先进光电测量、分析与制造

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250718001

激光微孔加工复合工艺研究进展

肖 强*,代海龙

(西安工业大学 机电工程学院, 西安 710021)

摘 要: 随着工业领域对微孔需求的快速增加,多种先进制造工艺应运而生,如激光束加工、电火花加工、电化学加工和超声振动加工。其中,激光束加工是最常用的先进加工方法之一,具有显著优势。文章系统综述了激光打孔的基本原理、加工方式、不同材料的激光微孔加工特性及相关案例,分析了造成重铸层和飞溅现象的原因及解决办法,并介绍了超快激光打孔技术的研究进展。此外,分类介绍了振动辅助、磁场辅助和液体辅助激光复合加工工艺的实验方法、加工机理、适用范围和优缺点。最后,总结了激光束加工面临的主要挑战,并对未来研究方向进行了展望。

关键词: 激光加工; 微孔制造; 飞秒激光; 激光复合加工工艺

中图分类号: TN249 **文章编号:** 1001－5868(2025)05－0784－11

Research Advances in Composite Processes for Laser Microhole Machining

XIAO Qiang, DAI Hailong

(School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, CHN)

Abstract: With the growing demand for micropores in the industrial sector, various advanced manufacturing technologies have been developed, including laser beam machining, electrical discharge machining, electrochemical processing, and ultrasonic vibration machining. Among these, laser beam machining stands out due to its versatility and significant advantages. This review article systematically examines the fundamental principles of laser drilling, various processing methods, and the characteristics of laser-based micropore fabrication in different materials, supported by relevant case studies. It explores the causes of recast layers and splattering, along with potential solutions, and highlights recent advancements in ultrafast laser drilling technologies. Furthermore, the paper classifies and discusses the experimental methods, mechanisms, application scopes, and the pros and cons of composite laser processing techniques, including vibration-assisted, magnetic-field-assisted, and liquid-assisted approaches. Finally, key challenges in laser beam machining are summarized, and future research directions are proposed.

Key words: laser processing; micropore fabrication; femtosecond lasers; composite laser processing

0 引言

微孔广泛应用于精密工程、微机电系统、生物医学、化学工程无线和光学通信以及PCB等工业领域,其直径在几微米到几百微米范围内[1-2]。为满足微孔直径符合微米级范围,研究人员研发了多种钻孔技术。传统钻孔技术是将不同构造的钻头安装在主轴上并使其高速旋转,钻穿工件形成微孔。随

收稿日期:2025－07－18.

*通信作者:肖 强

着先进工程材料的出现，具有严格设计要求、复杂形状和特殊尺寸的工件限制了传统加工方法的使用范围。而先进制造工艺包括激光束加工（LBM）、电火花加工（EDM）、电化学加工（ECM）、超声振动加工（USM）和这些方法的组合，这类工艺涉及物理、化学过程以及热、电等多种能量形式变化。

在先进制造工艺加工技术中，激光加工是最常用的方法之一。与普通光不同，激光光子具有相同的频率、波长和相位，这种高度的相干性使光束拥有极好的方向性、高功率密度和优异的聚焦特性。激光加工是一种利用高能光束烧蚀材料的非接触式工艺，克服了传统机械加工在孔壁表面易产生微裂纹的缺点。当聚焦光束产生的能量密度大于材料烧蚀阈值时，材料被转化为熔融、蒸发和化学降解状态，光束通过烧蚀去除材料。激光束能够实现微米或亚微米级的精密几何结构加工和表面改性[3]，高精度、高灵活性的特点使其非常适合复杂形状零件的微孔加工，因而被广泛应用于陶瓷、玻璃、高温合金复合材料等高硬度或难加工材料的制造。

本文对激光钻孔技术进行系统综述，主要内容包括激光打孔的基本原理、加工方式、不同材料的激光微孔加工特性及案例，分析造成重铸层和飞溅现象的原因及解决办法以及最新的飞秒激光打孔技术。分类介绍了激光复合加工工艺的实验方法、加工机理、适用范围和优缺点。最后，提出了激光束加工面临一些挑战，并对其未来的改进方向进行了展望。

1　激光加工工艺

1.1　激光打孔原理

激光钻孔是一种可控烧蚀机制的加工技术，激光钻孔过程的示意图如图 1 所示[4]。高密度光束聚焦在样品上，以便快速熔化和蒸发其路径上的材料，可加工孔径从一微米到几百微米不等。该作用机制涉及不同的操作参数，包括激光的特性（频率、波长和能量密度）、加工工艺的选择（辅助气体类型和压力）和材料规格（化学成分和厚度）。光束与材料的作用机制通常包含两个阶段：光化学、光热。在光化学阶段，激光光子能量直接作用在材料上并破坏化学键，使得靶材从母体中喷出；在光热阶段，材料吸收激光能量，温度升高至熔点或蒸发点以上，继而通过沸腾或蒸发被快速去除[5]。

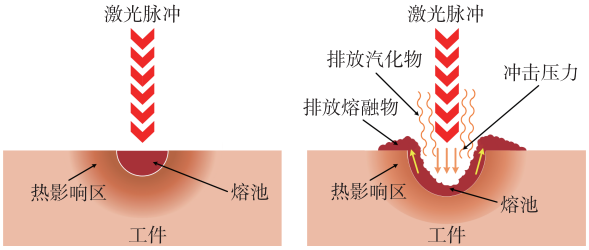


图 1　激光钻孔过程示意图[4]

激光加工设备通常由同轴辅助吹气装置、CCD 摄像机、扫描振镜、三维移动工作平台组成，如图 2 所示[6]。扫描振镜用于调节光束扫描速度，三维移动平台用于调节激光束与工件的相对位置。Nd：YAG 和 CO_2 是 LBM 应用中最常用的激光器。Nd：YAG 激光器在脉冲模式下具有高峰功率和较小热负荷，可加工一些脆性材料如 SiC 陶瓷等，这些材料不能用 CO_2 激光加工否则会产生裂纹损伤。皮秒和飞秒等具有较短脉冲宽度的激光适用于热影响区（HAZ）较小的高精度加工[7]。

