

引用格式: LI Yong, LI Jianlang, LI Zhan, et al. Inspection and Repair of Optical Damage in Tradition and Deep Learning (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10):1012002

李勇, 李建郎, 李展, 等. 光学元件损伤的检测和修复: 传统与深度学习(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(10):1012002

光学元件损伤的检测和修复: 传统与深度学习(特邀)

李勇^{1,2}, 李建郎¹, 李展², 刘德安², 张大伟¹, 张军勇²

(1 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要: 光学元件的损伤在高功率激光系统的终端光学组件中较为普遍且对激光系统的正常运行有重大影响。为提高元件的使用寿命和保证激光光路正常运行, 首先要做的是检测和判断出损伤出现的位置、大小、类型。在线检测中终端光学损伤检测装置是一种重要的方法, 它能够直接、实时地对元件的损伤情况进行成像并分析, 另外还有一种间接获取损伤图像的方式, 即用衍射环检测损伤, 通过相关公式求出损伤点的大小和位置。针对更小的损伤的检测, 深度学习这一工具能够处理大量数据, 是目前研究该问题不可或缺的一类方法, 它能够减少人工, 并提高效率和准确率。修复损伤的主要方式是快速熔融缓解, 即二氧化碳激光熔融损伤区, 该方法是目前最常见、最有效的修复方式。对损伤问题处理的前提和关键在于精确定位更小的损伤点并分类不同类型的损伤, 以便确定后续修复步骤。损伤的检测和修复是光学循环回路策略的重要部分, 传统方法有一定的局限性。近些年, 受到深度学习在图像处理和目标识别领域的优势的影响, 未来会有越来越多深度学习的方法能够被用在与损伤检测相关的研究上。这对高功率激光系统长期稳定运行和正常发展有重要意义和作用。

关键词: 元件损伤; 在线检测; 高功率激光系统; 损伤修复; 深度学习

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225110.1012002

0 引言

惯性约束核聚变可满足人类对清洁、安全、取之不竭的能源的需求, 被认为是解决未来能源问题的有效途径之一。利用高功率激光器输出光束的聚焦能量对聚变材料点火是实现惯性约束核聚变的主要方式。目前很多国家都在积极开展和推动相关方面的研究, 如美国的国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)^[1], 法国的兆焦耳激光装置(Laser Mégajoule, LMJ)^[2], 以及中国的神光装置等^[3]。虽然每个国家所建立的高功率激光系统的形态、布局、结构略微不同, 但它们的基本原理, 最后想要达成的目标以及面临的科学问题是基本相同的。

高功率激光装置中集成了大量的大口径光学元件, 因为长时间受到激光照射, 在光学元件表面会发生损坏, 研究者把这种损坏叫做激光诱导损伤(Laser-induced Damage, LID), 简称损伤(damage)。虽然初始损伤的尺寸和生长速度较小, 但只要损伤一旦形成, 随着激光的持续照射, 接下来就会发生指数型增长(即损伤点尺寸和程度成爆炸式增长)。单个元件的损伤还可能引起下游元件的损伤, 甚至影响整个装置和实验的成败。这些大口径元件一般造价不菲, 为了提高使用寿命, 节约成本, 保证实验正常运行, 及时检测损伤并对相应的损伤点进行处理是很有必要的。准确分类出损伤点的类型可以为损伤的产生和增长的研究提供信息, 也进一步为整个光学元件回路回收利用提供基础和保障。

基金项目: 国家重点研究发展计划(No. 2020YFB2007504), 国家自然科学基金(Nos. 62175245, 61975217), 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(No. XDA25020104)

第一作者: 李勇(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学检测。Email: liyong@siom.ac.cn

共同第一作者(通讯作者): 李建郎(1970—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为新型激光器及其模式调控。Email: lijianlang@usst.edu.cn

通讯作者: 张军勇(1982—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光学检测和光学传感。Email: zhangjy829@siom.ac.cn

收稿日期: 2022-06-08; **录用日期:** 2022-08-23

<http://www.photon.ac.cn>

NIF是目前世界上最大、能量最高的高功率激光器系统,并且在此领域的大多数相关研究成果和报道都出自其所在实验室—美国利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL),所以本文主要以NIF作为主要案例,展开对光学元件损伤的快速、精确检测以及相应的完善修复等相关方面的论述。主要通过对比和总结传统方法和深度学习分别在损伤的检测和修复领域的相关成果,并最终归于光学循环回路策略的重要一环,突出了损伤检测和修复的重要性以及发展的需要。

1 大口径光学元件损伤

由于大口径光学元件制作难度大且不易拆卸,所以在损伤检测和修复中最值得重点关注。特别是位于靶室附近,在光路的末端存在最复杂的单元——终端光学组件(Final Optical Assembly, FOA)^[4],其在NIF中的结构如图1。FOA具备实现激光倍频和聚焦传输的功能,其中楔形焦点透镜(Wedged Focus Lens, WFL)的作用是将 1ω 和 2ω 的光束分散并远离靶室,光栅碎片屏障(Grating Debris Shields, GDS)的作用是保护上游元件^[5]。作为在整个光路中承受激光能量最高的部位,FOA中的损伤是不可避免的。总之,FOA的重要且独特的性能使研究者们特别重视并开展了大量研究。本文的重点亦是放在终端光学组件的损伤研究上。

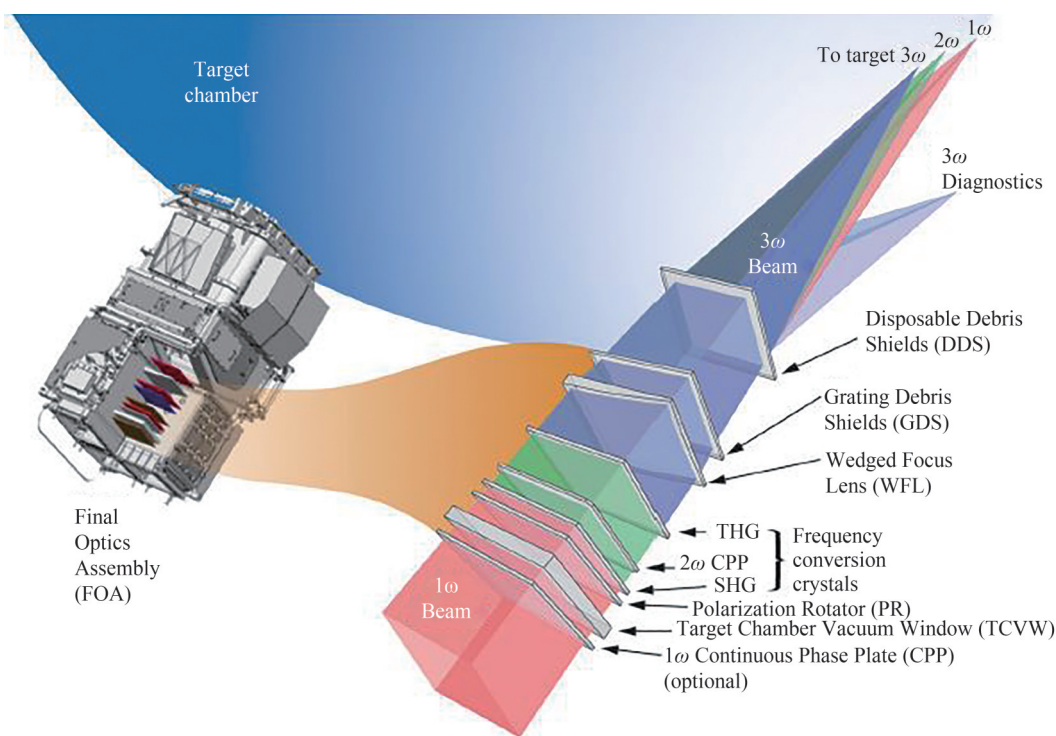


图1 FOA在NIF中的大致结构和位置^[5]

