

## 表面缺陷的偏振散射表征方法及区分原理

陆敏\*, 王治乐, 张树青, 高萍萍, 何晓博

哈尔滨工业大学航天学院空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 为了区分微米量级表面上方颗粒物灰尘与表面下方气泡粒子这两种表面缺陷, 根据菲涅耳透射定律以及 Mie 散射理论, 结合穆勒矩阵建立了两种表面缺陷的偏振透射模型, 在此基础上通过仿真分析, 得到元件折射率、缺陷种类、缺陷尺寸、入射波长、入射角度对两种表面缺陷粒子的偏振透射特性的影响。最终通过实验验证证明了模型具有较高的准确性, 具备实际的仿真模拟分析和工程应用价值。

**关键词** 散射; 偏振; 缺陷检测; 缺陷区分

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1229001

Polarization Scattering Characterization and Discrimination  
Principle of Surface Defects

Lu Min\*, Wang Zhile, Zhang Shuqing, Gao Pingping, He Xiaobo

Research Center for Space Optical Engineering, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** In order to distinguish the two kinds of surface defects, particulate dust above the surface and bubble particles below the surface, we establish two polarization transmission models of surface defects according to the Fresnel transmission law and Mie scattering theory, combined with the Mueller matrix. Through simulation analysis, the influence of component refractive index, defect type, defect size, incident wavelength, and incident angle on the polarization transmission characteristics of the two surface defect particles is obtained. Finally, the experimental verification proves that the model has high accuracy and is important both in theoretical research and engineering.

**Key words** scattering; polarization; defect detection; defect discrimination

**OCIS codes** 290.5855; 150.3040; 150.1835

## 1 引言

表面缺陷检测是光学元件质量评价的重要过程之一<sup>[1]</sup>。对于不同类型的表面缺陷, 其对应的处理方法差异很大: 表面气泡是元件表面的真实损伤, 需要复杂的技术来修复或弃置; 而表面上方的异物颗粒可以通过简单的清洗过程去除。因此表面缺陷的错误分类将会影响后续操作处理, 对其进行准确分类具有重要意义。

表面缺陷中的颗粒脏污与气泡经常呈现球形,

在目前常用的检测识别中, 因光强图像有相同的点状纹理, 成像区分方案复杂。针对这两类缺陷的区分方案, 不同学者从图像的不同角度出发进行了讨论: Liang 等<sup>[2]</sup>提出了一种低分辨率图像稀疏表示方法, Li 等<sup>[3]</sup>提出了利用主成分分析来寻找和提取触摸屏玻璃的缺陷等。2020 年张进朋等<sup>[4]</sup>对透明件表面缺陷的机器视觉检测进行了综述, 系统地指出图像处理结果可靠性不足、光强图像信息量较少导致缺陷难以区分等问题。为了解决以上问题, 后续很多学者在原有散射光强信息的基础上添加偏振

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-12-09; 录用日期: 2021-01-21

基金项目: 航空科学基金(20160177007)

\* E-mail: 18243087454@163.com

信息来进行进一步的分析;1997 年 Germer<sup>[5]</sup> 提出利用偏振散射特性检测基片表面存在缺陷的情况;2018 年卢荣胜等<sup>[6]</sup> 提出利用 p 偏振入射光引起的 p 偏振散射光能将基片上下方粒子进行区分。虽然有学者分析了元件缺陷透射成像的各种性质,并将偏振散射特性运用至表面缺陷检测中,但是目前的理论都是基于纳米量级的简化讨论,没有针对检测标准中微米量级缺陷粒子的偏振透射特性的相关研究。

穆勒矩阵是一种能完全表征样品偏振属性的方法,本文将利用穆勒矩阵信息来探讨手机屏幕、计算

机屏幕等光学元件中盖板玻璃的缺陷偏振散射特性,待测元件特点为:透过率高(高达 98%)、厚度薄(mm 量级)、检测精度高(表面缺陷量级  $\geq 1 \mu\text{m}$ ),研究对象为难以区分的两种表面缺陷(气泡和颗粒脏污),主要研究其偏振透射特性及区别。

## 2 理论分析

当光线到达两种不同透明介质的界面时,光线会发生反射与折射现象。该过程可以用菲涅耳公式建模求解。对于折射光来说,相位差为 0,折射过程对应的穆勒矩阵为<sup>[7]</sup>

$$\mathbf{M}_T = \frac{\sin 2\theta_i \sin 2\theta_r}{2(\sin \theta_+ \cos \theta_-)^2} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_- + 1 & \cos^2 \theta_- - 1 & 0 & 0 \\ \cos^2 \theta_- - 1 & \cos^2 \theta_- + 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\cos \theta_- & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\cos \theta_- \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中  $\theta_{\pm} = \theta_i \pm \theta_r$ ,  $\theta_i$  为入射角,  $\theta_r$  为折射角。