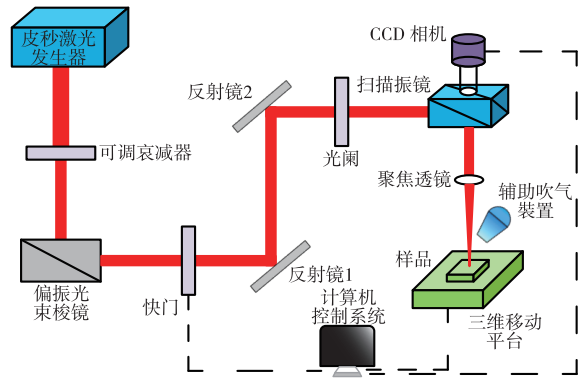
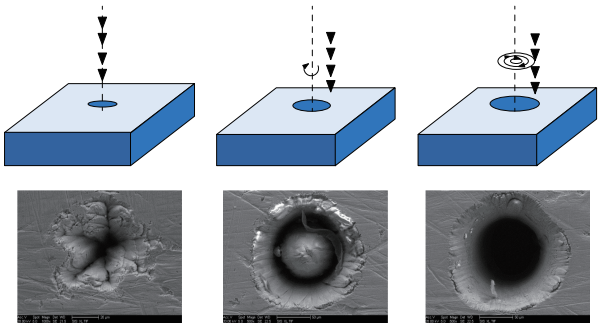


图 2　激光加工设备示意图[6]

1.2　激光打孔方式

激光束钻孔有三种加工方式：脉冲冲击钻孔、环切钻孔和旋切钻孔，如图 3 所示[8]。脉冲冲击钻孔方式是通过连续“冲压”，对工件材料进行去除，仅适合深度较小的浅孔。由单个脉冲完成，称为单脉冲钻孔，而当板材厚度较大时，则需要增加脉冲数，称为多脉冲钻孔。由于应用冲击钻孔技术时工件和激光束都处于静止状态，该技术又称为静态钻孔技术。激光环切技术首先将孔的中心处穿透，再运动到孔的周边作圆周运动，又叫作动态钻孔。与冲击钻孔相比，环切钻孔需要的激光能量更少，即可加工出相同直径的微孔。主要原因是环切工艺需要去除的环形材料体积小于冲击钻孔的圆柱形体积，使得激光能量输入降低，热影响区减小，从而提高了加工精度。激光旋切制孔沿着螺旋线路径

进行扫描加工，使得整个孔洞内材料被烧蚀和融化。螺旋路径自然形成逐渐扩大的孔洞为熔融物排出提供了空间，从而有效减少了重铸层和飞溅物产生，因此其加工精度在三种方式中最高。图4为不同激光制孔方式的加工精度图[9]。



（a）脉冲钻孔 （b）环切钻孔 （c）旋切钻孔

图3 激光钻孔方式[8]

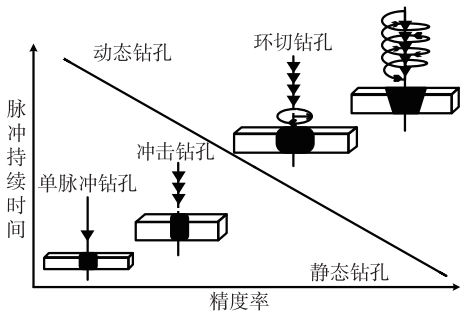


图4 不同激光制孔方式的加工精度[9]

Bandyopadhyay等[10]使用Nd:YAG激光器研究了不同厚度的钛合金和镍基合金打孔过程。结果发现，不同材料的入口直径和锥度均不同，并随着厚度的减小而增大，锥角随着脉冲频率的增加而减小，而脉冲能量对锥度没有显著影响。采用玻璃纤维复合材料的Nd:YAG激光对玻璃纤维增强环氧树脂层压板进行钻孔，在增加激光功率的情况下可以获得更大的孔径[11]。有研究显示，最小孔锥度的焦平面位置相对于工件表面的设置取决于材料厚度[12]。根据激光加工铝合金的研究发现，HAZ会随着钻孔深度的增加而增加[13]。根据TBC镍高温合金的激光钻孔研究表明，当增加光束角度时，微孔表面HAZ会减小，在角度达到60°之后，重铸层和氧化层厚度几乎保持不变，如图5所示[14]。

Yilbas[15]通过改变脉冲长度来改善钻孔质量，结果表明，平均孔径和锥度随着脉冲长度的增加而减小。Ghoreishi等[16]发现采用正焦平面位置、较高的峰值功率、较高的脉冲数、较高的辅助气体压力和适中的脉冲宽度，可以获得圆度较高的微

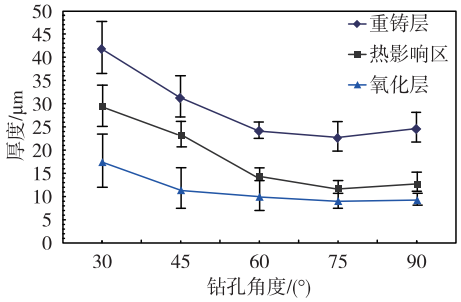


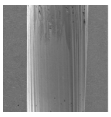
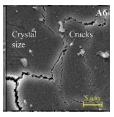
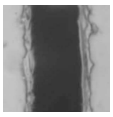
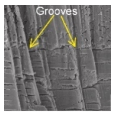
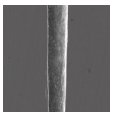
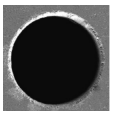
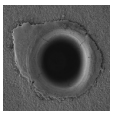
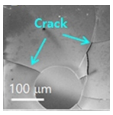
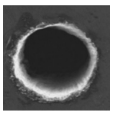
图5 不同钻孔角度下重铸层、热影响区和氧化层的平均厚度[14]

孔。Tam等[17]使用正交方法确定25 mm厚Inconel 718合金最佳参数值：脉冲能量为30 J、脉冲持续时间为1.8 ms、焦点位置为在工作表面上、氧气压力为0.35 MPa。研究人员在航空航天材料钻孔期间分析了不同因素对重铸层和微裂纹形成的重要性，发现高脉冲能量、较短脉冲宽度和三倍脉冲波形能降低微裂纹，同时脉冲能量还能显著降低重铸层的厚度，而涂层密度对微裂纹的影响不显著[18]。Jiang等[19]采用单个环切工艺研究了激光功率和转速对厚度为2 mm的碳纤维增强复合材料热影响区和烧蚀深度的影响。研究发现烧蚀深度和热影响区会随着激光转速的增加而减小，并且激光功率越大，烧蚀深度和热影响区域越大。对单个环形钻孔方式进行改进，实验的扫描路径为半径均匀分布的多个同心圆，激光束沿着扫描路径从外到内做圆周运动，完成路径扫描，加工质量显著提高[20]。Chao等[21]进行了环切工艺和旋切工艺的对照试验，采用螺旋钻孔工艺在孔口周围表面观察到少量重铸层，孔的表面质量最高。

1.3 不同材料的激光微孔加工特性

表1为不同材料的激光微孔加工特性对比。由表1可知，不同材料的激光钻孔方式、激光器类型、孔径及材料厚度范围、孔壁质量、表面清洁度、关键影响参数和材料去除机制存在明显差异。金属及合金的加工质量较好，表面侧壁较光洁[22]。对陶瓷材料的研究以脉冲打孔方式为主，孔壁微裂纹是造成加工质量下降的因素之一[23]。玻璃是光学器件使用频率最高的材料，但激光打孔易导致出口产生微裂纹[24]。聚合物基复合材料微孔入口清洁度高，动态切割方式形成了孔壁表面纳米状条纹结构[25]。激光加工半导体材料时，通过熔化和蒸发将材料转化为等离子体去除[26]。

