

基于总散射测量的表面质量检测新方法

黄聪¹, 张科鹏², 王翔¹, 孙年春¹, 张彬^{1*}, 陈坚³, 赵建华³

¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064;

² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³ 超光滑表面无损检测安徽省重点实验室, 合肥知常光电科技有限公司, 安徽 合肥 230031

摘要 光学元件在加工及使用过程中引入的麻点或擦痕会严重影响其表面质量。基于 Peterson 疵病散射理论, 将麻点或擦痕引起的散射光分为两部分, 即对麻点(或擦痕)内部表面的散射光作漫反射分析, 对麻点或擦痕外围轮廓引起的散射光作衍射分析。进一步考虑麻点和擦痕的挡光效应, 以及麻点衍射消失的边界条件, 通过将疵病散射理论与国家标准 GB/T 1185—2006 相结合, 推导出麻点、擦痕的双向反射分布函数的解析表达式, 进而分析了不同疵病级数下的角分辨散射和总散射。研究表明: 表面疵病的总散射与疵病面积近似成线性正比, 进而据此提出了一种基于总散射测量的表面质量检测新方法, 并分析了光学元件表面疵病的阈值。

关键词 散射; 疵病检测; 表面疵病; 散射光; 疵病阈值

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0712005

Method for Surface Quality Inspection Based on Total Scattering Measurement

Huang Cong¹, Zhang Kepeng², Wang Xiang¹, Sun Nianchun¹,
Zhang Bin^{1*}, Chen Jian³, Zhao Jianhua³

¹ College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³ Anhui Province Key Laboratory of Non-Destructive Evaluation, ZC Optoelectronic Technologies. LTD., Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Digs or scratches generated during the processing and application of optical components seriously affect the surface quality of these components. The scattered light caused by digs or scratches is divided into two parts based on Peterson's defect scattering theory: geometric refraction or reflection from the surfaces inside scratches or digs and diffraction of light that passes around the scratch or dig. The analytical formulas for the bidirectional reflection distribution function of the scratches or digs are derived considering the light-blocking effect of the digs and scratches and the boundary conditions for the disappearance of diffraction around the digs, and by combining the theory of defect scattering with the new national standard of GB/T 1185-2006. Then, angular resolved scattering and total scattering are analyzed under different defect grade numbers. The results show that the total scattering of the surface defect is approximately linearly proportional to the area of the defect. On this basis, herein, a surface quality inspection method based on total scattering measurement is proposed, and the surface defect thresholds of optical components are analyzed.

Key words scattering; defect inspection; surface defect; scattering light; defect threshold

OCIS codes 290.1483; 290.2648; 240.6700

收稿日期: 2019-01-14; 修回日期: 2019-03-11; 录用日期: 2019-03-25

基金项目: 四川省科技计划(2018JY0553)、天津市薄膜光学重点实验室开放基金课题(kjwx170620)、合肥知常光电科技有限公司超光滑表面无损检测安徽省重点实验室(CGHBMWSJC06)

* E-mail: zhangbinff@sohu.com

1 引 言

光学元件表面呈现的麻点、斑点、擦痕、破边等瑕疵统称为表面疵病^[1]。在成像光学系统中,光学元件表面疵病引起的散射会加剧噪声,降低系统的信噪比,进而严重破坏系统的成像质量。此外,在高功率激光装置中,表面疵病不仅会造成光学元件表面散射量的增加,还会因其吸收光能量而引起元件薄膜的破坏及损伤阈值的降低,从而缩短光学元件的使用寿命或导致整个系统工作失效。通常,表面疵病产生于光学元件的抛光、磨边、注塑、镀膜等过程。在实际工作中,对光学元件表面疵病的检测是确保高功率激光装置、精密光学系统、紫外光刻及红外光学探测系统等有效运行的基础和关键。

目前,光学元件表面疵病的检测方法主要为人工目视检测法^[2]。此外,还有人采用动态彩色编码融合成像技术^[3]、多光谱成像技术^[4]以及基于条纹反射的技术^[5]对光学元件的表面疵病进行检测。美国 Savvy 光学公司开发了一款光学表面划痕、麻点检测系统^[6],该系统结合专门的分析软件及照明装置对表面疵病进行检测,但其只支持美国军标及美国国家标准。目前,利用放大镜或显微镜对表面疵病进行目视检测仍是最为普遍的方法,但该方法有诸多不足,如对检测人员的实际经验要求较高、主观性强、费时费力、工作强度大。对于光学元件表面质量的大批量检测,肉眼检测的方法显然已不能满足实际应用的需要。因此,急需寻求一种简单、准确的疵病检测新方法。

