

激光与光电子学进展

激光加工微孔质量的研究

张云龙^{1,2}, 孙树峰^{1,2*}, 王茜^{1,2}, 张丰云^{1,2}, 刘力^{1,2}, 刘世光^{1,2}

¹青岛理工大学激光绿色智能制造技术实验室, 山东 青岛 266520;

²山东省激光绿色高效智能制造工程技术研究中心, 山东 青岛 266520

摘要 激光加工凭借加工精度高、效率高、无污染、应用材料范围广泛的独特优势,成为加工微孔的首选,尤其是在高质量微孔的加工中有着不可替代的作用。介绍了激光加工微孔的优势及研究意义,总结了激光加工微孔的质量特征(如深径比、锥度、圆度、重铸层等),综述了激光加工微孔质量的研究现状,讨论了打孔方式、激光工艺参数(如脉冲宽度、波长、重复频率等)和加工环境(如真空、气体、液体等)三个因素对激光加工微孔质量的影响及其造成影响的原因,并对激光加工微孔的发展方向和今后研究的重点进行了总结。

关键词 激光技术; 激光加工; 微孔质量; 工艺参数; 打孔方式; 加工环境

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1900002

Research on Quality of Micro-Holes Fabricated by Laser Drilling

Zhang Yunlong^{1,2}, Sun Shufeng^{1,2*}, Wang Xi^{1,2}, Zhang Fengyun^{1,2}, Liu Li^{1,2}, Liu Shiguang^{1,2}

¹Laser Green Intelligent Manufacturing Technology Laboratory, Qingdao University of Technology,
Qingdao, Shandong 266520, China;

²Shandong Research Center of Laser Green and High Efficiency Intelligent Manufacturing Engineering Technology,
Qingdao, Shandong 266520, China

Abstract With the unique advantages of high processing accuracy, high efficiency, no pollution, and wide range of application materials, laser processing has become the first choice for micro-hole fabrication, especially in the processing of high-quality micro-holes. The advantages and research significance of laser processing micro-holes are introduced. The quality characteristics of laser processing micro-holes (such as depth-diameter ratio, taper, roundness, and recast layer) are summarized. The current research status of micro-hole quality of laser processing is reviewed and discussed. The impact of drilling methods, laser process parameters (such as pulse width, wavelength, and repetition frequency), and processing environment (such as vacuum, gas, and liquid) on the quality of laser processing micro-holes and the reasons for the impact are discussed. The development direction of laser processing of micro-holes and the focus of future research are summarized.

Key words laser technique; laser processing; micro-hole quality; process parameters; drilling method; processing environment

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 220.4610

收稿日期: 2021-01-06; 修回日期: 2021-01-27; 录用日期: 2021-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(51775289)、山东省自然科学基金(ZR2018ZB0524)

通信作者: *shufeng2001@163.com

1 引言

微孔通常是指直径小于 300 μm 的孔,其在航空航天、医疗器械、汽车、电子封装及新能源领域等有着极其重要的作用^[1-4]。在航空航天领域,微孔大多应用于涡轮发动机,如空气均匀地通过涡轮叶片上加工的气膜孔,其孔径通常为 100~800 μm ,微孔的倾斜角度为 15°~90°,微孔应用于涡轮发动机可以降低发动机涡轮叶片的温度^[5-6],提高发动机的服役温度,延长使用寿命;在医疗器械领域,缝合针的针径为 500~1300 μm ,尾孔的直径为 250~650 μm ,制作带线缝合针的关键工序是制作尾孔,直径较小的尾孔会减小血管损伤的程度,另外输液导管孔和栓塞保护过滤器同样也是微孔在医疗器械的重要应用;在汽车喷油器上,燃油通过喷油孔以高速射流方式进入燃烧室,由连续态转化为雾化液滴以提高燃油效率^[7-8];在电子封装领域,电子陶瓷基板表面的盲孔、通孔可实现芯片导通和引脚固定,实现电子系统的高密度互连^[9-10];在新能源领域,聚变核能是人类最理想的洁净能源之一,该工程中的点火靶充气微孔结构制造是关键环节之一,壁厚为数微米至数百微米,需在球壳上加工出直径为数微米至十几微米的微孔;在锂离子电池中,多孔材料由于具有非常大的孔体积,可以为充电和放电过程提供缓冲,提高能量密度,延长电池的使用寿命^[11];光纤传感器中的微孔结构能够提高传感器的灵敏度和抗温度串扰能力^[12]。

目前,微孔结构朝着小尺寸、大深径比、高表面质量和尺寸精度高的方向发展,因此其加工制造成为技术难题。传统的机械加工易导致机械钻头断裂,孔中心线易偏斜,孔壁表面质量低^[13],而特种加工的方法也存在极大的限制,如超声加工法速度较低且微孔精度较低^[14-15];高压水射流法设备投资较大,加工表面质量不佳且噪声大^[16];电火花加工只能加工导电材料,加工效率低,成本高,孔壁存在热影响区、重铸层和微裂纹等缺陷^[17-18];电化学加工法的加工对象局限于金属材料^[19];电子束加工法需要在真空环境下加工,使用条件苛刻,设备昂贵^[20]。

近些年,激光加工制造领域备受关注,随着激光技术的发展,多种激光加工技术应运而生,如激光切割、激光连接、激光微孔加工、激光熔覆等^[21-27]。其中,激光微孔加工是激光技术中应用最早、最为广泛的技术之一^[28-29],其具有高精度、高效率、无切削作用

力、无污染,以及可加工高硬度、高脆性等难加工材料等一系列优点^[30-33],备受研究者的青睐,特别是对于高质量微孔,相比于传统的加工方法,激光微孔加工是一种更加有效的加工手段。激光加工所形成的微孔存在其特有的质量特征,并且微孔的质量受不同因素的影响。本文总结了激光加工微孔的质量特征,总结了打孔方式、激光工艺参数和加工环境三个因素对微孔质量的影响规律,从而为激光加工高质量微孔的进一步发展提供参考。

2 激光加工微孔质量特征

激光加工材料可大致分为金属(黑色金属、有色金属和高级工程金属等)、非金属(玻璃、陶瓷和半导体等)和复合材料(聚合物基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料等)三大类,不同材料被加工后形成的微孔具有相似的质量特征,通常用直径、深度、锥度、圆度、重铸层、热影响区、微裂纹、粗糙度和孔口堆积及飞溅等对微孔进行质量表征,进而确定一个高质量的微孔结构。图 1 所示为微孔的各种质量特征。

1) 深径比

深径比就是微孔的深度与直径的比值,是衡量微孔质量的重要标准,如航空发动机涡轮叶片气膜孔的直径大多介于 0.3~0.5 mm,深度最大达到 10 mm,深径比达到了 20:1;德国 Rofin-LASAG 公司利用飞秒激光实现了深径比达 100:1 的微孔加工^[33],大深径比微孔加工一直是技术难点和重要的质量评价标准。

2) 锥度

微孔的锥度通常可表示为^[34]

$$\theta = \arctan\left(\frac{d_{\text{ent}} - d_{\text{exit}}}{2t}\right), \quad (1)$$

式中: d_{ent} 、 d_{exit} 和 t 分别为工件的孔入口直径、孔出口直径和厚度。微孔锥度的示意图如图 1(a)所示。航空发动机叶片气膜孔、汽车喷油器微细喷油孔等关键零部件需要微孔锥度小甚至锥度为零的直壁孔,某些特殊应用中还需要锥度值为负的倒锥孔^[35],例如柴油发动机喷油嘴上的微细倒锥形喷孔可有效提高燃油的燃烧效率,减少废气排放等。激光束的收敛-发散性质是导致微孔锥度产生的原因^[36-37]。

3) 圆度

在激光打孔中,孔的圆度是微孔的一个非常重要的特性,它包括出口圆度和入口圆度,如图 1(b)所示, $d_1 \sim d_6$ 为孔不同方向的直径,通常圆度 C 可表示为

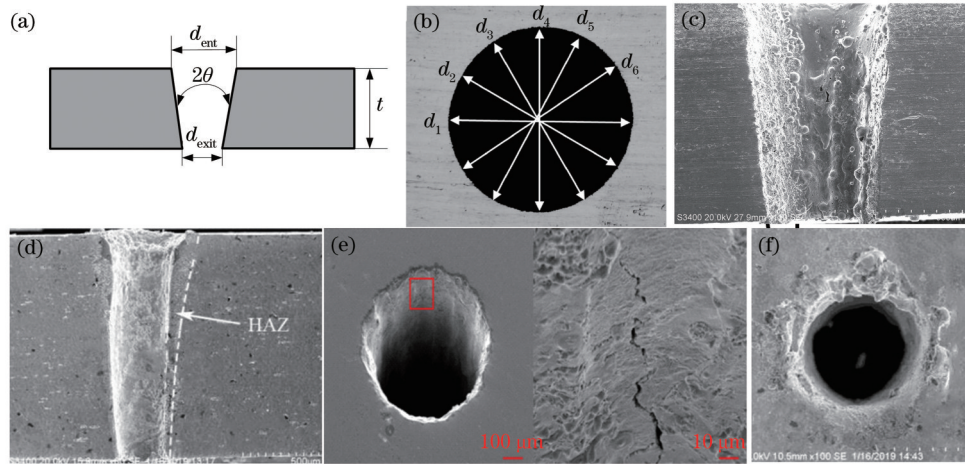


图1 微孔质量特征示意图。(a)锥度;(b)圆度;(c)重铸层;(d)热影响区;(e)微裂纹;(f)孔口堆积

Fig. 1 Schematic diagrams of micropore quality characteristics. (a) Taper; (b) roundness; (c) recast layer; (d) heat-affected zone; (e) microcracks; (f) spatter deposition around periphery of holes

$$C = \frac{D_{\min}}{D_{\max}}, \quad (2)$$

式中: D_{\min} 和 D_{\max} 分别为测量得到的若干组不同方向直径中的最小直径和最大直径。图1(b)所示为若干组不同方向的孔径。微孔不圆是由激光聚焦时的衍射、非线性效应,光斑本身的质量,光路,材料本身对激光的吸收率,以及打孔时产生的熔渣堆积等多因素造成的。

4) 重铸层

在加工微孔过程中,激光束聚焦到工件表面时,使材料发生熔化、气化和冷凝,热量的增加使得材料蒸气以很大的压力从底部喷出,在急速冷却和加热过程中,有一些无法喷出的熔化材料重新凝附在孔壁表面,形成了重铸层。图1(c)所示为在镍基合金上采用纳秒激光加工微孔存在的较为严重的重铸层。重铸层的冶金状态、力学性能和基体材料差别较大,极易引发微裂纹的产生。因此在激光加工微孔的过程中必须严格控制重铸层,设法使其厚度减小甚至为0^[38]。

5) 热影响区

当激光作用到工件表面时发生热作用,由于激光束温度较高,工件的物理、机械和化学性能在相互作用过程中发生变化,在这些因素的综合影响下侧壁出现热影响区。热影响会导致工件在使用中发生疲劳断裂和可靠性降低,因此,在激光加工微孔的过程需尽量降低热影响^[39]。图1(d)为纳秒激光加工NI718微孔存在的热影响区。

6) 微裂纹

激光加工过程中,熔融材料在瞬间凝固和冷却的过程中的固态收缩受到阻碍,此时出现拉应力,当

拉应力的值超过材料在该温度下的强度极限时便会产生残余应力,导致重铸层出现裂纹。微裂纹对于微孔的质量影响极大,在工件使用过程中,微裂纹会向工件基体蔓延,这不但缩短了工件的疲劳寿命,而且还会导致工件产生疲劳断裂。在加工过程中应该设法去除微裂纹,杜绝其存在。图1(e)是在激光加工后的微孔侧壁裂纹及放大图^[40]。

