

水导激光制备镍基单晶高温合金微孔工艺试验研究

王顺山^{1,2,3}, 乔红超^{1,2*}, 曹治赫^{1,2}, 梁金盛^{1,2,3}, 韩东宇^{1,2}, 赵吉宾^{1,2}¹中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;²中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了改善水导激光制备单晶镍合金微孔的表面形貌,降低微孔锥度,采用控制变量法研究了在单步螺旋打孔方法下,激光单脉冲能量、扫描速度、进给次数和扫描圈数对微孔表面形貌及锥度的影响规律。提出了多步螺旋打孔方法,并在优选加工参数组合下与单步螺旋打孔方法进行了比较。结果表明,增加单脉冲能量和降低扫描速度可以改善微孔表面形貌,减小微孔锥度。随着进给次数的增多,微孔表面形貌逐渐变好,微孔锥度先减小后饱和。随着扫描圈数的增多,微孔表面形貌逐渐变差,微孔锥度先增大后减小。采用多步螺旋打孔方法加工的微孔锥度仅为 0.29°,比单步螺旋打孔方法降低了 70%,且尺寸偏差和圆度都控制在 20 μm 以内。

关键词 激光技术; 水导激光; 螺旋打孔; 高温合金; 表面形貌; 锥度

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231117

1 引言

随着我国航空科技、船舶、电力与能源等领域的迅速发展,航空燃气涡轮发动机技术逐步向高端化、专业化方向发展,这对相关零部件微孔结构的加工精度和质量提出了更为严格的要求。镍基单晶高温合金因其优越的蠕变抗力、高温持久强度、抗疲劳性能和耐高温腐蚀性能,已被广泛应用于先进航空发动机和燃气轮机的大型薄壁隔热屏、火焰筒类零件等^[1-3]。

目前,镍基单晶高温合金微孔的加工方法包括电火花加工^[4](EDM)、电液束加工^[5](ECM)以及激光加工^[6](LP)等。电火花加工存在加工效率低、阴极损耗、锥度大、重铸层厚度超标和微裂纹等问题^[4]。电液束加工虽然加工效率较高且不存在电极损耗,但难以精确控制孔形和锥度,且设备及工艺过程复杂,尚未得到广泛应用^[7]。相较于这些方法,激光加工具有材料适用范围广、生产效率高和无接触应力等优势,但长脉冲激光加工产生的热影响区较大,难以避免重铸层、锥度和微裂纹的产生^[8]。超短脉冲激光加工得益于其“冷加工”的特性,可以实现无热缺陷加工,但材料去除效率较低,且设备采购成本较高^[9]。因此,传统的打孔方法难以满足气膜孔在冶金质量和加工效率等方面的要求,迫切需要一种能够兼顾加工质量和效率的新方法。

水导激光(WJGL)加工作为一种清洁、受控的

冷激光复合加工技术,集合了水射流切割温度低、工作距离长以及传统激光加工效率高、材料适用范围广的优点,有效地解决了传统激光加工中孔周飞溅物堆积、热损伤、锥度大和加工精度低等问题,为气膜孔的高效高质加工提供了新的可能。国内外学者针对镍合金气膜孔的水导激光加工进行了研究。Gurav 等^[10]对比了水导激光、电火花和传统激光加工技术打孔 CMSX-4 镍合金时的表面质量,发现水导激光加工的微孔质量更具优势,微孔表面更平整光洁、无微裂纹产生。梁金盛等^[11]采用控制变量法研究了激光功率和扫描速度对镍基高温合金水导激光打孔效率和重铸层厚度的影响规律。于永飞等^[12]则研究了激光功率和扫描速度对微孔圆度和孔壁粗糙度的影响。Liu^[13]研究了水导激光加工镍基单晶涡轮叶片气膜孔时,层流射流流速对孔侧壁热影响区厚度的影响规律,发现增大射流流速可以减少加工产生的缺陷。Marimuthu 等^[14]采用水导激光对涂覆热障涂层的镍基高温合金进行了打孔试验研究,分析了不同射流倾角(15°、30°、60°)下脉冲重复频率对加工孔形貌特征的影响规律,试验结果表明,增大脉冲重复频率可以使孔轮廓更加平滑,涂层分层或重铸层等热缺陷减少。Subasi 等^[15]使用水导激光对四种不同航空镍合金进行了钻孔试验,研究了材料的热物理性质对单脉冲的平均去除效率、孔截面锥度及重铸层厚度的影响,结果显示,材料的蒸发焓值与孔

收稿日期: 2023-08-18; 修回日期: 2023-09-21; 录用日期: 2023-10-09; 网络首发日期: 2023-10-16

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4601600)

通信作者: hcqiao@sia.cn

锥度呈正比关系,即对于相同的工艺参数集,蒸发焓值较高的镍合金加工的孔锥度较大,反之则较小。Liao 等^[16]采用水导激光技术加工了镍合金气膜孔,通过对加工表面完整性以及白层晶体学组成的分析,证明了材料蚀除机制是材料通过熔体喷溅的方式,以熔渣、气泡和等离子体羽流的形式从基体分离去除的。

尽管大量试验研究已充分证明了水导激光加工技术在单晶镍合金气膜孔加工中的优越性和应用价值,但在气膜孔高质高精、批量化生产方面,仍需进一步探索。本文通过设置单因素试验,研究了单晶镍合金水导激光单步螺旋打孔中激光单脉冲能量、扫描速度、进给次数和扫描圈数对微孔表面形貌及锥度的影响规律。针对镍合金水导激光气膜孔加工中存在的

几何形貌差、尺寸精度低和锥度超标等问题,对单步螺旋打孔方法进行了优化,提出了多步螺旋打孔方法,并在优选加工参数组合下对比了两种打孔方法的加工效果。

2 试验设备与方法

2.1 试验材料

本试验选用中国科学院金属研究所提供的 2 mm 厚第四代镍基单晶高温合金 DD91 试件作为试验材料,在其表面加工直径为 1 mm 的微孔。DD91 镍合金的名义化学成分如表 1 所示^[1],试验前,使用 400# 碳化硅砂纸对线切割成型的试样表面进行打磨,并将其浸泡在乙醇溶液中超声清洗 15 min,以尽可能消除材料表面粗糙度和沉积物对试验结果的影响。

表 1 DD91 镍基单晶高温合金的名义化学成分

Table 1 Nominal compositions of DD91 nickel-based single crystal superalloys

Element	Al	Cr	Co	Mo	Ta	W	Re	Ru	Ni
Mass fraction / %	6	5	12	1	8	6	5	3	Bal.