在光学元件表面疵病的检测过程中,存在一个疵病阈值^[1],当表面疵病的总量在该阈值范围内时,可以认为该元件符合某系统的应用需求;而当表面疵病的总量超过该阈值时,该元件就不能满足某特定应用的需要。因此,结合表面疵病检测的实际应用情况,合理判断光学元件的疵病阈值对表面疵病的检测具有重要意义。

Peterson 在研究表面疵病对光的散射作用时,把表面疵病引起的散射光分为几何反射(或折射)和衍射两部分。相对于基板表面而言,麻点(或擦痕)内部表面凹凸不平且相当粗糙,当入射光打在麻点(或擦痕)内部表面上时,将发生几何反射或折射;而从麻点(或擦痕)边缘通过的入射光,将会不可避免地产生衍射现象。本文基于 Peterson 疵病散射理论^[7],进一步考虑麻点和擦痕的挡光效应,建立了光学元件表面疵病的散射模型。在定量分析不同疵病

级数下角分辨散射(ARS)和总散射(TS)的基础上,提出了一种基于 TS 测量表面质量的快速检测新方法,进而讨论了光学元件的疵病阈值,以实现表面疵病的新国家标准数字化快速检测。

2 理论模型

在光学元件的加工制造过程中,表面疵病公差是衡量光学元件表面加工质量的重要指标,而利用光的散射特性检测光学元件表面疵病是目前疵病检测的主要方法之一。利用光散射评估光学元件表面加工质量时,其表面的散射特性主要受表面粗糙度及表面洁净度的影响。光学元件表面的空间散射强度分布采用 ARS 分布函数进行描述^[8],而其散射总量则采用 TS 进行表征。因此,实际表面的 ARS 是表面粗糙度、表面缺陷以及表面洁净度的散射之和,即

$$A = \rho_1 A_{\text{rou}} + \rho_2 A_{\text{def}} + \rho_3 A_{\text{cle}}, \quad (1)$$

式中: A_{rou} 、 A_{def} 、 A_{cle} 分别为表面粗糙度、表面疵病、表面洁净度的 ARS 分布函数; ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 为相应的比例系数,可通过实验测量获得。为方便讨论且不失一般性,文中假定 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ 。根据国际标准 ISO 13696—2002^[9],当入射光垂直入射时,TS 定义为元件表面上散射到半球空间的功率 P_s 与入射功率 P_i 的比值,即

$$T = \frac{P_s}{P_i} = 2\pi \int_0^{\pi/2} A(\theta_s) \sin \theta_s d\theta_s, \quad (2)$$

式中: θ_s 为散射角。

2.1 表面疵病的散射模型

光学元件的表面疵病主要包括麻点和擦痕。麻点是指光学元件表面呈现的微小点状凹穴,包括开口气泡、破点,以及细磨或精磨后残留的砂痕等。擦痕是指光学元件表面呈现的微细的长条形凹痕^[1]。根据国家标准 GB/T 1185—2006,可用级数表示疵病的等级。级数 G 是以毫米为单位且表征表面疵病大小的数值分级,级数值为疵病面积的平方根,也是该级表面疵病的最大值。表面疵病的基本级数(包括擦痕的宽度和长度系列)是公比为 1.6 的优先数系列,基本级数系列值分别为 0.0040, 0.0063, 0.010, 0.016, 0.025, 0.040, 0.063, 0.10, 0.16, 0.25, 0.40, 0.63, 1.0, 1.6, 2.5, 4.0 mm, 非特定要求时,级数小于 0.0040 mm 的疵病可忽略不计。表面疵病公差由基本级数及其许有个数组成。在疵病总面积不变的前提下,表面疵病公差的基本级数可通过换算系数分解成若干个较小级数或折算成不同长宽比

的短擦痕。

光学元件在加工及使用过程中引入的疵病会降低光学元件的表面质量,进而影响光学元件表面的散射特性。根据 Peterson 疵病散射理论,可将麻点或擦痕引起的散射光分为两部分,即对麻点或擦痕内部表面的散射光作几何反射或折射分析,或者对绕过麻点或擦痕外轮廓的散射光进行衍射分析^[7],如图 1 所示。

