DOI：10.3901/JME.2025.01.305

异质多元多层复合材料激光微细加工研究进展*

郑李娟 孙 勇 徐向前 余举满 王 军 王成勇
(1. 广东工业大学机电工程学院 广州 510006；
2. 高性能工具全国重点实验室 广州 510006)

摘要：高端印制电路板是一种典型的异质多元多层复合材料，其上孔、槽、线路和图案等微细结构的加工质量决定了芯片、航空航天、5G/6G 通信、超算等核心电子器件的使役性能。随着印制电路板材料组成越来越复杂、加工尺度极端微细化、加工质量要求高且评价体系复杂等，为高端印制电路板的孔、槽等微细结构激光加工带来巨大挑战。针对异质多元多层复合材料激光微细加工技术的研究进展进行综述，系统分析新材料、极端尺度微细结构对激光微细加工工艺带来的技术变革，并指出其面临的技术挑战和未来的发展方向，旨在为高端印制电路板的微细结构激光加工制造提供指导和借鉴。

关键词：印制电路板；异质多元多层；复合材料；微细结构；激光加工
中图分类号：TG156

Laser Micromachining of Heterogeneous Multi-layer Composite Materials: A Review

ZHENG Lijuan SUN Yong XU Xiangqian YU Juman WANG Jun WANG Chengyong
(1. School of Electromechanical Engineeing, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006);
2. State Key Laboratory for High Performance Tools, Guangzhou 510006)

Abstract：High-end printed circuit board is the typical heterogeneous multilayer composite material. The quality of microstructures such as holes, slots, circuits, and patterns directly determine the operational performance of electronic devices in semiconductors, aerospace, 5G/6G communications, and supercomputing. With the increasing complexity of printed circuit board materials and processing quality evaluation systems, the miniaturization of processing scales, and the high requirements for processing quality such as consistency and reliability, laser processing of high-end PCB is confronted with great challenges. This article provides a comprehensive review of the research progress in laser micromachining technology for heterogeneous multilayer composite materials. It systematically analyzes the technological changes brought about by new materials and extreme-scale structures in laser micromachining processes and identifies the technical challenges and future development directions. The aim is to provide guidance and reference for the manufacture of microstructures in high-end printed circuit boards through laser processing.

Key words：printed circuit board；heterogeneous；composite material；microstructure；laser

0 前言

印制电路板(Printed circuit board，PCB)是电子系统安全可靠运行的核心基础件，为电子系统提供了元器件机械装配支撑和电气连接的作用，广泛应用于半导体集成电路、人工智能、航空航天、4G/5G/6G 移动通信、超级计算机和高性能服务器等国家发展战略核心领域。2023 年全球 PCB 市场规模预估达到 783.67 亿美元，中国是全球 PCB 的主要市场[1](数据来源：Prismark)。孔和槽是印制电路板上组成线路和图案的最基本结构，其中孔起到各层间的电气连接、信号传输，以及电子器件的定位与固定作用；槽起到制作电路、隔离表面放电、降低电磁干扰等功能；图案的标刻起到防伪、标记信息等作用；而极窄的线宽线距可以实现芯片更高的封装效率，是芯片载板等高端印制电路板制造的核

* 国家自然科学基金优秀青年基金(52122510)、国家自然科学基金面上(52375415)和鹏鼎控股(深圳)股份有限公司产学研(19HK0062)资助项目。20240219 收到初稿，20240622 收到修改稿

心难点。印制电路板上孔、槽、图案的加工质量以及线宽线距的大小决定了印制电路板的加工质量和电子器件的使役性能。

目前印制电路板常用的加工方式为机械加工、激光加工和化学蚀刻加工。相较于机械加工刀具易磨损、易折断等问题，以及化学蚀刻加工效率低、加工质量一致性差(过蚀刻和欠蚀刻)、化学污染等问题，激光加工具有高精度、高质量和清洁环保等特点。印制电路板制造行业内激光加工多采用 CO_2 激光(毫秒脉宽量级)和 Nd:YAG(纳秒脉宽量级)等脉冲宽度较长的激光，超快激光的应用还只是少数，大多数还在研究过程，相应超快激光加工装备也在开发中。其中 CO_2 激光能量高、加工效率高，适用于 50 μm 以上直径盲孔和槽的加工[2]，且由于铜箔基材对 CO_2 激光吸收率较低[3]，适用于先用化学药品对铜箔进行棕化的情况。对于 Nd:YAG 紫外纳秒激光，各种基材对紫外激光有着较高的吸收率，且纳秒激光与材料作用时间相较于 CO_2 激光较短，适合 50μm 以下的微孔、槽制作过程[2]，以及线路的制作和表面图案的标刻。超快激光由于其与材料的作用时间极短，加工热效应更小、加工精度更高，可用于芯片载板、高密度互联板、柔性电路板等高端印制电路板的微孔(孔径≤20 μm)、微槽、高质量线路(8/8 μm 以下)加工。表 1 所示为不同印制电路板的板材特点、加工难点，以及加工适合采用的激光类别、激光加工结构和尺寸要求。由表 1 可知，对于各类印制电路板复合材料的共性难点，从组成材料上来看，各类印制电路板组成基材种类复杂，涉及如铜箔、铝板等的金属类基材，聚酰亚胺、环氧树脂等的高分子材料基材，以及玻璃纤维布、陶瓷颗粒等的硬脆填料基材，材料各向异性显著，使得各类板材普遍加工难度高。其次，从从加工尺寸上看，加工尺寸普遍减小，且深径比急剧上升，已达传统加工方式极限。最后，从各类板材的加工质量要求上来看，首先各类板材的加工质量要求不断提高，其次对于印制电路板加工质量的评价方式日趋复杂，如孔径和深径比的尺寸精度要求，锥度和圆度的形位精度要求，以及热影响、重铸层、毛刺和裂纹等的质量精度要求，日益上升的加工需求导致印制电路板加工难度不断提高，以满足后续孔内钻污去除、镀铜和层压等工序的质量要求。

表 1 不同应用领域印制电路板加工所采用的激光种类及激光加工结构和要求

板材类型	板材特点与加工难点	应用领域	采用激光种类	加工要求及尺寸
芯片载板[4]	加工尺寸极小，质量要求极高；传统加工方法在加工尺寸和加工质量上已达极限	半导体、通信、超级计算机、消费电子等	200～1 064 nm 波长、皮秒至飞秒脉宽量级的激光	热影响小、质量高的高密度微孔群(**孔径≤20 μm**)加工，精密图案和信息的标刻，极窄**线宽线距**(约 **10/10 μm**)加工，高质量线路加工
陶瓷基板[5]	板材极硬、极脆；不易加工，加工时容易产生裂纹和碎裂问题	半导体、汽车电子、航空航天、新能源等	355～1 064 nm 波长、毫秒至飞秒脉宽量级的激光	热影响小、无裂纹和喷溅物、重铸层少的高深径比微孔(**孔径约 100-500 μm**)加工
高密度互联板[6]	孔密度和布线密度极高，层数多(20 层以上)；孔加工形位精度要求极高	消费电子、通信、汽车电子等	355～1 064 nm 波长、纳秒至飞秒脉宽量级的激光	热影响小、质量高、高深径比的高密度微孔(**孔径约 50 μm** ，层数约 6-20 层)加工，无毛刺的高质量激光切割加工
高频电路板[7]	板材同时含玻璃纤维和陶瓷颗粒填料；加工难度大，孔壁质量要求极高	通信、航空航天、高性能计算机等	355～1 064 nm 波长、纳秒至飞秒脉宽量级的激光	热影响小、孔壁质量高的微孔(**孔径约 100 μm**)加工，无毛刺的高质量外形铣削和切割加工
高速电路板[8]	板材同时含玻璃纤维和硬质填料，层数多(10 层以上)；加工难度大，加工尺寸大	高性能服务器、基站、高端数据存储设备等	355～1 064 nm 波长、毫秒至纳秒脉宽量级的激光	热影响小、孔壁粗糙度小的高密度、高深径比微孔(**孔径约 100 μm，板层数约 10 层以上**)加工
刚挠结合板[9]	软板和硬板相结合；软板和硬板材料性能差异极大，容易造成分层、膨胀变形等质量问题	通信、航空航天、国防、汽车、医疗等	355～1 064 nm 波长、纳秒至飞秒脉宽量级的激光	热影响小、质量高的微孔(**孔径约 100 μm** 加工，高质量的定深铣削加工
金属基板[10]	板材内含金属芯板；加工难度高，加工质量要求高(孔、槽无毛刺，内部无钻污)	汽车电子、大功率电气设备等	355～1 064 nm 波长、毫秒至飞秒脉宽量级的激光	热影响小、无毛刺的微孔(**孔径约 200 μm**)加工，高质量的 V 形槽铣削加工
柔性电路板[11]	板材柔软；加工时易发生变形，对加工质量和形位精度要求极高	军工、仪器仪表、通信基站、消费电子等	355～1 064 nm 波长、毫秒至飞秒脉宽量级的激光	热影响小、质量高的微孔(**孔径约 20 μm**)加工，高质量的槽和线路(**宽约 30 μm**)加工

随着印制电路板的不断发展，其孔、槽朝着尺寸小(微孔孔径 20 μm 以下，槽线宽/线距最小达 8 μm/8 μm)、孔群密度大(高达 1 000 孔/cm^2)、深径比大(高于 20∶1)、高多层(最高达 100 层)和加工质量要求高等特点发展，传统机械加工方式普遍存在刀具易磨损、断刀随机、加工尺寸受限等问题；化学蚀刻加工存在效率低、易出现过刻和欠刻等问题；传统的长脉宽激光加工也存在孔形差、热影响区域大、加工深度受限等问题。而超快激光由于其相对更高的加工质量和加工精度的优势开始被行业采用。

本文在本课题组先前发表的印制电路板精密孔机械加工综述[12]的基础上，对以孔/槽加工为代表的印制电路板多元多层复合材料激光微细加工研究进行综述，介绍了近年高端印制电路板复合材料激光加工理论和工艺等方面的研究进展，总结了印制电路板复合材料激光加工工艺的相关研究进展。针对印制电路板复合材料激光加工目前存在问题，提出了高端印制电路板复合材料激光加工未来的研究重点和发展方向。

1　异质多元多层印制电路板复合材料激光微细加工机理研究进展

印制电路板作为典型的异质多元多层复合材料，通常由金属材料(如铜箔、铝板等)、非金属高分子材料(聚酰亚胺、环氧树脂等)以及非金属硬脆材料(玻璃纤维、陶瓷颗粒等)等基材构成。各种基材对不同激光的吸收率、反射率差异较大(如铜等金属材料对波长较长的 1 064 nm 红外激光吸收率低于 10%，而对波长较短的 355 nm 紫外激光吸收率达到 70%。同样，聚酰亚胺等非金属材料对激光的反射率极低，对紫外波长激光的吸收率也远大于对红外波长激光的吸收率)，不同激光对于不同基材的去除机理也各不相同，在激光加工过程中往往出现材料去除不均以及烧蚀过度等加工质量问题。

明确不同种类激光与各种基材作用时的激光加工机理，对激光选型、揭示印制电路板复合材料激光微孔/槽成形过程、优化激光加工工艺，以及提高加工质量有着重要意义。本节从印制电路板复合材料不同种类基材和不同种类激光角度出发，综述印制电路板复合材料基材激光加工机理的研究进展。

1.1　异质多元多层印制电路板复合材料单一基材激光加工机理

1.1.1　金属基材激光加工机理研究

不同脉冲宽度的激光与材料的作用时间存在差异，导致金属基材在不同种激光的作用下去除机理不同。当金属基材与脉冲宽度在皮秒、飞秒量级(10^{-15}～10^{-12} s)的脉冲激光作用时，激光与材料的作用机理较为复杂，目前学者普遍按时间的演化过程将光子与电子的相互作用过程分为“电子的光激发过程”与“加热过程”[13]，也有学者称为“光化学反应(作用)”和“光热反应(作用)”[14]。超快激光脉冲持续时间极短，被辐照区域材料吸收光子能量，并在空间上以纳米量级的吸收层深度、在时间上以短于电子-声子耦合的时间迅速沉积，电子瞬时温度极高并远超材料熔化甚至汽化温度，导致材料瞬间汽化蒸发，并产生密度、温度和压力极高的等离子体气团向外喷发。而此时电子与晶格温度还未达到平衡，晶格还处于“冷”的状态，以此实现近似“冷”加工的材料去除。RETHFELD 等[15]探究了飞秒激光作用下金属材料激光烧蚀过程中电子激发、材料熔化和材料去除过程，并表明辐照后材料的状态在很大程度上取决于材料的类型和激光的性质。DAUSINGER 认为[16]当激光脉宽大于 1 ps 时，碰撞电离对材料烧蚀起主要作用，激光脉宽小于 1 ps 时，随着脉宽的减小光致电离逐步成为造成材料烧蚀的主要原因。

也有学者认为“静电分离”是金属基材在超快激光作用下的材料去除机理：超快激光的脉冲宽度远小于材料中电子与声子的耦合时间，表层被激光辐照区域材料电子电离后瞬间被加速到极高的动能，此时靶材中的离子来不及反应，仍处于“冷”温度状态，在靶材表面形成正负电荷分离的强静电场，静电场加速离子使其脱离靶材表面最终实现材料去除，实现材料的近似“冷”加工。刘院省[17]探究了不同脉冲宽度作用下金属铜基材的刻蚀机理，探究了“热平衡刻蚀”和“非平衡静电场刻蚀”两种机制，认为在皮秒激光作用下铜是通过“静电分离”作用而导致原子被“拉”出材料表面从而实现类似“冷加工”的材料去除。

