激光加工在线监测技术研究进展

丁烨^{1,2†}, 薛遥^{3†}, 庞继红⁴, 杨立军^{1*}, 洪明辉^{2*}

1. 哈尔滨工业大学微系统与微结构制造教育部重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 新加坡国立大学电子与计算机工程系, 新加坡 117583, 新加坡;

3. 温州大学激光与光电智能制造研究院, 温州 325000;

4. 温州大学机电工程学院, 温州 325035

†同等贡献

*联系人, 杨立军, E-mail: yljtj@hit.edu.cn; 洪明辉, E-mail: elehmf@nus.edu.sg

收稿日期: 2018-09-03; 接受日期: 2018-10-09; 网络出版日期: 2018-12-19

国家重点研发计划(编号: 2018YFB1107600)、国家自然科学基金(编号: 71671130)和留学基金委员会资助项目

摘要 激光加工技术是一种非接触式先进加工技术, 主要利用激光与物质相互作用过程中产生的光物理、光化学反应对物质进行加工. 现阶段, 激光加工技术在航空航天、汽车制造、医疗卫生、仪器仪表和核工业等领域有着极为重要的应用价值. 随着该技术工业化程度的不断加深, 对其加工效率和加工质量提出了越来越高的要求. 相比于使用成本较高的超短脉冲激光器实现这一目标, 使用监测技术对加工过程进行观察和调控是更为合理的手段. 传统的离线监测技术采用先加工后分析的方式对激光加工进程和加工缺陷进行监测, 这种方法往往伴随着较差的时效性和较低的工作效率, 在面对工况复杂多变、工件结构和组分多样化的实际工业生产时无法大规模应用. 因此, 在线监测技术作为一种必要的辅助手段, 目前逐渐被广泛地应用到激光加工过程中. 本文首先从时间尺度上分析了激光与物质相互作用的机理, 阐述了不同脉宽激光加工时的一系列物理现象, 明确了在线监测系统工作的切入点. 针对国内外在激光加工过程中应用的在线监测技术进行了系统综述, 详细分析了由声学传感器、光谱仪、光电二极管、视觉传感器和温度传感器等单一传感器构成的在线监测技术各自的工作原理、系统组成以及优缺点, 同时阐述了这些传感器之间相互复合以及将传感器与新兴的人工智能技术结合的在线监测技术的应用现状, 并基于现有在线监测技术的不足对其未来的发展趋势进行了展望.

关键词 激光加工技术, 在线监测, 传感器, 人工智能

PACS: 07.05.Hd, 07.05.Kf, 07.07.Df, 42.62.Cf

1 引言

激光是物质受激辐射产生的一种相干光, 它具有

高方向性、高单色性、高相干性和高能量密度等特点. 相比于传统的加工方式, 激光加工具有无工具损耗、加工精度和效率高、过程高度可控、柔性高等优

引用格式: 丁烨, 薛遥, 庞继红, 等. 激光加工在线监测技术研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 044201

Ding Y, Xue Y, Pang J H, et al. Advances in *in-situ* monitoring technology for laser processing (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 044201, doi: [10.1360/SSPMA2018-00311](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00311)

点. 因此, 自20世纪90年代以来, 激光加工逐渐被广泛应用到诸多工业领域中. 常见的应用有激光焊接、激光打孔、激光切割、激光打标、激光划片、激光清洗、激光熔覆等.

随着科学技术的不断进步, 工业界对激光加工的质量和效率提出了越来越高的要求. 一方面, 随着脉冲锁模技术的发展, 激光的脉冲宽度可以缩短到皮秒(10^{-12} s)和飞秒(10^{-15} s)量级, 即超短脉冲激光. 这类激光加工过程中的热效应能够有效地被抑制, 单脉冲蚀除精度以及加工质量能够显著提高. 但是, 皮秒和飞秒激光器在大规模应用方面存在明显的瓶颈, 如较高的购买、使用及维护成本、较低的生产效率等. 另一方面, 现阶段广为应用的连续激光和长脉冲激光加工过程中伴随着大量的声、光、电、热信号的释出, 依托于多种传感器, 可以实现对这一系列信号的监测. 在监测过程中, 这类传感器将获得的信号按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出, 从而可以建立信号强度变化与加工进程之间的关联, 并可以根据实际加工需求在线调整加工参数, 提高加工质量. 在工业上应用的传感器, 如声学传感器、光谱仪、光电二极管、视觉传感器和温度传感器等, 大多具有高响应速度、低使用成本、智能化、系统化等优点. 相比于应用超短脉冲激光加工, 应用在线监测技术可以有效降低生产成本和提高生产效率, 因而更加适用于大规模生产.

在经过大量的试验测试后, 学者们发现, 基于单一传感器的在线监测系统仅能识别、采集和处理激光加工过程中释放的某一类信号, 故仅能片面地监测激光加工过程. 同时, 每一种传感器都有其显著的优缺点, 在某些特殊的工况下, 其缺点会被放大, 如声传感器无法在噪声较大的环境工作、视觉传感器无法在亮度较大的环境中工作等. 此时, 传感器识别和采集得到的信号存在较为严重的失真, 也就无法准确地对激光加工过程进行在线监测. 为解决这些问题, 一些学者将多个传感器进行组合, 相互取长补短, 抑制了工况对传感器工作的影响, 从而较为全面地对激光加工过程进行监测. 还有部分学者利用人工智能技术分析传感器获得的信号, 在有效屏蔽干扰信号的同时, 显著地缩短了传感器获得的信号处理及对加工参数进行优化所需时间. 尽管如此, 通过分析文献中搭建的在线监测系统和获得的试验结果可以发现, 现有的激光加工在线

监测技术依然存在一些技术上的短板.

为了对激光加工在线监测技术进行一个较为完备的综述, 本文首先从时间尺度上分析了激光与物质相互作用的机理, 阐述了不同脉宽的激光在加工时引发的一系列物理现象, 明确了在线监测系统工作的切入点. 然后, 系统地列举了对国内外学者开发的基于单个传感器的激光加工在线监测技术, 对每种技术对应的工作原理、系统搭建及监测结果进行了详细分析, 并总结了不同传感器各自的优缺点. 在此基础上, 进一步分析了将多个传感器相结合以及将传感器与人工智能技术相结合的在线监测技术, 阐明了这些技术在工作精度和工作效率上相较于基于单一传感器的在线监测技术的优越性. 基于分析文献中提到的在线监测技术的不足之处以及工业界对其提出的更高要求, 对这项技术的未来发展趋势进行了展望.

2 激光与物质相互作用的机理

当激光束轰击物质表面时, 部分会被物质表面反射, 剩下的会被物质吸收, 被反射的激光能量比例与激光的工作频率、偏振方向、入射角度、大气和物质的折射率有关^[1]. 被吸收的激光能量沉积在物质中, 引起物质的改性, 主要表现为物质内部处于平衡态的电子通过吸收激光束内的光子达到激发态的受激电离^[2]. 受激电子的弛豫在时间尺度上主要分为以下五个过程, 示意图如图1(a)所示^[3].