表 1　不同材料的激光微孔加工特性对比

材料类型	金属及合金	陶瓷	玻璃	聚合物基复合材料	半导体(硅)
加工方式	环切/旋切制孔	脉冲打孔	脉冲/环切制孔	环切/旋切制孔	脉冲/环切/旋切制孔
激光类型	纳秒[27]、皮秒[28]、飞秒[29]	毫秒[34]、纳秒[35]	纳秒、飞秒[37]、皮秒[38]	纳秒[40]、飞秒[41]、皮秒[42]	纳秒[26]、皮秒[44]、飞秒[45]
孔径/mm	0.062～0.5[30-31]	＜1.2[34]	＞0.127[37]	＞0.1[40]	＞0.3[45]
厚度/mm	1～2[30,32]	＜1[34]	＜1.1[39]	＜3[25]	＜1[44]
锥度/(°)	0.1～26[29,33]	0.333～2.158[36]	＜1.52[24]	＞0.19[40]	＜4.0[44]
孔壁质量	侧壁光滑[22] 	裂纹显著[23] 	毛刺较多[37] 	条纹结构[25] 	侧壁粗糙[26] 
表面质量	堆积物较少[22] 	堆积物多[35] 	裂纹较多[24] 	孔口干净[25] 	堆积物多[46] 
关键参数	扫描速度 激光功率 扫描次数 重复频率[30]	重复频率 激光功率 脉冲数 焦点位置[34]	激光波长 脉冲能量 脉冲重叠率 脉冲宽度[24]	扫描路径 扫描次数 重复频率[43]	能量密度 进给速度 重复频率[47]
材料去除机制	瞬间高温将金属材料转变为蒸汽和等离子体，但对激光能量有明显的能量屏蔽作用，易导致孔壁上出现微裂纹[22]	由于对激光的高吸收特性，在激光的照射下能够迅速燃烧，通过反冲压力的溅射去除熔体材料[23]	对于透明介质，激光烧蚀是通过诱导等离子体来进行的，将透明介质转变为吸收介质[39]	首先形成外环以限制热影响区，之后选择较高的能量输入来实现内环更高的材料去除率[25]	通过熔化和蒸发将材料转化为等离子体去除[26]

1.4　孔口飞溅物

飞溅是激光微钻孔过程中需要考虑的另一个重要因素。从钻孔部位未排除的喷射材料重新凝固并粘附在孔周边的工件表面上，形成飞溅物[48-49]。去除飞溅物需要额外的精加工工艺，进而增加了工艺复杂性、生产时间和成本。图 6 所示为 Nd:YAG 激光束钻孔飞溅在 IN 718 板材周围的飞溅物[50]。

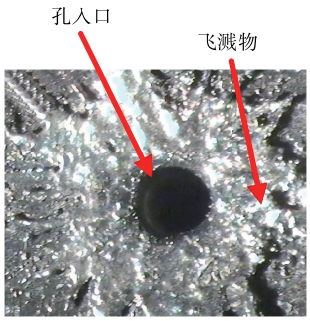


图 6　IN 718 微孔入口的飞溅物[50]

减少或防止飞溅现象发生的方法有：1）钻孔前在工件表面上喷涂特定的溶液；2）使用振动技术来增强熔融材料的流动性[51]；3）优化激光加工参数。

1.5　重铸层

由于在激光加工过程中大部分材料是通过熔体喷射被去除的，未从孔内去除的熔体部分会重新凝固，并且在微孔的侧壁和底部形成重铸层。重铸层与母材相比具有完全不同的性质，因此实验中需要消除或减少重铸层。研究发现重铸层受加工参数影响，随着脉冲频率和脉冲能量的增加，重铸层厚度逐渐增加[10]，光束角度对重铸层和热影响区的作用效果相同[14]。

1.6　超快激光技术

近年来，超快激光器克服了传统激光器的缺点，受到众多研究者的关注，如皮秒激光器、纳秒激光器和飞秒激光器。

在皮秒激光加工过程中，靶材表面吸收激光能量，产生大量的高温自由电子。这些自由电子将能量传递给晶格，晶格进一步剥离以产生高温和高密度的等离子体。在库仑排斥作用下等离子体分离，烧蚀材料快速从母材表面去除。更高的激光能量使得光子能量逐渐积累，产生更多的高温自由电子和自由载流子等离子体，如图 7 所示[52]。因此，皮秒激光的烧蚀特征尺寸会稍大[53]。加工参数对皮秒激光加工质量有明显影响，增加有效激光脉冲数[54]、光束扫描次数[55]可以显著提高加工深度和材

料去除率，更容易获得更高质量的微孔。

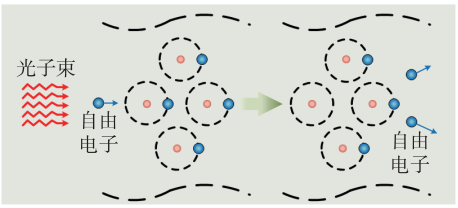
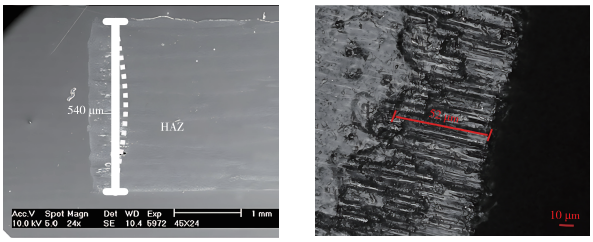


图7 自由电子电离过程示意图[52]

Wlodarczyk等[56]研究了皮秒激光在薄柔性玻璃材料上微钻孔，计算了不同激光加工参数的有效钻孔速度。Zhao等[57]系统研究了重复率对皮秒超短脉冲激光器在金属上钻孔尺寸和形貌的影响，发现临界重复率在微浅孔烧蚀中可以获得最大的孔径和深度。据报道，传统长脉冲激光器对碳纤维增强聚合物复合材料钻孔的热影响区为540 μm，使用皮秒超短脉冲激光系统热影响区缩小至52 μm，如图8(a)和(b)所示[58-59]。