7) 表面粗糙度

除重铸层、微裂纹、热影响区外,孔壁表面粗糙度也是重要的研究对象^[41]。微孔的粗糙度指的是微孔内壁表面的细微间隔的表面不规则性,用 R_a 表示,微孔表面粗糙度通常要求小于 $0.8 \mu\text{m}$,孔内无毛刺,粗糙度好。由于实际应用对微孔尺寸精度的要求较高,目前,常用表面轮廓仪、干涉显微镜、扫描探针显微镜等对微孔粗糙度进行测量。激光烧蚀不均匀造成的不平整以及烧蚀过程中产生的喷溅物经冷却后沉积在微孔表面是造成孔壁表面粗糙的主要原因。

8) 孔口堆积及飞溅

激光加工过程中部分熔融液体在材料蒸气的反冲压力作用下喷溅排出并沉积在孔口周围,形成碎屑、碎片、毛刺等瑕疵^[42],它是激光打孔过程中的固有缺陷之一。熔融喷溅在孔口表面所形成的挂渣、毛刺等缺陷易划伤其他部件,脱落时易掉落在孔中将小孔堵塞,影响工件机械性能和使用寿命。图1(f)所示为激光加工碳化硅材料微孔孔口的堆积物^[43]。

因此要获得的高质量微孔应该满足这些条件:实际要求的深径比、锥度、粗糙度,尽可能大的圆度,无重铸层、热影响区及孔口堆积现象,杜绝微裂纹的存在。

3 激光加工微孔质量的研究现状

利用激光进行微孔加工是将材料加热熔化再凝固的复杂热变过程,因而微孔的质量受到众多因素的影响,有必要对一些影响微孔质量的主要因素进行研究,以确保激光加工的微孔的质量满足实际生产的需求。目前,影响微孔加工质量的研究主要集中在以下三个方面:激光工艺参数、打孔方式、加工环境。

3.1 激光参数对微孔质量影响的研究

1) 脉冲宽度。脉冲宽度是指单个激光脉冲所持续的时间,按照脉冲宽度可将激光分为毫秒、纳秒、皮秒、飞秒激光等。张银江等^[44-45]采用毫秒激光在氧化铝陶瓷上打孔时,发现在其他参数相同的情况下,微孔的直径随着脉冲宽度的增加先增大后趋于一定值不变,深度随着脉冲宽度的增加而增

加^[46],这是由于脉冲宽度的增加延长了激光在材料表面的作用时间,加工区域吸收了更多的能量,孔入口、出口直径增加,深度方向的材料不断地发生熔融并排出,孔深度增加,但由于光斑直径的限制,热量扩散不足以使更多的熔池边缘的材料被熔化,孔口直径趋于一定的值^[44],微孔直径和深度随脉冲宽度的变化规律如图 2(a)、(b)所示。图 2(c)所示为采用不同脉冲宽度的激光在硅材上加工得到的微孔^[47-48],随着脉冲宽度的减小,孔壁逐渐光滑,粗糙度减小,孔口堆积逐渐减少,重铸层厚度也逐渐减小,这是因为脉冲宽度越大,获得的激光峰值功率越低,打孔过程中材料的去除则以熔化为为主,材料的蒸气压力减小,液态熔融物无法从孔底端排出,在孔入口表面形成的堆积物和飞溅增多,孔内壁上的熔融物重新冷却凝固,导致重铸层增多,孔壁表面粗糙度变差^[49]。Ng 等^[50]使用 YAG 激光器在

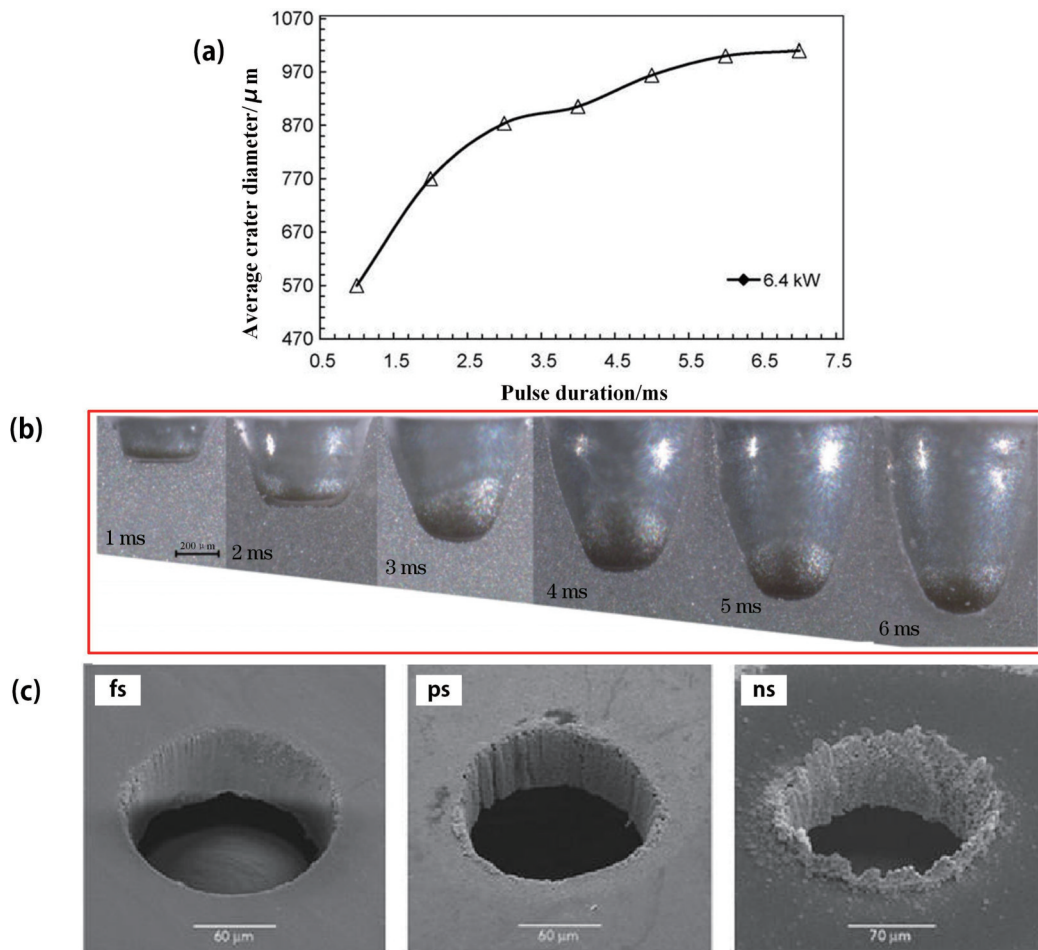


图 2 脉冲宽度对微孔质量的影响规律^[47-48]。(a)脉冲宽度和微孔直径的关系;(b)脉冲宽度和微孔深度的关系;(c)不同脉冲宽度下微孔的形貌图

Fig. 2 Influence of pulse width on quality of micro-holes^[47-48]. (a) Relationship between pulse width and hole diameter; (b) relationship between pulse width and hole depth; (c) micro-hole morphologies under different pulse widths

低碳钢上打孔时发现较小的脉冲宽度和较高的峰值功率可导致较小的飞溅厚度,从而产生更好的孔几何形状。

2) 重复频率。Kamlage 等^[51]使用飞秒激光对不锈钢材料进行打孔实验,结果显示随着激光频率的增加,微孔的出口直径增大,而入口直径减小,如图 3(a)所示,这是由于随着重复频率的增加,单位时间内激光脉冲个数增多,飞秒激光烧蚀材料产生的微粒来不及喷出,和后续激光进一步相互作用,金属微粒的存在使得空气击穿阈值降低,更易产生等离子体,随着微孔内等离子体的不断增加,等离子体对微孔侧壁的刻蚀效应增强,同时激光光束产生畸变和发散,造成出口孔径增大。从图 3(b)中可以看出重复频率对微孔深度有影响,存在一个临界值,当重复频率高于这个临界值时,微孔的深度随着重复频率的增加而减小^[46,52],这是由于随着重复频率的增大,加工区域在单位时间内接收的脉冲数增多,孔内熔融物的积累增多,在重复频率达到临界值时,熔融物产生的速度大于其排出的速度,从而阻碍后续激光对孔底材料的去除。Mishra 等^[53]在厚度为 0.7 mm 的铝板上进行了激光钻孔,研究

了脉冲频率对微孔质量的影响,他们发现随着脉冲频率的增加,微孔的锥度呈现减小趋势,而热影响区厚度呈现增大趋势,如图 3(c)所示,这是由于在较高的重复频率下,微孔被打穿后,出口直径就会增加,因此锥度会减小,而热影响区厚度增加是因为相邻脉冲的时间间隔减小,在径向方向会发生热扩散,从而形成较大的热影响区域。另外,在较高的重复频率下,明显的熔体喷射造成孔壁粗糙、熔融物堆积在孔口等现象^[54],这是由于重复频率过高,在下一个脉冲到来时,上一个脉冲产生的部分熔融物还没来得及排出,就又在孔壁内被加热,熔融物在孔内堆积,导致重铸层变厚,粗糙度变差。Zhao 等^[55]通过在厚度不同的不锈钢上打孔发现重复频率对微浅孔的圆度未产生明显影响,如图 3(d)所示,而在对微深孔的加工中,随着重复频率的增加,圆度会出现变差的现象。

3) 激光能量。张铭峰等^[56]利用毫秒激光在陶瓷材料上加工微孔,研究发现在其他参数相同的条件下,微孔的直径和深度都随着激光能量的增加而增加最终趋于饱和,孔深和孔径增加是因为烧蚀区域温度随着激光能量的增加而增加,因而排出的熔

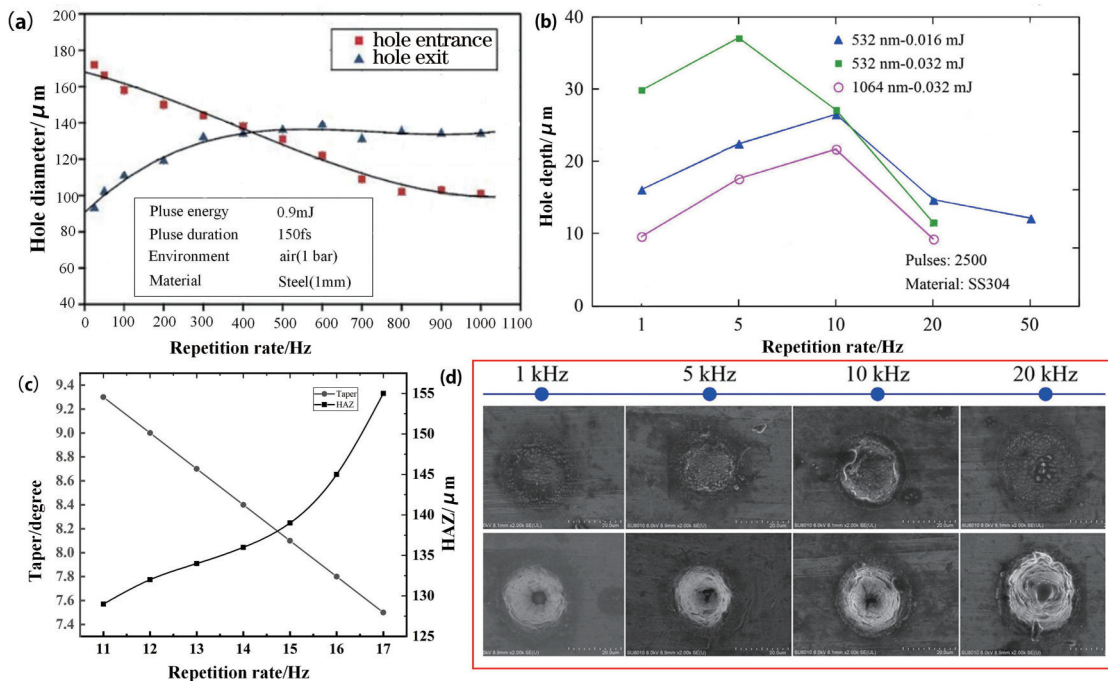


图 3 重复频率对微孔质量的影响规律^[51-53,55]。(a)重复频率和微孔直径的关系;(b)重复频率和微孔深度的关系;(c)重复频率和锥度、热影响区的关系;(d)重复频率对微浅孔圆度的影响