对于本文的研究对象——硅酸盐盖板玻璃,无图案,单色透明,具有无规则结构,没有固定的熔点,内部几乎无孔隙,复折射率在  $0.683 \mu\text{m}$  时为 1.5135。两种表面缺陷颗粒灰尘和气泡由于所在位置不同,材料不同,使得同一条件下产生的偏振特性不同,因此分析他们的偏振散射模型就可以对两种表面缺陷进行鉴别。首先对模型建立进行基本假设:1)假设两种表面缺陷形状均为球形均匀各向同性粒子;2)假设单颗粒散射,且颗粒散射光不会入射到其他颗粒上。

## 3 模型建立

### 3.1 表面颗粒灰尘偏振散射模型

当光学元件暴露于空气中时,灰尘以球形“凸起”的形式附着在光学表面,计算研究光学表面上颗粒物散射特性时,可以利用 Mie 散射理论<sup>[8]</sup> 来表征由空中颗粒所导致的光散射及其他电磁辐射。这一理论也适用于预测光学元件表面上的沉积颗粒散射<sup>[9-10]</sup>。本研究只讨论单一脏污颗粒以及单一气泡的偏振散射特性。对表面缺陷中的颗粒脏污进行建模,其散射空间关系如图 1 所示。

粒径为  $d$  的各向同性球形颗粒处于坐标原点位置,传播方向为  $z$  轴方向,而电矢量方向为  $x$  轴方向,当其一束光强为  $I_0$  的单色平面波  $E_i$  照射时,散射场分布函数为

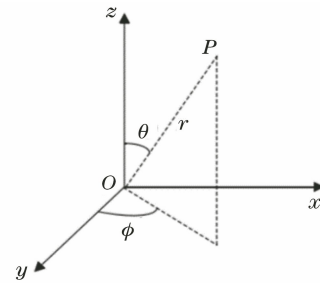


图 1 Mie 散射空间关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Mie scattering spatial relationship

$$\begin{pmatrix} E_{\parallel s} \\ E_{\perp s} \end{pmatrix} = \frac{\exp(ikr)}{-ikr} \begin{pmatrix} S_2 & 0 \\ 0 & S_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\parallel i} \\ E_{\perp i} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $k$  为光的波数;  $r$  为半径;  $S_1$  和  $S_2$  为 Mie 散射振幅函数,是粒径尺寸的无因次参量、粒子相对周围介质的折射率  $n$  以及散射角的函数,是由 Bessel 函数和 Legendre 函数组成的无穷级数;“ $\parallel$ ”和“ $\perp$ ”分别表示平行和垂直方向。

Mie 散射模型近似粉尘与光的相互作用,如图 2 所示,图中  $\theta_i$  为入射角度, T1 和 T2 为经过光学元件的第一、第二个界面,  $\theta_{\text{sys}}$  为出射角度,光波与散射粒子的作用可以看成入射光波的解析表达式与矩阵相乘。Mie 散射粒子的单次散射矩阵可表示为<sup>[7]</sup>

$$\mathbf{M}_{\text{Mie}} = \mathbf{M}(\theta) = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} & S_{34} \\ 0 & 0 & -S_{34} & S_{33} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $S_{11} = \frac{S_1^* S_1 + S_2^* S_2}{2}$ ,  $S_{12} = \frac{S_2^* S_2 - S_1^* S_1}{2}$ ,  $S_{33} = \text{Re}(S_2^* S_1)$ ,  $S_{34} = \text{Im}(S_1^* S_2)$ ; \* 表示取复数共轭。

颗粒物灰尘系统的穆勒矩阵为<sup>[11]</sup>

$$\mathbf{M}_{\text{sys}} = \mathbf{M}_{T2} \mathbf{M}_{T1} \mathbf{M}_{\text{Mie}}, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{M}_{T1}$  和  $\mathbf{M}_{T2}$  为光学元件的第一、第二个界面的单次散射矩阵。

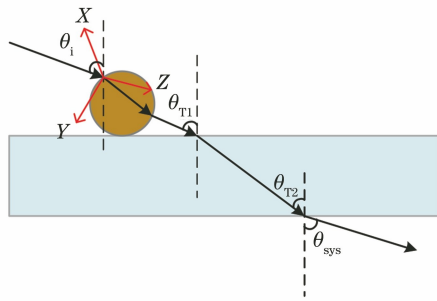


图 2 表面颗粒物灰尘光线图

Fig. 2 Surface particle dust light diagram

### 3.2 表面气泡偏振散射模型

气泡是由光学元件的生产或加工过程中未及时排除的气体所形成的,由于各方向气体的压力均匀分布,因此气泡的形状一般呈圆球形。本课题以空气中几种气体平均折射率 1.041 为参考进行气泡偏振散射的讨论,玻璃中气泡 Mie 散射光线如图 3 所示。