2.2 试验设备

本研究采用的水导激光加工设备为自研的水导激光铣削加工系统,其详细结构如图 1 所示,由激光-水射流耦合检测系统、供水系统、气氛辅助系统以及三轴数控工作台等组成。系统中的二极管泵浦固体 Nd:YAG 激光器能够产生纳秒级的 532 nm 波长激光脉冲,最短脉冲持续时间为 10 ns,最大重复频率可达 40 kHz。供水系统通过液压泵将纯净的去离子过滤水注入耦合装

置,形成稳定的层流同轴射流。废液在经过沉淀和过滤处理后,可在加工过程中被循环利用。激光束穿过耦合装置上方的光学窗口与“细如发丝”的水射流相结合,以类似于传统光纤的方式通过全内反射被引导到固定在三轴数控工作台的工件上,同时水射流持续冷却切割区域并有效地清除碎屑。最后,借助电荷耦合元件(CCD)相机对激光束进行定位和聚焦,并通过控制系统调节光学扫描振镜和工作台,实现对材料的微

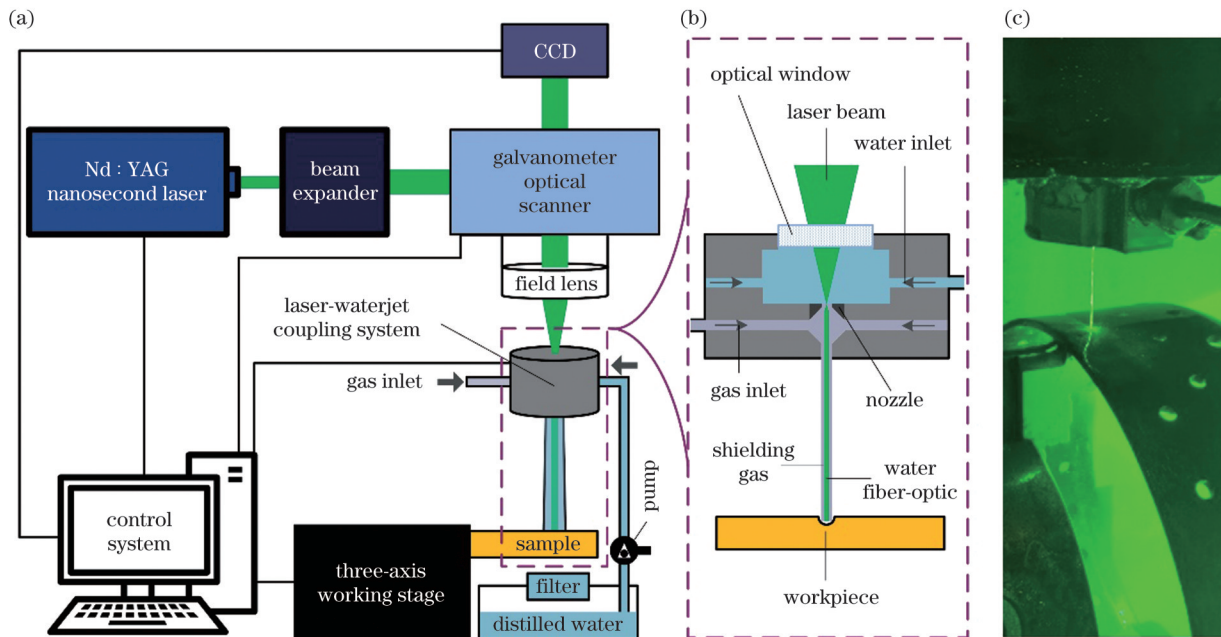


图 1 水导激光加工系统。(a)试验设备原理图;(b)激光-水射流耦合系统原理图;(c)加工系统关键零部件实物图

Fig. 1 WJGL processing system. (a) Schematic of test equipment; (b) schematic of laser-waterjet coupling system; (c) photograph of key components in processing system

细加工。此外,同轴螺旋气氛最大限度地减小了水射流的动量损耗,提高了加工效率和质量^[17]。

2.3 试验方案

在钻孔过程中,耦合能束沿着特定扫描路径在试样表面移动,如图 2 所示。图 2(a)为单步螺旋扫描模式(SSSM)的示意图,耦合能束从最内圈(circle 1)的起始点开始,沿顺时针方向逐层向最外圈(circle n)螺旋扫描,完成一层扫描后,跳转方向由外向内逐圈递

进扫描,最终在最内圈(circle 1)结束扫描。该过程重复进行,直至贯穿试样形成微孔。图 2(b)为本文基于单步螺旋扫描路径提出的多步螺旋扫描模式(MSSM)的示意图,耦合能束重复扫描最内圈(circle 1) N 次,在微孔中心贯穿材料形成预制孔洞,然后以单步螺旋扫描模式扫描 N 次,完成第二圈(circle 2)到最外圈(circle n)填充圆的加工,实现孔径拓宽和孔形修饰。

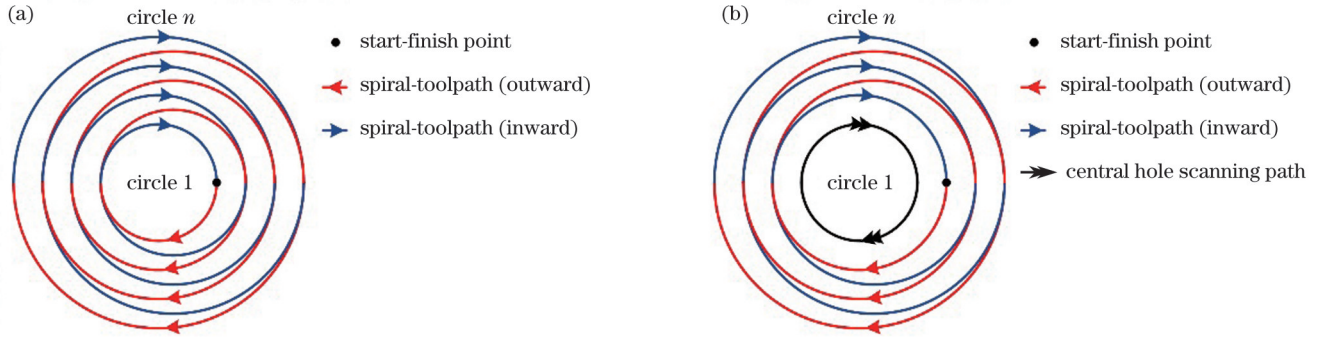


图 2 水导激光螺旋打孔扫描路径示意图。(a)单步螺旋扫描路径;(b)多步螺旋扫描路径

Fig. 2 Schematics of scanning paths of WJGL spiral drilling. (a) Single-step spiral scanning mode; (b) multi-step spiral scanning mode