Fig. 3 Effect of repetition frequency on quality of micro-holes^[51-53,55]. (a) Relationship between repetition frequency and diameter of micro-holes; (b) relationship between repetition frequency and depth of micro-holes; (c) relationship among repetition frequency, taper, and heat-affected zone; (d) effect of repetition frequency on roundness of micro-shallow holes

融物也随之增多,但当烧蚀区域增大到一定值时,由热传导引起的能量扩散有限,熔池边缘材料的温度无法达到熔点,材料不能够进一步熔化喷出,孔径达到饱和,较高的激光能量将导致材料大量气化,促使材料在被加工过程中产生大量的等离子体,等离子体会对激光形成屏蔽作用,使得到达加工区域的实际激光能量减小,从而限制了后续的材料去除,最终孔深达到饱和。Kacar 等^[45-57]使用毫秒激光器在氧化铝上进行打孔实验,研究发现微孔锥度随着激光功率的增加而减小,并且微孔出口直径大于入口直径,从而出现负锥度,这是因为随着激光能量的增大,材料表面上方的反冲压力将推动孔中熔融物向上移动并从孔中排出,但由于温度变冷和重力作用,材料将会重新凝固在孔口,从而导致入口直径变小,图 4(a)所示为锥度随激光功率的变化规律,图 4(b)为微孔的出入口形貌。采用不同能量密度的飞秒激光对 TIC 陶瓷进行打孔时发现^[58],在不同能量密度下微孔出口的圆度均不小于 99%,而微孔出口圆度

随着能量密度的增大而增大最后趋于稳定,这种现象是由于激光与材料作用过程中,激光能量密度越大,激光对材料的去除能力就越强,能量密度低的激光深入材料内部进行加工的能力比较弱,所加工的微孔出口圆度也较差^[59]。le Harzic 等^[60]采用飞秒激光在不同金属(钢、铜、铝)上进行微加工,研究了能量密度对微孔质量的影响,结果显示,在高能量密度下,加工区域会出现热影响区和重铸层等缺陷,这是因为激光能量密度越高,高压蒸气带走的液相物质越多,但当激光能量过高时,长时间的加热会使过量的材料融化,熔融物重新凝固时会将孔重新堵塞,过高的能量密度会产生过多的热量,使得孔内的重铸层和热影响区的厚度增加。Lee 等^[61]使用二氧化碳激光器在氧化铝陶瓷基板上进行钻孔,研究激光功率对微孔表面粗糙度的影响,他们发现微孔的表面粗糙度随着激光功率的增大而降低,如图 4(c)所示,其原因更大的激光功率使得陶瓷基板更容易熔化,从而使表面更光滑。

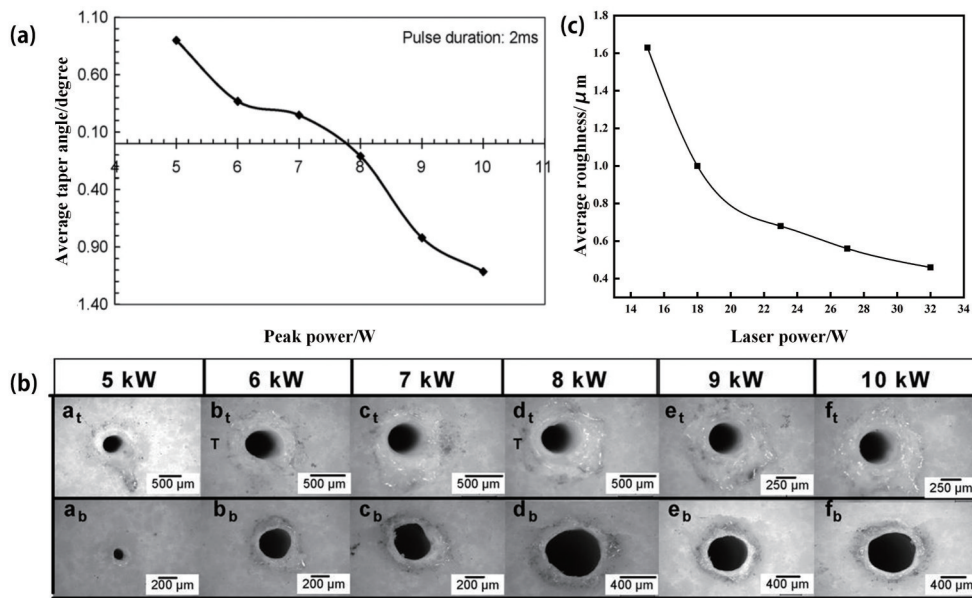


图 4 激光能量对微孔质量的影响规律^[57-58,60]。(a)激光能量和锥度的关系;(b)不同功率下的微孔出入口图像;(c)激光功率和微孔粗糙度的关系

Fig. 4 Influence of laser energy on quality of micro-holes^[57-58,60]. (a) Relationship between laser energy and taper; (b) images of entrance and exit of micro-holes under different power; (c) relationship between laser power and roughness of micro-hole

4) 离焦量。离焦量是指材料上表面与激光束聚焦点之间的距离。采用负离焦加工时,微孔锥度较大,这是因为激光焦点在材料内部,孔壁不能直接接收激光通量,排出的液态熔融物大于气体物质,微孔中蒸气压力较小;而采用正离焦加工时,微孔锥度较小,这是因为激光焦点在材料上部,破坏

机理主要是材料的蒸发,此时打出的孔比较深,孔入口直径较小^[10,62-63],如图 5(a)所示。Low 等^[64]研究了离焦量对微孔飞溅面积的影响,如图 5(b)所示,当离焦量为 1 mm 时,孔口的飞溅面积最大,离焦量除了对微孔孔型产生影响外,对孔口的飞溅影响也是不可忽略的。

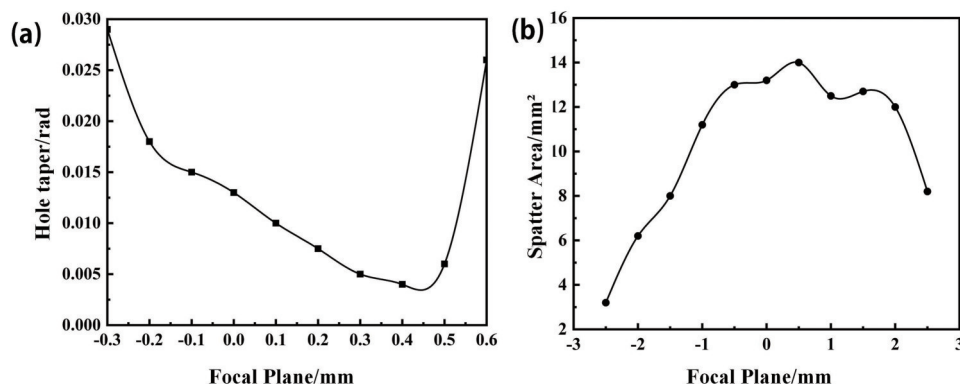


图 5 焦点位置对微孔质量的影响规律^[63-64]。(a)焦点位置和孔锥度的关系;(b)焦点位置和飞溅面积的关系
Fig. 5 Influence of focal position on quality of micro-holes^[63-64]. (a) Relationship between focus position and hole taper; (b) relationship between focus position and splash area

5) 激光波长。Zoppel 等^[65-66]利用皮秒激光加工微孔研究了激光波长对 SiC 材料的加工效率和质量的影响,发现长波长激光的加工效率较低,并且加工质量较差。图 6(a)、(b)分别是 532 nm 和 1064 nm 激光加工的微孔剖面图。在 1064 nm 激光加工的微孔的剖面图,与 532 nm 激光加工相比,孔壁粗糙,孔内

存在重铸层,孔口也不平滑^[67]。Takahashi 等^[68]分别使用不同波长的激光对碳纤维增强复合材料进行了加工,研究发现波长较长的激光主要依靠热作用去除材料,加工区域边缘存在热影响区,而波长较短的激光则依靠光化学作用去除材料,加工区域边缘热影响区比较小,其加工效果如图 6(c)、(d)所示。

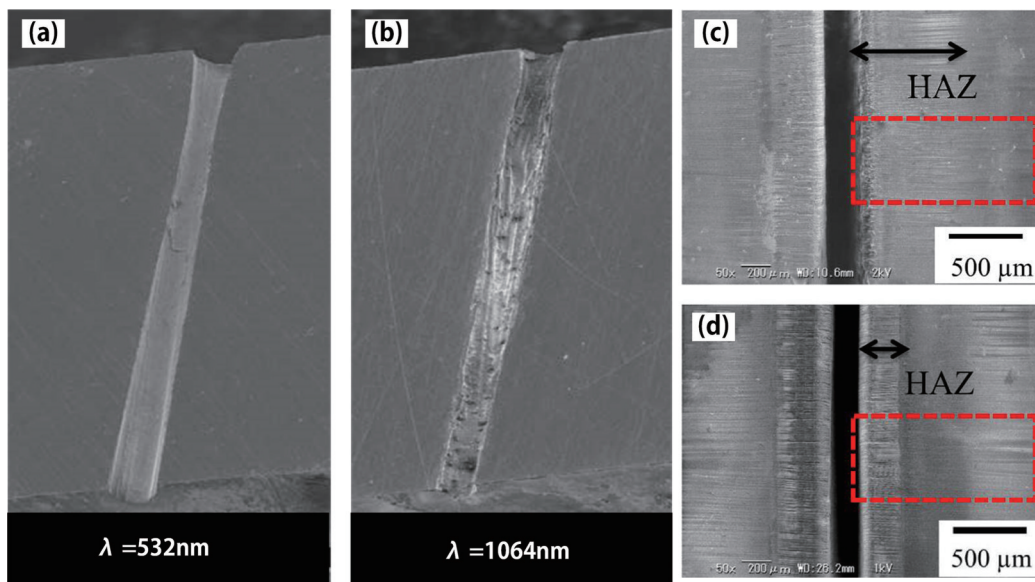


图 6 激光波长对微孔质量的影响^[67-68]。(a) 532 nm 激光加工微孔剖面图;(b) 1064 nm 激光加工微孔剖面图;(c) 1066 nm 激光加工复合材料电镜图;(d) 266 nm 激光加工复合材料电镜图
Fig. 6 Effect of laser wavelength on quality of micro-holes^[67-68]. (a) Micro-hole section view obtained by 532 nm laser processing; (b) micro-hole section view obtained 1064 nm laser processing; (c) composite material electron microscope image obtained by 1066 nm laser processing; (d) composite material electron microscope image obtained by 266 nm laser processing

3.2 激光加工方式对微孔质量的影响研究

Dausinger^[69]对激光加工微孔方式进行研究,根据激光与材料在加工过程中是否发生位置改变,可将激光加工微孔方式分为复制法和轮廓迂回法。复制法指激光束重复照射到材料上且与材

料没有相对位移,主要包括单脉冲打孔和多脉冲打孔;轮廓迂回法是指激光束与工件发生相对位移的加工方法,主要包括环切打孔和螺旋打孔。选择合适的打孔方式能极大地改善打孔质量并提高加工效率。

单脉冲打孔是利用一个激光脉冲和材料的相互作用形成所需的微孔,如图 7(a)所示,单脉冲打孔的效率极高,每秒能够加工数百个孔^[70-71],Ocaña 等^[71]在钛片上加工微孔,发现当打孔速度大于 300 hole/s 时,微孔的圆度将会减小,最大速度可达 700 hole/s,其加工的微孔如图 7(b)所示。Jiang 等^[72]在电介质材料上使用单脉冲打孔方式进行微孔加工,研究发现单个脉冲打孔深度随激光能量的增大而增加,最

终出现平底状凹状结构,孔深不再增加;此外还发现在单脉冲加工过程中,孔壁存在着一定厚度的熔融重铸层,孔口分布一定量的飞溅物,导致其不平整光滑^[73-74],这是由在加工过程中气化的材料从孔中喷出时对激光的无规则屏蔽、散射及液态金属材料未被喷射出来等现象造成的。因此单脉冲打孔适用于加工大批量集群孔及加工较薄材料或深度较小的盲孔^[75]。

