

光学材料亚表面损伤的表征与检测技术研究进展

王华东^{1,2}, 张泰华¹

¹浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310014;

²浙江师范大学工学院, 浙江 金华 321004

摘要 亚表面损伤(SSD)的系统表征和准确检测是控制光学材料加工表层损伤的关键。将 SSD 的表征方法和检测技术相结合,综述了光学材料 SSD 检测评价方法的研究进展;分析了超精密加工产生的 SSD 结构和表征参量;针对 SSD 的几何表征参量,介绍了几种典型的损伤性检测技术及其技术特点和适用范围;重点介绍了几种满足超精密加工检测要求的无损检测技术,并分析了其技术优势和发展瓶颈;对比了国内外 SSD 的表征与检测技术水平,并对 SSD 检测技术的发展趋势进行了展望。

关键词 材料;亚表面损伤;损伤表征;损伤性检测;无损检测

中图分类号 TN205 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100003

Research Progresses on Characterization and Detection Technology of Subsurface Damages in Optical Materials

Wang Huadong^{1,2}, Zhang Taihua¹

¹College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China;

²College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract The systematic characterization and accurate detection of subsurface damage (SSD) are the key to controlling the surface damage in the processing of optical materials. The research progresses on the detection and evaluation methods of SSD in optical materials are reviewed by combining the SSD characterization methods and the detection technologies. The structures and the characterization parameters of SSD induced by the ultra-precision machining are analyzed. Several typical destructive detection technologies and their technical features and application ranges are introduced aiming at the geometric characterization parameters of SSD. Several non-destructive detection technologies which meet the detection requirements of ultra-precision machining are introduced emphatically, and their technical advantages and development bottlenecks are also analyzed. The comparison for the SSD characterization and detection technologies between at home and abroad is performed, and the developing trend of SSD detection technology is presented.

Key words materials; subsurface damage; damage characterization; destructive detection; nondestructive detection

OCIS codes 160.4670; 220.4610; 120.4290; 350.3850

1 引言

光学材料是具有一定光学性质的功能材料。随着材料科学和加工工艺的发展,以光学玻璃和光学晶体为典型代表的光学材料被广泛应用于工业、军事和科学研究中关键元件的制作。光学元件的制作过程一般包括切割、磨削、研磨和抛光等工艺,极易产生不同程度的表层损伤。表层损伤会降低材料的强度、镀膜质量

收稿日期: 2017-04-12; **收到修改稿日期:** 2017-05-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11672356)、浙江省教育厅一般科研项目(Y201636134)

作者简介: 王华东(1984—),男,博士研究生,主要从事光学材料损伤表征与检测技术方面的研究。

E-mail: whd@zjut.edu.cn

导师简介: 张泰华(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事微纳米力学测试技术与应用方面的研究。

E-mail: zhangth@zjut.edu.cn(通信联系人)

和激光损伤阈值等,从而影响光学元件的长期稳定性和使用寿命^[1-4]。因此,调控其表层损伤成为了光学元件加工领域的研究焦点之一。

表层损伤的传统加工控制策略主要是通过优化机械加工工艺降低表层损伤深度,及通过无损伤抛光工艺去除亚表面损伤(SSD)层。二者的关键都在于表层损伤的系统表征和准确检测。表层损伤包括表面损伤和 SSD,表面损伤易于表征且检测手段较多^[5-6],而 SSD 难以直接观测。因此,SSD 的表征和检测成为了调控光学材料表层损伤的关键。目前,光学元件的 SSD 研究主要侧重于发展新型 SSD 检测技术^[7-10]。本文将 SSD 的表征方法和检测技术相结合,系统介绍了光学材料损伤检测评价方法的研究现状,并分析了其主要技术特点和发展趋势。

2 SSD 的结构和表征参量

在机械加工过程(例如切割、磨削和研磨等)中,光学材料表面受到不同的载荷、磨粒、转速等工况作用,表现出不同的变形特性,从宏观上表现为划痕、断裂乃至剥落;从微观上表现为微裂纹、材料晶体结构变化等。

抛光后 SSD 层结构^[11]如图 1 所示。其中,抛光再沉积层和变形层为连续性损伤层,裂纹层为非连续性损伤层。根据加工工艺的不同,机械加工后的 SSD 层表现出不同的结构:延性加工时,材料 SSD 层结构为弹性变形层;脆性加工时,材料 SSD 层结构为亚表面裂纹层和变形层,如图 2 所示。

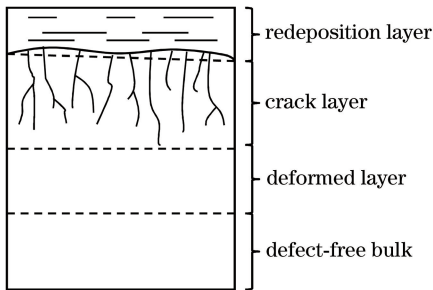


图 1 抛光后 SSD 层结构^[11]

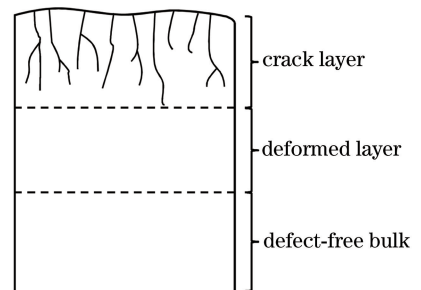


图 2 脆性加工后 SSD 层结构

Fig. 1 Structure of SSD layer after polishing^[11]

Fig. 2 Structure of SSD layer after fracture machining

目前,学者们主要以几何参量表征 SSD 层结构。其中,亚表面裂纹层通常以最大裂纹深度表征,但最大裂纹深度不能完全表征亚表面的损伤特征。王卓等^[12-13]利用亚表面裂纹群集深度、最大深度和损伤密度等几何参量,全面表征了光学元件研磨亚表面的裂纹损伤。力学指标也是一种常用于表征 SSD 层结构的参量。Zhang 等^[14]采用显微拉曼光谱,分析了单晶硅磨削后残余应力沿试样深度方向的分布,并利用残余应力的分布综合表征了 SSD 层结构。Yang 等^[15-16]采用纳米压入技术,研究了磨粒加工微晶玻璃的 SSD 对材料表层力学性能的影响。研究表明,材料表层的名义弹性模量随压入载荷的增加而逐渐减小,并趋于稳定值。由于名义弹性模量不是真实弹性模量,因此难以得出真实的损伤深度和损伤分布,但该方法具有一定的参考意义。Ma 等^[17]同样采用纳米压入技术,研究了光学玻璃损伤层内弹性模量和硬度随压入深度的变化,发现弹性模量的梯度变化与深度方向的损伤变化有一定相关性,但硬度相关性不明显,其原因可能是最大加载深度($5\ \mu\text{m}$)相对于损伤深度($200\ \mu\text{m}$)太小,以致不能充分体现损伤层内力学特性的变化情况。