本研究采用控制变量法研究了单晶镍合金水导激光单步螺旋打孔中激光单脉冲能量、扫描速度、进给次数和扫描圈数对微孔表面形貌及锥度的影响规律,并在优选加工参数组合下对比了单/多步螺旋打孔方法加工微孔的质量。进给次数表示打孔过程中耦合能束从起始点沿单步螺旋路径扫描至终止点的循环加工次数。扫描圈数表示单次进给模式下扫描路径中与微孔轮廓线同心的圆圈个数。根据前期大量试验结果,其他加工参数设置如下:水射流压力为 20 MPa,加工距离为 12 mm,高压水射流喷嘴孔径为 70 μm [由于缩流效应^[18],实际光斑直径(w_0)约为 60 μm],脉冲持续时间为 100 ns,脉冲重复频率为 10 kHz,扫描圆圈间距为 30 μm 。此外,系统中使用的光学元件(光纤、透镜、水射流等)会导致激光束传输到材料表面时出现能量损耗,故本研究中采用的单脉冲能量为光纤耦合能量计测得的试验工况下传输到材料表面的能量。

使用超声波清洗机和乙醇溶液对加工后的单晶试样进行清洗处理,以去除附着在微孔表面和内壁的残渣。使用光学显微镜在 2 倍倍率下对微孔出入口表面形貌进行观察,利用超景深三维显微镜测量微孔孔径。微孔锥度角(α)是通过测量微孔的入口孔径(D_{ent})、出口孔径(D_{exit})以及深度(h)来计算的:

$$\alpha = 2\arctan\left(\frac{D_{\text{ent}} - D_{\text{exit}}}{2h}\right) \times \frac{180}{\pi}. \quad (1)$$

3 结果与讨论

3.1 材料去除机制分析

水导激光加工技术的主要优势在于增强的冷却

效应和优越的材料去除机制,这两者都得益于水射流的作用。图 3 所示为水导激光加工金属材料时的去除机制示意图。首先,水射流引导的激光脉冲与材料表面相互作用,加工区域的材料吸收激光能量,发生温度升高、熔融和轻微的气化。由于脉冲持续时间较长,部分激光能量被蒸汽羽流吸收发生电离现象,在水射流和材料之间的中间区域产生高温高压的等离子体云^[16]。这种现象与激光冲击强化的机制类似,在这种机制中,等离子体受到水层的约束作用,形成大量级的压力冲击波^[19]。与传统纳秒激光加工相比,水层约束的等离子体冲击波和蒸汽压力加速了熔融物的喷溅过程。一旦等离子体开始溃败,水射流与高温激光辐照的表面相互作用,发生爆炸性气化蒸发,产生脉冲冲击压力,使加工区域的残余熔体层被去除^[14]。此外,在下一个脉冲与材料相互作用之前,水射流持续冷却冲刷加工区域,使其温度接近环境温度。

3.2 单脉冲能量对微孔表面形貌及锥度的影响

为了研究激光单脉冲能量对微孔表面形貌及锥度的影响规律,设置光斑扫描速度为 2 mm/s,进给次数为 4,扫描圈数为 3,单脉冲能量分别为 0.9、1.3、1.7、2.1、2.5 mJ,在这些参数下进行单因素试验。不同单脉冲能量下微孔入口和出口处的表面形貌如图 4 所示。图 5 显示了微孔出入口孔径及锥度随单脉冲能量变化的趋势。结果表明,随着单脉冲能量的增加,微孔出入口孔径均呈增大趋势,但变化速率有所不同。微孔入口孔径的增速较缓,变化幅度(1021~1032 μm)不太显著。与此不同的是,当单脉冲能量从 0.9 mJ 增加到 2.1 mJ 时,出口孔径呈线性增大趋

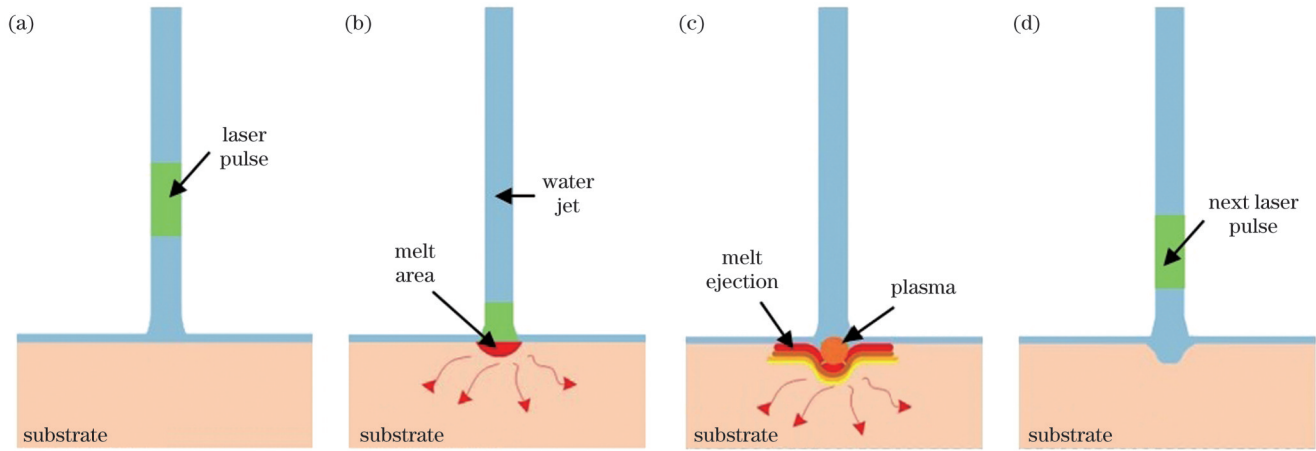


图 3 水导激光加工的材料去除机制。(a)激光作用前;(b)熔池和蒸汽形成;(c)产生等离子体羽流和冲击波;(d)激光脉冲作用后
Fig. 3 Material removal mechanism of WJGL processing. (a) Before laser action; (b) formation of molten pool and vapor; (c) generation of plasma plumes and shock waves; (d) after laser action