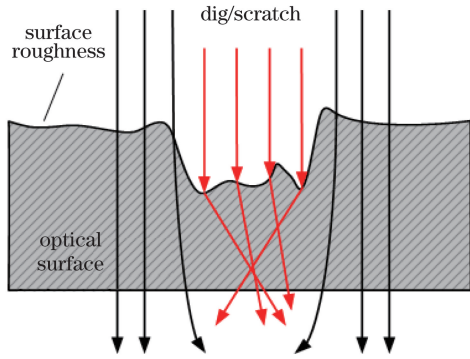


图 1 麻点或擦痕对散射的两种贡献方式

Fig. 1 Two contributions to scattering from dig or scratch

由麻点内部表面引起的散射光的角度分布取决于麻点表面的几何形状。为了便于分析麻点内部表面的散射光,可通过朗伯模型对麻点内表面进行建模,而对于麻点外围轮廓引起的衍射,在远场近似中使用标量衍射理论来逼近麻点衍射光的强度。根据巴比涅原理,来自遮蔽物的衍射与来自孔径的衍射相同。虽然实际的麻点可以是任何形状,但为了便于研究,将麻点假设成圆形,并均匀地分布在光学元件表面。根据文献^[7]可得,直径为 d 的麻点的双向反射分布函数(BRDF)为

$$B_d(\theta_s) = \frac{1}{4} N_d d^2 \left[1 + \frac{\pi^2 d^2}{4\lambda^2} \left(1 + \frac{\sin^2 \theta_s}{l_d^2} \right)^{-3/2} \right],$$

$$l_d = \left(\frac{4}{\pi^4} \right)^{1/3} \frac{\lambda}{d}, N_d = \frac{4N}{\pi D^2}, \quad (3)$$

式中: N_d 为直径为 d 的麻点的密度; λ 为入射光的波长; l_d 为表面麻点引起的滚落角; N 为直径为 d 的麻点的数量; D 为光学元件的直径。

根据国家标准 GB/T 1185—2006 中麻点疵病级数 A_n 的定义,级数值为麻点面积的平方根,即

$$A_n = \frac{\sqrt{\pi d}}{2}. \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式可得

$$B_d(\theta_s) = \frac{4NA_n^2}{\pi^2 D^2} \left[1 + \pi \frac{A_n^2}{\lambda^2} \left(1 + 2^{2/3} \pi^{5/3} \sin^2 \theta_s \frac{A_n^2}{\lambda^2} \right)^{-3/2} \right]. \quad (5)$$

进一步考虑麻点对光学元件的挡光效应,以及麻点尺寸约等于元件尺寸时衍射效应消失的边界条件,得到麻点的 BRDF 为

$$B_d(\theta_s) = \frac{4NA_n^2}{\pi^2 D^2} \left[c_1 + c_2 \pi \frac{A_n^2}{\lambda^2} \left(1 + 2^{2/3} \pi^{5/3} \sin^2 \theta_s \frac{A_n^2}{\lambda^2} \right)^{-3/2} \right], \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} c_1 = \frac{1}{A_{\text{dig}}} \iint_{A_{\text{dig}}} \exp\{-\ln 2[(2x/d)^2 + (2y/d)^2]\} dx dy, \\ c_2 = 1 - \exp[-(d-D)^2/(100\lambda)^2] \end{cases} \quad (7)$$

式中: A_{dig} 为麻点的面积; (x, y) 表示疵病上的任意一点坐标; c_1 为麻点的透过率函数(即挡光效应)。引入 c_2 以考虑麻点极大时($d \approx D$)衍射效应的消失。

对于疵病中的擦痕,其内部的漫反射分析与麻点类似。对于擦痕的衍射分析,考虑到擦痕通常很窄,其长度可能比波长大很多,因而使用边界衍射波形式与固定相位近似相结合的方式估算擦痕的衍射^[10]。实际表面中的擦痕为任意形状,为了便于分析,假定所有擦痕均为长方形,且在光学元件表面均匀分布。根据 Peterson 的研究^[7],长度为 l 、宽度为 w 的擦痕的 BRDF 为

$$B_s(\theta_s) = \frac{N_s w l}{\pi} \left[1 + \frac{\pi w l}{\lambda^2} \left(1 + \frac{\sin^2 \theta_s}{l_s^2} \right)^{-3/2} \right],$$

$$N_s = \frac{4N'}{\pi D^2}, l_s = \left(\frac{1}{2\pi^2} \right)^{2/3} \frac{\lambda}{(w^2 l)^{1/3}}, \quad (8)$$

