

# 物体内部缺陷无损检测技术综述

伍小燕 于瀛洁 吕丽军

(上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

**摘要** 物体内部缺陷是指表面以下的裂纹、杂质、疲劳损伤以及腐蚀, 此类缺陷因具有隐蔽性而严重影响产品质量和运行安全。以光学元件和飞机叶片为例, 分析内部缺陷形成机理和形貌特征。将内部缺陷无损检测分为有激励无损检测和无激励无损检测, 并着重介绍了热激励和磁激励无损检测的原理和研究成果。

**关键词** 测量; 内部缺陷; 光学元件; 飞机叶片; 热激励无损检测; 磁激励无损检测

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.040002

## Review on Non-Destructive Detection of Inner Defects of Object

Wu Xiaoyan Yu Yingjie Lü Lijun

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract** Inner defects of object are cracks, impurity, fatigue damage and corrosion under surface. The defects are secluded so that they deteriorate the quality of product and safety of operation seriously. Taking optical components and aircraft blades as examples, we analyze the forming mechanism and the characteristic of inner defects. Non-destructive detection of inner defects is categorized into energizing and unenergizing non-destructive detection. This paper focuses introducing the principles and research achievements of thermal excitation non-destructive detection and magnetic pumping non-destructive detection.

**Key words** measurement; inner defect; optical component; aircraft blade; thermal excitation non-destructive detection; magnetic pumping non-destructive detection

**OCIS codes** 120.4290; 160.4670; 350.1820

### 1 引言

物体内部缺陷是指加工或应用过程中工件内部产生的裂纹、杂质、疲劳损伤以及腐蚀等。隐藏在工件内部的缺陷具有隐蔽性和危险性, 成为影响生产质量和运行安全的致命因素。上海东方航空的“麦道飞机事件”就是由于前起落架销子内部裂缝, 飞机起飞后销子断裂而引起的。物体内部缺陷也成为制约太空望远镜发射的一大障碍<sup>[1]</sup>, 隐藏在光学元件中的内部裂纹, 当其暴露在太空环境中时, 内部裂纹会进一步扩展, 导致镜面扭曲, 难以满足严格的面形和平面度要求<sup>[2]</sup>。可见对裂纹、杂质、疲劳损伤以及腐蚀等工件内部缺陷进行可靠的、定期的检测是非常有必要的, 可减少事故的发生、减少经济损失, 还可提高加工效率、减少加工成本。

目前, 国内外研究人员对物体内部缺陷检测进行了大量的分析研究, 提出了许多检测方法, 尤其是无损检测技术因其快速而不损伤元件的特点受到广泛的关注。红外热成像技术采用红外光对被测件大面积加热检测, 因此检测速度快并且装置简单、容易实现; 磁光涡流成像(MOI)技术检测前不需要清除油漆等表面覆盖层, 检测难度低, 能实现表面以下细小缺陷的检测。此两项技术因其广泛应用而成为无损检测技术中的典型代表。

本文以光学元件和飞机叶片为例, 对内部缺陷形成机理和特征进行了分析, 并根据缺陷无损检测时有无激励划分为有激励无损检测和无激励无损检测。着重介绍了热激励无损检测技术-(红外热成像技术)和磁激励无损检测技术-(磁光涡流成像技术)的原理以及研究成果。