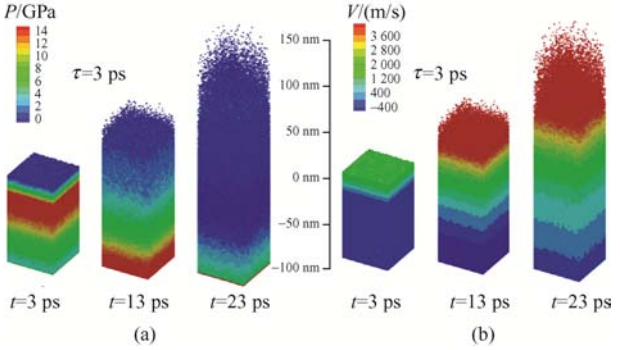
当金属基材与脉冲宽度为 10^{-9} s 的纳秒激光(如 Nd:YAG 激光等)作用时，由于脉冲宽度时间足够能量由自由电子传递到晶格，因此认为电子和晶格温度达到了平衡[18]。此时热量通过电子漂移和晶格-晶格耦合作用向材料的激光辐照区域外进行扩散，当达到熔点和沸点后材料由固态向液态转变，通过熔融喷溅和汽化实现热烧蚀材料去除[19]。如 ELSIED 等[20]探究了红外纳秒激光作用下铝基材的材料去除过程，并探究了材料性能、激光通量、环境气体和环境压力对激光烧蚀的影响，铝基材在红外纳秒激光作用下的去除机理属于热烧蚀去除；张恒等[21]通过激光微孔加工实验和数值模拟的方法探究了纳秒激光加工铜基材的材料加工机理，认为纳秒激光聚焦在金属表面并形成烧蚀痕迹，是纳秒激光微加工的直接原因。

而当金属基材与脉冲宽度在 10^{-6}～10^{-3} s 的长脉宽激光(如 CO_2 激光等)以及连续激光作用时，高能激光束聚焦后辐照于加工靶材表面，被辐照区迅速产生大量热效应[22]使得材料的受辐照区域在极短时间内产生升温、融化、汽化，汽化产生气体对

熔融体产生反冲压力，驱动熔融体向外喷溅从而实现材料去除[23]。陈壹华[24]探究了 CO_2 激光加工高密度互联板微孔工艺，探究了激光加工参数对成孔孔径、孔深和加工质量的影响，认为 CO_2 激光加热材料表面铜金属基材时，激光辐照区域材料表面温升，材料的相变以熔化为主，熔融材料通过反冲压力排出实现材料去除。由于印制电路板复合材料铜基材对 CO_2 激光吸收率较低，ZHOU 等[25]采用 H_2SO_4/H_2O_2 溶液对 CO_2 激光加工区域铜箔颜色和微形貌进行处理的方式，增大了铜对 CO_2 激光的吸收率，并对材料的 CO_2 激光加工机理进行了分析，发现棕色氧化产生的蜂窝结构增加了 CO_2 激光吸收的传输路径，使得对激光的吸收率提高了近 20 倍，增强了 CO_2 激光辐照区域的热效应从而实现铜箔材料的去除。

有学者认为金属基材的激光加工机理与激光加工过程中产生的机械应力波有关：在超快激光脉冲作用下，能量沉积区域并未达到材料的熔点，但由于超快激光高峰值功率带来的机械应力波作用，被辐照区域材料发生断裂形成团簇，进而被去除。此外，也有学者认为当飞秒激光作用于金属时，材料内部产生“高温-低温-高温”不同的温度分层，高温区域的材料发生热熔化，而低温的区域材料可能并未熔化，这就使得不同区域的材料相变情况出现差异，熔融的材料结合力较弱，在机械应力作用下容易被拉伸而破碎，从而使材料去除。MEDVEDEV 等[26]探究了激光加工过程中，包括铜基材和铝基材等各种金属的电子激发引起的机械应力如何影响材料的性能及其稳定性；KUDRYASHOV 等[27]针对铝基材，通过双脉冲飞秒激光加工实验和理论模拟相结合的方法，深入探讨了飞秒双脉冲激光在铝基材上的烧蚀过程，发现通过飞秒激光激发离子亚晶格的亚皮秒振动(图 1)，可以实现原子运动的“全光控制”，同时也证明了激光与材料作用过程中机械应力对于材料去除的影响。

因此，不同时间和空间尺度下印制电路板金属基材的激光加工机理如图 2 和表 2 所示。当激光与



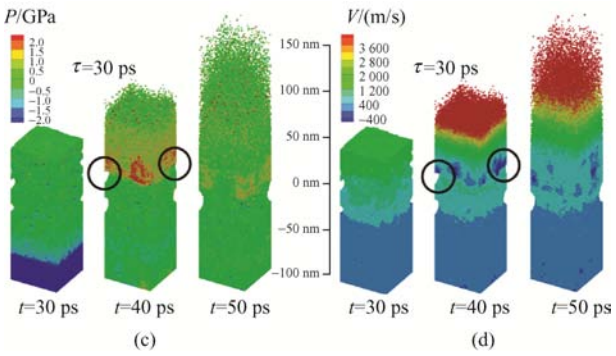


图 1 超快激光作用过程中第二脉冲延迟对激光诱导的应力弛豫动力学的影响(黑圈位置为机械应力波传递引起空洞)[27]

如铜、铝等印制电路板复合材料金属基材作用时，少数学者认为材料的去除机理与电子的光激发与加热过程相关，还有的学者认为是激光与材料作用过程中产生的机械应力波有关，但多数学者认为与脉冲作用下产生的热烧蚀效应有关。

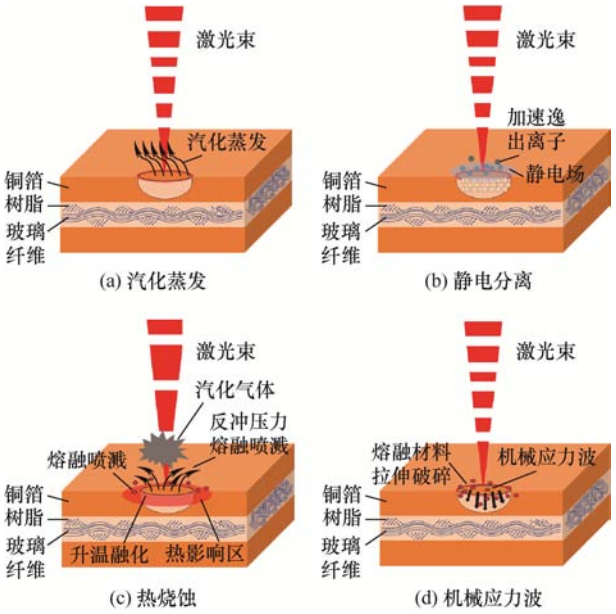


图 2 印制电路板金属基材激光加工机理示意图

表 2 印制电路板金属基材激光去除机理相关研究

文献编号	激光种类	材料	激光加工机理
DAUSINGER[16]	飞秒激光	Al	材料瞬间汽化蒸发
刘院省[17]	1 064 nm 红外皮秒激光	Cu	静电分离
ELSIED[20]	1 064 nm 红外纳秒激光	Al	热烧蚀去除
张恒[21]	351 nm 紫外纳秒激光	Cu	热烧蚀去除
陈壹华[24]	CO_2 激光	Cu	热烧蚀去除
ZHOU[25]	CO_2 激光	Cu	热烧蚀去除
MEDVEDEV[26]	飞秒激光	Cu、Al 等	非热相变引起的机械应力波
KUDRYASHOV[27]	飞秒激光	Al	晶格振动引起的机械应力波

1.1.2　非金属高分子基材激光加工机理研究

对于印制电路板复合材料的非金属基材，如环氧树脂、聚酰亚胺(PI)、聚四氟乙烯(PTFE)等高分子材料的激光加工机理一直没有统一的定论，但大多学者普遍将高分子材料的激光去除机理分为：光化学反应下的去除过程和光热反应下的材料去除过程[28]。

高分子材料与激光相互作用始于分子吸收光子能量完成基态到激发态的跃迁，激发态失活方式的不同对应着光能转化为热能或是化学能。当单一高分子基材与如 CO_2 激光等长脉宽激光作用情况下，材料吸收的光子能量超过高分子材料的化学键能时，发生光化学反应并实现材料的去除，其他情况则发生热烧蚀去除。欧长劲等[29]探究了 CO_2 激光切割高分子 PET 材料过程，认为高分子材料长脉宽激光切割过程就是将热量载荷施加在高分子材料上，实现包括光能向热能的转化、热能在工件上的转化与分布和工件与周围环境热交换。材料将吸收的能量累积转化为热能，从而导致材料的熔化与气化蒸发，最终实现材料的去除。

当与紫外纳秒激光(UV 激光)作用时，由于 UV 激光波长较短、能量较高的特性，通过光化学反应破坏材料的分子键与离子键，再通过激光热作用的累积，使得材料发生熔化、蒸发，从而实现材料去除。如 YUNG 等[30]使用紫外纳秒激光对聚酰亚胺材料进行激光微孔加工，观察分析了聚酰亚胺表面化学成分和结构的变化，发现激光烧蚀过程先破坏了化学键释放了 O 原子和 N 原子，接着热作用的累积使得在烧蚀区形成熔融喷溅的纳米粒子，其主要由碳团簇组成(图 3)。此外对于纳秒激光，激光的能量密度会影响激光与高分子材料的作用过程，如李家峰等[31]针对聚醚醚酮材料，采用 1 064 nm 红外纳秒激光进行表面改性处理，并观察分析了材料表面改性后的微观结构和性能，发现当激光能量密度低于 60 J/cm^2 时聚醚醚酮高分子材料主要通过光热作用实现材料去除和表面改性，当激光能量密度大于 60 J/m^2 时聚醚醚酮高分子材料光热作用增强，并伴有光化学反应的化学键断裂过程；林素颖等[32]针对聚酰亚胺薄膜材料，研究了 355 nm 紫外纳秒激光作用下聚酰亚胺薄膜材料 LPSS 条纹结构的制备，认

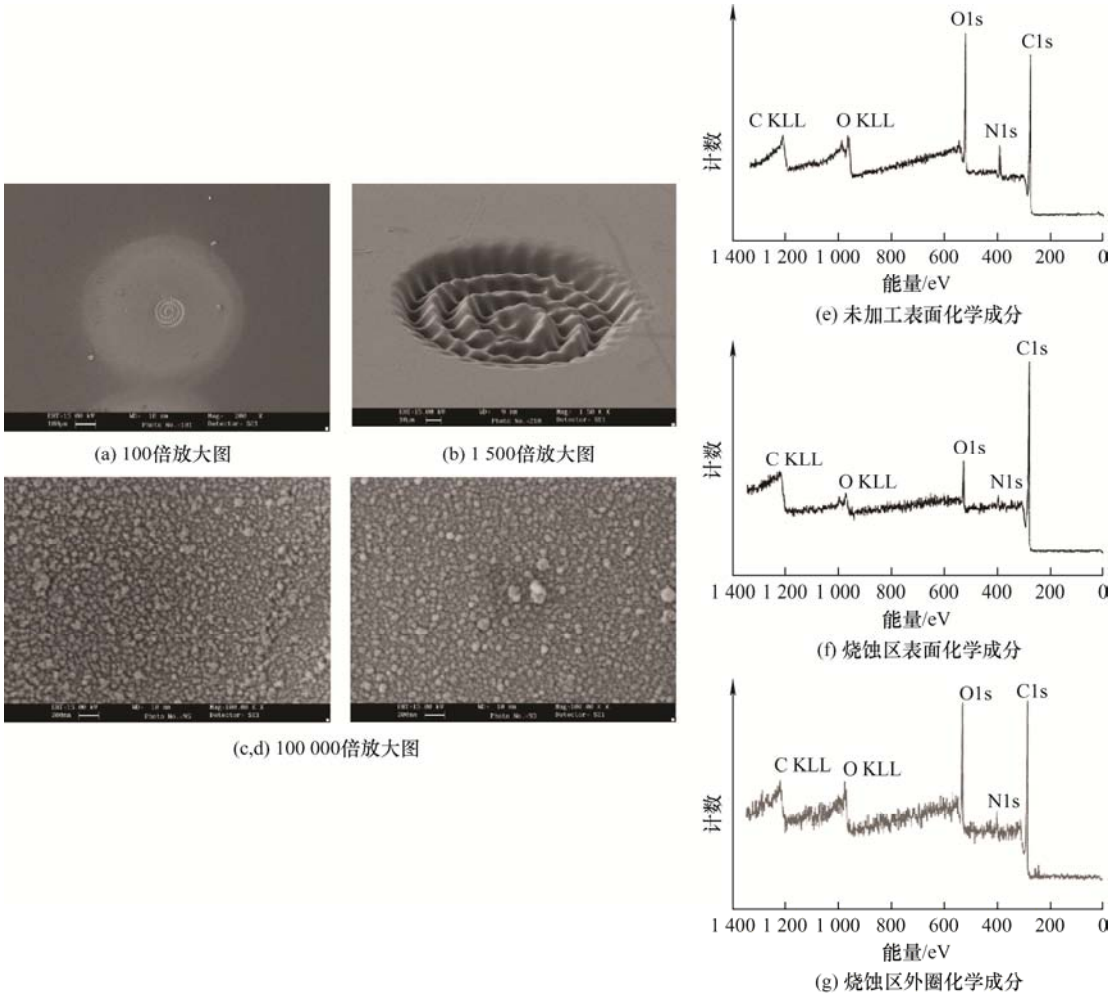


图 3　聚酰亚胺材料紫外纳秒激光加工 SEM 图和 XPS 图[30]

为由于大部分聚合物对紫外光的吸收率较高，经紫外光的辐照容易激发自由基，导致分子链的断裂，影响材料在力学、光学等方面的性能，最终可导致材料去除。

当高分子材料与如皮秒和飞秒激光的超短脉冲激光作用时，材料内部分子吸收光子能量并处于激发状态，此时分子电荷密度分布、构型、化学活性等性质发生变化，使受激发的分子处于不稳定状态，极易衰变回归稳态。其中分子内或分子间的能量转移引起光化学反应的非辐射衰变，被认为是超快激光与高分子树脂材料的主要作用机制，在宏观上表现为化学键的断裂和光降解[33]。HAM 等[34]认为超快激光与高分子材料如聚酰亚胺作用时，高分子材料对激光能量成线性吸收。在低重频、低脉冲数、高扫描速度下，作用机理为冷消融；在高重频下，作用机理为热烧蚀和碳化；QIN 等[35]针对聚四氟乙烯材料，探究了红外皮秒脉冲激光、紫外皮秒脉冲激光和紫外纳秒脉冲激光刻蚀 PTFE 材料的加工机理，发现红外皮秒脉冲激光是以光热作用为主，紫外皮秒脉冲激光刻蚀 PTFE 是以光化学作用为主，紫外纳秒脉冲激光刻蚀 PTFE 为光热和光化学的协同作用。