式中: N_s 为擦痕密度; N' 为擦痕的数量; w 为擦痕宽度; l 为擦痕长度; l_s 为表面擦痕引起的滚落角。根据国标 GB/T 1185—2006,擦痕的疵病级数可表示为

$$A_n = \sqrt{l w}. \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式,并进一步考虑擦痕的挡光效应,推导出长度为 l 、宽度为 w 的擦痕的 BRDF 为

$$B_s(\theta_s) = \frac{4N'A_n^2}{\pi^2 D^2} \left[c_1 + \pi \frac{A_n^2}{\lambda^2} \left(1 + \frac{\sin^2 \theta_s}{l_s^2} \right)^{-3/2} \right],$$

$$c_1 = \frac{1}{A_{\text{scr}}} \iint_{A_{\text{scr}}} \exp\{-\ln 2[(2x/l)^2 + (2y/w)^2]\} dx dy, \quad (10)$$

式中: A_{scr} 为擦痕的面积。

在确定麻点和擦痕的 BRDF 后,可计算得到元件表面的 ARS^[11]:

$$A(\theta_s) = B(\theta_s) \cos \theta_s. \quad (11)$$

2.2 表面粗糙度散射模型

表面粗糙度是对光学元件表面形貌高低起伏的度量,是元件表面上具有的较小间距和微小峰谷所组成的微观几何特征。根据 Rayleigh-Rice 散射理论,光滑表面粗糙度引起的 BRDF 可以表示为^[12]

$$B_{\text{rou}} = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} Q \cos \theta_s \cos \theta_i \text{PSD}(f), \quad (12)$$

式中:PSD 为表面功率谱密度函数,可设表面高度分布的概率密度函数为高斯型,用表面粗糙度 σ 和自相关长度 l_c 表征; Q 为反射率;入射角 $\theta_i=0$ 。

2.3 表面洁净度散射模型

在实际应用中,用表面洁净度等级(或表面污染程度)来表征镜面的污染状况。表面洁净度用一个数值来表示,该数值表示每平方英尺(1 ft=30.48 cm)的镜面上,粒子尺寸大于该数值的所有粒子数量刚好为 1。镜面上粒子直径与粒子数量的分布近似满足如下规律^[13-14]:

$$\lg N_x = 0.926(\lg X_1 - \lg X), \quad (13)$$

式中: X 为粒子尺寸(微米量级且 $X \geq 1$); X_1 为表面洁净度; N_x 为每平方英尺上粒子尺寸大于等于 X 的粒子数目。因此,可推导出每平方英尺上,尺寸为 X 的粒子数目为

$$F(X) = 10^{0.926(\lg^2 X_1 - \lg^2 X)} - 10^{0.926[\lg^2 X_1 - \lg^2 (X+1)]}. \quad (14)$$

米氏散射可用以描述各种球形粒子的散射特性。在用米氏散射理论对表面洁净度散射特性进行分析时,进行如下假设:1)镜面上所有的污染粒子互不重叠,且粒子之间的间距大于其半径的 3 倍;2)所有污染粒子均匀地分布在元件表面;3)入射光垂直于镜面入射;4)不考虑相干效应和凝结核效应。图 2 给出不同表面洁净度下的粒子分布和 ARS 分布。

分析图 2(a)可知,污染粒子的数目随着表面洁净度的增大而增多,且在同一表面洁净度下,粒子数目随着粒子尺寸的增大而迅速减少。从图 2(b)中可以看出,不同表面洁净度下的 ARS 曲线分布趋势大致相同,ARS 值随着表面洁净度的增加而增大。