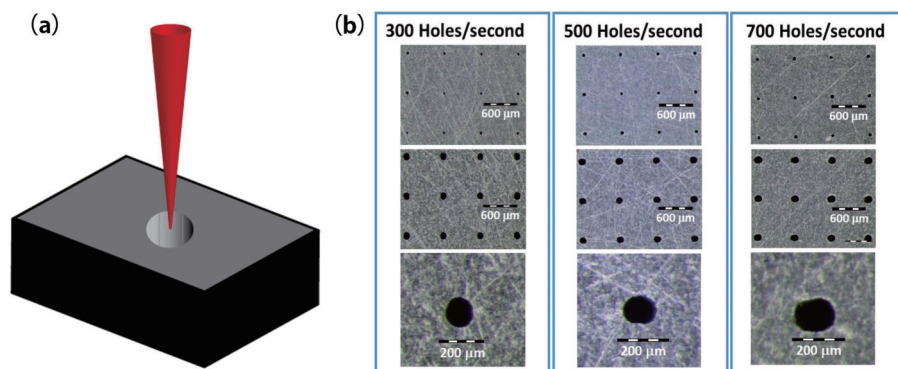


图 7 单脉冲打孔示意图及加工效果图^[70-71]。(a)单脉冲加工打孔示意图;(b)以 300,500,700 hole/s 的速率产生的微孔
Fig. 7 Schematic diagrams of single pulse drilling and processing effect^[70-71]. (a) Schematic diagram of single-pulse processing and drilling; (b) micro-holes produced at rates of 300, 500, and 700 hole/s

多个脉冲激光能量的不断积累,使照射区内的材料被逐层气化蒸发,孔逐渐加深^[75],达到所需的深度,这种打孔方式即为多脉冲打孔法,也叫叩击法,如图 8(a)所示,该方法克服了单脉冲对加工深度的限制,有利于加工大深径比的微孔。图 8(b)为在其他参数相同的情况下,脉冲数分别为 1,5,100 时加工的聚碳酸酯材料微孔的 SEM 图^[76],从图中可

以看出随着脉冲数的增加,孔不断加深,这是由于:激光沿孔壁多次反射并以类似光波导的方式传至微孔底部,使得后续脉冲可进一步增加烧蚀深度。另外与单脉冲打孔法相比,多脉冲打孔法可提高烧蚀速率,而较高的烧蚀速率可以减少孔表面的污染,减少飞溅物在孔口周围的堆积^[77-78]。Klein-Wiele 等^[79-80]采用紫外飞秒激光在各种材料上加工

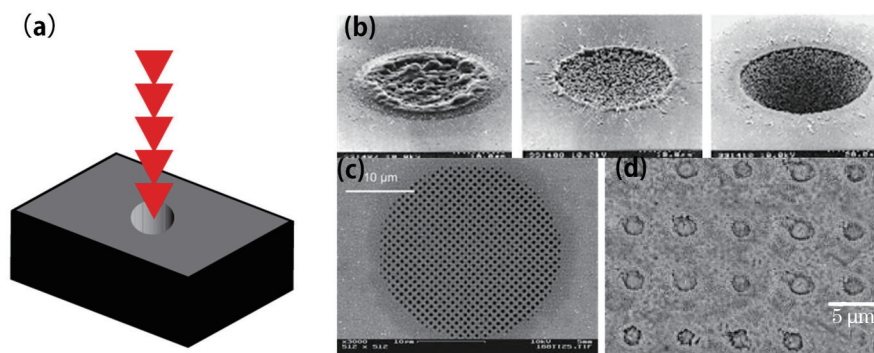


图 8 多脉冲打孔示意图及加工效果图^[76-79]。(a)多脉冲打孔示意图;(b)采用不同脉冲个数对聚碳酸酯材料进行微孔加工的 SEM 图(脉冲个数从左往右依次为 1,5,100);(c)使用多束干涉技术的紫外飞秒脉冲穿孔的钛箔的 SEM 图像;(d)微孔阵列的扫描电子显微镜图像
Fig. 8 Schematic diagrams of multi-pulse drilling and processing effect^[76-79]. (a) Schematic diagram of multi-pulse drilling; (b) SEM images of micro-hole processing of polycarbonate materials with different pulse numbers (pulse numbers are 1, 5, and 100 from left to right); (c) SEM images of titanium foil perforated by ultraviolet femtosecond pulses using multi-beam interference technique; (d) scanning electron microscope image of micro-hole array

Fig. 8 Schematic diagrams of multi-pulse drilling and processing effect^[76-79]. (a) Schematic diagram of multi-pulse drilling; (b) SEM images of micro-hole processing of polycarbonate materials with different pulse numbers (pulse numbers are 1, 5, and 100 from left to right); (c) SEM images of titanium foil perforated by ultraviolet femtosecond pulses using multi-beam interference technique; (d) scanning electron microscope image of micro-hole array

亚微米级微结构,其中图 8(c)为利用飞秒激光多光束干涉技术在钛箔上同时加工出的大量直径为 400 nm 的微孔,图 8(d)为 ZnO 上阵列微孔的扫描电子显微镜图像。刘璇等^[81-82]研究发现,在采用叩击法打孔时,增加脉冲数会产生孔口变小、圆度变差、孔壁质量差等缺陷。多脉冲打孔法所加工出来的微孔孔径可以达到 10 μm 以下的级别,但这种打孔方式对光束质量要求较高,孔径大小及圆度受聚焦光斑质量的限制。

旋切打孔结合了切割技术与激光加工技术^[83],如图 9(a)所示,该方法能够减小微孔加工过程中孔

边缘的热影响,加工的微孔具有较好的圆度,材料与激光束之间的相对运动可以加工较大孔径的孔^[84]。图 9(b)所示为采用旋切打孔方式加工的微孔,从图 9(b)可以看出,孔口几乎没有堆积物和喷溅物,孔壁光滑细致,具有良好的表面粗糙度,未发现重铸层^[85]。Goyal 等^[86]采用旋切方式在钛合金上对微孔的锥度和圆度进行了研究,发现该方法在最佳参数下与冲孔法相比,得到的微孔锥度和圆度分别提高了 49% 和 8%。但在采用旋切打孔加工较深工件时,孔口周围出现喷溅物,侧壁也变得较粗糙^[87]。

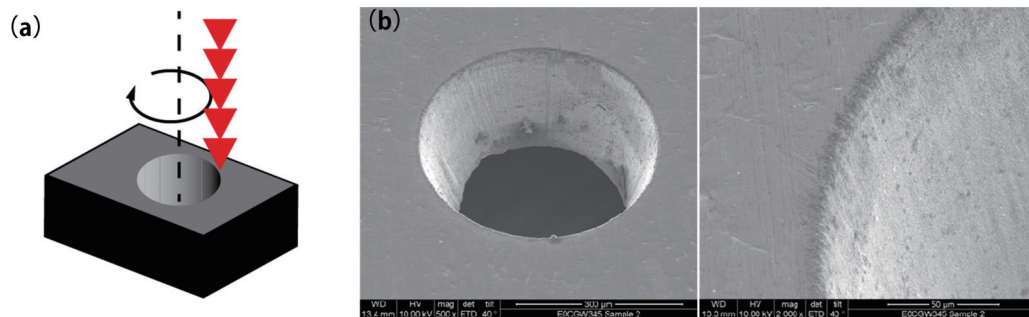


图 9 旋切打孔示意图及加工效果图^[83-84]。(a)旋切打孔示意图;(b)旋切打孔方式加工的微孔

Fig. 9 Schematic diagram of rotary cutting and drilling and processing effect diagram^[83-84]. (a) Schematic diagram of rotary cutting and drilling; (b) micro holes processed by rotary cutting and drilling

为了克服旋切打孔在加工较厚工件上的不足,在旋切钻孔的基础上采用螺旋线扫描方式增加了深度方向的进给运动,螺旋打孔如图 10(a)所示。Zhang 等^[88]采用皮秒激光进行螺旋钻孔实验,发现孔的出口端、入口端和孔壁都很光滑,没有出现堆积物和重铸层,并且具有良好的圆度。Lee 等^[89]在铝硅酸盐玻璃基板上采用飞秒激光进行螺旋钻孔实验,发现通过调整光学器件和内部光束路径,可

以实现正和负锥度以及圆柱孔,并且微孔侧壁及出入口几乎没有重铸层和热影响区。Nebel 等^[90-91]使用皮秒激光在 25 μm 厚的不锈钢箔上进行螺旋钻孔,加工出直径为 100 μm 的通孔,如图 10(b)所示,其表面和孔壁质量较好,无明显缺陷。使用螺旋钻孔法制备的微孔重铸层、圆度、锥度均优于脉冲冲击法所制备的孔,螺旋钻孔增加深度方向的进给,相比于旋切钻孔增加了孔的深度,有利于获得大深

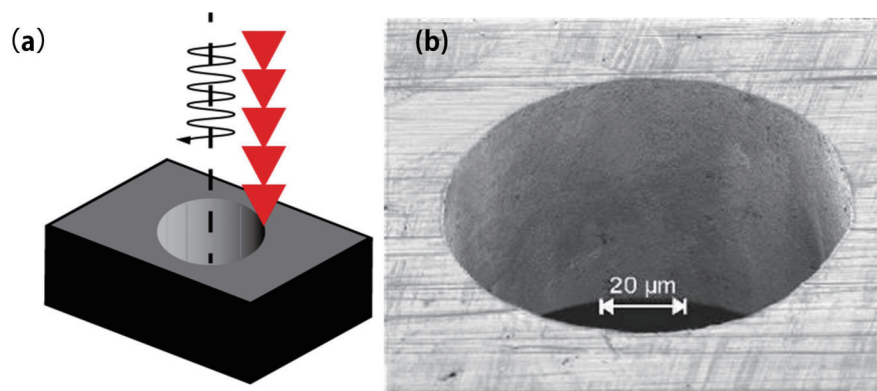


图 10 螺旋打孔示意图及加工效果图^[91]。(a)螺旋打孔示意图;(b)螺旋打孔方式加工的微孔

Fig. 10 Schematic diagram of spiral drilling and processing effect diagram^[91]. (a) Schematic diagram of spiral drilling; (b) micro holes processed by spiral drilling

径比的微孔的加工^[58]。

3.3 激光加工环境对微孔质量的影响研究

激光与物质的相互作用是一个复杂的多因素、非平衡过程,加工环境是影响微孔质量不可忽略的重要因素,目前,加工环境对微孔质量的影响主要集中在真空环境、辅助气体、液体环境三个方面。

真空环境对微孔质量的影响吸引大量学者对其展开研究。与空气环境相比,真空条件下碎屑易排出,所加工微孔的重铸层更薄、表面质量更高,沉积在微孔边缘的颗粒更少^[92-93],图 11(a)、(b)分别

为在空气中和真空环境下加工的微孔^[94],真空中加工的孔周围无明显残渣堆积和热影响区^[95-96]。北京理工大学姜澜团队的研究表明,相比于空气环境,真空环境更有利于微孔深度的增加,在真空中能够加工大深径比的微孔^[97],如图 11(c)~(e)所示,可以明显看出在真空环境下微孔具有更大的深度,这是因为真空环境中加工微孔时,前续激光脉冲所形成的等离子体以及碎屑等更容易从微孔中喷发出来,微孔内部的残留物明显减少,其对后续脉冲光场的影响也将减弱,激光脉冲能量可以更有效地向微孔底部传递^[98]。