第一个过程: 在 10^{-14} s范围内, 受激电子的相位改变, 但是能量分布保持不变.

第二个过程: 在 10^{-14} – 10^{-13} s范围内, 电子通过散射达到准热平衡状态, 电子的能量服从费米-狄拉克分布规律. 物质吸收的激光能量全部被束缚在电子系统中, 故电子的温度远高于周围的晶格温度.

第三个过程: 在 10^{-13} – 10^{-12} s范围内, 电子能量弛豫, 处在准热平衡状态的自由电子主要通过辐射受限纵向光学声子(LO声子)向周围晶格传递能量.

第四个过程: 在 10^{-12} – 10^{-11} s范围内, 声子-声子弛豫、LO声子耦合生成声学声子辐射, 最终声子按照玻色-爱因斯坦分布规律在布里渊区重新分布, 此时电子与晶格的能量分布接近热平衡状态.

第五个过程: 在 10^{-11} s的时间尺度上, 能量通过电子漂移以及晶格-晶格耦合实现热扩散, 扩散的时间取

图 1 (网络版彩图)(a) 时间尺度上的受激电子的弛豫过程; (b) 长脉冲或连续激光与物质作用过程; (c) 超短脉冲激光与物质作用过程

Figure 1 (Color online) (a) Relaxation process of excited electrons in the time scale; (b) interaction between long pulsed laser or continuous wave laser with matter; (c) interaction between ultrashort pulsed laser with matter.

决于物质的热扩散特征长度和热扩散系数。

由上述分析可知, 当入射激光脉宽大于热扩散时间即连续激光或长脉冲激光加工时, 在作用区域附近热量会大量累积, 物质以沸腾、汽化的方式被去除, 并会在表面留有熔渣、再铸层、微裂纹等典型缺陷, 实现热熔性加工, 示意图如图 1(b) 所示^[4]。当入射激光脉宽远小于物质中的电子-声子耦合时间即皮秒或飞秒激光加工时, 只需要考虑电子吸收光子后的激发和储能过程, 从根本上避免了能量的转移、热能的存在以及热扩散造成的影响。物质吸收光子后产生的能量仅在物质表面几纳米的厚度聚集, 在此范围内电子的瞬间温度将远高于物质的熔化、汽化温度, 进而转化为高温高压的等离子体。等离子体的喷发基本带走了加工过程中产生的热量, 实现非热熔性加工, 示意图如图 1(c) 所示^[5]。

3 基于各类传感器的激光加工在线监测技术

相比于传统的机械加工方式, 激光能量的传递主要依赖硬光路(光学镜组)或者软光路(光纤)。并且在激光加工过程伴随着显著的声、光、电、热信号的释放, 这为激光加工的在线监测提供了可靠的切入点。

3.1 基于声学传感器的在线监测技术

激光与物质相互作用产生的冲击波主要由以下几部分构成: 首先, 部分激光被反射, 光子的移动轨迹也相应改变, 根据动量守恒定律可知, 光子的动量损失转移到物质中, 即激光给物质表面施加了光压, 从而引起物质表面的振动和声波的产生。同时, 根据第 2 节的描述, 在吸收光子能量之后, 物质内部的电子将能量传递

给晶格, 短时间内物质表面温度升高诱发的热弹性效应会在物质内部引发冲击波. 此外, 在激光与物质相互作用的区域, 物质快速蒸发, 局部的粒子密度上升, 局部压力的增大也会引发冲击波^[6]. 产生的熔渣高速向外喷溅, 给物质内部引起很强的反冲力. 部分冲击波会在加工区域附近的空气中传播, 在空气阻力的影响下逐渐湮灭. 值得一提的是, 激光诱导产生的冲击波中同时包含声波和超声波^[7].

Lu等人^[8]在研究中将工作频率为20 Hz–20 kHz的

麦克风放置在加工区域附近, 用以探测激光清洗过程中的可闻声波, 系统搭建如图2(a)所示. 试验结果表明, 当激光的能量密度低于物质的烧蚀阈值时, 随着作用脉冲数的增加, 声波的峰值振幅逐渐降低到0; 当激光的能量密度高于物质的烧蚀阈值时, 随着作用脉冲数的增加, 声波的峰值振幅逐渐降低到一个大于0的稳定值, 并且激光能量密度越高, 数值越大. 通过拟合声波的峰值振幅与烧蚀量, 可以较为准确地建立声波峰值振幅与硅和铜实时烧蚀速率的联系, 如图2(b)所示.

图 2 (网络版彩图)(a) 基于麦克风的激光清洗声波信号在线监测系统搭建; (b) 准分子激光加工硅和铜过程中声波峰值振幅与烧蚀速率的关系; (c) 基于压电陶瓷传感器的激光清洗光声信号在线监测系统搭建; (d) 不同激光能量密度作用时归一化光声信号强度与相对清洗面积的线性回归模型以及不同烧蚀机制下激光能量密度与归一化光声信号强度的线性回归模型

Figure 2 (Color online) (a) Experimental setup of microphone based *in-situ* audible acoustic wave monitoring system for laser cleaning; (b) relationship between the ablation rate and the peak amplitude of acoustic wave during excimer laser ablation of Si and Cu; (c) experimental setup of piezoelectric ceramics sensor based *in-situ* photoacoustic signal monitoring system for laser cleaning; (d) linear regression models correlating the relative cleaned area with the normalized photoacoustic signal for different laser fluences as well as linear regression models correlating the normalized photoacoustic signal generated at different ablation regimes for different laser fluences.

Cai等人^[9]采用相同的在线监测方式,建立了声波的峰值振幅与铝和PVC塑料单位时间内烧蚀量之间的联系.除了通过非接触式传感器测量空气中的声波信号之外,还可在物质表面放置接触式传感器用以测量激光加工在物质内部引起的冲击波. Tserevelakis等人^[10]将工作频率为5 MHz的压电陶瓷超声传感器固定在激光清洗区域附近采集冲击波引起的光声信号,经由射频频放大器处理之后在高速示波器上显示,系统搭建如图2(c)所示.通过对比不同能量密度激光作用下的烧蚀面积、烧蚀深度和光声信号强度,建立起不同激光能量密度作用时归一化光声信号强度与相对烧蚀面积之间的联系以及不同烧蚀机制下激光能量密度与归一化光声信号强度之间的联系,如图2(d)所示.

通过建立声波峰值振幅、光声信号强度等由声学传感器采集到的信号与烧蚀进程的关联,可以实现对激光加工的在线监测.尽管这类在线监测技术的系统搭建成本和信号处理难度较低,但是,其工作距离较短,背景噪音也会对监测获得的声信号产生较大影响.

3.2 基于光谱仪的在线监测技术

当激光能量密度大于物质的烧蚀阈值时,物质会从基体中剥离,这一过程中伴随着大量等离子体的产生.等离子体中包含了激发态原子、电子和带电粒子^[11],而入射激光与等离子体相互作用会诱发电磁波.通过采集电磁波信号的光谱、温度等特征数据可以实现对激光加工的在线监测.