3 表面疵病的散射特性

为了分析表面疵病的散射特性,需要对不同类型、数量、级数的疵病进行散射特性分析,以获得表面疵病的 ARS 及 TS。

3.1 疵病的类型及数量

根据国家标准 GB/T 1185—2006,在疵病面积不变的前提下,表面疵病可直接换算成麻点或根据

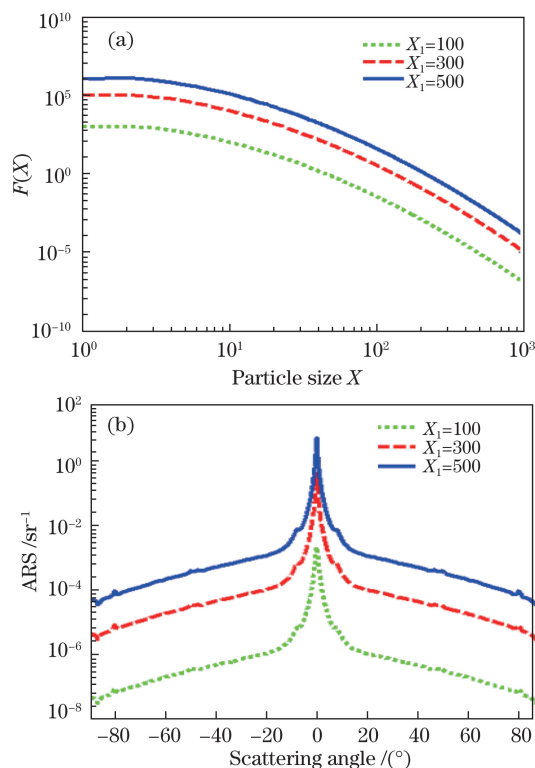


图 2 不同表面洁净度下的粒子分布与 ARS。
(a) 粒子分布; (b) ARS

Fig. 2 Particle distribution and ARS with different surface cleanliness. (a) Particle distribution; (b) ARS

换算系数折算成不同长宽比的擦痕。以任意一个表面疵病基本级数 $G=0.10$ mm 为例,可直接换算成一个直径为 0.11 mm 的麻点或一条尺寸(长×宽)分别为 0.16 mm×0.063 mm、0.25 mm×0.040 mm、0.40 mm×0.025 mm 的擦痕。为了分析不同类型疵病的散射分布特性,可通过(6)、(9)、(10)式计算出麻点和擦痕的 ARS;为了分析不同类型疵病的 TS,可通过(2)式进一步计算出不同类型疵病的 TS。图 3(a)、表 1 分别给出了同一疵病级数下,不同类型疵病的 ARS 和 TS,可以看出,在同一疵病级数下,麻点与不同长宽比擦痕的 ARS 分布曲线基本重合,TS 值大致相等。

表 1 不同类型疵病的 TS

Table 1 TS with different defect types

Defect type	Dig	Scratch 1	Scratch 2	Scratch 3
TS / 10 ⁻⁶	7.70	5.99	6.23	6.63

表 2 不同数量疵病的 TS

Table 2 TS with different defect numbers

Defect number	B1	B2	B3	B4
TS / 10 ⁻⁶	6.23	6.22	6.15	6.25

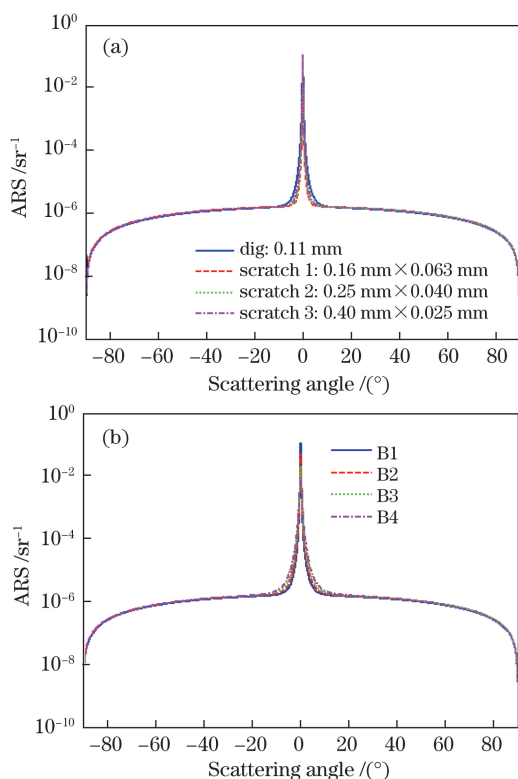


图 3 疵病的 ARS。(a) 不同类型疵病；
(b) 不同数量疵病
Fig. 3 ARS of defect. (a) Different defect types;
(b) different defect numbers

根据国家标准 GB/T 1185—2006, 在疵病面积不变的前提下, 表面疵病基本级数可通过换算系数分解成若干个较小的级数。根据该标准, 以任意一个表面疵病的基本级数 $G=0.10$ mm 为例, 通过换算系数可分别换算成 2.5 个 0.063 mm、6.2 个 0.040 mm 以及 16 个 0.025 mm 较小级数的疵病 (B1、B2、B3、B4 分别表示 1 个 0.10 mm、2.5 个 0.063 mm、6.2 个 0.040 mm、16 个 0.025 mm 的疵病)。为了分析同一基本级数下不同数量疵病的散射特性, 图 3(b)、表 2 分别给出了同一疵病基本级数下, 不同数量疵病的 ARS 及 TS, 可以看出, 在同一基本级数下, 不同数量疵病的 ARS 分布曲线几乎重合, TS 值大致相等。