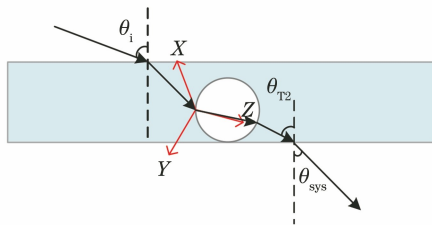


图 3 表面气泡光线图

Fig. 3 Surface dig light diagram

本研究仍然将 Mie 散射理论应用到该缺陷上,相比于表面颗粒脏污来说,不同之处在于缺陷位置与缺陷折射率,以及与光的相互作用,这些都可以在偏振散射模型的穆勒矩阵中体现出来。表面缺陷气泡系统偏振散射模型的穆勒矩阵为

$$\mathbf{M}_{\text{sys}} = \mathbf{M}_{T2} \mathbf{M}_{\text{Mie}} \mathbf{M}_{T1}. \quad (5)$$

## 4 偏振散射的影响因素分析

### 4.1 待测元件折射率的影响

根据(1)~(5)式的分析和计算,表面颗粒脏污和表面气泡的穆勒矩阵都可以写成(6)式的形式,在 16 个特征偏振检测元中,  $m_{11}$  是归一化元,没有借鉴意义,  $m_{12}$ 、 $m_{33}$  和  $m_{34}$  是本文的仿真分析对象,由于篇幅限制,本文主要以颗粒脏污和气泡的  $m_{33}$  值为例作对比分析。其系统偏振散射模型的穆勒矩阵为

$$\mathbf{M}_{\text{sys}} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 \\ m_{12} & m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & -m_{34} & m_{33} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

常用的光学元件的折射率一般在 1.4~1.8 之间,一些特殊的晶体材料的折射率能够达到 2。本文假定颗粒脏污折射率为  $1.53 + 5 \times 10^{-4}i$ ,入射波长为  $0.6 \mu\text{m}$ ,入射角度为  $0^\circ$ ,分别分析了材料折射率为 1.4,1.5,1.8,2.0 对粒径为 1,5,10  $\mu\text{m}$  的颗粒脏污和气泡的  $m_{33}$  值的影响,如图 4 所示,其中横坐标表示散射角度,纵坐标为归一化后的  $m_{33}$  值。由图 4 可以发现,当粒径较小时,气泡和颗粒脏污的  $m_{33}$  值都变化平缓,随着粒径的增大,角度的变化越来越剧烈,这与散射理论相吻合,但同时会对多角度测量缺陷光学参数提出挑战。材料折射率的改变主要影响了大角度散射(大于  $20^\circ$ )的  $m_{33}$  值,对小角度

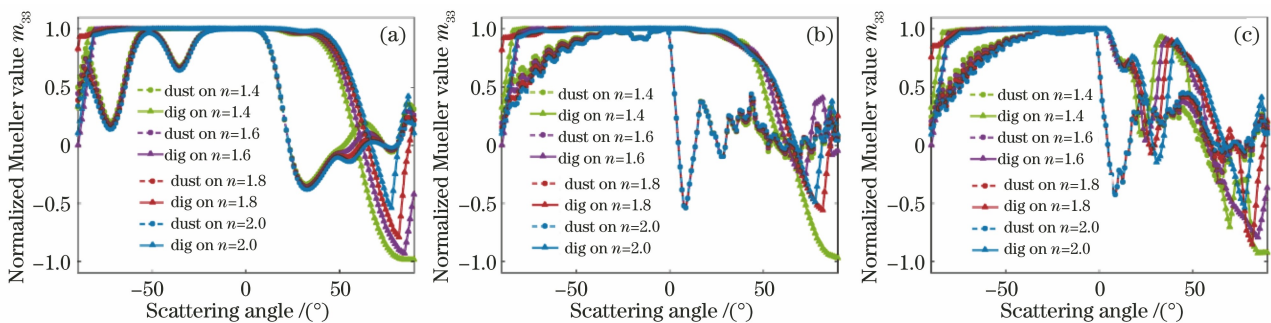


图 4 不同折射率在三种粒径条件对颗粒脏污和气泡的  $m_{33}$  值影响。(a)  $1 \mu\text{m}$ ; (b)  $5 \mu\text{m}$ ; (c)  $10 \mu\text{m}$

Fig. 4 Influence of different refractive indexes with three types of particle size on  $m_{33}$  values of particle contamination and dig. (a)  $1 \mu\text{m}$ ; (b)  $5 \mu\text{m}$ ; (c)  $10 \mu\text{m}$