由上述分析可知,几何指标是目前表征 SSD 的基本指标之一,其表征方法已日臻完善。损伤层内的几何指标与力学指标呈现了一定的相关性。因此,力学指标可能成为一种表征 SSD 的新手段,但其表征方法有待进一步研究。

3 SSD 检测技术

SSD 检测是控制材料表层损伤进而获得无损伤表面的前提。目前,国内外已发展了多种 SSD 的检测技术,按其对材料损伤程度的不同可分为损伤性检测技术和无损伤检测技术。下面,对几种常用 SSD 检测技术的原理和特点进行系统介绍。

3.1 损伤性检测技术

损伤性检测技术通过局部或全部破坏材料,使表层损伤信息暴露以便于显微镜观测,进而获得材料的损伤信息。按其获取 SSD 信息方式的不同可分为化学蚀刻方法和剖面显微方法。

3.1.1 化学蚀刻方法

化学蚀刻方法是用特定化学腐蚀液破坏材料表面的分子或原子键。SSD 存在不均匀性,蚀刻过程会表现出不同的表面形貌和腐蚀速率。常用的化学蚀刻方法有择优蚀刻法、化学蚀刻速率法和分步蚀刻法。

3.1.1.1 择优蚀刻法

择优蚀刻法一般用于抛光后表面的蚀刻,结合显微镜观测可获得材料特定深度层的损伤信息^[8]。也有直接利用该方法检测 SSD 层深度的应用。徐乐等^[9]利用单晶硅不与 HF 溶液发生化学反应,而非晶硅溶于该溶液的特性,提出了一种快速检测单晶硅亚表面非晶损伤层深度的方法。但该方法对于裂纹层和变形层的深度检测存在局限性。

3.1.1.2 化学蚀刻速率法

化学蚀刻速率法是一种利用损伤层和基体不同的腐蚀速率来确定损伤层深度的方法。早期的化学蚀刻方法通常采用恒定化学蚀刻速率法,即通过判断损伤层和基体的腐蚀速率拐点来确定损伤层深度。腐蚀液浓度和环境温度等因素对蚀刻速率的影响并不是线性变化,导致恒定化学蚀刻速率法的测试结果波动较大,进而影响检测精度。蚀刻速率曲线^[18]如图 3 所示。李改灵等^[18]提出了一种差动速率蚀刻法,即通过判断损伤层和基体的差动蚀刻加速度拐点来确定损伤层深度,进而削弱环境因素对检测精度的影响,蚀刻加速度曲线如图 4 所示。该方法操作简单,测试成本低,能够获得亚表面裂纹层和变形层的深度信息,目前已被应用于蓝宝石等材料的损伤深度检测^[19]中,但其测试效率较低,且精度在微米量级。

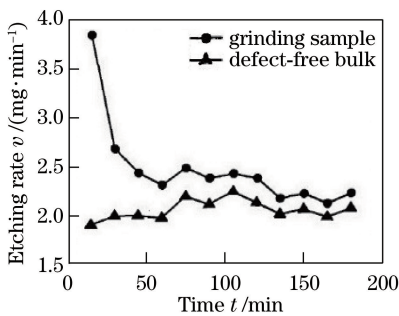


图 3 K9 玻璃蚀刻速率曲线^[18]

Fig. 3 Etching-rate curves of K9 glass^[18]

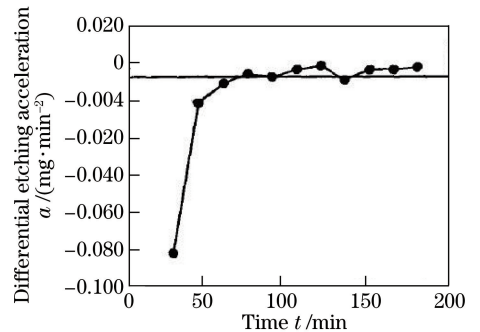


图 4 K9 玻璃差动蚀刻加速度曲线^[18]

Fig. 4 Differential etching acceleration curves of K9 glass^[18]

3.1.1.3 分步蚀刻法

分步蚀刻法采用特定腐蚀液对工件进行分层蚀刻,然后采用显微镜观测手段获得蚀刻台阶的深度或表面形貌,通过蚀刻速率或形貌特征确定 SSD 层深度。吴沿鹏等^[20]选用 HF 和浓 HNO₃ 混合腐蚀液蚀刻磨削后的 K9 玻璃,并采用光学显微镜分别观测不同腐蚀时间段的表面形貌,以腐蚀后的亮斑点数量确定亚表面裂纹层的深度。戴子华等^[21]采用 HF 和 NH₄F 混合液腐蚀固结磨料研磨加工后的 K9 玻璃,采用高精度的三维表面形貌仪检测了不同腐蚀时间段的蚀刻台阶高度,用蚀刻速率拐点确定 SSD 深度,并引入修正系数降低腐蚀环境变化的影响,大幅提高了腐蚀深度的测试精度。Wang 等^[10]采用生物酶标记熔融石英抛光后的损伤层,通过分层蚀刻法得到了每层的生物酶活性,基于生物酶活性的检测标定铈离子浓度沿深度的分布,进而确定了 SSD 层深度。该方法检测精度较高,可同时获得损伤深度和形貌信息,但受检测设备精度和腐蚀环境的影响较大。

3.1.2 剖面显微方法

剖面显微方法是一种采用剖面工艺加工出与表面成一定角度的剖面以暴露出 SSD 层的方法。根据剖面角度不同,分为两种检测方法:剖面与加工表面夹角较小时的角度抛光法和剖面与加工表面垂直时的截面显微法。