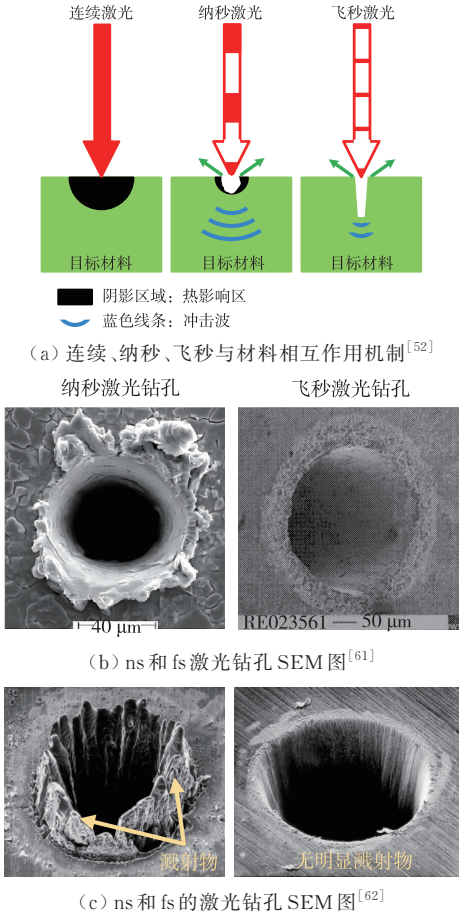


(a) 长脉冲激光[58] (b) 皮秒激光[59]

图8 不同激光打孔的热影响区域

皮秒激光技术相比于长脉冲激光可瞬间汽化材料，减少热扩散。与昂贵和复杂的纳秒、飞秒激光系统相比，具有更高功率和更紧凑规模的皮秒激光系统在精度和效率上都表现出良好的性能，但是在大面积加工时效率低于长脉冲激光。皮秒激光技术虽为“冷加工”，但高重复频率下仍可能因热量累积影响加工质量(如玻璃裂纹)。

超快(例如飞秒激光器)的基本工作原理与传统的长脉冲激光器截然不同[60]。如前所述，材料的烧蚀主要通过光的蒸汽压力和反冲压力驱动熔体排出。在图9(a)[52]中，黑色区域表示热影响区，蓝色线条表示光脉冲产生的冲击波。左侧的连续光束(CW)主要通过熔化去除材料并产生大范围的HAZ。中间的纳秒激光器使用相同的原理产生较小的HAZ。在两种情况下熔化层再次凝固，形成重铸层和飞溅，导致孔的几何尺寸发生变化。右侧的飞秒激光器使用比自由电子和晶格之间能量转移时间尺度短得多的脉冲持续时间，工件吸收的能量使材料快速地通过其动能直接加热到蒸汽相。因此材料通过直接蒸发从表面去除，而不形成飞溅或重铸层，并且HAZ最小。图9(b)[61]表示纳秒和飞秒激光器制备的孔，比较发现飞秒激光微孔表面几乎无飞溅。Tunnermann等[62]进行了类似的研究，如图9(c)所示。实验结果表明，飞秒激光器获得的孔的质量比纳秒激光器好得多，并且观察到没有明显的重铸层。



(a) 连续、纳秒、飞秒与材料相互作用机制[52]

(b) ns和fs激光钻孔SEM图[61]

(c) ns和fs的激光钻孔SEM图[62]

图9 不同类型的激光与材料的作用机制和孔口形貌图

纳秒、飞秒激光器的脉冲持续时间更短，峰值能量更高，比皮秒激光加工具有更小的热影响区和更高的精度。但由于激光功率的限制，加工速度很难满足工业要求，同时激光系统的复杂性和低加工效率限制了其工业应用。

2 激光复合加工工艺

激光加工是一种重要的加工方法，但也存在热应力、尺寸不可控、毛刺和飞溅等缺点[63]。近年，研究人员对基于激光的混合加工机理进行了深入的研究(即增加辅助激光束加工的其他能量源)，在复合工艺中，

两个或更多工艺以辅助形式组合，使多个工艺的能量源可以用于加工，有助于提高零件的质量和特性[64-65]。本节系统综述了激光复合加工技术的实验研究和理论研究现状，详细介绍了激光加工外加能量的研究，包括振动、磁场、液体和气体，并阐述了加工装置、加工机理以及工艺参数对加工效果的影响，指出激光复合加工技术可以提高加工效率、表面质量。

2.1　振动辅助激光加工

在激光加工中需要避免再沉积和再固化材料层的产生，激光束和二次生成新材料之间的相互作用限制了微孔的深径比和表面质量。通过化学蚀刻或抛光可以减少孔内壁的再沉积。与典型的 EDM 相比，振动辅助 EDM 获得了更好的表面形态[66]。振动辅助激光钻孔的振动源通常安装在透镜或工件上，如图 10 所示[67]。

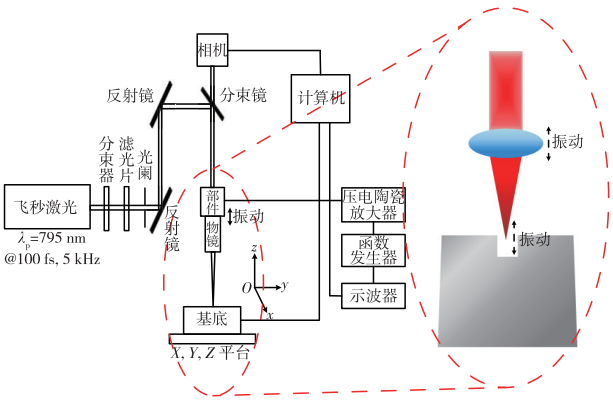
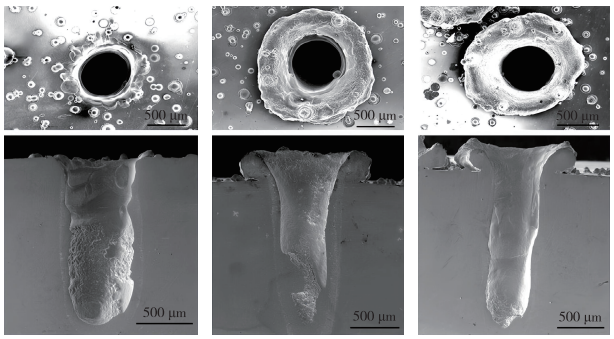


图 10　振动辅助激光钻孔装置[67]