散射(小于  $20^\circ$ )几乎没有影响,这与折射定律相吻合。同时可以得出:相同条件下,颗粒脏污和气泡的  $m_{33}$  值差异较大,在一些散射角度上差值能够达到 1.5 以上,这足以说明偏振参量的分析能够作为区分缺陷的有效方法。

### 4.2 缺陷种类的影响

#### 4.2.1 颗粒脏污折射率实部的影响

大部分颗粒脏污的折射率在  $1.4 \sim 2.0$  范围内,使用固定折射率虚部  $5 \times 10^{-4}i$ ,选取 4 个折射率实部  $m_1: 1.4, 1.6, 1.8$  和  $2.0$ ,分析其对粒径为  $1, 5,$

$10 \mu\text{m}$  的颗粒脏污和气泡的  $m_{33}$  值影响。在入射波长为  $0.6 \mu\text{m}$ ,入射角度为  $0^\circ$ ,待测元件折射率为  $1.5135$  条件下进行仿真,如图 5 所示。当粒径较小时,折射率实部对散射光分布的影响较大,但由于粒径较小,光强本身绝对值很小,粒径增加时,折射率带来的影响逐渐变小,故粒径对散射光强的影响远大于折射率的变化。并且随着粒径增大,散射曲线振荡加剧,而不同的折射率在某些角度下对幅值也有影响,由此可知选取合适的探测角度可以区分出不同的折射率。

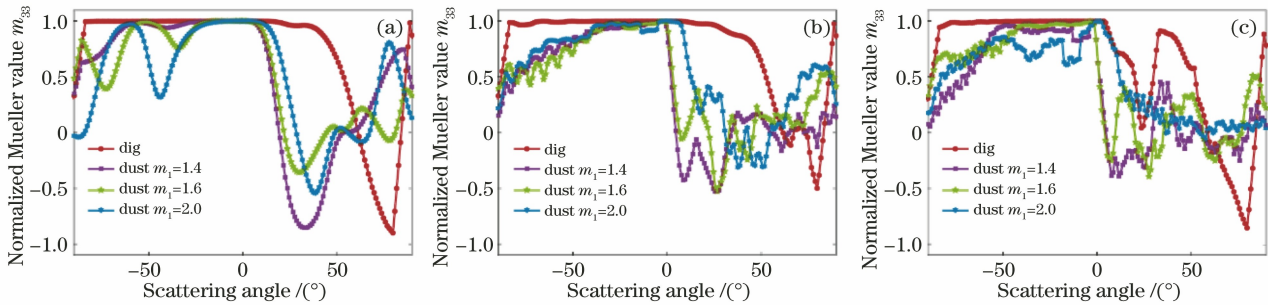


图 5 不同颗粒脏污折射率实部在三种粒径条件下对颗粒脏污的  $m_{33}$  值影响。(a)  $1 \mu\text{m}$ ; (b)  $5 \mu\text{m}$ ; (c)  $10 \mu\text{m}$   
 Fig. 5 Influence of different real part of contamination refractive indexes with three types of different particle sizes on  $m_{33}$  values of particle contamination. (a)  $1 \mu\text{m}$ ; (b)  $5 \mu\text{m}$ ; (c)  $10 \mu\text{m}$

#### 4.2.2 颗粒脏污折射率虚部的影响

颗粒物的折射率虚部量级一般在  $1 \times 10^{-4}$  左右,含碳质颗粒物在绿光以上时能够达到  $1 \times 10^{-3}$ ,水溶性颗粒物能达到  $1 \times 10^{-2}$  量级<sup>[12]</sup>。为不失一般性,取三个折射率虚部  $m_2: 1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-4}$  与  $1 \times 10^{-5}$  作比较,分析折射率虚部的影响,如图 6 所示。当折射率虚部在  $1 \times 10^{-3}$

以下时,吸收很弱,且随着粒径变化  $m_{33}$  曲线发生改变,但是三条曲线均重叠在一起,故在极小的折射率虚部下,折射率实部的影响大于折射率虚部。但虚部值为  $1 \times 10^{-2}$  时,粒径达到  $5 \mu\text{m}$  时曲线已经发生偏离, $10 \mu\text{m}$  时变化剧烈,故对于特殊的强吸收颗粒物,其偏振散射需进行特殊分析。