3.1.2.1 角度抛光法

角度抛光法是利用一个小角度斜面放大并暴露 SSD 信息。该方法通常用于观测材料在加工过程中引入的亚表面裂纹深度。通过测量裂纹损伤在斜面上的长度及斜面与表面的夹角,可得到亚表面裂纹深度。获得斜面的常用方式有两种:1) 采用专用夹具,通过无损抛光后择优蚀刻获得,检测原理如图 5 所示^[22]; 2) 采用磁流变斜面抛光获得,检测过程如图 6 所示^[23]。由于斜面加工过程易引入新的损伤,且难以保证准确的斜面角度,因此抛光工艺的优化和斜面角度的准确检测成为该技术的关键。

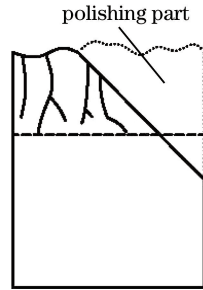


图 5 角度抛光法检测 SSD 原理图^[22]

Fig. 5 Schematic for SSD detection with angle polishing method^[22]

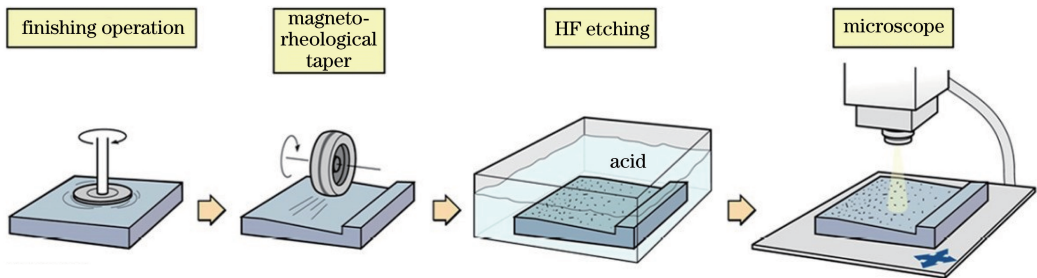


图 6 磁流变斜面抛光法检测 SSD 示意图^[23]

Fig. 6 Schematic for SSD detection with magneto-rheological inclined-plane polishing method^[23]

磁流变抛光不会引入机械损伤,克服了角度抛光法易引入新损伤的缺陷,但其抛光效率较低。斜面抛光加工面积较大的工件时,不但会扩大工件破坏范围,且抛光效率低下。Randi 等^[24]为解决球形斑点抛光方法^[25]及角度抛光法存在附加损伤和测量效率低的问题,提出了一种基于磁流变抛光工艺的斑点抛光方法。李圣怡等^[26-27]通过增大磁流变斑点贯入深度和精确确定裂纹测量基准等方式优化了该方法,提高了检测精度。该方法在获得 SSD 信息的同时,极大地保存了工件的完整性。

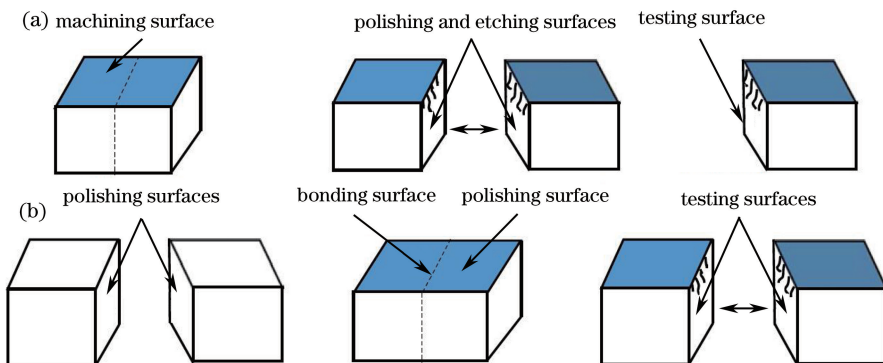


图 7 截面显微法示意图。(a)剖面形式;(b)粘结形式

Fig. 7 Schematic of cross-section microscopy method. (a) Profile form; (b) bonding form

3.1.2.2 截面显微法

截面显微法是一种检测亚表面裂纹深度和观测裂纹构型的重要方法。其原理是用剖面工艺将 SSD 沿

深度方向展现出来,用显微观测手段直接观测剖面,从而得到损伤信息。第一种截面显微法是将试样沿深度方向一分为二,对截面进行抛光和择优腐蚀后观测损伤。张银霞等^[28]利用该方法研究了研磨后 SiC 晶片的亚表面裂纹构型和不同晶面的裂纹深度。检测流程为表面加工-剖面-截面抛光-腐蚀-观测,如图 7(a)所示。该方法测试过程繁琐,只能观测特定位置的损伤信息,且剖面过程可能引入新的损伤,影响后期观测精度。第二种截面显微法是将试样待测截面抛光后用粘结剂粘结,加工过程在与该截面垂直的表面进行,加工完成后分离截面并清洗后进行观测^[29-30]。检测流程为截面抛光-粘结-表面加工-分离清洗-观测,如图 7(b)所示。该方法中粘合界面上的应力状态虽与整体(半无限体)截面不同,但研究表明,应力状态的不同并不会改变亚表面的损伤特征^[31],因此该方法同样适用于 SSD 观测。

化学蚀刻方法以损伤层和基体的蚀刻特性差异来确定损伤深度,测得的损伤深度包括裂纹层和变形层的深度,但其检测精度易受检测环境的影响。剖面显微方法则采用物理方法打开剖面,直接观测并获得损伤信息,能够检测裂纹损伤的构型、深度和密度,但不能检测变形层的深度。综上所述,损伤性检测技术检测机理明确,获得的损伤信息丰富,且检测成本较低,应根据检测对象的损伤特征和检测要求选择合适的检测手段。

3.2 无损检测方法

无损检测方法是在不损伤工件前提下获得 SSD 信息的检测方法。目前,SSD 的无损检测方法主要包括基于表面粗糙度的亚表面裂纹深度预测方法和基于光学原理的 SSD 检测技术。

3.2.1 基于表面粗糙度的亚表面裂纹深度预测方法

超精密磨粒加工在材料表面和亚表面形成具有压入断裂特征的裂纹系统,形成的塑性划痕或横向裂纹扩展至表面,引起材料剥落,形成表面粗糙度;同时在亚表面产生中位裂纹或晶体结构的变化,成为 SSD。