3.2 疵病的级数

从上述 ARS 和 TS 的分析可知, 在同一基本级数下, 疵病的类型和数量对表面疵病散射特性的影响并不大。为此, 进一步分析不同级数下疵病的散射特性。图 4(a)、(b) 分别给出不同级数疵病的 ARS 分布和 TS 分布, 可以看出, 不同级数疵病的 ARS 分布规律大致相同, 且随着级数增大, ARS 值迅速增大。由疵病级数的定义可知, 疵病级数的平

方表示疵病的面积, 图 4(b) 给出 TS 随疵病面积的变化。分析图 4(b) 可知, TS 与疵病面积近似成线性正比, 图中拟合曲线的表达式为

$$T_{\text{def}} = 8.1 \times 10^{-4} S - 2.3 \times 10^{-9}, \quad (15)$$

式中: T_{def} 为表面疵病引起的总散射; S 为疵病面积。

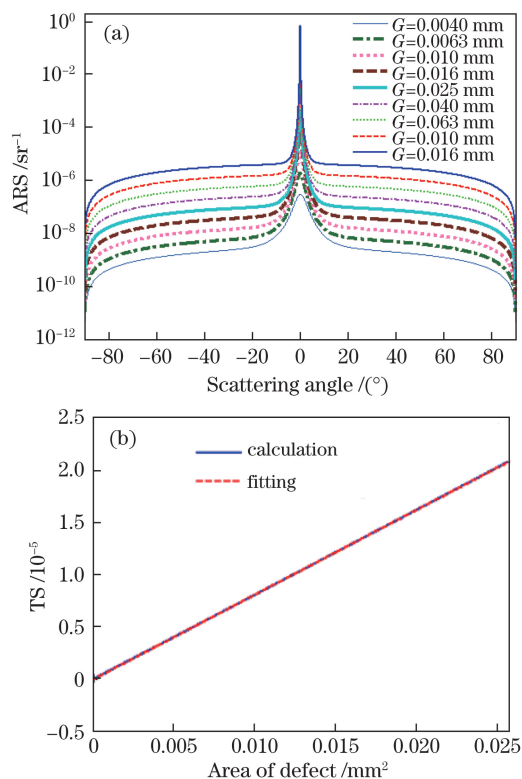


图 4 不同级数疵病的 ARS 和 TS。(a) ARS; (b) TS
Fig. 4 ARS and TS with different defect grade numbers.
(a) ARS; (b) TS

3.3 预估表面疵病的面积

在利用光散射评估光学元件表面质量时, 元件本身固有的表面粗糙度以及受环境影响的表面洁净度会进一步影响元件表面的散射特性。因此, 实际测量的 TS 包含表面粗糙度和表面洁净度所贡献的成分。本文主要考虑疵病的散射特性, 而表面粗糙度和表面洁净度引起的散射作为影响因素出现。当表面粗糙度已知时, 根据 Harvey-Shack 理论, 在散射光全角度收集的情况下, 表面粗糙度引起的总散射 T_{rou} 为

$$T_{\text{rou}} = 1 - \exp[-(4\pi\sigma \cos \theta_i)^2], \quad (16)$$

由于在实际测量中, 通过 TS 测量是不可能区分疵病和污染颗粒的, 因而在测量前仔细清洗待测元件, 以尽可能降低污染颗粒的影响, 而对于测得数据, 将污染颗粒视为麻点处理 (即把 T_{cle} 看作 T_{def} 的一小部分, T_{cle} 为表面污染引起的总散射)。分析

(15)式可知,疵病面积与 T_{def} 近似成线性,因而可通过实际测量的 TS 减去表面粗糙度引起的 T_{rou} ,再结合(15)式估算出光学元件表面上的疵病总面积,即

$$S = \frac{T - T_{rou} + 2.3 \times 10^{-9}}{8.1 \times 10^{-4}} \quad (17)$$

根据国家标准 GB/T 1185—2006,一般将表面疵病公差标识为 $N_n \times G$,其中: G 为表面疵病的基本级数,也是该级表面疵病的最大值; N_n 表示基本级数疵病的许有个数。传统的表面疵病检测方法大多采用放大镜或显微镜对表面不同大小的疵病逐一进行观察,统计出疵病的总面积和最大的疵病级数,进而判断表面疵病公差。由于受人眼分辨率和极限视角的限制,该方法对小尺寸疵病进行判定时存在误差大、费时费力等缺点。由于 $N_n \times G^2$ 等于光学零件表面疵病的总面积,因此,在估算出表面疵病总面积的情况下,只需要确定表面最大尺寸疵病的级数(G_m),便可判定该元件的表面疵病公差(SDT)。如表 3 中所示,当估算出疵病总面积为 0.19 mm^2 时,便可根据表面的最大疵病级数判断表面疵病公差。该方法相对于传统的疵病检测而言,只需关注表面的大尺寸疵病,省略了在小尺寸疵病检测上所花费的时间成本和人力成本。对于大批量检测而言,该方法极大地提高了疵病的检测效率,可为表面疵病的检测提供参考。