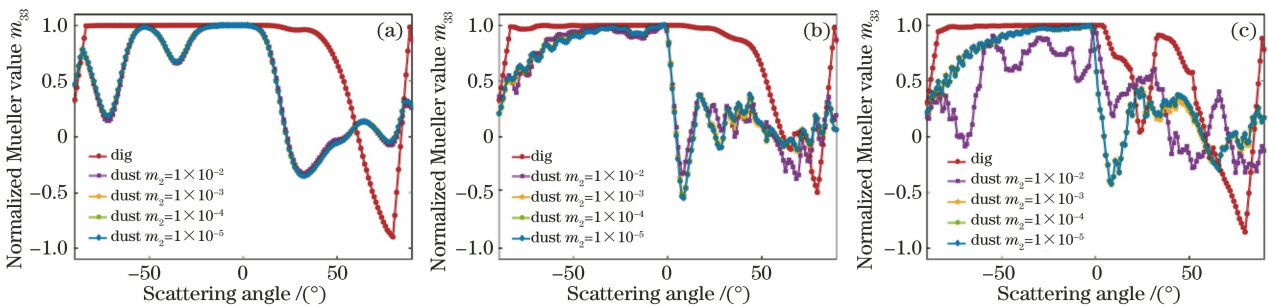


图 6 不同颗粒脏污折射率虚部在三种粒径条件下对颗粒脏污的  $m_{33}$  值影响。(a)  $1 \mu\text{m}$ ; (b)  $5 \mu\text{m}$ ; (c)  $10 \mu\text{m}$   
 Fig. 6 Influence of different imaginary part of contamination refractive indexes with three types of particle size on  $m_{33}$  values of particle contamination. (a)  $1 \mu\text{m}$ ; (b)  $5 \mu\text{m}$ ; (c)  $10 \mu\text{m}$

### 4.3 缺陷尺寸和波长的影响

探测波长是影响穆勒矩阵表征的一个外部特征。根据 Mie 散射原理,影响偏振参量的实际因素是无单位参量  $D/\lambda$ 。本文选择波长为  $480 \sim 1200 \text{ nm}$ ,针对 (a) 粒径  $1 \sim 2.5 \mu\text{m}, D/\lambda = 25/12,$

(b) 粒径  $2 \sim 5 \mu\text{m}, D/\lambda = 25/6,$  (c) 粒径  $4 \sim 10 \mu\text{m}, D/\lambda = 25/3$  三种情况进行分析,如图 7 所示,当  $D/\lambda$  为定值时,波长和粒径的联动变化不会对颗粒脏污或气泡的偏振元产生影响,随着  $D/\lambda$  增大,散射曲线振荡加剧,颗粒脏污和气泡的  $m_{33}$  值差异持续存

在,因此仿真分析了不同  $D/\lambda$  对颗粒脏污与气泡之间的穆勒值(a) $m_{12}$  值,(b) $m_{33}$  值,(c) $m_{34}$  值之差的影响。如图 8 所示,上述三种情况下穆勒值差均存

在峰值,可以以此作为区分气泡和颗粒脏污的理论依据,例如  $0^\circ$  入射条件下,针对这三种情况在  $0^\circ \sim 20^\circ$  之间进行探测,都能够有效区分缺陷。

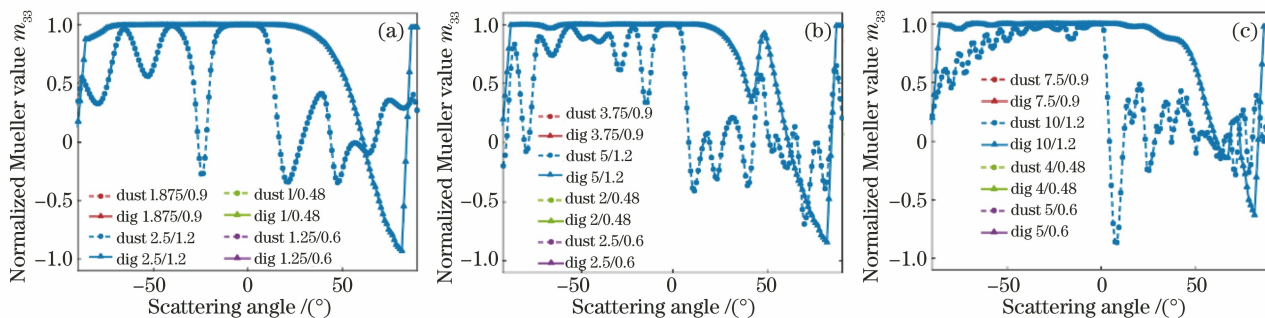


图 7  $D/\lambda$  对颗粒脏污和气泡的  $m_{33}$  值影响。(a)  $D/\lambda=25/12$ ; (b)  $D/\lambda=25/6$ ; (c)  $D/\lambda=25/3$

Fig. 7 Influence of  $D/\lambda$  on  $m_{33}$  values of particle contamination and dig. (a)  $D/\lambda=25/12$ ; (b)  $D/\lambda=25/6$ ; (c)  $D/\lambda=25/3$