根据 Lawn 等^[32-33]的压入断裂模型,中位裂纹和横向裂纹的长度与材料力学参数、磨粒几何特性和加载条件等相关。因此,亚表面裂纹深度与表面粗糙度存在内在的定量关系。早期的研究认为,亚表面裂纹的群集深度与表面粗糙度呈近似线性关系^[23-24]。Lambropoulos 等^[34]和 Randi 等^[24]基于压入断裂模型,建立了亚表面裂纹群集深度与表面粗糙度的理论模型,即

$$f_{\text{SSD}} = 2.33\alpha_k^{2/3} \left(\frac{E}{H}\right)^{(2-5m)/3} \frac{(\cot \psi)^{1/9}}{(\sin \psi)^{2/3}} \left(\frac{F}{K_c^4/H^3}\right)^{1/6} f_{\text{SR}}, \quad (1)$$

式中 f_{SSD} 为亚表面裂纹群集深度; f_{SR} 为表面粗糙度; F 为磨粒载荷; E 、 H 和 K_c 分别为材料的弹性模量、硬度和断裂韧度; ψ 为磨粒锐度角,一般为 $46^\circ \sim 62^\circ$; m 为无量纲常数,一般取值为 $1/3$; 无量纲常数 $\alpha_k = 0.027 + 0.090(m - 1/3)$ 。

该方法难以直接确定载荷的定量信息,其进一步的应用受到限制。李圣怡等^[24]基于压入断裂模型,考虑弹性组元对中位裂纹深度的影响,通过消去(1)式中的磨粒载荷,建立了亚表面裂纹群集深度与表面粗糙度的直接对应关系,即

$$f_{\text{SSD}} = 3.08 (\kappa\alpha_k)^{2/3} \frac{1}{(\sin \psi)^{2/3}} \frac{H^{2m}}{E^{2m-2/3} K_c^{2/3}} f_{\text{SR}}^{4/3}, \quad (2)$$

式中 κ 为弹性变形对中位裂纹的修正系数, $\kappa = 1 + \chi_e/\chi_r$, 其中 χ_e 和 χ_r 分别为中位裂纹弹性组元和塑性组元的压痕系数,且 $\chi_e = 0.032 \pm 0.008$, $\chi_r = 0.026 \pm 0.003$ 。

向勇等^[35]将磨粒运动过程中切向载荷对中位裂纹偏转角度的影响引入(2)式,完善了李圣怡等^[24]的预测模型,得到亚表面裂纹群集深度的表达式为

$$f_{\text{SSD}} = \frac{[1 + (\chi_e/\chi_r)^{2/3} \omega^2] \alpha_k^{2/3}}{0.43^{4/3}} \frac{1}{(\sin \psi)^{2/3}} \frac{H^{2m} \cos \phi}{E^{2m-2/3} K_c^{2/3}} f_{\text{SR}}^{4/3}, \quad (3)$$

式中 ϕ 为中位裂纹偏转角, ω 为切向载荷对中位裂纹长度的影响因子。

Suratwala 等^[23]研究发现,亚表面裂纹的最大深度与群集深度存在线性关系,实验测得二者比值约为 2.8。Buijs 等^[36]发现,当压痕间距小到一定程度时,压痕间距对裂纹深度的影响变得显著,并研究了压痕间距对中位/径向裂纹长度的影响规律。王卓等^[37]基于亚表面裂纹群集深度的预测结果和 Buijs 等^[36]的结论,仿真得到 K9 玻璃研磨过程中亚表面裂纹最大深度和群集深度的比值为 (1.3 ± 0.05) , 实验得到研磨加工亚表面裂纹最大深度与群集深度的比值为 (1.21 ± 0.05) 。

需要注意的是,理论预测方法虽然实现了亚表面裂纹深度的高效无损伤检测,但其中表面粗糙度的检测手段(接触轮廓仪或白光干涉仪)和表达方式(峰谷值或平均值)引起的预测结果差异可能较大^[38]。更重要的是,该模型是基于材料脆性断裂的假设,在延性域加工(即存在连续性损伤,例如加工硬化、位错和相变等)或者有表面化学沉积层的情况下,表面粗糙度不能完全反映表层材料脆性断裂的程度,可能会导致较大的计算误差。

3.2.2 基于光学原理的 SSD 检测技术

基于光学原理的 SSD 检测技术是通过检测损伤层内的特征光学参数与基体的差异,定量估计 SSD 的信息。该技术已广泛应用于金属材料^[39]、工程陶瓷^[40]和光学材料^[41-42]的缺陷检测,其应用范围与检测精度有关。光学材料的 SSD 层深度主要取决于磨粒加工工艺,而磨削和研磨的亚表面深度范围约为几微米到几十微米^[43],因此为满足光学材料的 SSD 检测要求,相应的无损伤检测技术的检测精度须达到亚微米级。能达到该要求的检测技术主要为基于光学原理的检测技术,目前主要包括以下几种:激光扫描共聚焦显微技术、荧光共聚焦显微技术、激光散射共聚焦显微技术和全内反射显微技术等。

3.2.2.1 激光扫描共聚焦显微技术

激光扫描共聚焦显微技术的原理是利用激光束经照明针孔形成的点光源,对样品内焦平面的每个点进行扫描,样品上的聚焦点经光学系统在探测针孔上成像。照明针孔和探测针孔相对于聚焦点共轭,该点以外的任何发射光均被探测针孔阻挡,进而形成被测对象的三维层析结构,检测原理示意图如图 8 所示^[44]。

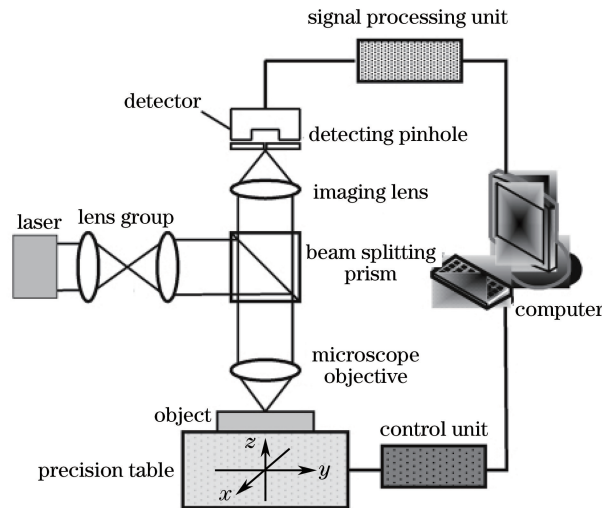


图 8 激光扫描共聚焦显微观测 SSD 示意图^[44]