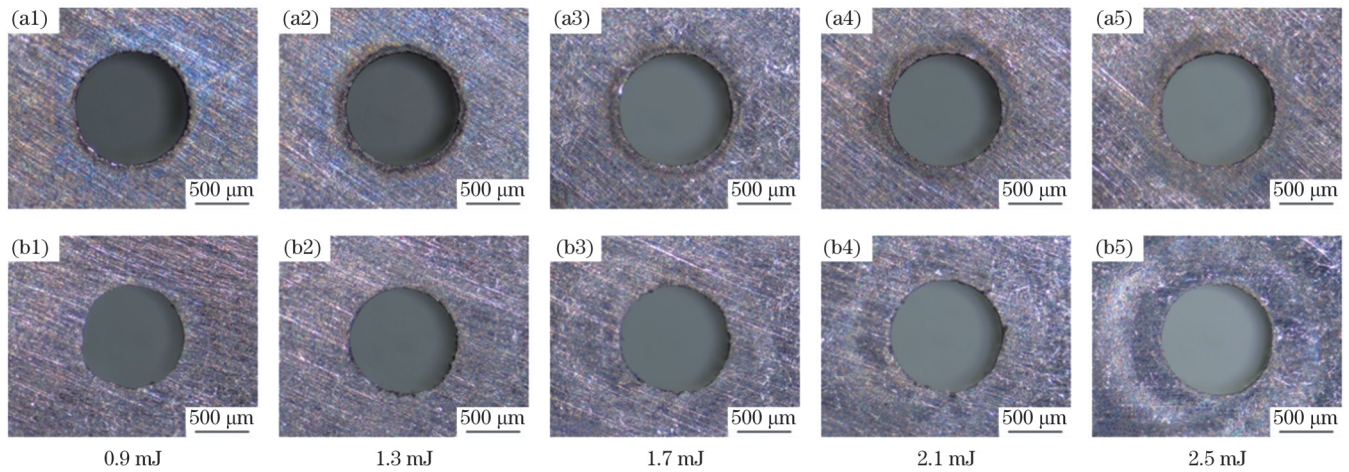


图 4 不同单脉冲能量下微孔出入口处的表面形貌光学显微镜图。(a1)~(a5)入口;(b1)~(b5)出口

Fig. 4 Optical microscope images of surface morphologies at entrances and exits of micro-holes under different single pulse energy values. (a1)~(a5) Entrance; (b1)~(b5) exit

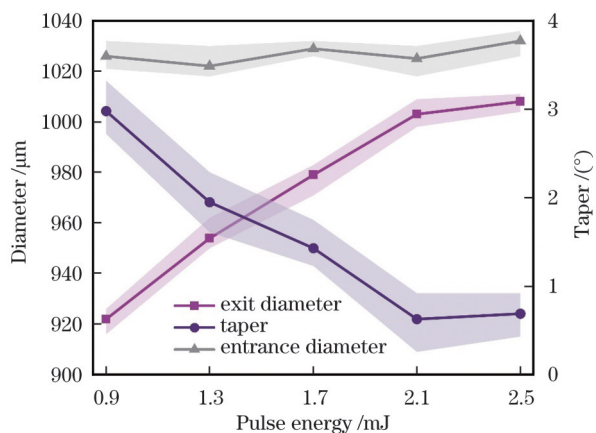


图 5 微孔出入口孔径及锥度随激光单脉冲能量的变化

Fig. 5 Size and taper of micro-hole versus single pulse energy

势,从 921 μm 增加到 1003 μm ,随着单脉冲能量的继续增加,出口孔径的增速逐渐减缓,最终稳定在 1007 μm 左右。这是由于当单脉冲能量较低时,烧蚀过程以热蒸发和熔体迁移为主^[20],材料的去除效率和熔融物的

排出效率较低,故微孔出口孔径较小,且锥度较大。随着单脉冲能量的增加,蒸汽羽流被电离并发生液相爆炸现象,材料的有效蚀除量和反冲压力排出熔渣的能力提升,促进了微孔底部的加工,从而扩大了微孔出口孔径,并降低了锥度。当脉冲能量高于 2.1 mJ 时,由于等离子体羽流屏蔽效应和气态物质散射干扰的影响^[21],传输到微孔底部的激光能量减小,微孔底部材料的去除效率降低,故微孔出口孔径的增加量小于入口孔径的增加量,锥度反而略有增大。此外,由于耦合能束光斑能量的平顶分布特性^[22],单脉冲能量增加,耦合能束中高于材料去除阈值的能量密度分布区域也随之增大,微孔边缘得到更加充分的加工,从而扩大了微孔孔径,改善了出口圆度和表面质量差的问题。

3.3 扫描速度对微孔表面形貌及锥度的影响

为了研究扫描速度对微孔表面形貌及锥度的影响规律,设置激光单脉冲能量为 1.7 mJ,进给次

数为 4, 扫描圈数为 3, 扫描速度分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm/s, 在这些参数下进行单因素试验。不同扫描速度下微孔入口和出口处的表面形貌如图 6 所示。图 7 显示了微孔出入口孔径及锥度随扫描速度变化的趋势。由图 6 可知, 随着扫描速度的增加, 微孔出入口处边缘的完整性变差, 表面质量降低, 且扫描速度对出口孔质量的影响要大于其对入口孔质量的影响。由图 7 知, 随着扫描速度的增加, 微孔入口孔径(1021~1029 μm)几乎不发生变化, 微孔出口孔径随着扫描速度的增加持续减小, 微孔锥