Fig. 1 The approximate structure and location of FOA in NIF^[5]

关于损伤形态的分类有不同的方案,但基本形态有点状、划痕、贝壳状、火山坑状等。其中点状又被称为灰榛子(gray hazelet),主要是抛光液残余物热沉积作用引起的形变造成的。划痕主要是外部作用力导致的^[6]。贝壳状又称蚌状(mussel)。火山坑又称紫罗兰状(pansy),这是元件在高通量激光照射下发生损伤的主要形态,也是损伤检测和修复关注的重点。这些不同损伤的具体形态样貌可以参考文献^[7],另外AMORIN C从形态方面将损伤更为细致地分为12类^[8],也包含了上述类型。图2展示了一些上述文献报道的损伤照片。由此可以看出不同类型的损伤在损伤形貌、尺寸大小上是不一样的,但从度量上来说一般都是微纳米级别。从激光入射方向不同可以分为入光面损伤和出光面损伤^[9]。出光面的损伤增长速度更快。损伤还可以分为真损伤和伪损伤^[10-11]。真损伤就是实际存在的损伤点,伪损伤包括各种噪声、其他杂散光的干扰、附着物等。真伪损伤给损伤的准确识别带来了挑战。另外,不同材质的元件损伤在修复方法上也有不同。

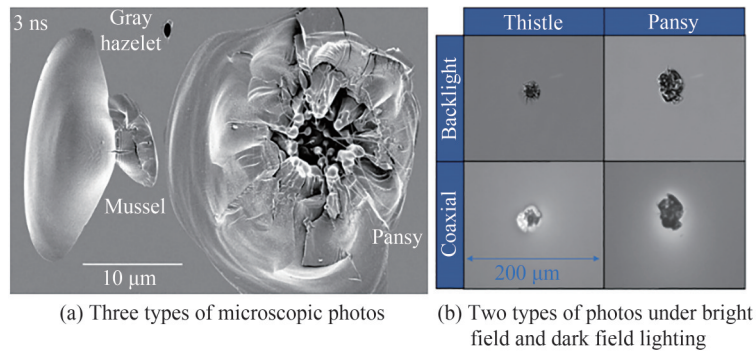


图2 不同类型的损伤照片^[7-8]
Fig. 2 Different types of damage photos^[7-8]

2 损伤的检测

2.1 传统的在线检测和离线检测

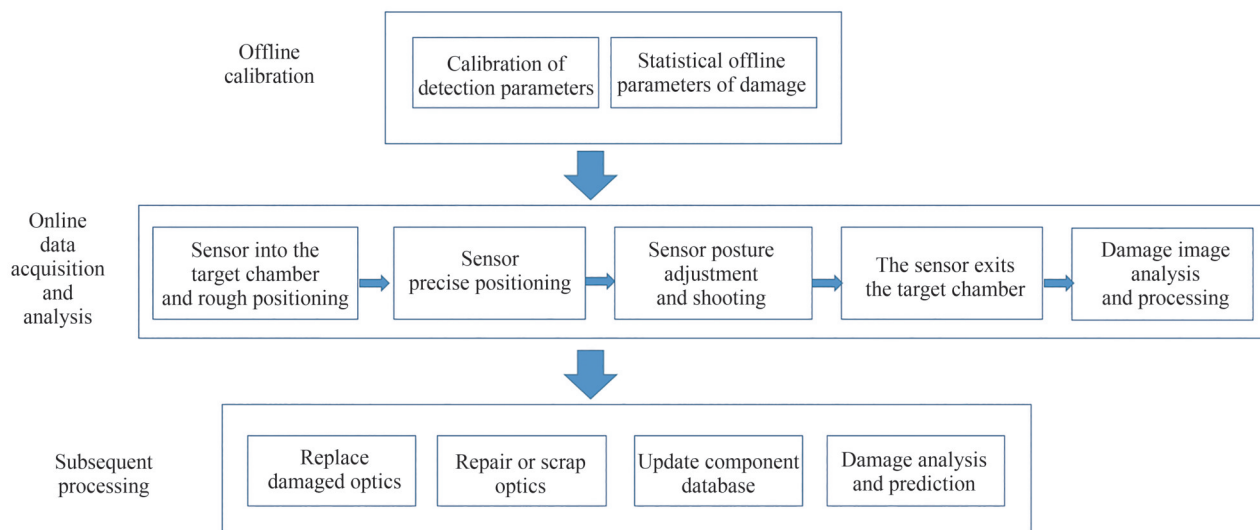
损伤的检测主要是判断损伤的有无、真假,检测并定位出大小和位置,以及对形态进行分类识别。光学元件损伤检测技术按照应用场景可分为离线检测与在线检测。离线检测需要将待检光学元件从实验装置上拆卸下来,放在特定的检测平台上进行检测,其优点为检测精度高,可以达到微米甚至亚微米的精度。但由于每次检测都需要拆卸被检元件,所以存在速度慢、效率低下等缺点。在线检测也称原位检测,可以不用拆卸被检元件,直接对光学元件进行现场检测,其优点是检测速度快、能实时监控元件的状态,缺点是检测精度一般低于离线检测。两种方式各有优缺点,在不同场合中需要使用不同的检测方式,在有些情况下还需要结合使用才能取得满意的结果。由于在线检测应用广泛、效果好,对技术要求高,所以研究重点和热点在实时在线检测上。

为了实时检测光学元件在激光器运行过程的状态,1998年NIF第一次开发了一种在线检测装置——终端光学损伤检测(Final Optical Damage Inspection, FODI)^[12],并于2007年对此在线检测装置进行了升级完善^[13]。FODI系统主要包括成像系统、姿态调整系统、控制系统和图像分析系统。精密成像系统安装在靶室中心的高灵敏度定位器上,可以瞄准每一束光以获得对应的损伤图像,图像均采用暗场成像技术加强损伤图像对比度,实现对光学元件损伤的探测。完善后在线检测装置的探测能力和精度进一步提高,可探测所有光学元件上尺寸大于50 μm的损伤,测定损伤尺寸误差小于15%,并能准确定位损伤在实际光学元件中所处的位置^[14]。

另外,照明技术是保证获取高信噪比损伤成像的关键技术之一,且对损伤进行成像的方式有明场成像与暗场成像之分。暗场成像是一种损伤区域在整个图像中以亮斑点的形式呈现在暗背景中的技术。FODI采用暗场分时独立侧照明技术,可以保证只有被检测的光学元件才使其打开侧方向照明,由此减少周围相邻元件的干扰,提高检测光学元件损伤的信噪比。在靶室的中心附近,使用六自由度机械臂(Six axis hexapod)能够让FODI中的望远系统瞄准任意一路的终端光学组件,调节望远镜的焦距可以进一步指向FOA中任意一块光学元件并获取图像,在2 h内就可以完成192路FOA中光学元件的图像收集。整个流程全部实现了自动化完成,包括图像的收集、损伤情况的分析与报表的产生^[14]。在线检测大致流程如图3^[15]。从图中可以看出流程基本分为三个部分:离线标定、在线获取数据、后续处理。其中在线获取数据也是所关心的内容。其主要说明了FODI中传感器的主要工作方案和流程。