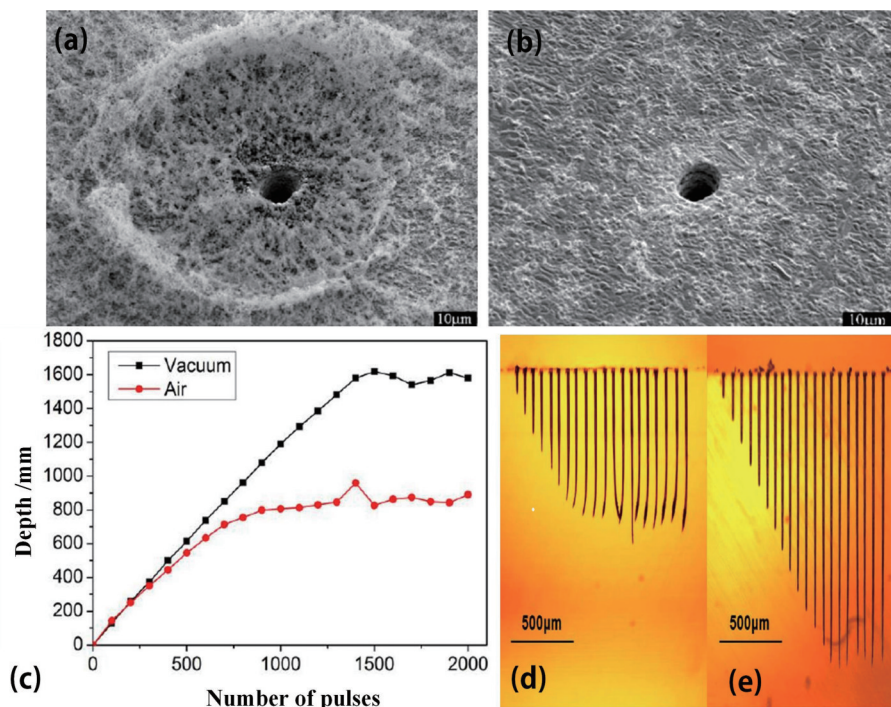


图 11 真空环境对激光加工微孔质量的影响规律^[92-93,95-96]。(a)空气中加工的微孔;(b)真空环境下加工的微孔;(c)真空和空气环境下加工对微孔深度的影响;(d)(e)分别对应于图 11(c)中空气和真空环境下形成的微孔

Fig. 11 Influence of vacuum environment on quality of micro-holes fabricated by laser processing^[92-93,95-96]. (a) Micro-holes processed in air; (b) micro-holes processed in vacuum environment; (c) effect of processing under vacuum and air environments on depth of micro-holes; (d) (e) micro-holes formed in air and vacuum corresponding to Fig. 11(c)

辅助气体的气压、种类和喷射方式都对微孔的质量有重要影响。适当的辅助气压可以促使孔中的熔融物和残渣飞溅出去,提高材料的去除率并减少飞溅物的形成^[99-100],从而得到较好的圆度和锥度,但过大的气压会通过强制对流的方式促使熔融物迅速冷却,从而抑制熔融物的去除,也就造成了气压过大时通孔的加工效果不好^[58],如表 1 所示,在不同辅助气压下,微孔的锥度随着辅助气体气压的增大而增大。不同类型的辅助气体去除孔壁熔融物的能量是不同的,氩气、氮气和氧气去除不锈钢微孔孔壁的熔

融物的能力依次提高,而对于铝的去除却没有明显区别^[101]。Wang 等^[102]使用脉冲 Nd:YAG 激光分别以氧气、氩气和氮气作为辅助气体进行了 SS305 型不锈钢小孔加工,他们发现氮气作为辅助气体比其他两种气体更具优势,可以减小 SS305 不锈钢微孔表面的重铸层厚度。在不同气体喷射方式下,打孔效率是不同的,Ho 等^[103]在 0.6 mm 厚的 Al5052 板材上进行激光打孔实验,使用三种不同的气体射流方式(旋流气体射流、直接气体射流和无气体射流)进行了打孔实验,发现相比于其他的两种方式,采用旋流

气体的方法的效率最高,在相同的脉冲数下,旋流气体的孔深是最大的,孔口周围的飞溅厚度是最小的,

其变化规律如图 12(a)、(b)所示,这是因为旋流气体射流可以减少孔入口周围沉积的飞溅物。

表 1 不同辅助气压加工微孔的直径和锥度^[58]

Table 1 Diameter and degree of taper of micro-holes fabricated with different assisted gas pressure^[58]

| Assisted gas pressure /MPa | Entry diameter / μm | | Exit diameter / μm | | Degree of taper of long axis /($^{\circ}$) | Degree of taper of short axis /($^{\circ}$) |
|----------------------------|--------------------------------|------------|-------------------------------|------------|--|---|
| | Long axis | Short axis | Long axis | Short axis | | |
| 0.2 | 533.75 | 5237.62 | 554.50 | 474.11 | -0.30 | 0.77 |
| 0.3 | 530.66 | 523.66 | 539.78 | 470.03 | -0.13 | 0.77 |
| 0.4 | 547.72 | 539.63 | 510.35 | 458.31 | 0.54 | 1.17 |
| 0.5 | 531.21 | 530.53 | 436.78 | 379.02 | 1.35 | 2.17 |

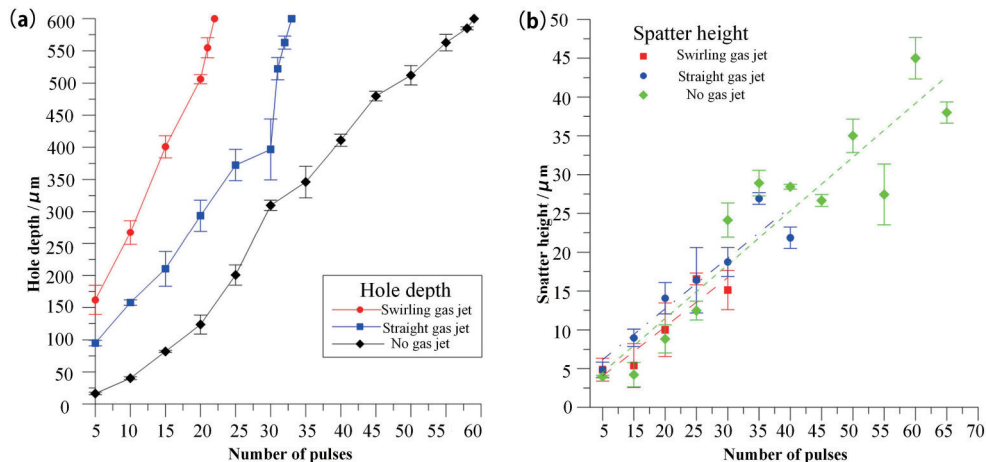


图 12 辅助气体对微孔质量的影响规律^[103]。(a)不同气体喷射类型对微孔深度的影响;(b)不同气体喷射类型对微孔孔口喷溅物的影响

Fig. 12 Effect of auxiliary gas on quality of micro-holes^[103]. (a) Influence of gas jet type on depth of micro-holes; (b) influence of gas jet type on splashes of micro-holes

液体环境对微孔质量的影响也不可忽略,常见的液体有水、化学液、乙醇和盐溶液等,他们通常作为一种辅助手段来协助激光进行打孔,如激光水下加工、激光水射流加工、化学液辅助激光加工微孔、乙醇辅助激光加工等,加工装置示意图分别如图 13(a)、图 14(a)、图 15(a)、图 16(a)所示。为了研究液体环境因素对微孔质量的影响,众多学者对此展开了深入的研究,所得结果如下。

1) 水辅助激光加工。水下激光加工时将材料浸没在水中,材料上表面有一定深度的水层,激光束透过水层对被加工材料进行加工,加工装置示意图如图 13(a)所示,和在空气中相比,激光在静水中打孔得到的孔锥度较小,表面质量更好,熔融物少,能够减小重铸层和微裂纹^[104-106],这是由于水溶液可以减少激光的多次反射,有利于能量的向下传输,从而有利于获得较小的锥度,孔壁光滑归因于较小的化学反应以及较高压力的影响,有利于有效清除

黏附的碎屑和熔融材料,水的冷却作用可能会减少化学反应,特别是氧化反应,图 13(b)、(c)分别为在空气中和水下加工微孔的截面图;当采用激光水射流法时,即在激光加工的同时,水束以旁轴射流的方式辅助加工,该方法能够显著减少熔渣,提高表面质量,减小微孔的锥度,减小重铸层和热影响区厚度^[107-109]。图 14(b)所示为热影响区微孔厚度在空气中和水中的变化规律,其相比于在空气中水射流辅助下激光加工的微孔的热影响区厚度大大减小,锥度减小是因为水流的冲击作用既可以及时将熔融态材料排出,避免后续激光因受阻而不能对材料进行有效的打孔,又可以避免冲击作用过大导致上孔径变大,间接导致孔锥度变小,另外射流可以带走产生的飞屑,减少重铸层和热影响区的形成^[110-111];水导激光加工技术采用低压微细水射流束,同时将激光聚焦于喷嘴,利用激光在水和空气两种介质的接触面的反射作用,将激光束引导至加

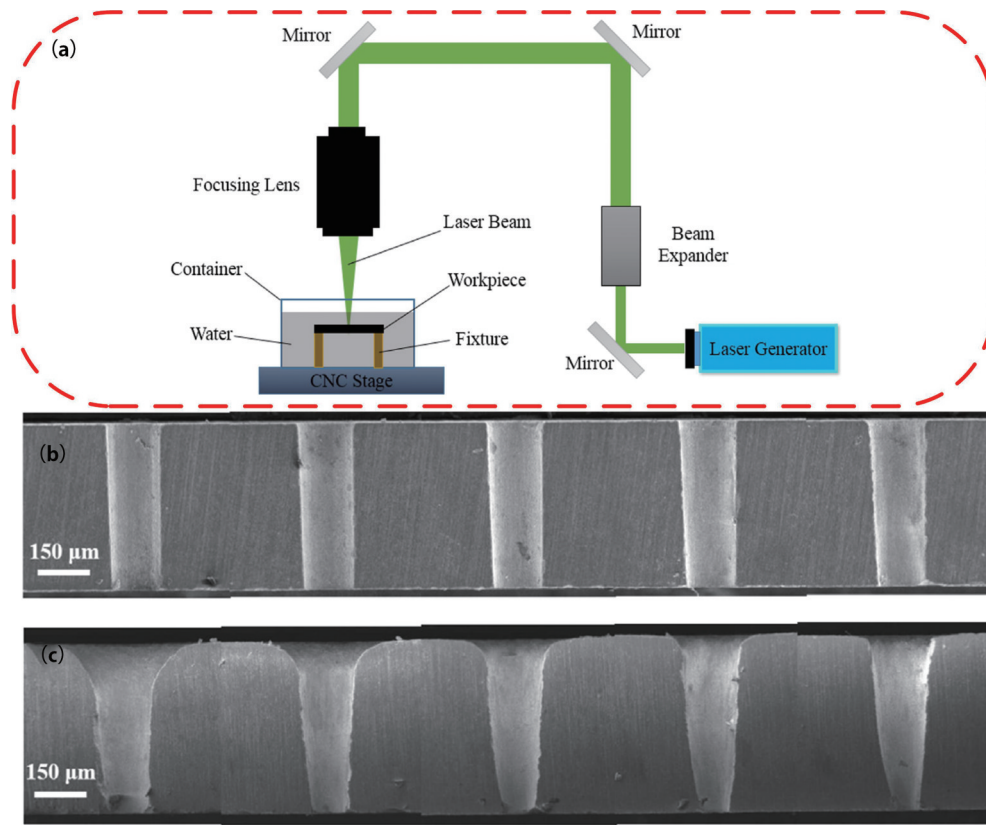


图 13 激光水下加工^[104]。(a)激光水下加工装置示意图;(b)激光水下加工的微孔;(c)空气中加工的微孔
Fig. 13 Underwater laser processing^[104]. (a) Schematic diagram of laser underwater processing device; (b) micro-holes processed by laser underwater processing; (c) micro-holes processed in air