Hong等人^[12]建立了一套在多波段范围工作的等离子体发射光谱探测系统,系统搭建如图3(a)所示.激光加工产生的等离子体信号被准直器采集,经由光纤输出到光谱仪中进行分析.这一系统被后续的学者们广泛借鉴. Stafe等人^[13]的试验结果表明,当作用脉冲数在一定范围内时,铝的谱线强度随着脉冲个数的增加线性衰减;当作用脉冲数超出范围后,谱线强度的衰减迅速减缓,这与加工产生的微坑形貌直接相关.分析认为,在一定的激光作用脉冲个数内,加工产生的微坑直径小于等离子体羽的流体动力长度,微坑内部的尺寸限制了等离子体羽的径向扩张,使得其只能沿轴向扩张.由于激光脉冲的不断叠加,微坑直径逐渐大于等离子体羽的流体动力长度,等离子体羽开始沿着径向扩张.后续激光脉冲作用时,等离子体羽的密度和温度逐渐下降,最终以获得的等离子体的发射

光谱及其热动力学属性为基础,实现对烧蚀速率和微坑尺寸的在线监测. Verhoff等人^[14]采集了2 μ s内能量密度相近的纳秒和飞秒激光与金属作用时产生的等离子体羽的形貌和发射光谱,如图3(b)和(c)所示,通过联立不同激光参数作用下等离子体谱线、温度、电子密度与加工形成的微坑尺寸,实现对微坑形貌变化的在线监测.

在激光焊接过程中,基体材料中某些特殊元素会在焊缝中诱导产生冶金缺陷,因而通过监测等离子光谱中不同元素的谱线,可以及时发现焊缝中缺陷^[15,16]. Kong等人^[17]的试验结果表明,在激光搭接焊镀锌板的过程中产生的等离子体的温度对于某些缺陷(如裂纹、焊接小孔)十分敏感,其光谱强度对于焊接速度的变化也十分敏感,部分试验结果如图3(d)所示.通过监测等离子体的温度和光谱强度,可以实现对焊接缺陷的在线监测. Rizzi等人^[18]发现入射激光能量的提高导致焊接深度增加,等离子体的温度核心逐渐向工件内部移动并逐渐陷进焊接毛细孔中,此时被光谱仪采集到的等离子体光谱信号实际上是温度较低的等离子体外壳发出的,故实际测得的等离子体光谱强度削弱了.

光谱仪可以探测激光加工各种物质时发射的谱线,具有广泛的适应性和较高的测量精度,而且适合对激光微纳加工过程进行在线监测.但是,基于光谱仪的在线监测系统搭建和调试较为复杂、工作距离短、同时使用和维护成本较高,所以在工业上的大规模应用较为困难.

3.3 基于光电二极管的在线监测技术

相比于昂贵精密的光谱仪,光电二极管是一种成本低、结构简单的传感器. Ho等人^[19]和Stournaras等人^[20]采用与光路同轴放置的光电二极管对激光打孔过程进行了在线监测,系统搭建如图4(a)所示.在过滤了干扰光信号之后,光电二极管将获得的等离子体信号转变为电信号,并在工控机中实现可视化监测.对试验结果进行线性回归分析的结果表明光电二极管获得的信号强度与微孔直径和深度的变化有显著的关联,同时文中进行了相应的理论验证. De Keuster等人^[21]在激光喷嘴侧边固定了一个光电二极管,用以监测激光切割多种材料过程中产生的等离子体信号.在对切割结果进行形貌表征的基础上,建立了等离子体的信号强度与切割进程的联系,部分试验结果如图4

图 3 (网络版彩图)(a) 基于光谱仪的多波段等离子体发射光谱在线监测系统搭建; 具有相近激光能量密度的纳秒和飞秒激光诱导产生的等离子体羽图像(b)和等离子体随延迟时间变化的谱线(c); (d) 激光搭接镀锌板时不同焊接速度下获得的等离子体光谱强度

Figure 3 (Color online) (a) Experimental setup of spectrometer based *in-situ* multi-channel monitoring system for detection of plasma emission spectra; ICCD images of nanosecond and femtosecond induced plasma (b) and their spectrums with increasing delay time (c) under similar laser fluence; (d) plasma spectrums captured during galvanized sheet overlap welding at different welding velocities.

图 4 (网络版彩图)(a) 基于光电二极管的等离子体在线监测系统搭建; 激光切割ST52-Q时恒定切割速度下原始光电二极管信号(b)和不同切割速度下滤波后的光电二极管信号(c); (d) 基于四个光电二极管的激光焊接在线监测系统搭建; (e) 基于时间频率分析法探测的焊接缺陷频谱

Figure 4 (Color online) (a) Experimental setup of photodiode based *in-situ* monitoring system for plasma detection; raw photodiode signal under fixed cutting velocity (b) and filtered photodiode signal under different cutting velocity (c) during laser cutting of ST52-Q; (d) experimental setup for four photodiodes based *in-situ* monitoring system for laser welding; (e) detected optical radiation signal of welding defects based on time frequency analysis.

(b)和(c)所示. 分析认为, 这套系统可以较为准确地在线监测激光在深度方向上的切割进度, 同时可以定量地建立切割过程中形成的条纹空间周期和表面熔渣高度与等离子体信号强度之间的关联, 从而实现对激光

切割过程的在线监测.

激光焊接过程中产生的表面羽流中存在金属蒸气和等离子体. 当用可见传感光电二极管对激光焊接过程进行在线监测时, 采集的信号包含了热辐射和等离

子体辐射, 借此可以表征激光焊接的穿透深度和焊缝宽度. Brock等人^[22,23]建立了由4个光电二极管组成的监测系统, 准确地表征了焊接过程中的光信号发射核心和金属蒸气流方向, 实现了对焊接质量的在线监测, 系统搭建如图4(d)所示. 除此之外, 很多文献提出了将光电二极管采集到的光学信号频率与激光焊接的熔池周期变化相关联, 进而通过监测光学信号中的特殊变化识别和定位焊接缺陷. 例如, 根据Schmidt等人^[24]的研究, 采用3.6 kW激光搭接焊厚度为1.3–2.5 mm的镀锌钢工件过程中, 焊接速度设置为3000–4000 mm/min, 光电二极管采集到的熔池的振荡频率为300–500 Hz, 焊接小孔的振荡频率为2000–2500 Hz. 相似的, Molino等人^[25]分析了焊接过程中光电二极管采集到的光学信号频率在时间尺度上的变化, 结果发现当焊接过程中出现缺陷时, 频谱的高频段(4.8–12 kHz)会变得异常显著, 部分结果如图4(e)所示. 此外, 大量试验结果表明, 当激光焊接参数保持一致时, 焊接小孔的扩张会导致大量的激光能量被反射, 而焊接小孔的缩小会限制激光能量的反射^[26,27].