我国也基于FODI的原理在中国工程物理研究院的带领下研制了类似的在线检测系统^[16-20],该系统根据FOA在靶室中的分布位置,设计了相应的对准及定位系统,实现了对大口径光学元件组的远距离、高精度、实时快速检测。法国LMJ针对大口径光学元件损伤检测提出光栅扫描的方法^[21],并开发了新的监控系统称为靶室中心诊断模块(Chamber Center Diagnostic Module, MDCC),其职能主要是检测终端光学元件中真空窗(vacuum window)的激光损伤^[22-24]。

最简单的离线检测是暗场环境强光掠射照明目视法。另外常用的离线方法还有线扫描相位差分成像(Linescan Phase Differential Imaging, LPDI),一种能够识别大孔径光学体或表面相位缺陷的大面积暗场成

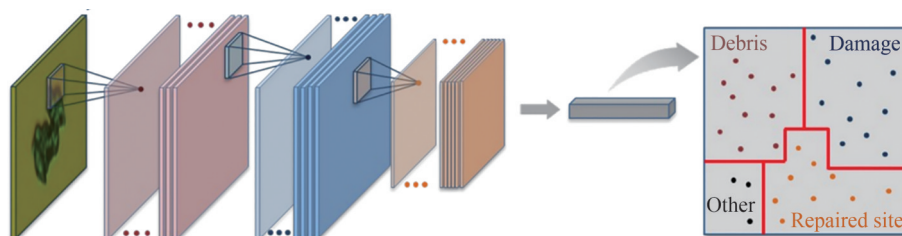
图3 在线检测流程^[15]Fig. 3 Online inspection process^[15]

像技术,该技术能够获得高对比度和高分辨率的激光损伤图像^[25-26]。

目前,由于在线检测能够实时、优秀检测损伤,因此损伤检测研究重点由离线检测转为在线检测。由于传统方法不仅耗费大量人力物力,准确度和精确度也有待提高,因此检测方法由传统方法更多的转向深度学习相关方法。

2.2 深度学习与损伤检测

近几年,随着机器学习和深度学习在图像处理、分类和识别上的优势被广泛关注^[27-30],这一技术被用来分析和处理激光损伤检测中出现的大量图片数据。深度学习同样适用于在线检测和离线检测,只要需要分析处理大量图片的地方就需要深度学习。2008年LLNL的科学家CARR A等首次将机器学习技术应用于入光面与出光面的损伤分类^[9]。2010年LLNL科学家ABDULLA G M等将机器学习中集成的决策树再次应用到伪损伤的识别中^[10]。2018年MILLER C F等用卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)和决策树(Ensemble of Decision Trees, EDT)结合识别并分类小损伤点的特征^[31]。图4为其网络结构。具体来说,这种方法能够识别并收集所有可能产生损伤的区域(候选区),并能识别最小为20 μm直径的损伤并分类(是否有粒子附着或者之前已修复过的位置)。深度学习的重要优势是自动发现图像属性,有助于后续区分不同的图像。这种混合深度学习技术是利用卷积神经网络来提取基本属性,利用决策树来进行分类,以确定光学元件上需要修复的特征。这为后续的修复工作提供了很多便利,也提高了回收元件的寿命。同样,AMORIN C等在2019年用混合深度学习来分类残余损伤和12类损伤形态^[8]。与上述相似,其中CNN能自动发现和提取这12类特征,然后EDT成为最终的决策层,降低了误差,提高决策的准确度。这种新的混合深度学习的结构能够明显提高测量精度和准确度,也是很多相关研究选择的方法,卷积神经网络也被普遍应用于光学元件损伤的检测中^[32]。在深度学习中,基于U型卷积网络(convolutional networks with U-shaped architecture, U-net)图像分割的表面缺陷检测检测模型可以在小样本上进行端到端训练,而不需

图4 CNN和EDT结合的网络结构^[31]Fig.4 Deep learning network structure combining CNN and EDT^[31]

要人工标记或人工提取特征^[33]。另外还有将机器学习算法支持向量机用于在线检测^[34],使用机器学习其他算法进行图像拼接来筛选伪损伤^[15]。图像处理的相关算法也被应用在损伤点形貌二维和三维重建上^[35-36],其中基于高斯滤波的全局阈值分割算法采用最小外接矩形法表示损伤的面积大小和位置坐标信息,可辅助制定激光元件的缓解(修复)方案^[35]。三维定位(损伤点在三维空间的位置)也是目前的研究难点和需要突破的地方,当然也包括对损伤部位自身深度的测量^[37]。综上可知,目前损伤检测在借助图像处理相关算法和更深一步深度学习的算法。其目的是追求更高的检测精度和对损伤点进行判断时的准确度。这是发展的趋势,值得重点关注。

2.3 传统衍射环检测并定位损伤

热像是一种特殊的自聚焦效应,是由上游光学元件的损伤点所引起的光束扰动,它会对主光束进行调制并破坏后续光路中的光学元件^[38]。上游损伤点是激光传输过程中热像的诱发因素,获取损伤点的特点即可计算出热像的位置及峰值光强。当明场照明时上游光学元件的损伤点会在下游光路中引起特定的衍射环图像。这在高功率激光器的FOA中也很常见。通过2.1节可知,FODI是用直接获取损伤图像来进行检测的,而此处衍射环则是一种“间接”的方式来检测上游元件上的损伤^[39-42]。这种间接的方法也是检测损伤的重要途径。

衍射环图案出现是激光入射的平面波和缺陷点产生的球面波之间的干涉的结果。距离环形图案中心 r 距离的图像像素的环强度 $I(r, R, z)$ 是缺陷的半径 R 和缺陷与下游光学之间的距离 Z 的函数,可表示为

$$I(r, R, z) = \frac{r^2 + R \cdot J_1\left(1, \frac{2\pi r R}{\lambda \cdot z}\right) \left[R \cdot J_1\left(1, \frac{2\pi r R}{\lambda \cdot z}\right) \right] - 2r \cdot \sin\left(\frac{\pi r^2}{\lambda \cdot z}\right)}{r^2} \quad (1)$$

式中, $J_1(x)$ 是第一类贝塞尔函数, λ 是照明光的波长。缺陷半径 R 越大,产生的环的强度幅值越高,距离 Z 越大,环的半径越大^[38]。所以,通过检测距衍射环图案的中心 r 处的强度 I 可以反演出上游元件损伤的尺寸大小和位置(损伤点到衍射环的距离),这就是衍射环检测热像的主要原理。图5直观地展示了这个原理。2005年LLNL实验室首次提出了这种根据下游光学元件图像中的衍射环来推断上游光学元件损伤情况的新方法^[38]。该方法首先在损伤图像中检测衍射环,原理就是通过式(1)计算上游损伤点的尺寸 R 。

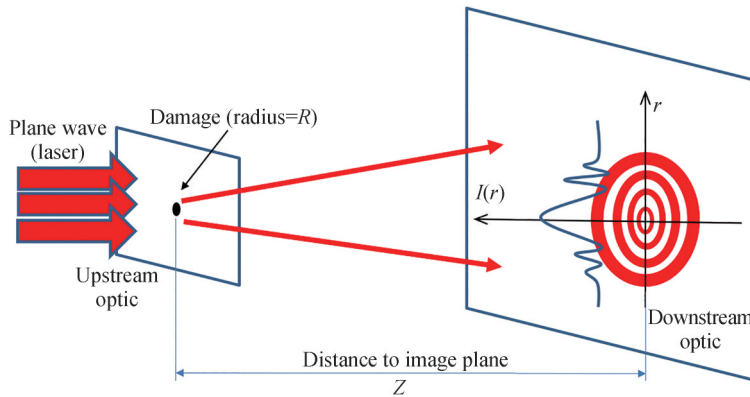


图5 衍射环检测热像损伤原理示意^[38]