**收稿日期**: 2012-11-05; **收到修改稿日期**: 2013-01-07; **网络出版日期**: 2013-03-11

**作者简介**: 伍小燕(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: orchis\_2005@163.com

**导师简介**: 于瀛洁(1969—), 女, 研究员, 主要从事光学测量方面的研究。

E-mail: yingjieyu@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

## 2 物体内部缺陷形成机理和特征分析

物体在加工过程以及使用过程中都会产生内部缺陷,在此从这两个方面分析物体内部缺陷的形成机理以及形貌特征。

### 2.1 物体加工过程中导致的内部缺陷

以光学元件机械冷加工为例分析加工过程导致的内部缺陷形成机理。

玻璃在许多棱角磨料的切削作用下,工件受压发生塑性变形,如图 1 所示,在变形区域的边缘分别产生横向裂纹和径向裂纹<sup>[3]</sup>;横向裂纹形成表面缺陷 H,径向裂纹构成内部缺陷 F<sup>[4]</sup>(图 2)。如图 3 所示,使用一系列粒径越来越小的研磨颗粒逐步加工,前道工序产生的损伤层被有效去除,新引入的损伤层随之减小<sup>[5]</sup>,因此样品被不断去除,同时在表面留下密密麻麻纵横交错的表面缺陷,以及产生包含较深的纵向裂纹、横向划痕和残余应力在内的内部损伤层。

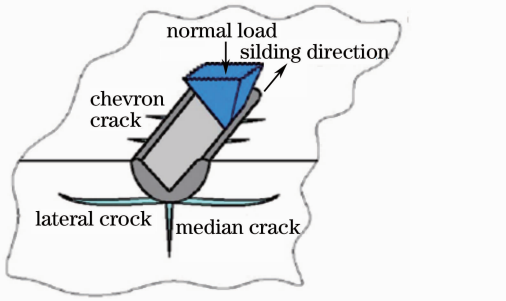


图 1 脆性材料切削机理

Fig. 1 Mechanism of removal of brittle materials

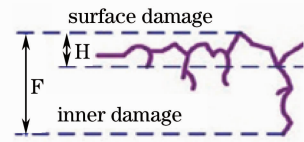


图 2 研磨后玻璃表层结构图

Fig. 2 Schematic of surface structure of glass resulting from abrasive action

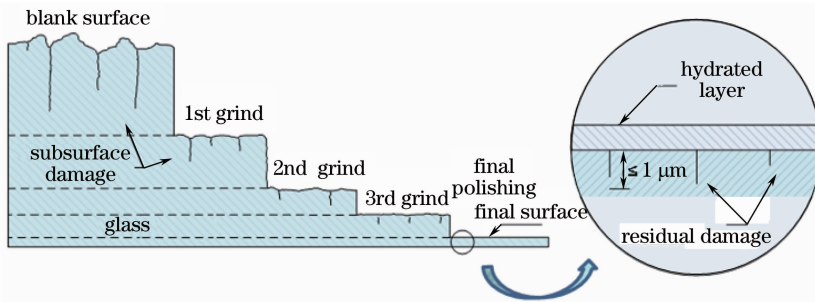


图 3 高质量抛光面的连续切削原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the successive stages of material removal used to achieve a highly polished glass surface

最后抛光得到材料内部缺陷形貌的剖面示意图如图 4 所示,裂缝主要是往下面各个方向延伸,且从上到下分支逐渐变多变细,形成倒树状结构。从表面到 50 nm 以及到 1  $\mu\text{m}$  左右深度范围内是抛光过程中由于热作用形成的一层致密的、杂质密度较高的沉积层;表面以下 1~100  $\mu\text{m}$  深度范围内主要是细裂缝和微量的杂质颗粒,这个深度范围是亚表面层;以下依次是变形层和玻璃体<sup>[6]</sup>。

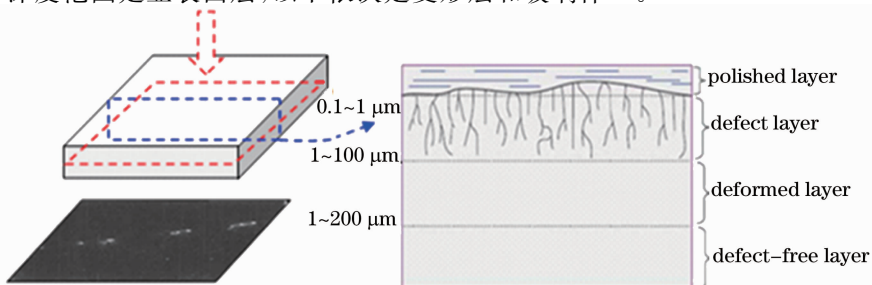


图 4 内部缺陷形貌示意图

Fig. 4 Schematic illustration of inner defects

## 2.2 物体使用过程中导致的内部缺陷

以飞机叶片为例分析使用过程中导致的内部缺陷形成机理。

物体使用过程中往往由于恶劣的工作环境导致其内部缺陷的产生。航空发动机的零部件中,叶片的工作条件和环境最差,要求在很高的温度和很大的气动负荷、机械负荷下工作,同时还要承受高温燃气的氧化和热腐蚀,最易产生缺陷导致失效<sup>[7,8]</sup>。