光电二极管的工作距离较长, 数据采集过程受被加工物质表面属性的限制较小, 因此系统的搭建和调试较为简单. 同时, 其响应时间极短, 收集信号过程中受到的外界干扰较小, 后续还有信号放大电路和滤波电路对信号进行再处理, 故利用光电二极管对激光加工过程进行在线监测是一种高效且适合广泛应用的方法. 但是其分辨率相对较低, 较难实现对微小缺陷的监测.

3.4 基于视觉传感器的在线监测技术

与光电二极管类似, 视觉传感器大多与激光加工的光路同轴布置, 并且在视觉传感器的前端需要放置滤光镜组. Wen等人^[28]将视觉传感器与闭环控制系统相结合, 系统搭建如图5(a)所示. 在试验中, 视觉传感器能够实时捕捉切割前沿和切割火花的投影, 将这些信号处理之后, 可以实现对加工缺陷以及切缝表面粗糙度的在线监测. 另外, 基于获得的图像信号, 闭环控制系统对切割参数进行在线调整, 从而实现对激光切割过程的在线优化. Kim等人^[29]在视觉传感器前设置532和660 nm的带通滤波器, 可以分别实现对激光焊接钢材和铝材过程中焊道内小孔形貌的捕捉以及焊接深度的在线监测. Gao等人^[30]对视觉传感器采集到的

图像进行灰度分析, 基于高斯滤波算法、边缘增强和追踪算法获得了焊接小孔和焊接熔池的实时图像, 结果如图5(b)所示. 通过追踪到的小孔和熔池的边缘信号, 可以对激光焊接的进度进行在线监测.

辅助光源可以有效增强视觉传感器采集的图像的亮度, 如Zhang等人^[31]通过对比增加辅助光源前后采集到的小孔和熔池图像, 发现在波长为510–610 nm的辅助光源辐照下, 能够更加清楚地观察到激光焊接过程中的热影响区、小孔和熔池形貌, 如图5(c)所示. Nilsen等人^[32]采用工作波长为450 nm的辅助LED光源, 对激光焊接的熔池区域进行辅助照明, 高速视觉传感器采集到的图像在经过简单的灰度处理后能够较为准确地在线监测焊接接头的中心位置.

基于视觉传感器的在线监测系统的搭建成本和难度较低, 同时其响应时间短, 图像采集过程基本不受外界环境干扰, 能够较为准确地识别激光加工区域的表面形貌特征. 但是, 一方面受限于图像采集机制, 视觉传感器很难识别加工区域深度方向上的变化, 另一方面受限于图像采集和处理速度, 基于视觉传感器的在线监测技术在短脉冲和超短脉冲激光加工的监测等方面应用较少.

3.5 基于温度传感器的在线监测技术

激光加工过程伴随着大量的热辐射, 热辐射强度直接反映了激光加工区域的温度变化, 进而间接反映了激光加工的进程. 高温计是一种不与工件直接接触, 而是通过对激光加工区域的辐射热量进行监测、对加工区域的温度进行表征的一种典型的温度传感器, 其广泛应用于对激光加工的在线监测中.

Marshall等人^[33]、Chivel^[34]和Grasso等人^[35]均采用高温计采集了激光沉积过程中熔池和基体材料的实时温度, 并分析了材料加热和冷却速率以及熔池附近热影响区的温度梯度. 通过对比加工区域的温度分布和获得的微结构形貌, 建立了熔池温度和送粉速率之间的关联, 从而实现对加工进程的在线监测. Santhanakrishnan等人^[36]将高温计应用在激光热处理的在线监测中, 系统搭建如图6(a)所示. 在分析热处理区域温度场的基础上, 建立了渗碳层深度硬度均匀性和回火温度与冷却速率之间的关联. 根据试验过程可知, 回火温度与冷却速率与激光功率、激光扫描速度、激光光斑重叠和扫描长度有关. 因此, 以采集到的温度场参

图 5 (网络版彩图)(a) 基于视觉传感器和闭环控制系统的激光切割在线监测系统搭建; (b) 经过灰度分析后获得的小孔图像和熔池形貌; (c) 有无辅助光源时同轴视觉传感器采集的焊接区域形貌对比

Figure 5 (Color online) (a) Experimental setup of visual sensor and close-loop control based *in-situ* monitoring system for laser cutting; (b) obtained keyhole and molten pool morphologies after gray analysis; (c) comparison of welding region morphology captured by co-axial visual sensor with and without auxiliary illuminant.

数为媒介, 可以较为准确地建立渗碳层深度硬度均匀性与激光加工参数的关联, 部分试验结果如图6(b)所示. Schmailzl等人^[37]将高温计集成到三维扫描仪中, 对激光透射焊接聚合物过程中的焊缝温度进行了在线监测, 试验结果表明基于温度传感器获得的温度分布

和焊接过程中热损伤在工件表面的分布, 可以实现对焊接参数和焊接轨迹的在线优化, 避免热损伤的形成. Doubenskaia等人^[38]将高温计引入到对高速激光搭焊的在线监测中, 对比高频、低分辨率和低频、高分辨率的观测结果可知, 前者更能准确地采集到高频激光

图 6 (网络版彩图)(a) 基于高温计的激光热处理在线监测系统搭建; (b) 激光扫描速度和激光热量输入对加工区域温度的影响; (c) 不同焊接间隙下测得的焊缝表面亮度温度与截面形貌

Figure 6 (Color online) (a) Experimental setup of pyrometer based *in-situ* monitoring system for laser heat treatment; (b) the effect of laser scanning velocity and heat input on the surface temperature; (c) surface brightness temperatures and cross-section morphologies of the welding seams under different welding gaps.

搭接过程中的熔池温度分布, 而当焊接间隙设置的过大时, 焊接质量下降, 同时焊缝的平均温度会产生显著振荡, 部分试验结果如图6(c)所示. Smurov^[39]利用多波段高温计观察了脉冲激光焊接时每个脉冲引起的工

件温度上升, 通过对熔池温度进行监测, 可以获得焊接参数如脉冲能量、脉宽、脉冲形状、焊接速度等对焊接质量的影响, 同时通过监测焊接过程中混合焊料的熔化和凝固过程, 可以有效预防某种焊料的热解以及

提高焊接质量.

高温计能够较为准确地测量激光加工区域温度, 并且在搭建相应的监测系统时无需与激光光路同轴布置, 工作距离较长. 但是, 受限于仪器自身的图像分辨率, 目前仅能实现对光斑较大、功率较高的激光加工的监测, 对于光斑较小、功率较低的激光微纳加工的在线监测, 高温计并不适用.

综合以上分析, 对应用在激光加工在线监测系统 中的传感器的各自特点进行总结, 如表 1 所示^[40].

4 激光加工在线监测技术的改进

4.1 多种传感器的复合

根据第 3 节对各个传感器的应用分析可知, 每一种传感器都有自己明显的优缺点, 并且都无法独立地对激光加工过程进行较为详细的监测. 将多种传感器进行复合, 可以弥补彼此的缺点, 实现更理想的监测效果.