Fig. 5 Schematic of diffraction ring detecting hot image damage^[38]

2.4 深度学习与衍射环

传统衍射环检测方式是使用梯度相位匹配(Gradient Direction Matching, GDM)来检测,通过使用衍射环的梯度相位与圆模板的梯度相位进行匹配获得匹配度最高的点。此外,基于GDM的衍射环检测方法需要选择不同的模板来检测不同尺寸的衍射环,在需要单次曝光实时处理的在线监测环境中是不可接受的^[39]。所以,2020年上海光机所李展等针对不需要模板匹配提出适用于衍射环检测的神经网络 Diffraction-Net,实现对重叠率大于61%的衍射环识别并且能够检测到最小的损伤尺寸为 $8 \mu\text{m}$,这是利用深度学习对损伤点进行三维定位的最新进展之一^[43]。这里提到的三维定位包括横向定位与轴向定位,横向定位涉及的是尺寸和横向坐标位置,轴向定位是指损伤点位于光路中的轴向位置。网络结构如图6,图中分类框是判断该区域是否有衍射环,回归框是对衍射环边框进行回归划分。这种方法能检测尺寸差异大或重叠率高的多

个衍射环,也说明深度学习与衍射环检测损伤结合对三维定位有很好的效果。图7展示了其部分实验结果,(a)~(f)表示不同衍射环间距的横向定位检测结果,黄框表示深度学习识别圆的置信概率。

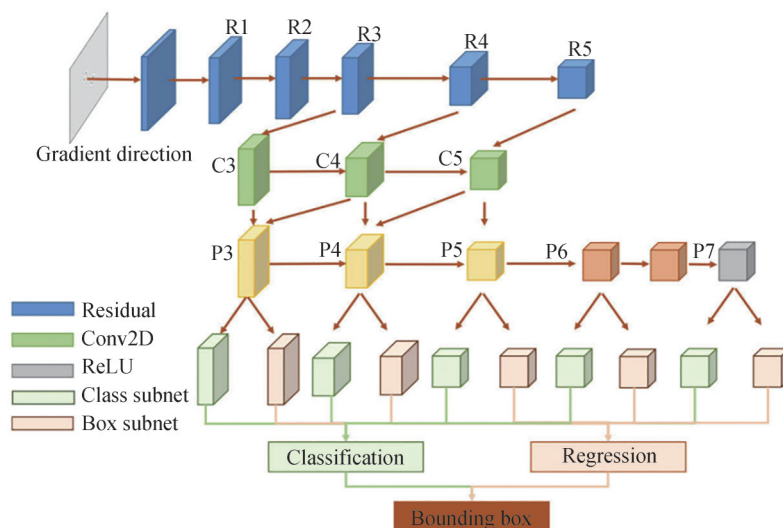


图6 深度学习检测衍射环网络结构

Fig. 6 Deep learning network structure to detect the diffraction ring

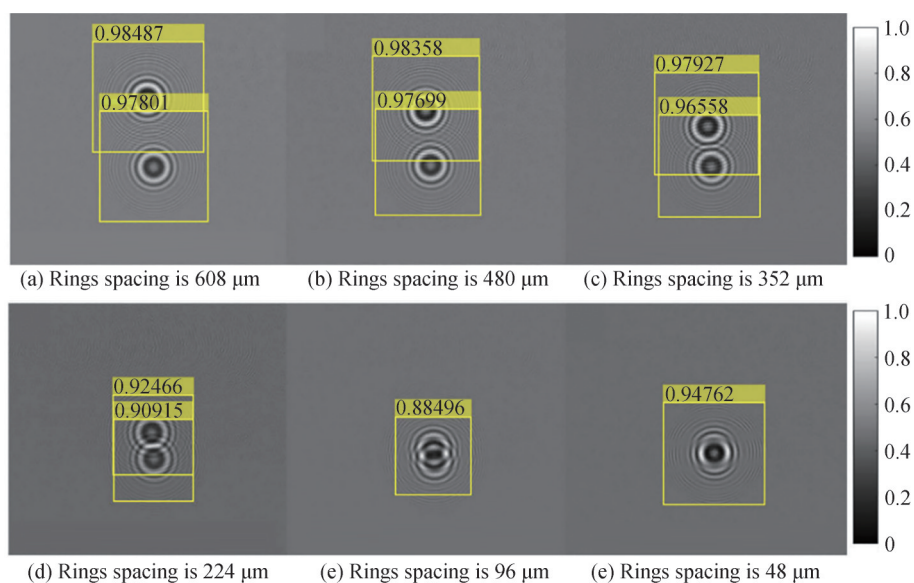


图7 李展等的部分实验结果^[43]

Fig. 7 Partial experimental results of LI Zhan et al^[43]

之前的损伤检测工作能对损伤的三维空间位置进行定位,进一步根据前面的定位信息开发了损伤重建模型(如图8)。模型受到PhysenNet^[44]启发,使用物理模型拟合的方式,对衍射场的信息进行逆衍射运算,获得损伤平面的复振幅分布。模型的输入图像是由DiffractionNet^[43]计算获得的Bounding Box限制后的衍射环图像,经过一个深度为3的U-net对计算出逆衍射后的损伤平面的场分布 E_r 。在网络误差计算方面,通过计算 E_r 经过 z 距离后衍射的场 E_g 的强度于输入损伤强度的均方误差(Mean Squared Error, MSE),对误差进行反向传播训练网络,其中 $E_g = E_r \times H(z)$, $H(z)$ 是距离 z 的非涅尔衍射传输矩阵, z 由文献[43]中的holographic focusing方法获得。在每一个 z 的距离上每次训练只需要一个数据对就可以完成训练,极大减少了神经网络训练的难度。

图9为基于图8得到的训练结果。模型使用60 mm的衍射和120 mm的衍射图像进行训练,然后随机生成两个损伤点,在60 mm和120 mm处计算出其衍射强度分布。将强度分布作为网络输入分别对其求出逆