Zheng 等[68]在可调立柱上安装频率为 40 kHz 的超声波振动器，再将超声变幅杆连接到工件上进行试验。对镍钛合金通过使用超声波振动辅助钻孔技术，孔的表面光洁度得到改善。超声波振动减少了再凝固层，因此表面比没有振动辅助时更清洁。振动辅助还有助于降低熔融材料的再沉积，表面形貌得到了改善。Choi 等[69]通过微振动器将振动施加在物镜上，利用振动连续改变激光束的焦点位置进行激光打孔。发现出口直径和入口直径随着振动幅度迅速变化，孔锥度取决于振动幅度，锥角随振幅的增大而减小。Alavi 等[70]在不锈钢上研究超声振动辅助激光钻孔的熔化和表面蒸发机制，通过 CO_2 激光器对工件施加不同幅度范围的振动。孔横截面 SEM 图像显示在较低振幅的振动下表面的飞溅物较少，然而，提高振动振幅增加了孔周围材料的再沉积，如图 11(a)～(c)所示。在较低的超声功率(20%)下，飞溅物围绕在孔附近没有任何积聚。增加超声功率，在孔周围有明显的堆积物。通过将超声振动施加到聚焦透镜进行激光加工，单个脉冲能量为 50 mJ，扫描速度为 0.01 mm/s，实验通过 795 nm 波长的钛蓝宝石飞秒激光进行。随着振动的引入，由于局部强制对流让热传递更有效，烧蚀颗粒冷却更快，并且更少倾向于聚集[71]。



(a) 20%　(b) 30%　(c) 40%

图 11　不同超声振动功率下微孔入口和横截面 SEM 图[70]

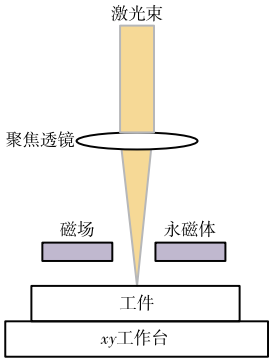
超声振动辅助 LBM 可以提高表面质量，再沉积和重铸问题也可以通过振动辅助解决。此外 Kang 等[72]还将超声振动应用于激光抛光方法。振动辅助激光工艺可以获得更大深径比的通孔，未来还需要在不同金属和陶瓷上进行广泛的实验和工艺建模。

2.2　磁场辅助激光加工

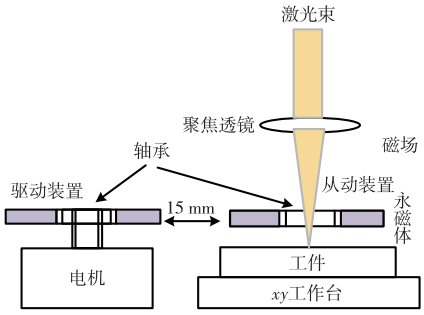
为改善激光加工的工艺质量，研究人员正在尝试将外加磁场应用于激光加工。通过永磁体产生外部磁场和洛伦兹力，从而增加电子速度、等离子体密度来提高工艺性能。目前磁场辅助激光加工在反射材料上进行了试验，但是对于激光束加工仍然具有很大的挑战性。

高反射铝 6061 材料的加工(反射率为 90%)采用磁场辅助激光加工工艺[73]。永磁体产生静态和动态磁场，如图 12(a)和(b)所示。在静磁场发现磁体越多孔深越深。在动态磁场作用下，对 0，100 和 350 rpm 转速下的孔深和孔径进行分析。结果表明，在动态磁场作用下热影响区和入口直径分别减小了 37% 和 30%。图 12(c)和(d)展示了不同磁体数量和旋转速度下孔深度和入口直径的变化。Ho 等[74]进行了磁场辅助激光冲击钻孔，使用直径为 10 mm 的圆形中空永磁体，其具有 1.5 mm，3 mm 和 4.5 mm 的可变内孔尺寸，发现磁场辅助激光冲击钻孔技术可以显著提高孔质量。在磁场作用下，孔深提高了 87.7%，这是因为洛伦兹力有助于熔融材

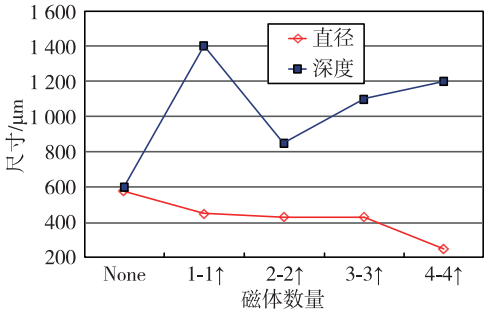
料向上排出，等离子体的膨胀增加了材料从侧壁的去除速率。为改善激光钻孔中等离子体特性，在激光加工中施加一个单向外磁场。纵向磁场对等离子体能量的增强作用比横向磁场更明显，等离子体通道的深度和宽度随纵向磁场强度的增加而增加，进一步提高了熔融物的去除率[75]。



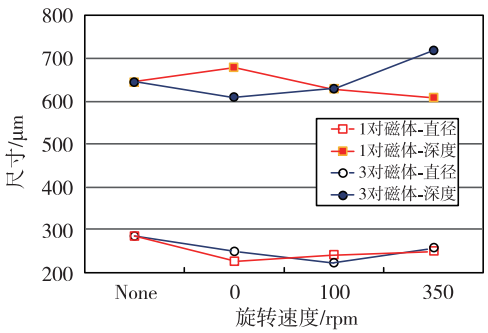
（a）静态磁场装置



（b）动态磁场装置



（c）静态磁场不同磁体数和转速对孔径孔深的影响



（d）动态磁场不同磁体数对孔径孔深的影响

图12 磁场辅助激光加工[73]

Wang等[76]系统研究了磁场、水和激光的组合效应，探索了磁场辅助激光加工镁合金盲孔和通孔，并使用飞秒和毫秒激光器在有和没有水浸的情况下进行对比试验。发现磁场增加了盲孔和通孔的入口直径，通过增加磁场强度可改善孔附近HAZ中的晶粒尺寸，以实现晶粒细化。

2.3 液体辅助激光加工

激光加工后对孔内壁观察，常见热缺陷包括HAZ、重铸层、碎片和裂纹。由于毫秒到微秒激光器的脉冲宽度较长，所以存在热效应，但是脉冲宽度较短的加工系统成本较高，例如飞秒和皮秒脉冲。因此，水辅助激光微加工技术用于减少烧蚀过程中加工区域的多余热量[77]。水辅助激光微加工技术最常用的液体介质是水，其成本低。水下或射流水辅助激光采用不同的激光，如CO_2和Nd:YAG，可以最大限度地减少热应力[78]。薄薄的水层覆盖在工件上，去除多余的热量和碎屑，水层过厚则会导致激光脉冲能量显著损失。研究人员还尝试使用水滴辅助加工，发现流动的水滴有助于从加工区域去除碎屑并消除孔的锥度，提高了材料去除量。Mistry等[79]通过有限元分析技术模拟液体辅助激光打孔。图13显示了水辅助激光钻孔装置示意图[80]。