飞机叶片加工过程中会在合金中加入碳,形成的碳化物能够改善其蠕变性能,但是大颗粒碳化物会成为应力集中点,在高气动负荷和机械负荷作用下,易产生裂纹,降低使用寿命。微观结构有缺陷的叶片,由于热机械疲劳使其破裂,成为第一个出现裂纹的叶片,产生的碎片由于运行过程中相互撞击而诱导其他叶片失效。整个叶片失效过程可概括为<sup>[9]</sup>:微观结构上有大颗粒碳化物或杂质的叶片,在恶劣的环境下首先失效,其失效时产生的碎片撞击而引起其他叶片失效。

## 3 红外热成像技术

红外热成像技术最早可追溯到 19 世纪英国物理学家 Herschel 对红外线的发现,是集传热学、计算机科学和数字图像处理为一体的热激励无损检测技术。主动式红外热成像技术利用外部热激励源对物体加热,使得物体表面温度发生变化,以检测物体内部是否存在缺陷。

脉冲激励法和锁相法是主动式红外热成像的重要分支。脉冲激励法利用闪光脉冲激励物体,该方法激励时间短,检测效率高,但对热激励源的均匀性要求高。锁相法采用周期性变化的热激励源,通过表面温度信息获得的相位和幅值进行缺陷分析,该方法不易受加热不均匀的影响,但激励时间长,检测效率低。脉冲相位热成像技术(PPT)是脉冲激励法和锁相法相结合的产物,同时具备两者的优点。

### 3.1 红外脉冲相位热成像技术的理论基础

根据热波传播理论,物体被激励时其温度函数为

$$T(x, t) = T_0 \exp(-x/\mu) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \omega t\right), \quad (1)$$

式中  $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi\omega}}$ ,  $\alpha$  为热扩散系数,  $\omega$  为热波频率,  $\lambda$  为热波波长。由(1)式可知:

1) 高次谐波扩散长度短,低频谐波穿透深;2) 近表面缺陷容易被高次谐波所响应,深处缺陷容易被低频谐波所响应。

红外摄影仪采集被激励物体表面温度,构成热时序图,从时序图中提取同一点的温度,组成被测点的温度时域信号,对该信号进行时频分析,由下式分别获取幅度和相位信息来判定缺陷:

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} T(k) \exp\left(\frac{2\pi i k n}{N}\right) = \text{Re } n + i \text{Im } n,$$

$$A_n = \sqrt{\text{Re } n^2 + \text{Im } n^2}, \phi_n = \arctan \frac{\text{Im } n}{\text{Re } n}, \quad (2)$$

分别对所有像素点进行分析处理。

### 3.2 红外脉冲相位热成像技术的应用

脉冲相位热成像技术最早由 Maldague 等<sup>[10,11]</sup>提出,检测装置如图 5 所示,并将其应用于铝板内部不同深度缺陷的检测。通过对热波理论的分析 and 处理,可得被测件相位图,如图 6 所示。从检测结果可以看出不同深度缺陷所表现出来的相位是不同的,可清晰判断不同深度缺陷所处的位置和形貌。

判定不同深度缺陷时,随着缺陷深度的增加,差异性减小,判定缺陷较困难。针对较深内部缺陷的判定,哈尔滨工业大学的刘俊岩等<sup>[12]</sup>采用 Chirp 线性调制光源,降低线性调制光源的初始频率,减小 Chirp 扫描速率,从而增大有缺陷与无缺陷对应的差异性。利用该方法检测金属平底中的孔,其孔洞分布如图 7 所示,热激励源为按照线性调频 Chirp 信号规律变化的卤素光源。调节 Chirp 信号频率分别为 1.0、0.7 Hz,图 8 为两种频率扫描信号的检测结果;当扫描频率  $f=0.7$  Hz 时,能检测最深位置的缺陷。线性调频热激励能够弥补传统锁相热成像检测的单频热波在缺陷处扩散深度的不足,可检测不同深度范围内的缺陷形状和尺寸。