因此，不同时间和空间尺度下印制电路板非金属高分子基材的激光加工机理如图 4 和表 3 所示，主要分为两种，一种是光化学反应，激光的光子能量直接打破高分子基材的化学键，发生解聚反应分解成多种片段产物，材料得以去除并达到加工的目的；一种是光热反应，高分子基材经高温熔化和蒸发去除，实现加工的效果。

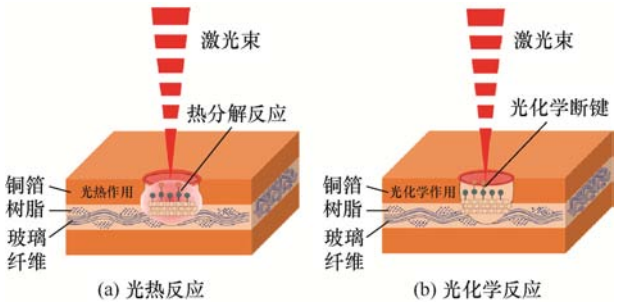


图 4 印制电路板高分子基材激光加工机理示意图

表 3 印制电路板高分子基材激光加工机理相关研究

文献编号	激光种类	材料	作用机理
欧长劲[29]	CO_2 激光	PET 材料	光热作用热烧蚀去除
YUNG[30]	355 nm 紫外纳秒激光	聚酰亚胺	光化学作用断键，光热作用累积热量
李家峰[31]	1 064 nm 红外纳秒激光	聚醚醚酮	光热作用
林素颖[32]	355 nm 紫外纳秒激光	聚酰亚胺	光化学作用
HAM[34]	355 nm 紫外皮秒激光	聚酰亚胺	在低重频下为光化学反应，在高重频下为光热反应
QIN[35]	1 064 nm 红外皮秒激光、355 nm 紫外皮秒激光、355 nm 紫外纳秒激光	聚四氟乙烯	红外皮秒脉冲激光加工机理以光热作用为主，紫外皮秒脉冲激光加工机理以光化学作用为主，紫外纳秒脉冲激光加工机理为光热和光化学的协同作用

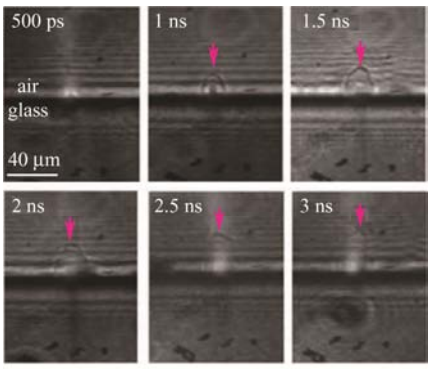
1.1.3 非金属硬脆材料基材激光加工机理研究

对于印制电路板复合材料的硬脆材料基材，如陶瓷、玻璃纤维等，当 CO_2 激光等毫秒脉冲宽度的激光作用于硬脆材料表面时，材料的激光加工机理本质上是一个热融化去除过程，激光聚焦后照射在硬脆材料表面形成熔池，高密度能量被加工区域材料吸收、累积，形成的高压蒸汽团产生反冲压力使得熔融材料排出，从而实现材料去除。陈振威[36]进行了钠钙玻璃的 CO_2 激光打孔和切割的研究，认为热烧蚀去除是 CO_2 激光加工玻璃材料的加工机理，并建立了传热模型对热分布进行模拟；贾贤石[37]探究了氧化铝陶瓷的毫秒激光微孔加工过程，认为氧化铝陶瓷在毫秒激光作用下是由于热量累积导致材料熔融汽化、喷溅去除，同时毫秒激光作用下会由于吸收增强而导致过度汽化烧蚀，造成孔口周围出现重铸层和裂纹等缺陷与损伤。

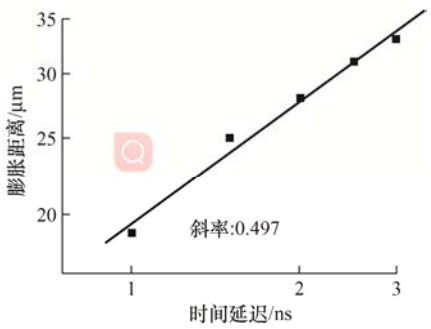
当 Nd:YAG 紫外纳秒激光作用于硬脆材料表面时，去除机理主要包括光热作用和光化学作用[38]。光热作用发生时，材料去除机理与长脉宽激光去除机理相同。而光化学作用发生时，材料直接吸收激光光子能量，导致其分子键断裂，晶粒被消融成为更小的分子,在外力作用下被去除[39]。WANG 等[40]探究了 Si_3N_4 陶瓷紫外纳秒激光微孔加工过程，在紫外纳秒激光作用下氮化硅会分解为液态硅和氮，发生氧化反应后生成一系列氧化物堆积在孔口。KACAR[41]和 HANON 等[42]分别探究了 Nd:YAG 紫外纳秒激光加工氧化铝材料微孔过程，研究了工艺参数对加工质量和形貌的影响，分别对加工过程中的熔融喷溅物的形成机理进行了探究，并对加工温度进行了仿真。

超快激光作用于硬脆材料表面时，由于非金属硬脆材料中没有大量的自由电子，所以需要激光激

发产生自由电子(种子电子)。材料中的价带电子吸收多个光子的能量，直接跃迁到导带发生光致电离，产生的自由电子作为种子电子与束缚电子和晶格发生相位碰撞并吸收激光能量，当种子电子的动能被加速到超过材料带隙时，下一次与价带电子的碰撞将使种子电子电离，产生低动能的自由电子，发生碰撞电离。碰撞电离过程不断重复进行，自由电子密度呈指数增长，即发生雪崩效应，最终达到等离子体临界密度，材料表面发生转变，能量累积后材料实现烧蚀去除。卞华栋等[43]通过数值模拟的方式，探究了红外飞秒激光脉冲在诱导石英玻璃的非线性电离过程中电子动量弛豫时间对于该电离过程的影响，探究了超快激光作用下飞秒脉冲与硬脆材料相互作用时内部的物理机理。魏健等[44]建立了基于飞秒激光抽运－探测原理的时间分辨阴影成像平台，观察了飞秒激光烧蚀石英微孔的超快过程图像，探究了超快激光与石英玻璃材料的作用过程(图 5 所示)。杨雪等[45]利用飞秒激光技术进行 BF33 硼硅玻璃的微结构加工，通过仿真模拟和实验观测等方式，探究了微结构加工工艺，分析了飞秒激光烧蚀透明电介质的机理。



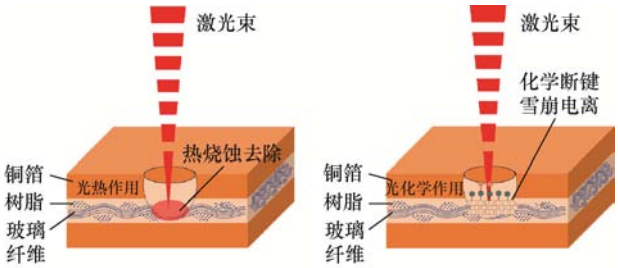
(a) 激光能量密度为0.16 J/cm^{2}时飞秒激光烧蚀石英玻璃的时间分辨阴影成像图



(b) 冲击波膨胀距离随时间延迟的变化

图 5　石英玻璃表面冲击波超快动力学[45]

因此，不同时间和空间尺度下印制电路板非金属硬脆材料基材的激光加工机理如图 6 和表 4 所示，主要分为两种：当作用的激光脉冲宽度较短时，硬脆材料基材中发生光化学作用，发生化学断键或电子发生雪崩效应实现材料的去除；而当激光脉冲宽度较长时，作用区域材料发生光热作用热融化并通过熔融喷溅实现去除。



(a) 光热作用　　(b) 光化学作用断键、雪崩电离

图 6　印制电路板非金属硬脆基材激光加工机理示意图

综上所述，不同时间和空间尺度下印制电路板金属基材、非金属硬脆材料基材和非金属高分子材料基材的激光加工机理对比如图 7 所示。金属基材如铜箔、铝板等的激光加工机理主要为超快激光作用下光化学作用导致的材料瞬汽化去除和静电分离去除，较长脉宽激光作用下光热作用导致的热烧蚀去除，以及激光引起的机械应力波实现的去除；非金属高分子材料如聚酰亚胺和环氧树脂等的激光加工机理主要分为光化学反应断键实现的材料去除，以及光热反应热量累积实现的材料去除；非金属硬脆材料基材如玻璃纤维、陶瓷颗粒等激光加工机理主要分为光热作用导致热量累积实现的材料去除，以及光化学反应导致的化学键断键、多光子电离和雪崩电离导致的材料去除。

表 4　印制电路板硬脆材料基材激光加工机理相关研究

文献序号	激光种类	材料	去除机理
陈振威[36]	CO_2 激光	钠钙玻璃	热烧蚀去除
贾贤石[37]	CO_2 激光	Al_2O_3 陶瓷	热烧蚀去除
WANG[40]	532 nm 绿光纳秒激光	Si_3N_4 陶瓷	光热作用热烧蚀和光化学作用断键
KACA^{R}[41]	紫外纳秒激光	Al_2O_3 陶瓷	热烧蚀去除
卞华栋[43]	800 nm 红外纳秒激光	石英玻璃	多光子电离和雪崩电离
魏健[44]	800 nm 红外飞秒激光	石英玻璃	自聚焦效应、电子发生电离后形成等离子体通道
杨雪[45]	343 nm 紫外飞秒激光	硼硅玻璃	多光子电离和雪崩电离
王禹茜[46]	1 030 nm 红外飞秒激光	TiC 陶瓷	多光子吸收诱导化学键断裂
STOIAN[47]	800 nm 红外飞秒激光	氧化铝陶瓷	多光子吸收，相爆炸

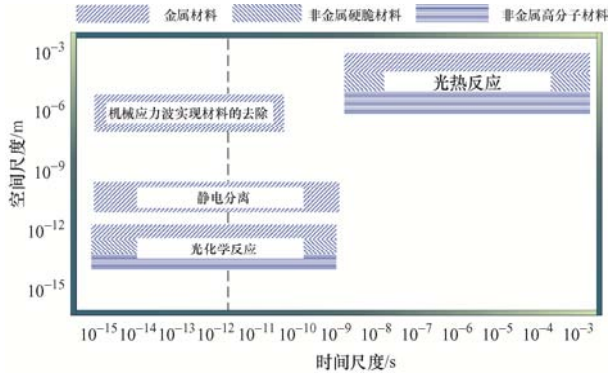


图 7 不同印制电路板基材激光加工机理对比图

1.2 异质多元多层印制电路板复合材料激光加工机理

印制电路板复合材料组成基材异常复杂，不同基材对不同种激光的响应不同，导致激光作用下印制电路板复合材料的加工机理并非其单一基材加工机理的简单叠加，而是一个高度复杂的过程。目前少数学者结合有限元仿真、分子动力学仿真等方式，对印制电路板复合材料的激光加工机理开展了相关研究。如孟雪[48]通过有限元差分计算，模拟得出了不同入射激光功率密度条件下印制电路板复合材料铜基材中电子和晶格温度随时间演化规律，并探究了激光作用于印制电路板复合材料表面时周期性表面结构的演化规律；徐梦廓[49]通过有限元仿真软件建立了 FR-4 的激光烧蚀模型，探究了印制电路板复合材料在 1 064 nm 的 YAG 激光作用下材料的去除机理，发现内部材料被激光作用产生的高压蒸汽挤压而向外喷射，从而实现材料去除并形成微孔。

除了印制电路板复合材料的激光加工去除过程的研究，印制电路板复合材料不同层基材之间接合面处的材料特性以及材料去除机理也值得关注，如铜基材与聚酰亚胺基材接合面处等。对于层压制成的印制电路板聚酰亚胺基材与铜基材之间除了存在物理接触并形成机械互锁外，还会存在界面化学成分具有显著变化的化学连接[50]，这使得激光在不同层基材连接界面处的材料去处机理异常复杂，除了存在热量传递外还会产生化学作用[51]。如黄欣[52]通过研究柔性电路板复合材料的红外飞秒激光加工过程，探究并发现了不同界面连接处的材料去除机理也并不相同，如“Cu-PI”界面与“PI-Cu”界面激光去除机理存在显著差异。陈志城等[53]通过实验发现材料去除过程中的光热反应使得与聚酰亚胺接触的铜熔化(图 8)，光化学烧蚀可以打断 Cu-O 键以及聚酰亚胺的 C-N 键和 C-C 键，进而通过反冲压力实现材料的去除。

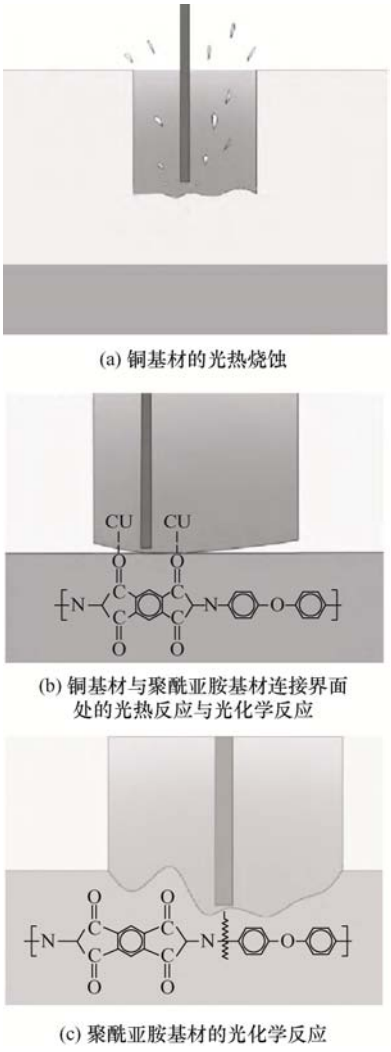


图 8 柔性电路板在 355 nm 皮秒激光作用下材料去除机理[53]