Shibahara 等人^[41]采用空间位置分布各异的三个视觉传感器, 对激光焊接前、中、后的完整过程进行了立体式监测, 第一个视觉传感器监测的是焊接前的焊缝形貌, 第二个视觉传感器监测的是焊接小孔形貌, 第三个传感器监测的是焊接区域熔池形貌. 通过分析三个传感器获得的形貌数据, 可以得出焊接区域的纵向、横向收缩以及角变形. Dorsch 等人^[42,43]搭建了一套基于近红外视觉传感器、可见光视觉传感器、CMOS 高速视觉传感器以及辅助照明装置的激光焊接在线监测系统, 系统搭建如图 7(a) 所示, 在辅助光源的

配合下, CMOS 高速视觉传感器可以实现对焊接前、中、后阶段焊缝区域形貌的监测, 近红外视觉传感器和可见光视觉传感器可以在较长的波长范围内对焊接区域的热辐射信号进行监测, 从而对焊接小孔、熔池形貌以及一系列焊接缺陷如熔渣、气孔的形成和空间位置等进行准确的判定. Kruth 等人^[44]采用光电二极管和声学传感器的组合, 对高功率激光切割厚板材进行了在线监测, 将熔渣高度、切缝粗糙度、切缝条纹周期等缺陷与不同传感器获得的信号进行匹配, 结果表明, 尽管辅助气流会带来一定影响, 通过声学传感器采集的信号仍然可以较为准确地监测激光在工件内部的穿透程度, 光电二极管采集的信号可以与加工缺陷的相关参数定量地建立关联. You 等人^[45]建立了一个基于两个高速视觉传感器和两个光电二极管的激光焊接在线监测系统, 两个光电二极管分别监测可见光强度和反射激光强度, 一个视觉传感器监测激光焊接过程中的小孔和熔池形貌, 另一个视觉传感器在窄带光学滤波器的协助下监测焊接区域上下表面金属蒸气的形貌, 系统搭建以及各个传感器获得的信号如图 7(b) 所示. 通过对比高速视觉传感器采集到的金属等离子体和小孔尺寸与光电二极管采集到的可见光和反射激光强度, 揭示了在高亮度、大功率盘形激光焊接中, 金属等离子体对激光能量、保护气体气压和焊接小孔的高度敏感性. Norman 等人^[46]同样采用高速视觉传感器和光电二极管对激光焊接过程进行在线监测, 通过对比两个传感器采集的信号以及焊接过程中的一系列物理现象, 得出光电二极管能够较为准确地识别焊接深度, 高速视觉传感器能够较为准确地识别焊接过程中

表 1 应用于激光加工在线监测的传感器的特点分析

Table 1 Characteristic analysis of sensors used for *in-situ* monitoring of laser processing

传感器类型	设备成本	工作频率 (kHz)	监测对象	设备优点	应用局限
声学传感器	较低	0.02–20000	冲击波中的声波和超声波	信号处理难度低, 系统搭建简单	工作距离短, 易受环境噪音干扰
光谱仪	较高	0.1–10	等离子体	信号分辨率高, 响应时间极短	工作距离短, 系统构成复杂
光电二极管	较低	1–100	热辐射和等离子体	工作距离长, 不易受干扰	空间分辨率一般, 不适合激光微细加工的监测
视觉传感器	较高 (取决于采集频率和像素)	0.05–500	熔池形貌	系统搭建简单, 不易受干扰, 监测精度高	对图像采集和处理速度有较高要求
温度传感器	较高 (取决于分辨率)	1–50	熔池和蒸汽温度	工作距离长, 较为准确的识别温度梯度	空间分辨率一般, 系统构成复杂, 需要红外相机的配合

图 7 (网络版彩图)(a) 基于近红外视觉传感器、可见光视觉传感器、CMOS高速相机以及辅助照明装置的激光焊接在线监测系统搭建; (b) 基于两个高速相机和两个光电二极管的激光焊接在线监测系统搭建以及采集到的信号与焊接结果对比
Figure 7 (Color online) (a) Experimental setup of near infrared sensor, visible sensor and CMOS high-speed camera based *in-situ* monitoring system for laser welding; (b) experimental setup of two high-speed cameras and two photodiodes based *in-situ* monitoring system for laser welding as well as comparison of captured signals and welding results.

的熔渣飞溅、堆积和咬边缺陷。

4.2 传感器与人工智能的结合

在各种激光加工在线监测技术中, 传感器可以采集激光加工过程中的大量原始数据, 如等离子体形貌、熔池形貌、加工缺陷等。随着计算机技术的发展, 人工智能在激光加工领域的应用日渐广泛, 将人工智能与激光加工在线监测技术相结合, 可以提高原始数据的利用率, 从而进一步提高监测效率与监测精度。

自适应控制是一种对系统参数的变化具有适应能力的控制方法, 现阶段作为激光加工在线监测技术的辅助手段广为应用。Sichani等人^[47]在激光切割过程中, 将自适应控制应用到基于光电二极管和近红外相机的

在线监测系统中, 一方面通过对比传感器获得的信号与切割质量分析, 建立起激光参数与切缝质量的关联, 另一方面, 通过自适应控制对激光参数进行调节, 在线提高激光切割质量, 调节过程如图8(a)所示。Chivel等人^[48]利用视觉传感器和高温计, 对激光烧结钛粉的烧结区域形貌和温度场进行监测, 并且采用自适应控制对激光扫描路径和能量进行优化, 在线提高烧结质量。Kawahito等人^[49,50]利用高速相机、红外视觉传感器、光电二极管, 对激光焊接铝合金过程进行了在线监测, 结果表明, 反射激光束的强度和焊接区域的热辐射信号可以作为监测焊接小孔、通孔的形成以及焊接节点的切变强度的有效手段。基于这些信号, 通过自适应控制对激光脉宽、输出功率、输出波形进行在线改进,

图 8 (网络版彩图)(a) 基于自适应控制的激光切割在线监测和参数修正; (b) 基于自适应控制的激光烧结流程图以及修正前后焊接节点切变强度对比

Figure 8 (Color online) (a) Adaptive control based *in-situ* monitoring and parameter correction for laser cutting; (b) schematic of flow chart for laser sintering based on adaptive control as well as the comparison of shear strength of welding joint before and after correction.