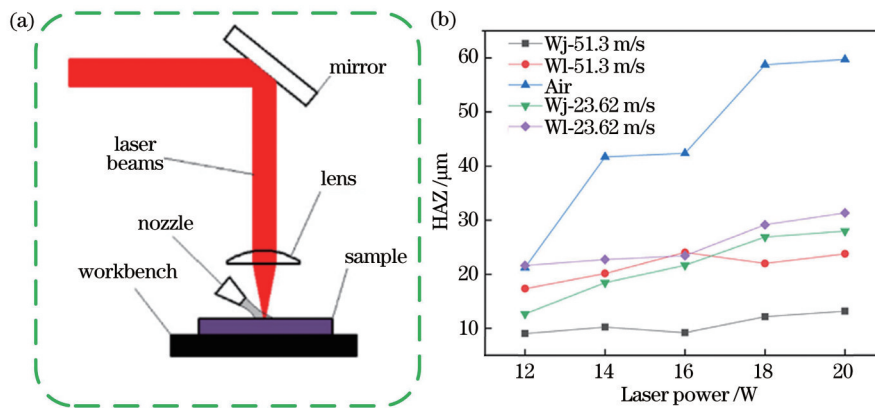


图 14 激光水射流加工^[109]。(a)低压水射流辅助激光加工装置示意图;(b)在空气和水中加工微孔的重铸层厚度
Fig. 14 Laser water jet processing^[109]. (a) Schematic diagram of low-pressure water jet assisted laser processing device; (b) thickness of recast layer of micro-holes processed in air and water

工表面,加工原理如图 15(a)所示,水束的加入可以有效去除加工后的残渣,减少残渣的堆积,因此有利于提高微孔的深径比,同时水束的加入可以实现对加工区域的冷却,减小热影响区,降低微孔的粗糙度^[112]。王扬等^[113]在 TC4 薄板上进行水导激光加工实验,加工结果如图 15(b)所示,孔的入口和出口的堆积物很少,加工效果比较理想。

2) 化学液辅助激光加工。Wang 等^[113-114]采用飞秒激光与化学腐蚀异步加工法在碳化硅材料上加工微孔,即在飞秒激光加工结束后,将被加工的样件放入化学液中进行浸泡腐蚀,加工原理如图 15(a)所示,发现化学腐蚀在不损伤基体的前提下,可以将热影响区完全去除,获得高质量微孔。Dongre 等^[115]使用纳秒激光在 SS316 不锈钢上钻孔

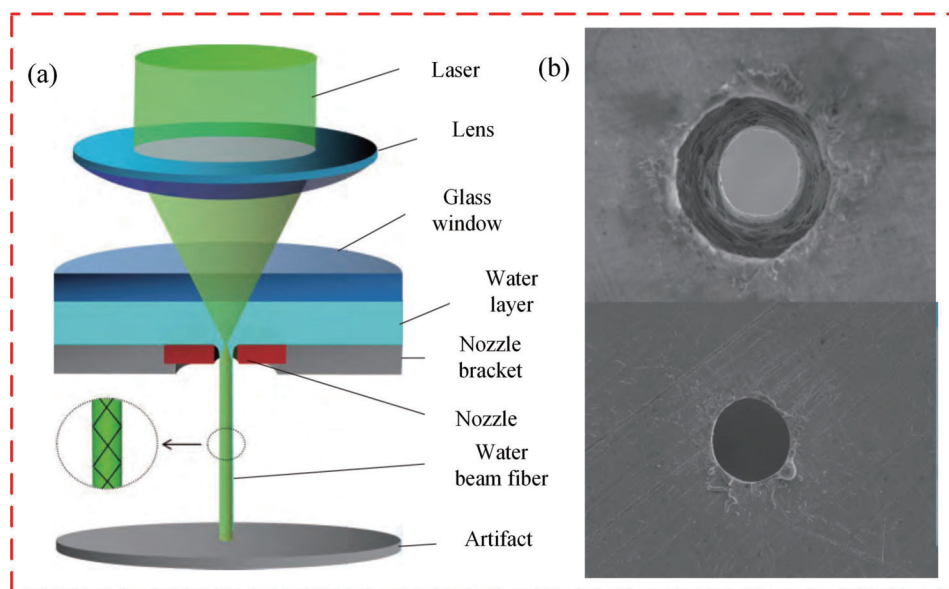


图 15 水导激光加工微孔^[110]。(a)水导激光加工技术原理图;(b)水导激光加工微孔的入口(上)和出口(下)

Fig. 15 Micro-holes obtained by water guided laser processing^[110]. (a) Principle of water guided laser processing; (b) inlet (top) and outlet (bottom) of microholes processed by water-guided laser

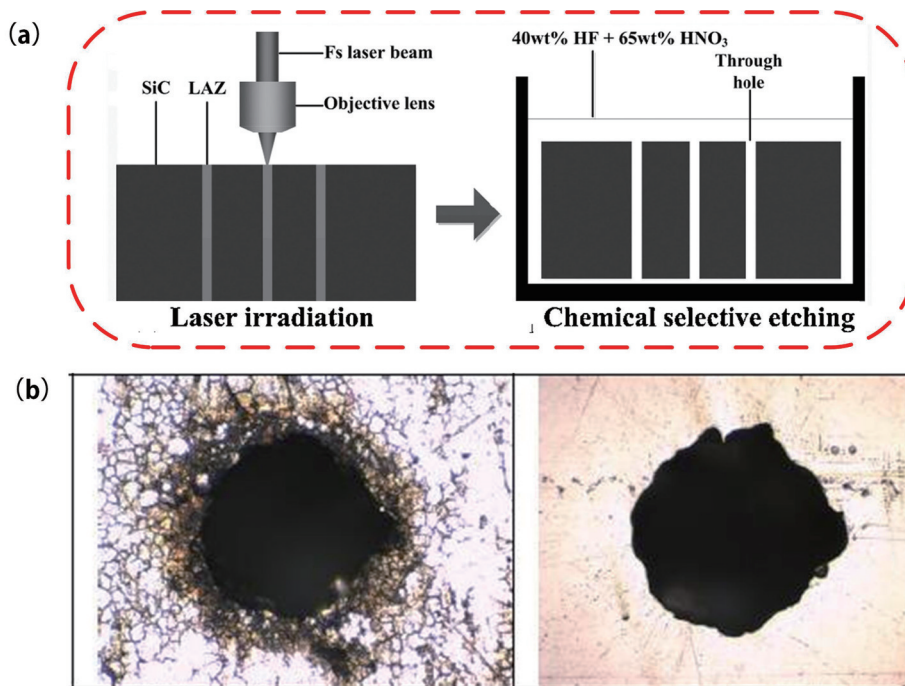


图 16 激光化学异步加工微孔^[113]。(a)激光化学异步加工微孔装置示意图;(b)化学腐蚀前后孔口变化

Fig. 16 Laser chemistry asynchronous processing of micro-holes^[113]. (a) Schematic diagram of laser chemical asynchronous processing micro-hole device; (b) orifices before and after chemical etching

时,发现微孔表面存在飞溅和重铸层等缺陷,利用 HNO_3 和 HCL 混合溶液对激光加工后的微孔进行化学腐蚀,腐蚀结束后孔口的飞溅物基本上被去除干净,图 16(b)为化学腐蚀前后的微孔孔口。Zhang 等^[116]采用化学液作为辅助液体在纳秒激光照射下在镍基合金上进行同步打孔实验,化学液

是以射流的方式参与加工的,研究发现激光与化学液的共同作用可以有效去除重铸层和孔口堆积等缺陷,最终获得高质量的微孔,如图 17(a)、(b)所示。

3) 乙醇辅助激光加工。Li 等^[117]采用乙醇作为辅助液体在碳化硅材料上进行激光加工,其加工原

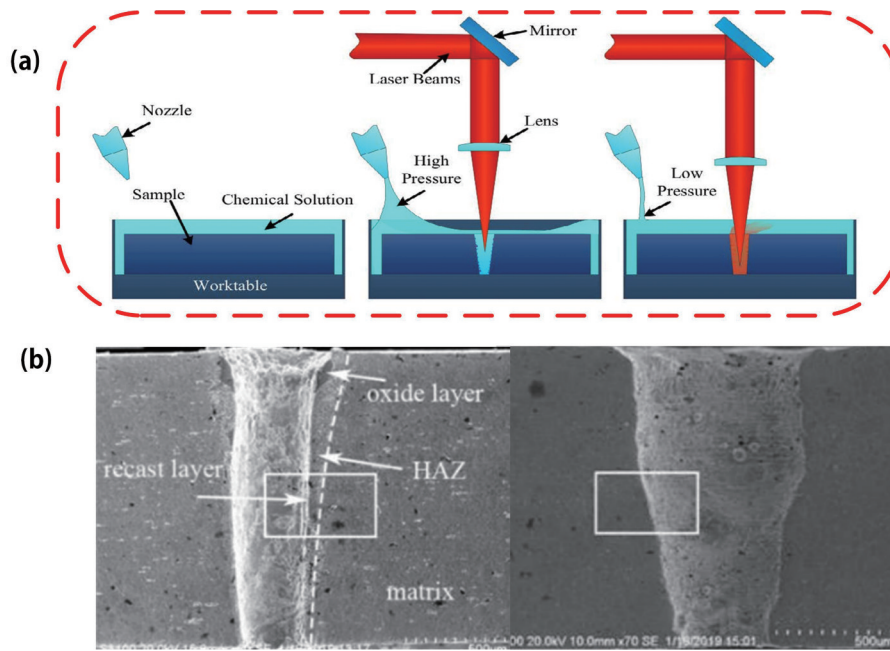


图 17 激光化学同步加工微孔^[116]。(a)激光化学同步加工微孔装置示意图;(b)腐蚀前后微孔侧壁形貌图
Fig. 17 Laser chemical simultaneous processing of micro-holes^[116]. (a) Schematic diagram of laser chemical simultaneous processing of micro-holes; (b) morphologies of micro-hole sidewalls before and after etching

理如图 18(a)所示,此处乙醇的加入并不是以静水或射流的方式加入的,而是将乙醇滴在工件上。结果表明,乙醇的冷却和挥发作用有利于加工更深、孔口更干净的孔,相比于空气中,在乙醇的辅助下

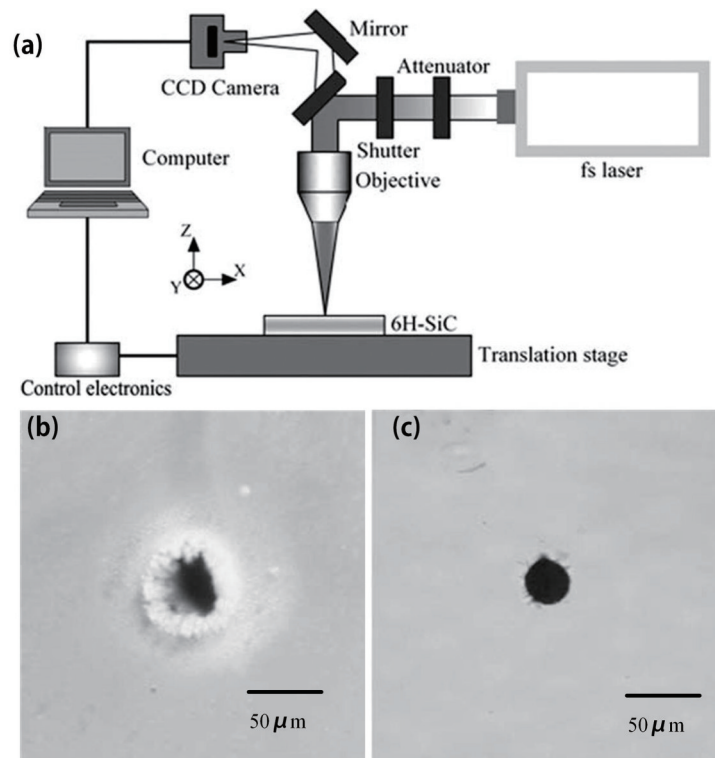


图 18 乙醇辅助激光加工^[117]。(a)乙醇辅助激光加工微孔装置示意图;(b)在空气中利用激光加工的微孔;(c)乙醇辅助激光加工的微孔
Fig. 18 Alcohol-assisted laser processing^[117]. (a) Schematic diagram of alcohol-assisted laser processing micro-hole device; (b) laser-processed micro-hole in air; (c) alcohol-assisted laser-processed micro-hole

