁻⁵
a_{15}	- 1.7 × 10 ⁻⁵	- 3.4 × 10 ⁻⁶	- 3.8 × 10 ⁻⁶
a_{20}	- 0.00015	- 1.8 × 10 ⁻⁵	- 3.6 × 10 ⁻⁵
a_{24}	5.5 × 10 ⁻⁶	1.19 × 10 ⁻⁶	1.22 × 10 ⁻⁶
a_{31}	8.14 × 10 ⁻⁵	1.17 × 10 ⁻⁵	1.92 × 10 ⁻⁵
a_{35}	- 2.3 × 10 ⁻⁶	- 5 × 10 ⁻⁷	- 5.1 × 10 ⁻⁷
a_{44}	- 3.6 × 10 ⁻⁵	- 5.1 × 10 ⁻⁶	- 8.6 × 10 ⁻⁶
a_{47}	5.96 × 10 ⁻⁷	- 1.6 × 10 ⁻⁷	2.1 × 10 ⁻⁷

4 结 论

在经过重力、均匀温升、装夹力三者叠加耦合作用后, 对面形变形量的结果进行提取分析, 发现对每种材料, 温度变化导致的变形量与温度的变化量仍然呈近似的线性关系。根据拟合出的泽尼克系数, 建立了每种材料的热变形模型。其中微晶材料的热稳定性是 3 种材料中最好的, 温度变化引起的变形量最小。

对于不同的透镜装夹支撑方式, 重力与夹持力

引起的面形变形分布情况不同, 需要针对不同情况进行具体分析。本文主要针对温度变化引起的变形情况进行了研究, 提出了一种建立热变形模型的方法, 该方法适用于不同透镜装夹支撑方式。热变形模型的建立使绝对检验过程中环境温度变化引入的面形变形量的消除成为可能, 一定程度上提高绝对检验标定结果的精度。

参 考 文 献

- 1 Xu Deyan, Wang Qing, Gao Zhishan. Active Optical Element Testing and International Standard[M]. Beijing: Science Press, 2009. 92~ 93
徐德衍, 王青, 高志山. 现行光学元件检测与国际标准[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 92~ 93
- 2 Karl-Edmund Ellsner, R. Burow, J. Grzanna. Absolute sphericity measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(21): 4649~ 4661
- 3 M. Vannoni, G. Molesini. Three-flat test with plates in horizontal posture[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(12): 2133~ 2145
- 4 M. Vannoni, A. Sordini, G. Molesini. Long-term deformation at room temperature observed in fused silica[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 5114~ 5123
- 5 V. Greco, G. Molesini. Micro-temperature effects on absolute flatness test plates[J]. *Pure Appl. Opt.*, 1998, **7**(6): 1341~ 1346
- 6 C. J. Evans, R. N. Kestner, C. J. Evans et al.. Test optics error removal[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(7): 1015~ 1021
- 7 Daniel Malacara. Optical Shop Testing[M]. Third edition, New Jersey: Wiley-Interscience, 2007, **32**: 40~ 46
- 8 Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao et al.. Analysis and correction of retrace error for non-null aspheric testing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 688~ 697
刘东, 杨勇英, 田超等. 非球面非零位检测中的回程误差分析与校正[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 688~ 697

- 9 Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongqiang *et al.*. Measurement error analysis of high precision fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. *Chinese J. Lasers* 2010, **37**(8): 2029~ 2034
- 苗二龙, 张健, 谷勇强等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2029~ 2034
- 10 Gao Zhishan. Analysis of coincidence tolerance between F' and C for the transmission spheres with small F -number[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 793~ 796
- 高志山. 小 F 数标准球波面透镜组的 F' C 重合误差分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 793~ 796
- 11 Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan *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
- 12 R. Schreiner, J. Schwider, N. Lindlein *et al.*. Absolute testing of the reference surface of a Fizeau interferometer through even/odd decompositions[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(32): 6134~ 6141
- 13 J. C. Wyant. Absolute testing of flats by using even and odd functions[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(25): 4698~ 4705
- 14 M. Vannoni, G. Molesini. Absolute planarity with three-flat test: an iterative approach with Zernike polynomials[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(1): 340~ 354
- 15 R. E. Parks, L. Shao, C. J. Evans. Pixel-based absolute topography test for three flats[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(25): 5951~ 5956
- 16 U. Griesmann. Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(23): 5856~ 5865
- 17 Xu Chen, Chen Lei. Absolute flatness measurement of optical surfaces[J]. *Opt. Technol.*, 2006, **32**(5): 775~ 778
- 徐晨, 陈磊. 光学平面绝对检验方法的研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(5): 775~ 778
- 18 Daniel Malacara, Manuel Servín, Zacarias Malacara. Interferogram Analysis for Optical Testing [M]. CRC Press, 2005. 137~ 144
- 19 Yan Jingzhou, Lei Fan. Algorithms for wavefront fitting using Zernike polynomial[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(5): 119~ 128
- 鄢静舟, 雷凡. 用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J]. *光学精密工程*, 1999, **7**(5): 119~ 128
- 20 J. Y. Wang, D. E. Silva. Wave front interpretation with Zernike polynomials [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(19): 1510~ 1518
- 21 Shan Baozhong, Wang Shuyan, Niu Hanben *et al.*. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(3): 318~ 323
- 单宝忠, 王淑岩, 牛憨笨等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(3): 318~ 323
- 22 Xie Bin, Xiao Zhihong, Yu Jinchi. Analyzing thermal deformation of ultra-thin mirror using Zernike polynomials[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(2): 173~ 179
- 解滨, 肖志宏, 余景池. 利用 Zernike 多项式分析超薄镜热变形[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(2): 173~ 179
- 23 D. Malacara. Wavefront fitting with discrete orthogonal polynomials in a units radius circle [J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(6): 672~ 675
- 24 R. R. Shannon, J. C. Wyant. Catalog of Zernike polynomials [J]. *Appl. Opt. & Opt. Engng.*, 1987, **10**: 193~ 221
- 25 J. C. Wyant. <http://www.optics.arizona.edu/jwyant/Zernikes/ZernikePolynomialsForTheWeb.pdf>