有效地提高了焊接节点的切变强度, 部分试验结果如图8(b)所示。Hu等人^[51]、Hofman等人^[52]和Heralić等人^[53]均在激光熔覆过程中, 采用红外相机观测加工区域温度分布和熔池形貌, 后续的闭环自适应控制系统建立起熔池形貌、激光参数和送粉速率之间的关联, 进而对前端光电二极管监测的送粉速率进行调控, 对激光熔覆的质量进行在线修正。

神经网络是人工智能领域兴起的研究热点, 它从信息处理角度对人脑神经网络进行抽象模拟, 建立特定的模型, 按不同的连接方式组成不同的网络。考虑到熔渣飞溅会极大地影响焊接质量, Nicolosi等人^[54]在激光焊接过程中, 应用基于细胞神经网络的闭环控制系统对视觉传感器获得的焊接区域的实时熔渣分布进行处理, 该系统能够在48 μ s内对监测系统获得的图像做出响应, 并在17 μ s内将处理结果反馈给工

控机、PLC和激光器, 实现对激光加工参数在线调整。Luo等人^[55]和Tan等人^[56]在激光焊接过程中, 首先训练稳态神经网络, 建立焊接参数与不可见的焊接小孔形貌之间的关联, 同时基于视觉传感器的焊接同轴观测系统可以获得焊接小孔的实时图像, 根据瞬态小孔形貌训练动态观测器, 获得焊接小孔形貌随时间变化规律的训练流程如图9(a)所示。对比数值仿真、工艺试验以及模型训练结果, 可以发现建立的动态神经网络模型能够较为准确地预测焊接参数突变时的瞬时焊接穿透深度和倾角, 部分结果如图9(b)所示。Akbari等人^[57]应用温度传感器对焊接区域的温度进行在线监测, 在此基础上应用两层神经网络, 修正了针对激光焊接区域的温度分布的数值仿真模型, 流程如图9(c)所示。在初步试验后对焊接区域的形貌进行分析, 进一步对神经网络进行修正, 最终应用的神经网络

图 9 (网络版彩图)(a) 小孔动态变化的稳态和动态神经网络训练模型; (b) 改变激光能量和焊接速度时数值仿真求解结果和动态神经网络预测结果对比; (c) 基于数值仿真和试验结果建立的预测焊缝形貌的两层神经网络模型

Figure 9 (Color online) (a) Static and dynamic neural network training models for keyhole dynamics; (b) comparison of numerical simulation and dynamic neural network training results under varied laser powers and welding velocities; (c) a two-layer neural network model employed to predict seam morphology based on numerical simulation and experimental results.

和数值仿真模型能够准确地在在线预测复杂加工参数下的熔池形貌, 平均绝对百分误差达到0.962. Huang等人^[58]在焊接过程中, 对声学传感器获得的实时信号进行降噪处理, 分析其在时域和频域的变化. 再利用神经网络建立这些变化与焊接深度之间的关联, 实现了基于声传感器的激光焊接深度的在线监测.

除了以上阐述的部分人工智能技术之外, 模糊逻辑

神经网络^[59,60]、模糊神经网络^[61,62]等均在激光加工的在线监测技术中有所应用.

5 激光加工在线监测技术的发展趋势

5.1 激光加工深度方向的在线监测技术

目前的在线监测技术主要对激光加工区域表层的

物理现象进行监测, 例如熔池形貌、熔渣分布、等离子体羽辉等, 但是在加工深度方向上尚缺乏有效的在线监测技术. 在大部分激光加工过程中(如激光切割、激光打孔、激光焊接), 对深度方向上的加工进程的在线监测极其重要. 同时, 加工深度方向上也会存在一些显著的缺陷, 如热影响区、微裂纹、再铸层等^[63], 这些缺陷的存在会对加工区域的后续应用带来较大风险. 一种较为合理的发展方向是首先以离线的方式, 利用小波分析等信号分析方法对传感器获得的信号频域逐步进行多尺度细化, 同时对试验结果进行深度和缺陷分析, 将两者的结果进行对比, 提取出与加工深度进程和加工缺陷相关的瞬时信号, 从而在后续的加工过程中实现对深度方向的在线监测. 研发更加合理高效的算法、建立起与加工深度和缺陷信号相关的完备的数据库, 是下一阶段针对深度方向进行监测的极为重要的环节.

5.2 更高工作频率的在线监测技术

根据表1可知, 现阶段应用的在线监测技术的工作频率范围为0.02–20000 kHz. 而随着脉冲压缩技术的发展, 皮秒激光和飞秒激光逐渐取代纳秒激光, 成为激光微纳加工中的主流工具. 这类激光脉宽极短, 常用工作频率范围为1 kHz–80 MHz, 因此每个脉冲激光蚀除深度有限, 热影响区等加工缺陷并不显著. 但是在针对某些特殊材料例如宝石、碳纤维蒙皮和炸药等的加工时, 由于材料的成本较高, 物理属性特殊, 仍然需要对其加工过程进行在线监测, 从而提高加工过程的稳定性, 降低加工成本. 现有的在线监测技术已经无法有效地监测超短脉冲激光的加工过程, 研发工作频率更高的传感器以及工作效率更高的图像处理分析软件, 在最短的响应时间内实现对每一个激光脉冲作用结果的识别、采集和处理, 可以更加准确地监测超短脉冲激光的加工进程, 这将是在线监测技术未来发展中必须实现的目标之一.

5.3 更加智能的在线监测技术

根据4.2节所述, 目前应用于激光加工在线监测技术中的人工智能技术主要是对传感器获得的图像数据进行处理, 然后根据一定算法对加工参数进行修正. 随着人工智能技术的不断发展, 基于神经网络的深度学习(Deep Learning)等研究方向逐渐兴起, 相比于现有的人工智能技术, 其算法更加智能、抗干扰和适应能力更强. 但是, 应用更加智能的在线监测技术的前期需要进行大量试验, 建立起庞大的数据库, 这样方可实现更高的数据处理速度、更快的加工进程判断和更准确的加工缺陷识别, 相应的对于加工过程的监测以及加工参数的修正更精确. 因此, 随着激光在微纳加工领域成为主流工具, 发展更加智能的在线监测技术迫在眉睫.

6 总结

激光加工过程中会释放大量的声、光、电、热信号. 声传感器可以监测到加工过程中的声波和超声波信号; 光谱仪可以监测到加工过程中的等离子体信号; 光电二极管可以监测到加工过程中的热辐射和等离子体信号; 视觉传感器可以监测到加工区域表面形貌; 温度传感器可以监测到加工过程中熔池和蒸汽的温度信号. 对这些传感器获得信号进行处理之后可以实现对加工进程的在线监测, 但是这些传感器各自有明显的优缺点. 将这些传感器进行复合, 可以实现对激光加工过程中多个信号的在线监测, 而将这些传感器与人工智能技术结合, 可以在对加工进程进行在线监测的基础上, 对加工参数进行在线修正. 考虑到日渐成熟的激光微纳加工技术, 后续的激光在线监测技术的发展需要进一步提高监测深度和工作频率, 数据处理方式也需要更加智能高效, 从而为提高加工质量和加工效率提供更大的助力.