可以获得更高质量的孔。图 18(b)为空气中加工的微孔。图 18(c)为在乙醇辅助下加工的微孔。

4 总结与展望

综述了激光参数、打孔方式和加工环境三个因素对微孔质量的影响规律。不同的加工参数对微孔质量的影响是不同的,如增大脉冲宽度、激光能量,微孔的直径均会出现先增大后趋于饱和的趋势;增大脉冲宽度、激光能量或者减小重复频率,微孔的深度会出现先增大后趋于饱和的趋势;增大脉冲宽度、重复频率或者激光能量,将焦点处于焦平面附近,可以使微孔的锥度减小;减小脉冲宽度或者增大激光能量,均可以导致微孔的圆度增大;增大脉冲宽度、激光能量、重复频率和激光波长,会使得微孔的重铸层、热影响区厚度增加,孔口堆积和微裂纹现象加重。不同的打孔方式有着不同的适用场景,如单脉冲打孔适合打深度小的浅孔,多脉冲适合打直径小的深孔,旋切方式可以加工直径大圆度好的微孔,螺旋打孔可以加工深度大、直径大、圆度好的微孔,选择合适的打孔方式有助于提高加工质量和效率。微孔的质量受到不同液体环境的影响,如真空环境有利于加工大深径比的微孔,其相比于空气中加工的微孔存在孔口堆积物少和热影响小的优势;在气体和液体的辅助下可以减小微孔的锥度和热影响等。因此,要想获得高质量的微孔,就应该选择合适的激光参数、打孔方式和加工环境。

目前,虽然激光加工技术已经广泛地应用于微孔加工领域,但其在加工过程中仍面临一些挑战。

1) 皮秒和飞秒激光加工微孔的精度和质量较高,但存在效率低的问题,而毫秒和纳秒激光的脉冲宽度较大,在实际加工中无法避免产生严重的热量积累,从而产生热影响等缺陷,无法满足高质量微孔的需求。此外影响激光加工微孔质量的参数众多,在研究不同加工参数对激光微孔加工的影响时,将研究某一参数得到的几种最优参数组合在一起得到的加工效果可能并不是最理想的,研究多种加工参数对加工效果的复合作用才能获得各方面都符合实际生产要求的高质量微孔。

2) 目前应用到实际工业中的激光微孔加工方式主要是旋切和螺旋打孔。但是,在加工中激光束与材料的相对运动导致无法加工较小孔径的微孔,且加工效率也受到光束和材料间相对运动的限制。

同时,叩击式加工由于无光束和材料间的相对运动,能够加工较小直径的微孔且加工效率较高,而单脉冲打孔深度有限。因此,叩击式微孔加工具有较大的应用潜力。

3) 液体环境可以极大程度地改善微孔的重铸层和飞溅物的缺陷,此外,液体环境中的含氧量较低,有利于减弱加工过程中热效应引起的氧化现象。但液体辅助加工微孔方法中仍有许多尚未解决的问题,例如激光能量被水吸收而损失、液体和气泡对激光光束的散射、折射等。

虽然激光加工微孔还存在许多问题,随着实验研究的深入,研究人员可以进而精确调控进而加工出高质量的微孔,目前,在激光加工中,超短脉冲激光具有超快超强的特性,其在加工微孔的过程中产生极小的热影响区、重铸层,在微孔质量要求越来越高的今天,超短脉冲激光微孔加工将被应用在更加广泛的行业和领域中,实现高硬性、脆性材料的加工,低微米、纳米级加工,微纳米直径下的大深径比微孔加工等,因此超短脉冲激光加工吸引越来越多的研究者进行探索和研究。结合多种加工设备(如扫描振镜、光束整形器等),对激光加工区域和耦合脉冲时序进行调控,可以提高微孔加工的效率 and 微孔的深径比。此外,激光复合加工技术是激光技术与其他加工技术相复合的技术,如水辅助激光加工、超声振动复合激光加工、化学辅助激光加工等,能发挥各自的优势,扬长避短,加工出高质量微孔,复合加工技术已成为未来加工技术的发展新趋势,具有美好的发展前景。

参 考 文 献

- [1] Baheri S, Tabrizi S P A, Jubran B A. Film cooling effectiveness from trenched shaped and compound holes[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2008, 44(8): 989-998.
- [2] Jiang L, Yang J, Wang S, et al. Fiber Mach-Zehnder interferometer based on microcavities for high-temperature sensing with high sensitivity[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3753-3755.
- [3] Lundgren E H, Forsman A C, Hoppe M L, et al. Fabrication of pressurized 2 mm beryllium targets for ICF experiments[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 51(4): 576-580.
- [4] Stratakis E, Ranella A, Farsari M, et al. Laser-based micro/nanoengineering for biological applications[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2009, 33(5):

- 127-163.
- [5] Zhang X Q, Xing S L, Liu L, et al. Trepanning of super-alloy with thermal barrier coating using femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0102013.
张学谦, 邢松龄, 刘磊, 等. 带热障涂层的高温合金飞秒激光旋切打孔[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102013.
- [6] Schulz W, Eppelt U, Poprawe R. Review on laser drilling I. Fundamentals, modeling, and simulation [J]. Journal of Laser Applications, 2013, 25(1): 012006.
- [7] Miyamoto I. Laser materials processing in Japan[J]. Laser Technik Journal, 2008, 5(3): 16-20.
- [8] Holtkamp J, Eifel S, Ryll J. Material processing with ultrashort-pulsed lasers[J]. Laser Technik Journal, 2014, 11(2): 36-39.
- [9] Fox M D T, French P, Peters C, et al. Applications of optical sensing for laser cutting and drilling[J]. Applied Optics, 2002, 41(24): 4988-4995.
- [10] Mei X S, Yang Z X, Zhao W Q. Laser hole drilling on surface of electronic ceramic substrates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500011.
梅雪松, 杨子轩, 赵万芹. 电子陶瓷基板表面激光孔加工综述[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500011.
- [11] Zhou W H, Ye Q, Ye L, et al. Distributed optical fiber *in situ* monitoring technology for a healthy temperature field in lithium ion batteries[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204002.
周炜航, 叶青, 叶蕾, 等. 锂离子电池内温度场健康状态分布式光纤原位监测技术研究[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204002.
- [12] Wang J, Zhao Z C, Jiang C, et al. Femtosecond laser precision machining of micropores in single-mode fiber and sensing application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111425.
王解, 赵宗晨, 江超, 等. 飞秒激光在单模光纤中精密加工微孔及其传感应用[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111425.
- [13] Egashira K, Mizutani K. Micro-drilling of monocrystalline silicon using a cutting tool[J]. Precision Engineering, 2002, 26(3): 263-268.
- [14] Lee T C, Chan C W. Mechanism of the ultrasonic machining of ceramic composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71(2): 195-201.
- [15] Wang J J, Zhang J F, Feng P F. Effects of tool vibration on fiber fracture in rotary ultrasonic machining of C/SiC ceramic matrix composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 129: 233-242.
- [16] Wang H X, Zhu S K, Asundi A, et al. Experimental characterization of laser trepanning performance enhanced by water-based ultrasonic assistance[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 109: 547-560.
- [17] Wei C J, Zhao L, Hu D J, et al. Electrical discharge machining of ceramic matrix composites with ceramic fiber reinforcements[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(1/2/3/4): 187-194.
- [18] Muttamara A, Fukuzawa Y, Mohri N, et al. Probability of precision micro-machining of insulating Si₃N₄ ceramics by EDM[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1/2/3): 243-247.
- [19] Ahn S H, Ryu S H, Choi D K, et al. Electrochemical micro drilling using ultra short pulses[J]. Precision Engineering, 2004, 28(2): 129-134.
- [20] Spinney P S, Howitt D G, Smith R L, et al. Nanopore formation by low-energy focused electron beam machining[J]. Nanotechnology, 2010, 21(37): 375301.
- [21] Dubey A K, Yadava V. Experimental study of Nd:YAG laser beam machining: an overview[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 195(1/2/3): 15-26.
- [22] Kononenko T V, Ralchenko V G, Vlasov I I, et al. Ablation of CVD diamond with nanosecond laser pulses of UV-IR range[J]. Diamond and Related Materials, 1998, 7(11/12): 1623-1627.
- [23] McElroy S, Yang D H, Reddy R G. Laser processing of titanium aluminides[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9(5): 506-515.
- [24] She J C, An S, Deng S Z, et al. Laser welding of a single tungsten oxide nanotip on a handleable tungsten wire: a demonstration of laser-weld nanoassembly[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(7): 073103.
- [25] Zhang X C, Qian J, Fu Q, et al. Cutting of PBO fiber-reinforced composites using picosecond lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002004.
张学聪, 钱静, 付强, 等. 皮秒激光切割 PBO 纤维增强复合材料[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002004.
- [26] de Leon A C, Chen Q Y, Palaganas N B, et al. High performance polymer nanocomposites for

- additive manufacturing applications[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2016, 103: 141-155.
- [27] Mazumder J, Dutta D, Kikuchi N, et al. Closed loop direct metal deposition: art to part[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34(4/5/6): 397-414.
- [28] Samant A N, Dahotre N B. Laser machining of structural ceramics: a review[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, 29(6): 969-993.
- [29] Meijer J. Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1/2/3): 2-17.
- [30] Luzius S, Sailer M, Siebert C, et al. PCB drilling with high power picosecond lasers[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 723-726.
- [31] Zheng L J, Wang C Y, Fu L Y, et al. Wear mechanisms of micro-drills during dry high speed drilling of PCB[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(10): 1989-1997.
- [32] 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.
- [33] Gautam G D, Pandey A K. Pulsed Nd: YAG laser beam drilling: a review[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 100: 183-215.
- [34] Nagesh S, Narasimha Murthy H N, Pal R, et al. Influence of nanofillers on the quality of CO₂ laser drilling in vinyl ester/glass using orthogonal array experiments and grey relational analysis[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 69: 23-33.
- [35] He C, Zibner F, Fornaroli C, et al. High-precision helical cutting using ultra-short laser pulses[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 1066-1072.
- [36] Chryssolouris G. Laser machining analysis[M]// *Laser machining. Mechanical engineering series*. New York: Springer, 1991: 160-208.
- [37] Yilbas B S. Laser drilling: practical applications[M]. Heidelberg: Springer, 2013.
- [38] Morar N I, Roy R, Mehnen J, et al. Investigation of recast and crack formation in laser trepanning drilling of CMSX-4 angled holes[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95(9/10/11/12): 4059-4070.
- [39] 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.
- [40] Zhang H Y, Zhou M, Wang Y L, et al. Development of a quantitative method for the characterization of hole quality during laser trepan drilling of high-temperature alloy[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(2): 1-11.
- [41] Stephen A, Vollertsen F. Mechanisms and processing limits in laser thermochemical machining[J]. *CIRP Annals*, 2010, 59(1): 251-254.
- [42] Voisey K T, Kudesia S S, Rodden W S O, et al. Melt ejection during laser drilling of metals[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 356(1/2): 414-424.
- [43] Sciti D, Bellosi A. Laser-induced surface drilling of silicon carbide[J]. *Applied Surface Science*, 2001, 180(1/2): 92-101.
- [44] Zhang Y J, Fang M G. The research of the ceramic drilling by Nd:YAG laser[J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(3): 161-162.
张银江, 方鸣岗. 陶瓷激光精密打孔工艺研究[J]. *激光与红外*, 2001, 31(3): 161-162.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Koroleva A, Schlie S, Fadeeva E, et al. Microreplication of laser-fabricated surface and three-dimensional structures[J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(12): 124009.
- [48] Ostendorf A, Kulik C, Bauer T, et al. Ablation of metals and semiconductors with ultrashort pulsed lasers: improving surface qualities of microcuts and grooves[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5340: 153-163.
- [49] Marimuthu S, Dunleavy J, Liu Y, et al. Characteristics of hole formation during laser drilling of SiC reinforced aluminium metal matrix composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 271: 554-567.
- [50] Ng G K L, Li L. The effect of laser peak power and pulse width on the hole geometry repeatability in laser percussion drilling[J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(6): 393-402.
- [51] Kamlage G, Bauer T, Ostendorf A, et al. Deep