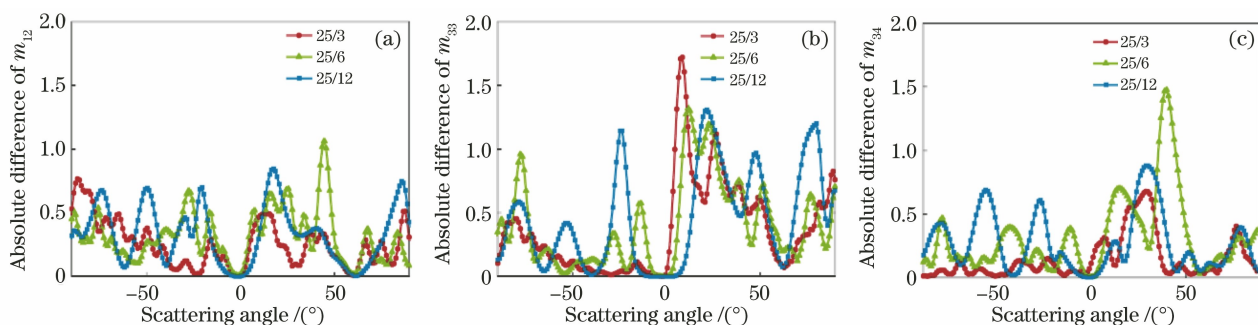


图 8 不同  $D/\lambda$  对颗粒脏污与气泡之间的穆勒值之差的影响。(a)  $m_{12}$  差; (b)  $m_{33}$  差; (c)  $m_{34}$  差

Fig. 8 Influence of  $D/\lambda$  on absolute difference of Mueller values of particle contamination and dig.

(a) Absolute difference of  $m_{12}$ ; (b) absolute difference of  $m_{33}$ ; (c) absolute difference of  $m_{34}$

#### 4.4 入射角度的影响

入射角度也是影响穆勒矩阵表征的另外一个外部特征。图 9 仿真了入射波长为  $0.6 \mu\text{m}$  时,粒径为  $10 \mu\text{m}$  量级的颗粒脏污和气泡在  $0^\circ, 30^\circ, 56.55^\circ$  (布儒斯特角)以及  $80^\circ$  入射角下的  $m_{33}$  值曲线,随

入射角增加,峰值值相对的散射角度逐渐平移,曲线的趋势大致相同,其中大角度入射角  $80^\circ$  处有突变,这是因为光在经由材料出射时可能会发生全反射,影响散射分布。

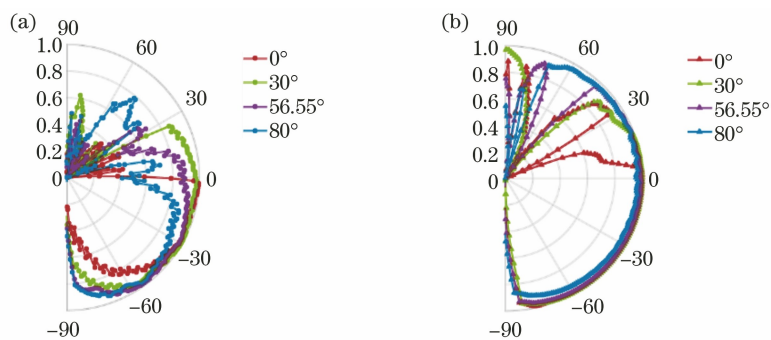


图 9 入射角度对缺陷  $m_{33}$  值的影响。(a)颗粒脏污;(b)气泡

Fig. 9 Influence of incident angles on  $m_{33}$ . (a) Particle contamination; (b) dig

颗粒脏污和气泡的  $m_{33}$  值曲线差异持续存在,因此仿真分析了不同入射角度对颗粒脏污与气泡之间的穆勒值(a) $m_{12}$  值,(b) $m_{33}$  值,(c) $m_{34}$  值之差的

影响。如图 10 所示,不同角度入射时,穆勒值差均存在峰值,可以以此作为区分气泡和颗粒脏污的理论依据。

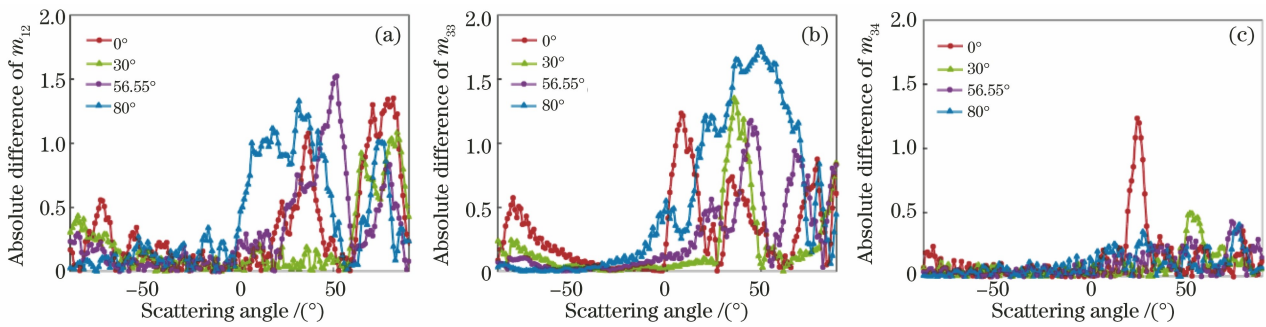


图 10 入射角对颗粒脏污与气泡之间的穆勒值之差的影响。(a)  $m_{12}$  差; (b)  $m_{33}$  差; (c)  $m_{34}$  差

Fig. 10 Influence of incident angles on absolute difference of Mueller values of particle contamination and dig.