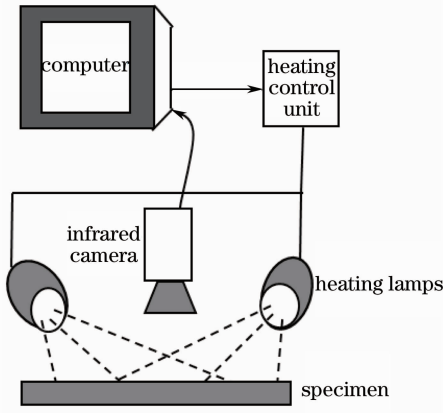


图 5 热成像实验装置

Fig. 5 Experimental setup for thermography

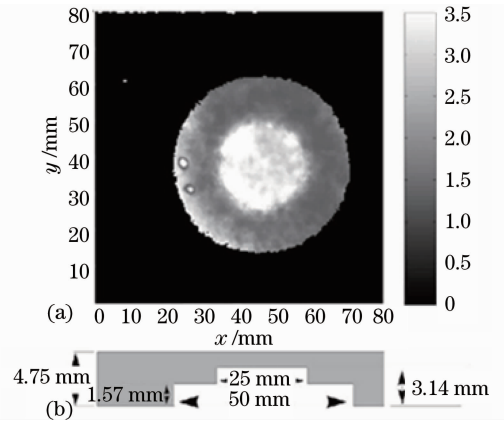


图 6 铝板缺陷脉冲相位热成像检测结果

Fig. 6 Result of defect fest of an aluminum sample using PPT

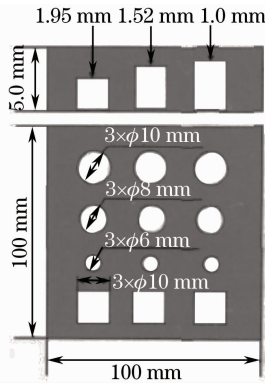


图 7 试件结构

Fig. 7 Specimen structure

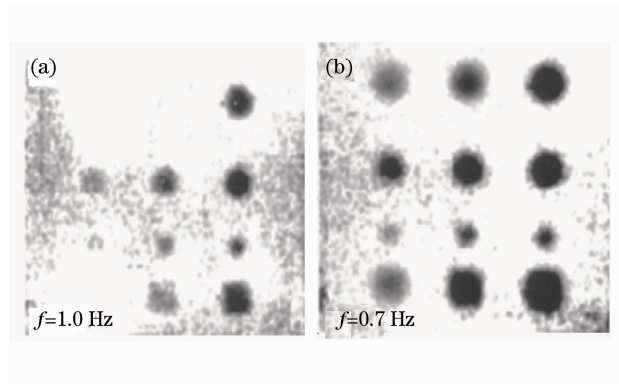


图 8 频域扫描的实验结果

Fig. 8 Experimental results of frequency-domain scanning

脉冲相位热成像技术不仅可应用于高导热材料的检测,还可以用于低导热材料,例如复合材料。被测物体为 3 mm 厚的塑合木复合材料,其横断面如图 9 所示,通过选取合适的小波频率、带宽参数以及尺度因子,找到与特征信号最匹配的小波进行分析,采用小波变换克服环境温度等的影响<sup>[13]</sup>。图 10 为塑合木材料亚表层缺陷厚度的脉冲相位热成像与三维(3D)计算机层析成像的检测结果,可知该方法获得的结果与真实的缺陷信息更为接近。