由于观测手段的缺乏，对于印制电路板复合材料主要采用有限元仿真和分子动力学仿真等方式探究异质多元多层印制电路板复合材料激光去除机理。目前针对印制电路板复合材料的去除机理研究较少，较多集中在印制电路板复合材料单一基材以及其他复合材料上，印制电路板复合材料激光去除机理的相关研究如表 5 所示。

表 5 印制电路板复合材料激光去除机理研究

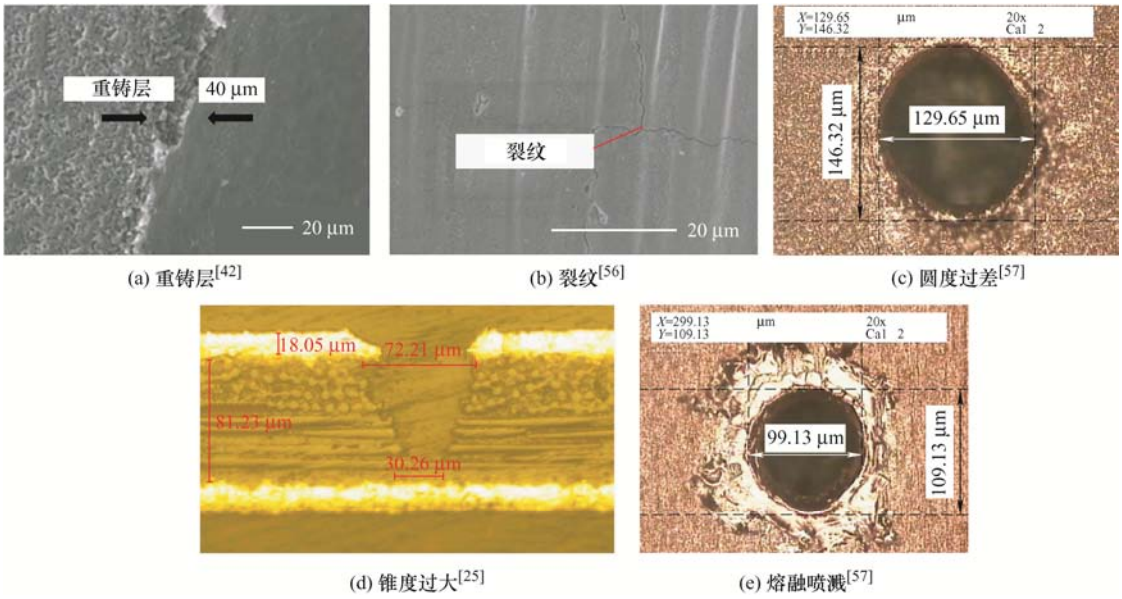
文献序号	激光	材料	研究方法	结论
孟雪[48]	800 nm 飞秒激光	铜箔基材	数值模拟，双温模型	飞秒激光加工区域分为烧蚀区、再沉积区和改性区
徐梦廓[49]	1 064 nmYAG 激光	FR-4	有限元仿真	内部材料被激光作用产生的高压蒸汽挤压而向外喷射，从而实现材料去除
黄欣[52]	1 030 nm 飞秒激光	柔性电路板复合材料	分子动力学仿真	在近红外飞秒激光与铜/聚酰亚胺界面作用机制方面，发现 Cu-PI 和 PI-Cu 界面作用机制存在显著差异
陈志城[53]	355 nm 皮秒激光	柔性电路板复合材料	试验结果观测、激光作用与化学键断键关系分析	紫外皮秒激光在聚酰亚胺-铜箔基材界面处的去除机理存在光热反应和光化学反应

2　异质多元多层印制电路板复合材料激光加工微孔/槽表面成形机理研究进展

孔和槽是组成印制电路板表面复杂图案和结构的最基本组成单位。印制电路板复合材料组成基材种类复杂，用于加工的激光种类多样，导致孔和槽等结构的成形机理存在显著区别。且由于基材物理化学性质上的差异，导致激光加工过程中会产生不同种类缺陷与损伤(如热影响、重熔层、喷溅和裂纹等)。因此，在印制电路板复合材料激光孔和槽等成形加工过程中，需要对激光成形过程机理进行区分与研究，实现激光加工质量的提升和精准调控。

2.1　微孔表面成形机理研究

印制电路板复合材料激光加工微孔成形机理的研究几乎没有，少数学者研究了微孔加工缺陷与损伤的形成过程。激光微孔加工过程可能产生孔口喷溅、重铸层、热损伤、裂纹、孔壁粗糙、锥度过大、孔底残胶、盲孔击穿、缩胶等激光诱导损伤现象，从而引发微孔质量问题[54]，进而影响电路板的可靠性和安全性，图 9 所示为激光微孔加工常见缺陷和质量问题。当激光能量密度大于材料的损伤阈值时，材料表面可能会发生一系列不可逆转的、破坏性的相互作用。



(a) 重铸层[42]　(b) 裂纹[56]　(c) 圆度过差[57]

(d) 锥度过大[25]　(e) 熔融喷溅[57]

图 9　激光孔加工常见缺陷

激光孔加工过程中，部分熔融液体通过蒸发方式排出，另一部分通过喷溅方式排出，未被完全排出的熔融液体将粘结在孔壁，冷却凝固后形成重铸层，并造成孔壁粗糙现象。熔融液体在冷却凝固形成重铸层的过程中由于剧烈的温度变化使材料收缩变形从而产生热应力，热应力发展到一定程度就会在重铸层及工件基体内产生微裂纹[25]。此外，激光能量过小会导致孔底残胶，能量过大则会导致盲孔击穿的问题。由于印制电路板不同基材对激光的吸收率不同，导致加工过程中不同层基材烧蚀程度不同，从而造成缩胶的现象。损伤和缺陷问题严重影响印制电路板激光加工质量以及后续工序[55]。

2.2　微槽表面成形机理研究

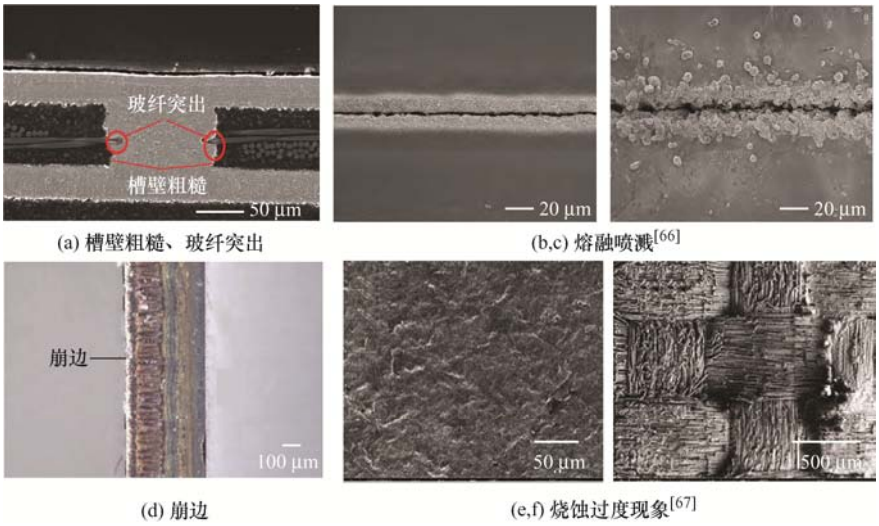
少数学者对印制电路板微槽表面成形机理进行了研究。对于印制电路板复合材料微槽结构的脉冲激光铣削、刻蚀加工过程，实质上仍是激光微孔加工过程的叠加[58-61]。加工区域的材料通过激光脉冲的逐点烧蚀、搭接去除，因此相邻脉冲之间的作用存在相互影响，材料的成形机理较为复杂[59]。激光光斑沿加工路径重叠后与材料发生作用，经过多次、往复的扫描加工后，材料被加工区域温度上升，最终通过融化、汽化、喷溅实现槽和图案等形状和结构的成形。因此，无论是脉宽较长的 CO_2 激光和 Nd:YAG 激光，还是脉宽较短的超快皮秒和飞秒激光，在激光光斑的高重叠率以及高扫描次数的作用下，材料表面槽的成形机理实质上仍然是热作用的累积[62-64]。因此，材料对激光的吸收率和反射率是影响槽的加工质量的重要因素之一。利用红外波长激光进行印制电路板复合材料铣削和蚀刻加工时，不同层基材的热学特性影响槽的成形过程。当激光与铜层等金属材料作用时，自由电子通过逆韧致辐射效应完成受激过程，处于受激状态的声子电子相

互作用，能量传递给晶格，使得加工材料的温度上升。当温度上升到一定程度时，能量传递通过电子与晶格的碰撞和晶格之间的耦合完成。当材料中沉淀足够能量后，发生化学键的断裂，材料从固态向液态和气态转化，最终通过蒸发、熔融喷溅、爆炸性沸腾实现所需加工槽和图形的成形。

当使用波长较短的紫外激光进行印制电路板复合材料激光铣削与刻蚀加工时，成形过程与红外激光加工类似。铜层主要依靠光热作用实现去除，但对于环氧树脂等非金属材料，由于单个紫外光光子能量大于环氧树脂等高分子材料的键能，主要依靠光热反应和光化学反应的共同作用实现槽和图案的成形。因此要实现印制电路板复合材料上槽、图案等结构的高效激光加工，必须选择合适的激光种类或进行多种激光复合加工，以充分使用激光能量。

激光铣削加工槽、图案等加工效率和质量取决于材料物理化学性能、激光加工参数和加工环境[62]。对于印制电路板复合材料槽和图案的激光成形过程，由于不同层基材的物理化学性能以及对激光的吸收率存在差异，导致微槽的加工过程仍会出现缺陷与损伤。如图 10a 所示，由于激光吸收率的差异使得材料去除不均，从而导致槽壁加工较粗糙以及玻纤未完全去除现象。

激光加工参数也是影响微槽加工质量的重要因素[63]，当使用吸收率较高的紫外激光，或使用脉冲宽度较长的长脉宽激光时，在激光辐照区容易容易产生如图 10b、10d 所示的熔融喷溅和烧蚀过度现象。此外，加工环境也是影响槽加工质量的重要因素。例如与在空气中进行陶瓷基印制电路板加工相比，在盐溶液或水中进行激光加工可以有效减小热效应，改善加工形貌和质量[65-66]。



(a) 槽壁粗糙、玻纤突出　(b,c) 熔融喷溅[66]

(d) 崩边　(e,f) 烧蚀过度现象[67]

图 10　激光微槽加工

3　异质多元多层印制电路板复合材料激光加工工艺研究现状

随着终端应用向着体积轻薄化、传输速度高频高速化和高集成化等方向发展，对印制电路板复合材料的激光加工质量、精度和效率提出了更高的要求，因此需要多种方式和途径进行印制电路板激光加工质量、精度和效率的精准调控。如工艺参数的优化是调控最根本的途径，加工方式的优化可以有效优化成形过程并改善加工质量，加工路径的优化可以有效提升加工的效率和质量；本节总结了目前印制电路板复合材料激光加工工艺相关的研究，包括工艺参数优化、加工方式优化、加工路径优化相关研究进展。

3.1　工艺参数影响规律研究进展

近年来较多学者通过工艺参数优化的方式，对印制电路板复合材料激光孔和槽加工质量进行调控。为了平衡激光加工质量和效率之间的关系，必须找到最佳的工艺参数，实现印制电路板复合材料小尺寸、高效率、高质量[68]的微孔群加工[69]以及槽铣削加工[72-74]。有学者通过神经网络算法进行参数优化和加工效果预测，从而实现激光微孔、微槽和图案的精准控形控性加工[72]。

对于印制电路板复合材料微槽的激光铣削加工工艺参数优化，除了扫描速度、重复频率、脉冲数量等基本的单一参数外，还需要对如扫描重叠率、光斑重叠率、激光单脉冲能量、激光能量密度和有效脉冲数等多个参数共同影响、耦合作用的参数进行优化和调控，从而实现高质量、低损伤的微槽和

图案的铣削加工[71]。表 6 所示为印制电路板复合材料激光微孔、槽加工工艺参数优化相关研究。如张菲[73]、张晓[33]、陈志城[53]等分别探究了激光加工参数对柔性电路板微孔/槽加工质量的影响，发现随着激光功率和光斑重叠率的增高会导致孔壁和孔底粗糙度提高、深度增加，并会出现过烧现象；随着重复频率的增加，深度和孔壁粗糙度减小；开/关光延迟的错误设置则会导致加工过度或材料去除不完全的现象；随着扫描速度的增加，深度和粗糙度逐渐减小；随着扫描次数的增加，深度和粗糙度逐渐增大。FRANZ[68]和 LONG[72]等分别探究了激光加工参数对 FR-4 板材微孔加工质量的影响，作者发现随着脉冲宽度的增加，孔壁粗糙度和损伤减小，孔锥度和孔径增大；随着重复频率的增加，损伤和孔锥度减小，孔径增大。

如何改善印制电路板复合材料激光加工过程中的缺陷和损伤是目前的研究重点，加工参数优化是一种行之有效、低成本的优化方式[69]。印制电路板复合材料激光微孔/微槽加工过程中质量问题产生原因、主要影响因素以及改善方法示意图如图 11 所示。