参考文献

- 1 Yang L, Ding Y, Wang M, et al. Numerical and experimental investigations on 342 nm femtosecond laser ablation of K24 superalloy. *J Mater Process Tech*, 2017, 249: 14–24
- 2 Zimmer K. Laser processing and chemistry. *Z Physik Chem*, 1999, 208: 291–292
- 3 Wu X F. Studies on theories and experiments in femtosecond laser ablation of metal (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. 10–11 [吴雪峰. 飞秒激光烧蚀金属的理论与试验研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006. 10–11]

- 4 Bulgakova N M, Bulgakov A V. Pulsed laser ablation of solids: transition from normal vaporization to phase explosion. *Appl Phys A*, 2001, 73: 199–208
- 5 Garrison B J, Srinivasan R. Laser ablation of organic polymers: microscopic models for photochemical and thermal processes. *J Appl Phys*, 1985, 57: 2909–2914
- 6 Zyung T, Kim H, Postlewaite J C, et al. Ultrafast imaging of 0.532 μm laser ablation of polymers: Time evolution of surface damage and blast wave generation. *J Appl Phys*, 1989, 65: 4548–4563
- 7 Leung W P, Tam A C. Noncontact monitoring of laser ablation using a miniature piezoelectric probe to detect photoacoustic pulses in air. *Appl Phys Lett*, 1992, 60: 23–25
- 8 Lu Y F, Hong M H, Chua S J, et al. Audible acoustic wave emission in excimer laser interaction with materials. *J Appl Phys*, 1996, 79: 2186–2191
- 9 Cai Y, Cheung N H. Photoacoustic monitoring of the mass removed in pulsed laser ablation. *Microchem J*, 2011, 97: 109–112
- 10 Tsevelakis G J, Pozo-Antonio J S, Siozos P, et al. On-line photoacoustic monitoring of laser cleaning on stone: Evaluation of cleaning effectiveness and detection of potential damage to the substrate. *J Cultural Heritage*, 2018, doi: 10.1016/j.culher.2018.05.014
- 11 Allmen M, Blatter A. *Laser-Beam Interactions with Materials: Physical Principles and Applications*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013. 146
- 12 Hong M H, Lu Y F, Bong S K. Time-resolved plasma emission spectrum analyses at the early stage of laser ablation. *Appl Surf Sci*, 2000, 154–155: 196–200
- 13 Stafe M, Negutu C. Real-time monitoring of the pulsed laser ablation of metals using ablation plasma spectroscopy. *Plasma Chem Plasma Process*, 2012, 32: 643–653
- 14 Verhoff B, Harilal S S, Freeman J R, et al. Dynamics of femto- and nanosecond laser ablation plumes investigated using optical emission spectroscopy. *J Appl Phys*, 2012, 112: 093303
- 15 Huber S, Glasschroeder J, Zaeh M F. Analysis of the metal vapour during laser beam welding. *Phys Proc*, 2011, 12: 712–719
- 16 Sibillano T, Ancona A, Berardi V, et al. Real-time monitoring of laser welding by correlation analysis: The case of AA5083. *Opt Lasers Eng*, 2007, 45: 1005–1009
- 17 Kong F, Ma J, Carlson B, et al. Real-time monitoring of laser welding of galvanized high strength steel in lap joint configuration. *Opt Laser Tech*, 2012, 44: 2186–2196
- 18 Rizzi D, Sibillano T, Pietro Calabrese P, et al. Spectroscopic, energetic and metallographic investigations of the laser lap welding of AISI 304 using the response surface methodology. *Opt Lasers Eng*, 2011, 49: 892–898
- 19 Ho C C, Chang Y J, Hsu J C, et al. Optical emission monitoring for defocusing laser percussion drilling. *Measurement*, 2016, 80: 251–258
- 20 Stournaras A, Salonitis K, Chrysosouris G. Optical emissions for monitoring of the percussion laser drilling process. *Int J Adv Manuf Tech*, 2010, 46: 589–603
- 21 De Keuster J, Duflou J R, Kruth J P. Monitoring of high-power CO₂ laser cutting by means of an acoustic microphone and photodiodes. *Int J Adv Manuf Technol*, 2007, 35: 115–126
- 22 Brock C, Hohenstein R, Schmidt M. Optical 3D position sensor for the fast tracking of light sources. *Phys Proc*, 2010, 5: 437–445
- 23 Brock C, Hohenstein R, Schmidt M. Towards fast tracking of the keyhole geometry. *Phys Proc*, 2011, 12: 697–703
- 24 Schmidt M, Otto A, Kägeler C. Analysis of YAG laser lap-welding of zinc coated steel sheets. *CIRP Ann*, 2008, 57: 213–216
- 25 Molino A, Martina M, Vacca F, et al. FPGA implementation of time-frequency analysis algorithms for laser welding monitoring. *Microproc Microsyst*, 2009, 33: 179–190
- 26 Salminen A. Welding-electron and laser-beam welded joints-guidance on quality levels for imperfections-Part 1 Steel, EN ISO 13919-1, 1997, Section 4. 1–8
- 27 Salminen A. Welding-electron and laser-beam welded joints-guidance on quality levels for imperfections-Part 2 Aluminium and its weldable alloys, EN ISO 13919-1, 2001, Section 4. 1–8
- 28 Wen P, Zhang Y, Chen W. Quality detection and control during laser cutting progress with coaxial visual monitoring. *J Laser Appl*, 2012, 24: 032006
- 29 Kim C H, Ahn D C. Coaxial monitoring of keyhole during Yb:YAG laser welding. *Opt Laser Tech*, 2012, 44: 1874–1880
- 30 Gao J, Qin G, Yang J, et al. Image processing of weld pool and keyhole in Nd:YAG laser welding of stainless steel based on visual sensing. *Trans*