(a) Absolute difference of  $m_{12}$ ; (b) absolute difference of  $m_{33}$ ; (c) absolute difference of  $m_{34}$

## 5 实验验证

### 5.1 实验方法

图 11 所示为实验原理图,使用中心波长为 532 nm、最大功率为 4 W 的光源,经扩束透镜、针孔滤波器和准直透镜准直为平面波。首先使用一组 THORLABS 公司的 532 nm 偏振片和 1/4 波片构成圆偏振发生系统,这是为了保证进入到起偏系统

的光束在各个方向上的光波能量相同,避免因入射光光强不同造成测量误差。起偏系统和检偏系统均是由一组偏振片和 1/4 波片组成,通过旋转偏振片和 1/4 波片的角度,可以得到不同斯托克斯矢量的偏振光信号。成像镜头使用了大恒图像的 FT30C-110R 远心镜头,探测器为大恒图像生产的 MER-130-30UM 型号 CMOS 相机,像元尺寸为  $5.2 \mu\text{m}$ ,有效像元数为  $1280 \times 1024$ 。

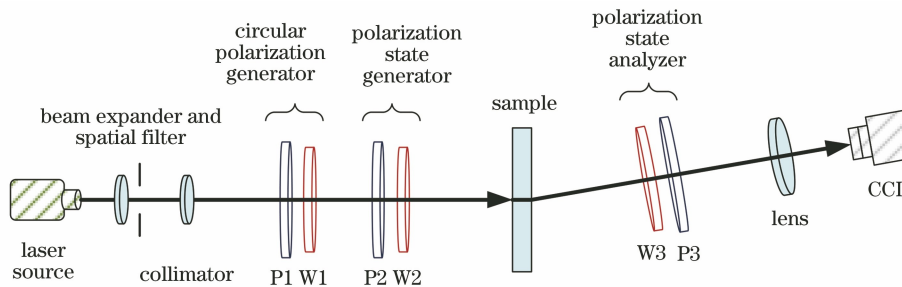


图 11 实验原理图

Fig. 11 Experimental schematic diagram

根据现有的实验条件和仿真结果,本研究选择  $10 \mu\text{m}$  量级的缺陷进行实验验证。脏污颗粒选用实验室购入的粒度为  $10 \mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2$  颗粒,折射率为  $1.68 + 3 \times 10^{-4}i$ 。将一定量的  $\text{SiO}_2$  颗粒溶于超纯水中,调制多份浓度不同的  $\text{SiO}_2$  颗粒溶液。将少许溶液滴于标准盖板之上,再把盖板微微倾斜放置,待盖板上没有水时即可获得达到实验要求的污染样片。使用显微镜对污染样片进行观察,获得单颗粒脏污样片。气泡样片直接使用工程检测中淘汰的气泡样片。测试气泡样品中的气泡尺寸后,对本次模型进行验证。

### 5.2 验证结果

设计实验条件为  $0^\circ$  入射,对每种样品进行 6 次测量并取其平均结果进行分析。首先利用已知的穆勒矩阵的光学元件进行实验,并将其理论值与实验

值进行比较,通过实验测量和数值计算<sup>[9]</sup>,得出空气、 $0^\circ$ 偏振片和  $90^\circ$ 偏振片的穆勒矩阵的标准差分别为 1%、5%和 4%,由此证明实验平台能够满足测量精度要求。然后以  $20^\circ$ 和  $60^\circ$ 的观测角对待测脏污颗粒样本和气泡样本进行观测测量,测量结果与实验结果如图 12 所示,横坐标  $m_{11} \sim m_{44}$  分别按顺序表示穆勒矩阵的 16 个元素,其中实线(下标为 T)为本文模型的仿真分析结果,虚线(下标为 S)为实验结果,脏污颗粒样本和气泡样本的仿真与实验之间的标准差分别为 2.24%和 1.57%,这说明本文的模型能够较好地模拟仿真脏污颗粒样本和气泡样本的偏振散射特性,具备实际工程应用价值。实际工程应用中,以  $0^\circ$ 入射, $20^\circ$ 观测角观测系统对样品的探测结果,计算样本的穆勒矩阵结果,其中  $m_{33}$  值为正值时是气泡,为负值时是脏污颗粒样本。