表 6　印制电路板复合材料激光微孔加工工艺参数优化研究

文献编号	激光类型	加工材料	加工结构及尺寸	优化方式	优化效果
张晓[33]	342 nm 紫外飞秒激光	柔性电路板	刻蚀(刻蚀深度 20.04～67.57 μm)	优化激光功率、扫描速度、重复频率、离焦量、加工次数参数	实现了铜基材的高质、高效去除，不伤及底层基材
陈志城[53]	355 nm 紫外皮秒激光	柔性电路板	孔(孔径 49～57.8 μm，孔深 49 μm)	优化激光功率、振镜扫描速度参数	减少了孔内残余铜，提高了孔圆度
LI [62]	1 030 nm 红外飞秒激光	玻璃基板	槽	优化能量密度和脉冲重叠率参数	实现了高质量、高效率和低损伤的激光铣槽加工
DANIEL[68]	绿光皮秒、飞秒激光	FR-4	孔(最小孔径 28.6 μm)	优化重复频率、单脉冲能量等参数	解决了孔内玻纤突出、底铜损伤和锥度过小等质量问题
ANDRIUS [70]	1 064 nm 红外皮秒激光	铜基材	槽	优化扫描速度、激光能量密度参数	实现了高质量槽和图案的激光加工
LONG[72]	紫外纳秒激光	FR-4	孔(孔径 0.1～0.15 mm、孔深 109.71～203.03 μm)	建立回归方程进行参数优化	实现了微孔精准控深加工
张菲[73]	紫外纳秒激光	柔性电路板	孔(孔径 75 μm)	优化功率密度、扫描间距、开/关激光延时参数	解决了孔中心处加工过深问题，孔壁、孔底粗糙度降低
王守绪[74]	紫外纳秒激光	刚挠结合板	槽(槽深 58.6～104 μm)	优化激光功率、光斑直径、重复频率、离焦量参数	实现了精准控深铣槽加工

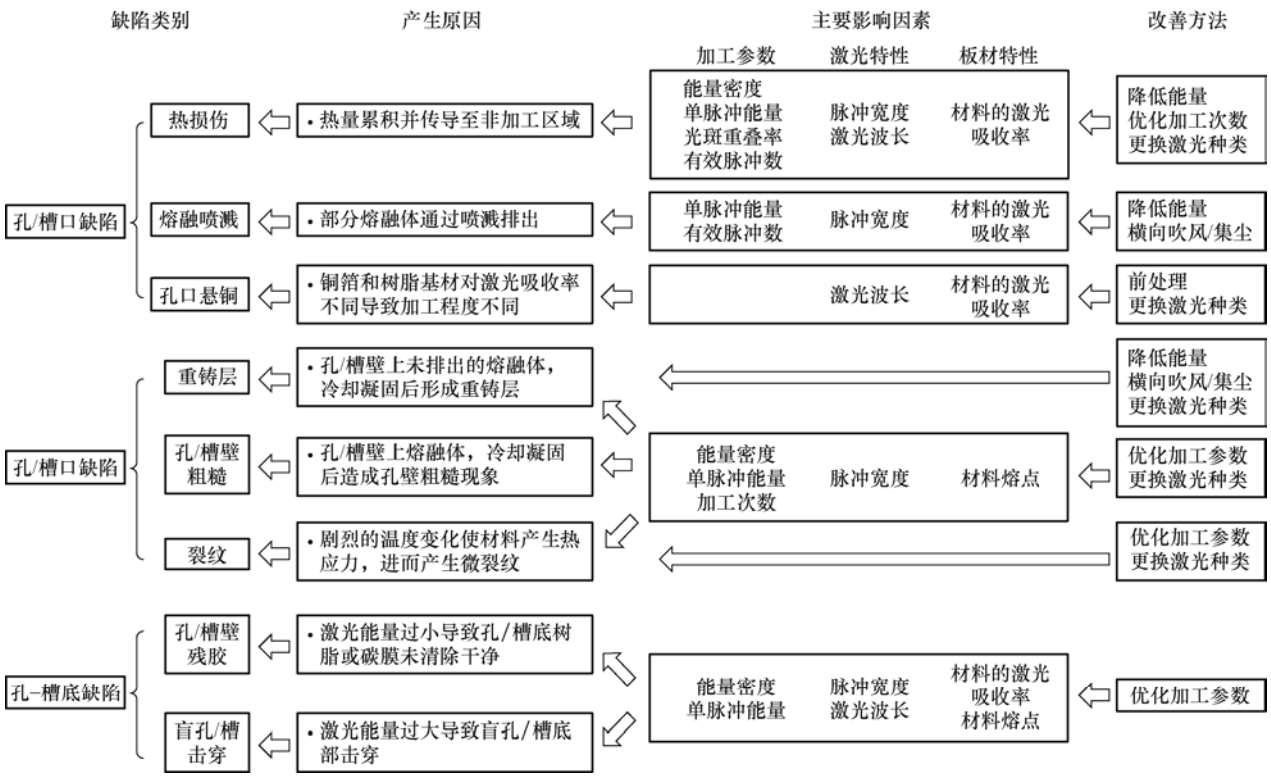


图 11　影响印制电路板复合材料激光加工孔、槽的质量参数

激光能量密度、单脉冲能量、有效脉冲数、光斑重叠率和加工次数等参数影响加工区域的热量累积，这些参数需要进行优化才能避免加工区域因热量累积所造成的热损伤、熔融喷溅、重铸层和裂纹等现象。此外，对于复合材料自身的特性如对激光的吸收率和材料熔点也影响着加工质量，需要在加工前进行激光的选型，或进行分步加工，以满足不同层基材吸收率上的差异。

3.2 加工方式研究进展

在印制电路板复合材料激光加工孔的成形过程中，如图 12 所示，通常以激光与材料在加工过程中是否发生相对位移为标准，将激光微孔成形方法分为复制法[75]和轮廓迂回法[76]。复制法包括单脉冲、多脉冲打孔，激光辐照于材料被加工区域且与材料没有发生相对位移，使得被加工区域的材料逐层烧蚀、气化蒸发，从而形成所需要深度的微孔。由于高斯激光存在空间以及时间上的高斯函数型能量分布，导致复制法激光微孔加工(单脉冲打孔、多脉冲打孔)过程中必然存在能量辐照不均匀区域，从而导致孔锥度大、孔形差等加工质量问题[77]。颜庙青[3]和倪超等[78]分别使用 CO_2 激光、红外和绿光飞秒激光，在 FR-4 印制电路板复合材料上探究了多脉冲打孔方式，对材料与激光的作用机理、作用模型、数值仿真、工艺参数优化以及孔和线路的成形过程开展了分析和研究。

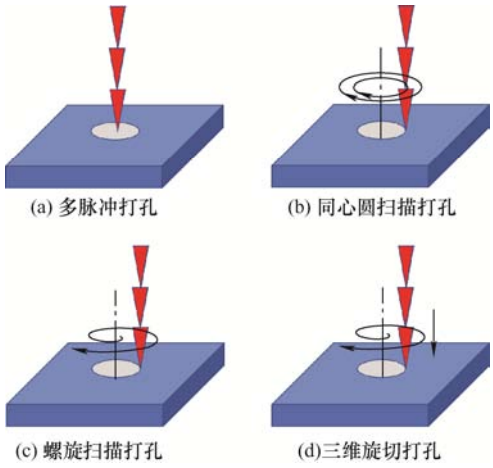


图 12 印制电路板常用激光微孔加工方式

轮廓迂回法指加工过程中激光与被加工材料发生相对位移，如同心圆扫描、螺旋扫描加工以及旋切加工，该方法适合加工印制电路板上高深径比微孔。同心圆扫描与螺旋扫描[53]使得激光与材料被加工区域在二维平面上产生相对位移，从而实现材料去除，形成微孔。轮廓迂回法由于脉冲重叠率、扫描速度、激光能量密度等加工参数不易精准控制，容易导致热影响区过大等加工质量问题出现[14]。考虑到同心圆扫描打孔和螺旋扫描打孔在孔深方向为离焦加工，LEE 等[79]通过在螺旋钻孔增加深度方向的进给，形成旋切打孔，有利于获得大深径比、高质量的微孔。也可在微孔激光加工过程中辅以高压气体喷射，从而去除印制电路板激光加工过程中在孔壁形成的重铸层，减少热影响区，并提升孔圆度和孔型。

3.3 加工路径研究进展

近年来，有学者通过将多种打孔方式和路径相结合的方式开展高质量的微孔加工。任云鹏等[80]针对旋切打孔中存在的孔型差、锥度大和出入口形貌差等问题，在旋切激光微孔加工的基础上提出了三步法旋切打孔方法，发现该方法可有效地减小微孔的锥度，改善出入口形貌和孔型，并减少孔口周围的飞溅物堆积(图 13)。也有学者对印制电路板微孔微槽加工路径优化问题开展了相关研究，如通过优化算法对加工路径进行规划，以改善印制电路板激光加工质量和加工效率。如图 14 所示，LO 等[81]通过 PCB 激光微孔加工路径规划，改善了加工过程中的路径交叉问题，并将加工区域分割成若干块，提高了振镜打孔的效率。KWAK 等[82]通过路径规划改善印制电路板激光加工孔过程中加工路径重叠、重复的现象，以提高加工效率。

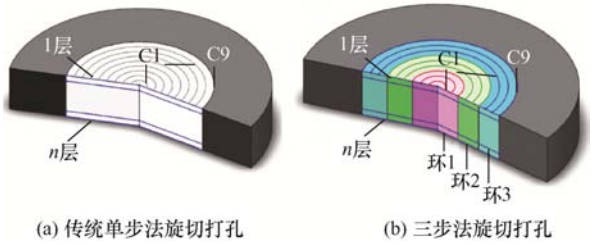
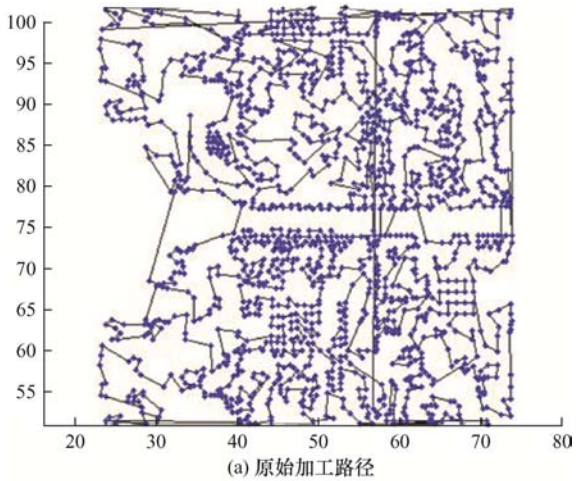


图 13 旋切打孔加工路径[80]



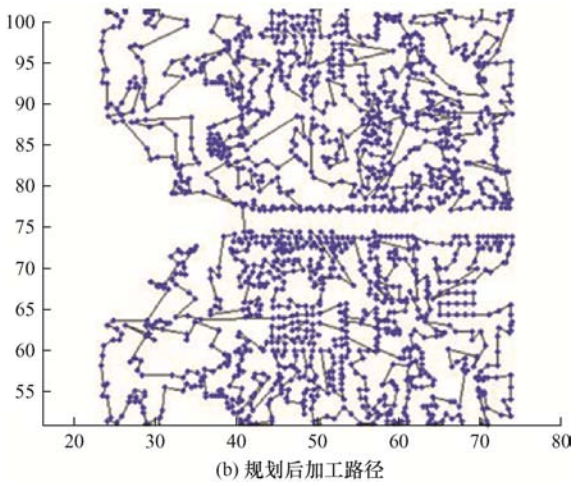


图 14　典型的印制电路板高密度群孔激光加工路径规划[82]

3.4　总结

随着印制电路板加工尺寸要求和质量要求的不断提高，激光加工工艺参数优化方法、加工方式优化方法和加工路径优化方法广泛应用于印制电路板激光加工过程中，可以有效改善印制电路板复合材料激光加工过程中出现的热损伤、熔融喷溅、毛刺、裂纹、孔/槽底残胶和击穿等一部分的加工质量问题，以及加工效率问题。但随着高端印制电路板组成基材成分的日益复杂(传统的金属、非金属材料构成的叠层复合材料，到金属基板、陶瓷基板和玻璃基板等)、板材层数不断提高(大于 50 层)、板材上要求加工的结构日益复杂(传统的孔、槽到线路、多边形和不规则形状等复杂结构)，导致传统激光加工工艺和优化方法逐渐无法满足高端印制电路板对加工尺寸极小、加工深径比极高和加工质量一致性极高的要求，即使是超快激光加工仍然会出现微孔圆度和锥度差等形貌质量问题，以及热影响区、熔融喷溅等加工质量问题，限制了印制电路板上孔群密度和布线密度。因此，印制电路板激光加工亟需寻求新技术的突破。

4　展望

4.1　多元多层复合材料激光微细加工面临的挑战

随着高端印制电路板逐渐向着多层、高密度、小型化和集成化方向发展，要求其上微孔尺寸更小、微孔群密度更大、微孔加工质量和精度更高、槽和线路的线宽线距更小、其上线路和图案加工更加精密。导致目前高端印制电路板复合材料激光加工存在：组成材料复杂性、加工尺寸极限性、烧蚀阈值差异性、激光作用机理复杂性和质量评价方法复杂性等挑战(图 15)。超快激光凭借其高质量、高精度和绿色环保加工的特点，在印制电路板复合材料激光加工上有着广阔的应用前景。但目前印制电路板复合材料的激光加工工艺亟需革新，缺乏印制电路板复合材料激光加工理论的基础性研究和系统性研究，且超快激光加工过程中仍然存在缺陷与损伤、加工效率低下等问题，导致超快激光并未广泛应用于印制电路板制造行业。针对印制电路板复合材料激光加工过程中存在的加工缺陷和损伤等问题，国内外研究学者主要从缺陷产生机理[83]、工艺参数优化[84]、加工方式[85]等方面开展研究，以改善缺陷和损伤现象。但由于材料和激光种类的复杂性，改善方法并不具有普遍性，改善效果也有限[86]。针对以上问题，印制电路板复合材料激光加工研究未来将有以下发展趋势。