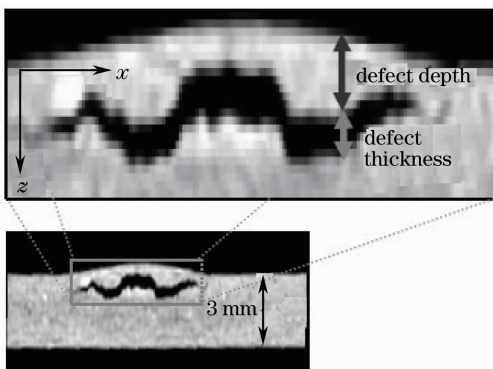


图 9 塑合木断层图

Fig. 9 A cross-section image in a wood plastic composite

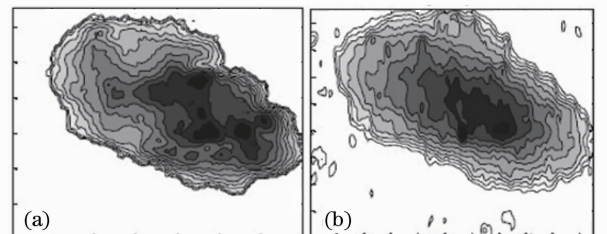


图 10 缺陷深度检测结果对比。(a) 脉冲相位热成像; (b) 三维计算机层析成像

Fig. 10 Comparison of results of detecting defect thickness. (a) Pulsed phase thermography; (b) 3D computed tomography

## 4 磁光涡流成像技术

磁光涡流成像(MOI)技术是以电涡流效应以及动态法拉第磁光效应为原理,实现快速、准确的磁性材料缺陷的磁激励无损检测。

### 4.1 磁光涡流成像技术的基本原理及检测装置

信号发生器间歇式激励线圈使被测金属中产生感生涡流,变化的涡流产生磁场,而磁性物体中的缺陷会改变涡流分布,相应地改变涡流激发的磁场。激光穿过线圈中的磁光元件时,其偏振方向发生旋转,旋转角度为

$$\theta = V(B + \mu M)l, \quad (3)$$

式中  $V$  为菲尔德常数,  $B$  为磁场强度,  $\mu$  为磁光系数,  $M$  为磁化强度,  $l$  为光程。

由(3)式可知:旋转角度  $\theta$  与菲尔德常数  $V$  成正比,为了获得较大的偏转,要求有较大菲尔德常数的磁光介质材料。

根据磁光涡流成像原理建立检测装置,如图 11 所示。激光束经扩束器、起偏器转变为线偏振光,线偏振光经分光棱镜分成两光束,其中一束透过偏振分光棱镜,经激励线圈、磁光元件、透镜和  $1/4$  波片后由被测物体反射回来,当经过两次  $1/4$  波片后到达分光棱镜时只能发生反射;激励线圈通电后,磁光元件在带有缺陷信息的磁场作用下,使通过其内的激光偏振方向产生不同程度的旋转,经检偏器后由 CCD 采集对应图像。

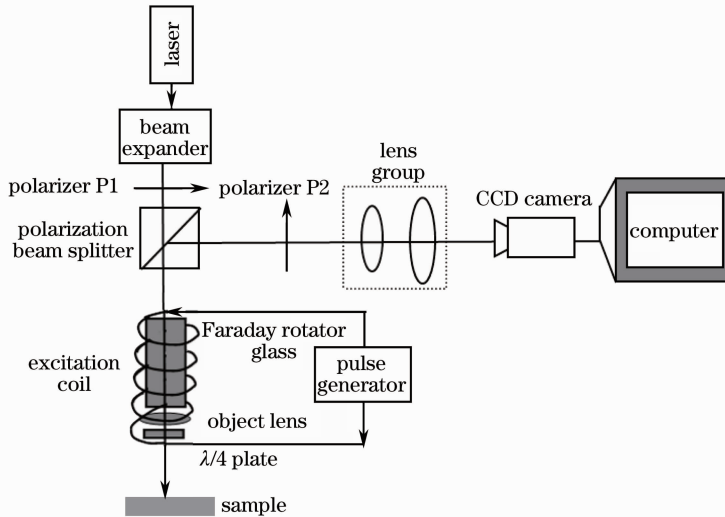


图 11 磁光涡流成像检测装置

Fig. 11 Experimental setup of magnetic-optic-eddy current imaging

### 4.2 磁光涡流成像技术的应用

磁光涡流成像技术最早由 Fitzpatrick 等<sup>[14]</sup>为了检测机身铝组件中的缺陷而提出。MOI 成像系统采集到的原始图像往往混杂着噪声,影响成像质量,降低检测效果,需要将缺陷信息从背景中分离出来。