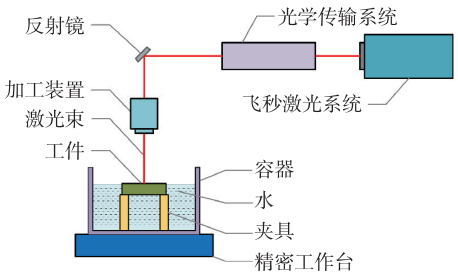
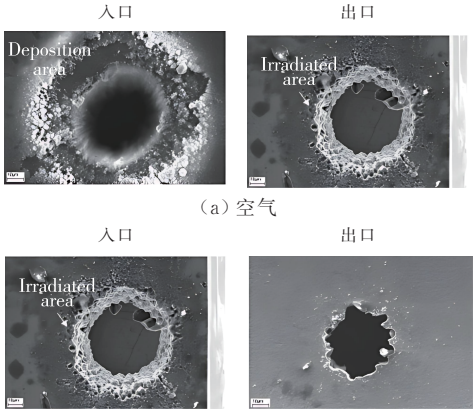


图13 水辅助激光钻孔装置[80]

Behera等[81]在工件表面上方覆盖了10 mm厚的水层，在加工过程中保持不变。观察到表面粗糙度比在空气中小2.7倍。在水下激光打孔中，孔径和孔深与空气中加工表现出相同的随扫描速度减小的趋势，粗糙度先减小后增大。Wee等[82]使用环切技术在空气和水介质中在硅片上进行50 μm尺寸的微钻孔，图14(a)和(b)分别为空气和水下的加工形貌。明显观察到空气介质中出口圆度较差，出口直径较小。水的冷却作用导致熔化材料的再次沉积效果减小，因此水下微孔的孔径较大。

Chung等[83]使用CO_2激光设备在水下进行微孔加工，最大激光功率为30 W，实现了水下加工无热裂纹。研究者在石英玻璃上进行水辅助飞秒



（a）空气

（b）水

图14　不同介质中微孔的入口和出口形貌[82]

激光钻孔，通过SEM分析孔壁发现表面粗糙度有所改善[84]。将水辅助与在空气介质中钻孔进行比较，水辅助增加了孔的入口直径和出口直径，减小了孔锥角。水辅助还可以减少烧蚀材料在孔壁的残留和再沉积，孔壁几乎没有残留和再沉积在洞口附近[85]。研究者尝试喷雾辅助激光加工技术，在金刚石涂层表面形成薄且快速流动的水膜，喷雾液滴从撞击点径向分散，并形成椭圆形，喷雾辅助加工的效果优于水下和干式加工[86]。

液体辅助激光加工减少了工件表面的热应力和裂纹，降低了孔表面和孔内壁的热影响区。此外，在该加工过程中表面粗糙度也得到显著改善。

2.4　激光复合加工工艺的适用场景和优缺点

基于激光的复合加工工艺克服了单一加工方式造成的加工缺陷，可以获得更好的表面完整性和更高的精度。不同的激光复合技术有不同的适用场景，表2展示了振动、磁场、液体三种辅助激光打孔技术的适用范围和优缺点。

表2　激光复合加工工艺的适用场景和优缺点

复合加工工艺	适用范围	优点	缺点
振动辅助激光加工	具有低热影响区的脆性材料（如陶瓷、玻璃）	通过振动调制激光能量，可减少熔渣和热裂纹，提升孔壁质量与深径比，同时抑制材料重铸层[68,70]	系统复杂度高，需精确控制振动参数（频率、振幅），加工效率低于激光打孔[70]
磁场辅助激光加工	航空航天类高精度磁性元器件	通过控制等离子体运动和熔融金属流动，可减少飞溅和重铸层，提高孔壁光洁度同时降低热影响区[74-75]	工艺调试难度大，磁场强度和磁体密度难以控制，仅适用于磁性材料[74]
液体辅助激光加工	高精度、低热损伤的生物医疗器件和精密电子元件	显著减少热影响区、抑制裂纹和熔渣，并提高孔壁光洁度，增强激光能量耦合效率，提升加工深度[77-78]	液体环境可能增加工艺复杂性，需精确控制液体流速和清洁度，且不适用于某些易腐蚀材料[84]

3　结论

与其他先进制造工艺相比，激光打孔是一种具有高度灵活性的非接触式先进加工方法，主要优势在于几乎能够加工所有类型的材料。激光加工方式有脉冲打孔、环切制孔和旋切制孔，加工精度依次递增，但加工效率逐渐降低。影响加工质量的主要因素有：激光参数（激光功率、波长、光斑直径）、材料参数（类型、厚度）和工艺参数（进给速率、焦平面位置、频率、能量、脉冲持续时间、辅助气体类型和压力）。激光钻孔技术虽然是使用频率最高的一种加工方式，但也有一些缺点，包括易形成需要去除的飞溅物或重铸层、导致产生微裂纹的热残余应力。这些缺点可以通过适当调节工艺参数来降低，提高激光打孔的性能。激光复合加工技术使多个工艺的能量源可以用于加工，有助于提高零件的质量和特性。对于条件苛刻的适用场景、特殊性能和要求的材料，可选择性使用激光复合加工工艺。

尽管激光加工具有显著的优势，但目前研究人员还面临一些挑战与未来工作的改进方向：

（1）现有文献表明，在激光打孔工艺优化过程中，研究人员主要以单一质量特性为目标。一个质量特性（如锥度）的最佳工艺参数可能会恶化其他的质量特性（如圆度），从而影响整体质量。目前还没有以多个质量特性为目标的工艺参数优化文献，多目标优化激光打孔过程是未来研究的一个主要方向。

（2）激光复合加工工艺的不同加工设置会导致工件的二次定位误差，所以需要开发一种具有两个或多个工序的加工装置。同时设计成本也需考虑，可通过结构设计和布局优化兼顾整体装置的经济性。

（3）测量在制造过程中也起着至关重要的作用，因此对于高精度的微型部件，必须在加工装置上测量几何尺寸，如锥度、圆度和表面粗糙度等。

参考文献：

[1] Li B H, Liu Z, Wang H, et al. Study on the stainless steel $1Cr_{18}Ni_9Ti$ micro-hole drilling experiment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 596: 43-46.

[3] Kim D W, Cho M W, Seo T I, et al. Application of design of experiment method for thrust force minimization in step-feed micro drilling[J]. Sensors, 2008, 8(1): 211-221.

[6] Ravi-Kumar S, Lies B, Zhang X, et al. Laser ablation of polymers: a review[J]. Polymer International, 2019, 68(8): 1391-1401.

[7] Plotnikov M B, Saratikov A S. Effect of prolonged intracarotid infusion of euphylline on the brain blood supply and metabolism of cats with intracerebral hemorrhage [J]. Farmakologiia i Toksikologiia, 1984, 47(3): 50-55.

[8] Biswas R, Kuar A S, Mitra S. Process optimization in Nd: YAG laser microdrilling of alumina-aluminium interpenetrating phase composite[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2015, 4(3): 323-332.