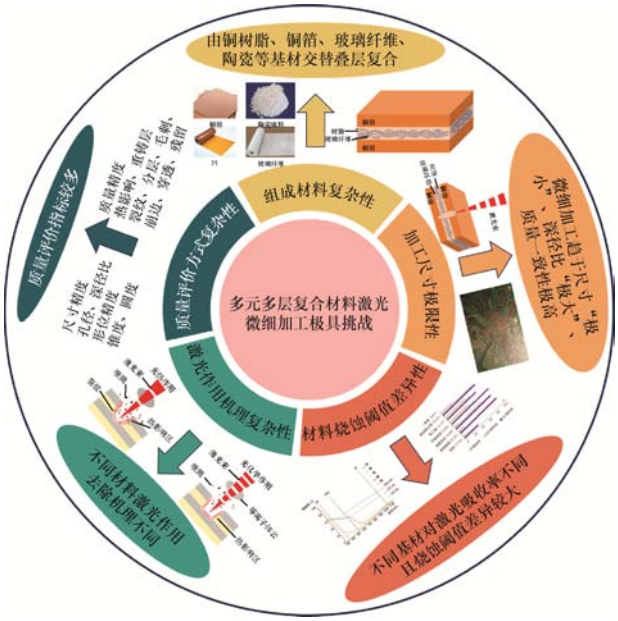


图 15　印制电路板复合材料激光加工的复杂性

4.2　未来发展趋势

4.2.1　印制电路板复合材料多能场复合激光加工

有学者在激光加工合金材料[87-91]、半导体材料[92-93]过程中引入磁场以改善激光加工过程中的等离子体屏蔽现象，以及调控熔融金属流动和排出以改善孔圆度等形貌质量问题(图 16a)；引入低温场以改善热影响区过大、减少熔融喷溅和减少重铸层等问题(图 16b)；引入如超声以实现改善激光能量作用深度、减少重铸层和热影响区、促进熔融体排出等(图 16c)。通过增加其他能量场，改善了单一激光加工的不足之处，充分发挥了激光加工的优势[94]，但目前鲜有多能场复合激光加工印制电路板复合材料的研究。本文作者团队近年来针对印制电路板复合材料开展了能场辅助激光加工微孔/槽研究，如磁场辅助激光加工可有效改善金属基板激光微孔加工过程

中孔的锥度、圆度和孔径，降低等离子体对激光能量的屏蔽[95]，低温辅助激光加工可有效改善印制电路板复合材料激光微孔加工过程中产生的热影响区过大、熔融喷溅严重现象，并改善微孔的形貌质量[52]。

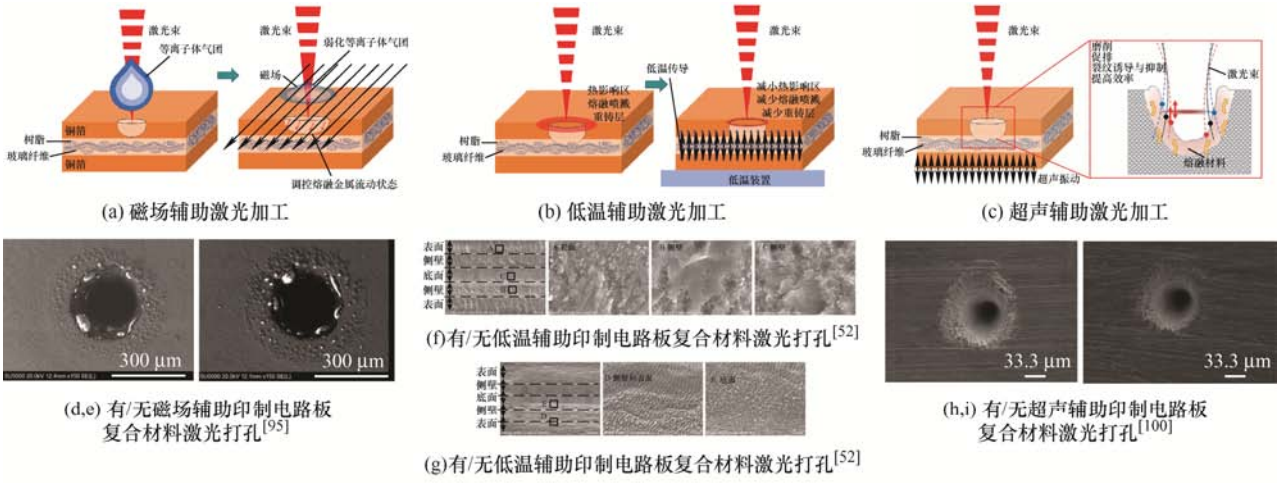


图 16 印制电路板复合材料及其基材多能场复合激光加工

也有学者采用多种能场复合的方式进行激光减材制造[96]，以最大限度的改善激光加工过程中产生的缺陷和损伤，并发挥激光加工的优势，如水基-超声辅助[97]、水基-磁场辅助[98]、水基-超声-磁场辅助[99]等，但均无印制电路板复合材料激光加工的相关研究，且水基是否对电路板性能产生影响还需探讨。

因此，随着加工尺寸要求不断减小，加工质量要求不断提高，多能场复合激光加工方法对印制电路板微细结构加工形貌和质量的改善有较强的针对性，有着较好的研究和应用前景。但目前多能场复合激光加工中各种能场如何影响激光加工印制电路板复合材料的加工过程、多种能场与激光如何耦合，以及不同能场与激光在印制电路板复合材料上的耦合作用机理等问题仍需要深入研究，且相应装备尚待开发，因此并未广泛应用于行业。

4.2.2 基于光场时/空整形的电子动态调控印制电路板复合材料激光加工

随着高端印制电路板对于高深径比微孔结构需求的增长和质量要求的提高，未经光束整形的高斯激光逐渐无法满足印制电路板复合材料加工质量、精度和效率需求。传统的超快激光加工方式是逐点扫描，该方式意味着超快激光制造面临着无法突破的效率问题。因此有学者将光场调制成相应的形状和不同的脉冲组合，从而满足不同的加工需求[101]。如时域调控可以减小应力的产生、削弱等离子提对激光能量的屏蔽、提高激光能量的沉积、减少孔壁裂纹的生成、减少热效应的影响等；通过对光束能量分布进行空间调控，可以获得扁平而稳定的能量分布，从而可以实现电路板上特定形状的高精度一次成形加工；通过对光束进行贝塞尔整形，可以使得激光能量在空间上实现均匀分布，从而可以实现玻璃基板的隐切、高精密划片加工等；而偏振态调控也有少数应用于柔性电路板复合材料激光加工过程中的研究，但并未进行系统、深入的探究。

目前，少数学者探究了用于印制电路板复合材料及其基材的基于光场时/空整形的激光加工方法[102]，但仍未进行深入探究，因此导致并未在科研和生产领域广泛研究和应用。图 17a～17d 为光场时域调控，经典模式、递减模式、递增模式、平坦模式；图 17e 为光场偏振态调控；图 17f 为飞秒激光时域加工玻璃基板的光场能量分布调控[103]；图 17g 为 36 子脉冲；图 17h 为 70 子脉冲；图 17i 为 100 子脉冲；图 17j 为 130 子脉冲；图 17k～17n 为飞秒激光偏振态调控加工柔性电路板孔入口形貌[11]：线偏振(k)、圆偏振(l)、径向偏振(m)、角向偏振(n)；图 17o～17r 为飞秒激光偏振态调控加工柔性电路板孔出口形貌[11]：线偏振(0)、圆偏振(p)、径向偏振(1)、角向偏振(r)；图 17s～17t 为皮秒激光偏振态调控加工柔性电路板微孔形貌[104]：水平偏振(s)和圆偏振(t)。如 BALAGE 等[103]通过飞秒激光时域调控，探究了 1.28 GHz 重复频率条件下子脉冲数和脉冲串形状对微孔加工质量的影响(图 17g～17j)，通过时域调控的方式在玻璃基材上获得了深径比达 120∶1 的微孔；例如翟中生等[11]通过液晶空间光调制器，1/2 波片和 1/4 波片调整激光偏振，再进行印制电路板复合材料的激光微孔加工，研究结果表明径向偏

振和角向偏振具有更好的圆度和更大的孔径(图 17k～17r)；ZHAO 等[104]研究了激光的波长、能量、脉冲、偏振等参数对通孔钻孔的影响，并对各种加工参数进行了优化(图 17s)，最终通过偏振态调控的方式加工出了直径小于 10 μm，孔间距小于 2 μm 的微孔阵列。

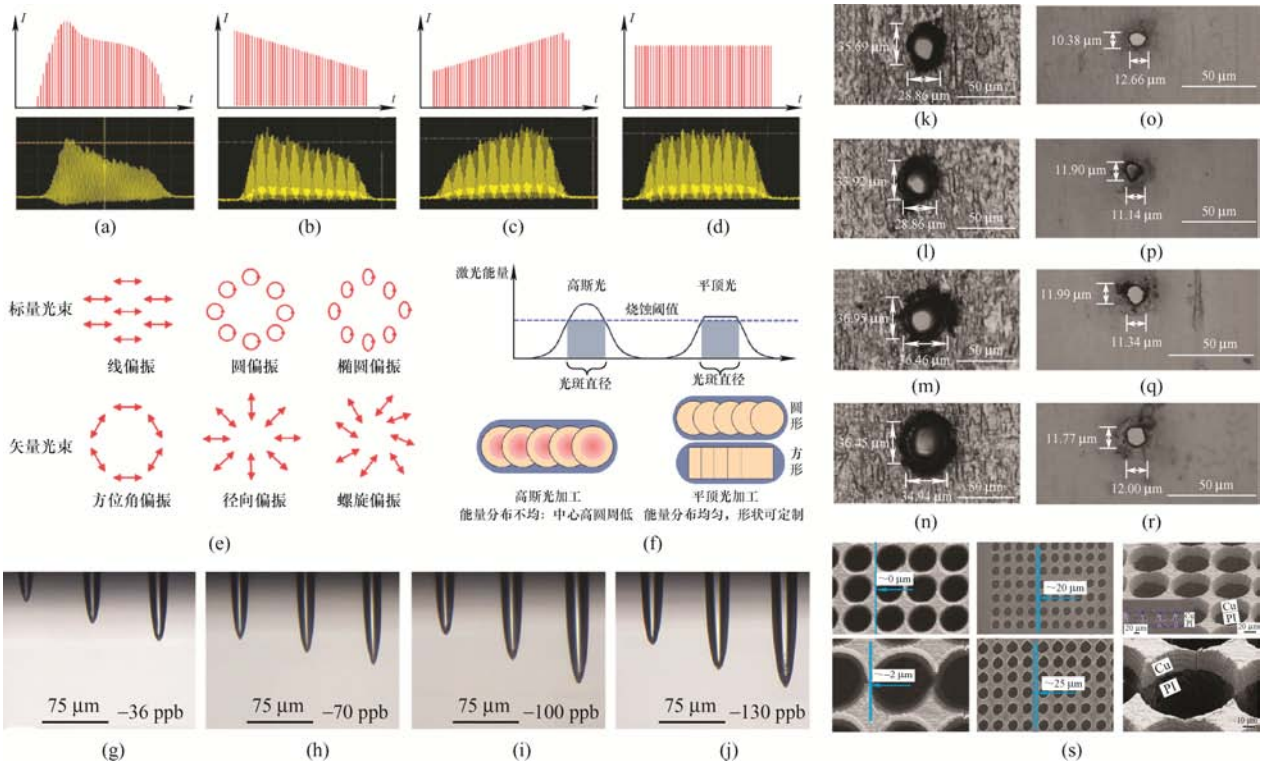


图 17　光场时/空整形的电子动态调控印制电路板

复合材料激光加工

因此，通过对超快激光进行时域和空间整形可以改变激光的光场分布，控制瞬时局部电子动态分布，调控后续相变过程，实现对微孔加工过程的精准调控，从而实现小直径下高深径比微孔结构的加工，是未来高端印制电路板和芯片封装领域亟需探究的方向。但由于光束整形微纳光学镜片与仪器的寿命问题和成本问题，以及整形后激光与材料的作用机理仍不明确等问题，导致该工艺并未在行业中推广。且由于光子具有丰富的物理维度(频率、波长、振幅、偏振、时间等)，导致该工艺存在需要调控的参量过多的问题。不同的参量和调控方法对于印制电路板复合材料有哪些影响，不同整形方式和调控手段适合加工什么结构，以及如何揭示基于光场整形的印制电路板复合材料激光加工机理，是后续仍然需要深入研究的问题。

5　结论

(1) 异质多元多层复合材料的激光加工机理。

关于多元多层复合材料的激光加工机理研究较少，少数学者通过实验结果观测、有限元仿真和分子动力学仿真等手段分析了激光加工复合材料过程，但还需要寻求新的检测手段进行更深入的研究。大多数学者针对复合材料的基材的激光加工机理进行了研究，对于如铜箔和铝板的金属基材，激光加工机理主要有材料在超短脉冲激光作用下直接汽化去除，也有认为是静电分离实现材料去除，在脉冲宽度较长激光作用下，材料通过热烧蚀实现去除，同时也有学者认为金属基材的激光去除机理与激光产生的机械应力波相关；对于如环氧树脂、PI 和 PTFE 等非金属高分子材料，激光加工机理分为光化学作用和光热作用；对于非金属硬脆材料如陶瓷填料、玻璃纤维等，有认为在超短脉冲激光作用下材料发生雪崩电离实现材料去除，也有认为是由于光化学作用断键实现材料去除，在较长脉冲宽度激光作用下由于热烧蚀实现材料去除；

(2) 异质多元多层复合材料的激光加工成形机理。

目前，针对多元多层复合材料的孔/槽成形过程少数学者做了相关缺陷与损伤的产生过程分析，印制电路板复合材料的孔、槽成形过程并非单一基材激光孔和槽成形过程的简单叠加，而是一个伴随着

缺陷和损伤产生的、涉及光和热复杂反应的成形过程；孔的成形过程以激光与材料在加工过程中是否发生相对位移为标准分为复制法和轮廓迂回法，材料逐层去除从而实现孔的成形，但孔的激光加工过程会出现孔口喷溅、重铸层、热损伤、裂纹等缺陷与损伤问题的产生。槽和图案的成形过程则是通过激光脉冲的逐点烧蚀、搭接去除而成形，成形过程中存在粗糙、玻纤突出、熔融喷溅、崩边和烧蚀过度等缺陷与损伤问题；但是关于激光如何逐层作用形成各层表面，且不同基材成形过程是否存在相互影响等还没有详细报道。

(3) 异质多元多层复合材料的激光加工工艺。

目前多元多层复合材料的激光微细加工工艺方面的研究主要集中在工艺参数、加工方式和加工路径对加工质量和加工效率的影响方面，工艺参数的优化是调控最根本的途径，加工方式的优化可以有效优化成形过程并改善加工质量，加工路径的优化可以有效提升加工的效率和质量；但这三种加工工艺优化方式调控范围窄，针对性不强，且还没有与加工材料-加工尺度-激光类型-质量等形成系统的关系模型，并形成对加工质量的预测与指导。

(4) 面临挑战和未来趋势。

随着芯片、航空航天、4G/5G/6G 通信、超算等核心电子器件的发展，对高端电路板提出了加工尺寸极小、加工质量一致性极高的要求，尺度趋于极限，如孔径小于 20 μm、深径比高于 20:1、100 层以上；材料愈加复杂，如陶瓷填料高达 60%以上；质量要求高且评价体系复杂，如微孔加工既需要达到规定的孔径、圆度、锥度，又需要微孔形貌质量好，群孔质量一致性高。因此，对复合材料极端尺度微细结构的加工提出了巨大挑战。传统高斯激光因能量分布的差异已逐渐无法满足尺寸极小、深径比极大、加工质量一致性极高的加工要求。多能场复合激光加工以及光场的时/空整形可以实现印制电路板复合材料激光加工质量的精准调控，且可以有效改善加工形貌和加工效率，未来有望解决高端印制电路板制造“尺寸极小、深径比极大、质量一致性极高”的难题。

参 考 文 献

[1] PRISMARK News. Prismark[EB/OL]. [2023-05-01]. https://www.prismark.com/what-s-new.