Fig. 8 Schematic for SSD detection by confocal laser scanning microscopy^[44]

激光射入具有 SSD 的试样会产生不同程度的散射,其散射光的强度和分布反映了亚表面的损伤信息。如图 8 所示,针孔探测器只能接受来自聚焦点的光,进而形成焦点成像。通过改变共聚焦显微镜的聚焦平面位置,对不同点进行轴向层析成像,由此获得待测元件表面下各个位置的 SSD 分布^[44]。

激光扫描共聚焦显微技术的优点在于能够实现对 SSD 原位、无损伤的实时检测,但其检测对象一般局限于透明材料,且损伤层的折射率变化、试样表面粗糙度和探测针孔的孔径大小均影响该技术的检测精度^[44-45]。该技术的分辨率主要取决于数值孔径、波长和光学指数等参数^[45],目前横向和纵向分辨率最高分别可达 $0.15 \mu\text{m}$ 和 $0.3 \mu\text{m}$ 。

3.2.2.2 荧光共聚焦显微技术

亚表面裂纹损伤通常为磨粒加载过程产生的中位裂纹,该裂纹尖端在磨粒卸载阶段闭合^[32]。因此,采用有色液体渗透技术^[42]和激光扫描共聚焦技术^[44]检测磨粒加工后的亚表面,裂纹损伤深度可能小于实际损伤深度。

荧光共聚焦显微技术是一种在 SSD 中引入荧光增强介质的激光扫描共聚焦显微技术。Neauport 等^[46]采用该技术检测熔融石英磨削过程产生的 SSD,发现亚表面裂纹损伤中残留的油基冷却液受波长为 405 nm

的激光激发,会产生 505 nm 的荧光,利用该荧光标定了磨削加工产生 SSD 层的位置和深度。Williams 等^[47-48]通过在加工液中加入纳米量级的荧光粒子(直径小于 10 nm)标记光学玻璃的亚表面裂纹损伤,采用激光共聚焦扫描显微镜观测了荧光粒子的激发荧光,进而标定了 SSD 层深度。荧光粒子与试样表面的接触模型如图 9 所示。王景贺等^[49]基于该方法,采用直径为 7~10 nm 的 CdSe/ZnSn 水溶性核壳结构纳米晶体表征了 SSD 层的结构和分布情况。王威等^[50]采用了类似的方法,利用罗丹明 6G(R6G)荧光标记物,分析了 N31 和 N41 掺钕磷酸盐激光玻璃抛光过程中亚表面裂纹的演变情况。

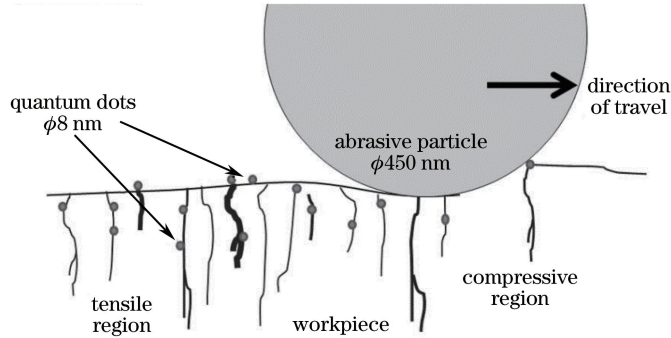


图 9 荧光粒子与试样表层接触模型示意图^[49]

Fig. 9 Schematic for contact model of fluorescent particles and sample surface layer^[49]

荧光共聚焦显微技术又称为激光扫描共聚焦显微技术的荧光工作模式。该技术利用加工过程中完成的 SSD 荧光标记,能够检测覆盖在连续损伤层(抛光再沉积层)之下的 SSD;但由于 SSD 层形貌复杂,荧光粒子不能完全深入所有损伤层,导致 SSD 检测结果可能偏小。同时,荧光介质的种类和粒度以及共聚焦显微镜的精度均会影响其检测精度,该技术的分辨率通常优于 0.5 μm 。

3.2.2.3 激光散射共聚焦显微技术

激光散射技术最先用于表面损伤检测,后用于 SSD 检测。该技术对损伤的激光散射信号敏感,可用于微小损伤的检测,但由于激光散射场复杂,SSD 散射信号易受表面散射和反射信号干扰,一般用于定性分析^[51]。因此,各国学者试图将该技术与其他检测技术相结合,以定量分析 SSD。激光调制散射技术是一种具有发展潜力的亚表面缺陷检测技术,Wu 等^[52-53]利用激光散射信号的光热敏感性,表征了光学元件抛光表面的微量缺陷,试图得到损伤的定量信息,但未见后续公开报道。

激光散射共聚焦显微技术是将激光散射技术和激光扫描共聚焦显微技术相结合的检测手段,原理图如图 10 所示^[54]。该技术的优点在于其利用共聚焦技术过滤非 SSD 的散射信号,进而提高 SSD 信息的提取精度和效率。Ma 等^[54]利用共聚焦显微镜观测散射信号的强度和形式,研究了熔融石英的 SSD 层深度和分布,实现了 SSD 层深度为 4 μm 的熔融石英研磨试样的原位无损伤检测。田爱玲等^[55-56]采用有限元手段,验

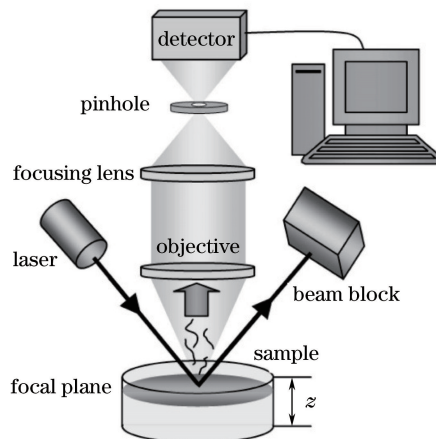


图 10 激光散射共聚焦显微技术观测 SSD 原理图^[54]

Fig. 10 Schematic for SSD detection by laser confocal scattering microscopy technique^[54]