表 3 不同 G_m 下的表面疵病公差

Table 3 Judgment of surface defect tolerance under different G_m

G_m / mm	0.25	0.16	0.10	0.063
SDT /mm	3×0.25	7×0.16	18×0.10	48×0.063

为了对光学元件表面加工质量进行快速初检,引入疵病阈值的概念。疵病阈值是指光学元件表面疵病总面积的限定值,当光学元件表面的疵病总面积未超过该限定值时可认为该元件符合某特定系统的要求,若疵病总面积超过该阈值,该元件不再适用其特定的应用。

4 实验结果及分析

为了验证利用 TS 预估表面疵病面积的可行性,开展了验证性实验。实验中,采用北京晶瑞远科技有限公司生产的硅基片。首先,根据浙江大学杨甬英等^[15]提出的基于暗场显微成像的方法,利用光学显微散射暗场成像到高分辨率 CCD 上,得到适合于数字图像二值化处理的暗场的亮疵病图像,然后利用计算机软件对数字化的图像进行处理,进而获得基片表面的疵病面积,如图 5 所示。最后,利用德国汉诺威激光中心生产的 VIS FastTS 测量仪(波长为 632.8 nm ,照明光束直径为 0.4 mm ,采用积分球的方式对散射光进行收集)对 6 块直径为 50 mm 的硅基片进行散射测量,获得元件表面的 TS 值。然后利用(16)式计算出基片表面的疵病面积。

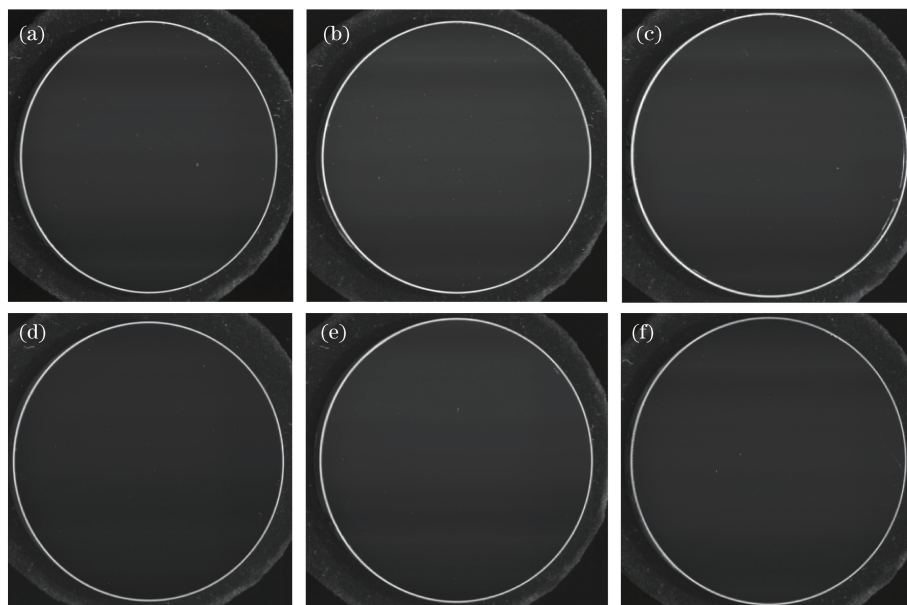


图 5 疵病图像。(a) 1 号元件;(b) 2 号元件;(c) 3 号元件;(d) 4 号元件;(e) 5 号元件;(f) 6 号元件

Fig. 5 Defect images. (a) No. 1 component; (b) No. 2 component; (c) No. 3 component; (d) No. 4 component; (e) No. 5 component; (f) No. 6 component

图 6 中,横轴表示光学元件的序号,实线表示利用实际测量的 TS 计算出的疵病面积,虚线则表示利用 CCD 成像和计算机软件对数字化图像处理后的测量结果。从图 6 中可以看出,利用 TS 测量并结合(16)式计算得到的预估结果与 CCD 成像的测量结果基本一致,从而验证了利用 TS 预估表面疵病面积的可行性,也进一步说明了光学元件的表面 TS 与疵病面积近似成正比。