度随扫描速度的增加不断增大。这是因为当扫描速度增加时, 单位面积内的有效脉冲数相应减少, 从而总输入热能减少, 所以材料烧蚀加工不充分, 孔圆度变差, 出口孔径变小, 锥度变大。此外, 扫描速度越快, 水射流就越容易受到扰动发生破裂, 导致激光发生折射和散射, 阻碍切口的连续切割。但扫描速度过小将显著降低水导激光的加工效率, 无法满足批量化生产的需求。因此, 实际生产中应综合考虑孔的加工效率和质量, 将扫描速度控制在合理范围内。

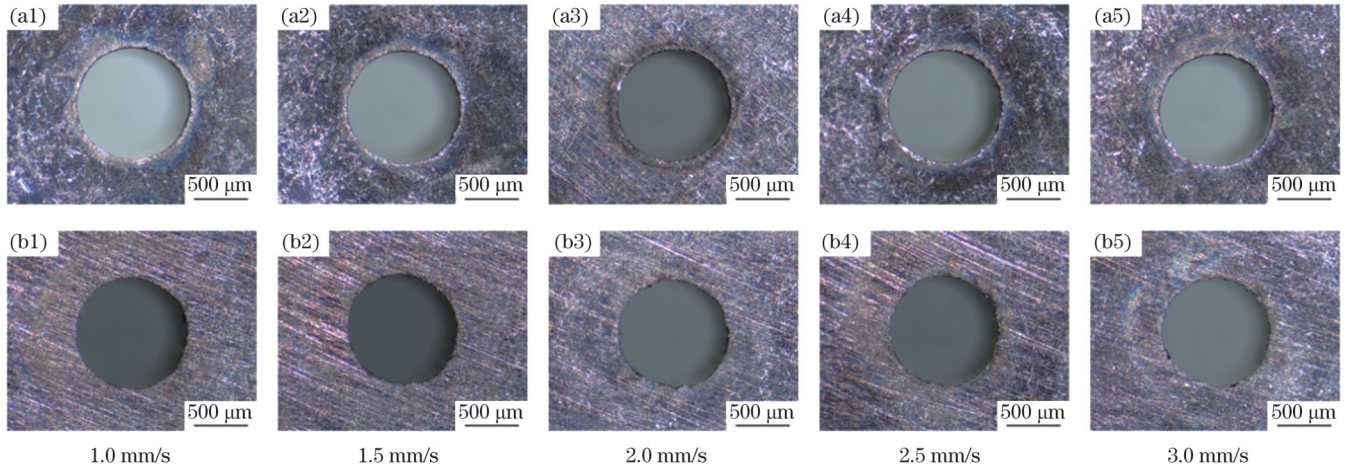


图 6 不同扫描速度下微孔出入口处的表面形貌光学显微镜图。(a1)~(a5)入口;(b1)~(b5)出口

Fig. 6 Optical microscope images of surface morphologies at entrances and exits of micro-holes under different scanning speeds.

(a1)~(a5) Entrance; (b1)~(b5) exit

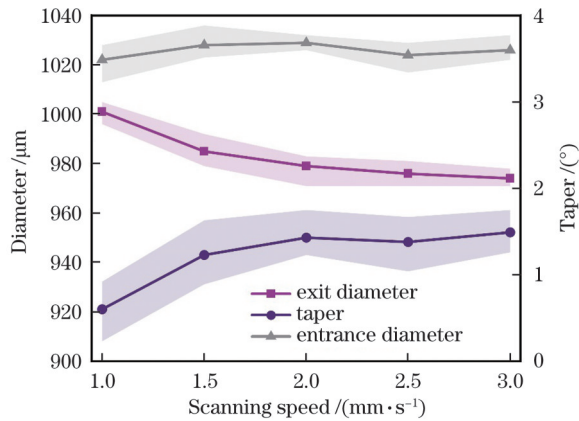


图 7 微孔出入口孔径及锥度随扫描速度的变化

Fig. 7 Size and taper of micro-hole versus scanning speed

3.4 进给次数对微孔表面形貌及锥度的影响

为了研究进给次数对微孔表面形貌及锥度的影响规律, 设置光斑扫描速度为 2 mm/s, 扫描圈数为 3, 单脉冲能量为 1.7 mJ, 进给次数分别为 4、6、8、10、12, 在这些参数下进行单因素试验。结果表明, 随着进给次数的增加, 微孔圆度和表面质量变好, 如图 8 所示。这是因为当采用较多进给次数加工时, 加工区域单位面积内烧蚀的时间增长, 侧壁凸起和重凝物得到更充分的去除, 孔出入口毛刺得到修整。由图 9

可知: 无论进给次数是多少, 微孔的入口孔径都稳定在 1025 μm 左右; 而出口孔径的演化趋势是先增大后趋于饱和, 当进给次数小于 6 时, 出口孔径随着进给次数的增加而增大, 在进给次数大于 6 后, 出口孔径达到饱和状态(饱和值约为 1000 μm)。这些现象可以用耦合能束能量分布和烧蚀机理进行解释。由于激光能量的平顶分布, 光斑实际烧蚀直径^[13](D_s)表示为

$$D_s^2 = 2\omega_0^2 \ln(F_0/F_{th}), \quad (2)$$

式中: ω_0 为耦合能束半径; F_0 为耦合能束的峰值能量; F_{th} 为单脉冲烧蚀阈值。

孔的实际烧蚀直径(D_{Enter})与扫描路径的消融直径(D_{CTD})以及光斑实际烧蚀直径的关系^[23]为

$$D_{Enter} = D_s + D_{CTD}. \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 入口孔径的最大影响因素是扫描路径的消融直径和激光通量。因此, 即使当进给次数改变时, 微孔的入口孔径也几乎相同。由于水射流对激光束的散射衰减, 微孔出口处的激光通量比入口处的激光通量更低, 故出口处光斑的实际烧蚀直径减小, 材料的去除效率降低。这可能是出口孔径先增大然后变饱和的主要原因之一, 而且通孔烧蚀成形后, 穿透孔的大部分激光能量被浪费而不是被材料吸收, 也阻碍了出口孔径的扩大。