- Nonfer Met Soc China, 2011, 21: 423–428
- 31 Zhang Y, Zhang C, Tan L, et al. Coaxial monitoring of the fibre laser lap welding of Zn-coated steel sheets using an auxiliary illuminant. *Opt Laser Tech*, 2013, 50: 167–175
- 32 Nilsen M, Sikström F, Christiansson A K, et al. In-process monitoring and control of robotized laser beam welding of closed square butt joints. *Proc Manuf*, 2018, 25: 511–516
- 33 Marshall G J, Young W J, Thompson S M, et al. Understanding the microstructure formation of Ti-6Al-4V during direct laser deposition via *in-situ* thermal monitoring. *JOM*, 2016, 68: 778–790
- 34 Chivel Y. Optical in-process temperature monitoring of selective laser melting. *Phys Proc*, 2013, 41: 904–910
- 35 Grasso M, Demir A G, Previtali B, et al. *In situ* monitoring of selective laser melting of zinc powder via infrared imaging of the process plume. *Robot Comput-Integr Manuf*, 2018, 49: 229–239
- 36 Santhanakrishnan S, Kovacevic R. Hardness prediction in multi-pass direct diode laser heat treatment by on-line surface temperature monitoring. *J Mater Process Tech*, 2012, 212: 2261–2271
- 37 Schmailzl A, Steger S, Hierl S. Process monitoring at laser welding of thermoplastics. *Laser Tech J*, 2015, 12: 34–37
- 38 Doubenskaia M, Bertrand P, Pinon H, et al. On-line optical monitoring of Nd: YAG laser lap welding of Zn-coated steel sheets. In: Proceedings of IV International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. Munich, 2007. 547–552
- 39 Smurov I. Laser process optical sensing and control. In: Proceedings of IV International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. Munich, 2007. 537–546
- 40 You D Y, Gao X D, Katayama S. Review of laser welding monitoring. *Sci Tech Weld Joining*, 2014, 19: 181–201
- 41 Shibahara M, Ikushima K, Itoh S. Development of *in situ* measurement system for welding deformation using digital cameras. *Sci Tech Weld Joining*, 2012, 17: 511–517
- 42 Dorsch F, Braun H, Keßler S, et al. NIR-camera-based online diagnostics of laser beam welding processes. SPIE, 2012, 8239: 82390T
- 43 Dorsch F, Braun H, Keßler S, et al. Process sensor systems for laser beam welding. *Laser Tech J*, 2012, 9: 24–28
- 44 Kruth J P, Duflou J, Mercelis P. On-line monitoring and process control in selective laser melting and laser cutting. In: Proceedings of the 5th Lane Conference, Laser Assisted Net Shape Engineering. 2007. 23–37
- 45 You D, Gao X, Katayama S. Multiple-optics sensing of high-brightness disk laser welding process. *NDT E Int*, 2013, 60: 32–39
- 46 Norman P, Engström H, Gren P, et al. Correlation between photodiode monitoring and high speed imaging of the dynamics causing laser welding defects. *J Laser Appl*, 2008: 829–837
- 47 Sichani E F, De Keuster J, Kruth J P, et al. Monitoring and adaptive control of CO₂ laser flame cutting. *Phys Proc*, 2010, 5: 483–492
- 48 Chivel Y, Inyutin A, Vatkin M, et al. The system of laser sintering process monitoring and adaptive control. SPIE, 2007, 6731: 673125
- 49 Kawahito Y, Katayama S. In-process monitoring and adaptive control for stable production of sound welds in laser microspot lap welding of aluminum alloy. *J Laser Appl*, 2005, 17: 30–37
- 50 Kawahito Y, Kito M, Katayama S. In-process monitoring and adaptive control for gap in micro butt welding with pulsed YAG laser. *J Phys D-Appl Phys*, 2007, 40: 2972–2978
- 51 Hu D, Kovacevic R. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing. *Int J Machine Tools Manu*, 2003, 43: 51–60
- 52 Hofman J T, Pathiraj B, van Dijk J, et al. A camera based feedback control strategy for the laser cladding process. *J Mater Process Tech*, 2012, 212: 2455–2462
- 53 Heralić A, Christiansson A K, Hurtig K, et al. Control design for automation of robotized laser metal-wire deposition. *IFAC Proc Volumes*, 2008, 41: 14785–14791
- 54 Nicolosi L, Abt F, Blug A, et al. A novel spatter detection algorithm based on typical cellular neural network operations for laser beam welding processes. *Meas Sci Tech*, 2011, 23: 015401
- 55 Luo M, Shin Y C. Estimation of keyhole geometry and prediction of welding defects during laser welding based on a vision system and a radial basis function neural network. *Int J Adv Manuf Tech*, 2015, 81: 263–276
- 56 Tan W, Bailey N S, Shin Y C. Investigation of keyhole plume and molten pool based on a three-dimensional dynamic model with sharp interface formulation. *J Phys D-Appl Phys*, 2013, 46: 055501
- 57 Akbari M, Saedodin S, Panjehpour A, et al. Numerical simulation and designing artificial neural network for estimating melt pool geometry and temperature distribution in laser welding of Ti₆Al₄V alloy. *Optik*, 2016, 127: 11161–11172

- 58 Huang W, Kovacevic R. A neural network and multiple regression method for the characterization of the depth of weld penetration in laser welding based on acoustic signatures. *J Intell Manuf*, 2011, 22: 131–143
- 59 Park H, Rhee S, Kim D. A fuzzy pattern recognition based system for monitoring laser weld quality. *Meas Sci Tech*, 2001, 12: 1318–1324
- 60 Park Y W, Kim T, Rhee S. Development of a monitoring system for quality prediction in laser marking using fuzzy theory. *J Laser Appl*, 2007, 19: 55–63
- 61 Alimardani M, Toyserkani E. Prediction of laser solid freeform fabrication using neuro-fuzzy method. *Appl Soft Comput*, 2008, 8: 316–323
- 62 Petković D, Nikolić V, Milovančević M, et al. Estimation of the most influential factors on the laser cutting process heat affected zone (HAZ) by adaptive neuro-fuzzy technique. *Infrared Phys Tech*, 2016, 77: 12–15
- 63 Ding Y, Yang L J, Hong M H. Enhancement of pulsed laser ablation assisted with continuous wave laser irradiation. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 034211

Advances in *in-situ* monitoring technology for laser processing

DING Ye^{1,†}, XUE Yao^{3,†}, PANG JiHong⁴, YANG LiJun^{1*} & HONG MingHui^{2*}

¹ Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structures Manufacturing, Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

² Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 117583, Singapore;

³ Laser and Opto-electronic Intelligent Manufacturing Centre, Wenzhou University, Wenzhou 325000, China;

⁴ College of Mechanical and Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China

† These authors contributed equally to this work.

Laser processing is an advanced non-contact processing technology. Photo-physical and photo-chemical reactions are mainly responsible for the processing of matter during the laser-matter interaction. Nowadays, laser processing has vast application values in many fields, such as aeronautics and astronautics, automobile manufacturing, health and medical community, instrument and apparatus and nuclear industry. With constantly deepening industrialization, higher demands for processing efficiency and quality are raised for laser processing. Comparing to high-cost ultra-short pulsed laser, it is more reasonable and affordable to apply monitoring technology to observe and regulate the laser processing, which can achieve similar outcomes. The conventional off-line monitoring technology analyzes the machining process and detects when the laser processing is finished, resulting in the poor timeliness and low working efficiency. This technology cannot be applied in mass industrial production when dealing with complex working condition as well as workpiece with diversified structures and components. Hence, *in-situ* monitoring technology has been widely employed as a necessary supplementary means for laser processing. In this paper, the interaction mechanism between laser and matter is firstly analyzed in the time scale. Various physical phenomena during the interaction between the laser with different pulse durations and matter are clarified, from which the pointcut for *in-situ* monitoring technology is specified. Systematic reviews on the applied *in-situ* monitoring technology during laser processing home and abroad are established. The working principle, system configuration as well as advantages and disadvantages of the *in-situ* monitoring technologies based on individual acoustic sensor, spectrometer, photodiode, visual sensor and temperature sensor are analyzed in detail. Meanwhile, the application status including the combination of these sensors and the combination of these sensor and artificial intelligence are elaborated. The development trend of the *in-situ* monitoring technology for laser processing based on the existing deficiencies is prospected.

laser processing technology, *in-situ* monitoring, sensor, artificial intelligence

PACS: 07.05.Hd, 07.05.Kf, 07.07.Df, 42.62.Cf

doi: 10.1360/SSPMA2018-00311