证了利用激光散射和共聚焦原理检测 SSD 的可行性。然而,该技术要求检测对象为透明或半透明材料,且对表面光洁度有较高要求,纵向分辨率最高可达亚微米级。

3.2.2.4 全内反射显微技术

全内反射显微技术是基于全内反射原理对光学材料表面和亚表面缺陷进行散射成像的技术。该技术最早由 Temple 等^[57]提出,检测原理图如图 11(a)所示。激光器发出的激光经偏振器后形成偏振光,再经由两个放射镜改变光路,偏振光以大于或等于全反射临界角的方向射入试样下方的直角棱镜,对光学元件进行散射成像,其中棱镜的折射率与试样的相同。当试样表面和亚表面不存在损伤时,光学显微镜视场检测不到任何信息;当损伤存在时,其引起的散射光在显微镜中形成散射光斑,其强度和分布代表损伤的深度和位置信息。Sheehan 等^[58]将该技术应用于熔融石英的激光损伤缺陷的检测,证明该技术能够有效检测引发激光损伤的微小缺陷。

van der Bijl 等^[59-60]基于 Temple 等^[57]的全内反射显微技术,提出了一种基于反射光的全内反射显微技术,实现了抛光过程表层损伤的原位检测,检测原理如图 11(b)所示。该技术与 Temple 等^[57]的区别在于,将信号探测改为了激光反射光的强度检测,即当反射光强度与入射光相同时,试样不存在缺陷;当反射强度与入射光不同时,试样存在缺陷,根据反射位置和强度判断损伤深度和位置信息。崔辉等^[61]利用显微镜系统的有限焦深,结合全内反射显微技术和数字图像处理技术,检测光学元件的亚表面缺陷,试样中深度为 $8.106\ \mu\text{m}$ 的坑状损伤和深度为 $29.4\ \mu\text{m}$ 的带状损伤,利用该技术得到的检测值分别为 $8.4\ \mu\text{m}$ 和 $28.7\ \mu\text{m}$ 。许逸轩等^[62]基于驻波理论分析和实验验证,建立了 SSD 光强度与入射光偏振态和入射角间的关系,为进一步估算 SSD 深度提供了参考依据。

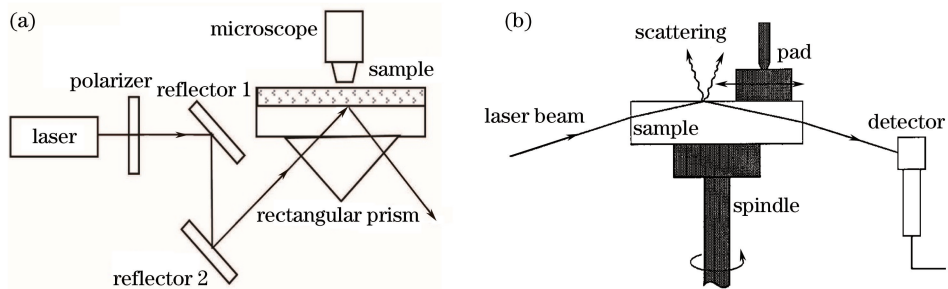


图 11 全内反射显微方法检测 SSD 示意图。(a)基于散射光^[57]; (b)基于反射光^[59]

Fig. 11 Schematic for SSD detection with total internal-reflection microscopy method.

(a) Based on scattered light^[57]; (b) based on reflected light^[59]

表面粗糙度对 SSD 的散射光检测结果影响较大,因此,该技术一般适用于表面粗糙度较小的试样检测,且要求试样透明;其横向分辨率受到衍射影响,检测得到的缺陷尺寸比实际缺陷要大,纵向分辨率取决于定位平台的定位精度和光学显微镜的分辨率,最高可达到亚微米级。

基于光学原理检测 SSD 的技术优势在于对试样无损伤,检测效率较高。然而,检测过程受干扰因素较多,导致检测条件比较苛刻,要求试样透明,且对表面粗糙度的要求较高。此外,激光扫描共聚焦显微技术和荧光共聚焦显微技术属于直接观测技术,其检测精度主要取决于图像获取和处理的精度,且受限于亚表面裂纹损伤形状的复杂程度,其检测结果一般小于实际值。激光散射共聚焦显微技术和全内反射显微技术属于间接检测技术,该技术目前主要的应用瓶颈在于检测理论模型尚未明确,检测精度受限。

4 结束语

SSD 的全面表征和准确检测是揭示光学元件加工机理、高效去除损伤层,进而获得无损伤表面的关键。国内近几年关于 SSD 的表征方法和损伤性检测技术取得了快速的发展,但无损伤检测技术尤其是基于光学原理的检测技术与国际水平还有一定的差距。同时,目前的亚表面检测技术多数只能应用于小型光学平面元件,针对大口径元件或曲面元件的 SSD 检测技术尚欠缺。因此,发展精确、可靠、高效的无损伤检测技术,开发适用于大口径元件或曲面元件领域的 SSD 检测技术将成为未来的研究重点。