Nath 等<sup>[15]</sup>为了提高 MOI 的检测能力,通过对检测信号进行大面积均值、形态滤波处理,进一步改善 MOI 成像质量,利用该方法对磁性钢板中缺陷深 5 mm、直径 40 mm 的圆柱型孔洞和 40 mm×40 mm 的方孔进行检测,内部缺陷的形貌得到了很好的再现,图 12 为检测结果。

电子科技大学的 Cheng 等<sup>[16]</sup>为避免被测物体温度过高带来的误差影响,在实验中采用间歇式激励信号,并采用图像处理技术实现缺陷信息的提取,分别对其进行灰度化处理,将背景灰度区域进行压缩,同时将含有缺陷的灰度区域进行拉伸,通过该方法突出被测区域轮廓,使缺陷轮廓清晰可见,然后采用二值变换分割提

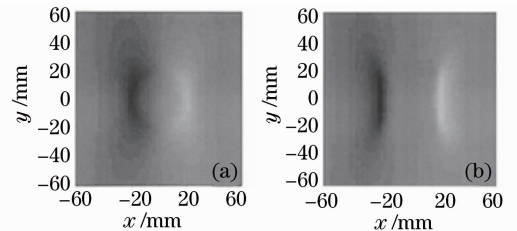


图 12 磁性钢板漏磁域缺陷的磁光涡流成像图。

(a) 圆形缺陷处; (b) 正方形缺陷处

Fig. 12 Magneto-optic-eddy current images of leakage fields from. (a) Circular and (b) quadratic defects at a ferromagnetic plate

取特征信息,如图 13 所示。图 13(c)为 MOI 检测信号的优化结果。

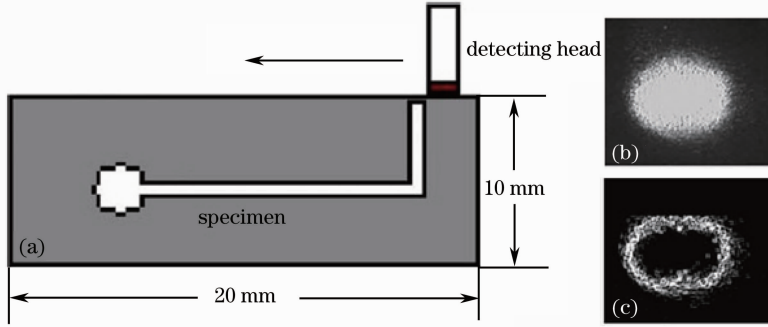


图 13 实验样本和结果。(a) 铝片;(b)磁光涡流成像结果;(c)优化图

Fig. 13 Experimental specimen and results. (a) Aluminum slice; (b) MOI image; (c) optimized image

首都师范大学 Pan 等<sup>[17]</sup>提出用多尺度小波与分水岭算法相结合来提高检测质量。首先获得磁光图像的小波系数并规则化处理,在每个频域寻求最大小波系数,然后根据线性滤波方程计算小波梯度值,并对小波梯度值做小波反变换,最后利用分水岭算法提取轮廓信息。图 14 为该方法对半导体缺陷的检测结果。该方法可增强图像对比度、局部细节并抑制噪声。

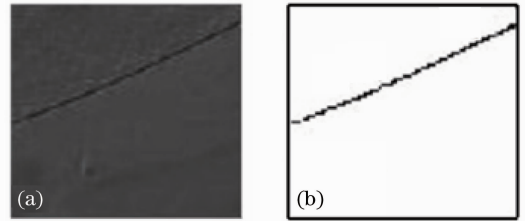


图 14 实验结果。(a) 半导体磁光成像;  
(b) 半导体磁光成像优化结果

Fig. 14 Experimental results. (a) Magneto-optic images of semiconductor defect; (b) improved MOI of wafer