[2] 杨威. 封装基板微盲孔成孔技术[J]. 电子工艺技术，2022，43(6)：338-341.
YANG Wei. Micro blind via forming technology of packaging substrate[J]. Electronics Process Technology，2022，43(6)：338-341.

[3] 颜庙青. 印制电路板激光微孔工艺研究[D]. 武汉：华中科技大学，2009.
YAN Miaoqing. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2009.

[4] KAWASUJI Y，FUJIMOTO J，KOBAYASHI M，et al. Deep ultraviolet excimer laser processing for the micro via hole on semiconductor package[J]. Journal of Laser Applications，2020，32(2)：022076.

[5] 刘晓东，陈亮，王曦照，等. 紫外激光微铣削 Al2O3 陶瓷盲孔的工艺研究[J]. 激光与光电子学进展，2021，58(5)：203-210.
LIU Xiaodong，CHEN Liang，WANG Xizhao，et al. Micromilling blind holes in Al_2O_3 ceramics using UV laser[J]. Progress in Laser and Optoelectronics，2021，58(5)：203-210.

[6] 李松松. 高密度互连印制电路板通孔与精细线路制作技术研究[D]. 成都：电子科技大学，2016.
LI Songsong. Research on HDI PCB though hole and fine line production technology[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology，2016.

[7] XI Z，GHITA O R，EVANS K E. Effect of recyclate PTFE/GF laminate incorporation on the dielectric and mechanical properties of PTFE/GF composites using a novel manufacturing process[J]. Journal of Applied Polymer Science，2011，122(4)：2467-2477.

[8] GAO Zhisen，SHI Hongyan，TAO Sha，et al. Study on the mechanism affecting the quality of micro-hole in ultrasonic-assisted drilling of high-speed circuit boards[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2022，124(7-8)：2527-2544.

[9] ZHOU G，HE W，WANG S，et al. A novel nitric acid etchant and its application in manufacturing fine lines for PCBs[J]. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology，2010，33(1)：25-30.

[10] 王庆. 大功率 LED 散热封装用铝基印刷电路板研究[D]. 杭州：浙江大学，2011.
WANG Qing. Study on aluminum core printed circuit board applying in high power LED packaging[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2011

[11] 翟中生，郭钊，汪于涛，等. 不同偏振态下飞秒激光在 FPC 上打孔特性研究[J]. 应用激光，2017，37(2)：262-267.
ZHAI Zhongsheng，GUO Zhao，WANG Yutao，et al. The

characteristics of femtosecond laser drilling on FPC with different polarizatinog states[J]. Applied Laser，2017，37(2)：262-267.

[12] 黄欣，王成勇，何宇星，等. 异质多元多层印制电路板精密孔机械加工[J].机械工程学报，2023，59(3)：283-307.
HUANG Xin，WANG Chengyong，HE Yuxing，et al. Drilling of heterogeneous multi-layer printed circuit boards：A review[J]. Journal of Mechanical Engineering，2023，59(3)：283-307.

[13] Von der LINDE D，SOKOLOWSKI-TINTEN K，BIALKOWSKI J. Laser–solid interaction in the femtosecond time regime[J]. Applied Surface Science，1997，109：1-10.

[14] 郭敏超，王明娣，张胜江，等. FR-4 覆铜板飞秒激光微孔加工工艺研究[J]. 中国激光，2020，47(12)：135-143.
GUO Minchao，WANG Mingdi，ZHANG Shengjiang，et al. Techniques for femtosecond laser processing of micro-holes in FR-4 copper clad laminate[J]. Chinese Journal of Lasers，2020，47(12)：135-143.

[15] RETHFELD B，SOKOLOWSKI-TINTEN K，Von Der LINDE D，et al. Timescales in the response of materials to femtosecond laser excitation[J]. Applied Physics A，2004，79：767-769.

[16] DAUSINGER F，HUGEL H，KONOV V I. Micromachining with ultrashort laser pulses：From basic understanding to technical applications[C]// ALT'02 International Conference on Advanced Laser Technologies. SPIE，2003，5147：106-115.

[17] 刘院省. 金属材料脉冲激光刻蚀微加工的基础研究[D]. 北京：北京工业大学，2007.
LIU Yuansheng. The basic study on the pulsed laser ablating metals[D]. Beijing：Beijing University Of Technology，2007.

[18] DABBY F，PAEK U C. High-intensity laser-induced vaporization and explosion of solid material[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics，1972，8(2)：106-111.

[19] MARTYNIUK M M. The role of the phase explosion of metals in the explosive electron emission process[J]. Radiotekhnikai Elektronika，1980，25：157-167.

[20] ELSIED A M，DIEFFENBACH P C，DIWAKAR P K，et al. Nanosecond laser-metal ablation at different ambient conditions[J]. Spectrochimica Acta Part B：Atomic Spectroscopy，2018，143：26-31.

[21] 张恒. 纳秒激光诱导若干金属材料微结构及其应用研究[D]. 苏州：苏州大学，2010.
ZHANG Heng. Research on fabrication of microstructures on metals induced by nanosecond laser and its applications[D]. Suzhou：Soochow University，2008.

[22] 孙立华. 陶瓷激光打孔技术研究[D]. 长春：长春理工大学，2007.
SUN Lihua. The reaserch of laser drilling on ceramics[D]. Changchun：Changchun University of Science and Technology，2007.

[23] 马南钢，王希军，丁华东，等. 碳化硼厚板的激光切割工艺及其机制 [J]. 中国激光，2007，34(10)：1441-1445.
MA Nangang，WANG Xijun，DING Huadong，et al. Laser cutting processing and mechanism for thick boron plate[J]. Chinese Journal of Lasers，2007，34(10)：1441-1445.

[24] 陈壹华. CO_2 激光成孔技术在 HDI 的应用研究[J]. 应用激光，2007(2)：144-147.
CHEN Yihua. Research on the application of forming-hole technology by CO_2 laser on HDI[J]. APPLIED LASER，2007，27(2)：144.

[25] ZHOU G，LI W，XIANG Q，et al. Copper induced direct CO_2 laser drilling blind hole with the aid of brown oxidation for PCB CCL[J]. Applied Surface Science，2019，479：512-518.

[26] MEDVEDEV N，MILOV I. Nonthermal phase transitions in metals[J]. Scientific Reports，2020，10(1)：12775.

[27] KUDRYASHOV S I，SAMOKHVALOV A A，GOLUBEV Y D，et al. Dynamic all-optical control in ultrashort double-pulse laser ablation[J]. Applied Surface Science，2021，537：147940.

[28] 贾威，罗义鸣，宋有建，等. 脉冲激光加工高分子材料[J]. 纳米技术与精密工程，2015，13(3)：205-210.
JIA Wei，LUO Yiming，SONG Youjian，et al. Laser micromachining of polymer[J]. Nanotechnology and Precision Engineering，2015，13(3)：205-210.

[29] 欧长劲，秦才宝，姜献峰，等. 非垂直激光切割能量分布研究[J]. 激光与光电子学进展，2017，54(4)：246-253.
OU Changjin，QIN Caibao，JIANG Xianfeng，et al. Study on energy distribution of non-vertical laser cutting[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2017，54(4)：246-253.

[30] YUNG K C，ZENG D W，YUE T M. XPS investigation of Upilex-S polyimide ablated by 355 nm Nd：YAG laser irradiation[J]. Applied Surface Science，2001，173(3-4)：193-202.

[31] 李家峰，王楠，白晶莹，等. 脉冲激光改性聚醚醚酮及表面金属化技术研究[J]. 表面技术，2022，51(3)：371-379.
LI Jiafeng，WANG Nan，BAI Jingying，et al. Pulse laser

modification of poly-ether-ether-ketone for surface metallization[J]. Surface Technology，2022，51(3)：371-379.

[32] 林素颖，廖小杰，韩冰. 纳秒激光诱导聚酰亚胺薄膜周期性结构的产生[J]. 红外与激光工程，2022，51(2)：94-100.
LIN Suying，LIAO Xiaojie，HAN Bing. Nanosecond laser-induced periodic structures on polyimide film[J]. Infrared and Laser Engineering，2022，51(2)：94-100.

[33] 张晓，刘凯，王明娣，等. 基于飞秒激光的覆铜板刻蚀工艺[J]. 光学学报，2019，39(12)：235-242.
ZHANG Xiao，LIU Kai，WANG Mingdi，et al. Etching technology for copper-clad laminates based on femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica，2019，39(12)：235-242.

[34] HAM S S，LEE H. Surface characteristics of polymers with different absorbance after UV picosecond pulsed laser processing using various repetition rates[J]. Polymers，2020，12(9)：2018.

[35] QIN Z，AI J，DU Q，et al. Superhydrophobic polytetrafluoroethylene surfaces with accurately and continuously tunable water adhesion fabricated by picosecond laser direct ablation[J]. Materials & Design，2019，173：107782.

[36] 陈振威. CO_2 激光加工玻璃的实验研究[D]. 武汉：华中科技大学，2012.
CHEN Zhenwei. Experimental study on glass processing by CO_2 laser[D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2012.

[37] 贾贤石. 氧化铝陶瓷复合激光打孔研究[D]. 武汉：华中科技大学，2022.
JIA Xianshi. Combined pulse laser drilling of alumina ceramic[D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2022.

[38] 姜海涛，杨子轩，赵万芹，等. 氧化铝陶瓷基板紫外纳秒激光打孔工艺研究[J]. 电子机械工程，2020，36(4)：36-41.
JIANG Haitao，YANG Zixuan，ZHAO Wanqin，et al. Research on nanosecond pulse laser drilling processing of alumina ceramic substrate[J]. Electro-Mechanical Engineering，2020，36(4)：36-41.

[39] NEDIALKOV N，SAWCZAK M，JENDRZEJEWSKI R，et al. Analysis of surface and material modifications caused by laser drilling of AlN ceramics[J]. Applied Surface Science，2007，254(4)：893-897.

[40] WANG H J，CHEN Q，LIN D T，et al. Effect of scanning pitch on nanosecond laser micro-drilling of silicon nitride ceramic[J]. Ceramics International，2018，44(12)：14925-14928.

[41] KACAR E，MUTLU M，AKMAN E，et al. Characterization of the drilling alumina ceramic using Nd：YAG pulsed laser[J]. Journal of Materials Processing Technology，2009，209(4)：2008-2014.

[42] HANON M M，AKMAN E，OZTOPRAK B G，et al. Experimental and theoretical investigation of the drilling of alumina ceramic using Nd：YAG pulsed laser[J]. Optics & Laser Technology，2012，44(4)：913-922.

[43] 卞华栋，戴晔，叶俊毅，等. 紧聚焦飞秒脉冲与石英玻璃相互作用过程中的电子动量弛豫时间研究[J]. 物理学报，2014，63(7)：170-176.
BIAN Huadong，DAI Ye，YE Junyi，et al. Analysis of electron momentum relaxation time in fused silica using a tightly focused femtosecond laser pulse[J]. Acta Phys. Sin.，2014，63(7)：074209.

[44] 魏健，张彬，刘晖，等. 飞秒激光烧蚀石英微孔的时间分辨阴影成像[J]. 中国激光，2019，46(5)：248-252.
WEI Jian，ZHANG Bin，LIU Hui，et al. Time-Resolved shadowgraphic imaging of femtosecond laser ablated micro-holes in silica glass[J]. Chinese Journal of Lasers，2019，46(5)：248-252.

[45] 杨雪. 飞秒激光加工玻璃微结构的机理与工艺参数研究[D]. 天津：天津工业大学，2021.
YANG Xue. Study on the mechanism and technological parameters of glass microstructure processing by femtosecond laser[D]. Tianjing：Tiangong University，2021.

[46] 王禹茜，张军战，刘永胜，等. 飞秒激光工艺参数对加工 TiC 陶瓷微孔的影响[J]. 中国激光，2014，41(10)：106-112.
WANG Yuxi，ZHANG Junzhan，LIU Yongsheng，et al. Effect of femtosecond laser parameters on TiC ceramic micro-hole drilling[J]. Chinese Journal of Lasers，2014，41(10)：106-112.

[47] STOIAN R，ASHKENASI D，ROSENFELD A，et al. The dynamics of ion expulsion in ultrashort pulse laser sputtering of Al_2O_3[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B：Beam Interactions with Materials and Atoms，2000，166：682-690.

[48] 孟雪. 飞秒激光烧蚀固体材料的过程及表面形貌研究[D]. 济南：山东师范大学，2015.
MENG Xue. The study of femtosecond laser ablation process and surface morphology of solid materials[D].

Jinan：Shandong Normal University，2015.

[49] 徐梦廓. 激光加工高密度 PCB 的研究[D]. 柳州：广西工学院，2011.
XU Mengkuo. The research of laser machining in high-density PCB[D]. Liuzhou：Guangxi University of Science and Technology，2011.