参 考 文 献

- [1] Feit M D, Exarhos G J, Rubenchik A M, *et al.* Influence of subsurface cracks on laser-induced surface damage[C]. SPIE, 2003, 5273: 264-272.
- [2] Bertussi B, Cormont P, Palmier S, *et al.* Initiation of laser-induced damage sites in fused silica optical components[J]. Optics Express, 2009, 17(14): 11469-11479.
- [3] Zhang Longxia, Zhu Xiaobing, Li Fengyu, *et al.* Laser-induced thermal damage influenced by surface defects of materials[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0914001.
张龙霞, 朱晓冰, 李风雨. 材料表面缺陷对激光热损伤的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0914001.
- [4] Wang Hongxiang, Shen Lu, Li Chengfu, *et al.* Analysis and experimental investigation of laser induced damage of optics[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(3): 0302006.
王洪祥, 沈璐, 李成福, 等. 光学元件激光诱导损伤分析及实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302006.
- [5] Wang Shitong, Yang Yongying, Zhao Limin, *et al.* Numerical simulation research on scattering light imaging of surface defects of optical components[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0708005.
王世通, 杨甬英, 赵丽敏, 等. 光学元件表面缺陷散射光成像数值模拟研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708005.
- [6] Luo Mao, Bu Yang, Xu Jinghao, *et al.* Optical element surface defect measurement based on multispectral technique [J]. Chinese J 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.
- [7] Dai Zihua, Zhu Yongwei, Li Jun, *et al.* Comparison of different methods to measure the subsurface damage depth of K9 glass lapped by fixed abrasive polishing pad[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2014(5): 6-12.
戴子华, 朱永伟, 李军, 等. 固结磨料研磨 K9 玻璃亚表面损伤层深度测量方法研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2014(5): 6-12.
- [8] Hu Chenlin, Bi Guo, Ye Hui, *et al.* Research on detection of subsurface damage on grinding optical elements[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(11): 2929-2934.
胡陈林, 毕果, 叶卉, 等. 光学元件磨削加工亚表面损伤检测研究[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(11): 2929-2934.
- [9] Xu Le, Guo Jian, Yu Bingjun, *et al.* Rapid detection on the thickness of subsurface damage layer of silicon[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 108-114.
徐乐, 郭剑, 余丙军, 等. 一种快速检测单晶硅亚表面损伤层厚度的方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 108-114.
- [10] Wang Z, Wang L, Yang J, *et al.* Detection of subsurface trace impurity in polished fused silica with biological method [J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21292-21301.
- [11] Kozlowski M R, Nichols M A. Subsurface damage and polishing compound affect the 355-nm laser damage threshold of fused silica surfaces[C]. SPIE, 1998, 3244: 356-364.
- [12] Wang Zhuo, Wu Yulie, Dai Yifan, *et al.* Characterization of subsurface damage of optical materials in lapping process [J]. Nanotechnology and Precision Engineer, 2008, 6(5): 349-355.
王卓, 吴宇列, 戴一帆, 等. 研磨加工中光学材料亚表面损伤的表征方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(5): 349-355.
- [13] Wang Zhuo, Wu Yulie, Dai Yifan, *et al.* Research on measurement and prediction methods of subsurface damage depth of optical materials in grinding process[J]. Aviation Precision Manufacturing Tehcnology, 2007, 43(5): 1-5.
王卓, 吴宇列, 戴一帆, 等. 光学材料磨削加工亚表面损伤层深度测量及预测方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(5): 1-5.
- [14] Zhang Y X, Kang R K, Guo D M, *et al.* Raman microspectroscopy study on the ground surface of monocrystalline silicon wafers[J]. Key Engineering Materials, 2006, 304/305: 241-245.
- [15] Yang F, Fei P. Microindentation of ground silicon wafers[J]. Semiconductor Science & Technology, 2004, 19(9): 1165-1168.
- [16] Yang F. Effect of subsurface damage on indentation behavior of ground ULE™ glass[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2005, 351(52/53/54): 3861-3865.
- [17] Ma B, Shen Z, He P, *et al.* Evaluation and analysis of polished fused silica subsurface quality by the nanoindenter technique[J]. Applied Optics, 2011, 50(9): 279-285.

- [18] Li Gailing, Wu Yulie, Wang Zhuo, *et al.* Experiment study on the destructive measurement of the depth of SSD for optical material[J]. *Aviation Precision Manufacturing Tehcnology*, 2006, 42(6): 19-22.
李改灵, 吴宇列, 王卓, 等. 光学材料亚表面损伤深度破坏性测量技术的实验研究[J]. *航空精密制造工程*, 2006, 42(6): 19-22.
- [19] Wang Jianbin, Zhu Yongwei, Wang Jiashun, *et al.* Effect of lapping methods on subsurface damage depth of single crystal sapphire[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2014, 43(5): 1099-1104.
王建彬, 朱永伟, 王加顺, 等. 研磨方式对单晶蓝宝石亚表面损伤层深度的影响[J]. *人工晶体学报*, 2014, 43(5): 1099-1104.
- [20] Wu Yanpeng, Yang Wei, Ye Hui, *et al.* Study on subsurface damage depth and morphology of optical elements[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2013(10): 78-81.
吴沿鹏, 杨炜, 叶卉, 等. 光学元件亚表面损伤深度及形貌研究[J]. *制造技术与机床*, 2013(10): 78-81.
- [21] Dai Zihua, Zhu Yongwei, Wang Jianbin, *et al.* Measurement of subsurface damage of K9 glass by step-by-step etching method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 287-293.
戴子华, 朱永伟, 王建彬, 等. K9 玻璃亚表面损伤的分步腐蚀法测量[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(2): 287-293.
- [22] Esmaeilzare A, Rahimi A, Rezaei S M. Investigation of subsurface damages and surface roughness in grinding process of Zerodur® glass-ceramic[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 313(7): 67-75.
- [23] Suratwala T, Wong L, Miller P, *et al.* Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(52/53/54): 5601-5617.
- [24] Randi J A, Lambropoulos J C, Jacobs S D. Subsurface damage in some single crystalline optical materials[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(12): 2241-2249.
- [25] Zhou Y, Funkenbusch P D, Quesnel D J, *et al.* Effect of etching and imaging mode on the measurement of subsurface damage in microground optical glasses[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 77(12): 3277-3280.
- [26] Li S Y, Wang Z, Wu Y. Relationship between subsurface damage and surface roughness of optical materials in grinding and lapping processes[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 205(1/2/3): 34-41.
- [27] Li Shengyi, Wang Zhuo, Wu Yulie, *et al.* Prediction theory and experiment of subsurface damage based on lapping processing parameters[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 192-198.
李圣怡, 王卓, 吴宇列, 等. 基于研磨加工参数的亚表面损伤预测理论和试验研究[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 192-198.
- [28] Zhang Yinxia, Yang Lele, Gao Wei, *et al.* Cross-sectional microscopy detection technology for subsurface damage of fixed abrasive lapped SiC wafers[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2013, 42(5): 906-910.
张银霞, 杨乐乐, 郜伟, 等. 固结磨料研磨 SiC 晶片亚表面损伤截面显微检测技术[J]. *人工晶体学报*, 2013, 42(5): 906-910.
- [29] Xu H H K, Jahanmir S. Simple technique for observing subsurface damage in machining of ceramics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 77(5): 1388-1390.
- [30] Wang Hongxiang, Li Chengfu, Zhu Benwen, *et al.* Destructive methods for detecting subsurface defects of fused silica optics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(12): 129-133.
王洪祥, 李成福, 朱本温, 等. 光学元件亚表面缺陷的损伤性检测方法[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(12): 129-133.
- [31] Helbawi H, Zhang L, Zarudi I, *et al.* Difference in subsurface damage in indented specimens with and without bonding layer[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43(4): 1107-1121.
- [32] Lawn B R, Evans A G, Marshall D B. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The median/radial crack system [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1980, 63(9/10): 574-581.
- [33] Marshall D B, Lawn B R, Evans A G. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The lateral crack system[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1982, 65(9/10): 561-566.
- [34] Lambropoulos J C, Jacobs S D, Ruckman J. Material removal mechanisms from grinding to polishing[J]. *Ceramic Transactions*, 1999, 102: 113-128.
- [35] Xiang Yong, Ren Jie, Bai Manshe, *et al.* Prediction method and measurement of the depth of subsurface damage of glass-ceramic by lapping process[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0708006.
向勇, 任杰, 白满社, 等. 微晶玻璃研磨加工亚表面损伤深度预测方法及测量[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0708006.