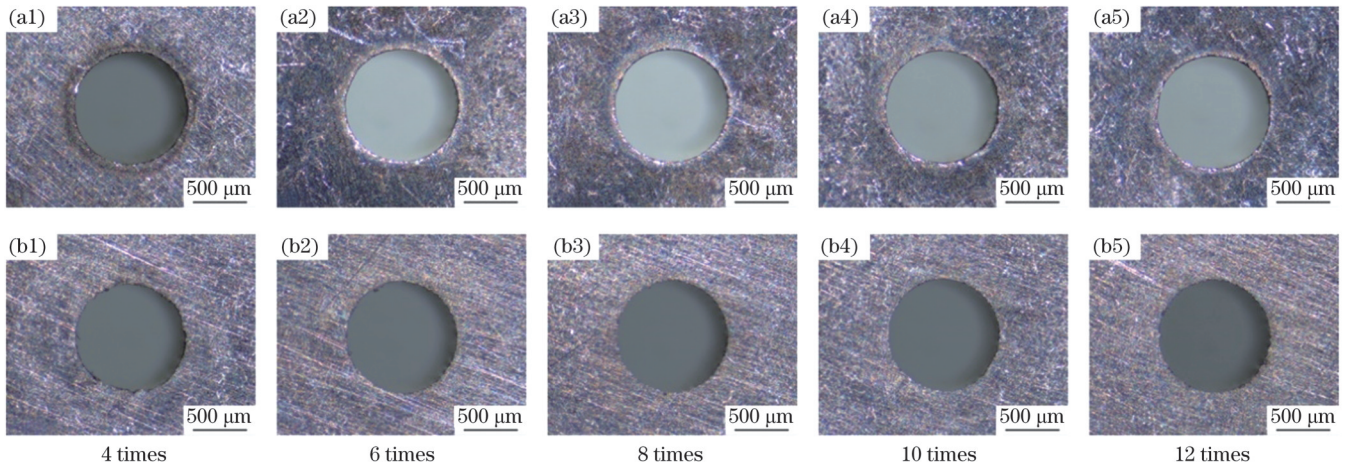


图 8 不同进给次数下微孔出入口处的表面形貌光学显微镜图。(a1)~(a5)入口;(b1)~(b5)出口
 Fig. 8 Optical microscope images of surface morphologies at entrances and exits of micro-holes under different feed times.
 (a1)~(a5) Entrance; (b1)~(b5) exit

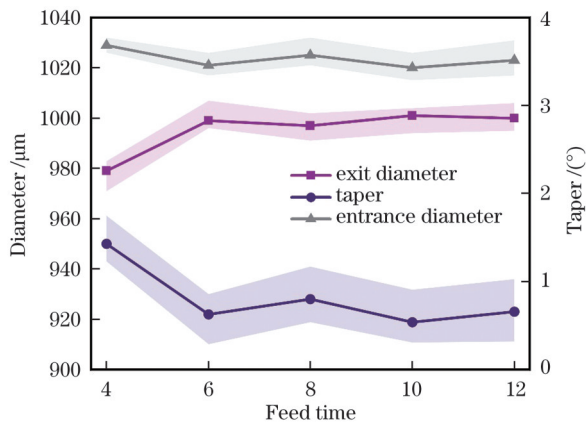


图 9 微孔出入口孔径及锥度随进给次数的变化
 Fig. 9 Size and taper of micro-hole versus feed time

3.5 扫描圈数对微孔表面形貌及锥度的影响

为了研究扫描圈数对微孔表面形貌及锥度的影响规律,设置光斑扫描速度为 2 mm/s,进给次数为 4,单脉冲能量为 1.7 mJ,扫描圈数分别为 1、3、5、7、9。

图 10 所示为不同扫描圈数下微孔入口和出口处的表面形貌图。不同扫描圈数下加工的微孔入口圆度和质量均较好,无表面飞溅物和熔凝物残留,如图 10(a1)~(a5)所示。对于微孔出口,随着扫描圈数的增加,孔口圆度和质量显著变差,出口几何形状呈不规则的圆形,轮廓边缘有少量毛刺,如图 10(b1)~(b5)所示。分析认为:随着加工的进行,加工孔底部会有熔融物堆积,在通孔形成后,熔融材料将从孔底排出,随着扫描圈数的增加,更多的熔融物和碎屑与基体材料粘附,可能导致孔底材料去除均匀性降低,进而导致出口圆度和表面质量显著变差。如图 11 所示,微孔入口孔径随扫描圈数的增加呈现出线性减小的变化趋势。微孔出口孔径则随扫描圈数的增加呈先减小后变饱和的趋势,当扫描圈数从 1 增加到 3 时,微孔的出口孔径从 1011 μm 急剧减小到 976 μm。这是因为当扫描圈数为 1 时,水射流与切缝侧壁剧烈摩擦,发生紊动扩散,射流边界向两侧扩展,在切缝侧壁的限制

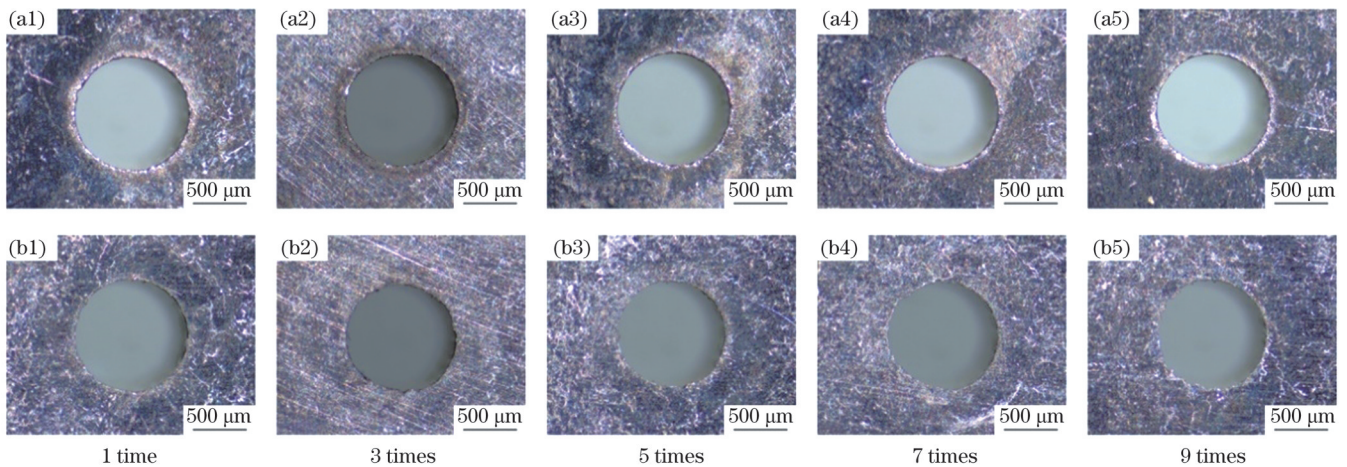


图 10 不同扫描圈数下微孔出入口处的表面形貌光学显微镜图。(a1)~(a5)入口;(b1)~(b5)出口
 Fig. 10 Optical microscope images of surface morphologies at entrances and exits of micro-holes under different scanning times.
 (a1)~(a5) Entrance; (b1)~(b5) exit