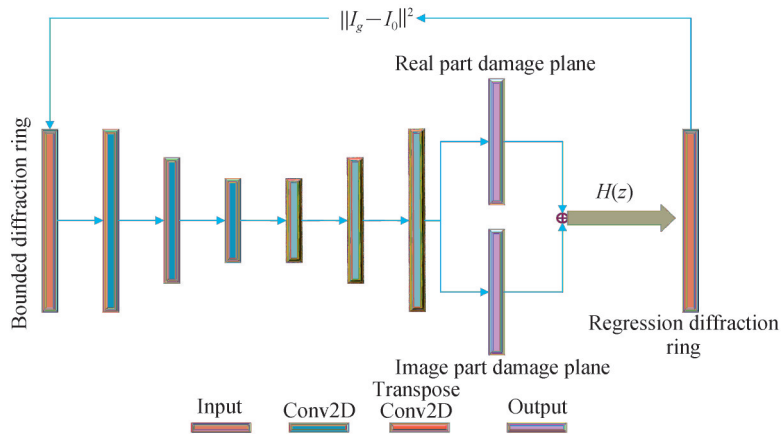


图8 深度学习与损伤重建模型原理

Fig. 8 Schematic of deep learning and damage reconstruction model

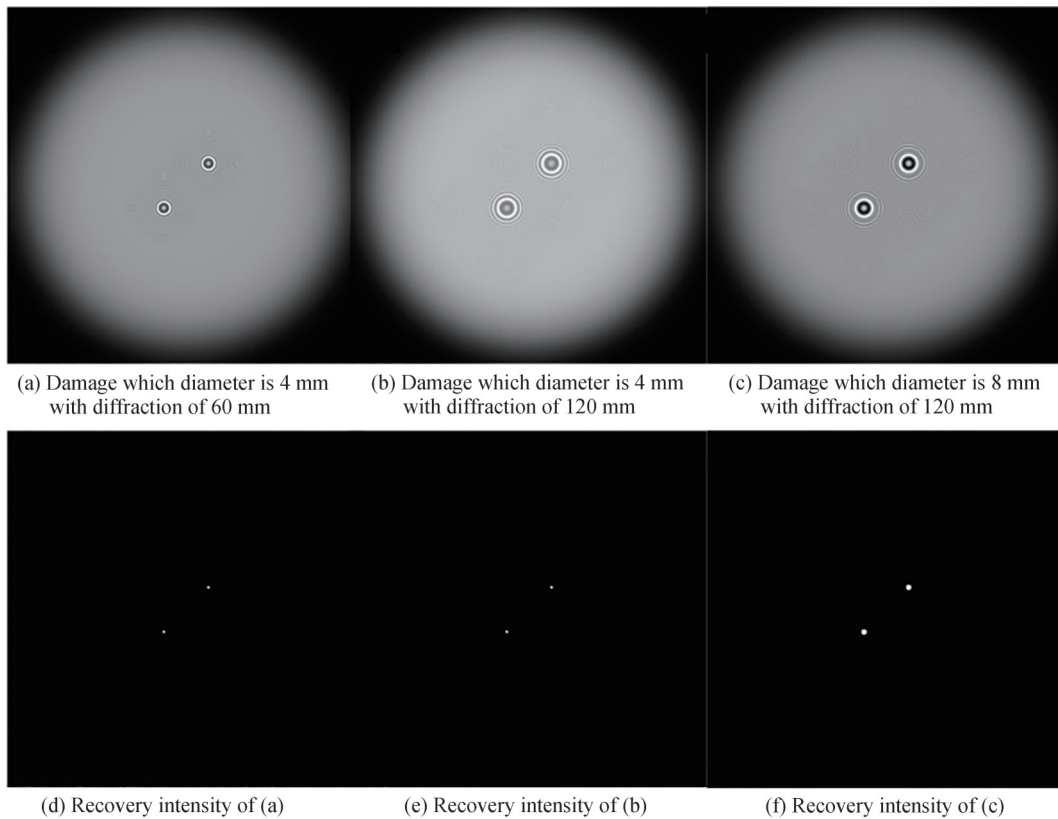


图9 模拟训练结果,不同直径损伤衍射图和复原强度

Fig. 9 Simulation training results, diffraction pattern and recovery intensity of damage with different diameter and diffraction distance

衍射,从结果可以看出,模型可以完整地获得真实的损伤分布,损伤半径误差小于 $10 \mu\text{m}$ 。结果说明了深度学习的优越性和今后发展的可能。

上面所述的损伤检测局限于光学元件的表面或者亚表面,其原因在于成像技术和数据处理相关技术的限制。而传统的三维损伤检测对较大深度处的损伤检测和重构仍存在较大的技术难度,这是目前需要克服的难点之一。然而,深度学习给检测乃至三维检测带来了技术上的改变和提升,这也是一个重要的发展方向。

3 损伤修复的方法和过程

既然高功率激光系统中光学元件的损伤不可避免,当损伤发生且被识别和检测到后,对损伤进行修复

以便能重复使用并节约成本则变得很有必要。目前的损伤修复方法主要基于用特定技术手段挖或削去损伤点在元件表面形成不规则的损坏的原理,主要包括微火焰加工、等离子体刻蚀、氢氟酸刻蚀^[45]、CO₂激光熔融^[46-53]、微机械移除^[54]等修复方式。微火焰加工和等离子体刻蚀需要在处理过程中通入四氟化碳气体,这会造成元件的污染。氢氟酸刻蚀可对缺陷内部结构进行钝化,从一定程度上抑制损伤增长。微机械修复是用机械锉削的方法削掉损伤区域,但这种方法会造成碎片溅射,形成二次损伤。在这些方法中,利用高功率CO₂激光束辐照熔融损伤区域以减缓或消除损伤点的方法,是当前抑制熔石英表面损伤点增长最有效、成熟的一种手段,也是报道最多的方法。

3.1 CO₂激光束熔融修复激光损伤

利用CO₂激光束熔融是目前常见的修复损伤的方法,其原理为聚焦的激光对损伤点及附近区域进行照射,使其在短时间内被气化蒸发或熔融,将此损伤点从不平整,不规则的形状恢复到光滑状态,从而达到改善元件的透过率。如图10所示,利用高功率CO₂激光束连续或脉冲辐照熔融损伤区域,将元件上的损伤区域烧熔成一个锥,达到缓解或去除损伤的效果。这种方法被称为快速熔融缓解(Rapid Ablation Mitigation, RAM)^[55]。由于这种缓解是将损伤点熔覆成一个相对平滑的锥体区域,这种平滑后的锥体可以减缓或抵抗激光损伤的进一步增长。当光学元件得到这种缓解处理后,可以重新安装并应用于实验系统。

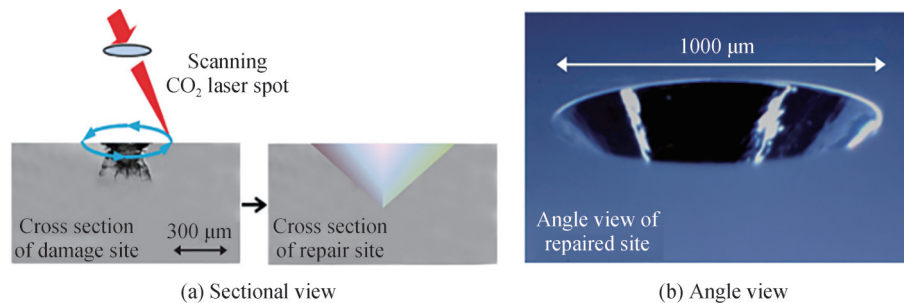


图10 修复前后对比^[55]

Fig.10 Comparison before and after repair^[55]

根据CO₂激光修复机理,可以分为蒸发式修复和非蒸发式修复^[46];按照激光波长,可以分为利用CO₂激光的4.6 μm波长的红外输出^[47-48]或10.6 μm波长的远红外输出^[49]来修复;按照激光光斑尺寸,可以分为小光斑修复^[47]、大光斑修复和可变光斑修复^[50];按照激光器的工作模式,可以分为连续式修复^[51]和脉冲式修复^[52-53];按照修复区域可以分为单点修复、区域修复^[50]及全口径扫描修复^[48]。要根据具体情况来选用不同的方法。一般来说,蒸发式会气化产生碎片沉积,非蒸发式能修复的深度较小;中红外波长的激光可以损伤较深的损伤点,也能避免气化,但这类激光器不常见;小光斑和大光斑没有明确界限,通常大光斑能修复区域的尺寸和深度都较大;脉冲激光可以调节频率,其峰值功率更高,有很大的优势,修复后的形貌更平滑;单点修复是针对单个损伤点,区域修复是在一定范围内有多个损伤点。针对不同尺寸的损伤点,也有不同的技术协议(protocol)来对应解决^[56],具体见表1。从表中可以看出,协议名称中涉及到该协议(方案)修复的直径大小。另外通过分析表中入光面或出光面的数据,可以得出尺寸越大,CO₂激光修复修复时间越长。

表1 不同的修复协议^[56]

Table 1 Different repair protocols^[56]