- drilling of metals by femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics A*, 2003, 77(2): 307-310.
- [52] Ancona A, Döring S, Jauregui C, et al. Femtosecond and picosecond laser drilling of metals at high repetition rates and average powers[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3304-3306.
- [53] Mishra S, Yadava V. Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of thin aluminum sheet [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 461-474.
- [54] Ancona A, Röser F, Rademaker K, et al. High speed laser drilling of metals using a high repetition rate, high average power ultrafast fiber CPA system [J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 8958-8968.
- [55] Zhao W Q, Shen X W, Liu H D, 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.
- [56] Zhang M F, Zheng S J, Zhang S X, et al. Investigation of optimized drilling conditions of Al₂O₃ ceramic plate by CO₂ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 26(5): 449-454.
张铭峰, 郑劭家, 张胜雄, 等. 氧化铝陶瓷基片 CO₂ 激光钻孔最佳条件之探讨[J]. *中国激光*, 1999, 26(5): 449-454.
- [57] Yilbas B S. Parametric study to improve laser hole drilling process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 70(1/2/3): 264-273.
- [58] Wang Y Q, Zhang J Z, Liu Y S, et al. Effect of femtosecond laser parameters on TiC ceramic micro-hole drilling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1003010.
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): 1003010.
- [59] Her T H, Finlay R J, Wu C, et al. Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(12): 1673-1675.
- [60] le Harzic R, Breitling D, Weikert M, et al. Pulse width and energy influence on laser micromachining of metals in a range of 100 fs to 5 ps[J]. *Applied Surface Science*, 2005, 249(1/2/3/4): 322-331.
- [61] Lee Y C, Cheng M H. CO₂ laser processing on ceramic substrates of light emitting diode assisted by compressed gas[J]. *Machining Science and Technology*, 2015, 19(3): 400-415.
- [62] Chen D M, Li Z G, Li J J, et al. The technology research of CO₂ laser micropore drilling on carbon steel[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 139/140/141: 777-781.
- [63] 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.
- [64] Low D K Y, Li L, Corfe A G. Characteristics of spatter formation under the effects of different laser parameters during laser drilling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 118(1/2/3): 179-186.
- [65] Zoppel S, Farsari M, Merz R, et al. Laser micro machining of 3C-SiC single crystals[J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83(4/5/6/7/8/9): 1400-1402.
- [66] Kraus M. Microdrilling in steel with frequency-doubled ultrashort pulsed laser radiation[J]. *Journal of Laser Micro*, 2008, 3(3): 129-134.
- [67] Hoffman J, Chrzanowska J, Kucharski S, et al. The effect of laser wavelength on the ablation rate of carbon[J]. *Applied Physics A*, 2014, 117(1): 395-400.
- [68] Takahashi K, Tsukamoto M, Masuno S, et al. Heat conduction analysis of laser CFRP processing with IR and UV laser light[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 84: 114-122.
- [69] Dausinger F. Femtosecond technology for precision manufacturing: fundamental and technical aspects[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4830: 471-478.
- [70] Nakashima S, Sugioka K, Midorikawa K. Enhancement of resolution and quality of nano-hole structure on GaN substrates using the second-harmonic beam of near-infrared femtosecond laser[J]. *Applied Physics A*, 2010, 101(3): 475-481.
- [71] Ocaña R, Soriano C, Esmoris J I. Fiber laser based single pulse drilling for production of perforated Titanium sheets for HLFC structures[J]. *Journal of Laser Micro*, 2019, 14(1): 54-58.
- [72] Jiang L, Tsai H L. Plasma modeling for ultrashort pulse laser ablation of dielectrics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(2): 023116.
- [73] Jones C, Hann D B, Voisey K T, et al. Application of high speed filming techniques to the study of rearwards melt ejection in laser drilling[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(2): 022204.
- [74] Zhang T Z, Jia Z C, Cui H C, et al. Analysis of melt ejection during long pulsed laser drilling[J]. *Chinese*

- Physics B, 2016, 25(5): 054206.
- [75] Xia B, Jiang L, Wang S M, et al. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2): 0201001.
夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0201001.
- [76] Tao S, Wu B X, Lei S T. Study of laser beam propagation in microholes and the effect on femtosecond laser micromachining[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(12): 123506.
- [77] Baudach S, Bonse J, Krüger J, et al. Ultrashort pulse laser ablation of polycarbonate and polymethylmethacrylate[J]. Applied Surface Science, 2000, 154/155: 555-560.
- [78] Sattmann R, Sturm V, Noll R. Laser-induced breakdown spectroscopy of steel samples using multiple Q-switch Nd: YAG laser pulses[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(10): 2181-2187.
- [79] Klein-Wiele J H, Bekesi J, Simon P. Sub-micron patterning of solid materials with ultraviolet femtosecond pulses[J]. Applied Physics A, 2004, 79(4/5/6): 775-778.
- [80] Zang Z G, Zeng X F, Du J H, et al. Femtosecond laser direct writing of microholes on roughened ZnO for output power enhancement of InGaN light-emitting diodes[J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3463-3466.
- [81] Liu X, Song L J. Experimental study on femtosecond laser percussion micro-hole drilling[J]. Applied Laser, 2019, 39(6): 980-986.
刘璇, 宋立军. 飞秒激光叩击式微孔加工的实验研究[J]. 应用激光, 2019, 39(6): 980-986.
- [82] Gurauskis J, Sola D, Peña J I, et al. Laser drilling of Ni-YSZ cermets[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(14): 2673-2680.
- [83] 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.
- [84] Ashkenasi D, Kaszemeikat T, Mueller N, et al. Laser trepanning for industrial applications[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 323-331.
- [85] Huang H, Yang L M, Liu J. Micro-hole drilling and cutting using femtosecond fiber laser[J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 051513.
- [86] Goyal R, Dubey A K. Modeling and optimization of geometrical characteristics in laser trepan drilling of titanium alloy[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(3): 1281-1293.
- [87] Zhao W Q, Mei X S, Wang W J. Ultrashort pulse laser drilling of micro-holes(part 2): experimental study[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(2): 0242001.
赵万芹, 梅雪松, 王文君. 超短脉冲激光微孔加工(下): 实验探索[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 0242001.
- [88] Zhang H Y, Di J K, Zhou M, et al. An investigation on the hole quality during picosecond laser helical drilling of stainless steel 304[J]. Applied Physics A, 2015, 119(2): 745-752.
- [89] Lee H M, Choi J H, Moon S J. Determining the machining parameters for femtosecond laser helical drilling of aluminosilicate glass substrate[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(7): 923-930.
- [90] Nebel A, Herrmann T, Henrich B, et al. Fast micromachining using picosecond lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5706: 87-98.
- [91] Kaspar J, Luft A, Nolte S, et al. Laser helical drilling of silicon wafers with ns to fs pulses: scanning electron microscopy and transmission electron microscopy characterization of drilled through-holes[J]. Journal of Laser Applications, 2006, 18(2): 85-92.
- [92] Wynne A E, Stuart B C. Rate dependence of short-pulse laser ablation of metals in air and vacuum[J]. Applied Physics A, 2003, 76(3): 373-378.
- [93] Zhang J P. Submitted in total fulfilment of the requirements for the degree of master in optical engineerin[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
张晋平. 飞秒激光加工高深径比微孔的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [94] Weck A, Crawford T H R, Wilkinson D S, et al. Laser drilling of high aspect ratio holes in copper with femtosecond, picosecond and nanosecond pulses[J]. Applied Physics A, 2008, 90(3): 537-543.
- [95] Juodkazis S, Okuno H, Kujime N, et al. Hole drilling in stainless steel and silicon by femtosecond pulses at low pressure[J]. Applied Physics A, 2004, 79(4/5/6): 1555-1559.
- [96] Bliss D E, Adams D P, Cameron S M, et al. Laser machining with ultrashort pulses: effects of pulse-width, frequency and energy[J]. MRS Online Proceedings Library, 1998, 546(1): 81-84.

- [97] Xia B, Jiang L, Li X W, et al. High aspect ratio, high-quality microholes in PMMA: a comparison between femtosecond laser drilling in air and in vacuum[J]. *Applied Physics A*, 2015, 119(1): 61-68.
- [98] Du K, Li X W, Yang B D, et al. Research progress of femtosecond laser microhole drilling on non-metallic materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111417.
杜坤, 李晓炜, 杨炳东, 等. 飞秒激光非金属微孔加工研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111417.
- [99] Chien W T, Hou S C. Investigating the recast layer formed during the laser trepan drilling of Inconel 718 using the Taguchi method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33(3/4): 308-316.
- [100] Khan A H, O'Neill W, Tunna L, et al. Numerical analysis of gas-dynamic instabilities during the laser drilling process[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(8): 826-841.
- [101] Wang Z Y, Chen K, Zuo T C, et al. Study on the influence of assisted gas on laser drilling[J]. *Laser Journal*, 2000, 21(6): 44-46.
王智勇, 陈铠, 左铁钊, 等. 辅助气体对激光打孔的影响[J]. *激光杂志*, 2000, 21(6): 44-46.
- [102] Wang X Y, Ng G K L, Liu Z, et al. EPMA microanalysis of recast layers produced during laser drilling of type 305 stainless steel[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 453/454: 84-88.
- [103] Ho C C, Chen Y M, Hsu J C, et al. Characteristics of the effect of swirling gas jet assisted laser percussion drilling based on machine vision[J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(4): 042001.
- [104] Chen Q, Wang H J, Lin D T, et al. Characterization of hole taper in laser drilling of silicon nitride ceramic under water[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(11): 13449-13452.
- [105] Li G L, Hu S S, Tang H Q, et al. Laser repeat drilling of alumina ceramics in static water[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(5/6/7/8): 2885-2891.
- [106] Iwatani N, Doan H D, Fushinobu K. Optimization of near-infrared laser drilling of silicon carbide under water[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 71: 515-520.
- [107] Lu P W, Yuan G F. Experimental study of low-pressure water jet assisted laser drilling on Al_2O_3 ceramic[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 599/600/601: 22-26.
- [108] Tangwarodomnukun V, Wang J, Huang C Z, et al. An investigation of hybrid laser-waterjet ablation of silicon substrates[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 56: 39-49.
- [109] Zhou J, Huang Y X, Zhao Y W, et al. Study on water-assisted laser ablation mechanism based on water layer characteristics[J]. *Optics Communications*, 2019, 450: 112-121.
- [110] Chen X H, Li X, Wu C, et al. Influence of water jet assisted laser processing silicon carbide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011405.
陈雪辉, 李翔, 吴超, 等. 水射流辅助激光加工碳化硅的影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011405.
- [111] Yang L J, Wang M L, Wang Y, et al. Numerical and experimental research on water-jet guided laser micromachining[J]. *Materials Science Forum*, 2009, 626/627: 297-302.
- [112] Yang L J, Kong X J, Wang Y, et al. Laser micro-holes machining technology and its application[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(19): 32-38.
杨立军, 孔宪俊, 王扬, 等. 激光微孔加工技术及应用[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(19): 32-38.
- [113] Wang Y, Li C Q, Yang L J, et al. Research on unconventional laser machining[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 448-454.
王扬, 李春奇, 杨立军, 等. 非常规激光加工技术的研究[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 448-454.
- [114] Khuat V, Ma Y C, Si J H, et al. Fabrication of through holes in silicon carbide using femtosecond laser irradiation and acid etching[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 289: 529-532.
- [115] Dongre G, Rajurkar A, Gondil R, et al. Removal of surface spatter and recast layer by chemical cleaning[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18: 4763-4772.
- [116] Zhang Q, Sun S F, Zhang F Y, et al. A study on film hole drilling of IN718 superalloy via laser machining combined with high temperature chemical etching[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(1/2): 155-162.
- [117] Li C X, Shi X, Si J H, et al. Alcohol-assisted photoetching of silicon carbide with a femtosecond laser[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(1): 78-80.