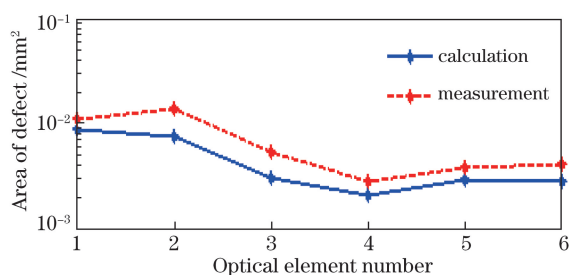


图 6 实验结果与理论计算的对比

Fig. 6 Comparison between experimental result and theoretical calculation result

5 结 论

基于 Peterson 理论,进一步考虑麻点和擦痕的挡光效应,以及麻点衍射消失的边界条件,并结合国家标准 GB/T 1185—2006,定量分析了同一疵病级数下不同疵病类型、不同疵病数量以及不同疵病级数下的 ARS 及 TS,得出同一疵病级数下的散射特性与疵病类型、数量几乎无关,而在不同的疵病级数下,光学元件表面疵病的 TS 与疵病面积近似成线性正比的结论,并据此提出了一种基于 TS 测量表面质量的检测新方法。通过实验验证了利用 TS 预估表面疵病面积的可行性,并讨论了光学零件的疵病阈值。在实际工程应用中,该研究适合镀膜工程人员用来对大批量待镀膜元件进行初次筛选,也可以为其他光学零件的表面加工质量的初检提供参考。在麻点和擦痕的分配和处理上,使用级数表征表面质量更为合理,且能更好地满足各种光学元件的使用要求,从而可灵活选择级数,实现对光学零件表面疵病量的管控。

参 考 文 献

[1] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Surface imperfections of optical elements: GB/T 1185-2006 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2006.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国

国家标准化管理委员会. 光学零件表面疵病: GB/T 1185-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

[2] Zhang B, Ni K Z, Wang L J, *et al.* New algorithm of detecting optical surface imperfection based on background correction and image segmentation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911004.
张博, 倪开灶, 王林军, 等. 基于背景校正和图像分割定量分析光学元件表面疵病的新算法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911004.

[3] Miao J, Li Z, Cui Z J, *et al.* Dynamic spectral coding fusion imaging detection technique of surface defects[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0912002.
缪洁, 李展, 崔子健, 等. 表面疵病动态彩色编码融合成像检测技术[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0912002.

[4] Luo M, Bu Y, Xu J H, *et al.* Optical element surface defect measurement based on multispectral technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0104001.
罗茂, 步扬, 徐静浩, 等. 基于多光谱技术的光学元件表面疵病检测[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0104001.

[5] Zhao W C, Zhong X Y, Liu B, *et al.* The surface flaws inspection of optical components based on the fringe reflection [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(9): 0912007.
赵文川, 钟显云, 刘彬, 等. 基于条纹反射的光学表面疵病检测法[J]. 光子学报, 2014, 43(9): 0912007.

[6] Yang H Q, Li X L. Precision modeling and prediction of the defect detector for optical element surface[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(6): 98-101.
杨荟琦, 李显凌. 光学元件表面疵病检测仪的精度建模及预测[J]. 机械设计与制造, 2018(6): 98-101.

[7] Peterson G L. A BRDF model for scratches and digs[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8495: 84950G.

[8] Schröder S, Herffurth T, Duparré A, *et al.* Impact of surface roughness on the scatter losses and the scattering distribution of surfaces and thin film coatings[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8169: 81690R.

[9] The British Standards Institution. Optics and optical instruments-test methods for radiation scattered by optical components: ISO 13696: 2002[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2002.

[10] Born M, Wolf E. Principles of optics [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 499-503.

[11] Elson J M, Bennett J M, Stover J C. Wavelength and angular dependence of light scattering from beryllium: comparison of theory and experiment[J]. Applied Optics, 1993, 32(19): 3362-3376.

[12] Stover J C. Experimental confirmation of the Rayleigh-

- Rice obliquity factor[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7792: 77920J.
- [13] Tribble A C, Boyadjian B, Davis J, *et al.* Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2864: 4-15.
- [14] Dittman M G. Contamination scatter functions for stray-light analysis[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4774: 99-111.
- [15] Yang Y Y, Lu C H, Liang J, *et al.* Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1031-1038.
杨甬英, 陆春华, 梁蛟, 等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 1031-1038.