Protocol name	Protocol diameter/μm	Maximum damage site size/μm	Optic surface	Time to repair/s
RAM360	360	180	Input	51
RAM520	520	150	Exit	15
RAM600	600	320	Input	22
RAM1260	1 260	300	Exit	78
RAM2000	2 000	800	Exit	300

3.2 预修复检测和质量检测

在对某一个损伤点进行修复前,需要对它进行预修复检测,即检测周围有没有之前修复过的地方(旧的

锥)、附近有没有损伤、最近的损伤点的距离。以及有没有损伤点有重叠的部分或者相隔很近,在修复的时候就可以用一个锥来同时修复多个损伤点。这些判断目前都是借助深度学习的方法。检测完后就可以给它分配一个适合的修复方案(protocol)。而修复后要对它(新的锥)进行质量检测,即是否符合要求、有没有残余损伤。这也是修复的最终检查环节。利用深度学习进行分类时可能会有假阴性结果(识锥体没有损伤,而实际存在损伤)和假阳性结果(在没有残余损伤的地方识别出残余损伤),所以,LLNL实验室的研究人员提出用深度学习中的迁移学习来训练识别残余损伤的网络,用反向传播来验证网络学习正确的特征(是否有残余损伤)^[56-57]。总之,预修复检测和修复检测目前基本可以通过机器学习或深度学习的方法来实现自动化从而减少人力的需求,对比传统的方式,深度学习的优势早已凸显出来了。

4 光学循环回路策略

综合上述损伤的检测和修复,LLNL实验室提出了光学循环回路策略(Optics Recycle Loop Strategy, ORLS),其流程如图11。在此策略中,首先近乎完美的光学元件出厂后被安装在光路中就开始了实时在线检测,其次通过图中箭头顺序依次判断损伤情况从而进到不同的回路中。最后,不同回路的处理结果有所不同,但目的都是为了使元件能够循环使用(其中菱形是与损伤有关的判断点)^[58]。光学循环策略的重点在于在损伤发生时能够及时发现,一旦被检测到后会根据损伤情况进行快速判断是否修复或更换。及时检测损伤并提高检测精确度和准确修复损伤对高功率激光装置的正常运行有重要的意义。值得注意的是2019年哈尔滨工业大学魏富鹏等针对光学循环回路策略中的损伤点的检测判断,开展基于机器学习的光学元件损伤高精度、快速检测技术相关研究,克服了大视场范围内微小损伤高信噪比成像技术难点^[59]。此后,越来越多相关人员开始关注到光学循环回路策略这一具有重要意义的工具,并且将人工智能领域中的机器学习和深度学习相关技术与之结合起来,使这一领域有了新的突破和方向,为后续研究提供了保障和助力。

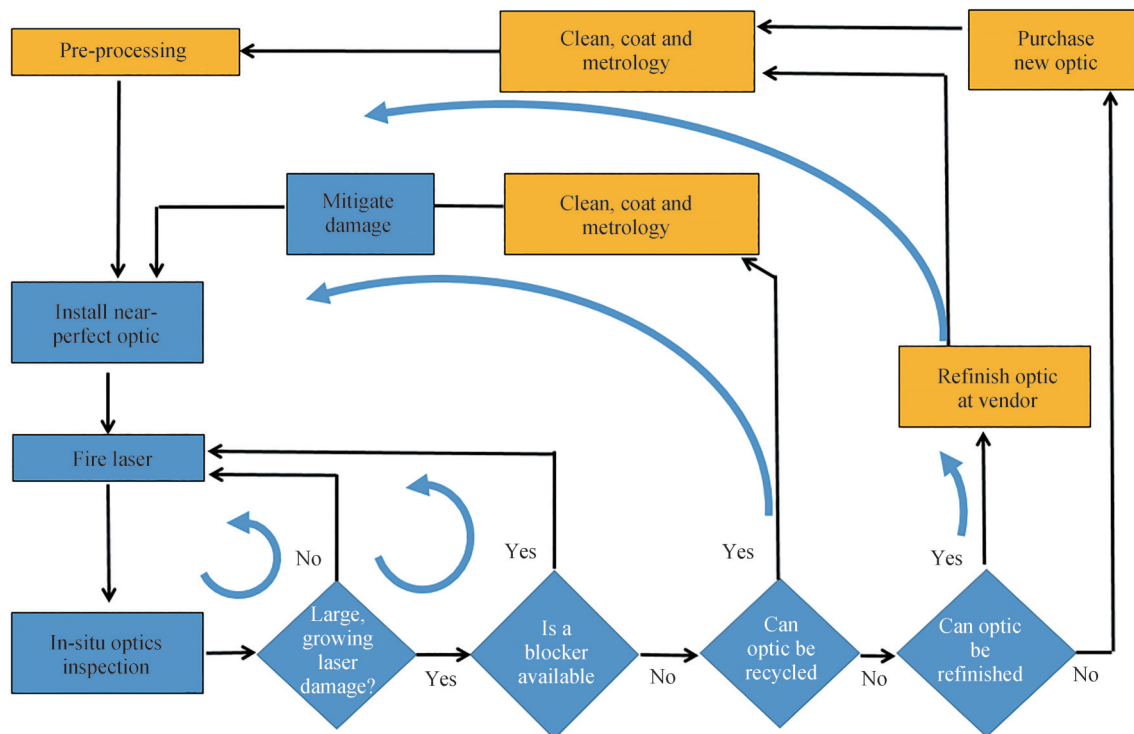


图11 光学循环回路策略^[42]

Fig. 11 Optics recycle loop strategy^[42]

根据图11可知,按照损伤程度的不同可以选择三种对应的解决方案:1) 使用阻挡器阻挡原有的损伤部位;2) 修复被检测出存在损伤的光学元件;3) 供应商返修。三种方案大致原理是:首先判断能否在光路中加入阻挡器(Blocker),其作用是在损伤部位对应的光束部位前方产生屏障,使得激光不会再次照射到这个

损伤点。当阻挡器的总遮光面积超过允许的最大值时,就不能使用阻挡,而需要将光学元件拆卸下来^[60]。拆下后,相关离线装置会对其进行缓解(Mitigation)修复,也就是采用CO₂激光对损伤部位进行熔融处理(图11的中间环路,蓝色箭头表示环路)。如果该损伤点的面积大到不能进行熔融修复的程度,这时应返给供应商,供应商抛光去除有损伤的表面,得到比之前更薄的元件,然后进行质量检测就可以安装在激光光路上其他需要的位置,达到循环使用的目的。如果光学元件已经太薄不能继续抛光,则只能报废(图11的最外环路),最后用新的完美的光学元件替换^[58,60]。在线检测方面,FODI中的光学元件检查软件可以持续跟踪损伤增长部位的尺寸。最内回路可以持续运行,直到任何被检查区域的大小达到需要采取行动以防止该区域增长到不可修复的大小(大于300 mm)为止。持续分析损坏部位的数据,以确定何时应封锁或阻挡该部位,何时应移除光学元件。通过损伤增长模型可以预测未来激光照射可能导致哪些损伤点面积的增加。

由此可以看出,光学循环回路策略的基本要素有:使用能够抗损伤的光学元件;识别已损坏的光学元件上损伤点的位置和大小;阻挡入射光到光学元件的损坏区域;用替换光学元件快速更换损坏的光学元件;修复或抛光损坏的光学元件。总之,在此策略中,关键判断点是损伤点的损伤情况,关键的处理损伤操作是阻挡或修复。这也是本文讨论的重点和今后研究的趋势。高功率激光系统中大口径元件的损伤不可避免^[61],相关科研人员唯有在预防、实时监控(在线检测)、及时有针对性的修复和回收利用等方面不断努力。