[11] Zhang Z, Wang W, Jiang R, et al. Investigation on geometric precision and surface quality of microholes machined by ultrafast laser[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 121: 105834.

[12] Zhang Q, Wang C, Liu Y, et al. Picosecond laser machining of deep holes in silicon infiltrated silicon carbide ceramics[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2015, 30(3): 437-441.

[13] 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.

[14] Gautam G D, Pandey A K. Pulsed Nd: YAG laser beam drilling: a review[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 100: 183-215.

[15] Bandyopadhyay S, Sarin Sundar J K, Sundararajan G, et al. Geometrical features and metallurgical characteristics of Nd: YAG laser drilled holes in thick IN718 and Ti-6Al-4V sheets [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127 (1): 83-95.

[16] Illyefalvi-Vitez Z. Laser processing of adhesives and polymeric materials for microelectronics packaging applications [C]//4th International Conference on Adhesive Joining and Coating Technology in Electronics Manufacturing, 2000: 289-295.

[17] Tuersley I P, Hoult T P, Pashby I R. Nd - YAG laser machining of SiC fibre/borosilicate glass composites. Part Ⅱ. The effect of process variables [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1998, 29(8): 955-964.

[18] Araújo D, Carpio F J, Méndez D, et al. Microstructural study of CO_2 laser machined heat affected zone of 2024 aluminum alloy [J]. Applied Surface Science, 2003, 208: 210-217.

[19] Sezer H K, Li L, Schmidt M, et al. Effect of beam angle on HAZ, recast and oxide layer characteristics in laser drilling of TBC nickel superalloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(15): 1972-1982.

[20] Yilbas B S. Parametric study to improve laser hole drilling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 70(1/3): 264-273.

[21] Ghoreishi M, Low D K Y, Li L. Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(9): 985-995.

[22] Tam S C, Yeo C Y, Jana S, et al. Optimization of laser deep-hole drilling of Inconel 718 using the Taguchi method [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1993, 37 (1/4): 741-757.

[23] Corcoran A, Sexton L, Seaman B, et al. The laser drilling of multi-layer aerospace material systems [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123(1): 100-106.

[24] Jiang H, Ma C, Li M, et al. Femtosecond laser drilling of cylindrical holes for carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites[J]. Molecules, 2021, 26(10): 2953.

[25] Salama A, Li L, Mativenga P, et al. High-power picosecond laser drilling/machining of carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites [J]. Applied Physics A, 2016, 122 (2): 73.

[26] He C, Weber M, Gillner A. Recast-free helical drilling of fused silica using SHG picosecond laser pulses[J]. Journal of Laser Micro Nanoengineering, 2020, 15(2): 158-163.

[27] Li M, Wen Z, Wang P, et al. Size effect of femtosecond laser helical drilling on nickel-based single crystal superalloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 116: 77-91.

[28] Jia X, Lin J, Li Z, et al. Continuous wave laser ablation of alumina ceramics under long focusing condition[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 134: 530-546.

[29] Shin J, Kang S, Park C, et al. A study on the effect of Cu reflector in glass drilling using a pulsed NIR laser[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 116: 328-337.

[30] Qiao Y, Chen T, Ma H, et al. Experimental study on the sidewall quality of femtosecond laser drilling CFRP [J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 266: 110972.

[31] Bustamante L, Karnam D, Lo Y L. Novel approach to nanosecond laser drilling of a crack-free through hole on SiC wafer [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 5818-5829.

[32] Han Y, Zhang J, Wang X, et al. Parametric optimization of hole taper control in ultraviolet nanosecond laser micro-drilling of copper foil[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 167: 109706.

[33] Wang H, Yu G, Xin W, et al. New solution for machining deep high-aspect-ratio micro holes based upon picosecond laser layered trepanning [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 189: 113107.

[34] Wang R, Dong X, Wang K, et al. Two-step approach to improving the quality of laser micro-hole drilling on thermal barrier coated nickel base alloys [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 406-415.

[35] Kar T, Deshmukh S S, Datta S, et al. An experimental study of low power fiber laser micro drilling of Aluminium

6061 alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 82: 96-102.

[36] Yu Z, Hu J, Li K. Investigating the multiple-pulse drilling on titanium alloy in picosecond laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 268: 10-17.

[37] Saravanan M, Bupesh Raja V K, Palanikumar K, et al. Laser drilling parameter optimization for Ti_6Al4v alloy [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 4003-4007.

[38] Dhaker K L, Pandey A K. Experimental study of hole taper in laser trepan drilling of nickel based super alloy sheet[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(11): 23994-24004.

[39] Hanon M M, Akman E, Genc Oztoprak B, 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.

[40] Jia X, Chen Y, Wang H, et al. Experimental study on nanosecond-millisecond combined pulse laser drilling of alumina ceramic with different spot sizes[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 130: 106351.

[41] Bharatish A, Narasimha Murthy H N, Anand B, et al. Characterization of hole circularity and heat affected zone in pulsed CO_2 laser drilling of alumina ceramics[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 53: 22-32.

[42] Nikumb S, Chen Q, Li C, et al. Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers[J]. Thin Solid Films, 2005, 477(1-2): 216-221.

[43] Wlodarczyk K L, Brunton A, Rumsby P, et al. Picosecond laser cutting and drilling of thin flex glass[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78: 64-74.

[44] Zhou Y, Hong M H, Fuh J Y H, et al. Near-field enhanced femtosecond laser nano-drilling of glass substrate[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 449(1/2): 246-249.

[45] Liu X, Li L, Yang S, et al. Optimization of nanosecond laser drilling strategy on CFRP hole quality[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 332: 118559.

[46] Zhao C, Ma Z, Sun J, et al. Femtosecond laser drill high modulus CFRP multidirectional laminates with a segmented arc-based concentric scanning method[J]. Composite Structures, 2024, 329: 117769.

[47] Wang P, Zhang Z, Liu D, et al. Comparative investigations on machinability and surface integrity of CFRP plate by picosecond laser vs laser induced plasma micro-drilling[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 151: 108022.

[48] Zhu M, Ouyang J, Tian Y, et al. Understanding factors affecting the process efficiency, quality and carbon emission in laser drilling of CFRP composite *via* tailored sequence multiple-ring scanning[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 272: 111156.

[49] Liu C, Li C, Gao L, et al. Micro-hole drilling of 2.5D C/SiC composite with picosecond laser: numerical modeling and experimental validation on hole shape evolution[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 81: 852-864.

[50] Hattori J, Ito Y, Jo H, et al. High-speed observation of pulse energy and pulse width dependences of damage generation in SiC during ultrashort pulse laser drilling[J]. Applied Physics A, 2020, 126(11): 861.

[51] Sun D R, Wang G, Li Y, et al. Laser drilling in silicon carbide and silicon carbide matrix composites[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 170: 110166.