## 5 结束语

红外热成像技术可大面积加热,检测速度快,效率高,装置简单,但是会受到被测物体与外界环境热交换的影响;磁光涡流成像技术检测结果直观易懂,检测效率高,但是相比较而言装置复杂而且更适用于易磁化材质缺陷的检测。上述激励检测法具有各自的优缺点和适用范围,需针对被测物体的物理特性选择合适的检测方法。

上述激励无损检测技术还存在的问题和发展趋势是:1) 分辨率影响因素分析,以及如何提高分辨能力;2) 自动化检测系统和便携式检测系统的研制;3) 缺陷的定量分析。

## 参 考 文 献

- 1 K. R. Fine, R. Garbe, T. Gip *et al.*. Non-destructive real-time direct measurement of subsurface damage[C]. *SPIE*, 2005, **5799**:133~145
- 2 Liu Jian, Ma Zhanlong, Wang Junlin. Research status of subsurface damage detection technology of optical elements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 081204
- 3 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
- 4 Y. Ahn, N. G. Cho, S. H. Lee *et al.*. Lateral crack in abrasive wears of brittle materials[J]. *JSME International Journal Series A*, 2003, **46**(2): 140~144
- 5 Y. Li, N. Zheng, H. Li *et al.*. Morphology and distribution of subsurface damage in optical fused silica parts: bound-abrasive grinding[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, **257**(6): 2066~2073
- 6 Y. Lee, J. Wang, Q. Xu *et al.*. Evaluating subsurface damage in optical glasses[J]. *J. European Optical Society-Rapid Publications*, 2011, **6**: 11001
- 7 J. W. Carr, E. Fearon, J. Haack *et al.*. Subsurface Structure in Polished Fused Silica and Diamond Turned Single Crystal Silicon[R]. UCRL-JC-134512, 1999. 87~96
- 8 N. Vardar, A. Ekerim. Failure analysis of gas turbine blades in a thermal power plant[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, **14**(4): 743~749
- 9 E. Silveira. Study on the root causes for the premature failure of an aircraft turbine blade[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2009, **16**(2): 639~647
- 10 E. Silveira, G. Atxaga, A. Irisarri. Failure analysis of two sets of aircraft blades[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2010, **17**(3): 641~647
- 11 X. Maldague, S. Marinetti. Pulse phase infrared thermograph[J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(5): 2694~2698

- 11 X. Maldague, F. Galmiche, A. Ziadi. Advances in pulsed phase thermograph[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, **43**(3): 175~181
- 12 Liu Junyan, Liu Xun, Wang Yang. Technology of linear frequency modulation infrared thermal-wave imaging for nondestructive testing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(6): 1416~1422  
刘俊岩, 刘 勋, 王 扬. 线性调频激励的红外热波成像检测技术[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(6): 1416~1422
- 13 G. Zauner, G. Mayr, G. Hendorfer. Wavelet-based subsurface defect characterization in pulsed phase thermography for non-destructive evaluation[C]. *SPIE*, 2009, **7248**: 72480D
- 14 G. L. Fitzpatrick, D. K. Thome, R. T. Skaugset *et al.*. Magneto-optic/eddy current imaging of aging aircraft: a new NDI technique[J]. *Materials Evaluation*, 1993, **51**(12): 1402~1407
- 15 S. Nath. Image processing for enhanced detectability of corrosion in aircraft structures using the magneto-optic imager[C]. *SPIE*, 1996, **35**: 231~237
- 16 Cheng Yuhua, Jiang Sunyan, Luo Gang. Visual detection of sub-surface defects using enhanced eddy current microscope [J]. *International J. Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2010, **29**(2): 347~354
- 17 Z. Pan, L. Chen, W. Li *et al.*. A novel defect inspection method for semiconductor wafer based on magneto-optic imaging [J]. *J. Low Temperature Physics*, 2012, doi: 10.1007/s10909-021-0671-y