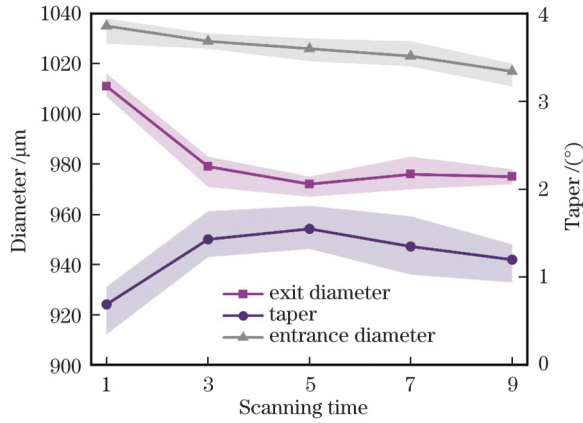


图 11 微孔出入口孔径及锥度随扫描圈数的变化

Fig. 11 Size and taper of micro-hole versus scanning time

下,水射流从与光束扫描相反的方向排出,避免了喷射的水滴和熔渣扰乱射流状态,激光的能量传输损耗较低,微孔底部得到充分的烧蚀加工,从而导致微孔入口和出口的孔径均较大且相差较小,相应的锥度也较小。当扫描圈数增加到3时,向上飞溅的颗粒和液滴扰乱了射流的层流状态,导致光导失稳和能量逸

散,削弱了激光对微孔底部的加工能力,进而导致微孔出口孔径减小,锥度变大。当扫描圈数高于3时,壁面效应^[24]对耦合能束加工能力的影响达到上限,因此微孔出口孔径的变化相对平稳,只有轻微的波动。然而,由于扫描圈数的增加,射流的紊动扩散得到改善,微孔入口处的激光辐照区域缩小,故入口孔径持续减小,微孔锥度也相应降低。

3.6 单/多步螺旋打孔方法加工效果的对比

根据上述试验结果,在保证满足微孔尺寸设计要求[直径为(1000±30)μm]的基础上,综合考虑加工时间和锥度,最终优选出微孔的加工参数组合:光斑扫描速度为1 mm/s,进给次数为6,单脉冲能量为2.1 mJ,扫描圈数为3。在这些参数下对比了两种打孔方法(单步/多步螺旋打孔方法)的加工效果。图12对比了单/多步螺旋打孔方法下加工的微孔出入口表面形貌。可以发现:当采用单步螺旋打孔方法时,由于熔融液滴或气化物质从孔入口处排出,故熔凝物会覆盖在微孔入口边缘;相反,当采用多步螺旋打孔方法时,由于存在预制中心孔,熔融物质从中心孔孔底排出,故微孔入口边缘更光滑。

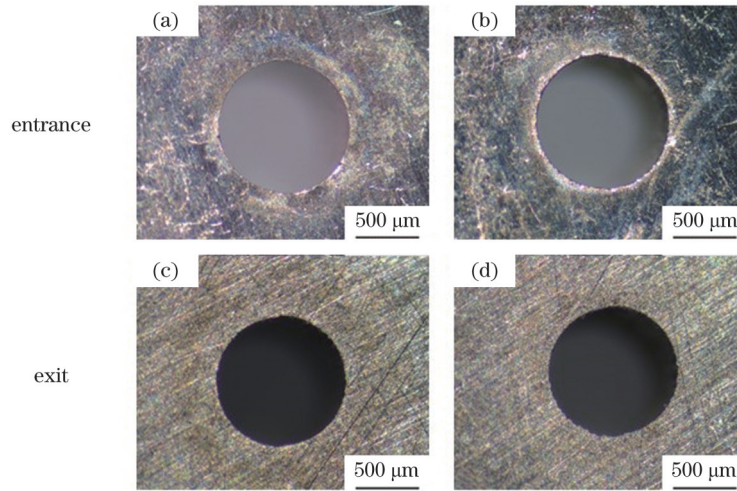


图 12 SSSM/MSSM 加工的微孔出入口处的表面形貌光学显微镜图。(a)(c)SSSM;(b)(d)MSSM

Fig. 12 Optical microscope images of surface morphologies at entrances and exits of micro-holes processed by SSSM/MSSM.

(a)(c) SSSM; (b)(d) MSSM

测量单/多步螺旋打孔方法加工的微孔的出入口孔径、圆度以及锥度,结果如表2所示。对比发现,多步螺旋打孔方法加工的微孔尺寸偏差更小且圆度更好,微孔的锥度明显降低,仅为0.29°,较单步螺旋打孔方法降低了70%。这是因为单步螺旋扫描过程中产生的喷溅和等离子体云干扰了水射流的状态,阻碍了激光的传输,所以微孔底部加工不充分,影响加工质量。而中心预制孔洞的引入使熔渣和水流从孔底排出,削弱了对激光传输的干扰,改善了微孔的表面形貌和锥度。值得注意的是,由于多步螺旋打孔方法需要先在孔中心形成贯穿孔,故该方法对微孔的直径和深度有一定的要求。

表 2 MSSM/SSSM 加工效果对比

Table 2 Comparison of MSSM/SSSM processing effects

Method	Diameter / μm		Roundness / μm		Taper / (°)
	Entrance	Exit	Entrance	Exit	
MSSM	1015	1005	15	16	0.29
SSSM	1032	998	20	27	0.97

4 结 论

采用水导激光在单晶镍合金上加工微孔,研究了激光单脉冲能量、扫描速度、进给次数和扫描圈数对微孔表面形貌及锥度的影响规律,提出了多步螺旋打孔方法,并对比了在优选工艺参数组合下单/多步螺旋打