[52] Liu Y, Wang C, Li W, et al. Effect of energy density and feeding speed on micro-hole drilling in C/SiC composites by picosecond laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 3131-3140.

[53] Low D K Y, Li L, Corfe A G, et al. Spatter-free laser percussion drilling of closely spaced array holes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(3): 361-377.

[54] Guo D, Cai K, Huang Y, et al. A novel anti-spatter and anti-crack laser drilling technique: application to ceramics[J]. Applied Physics A, 2003, 76(7): 1121-1124.

[55] Bandyopadhyay S, Gokhale H, Sarin Sundar J K, et al. A statistical approach to determine process parameter impact in Nd: YAG laser drilling of IN718 and Ti-6Al-4V sheets[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(2): 163-182.

[56] Demir A G, Previtali B, Bestetti M. Removal of spatter by chemical etching after microdrilling with high productivity fiber laser[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 317-326.

[57] Lucas L, Zhang J. Femtosecond laser micromachining: A back-to-basics primer[J]. Industrial Laser Solutions, 2012, 27(4):29-34.

[58] Yu Z, Hu J, Li K. Investigating the multiple-pulse drilling on titanium alloy in picosecond laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 268: 10-17.

[59] Zhao W, Wang L, Yu Z, et al. A processing technology of grooves by picosecond ultrashort pulse laser in Ni alloy: enhancing efficiency and quality [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 214-221.

[60] Salama A, Yan Y, Li L, et al. Understanding the self-limiting effect in picosecond laser single and multiple parallel pass drilling/machining of CFRP composite and mild steel [J]. Materials & Design, 2016, 107: 461-469.

[61] Wlodarczyk K L, Brunton A, Rumsby P, et al. Picosecond laser cutting and drilling of thin flex glass[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78: 64-74.

[62] Zhao W, Shen X, Liu H, et al. Effect of high repetition rate on dimension and morphology of micro-hole drilled in metals by picosecond ultra-short pulse laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124: 105811.

[63] Riveiro A, Quintero F, Lusquiños F, et al. Experimental study on the CO_2 laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(8): 1400-1409.

[64] Salama A, Li L, Mativenga P, et al. High-power picosecond laser drilling/machining of carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites [J]. Applied Physics A, 2016, 122 (2): 73.

[65] Zhao X, Shin Y C. Femtosecond laser drilling of high-aspect ratio microchannels inglass[J]. Applied Physics A, 2011, 104 (2): 713-719.

[66] Huang H, Yang L M, Liu J. Micro-hole drilling with femtosecond fiber laser [C]//Conference on Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVIII, 2013: 1-9.

[67] Tuennermann A, Nolte S, Limpert J. Femtosecond *vs.* picosecond laser material processing [J]. Laser Technik Journal, 2010, 7(1): 34-38.

[68] McNally C A, Folkes J, Pashby I R. Laser drilling of cooling holes in aeroengines: state of the art and future challenges[J]. Materials Science and Technology, 2004, 20(7): 805-813.

[69] Rahman M, Asad A B M A, Masaki T, et al. A multiprocess machine tool for compound micromachining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(4): 344-356.

[70] Singh K, Maurya S K, Kumar S. A review on introduction to hybrid machining process [J]. International Journal of Advanced Engineering and Technology, 2018, 2(3): 22-26.

[71] Zhang Y, Xie B. Investigation on hole diameter non-uniformity of hole arrays by ultrasonic vibration-assisted EDM [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(11): 3083-3091.

[72] Park J K, Yoon J W, Kang M C, et al. Surface effects of hybrid vibration-assisted femtosecond laser system for micro-hole drilling of copper substrate [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: s801-s807.

[73] Zheng H Y, Huang H. Ultrasonic vibration-assisted femtosecond laser machining of microholes [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(8): N58.

[74] Choi W, Kim H Y, Jeon J W, et al. Vibration-assisted femtosecond laser drilling with controllable taper angles for AMOLED fine metal mask fabrication[J]. Materials, 2017, 10(2): 212.

[75] Alavi S H, Harimkar S P. Ultrasonic vibration-assisted continuous wave laser surface drilling of materials [J]. Manufacturing Letters, 2015, 4: 1-5.

[76] 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.

[77] Kang D, Zou P, Wu H, et al. Research on ultrasonic vibration-assisted laser polishing of the 304 stainless steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 403-417.

[78] Chang Y J. Magnetic assisted laser micromachining for highly reflective metals[J]. Journal of Laser Micro, 2012, 7(3): 254-259.

[79] Ho C C, Tseng G R, Chang Y J, et al. Magnetic-field-assisted laser percussion drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1): 329-340.

[80] Saxena I, Wolff S, Cao J. Unidirectional magnetic field assisted Laser Induced Plasma Micro-Machining [J]. Manufacturing Letters, 2015, 3: 1-4.

[81] 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.

[82] Cao X W, Chen Q D, Fan H, et al. Liquid-assisted femtosecond laser precision-machining of silica [J]. Nanomaterials, 2018, 8(5): 287.

[83] Alahmari A M, Ahmed N, Darwish S. Laser beam micro-machining under water immersion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9): 1671-1681.

[84] Mistry V, James S. Finite element analysis and simulation of liquid-assisted laser beam machining process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(5): 2325-2331.

[85] Ren N, Xia K, Yang H, et al. Water-assisted femtosecond laser drilling of alumina ceramics[J]. Ceramics International, 2021, 47(8): 11465-11473.

[86] Behera R R, Sankar M R, Swaminathan J, et al. Experimental investigation of underwater laser beam micromachining (UW-LBμM) on 304 stainless steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9): 1969-1982.

[87] Wee L M, Ng E Y K, Prathama A H, et al. Micro-machining of silicon wafer in air and under water[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1): 62-71.

[88] Chung C K, Chang H C, Shih T R, et al. Water-assisted CO_2 laser ablated glass and modified thermal bonding for capillary-driven bio-fluidic application [J]. Biomedical Microdevices, 2010, 12(1): 107-114.

[89] An R, Li Y, Dou Y, et al. Water-assisted drilling of microfluidic chambers inside silica glass with femtosecond laser pulses[J]. Applied Physics A, 2006, 83(1): 27-29.

[90] Ren N, Xia K, Yang H, et al. Water-assisted femtosecond laser drilling of alumina ceramics[J]. Ceramics International, 2021, 47(8): 11465-11473.

[91] Guo Z, Guo B, Zhao Q, et al. Optimisation of spray-mist-assisted laser machining of micro-structures on CVD diamond coating surfaces[J]. Ceramics International, 2021, 47(15): 22108-22120.

作者简介：

肖　强(1976—)，男，博士，教授，主要研究方向为先进制造技术。