5 结论

高功率激光器中的元件损伤较为常见且不可避免,尤其在终端光学组件中。这些元件造价昂贵、用途重要。所以,提高元件的使用寿命,达到循环使用的意义重大。光学循环回路策略由此而生,该策略的重点是尽可能及时修复小的损伤,避免损伤增长。而修复损伤的前提和关键是准确检测到这些小的损伤。FODI是目前比较常见的在线检测装置,而结合衍射环等能够比较精确检测并计算出微小损伤点的尺寸和位置,从而实现定位,为后面修复提供基础。随着深度学习中的图像识别和分类技术被广泛应用,在检测损伤得到相关图像的后续处理中,深度学习能够帮助提高效率,同时结合不同算法和模型来实现很好的识别、分类、检测,这些已然成为目前研究的热点和趋势。结合深度学习,可以实现对激光驱动器损伤识别修复流程的自动化处理,极大减少了处理光学元件所需的操作时间。总之,光学元件损伤检测和修复已经向着在线检测提高分辨率、深度学习帮助提高分类准确度和精确三维定位方向发展。

参考文献

- [1] SPAETH M L, MANES K R, BOWERS M, et al. National ignition facility laser system performance[J]. *Fusion Science & Technology*, 2016, 69(1):366-394.
- [2] MIQUEL J L, LION C, VIVINI P. The LMJ program: overview and status of LMJ & PETAL projects[C]. *CLEO*: 2013.
- [3] ZHU Q, ZHENG W, WEI X, et al. Research and construction progress of the SGIII laser facility[C]. *SPIE*, 2013.
- [4] SPAETH M L, MANES K R, KALANTAR D H, et al. Description of the NIF laser[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
- [5] BAISDEN P A, ATHERTON L J, HAWLEY R A, et al. Large optics for the national ignition facility[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 295-351.
- [6] YU Jingxia. Thermodynamic and kinetic simulation on fused silica materials irradiated by CO₂ laser[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
于景侠. CO₂激光辐照熔石英材料的热力学和动力学模拟[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- [7] CARR C W, MATTHEWS M J, BUDE J D, et al. The effect of laser pulse duration on laser-induced damage in KDP and SiO₂[C]. *Laser-induced Damage in Optical Materials*, International Society for Optics and Photonics, 2006.
- [8] AMORIN C, KEGELMEYER L M, KEGELMEYER W P. A hybrid deep learning architecture for classification of microscopic damage on National Ignition Facility laser optics[J]. *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal*, 2019, 12(6): 505-513.
- [9] CARR A, KEGELMEYER L, LIAO Z M, et al. Defect classification using machine learning[C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2008.
- [10] ABDULLA G M, KEGELMEYER L M, LIAO Z M, et al. Effective and efficient optics inspection approach using machine learning algorithms[C]. *SPIE*, 2010.
- [11] WEI F, CHEN F, LIU B, et al. Automatic classification of true and false laser induced damage in large aperture optics[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(5):11.

- [12] THOMPSON C E, KNOPP C F, DECKER D E. Optics damage inspection for the NIF[C]. SPIE, 1999.
- [13] CONDER A, CHANG J, KEGELMEYER L, et al. Final Optics Damage Inspection (FODI) for the national ignition facility[C]. SPIE, 2010.
- [14] KEGELMEYER L M, CLARK R, JR R L, et al. Automated optics inspection analysis for NIF[J]. Fusion Engineering & Design, 2012, 87(12):2120-2124.
- [15] FENG Bo. Research on final optics damage online inspection technologies for ICF system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
冯博. 惯性约束聚变终端光学元件损伤在线检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [16] PENG Zhitao. Research on laser damage on-line detection technology for optical components of high-intensity laser complex optical components[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2011.
彭志涛. 强激光复杂光机组件光学元件激光损伤在线检测技术研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2011.
- [17] FENG Bo, LIU Bingguo, CHEN Fengdong, et al. Final optics damage online inspection system for ICF[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013(9):2519-2524.
冯博, 刘炳国, 陈凤东, 等. ICF终端光学元件损伤在线检测装置的研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9):2519-2524.
- [18] SHI Yali, TAO Xian, ZHOU Xinda, et al. An online laser-induced flaw inspection device for optical elements[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4):30-36.
史亚莉, 陶显, 周信达, 等. 光学元件激光损伤在线检测装置[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4):30-36.
- [19] PENG Zhitao, WEI Xiaofeng, YUAN Haoyu, et al. Signal noise ratio of total internal reflection edge illumination for optics damage inspection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6):1111-1114.
彭志涛, 魏晓峰, 元浩宇, 等. 全内反射照明光学元件损伤检测信噪比分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6):1111-1114.
- [20] XU Longbo, PENG Zhitao, SUN Zhihong, et al. Damage online inspection technology of driver terminal optical elements [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4):721-724.
徐隆波, 彭志涛, 孙志红, 等. 驱动器终端光学组件损伤在线检测技术 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4):721-724.
- [21] BOUILLET S, AMEIL C, BEAU V, et al. Large optics metrology for high-power lasers[J]. Journal of the Optical Society of America A, 36(11):C95-C103.
- [22] NICOLAIZEAU M G, MIQUEL J L. LMJ status: Fifth bundle commissioning and PW class laser coupling[C]. High Power Lasers for Fusion Research V, 2019.
- [23] GUILLAUME H, CHLOÉ L, JÉRÔME N, et al. Detection and tracking of laser damage sites on fused silica components by digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 146:106674.
- [24] CHLOÉ L, SÉBASTIEN V, GUILLAUME H, et al. Dealing with LMJ final optics damage: post-processing and models[C]. SPIE, 2020.
- [25] FRANK L R, MICHAEL C N, LAURA M K, et al. Process for rapid detection of fratricidal defects on optics using linescan phase-differential imaging[C]. SPIE, 2009.
- [26] FAN Xingnuo, JANG Youen, LI Xuechun. Technology for rapid detection of laser-induced damage on optical components using line-scan phase differential imaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9):196-200.
范星诺, 姜有恩, 李学春. 基于线扫描相位差分成像的光学元件激光损伤快速检测技术[J]. 中国激光, 2013, 40(9):196-200.
- [27] ALEX K, ILYA S, GEOFFREY E H. ImageNet classification with deep convolutional neural networks [J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6):84-90.
- [28] ZHAO Z, ZHENG P, XU S, et al. Object detection with deep learning: a review [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 1807:05511.
- [29] GALVIN T C, HERRIOT S I, NG B, et al. Active learning with deep bayesian neural network for laser control [C]. SPIE, 2018.
- [30] WILLIAM L, JAMES H, ROBERT H, et al. Using convolutional neural networks to classify static X-ray imager diagnostic data at the National Ignition Facility[C]. SPIE, 2019.
- [31] MILLER C F, KEGELMEYER L, NOSTRAND M C, et al. Characterization and repair of small damage sites and their impact on the lifetime of fused silica optics on the National Ignition Facility [C]. Laser-Induced Damage in Optical Materials 2018, 2018.
- [32] ZHAO Bo, SHI Yingxing. Detection of surface defects of high precision optical components based on convolution neural network[J]. Laser Journal, 2021, 42(11):185-189.
赵博, 史迎馨. 卷积神经网络的高精密光学元件表面缺陷检测[J]. 激光杂志, 2021, 42(11):185-189.
- [33] CHU X, ZHANG H, TIAN Z, et al. Detection of laser-induced optical defects based on image segmentation[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7:e66.
- [34] LU Li, DONG Liu, PIN Cao, et al. Automated discrimination between digs and dust particles on optical surfaces with