[50] BOIN N，JEONGWON Y，SEUNGBOO J. Effect of laminating parameters on the adhesion property of flexible copper clad laminate with adhesive layer[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives，2010，30(1)：30-35.

[51] PARK J H，LEE J H，SOON A. Organics on oxidic metal surfaces：a first-principles DFT study of PMDA and ODA fragments on the pristine and mildly oxidized surfaces of Cu(111)[J]. Physical Chemistry Chemical Physics，2016，18(31)：21893-21902.

[52] 黄欣. 柔性电路板飞秒激光精密加工机理研究[D]. 广州：广东工业大学，2022.
HUANG Xin. Femtosecond laser precision machining mechanism of flexible circuit boards[D]. Guangzhou：Guangdong University of Technology，2022.

[53] 陈志城，刘文鑫，吕凤洋，等. 355 nm 皮秒激光对柔性电路板盲孔加工的研究[J]. 应用激光，2022，42(5)：58-65.
CHEN Zhicheng，LIU Wenxin，LÜ Fengyang，et al. Research on blind hole machining of flexible circuit board by 355 nm picosecond laser[J]. Applied Laser，2022，42(5)：58-65.

[54] SUN M，EPPELT U，HARTMANN C，et al. Damage morphology and mechanism in ablation cutting of thin glass sheets with picosecond pulsed lasers[J]. Optics & Laser Technology，2016，80：227-236.

[55] OBATA K，HIROGAKI T，AOYAMA E，et al. Cu-direct laser drilling of blind via-hole in multi-layer PWBs：Process visualization using high-speed camera images[C]// Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd，2012，516：30-35.

[56] ZHANG F，DUAN J，ZENG X，et al. UV laser microprocessing and post chemical etching on ultrathin Al_2O_3 ceramic substrate[J]. Journal of the European Ceramic Society，2011，31(9)：1631-1639.

[57] FANG X Y，YUNG K C. Copper direct drilling with TEA hbox CO_2 laser in manufacture of high-density interconnection printed circuit board[J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing，2006，29(3)：145-149.

[58] BHASKAR A，PHILIPPE J，BRAUD F，et al. Large-area femtosecond laser milling of silicon employing trench analysis[J]. Optics & Laser Technology，2021，138：106866.

[59] XU H，HU J. Modeling of the material removal and heat affected zone formation in CFRP short pulsed laser processing[J]. Applied Mathematical Modelling，2017，46：354-364.

[60] LEONE C，GENNA S，TAGLIAFERRI F，et al. Experimental investigation on laser milling of aluminium oxide using a 30 W Q-switched Yb：YAG fiber laser[J]. Optics & Laser Technology，2016，76：127-137.

[61] LEONE C，BASSOLI E，GENNA S，et al. Experimental investigation and optimisation of laser direct part marking of Inconel 718[J]. Optics and Lasers in Engineering，2018，111：154-166.

[62] LI S S，WANG Y L，LI B J，et al. Femtosecond laser selective ablation of Cu/Ag double-layer metal films for fabricating high-performance mesh-type transparent conductive electrodes and heaters[J]. Optics Communications，2021，483：126661.

[63] 施克明，王明娣，陈添禹，等. 飞秒激光扫描刻蚀覆铜板工艺及质量研究[J]. 应用激光，2018，38(1)：81-88.
SHI Keming，WANG Mingdi，CHEN Tianyu，et al. Study on technology and quality of etching copper clad laminate with femtosecond laser[J]. Applied Laser，2018，38(1)：81-88.

[64] 姚燕生，陈庆波，汪俊，等. 氮化硅陶瓷水射流辅助激光精密加工[J]. 光学精密工程，2018，26(11)：2723-2731.
YAO Yansheng，CHEN Qingbo，WANG Jun，et al. Water-jet assisted laser precision processing of Si_3N_4 ceramics[J]. Optics and Precision Engineering，2018，26(11)：2723-2731.

[65] ISSELIN J C，ALLONCLE A P，AUTRIC M. On laser induced single bubble near a solid boundary：Contribution to the understanding of erosion phenomena[J]. Journal of Applied physics，1998，84(10)：5766-5771

[66] 段凌云，黄传真，刘盾，等. 激光辅助水射流加工砷化镓晶片微槽的实验研究[J]. 中国机械工程，2023，34(10)：1172-1183.
DUAN Lingyun，HUANG Chuanzhen，LIU Dun，et al. An experimental investigation on laser assisted waterjet microgrooving of GaAs wafer[D]. China Mechanical Engineering，2023，34(10)：1172-1183.

[67] 傅茜，张菲，蒋明，等. 1 064 nm 和 355 nm 激光扫描刻蚀覆铜板工艺及质量研究[J]. 激光技术，2014，38(4)：435-440.

FU Xi，ZHANG Fei，JIANG Ming，et al. Study on technology and quality of etching copper clad laminate with 1 064 nm and 355 nm laser[J]. Laser Technology，2014，38(4)：435-440.

[68] FRANZ D，HÄFNER T，KUNZ T，et al. Ultrashort Pulsed laser drilling of printed circuit board materials[J]. Materials，2022，15(11)：3932.

[69] KIM K R，CHO J H，LEE N Y，et al. High-precision and ultrafast UV laser system for next-generation flexible PCB drilling[J]. Journal of Manufacturing Systems，2016，38：107-113.

[70] ŽEMAITIS A，GAIDYS M，BRIKAS M，et al. Advanced laser scanning for highly-efficient ablation and ultrafast surface structuring：Experiment and model[J]. Scientific Reports，2018，8(1)：17376.

[71] FINGER J，KALUPKA C，REININGHAUS M. High power ultra-short pulse laser ablation of IN718 using high repetition rates[J]. Journal of materials processing technology，2015，226：221-227.

[72] LONG F，HE W，CHEN Y，et al. Application of ultraviolet laser in high density interconection micro blind via[C]// 2010 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference. IEEE，2010：1-3.

[73] 张菲，段军，曾晓雁，等. 355 nm 紫外激光器加工多层柔性线路板盲孔[J]. 红外与激光工程，2010，39(1)：143-146.

ZHANG Fei，DUAN Jun，ZENG Xiaoyan，et al. Drilling blind holes on multi-layer FPC board with a 355 nm UV laser[J]. Infrared and Laser Engineering，2010，39(1)：143-146.

[74] 王守绪，何雪梅，董颖韬，等. UV 激光控深铣槽在刚挠结合印制板中的应用研究[J]. 印制电路信息，2015，23(5)：22-24.

WANG Shouxu，HE Xuemei，DONG Yingtao，et al. Application research on slot-cutting by UV laser in rigid-flex PCB[J]. Printed Circuit Information，2015，23(5)：22-24.

[75] 张云龙，孙树峰，王茜，等. 激光加工微孔质量的研究[J]. 激光与光电子学进展，2021，58(19)：20-39.

ZHANG Yunlong，SUN Shufeng，WANG Xi，et al. Reasearch on quality of micro-holes fabricated by laser drilling[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2021，58(19)：20-39.

[76] DAUSINGER F. Femtosecond technology for precision manufacturing：Fundamental and technical aspects[J]. Proceedings of SPIE，2003，4830：471-478.

[77] BRUSBERG L，QUEISSER M，GENTSCH C，et al. Advances in CO_2-laser drilling of glass substrates[J]. Physics Procedia，2012，39：548-555.

[78] 倪超. FR-4 覆铜板飞秒激光打孔及微细线路刻蚀研究[D]. 苏州：苏州大学，2020.

NI Chao. Study of femtosecond laser drilling and etching micro line on FR-4 copper clad laminate[D]. Suzhou：Soochow University，2020.

[79] LEE H M，CHOI J H，MOON S J. Machining characteristics of glass substrates containing chemical components in femtosecond laser helical drilling[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology，2021，8：375-385.

[80] 任云鹏，程力，周王凡，等. 铝合金飞秒激光单步法和三步法旋切打孔技术研究[J]. 中国激光，2022，49(22)：226-235.

REN Yunpeng，CHENG Li，ZHOU Wangfan，et al. Femtosecond laser single-step and three-step trepanning drilling technology of aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Laser，2022，49(22)：226-235.

[81] LO T M，YOUNG J S. Improvements of productivity for PCB drilling by laser driller machine[J]. International journal of Precision Engineering and Manufacturing，2014，15：1575-1581.

[82] KWAK H，HAN S C，KOO J C，et al. A clustering based path planning for UV laser galvanometric scanning drilling machine using spatial tessellations with A[C]// 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE，2014：871-876.

[83] WANG L，REN N，WANG Y，et al. Microstructure comparative investigation of deep hole in super alloy by trepanning and percussion laser processing[J]. Nanoscience and Nanotechnology Letters，2017，9(4)：407-415.

[84] LI Q，YANG L，HOU C，et al. Surface ablation properties and morphology evolution of K24 nickel based superalloy with femtosecond laser percussion drilling[J]. Optics and Lasers in Engineering，2019，114：22-30.

[85] WANG M，YANG L，ZHANG S，et al. Experimental investigation on the spiral trepanning of K24 superalloy with femtosecond laser[J]. Optics & Laser Technology，2018，101：284-290.

[86] XIE J，YAN J，ZHU D，et al. Atomic‐level insight into the formation of subsurface dislocation layer and its effect on mechanical properties during ultrafast laser micro/nano fabrication[J]. Advanced Functional Materials，2022，32(15)：2108802.

[87] CHANG Y J，KUO C L，WANG N Y. Magnetic assisted laser micromachining for highly reflective metals[J]. Journal of Laser Micro Nanoengineering，2012，7(3)：254.

[88] LU Y，SUN G F，WEN D P，et al. Effects of applying electric and magnetic fields on laser drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2016，84(9)：2293-2300.

[89] BALAMURUGAN S，MANIKANDAN C B，BALAMURUGAN P. A study on magnetic field assisted laser percussion drilling and its effect on surface integrity[J]. Archives of Materials Science and Engineering，2018，94(1)：35-40.

[90] WANG H，HU Y，NING F，et al. Ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of Inconel 718 parts：Effects of ultrasonic frequency on microstructural and mechanical properties[J]. Journal of Materials Processing Technology，2020，276：116395.

[91] RAFTAR O R，AMIRI S，KHAJEHZADEH M，et al. The influence of ultrasonic vibration amplitude and magnetic field intensity on microstructural characteristics in laser drilling of Ti6Al4V[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part C：Journal of Mechanical Engineering Science，2022，236(5)：2363-2379.

[92] JIAO L，ZHENG H，ZHANG Y，et al. Picosecond laser drilling of silicon with applied voltage[J]. SN Applied Sciences，2019，1(1)：1-7.

[93] ZHOU J，JIAO H，HUANG Y，et al. The mechanism of micro-cracks formation in ultrasonic-assisted water confined laser micromachining silicon[J]. Optics Communications，2021，488：126745.

[94] 王银飞，朱浩，张朝阳，等. 旋转磁场辅助激光加工微孔的机理及试验研究[J]. 中国激光，2022，49(16)：7-15.
WANG Yinfei，ZHU Hao，ZHANG Chaoyang，et al. Mechanism and experimental research of magnetic field rotation assisted laser machining of micro-holes[J]. Chinese Journal of Laser，2022，49(16)：7-15.

[95] 彭国豪. 磁场辅助激光加工铜基散热基板微孔研究[D]. 广州：广东工业大学，2022.
PENG Guohao. Magnetic field-assisted laser processing of micro-hole in copper-based thermal substrates[D]. Guangzhou：Guangdong University of Technology，2022.

[96] 郑李娟，王成勇，黄兵. 一种多能场辅助印制电路板激光加工装置及方法，中国：CN117226307A[P]. 2023-12-15.
ZHENG Lijuan，WANG Chengyong，HUANG Bing. A multi energy field assisted laser processing device and method for printed circuit boards，China：CN117226307A [P]. 2023-12-15.

[97] XIA K，REN N，WANG H，et al. Analysis for effects of ultrasonic power on ultrasonic vibration-assisted single-pulse laser drilling[J]. Optics and Lasers in Engineering，2018，110：279-287.

[98] WANG H，XU Y，LIU J，et al. Magnet-assisted laser hole-cutting in magnesium alloys with and without water immersion[J]. Journal of Manufacturing Processes，2021，61：539-560.

[99] WANG H，XU Y，ZHU S，et al. Water-based helical laser hole-cutting in nickel super-alloy GH4049 assisted by longitudinal and transverse magnetic fields with/without ultrasonic assistance[J]. Optics and Lasers in Engineering，2020，128：105985.

[100] PARK J K，YOON J W，CHO S H. Vibration assisted femtosecond laser machining on metal[J]. Optics and Lasers in Engineering，2012，50(6)：833-837.

[101] ZANG X，LIU Z T，XU Y S，et al. Spatial light modulation for femtosecond laser manufacturing：Current developments and challenges[J]. Science China Technological Sciences，2023：1-13.

[102] 张超，李敏，叶柏臣，等. 飞秒激光时空整形的电子动态调控微孔加工[J]. 光电工程，2022，49(2)：36-49.
ZHANG Chao，LI Min，YE Baichen，et al. Electrons dynamics control micro-hole drilling using temporally/spatially shaped femtosecond laser[J]. Opto-Electronic Engineering，2022，49(2)：36-49.

[103] BALAGE P，BONAMIS G，LAFARGUE M，et al. Advances in femtosecond laser GHz-Burst drilling of glasses：Influence of Burst shape and duration[J]. Micromachines，2023，14(6)：1158.

[104] ZHAO W，WANG L. Microdrilling of through-holes in flexible printed circuits using picosecond ultrashort pulse laser[J]. Polymers，2018，10(12)：1390.

作者简介：郑李娟(通信作者)，女，1987 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为难加工材料高效精密绿色加工理论、刀具、工艺与装备。
E-mail：zhenglijuan@gdut.edu.cn
王军，男，1961 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为跨尺度磨料射流、高能束及多能场复合、精密/超精密加工的相关理论、技术与装备。
E-mail：j.wang@gdut.edu.cn
王成勇，男，1964 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为高速高效精密超精密加工理论、工艺、刀具与装备技术，生物组织切除理论与医疗器械设计和制造。
E-mail：cywang@gdut.edu.cn