- [36] Buijs M, Martens L A A G. Effect of indentation interaction on cracking[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2005, 75(10): 2809-2814.
- [37] Wang Z, Wu Y, Dai Y, *et al.* Subsurface damage distribution in the lapping process[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): 1417-1426.
- [38] Blaineau P, Laheurte R, Darnis P, *et al.* Relations between subsurface damage depth and surface roughness of grinded fused silica[J]. Optics Express, 2013, 21(25): 30433-30443.
- [39] Wu Xiaoyan, Yu Yingjie, Lü Lijun. Review on non-destructive detection of inner defects of object[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040002.
伍小燕, 于瀛洁, 吕丽军. 物体内部缺陷无损检测技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040002.
- [40] Tian Xinli, Wang Jianquan, Dan Wei, *et al.* Progress on NDT technologies for micro-defects of engineering ceramics [J]. China Mechanical Engineering, 2010(21): 2639-2645.
田欣利, 王健全, 但伟, 等. 工程陶瓷微缺陷无损检测技术的研究进展[J]. 中国机械工程, 2010(21): 2639-2645.
- [41] Liu Jian, Ma Zhanlong, Wang Junlin. Research status of subsurface damage detection technology of optical elements [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 081204.
刘健, 马占龙, 王君林. 光学元件亚表面损伤检测技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 081204.
- [42] Wang J, Li Y, Han J, *et al.* Evaluating subsurface damage in optical glasses[J]. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2011, 6: 11001.
- [43] Yuan Julong, Zhang Feihu, Dai Yifan, *et al.* Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177.
袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
- [44] Tian Ailing, Wang Huiting, Dang Juanjuan, *et al.* A novel method for subsurface damage measurement of optical components[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(2): 214-218.
田爱玲, 王会婷, 党娟娟, 等. 抛光表面的亚表层损伤检测方法研究[J]. 光子学报, 2013, 42(2): 214-218.
- [45] Fine K R. Non-destructive real-time direct measurement of subsurface damage[C]. SPIE, 2005, 5799: 105-110.
- [46] Neauport J, Cormont P, Legros P, *et al.* Imaging subsurface damage of grinded fused silica optics by confocal fluorescence microscopy[J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3543-3554.
- [47] Williams W B, Mullany B A, Parker W C, *et al.* Using quantum dots to tag subsurface damage in lapped and polished glass samples[J]. Applied Optics, 2009, 48(27): 5155-5163.
- [48] Williams W B, Mullany B A, Parker W C, *et al.* Using quantum dots to evaluate subsurface damage depths and formation mechanisms in glass[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 569-572.
- [49] Wang Jinghe, Zhang Lei, Wang Hongxiang, *et al.* Fused quartz subsurface damage detecting method based on confocal fluorescence microscopy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0406004.
王景贺, 张磊, 王洪祥, 等. 基于荧光共聚焦技术熔石英亚表层损伤检测方法[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0406004.
- [50] Wang Wei, Zhang Lei, Feng Suyu, *et al.* Using fluorescence microscopy method to study subsurface defects in Nd-doped phosphate laser glasses[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0906001.
王威, 张磊, 冯素雅, 等. 采用显微荧光法研究掺钕磷酸盐激光玻璃的亚表面缺陷[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0906001.
- [51] Trost M, Herffurth T, Schmitz D, *et al.* Evaluation of subsurface damage by light scattering techniques[J]. Applied Optics, 2013, 52(26): 6579-6588.
- [52] Wu Z, Sheehan L, Kozlowski M. Laser modulated scattering as a nondestructive evaluation tool for defect inspection in optical materials for high power laser applications[J]. Optics Express, 1998, 3(10): 376-383.
- [53] Wu Z, Feit M D, Kozlowski M R, *et al.* Laser modulated scattering as a nondestructive evaluation tool for optical surfaces and thin film coatings[C]. SPIE, 1999, 3578: 721-729.
- [54] Ma B, Shen Z X, He P F, *et al.* Detection of subsurface defects of fused silica optics by confocal scattering microscopy [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(3): 296-299.
- [55] Tian Ailing, Wang Hui, Wang Chunhui. Simulation research on the light-scattering properties of the subsurface damage of optical components[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908006.
田爱玲, 王辉, 王春慧. 光学元件亚表面损伤的激光散射仿真研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908006.

- [56] Tian Ailing, Tian Yujun, Wang Chunhui, *et al.* Scattering characteristics of focused light beam in medium with subsurface damage[J]. High Power Laser and Particles Beams, 2014, 26(9): 115-121.
田爱玲, 田玉珺, 王春慧, 等. 聚焦光在亚表面损伤介质中的散射特性[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(9): 115-121.
- [57] Temple P A. Total internal reflection microscopy: A surface inspection technique[J]. 1981, 20(15): 2656-2664.
- [58] Sheehan L M, Kozlowski M R, Camp D W. Application of total internal reflection microscopy for laser damage studies on fused silica[C]. SPIE, 1998, 3244: 282-295.
- [59] van der Bijl R J, Föhnle O W, Van B H, *et al.* In-process monitoring of grinding and polishing of optical surfaces[J]. Applied Optics, 2000, 39(19): 3300-3303.
- [60] Föhnle O W, Wons T, Koch E, *et al.* iTIRM as a tool for qualifying polishing processes[J]. Applied Optics, 2002, 41(19): 4036-4038.
- [61] Cui Hui, Liu Shijie, Zhao Yuanan, *et al.* Study on total internal reflection microscopy for subsurface damage[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612004.
崔辉, 刘世杰, 赵元安, 等. 全内反射显微技术探测亚表面缺陷新方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612004.
- [62] Xu Yixuan, Jiang Zhengdong, Wang Hualin, *et al.* Theoretical research and experimental analysis on the depth measurement of subsurface damage[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111401.
许逸轩, 蒋正东, 王华林, 等. 亚表面损伤深度测量的理论研究与实验分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111401.