- dark-field scattering microscopy[J]. *Applied Optics*, 2014, 53:5131-5140.
- [35] ZHAO L J, CHENG J, CHEN M J, et al. Development of integrated multi-station system to precisely detect and mitigate surface damage on fused silica optics[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, 22: 95-105.
- [36] ZHANG Jianpu, SUN Huanyu, WANG Shiling, et al. Three-dimensional reconstruction technology of subsurface defects in fused silica optical components[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0216001.
张健浦, 孙焕宇, 王狮凌, 等. 熔融石英光学元件亚表面缺陷三维重构技术[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0216001.
- [37] QIU Xiaotian, TIAN Ailing, WANG Dasen, et al. Fluorescence microscopic stereo imaging method to measure the depth of subsurface damage of optical components[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11):1112005.
邱啸天, 田爱玲, 王大森, 等. 荧光显微立体成像测量光学元件亚表面损伤深度[J]. *光子学报*, 2021, 50(11):1112005.
- [38] CHEN B Y, KEGELMEYER L M, LIEBMAN J A, et al. Detection of laser optic defects using gradient direction matching[C]. SPIE, 2005.
- [39] YANG A, LI Z, LIU D, et al. Direct pre-judgement of hot images with detected diffraction rings in high power laser system[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6:e52.
- [40] JIAO Z, ZHANG Y, SUN M, et al. Analysis of hot images in final optics assembly[C]. *Pacific Rim Laser Damage: Optical Materials for High Power Lasers*, 2017.
- [41] JIAO Z, SUN M, ZHU J. Online detection of hot image in the large aperture near field of the final optics assembly[C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2018.
- [42] YANG A, LIU D, GAO Y, et al. Pre-judgement of hot-images' damage based on gradient direction matching method in high power laser system[C]. *Optical Materials for High Power Lasers*, 2017.
- [43] LI Z, HAN L, OUYANG X, et al. Three-dimensional laser damage positioning by a deep-learning method[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7):10165-10178.
- [44] WANG F, BIAN Y, WANG H, et al. Phase imaging with an untrained neural network [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9:77.
- [45] CHENG Jian, WANG Jinghe, ZHANG Peiyue, et al. Experimental study on HF etching of fused silica[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(11):4-10.
程健, 王景贺, 张培月, 等. 熔石英元件 HF 刻蚀的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29(11):4-10.
- [46] ADAMS J J, BOLOURCHI M, BUDE J D, et al. Results of applying a non-evaporative mitigation technique to laser-initiated surface damage on fused-silica[J]. SPIE, 2010.
- [47] YANG S, MATTHEWS M, ELHADJ S, et al. Comparison of laser-based mitigation of fused silica surface damage using mid-versus far-infrared lasers[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(14):2606-2616.
- [48] GUSS G, BASS I, DRAGGOO V, et al. Mitigation of growth of laser initiated surface damage in fused silica using a 4.6-micron wavelength laser[C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2006.
- [49] PRASAD R R, BRUERE J R, PETERSON J, et al. Enhanced performance of large 3ω optics using UV and IR lasers [C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2004.
- [50] MENDEZ E, NOWAK K, BAKER H, et al. Localized CO₂ laser damage repair of fused silica optics[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(21):5358-536.
- [51] DURING A, BOUCHUT P, COUTARD J G, et al. Mitigation of laser damage on fused silica surfaces with a variable profile CO₂ laser beam[C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2006.
- [52] BASS I L, GUSS G M, NOSTRAND M J, et al. An improved method of mitigating laser-induced surface damage growth in fused silica using a rastered pulsed CO₂ laser[C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2010.
- [53] STOLZ C J. The national ignition facility: the path to a carbon-free energy future[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, 370:4115-4129.
- [54] GERAGHTY P, CARR W, DRAGGOO V, et al. Surface damage growth mitigation on KDP/DKDP optics using single-crystal diamond micro-machining ball end mill contouring[C]. SPIE, 2007.
- [55] FOLTA J, NOSTRAND M, HONIG J, et al. Mitigation of laser damage on National Ignition Facility optics in volume production[C]. *Laser-induced Damage in Optical Materials*, 2013.
- [56] TRUMMER S, LARKIN G R, MASCIIO-KEGELMEYER L, et al. Automated repair of laser damage on national ignition facility optics using machine learning[C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2018.
- [57] MUNDHENK T N, KEGELMEYER L M, TRUMMER S K. Deep learning for evaluating difficult-to-detect incomplete repairs of high fluence laser optics at the National Ignition Facility[C]. *The International Conference on Quality Control by Artificial Vision*, 2017.
- [58] SPAETH M L, WEGNER P J, SURATWALA T I, et al. Optics recycle loop strategy for NIF operations above UV laser-induced damage threshold[J]. *Fusion Science & Technology*, 2016, 69(1):265-294.
- [59] MANES K R, SPAETH M L, ADAMS J J, et al. Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics[J].

- Fusion Science and Technology, 2016, 69(1) : 146-249.
- [60] WEI Fupeng. Research on intelligent inspection method of weak feature damage in large aperture final optics [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
魏富鹏. 大口径光学元件弱特征损伤智能检测方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [61] ZHAO D, SUN M, WU R, et al. Laser-induced damage of fused silica on high-power laser: beam intensity modulation, optics defect, contamination [C]. SPIE, 2015.

Inspection and Repair of Optical Damage in Tradition and Deep Learning (Invited)

LI Yong^{1,2}, LI Jianlang¹, LI Zhan², LIU Dean², ZHANG Dawei¹, ZHANG Junyong²
(1 School of Optical-electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)
(2 Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China)

Abstract: This paper mainly introduces the inspection and repair methods of optical damage in high power laser system. Because the optical element damage is common in the Final Optical Assembly (FOA) of high power laser system and has great influence on the normal operation of laser system, it is necessary to inspect real time and repair in time, so as to achieve the purpose of recycling optical elements. In online inspection, Final Optical Damage Inspection (FODI) is an important method, which can image and analyze the damage of optical components in real time. In addition, there is an indirect way to obtain damage images, which is to detect the damage by diffraction ring. The size and location of the damage point can be calculated by the relevant formula. For the detection of smaller damage, the tool of deep learning, which can process a large amount of data, is an indispensable method for studying this problem at present. The on-line detection device proposed by them has been a very effective means of detection. With the development of deep learning in image and data processing, convolutional neural networks and decision trees are used to identify and judge the location and size of damage points, so that we can quickly find the damage points. Accurate detection and identification is a premise for the protection and recovery of optical components, then, damage repair needs effective technical means to repair the component and bring it back to the original quality standard as much as possible. The main method of repairing damage is Rapid Ablation Mitigation (RAM), which is the most common and effective method of repairing damage. The premise and key to the damage site treatment is to accurately locate smaller damage points and classify different types of damage so as to determine the subsequent repair steps. Of course, different application scenarios require different technical means. Finally, the structure and flow of optical element damage detection and repair are introduced by the optics recycle loop strategy. This process is very helpful to realize multiple utilization of optical components, save cost and improve utilization rate. Damage detection and repair is an important part of optics recycle loop strategy. Influenced by deep learning in the field of image processing, it is believed that more and more methods of deep learning can be used in researches related to damage detection and repair. In a word, optical component damage detection has developed towards the direction of online detection to improve resolution, and deep learning to help improve classification accuracy and accurate positioning. Damage inspection and repair is an important and indispensable part of the optics recycle loop strategy.

Key words: Element damage; On-line inspection; High power laser system; Damage repair; Deep learning

OCIS Codes: 120.4630; 140.3330; 110.2970; 140.3460