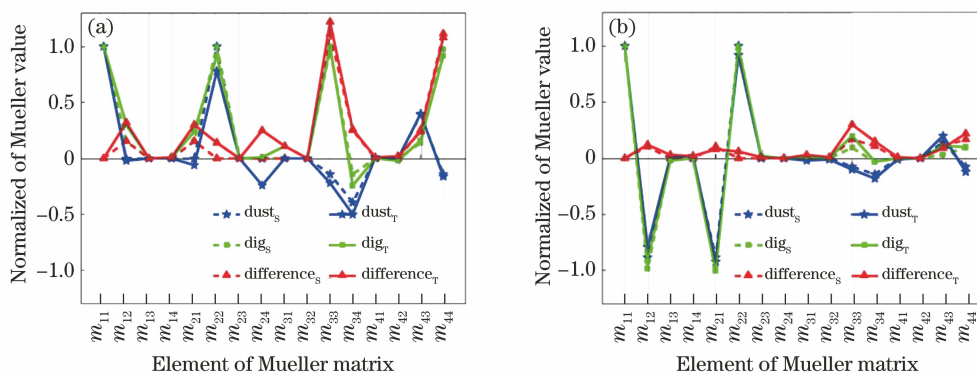


图 12 仿真结果与实验结果对比图。(a) 20°观测角;(b) 60°观测角

Fig. 12 Comparison of simulation results with experimental results. (a) 20°; (b) 60°

## 6 结 论

利用菲涅耳折射定律和 Mie 散射理论,结合偏振穆勒矩阵的描述方法建立了微米量级的表面上方颗粒物灰尘与表面下方气泡粒子两种表面缺陷的偏振透射模型,通过仿真分析得出:表面脏污颗粒的折射率实部对偏振散射的影响较大;颗粒粒径与入射波长对偏振散射作用明显。无参量  $D/\lambda$  为定值时,波长和粒径的联动变化不会对颗粒脏污或气泡的偏振元产生影响;随着  $D/\lambda$  增大,散射曲线振荡加剧,颗粒脏污和气泡的  $m_{33}$  值差异持续存在。同时,不同角度入射时,颗粒脏污和气泡穆勒值差均存在峰值,可以以此作为区分气泡和颗粒脏污的理论依据。为验证模型的有效性,本文又搭建了实验平台进行实验验证,脏污颗粒样本和气泡样本的仿真与实验之间的标准差分别为 2.24% 和 1.57%,由此说明本文的模型能够较好地仿真缺陷的偏振散射特性。

### 参 考 文 献

- [1] Huang C, Zhang K P, Wang X, et al. Method for surface quality inspection based on total scattering measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0712005.  
黄聪, 张科鹏, 王翔, 等. 基于总散射测量的表面质量检测新方法[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0712005.
- [2] Liang L Q, Li D, Fu X, et al. Touch screen defect inspection based on sparse representation in low resolution images [J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75(5): 2655-2666.
- [3] Li D, Liang L Q, Zhang W J, et al. Defect inspection and extraction of the mobile phone cover glass based on the principal components analysis [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(9/10/11/12): 1605-1614.
- [4] Zhang J P, Qin X P, Yuan J X, et al. Defect location and size detection based on laser ultrasonic diffraction bulk wave [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1214002.  
张进朋, 秦训鹏, 袁久鑫, 等. 基于激光超声衍射体波的缺陷定位定量检测 [J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1214002.
- [5] Germer T A. Angular dependence and polarization of out-of-plane optical scattering from particulate contamination, subsurface defects, and surface microroughness [J]. Applied Optics, 1997, 36(33): 8798-8805.
- [6] Lu R S, Wu A, Zhang T D, et al. Review on automated optical (visual) inspection and its applications in defect detection [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815002.  
卢荣胜, 吴昂, 张腾达, 等. 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述 [J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815002.
- [7] Goldstein D H. Polarized light [M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011: 808.
- [8] Kerker M. The scattering of light and other electromagnetic radiation [J]. Physical Chemistry: A Series of Monographs, 1969: page ii.
- [9] Young R P. Low-scatter mirror degradation by particle contamination [J]. Optical Engineering, 1976, 15(6): 156516.
- [10] Young R P. Mirror-scatter degradation by particulate contamination [J]. Proceedings of the SPIE, 1990, 1329: 246-254.
- [11] Flynn D S, Alexander C. Polarized surface scattering expressed in terms of a bidirectional reflectance distribution function matrix [J]. Optical Engineering, 1995, 34(6): 1646-1650.
- [12] Wu J L, Zhang J B, Zhang L, et al. Near forward light scattering characteristics of airborne particles [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0529001.  
吴金雷, 张金碧, 张莉, 等. 大气颗粒物近前向光散射特性研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0529001.