描打孔的表面质量,结论如下:

1) 微孔表面形貌及出口孔径主要受单脉冲能量和扫描速度的影响,且各参数对微孔出口表面形貌的影响要大于其对微孔入口表面形貌的影响。随着单脉冲能量的增加,材料去除率和光斑烧蚀直径增大,微孔表面形貌变好,出口孔径增大,微孔锥度降低。较慢的扫描速度可以改善微孔表面形貌,并降低微孔锥度,但过慢的扫描速度会导致生产效率降低,不利于工业应用。

2) 适当增加进给次数可以提高微孔加工质量,降低锥度,但受耦合能束能量分布特性的影响,出口孔径和锥度存在饱和值。

3) 当扫描圈数为 1 时,微孔锥度最小,微孔质量也较好,但尺寸偏差较大。随着扫描圈数的增加,微孔质量变差,入口孔径线性减小,出口孔径先减小后饱和,出口孔径的减小量大于入口孔径的减小量,微孔锥度先增大后减小。

4) 预制中心孔促使熔渣和水流从孔底排出,削弱其对水射流状态的扰动,可以极大地改善微孔表面形貌,减小微孔锥度。在相同的工艺参数组合下,多步螺旋扫描加工的微孔锥度仅为 0.29° ,比单步螺旋扫描下的锥度降低了 70%,且尺寸偏差和圆度都控制在 $20\ \mu\text{m}$ 以内。

参 考 文 献

- Wang X G, Liu J L, Jin T, et al. Effects of temperature and stress on microstructural evolution during creep deformation of Ru-free and Ru-containing single crystal superalloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(7): 1034-1044.
- 谭子昊,李永梅,王新广,等.一种第四代镍基单晶高温合金的同相位热机械疲劳行为及损伤机制[J].*金属学报*, 2024, 60(2): 154-166.
Tan Z H, Li Y M, Wang X G, et al. In-phase thermal-mechanical fatigue behavior and damage mechanism of a fourth-generation Ni-based single-crystal superalloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2024, 60(2): 154-166.
- 李继康,张振武,杨源祺,等.激光选区熔化 DD91 镍基单晶高温合金的单道形貌、晶体取向和微观组织[J].*中国激光*, 2022, 49(14): 1402103.
Li J K, Zhang Z W, Yang Y Q, et al. Crystal orientation and microstructure of DD91 nickel-based single crystal superalloy fabricated by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(14): 1402103.
- Sahu D, Sahu S K, Jadam T, et al. Electro-discharge machining performance of nimonic 80A: an experimental observation[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(12): 10155-10167.
- 潘志福,傅军英,张明岐.电液束加工特性及小孔形貌控制技术研究[J].*航空制造技术*, 2020, 63(4): 14-20.
Pan Z F, Fu J Y, Zhang M Q. Study on characteristics of electro stream machining and controlling technology of hole morphology [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(4): 14-20.
- 孙建林,孙会来,岳端木,等.激光制备带热障涂层高温合金微孔工艺研究[J].*激光与红外*, 2021, 51(10): 1259-1271.
Sun J L, Sun H L, Yue D M, et al. Research on laser machining of micro-holes in superalloy with thermal barrier coating[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(10): 1259-1271.
- 宋金榜,易海云.航空发动机涡轮叶片气膜孔加工工艺[J].*工具技术*, 2020, 54(12): 82-86.
Song J B, Yi H Y. Technology for gas film hole of aircraft engine turbine blade[J]. *Tool Engineering*, 2020, 54(12): 82-86.
- Biffi C A, Previtali B. Spatter reduction in nanosecond fibre laser drilling using an innovative nozzle[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(9): 1231-1245.
- Zhai Z Y, Wang W J, Mei X S, et al. Percussion drilling on nickel-based alloy with thermal barrier coatings using femtosecond laser [J]. *Optik*, 2019, 194: 163066.
- Gurav M M, Gupta U, Dabade U A. Quality evaluation of precision micro holes drilled using pulsed Nd: YAG laser on aerospace nickel-based superalloy[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 19: 575-582.
- 梁金盛,乔红超,曹治赫,等.镍基单晶高温合金水导激光钻孔工艺特性研究[J].*激光与红外*, 2022, 52(7): 986-993.
Liang J S, Qiao H C, Cao Z H, et al. Study on technological characteristics of water-guided laser drilling of nickel-based single crystal superalloy[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(7): 986-993.
- 于永飞,乔红超,曹治赫,等.高温合金 GH4169 水导激光钻孔工艺特性研究[J].*激光与红外*, 2022, 52(4): 508-514.
Yu Y F, Qiao H C, Cao Z H, et al. Research on process characteristics of water-guided laser drilling for superalloy GH4169 [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(4): 508-514.
- Liu Y Z. Coaxial waterjet-assisted laser drilling of film cooling holes in turbine blades[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 150: 103510.
- Marimuthu S, Smith B. Water-jet guided laser drilling of thermal barrier coated aerospace alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(1): 177-191.
- Subasi L, Diboine J, Gunaydin A, et al. Water jet guided laser microdrilling of aerospace alloys: correlation of material properties to process time and quality[J]. *Journal of Laser Applications*, 2021, 33(1): 012015.
- Liao Z R, Xu D D, Axinte D, et al. Surface formation mechanism in waterjet guided laser cutting of a Ni-based superalloy[J]. *CIRP Annals*, 2021, 70(1): 155-158.
- Cheng B, Ding Y, Li Y, et al. Coaxial helical gas assisted laser water jet machining of SiC/SiC ceramic matrix composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 293: 117067.
- 张光辉,黄宇星,黄平,等.水导激光技术中水-光耦合传能规律研究[J].*激光技术*, 2022, 46(6): 749-754.
Zhang G H, Huang Y X, Huang P, et al. Study on the law of water-light coupling energy transfer in water-guided laser technology[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(6): 749-754.
- Deng W W, Wang C Y, Lu H F, et al. Progressive developments, challenges and future trends in laser shock peening of metallic materials and alloys: a comprehensive review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, 191: 104061.
- Mishra S, Yadava V. Laser beam MicroMachining (LBMM) — A review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 73: 89-122.
- 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): 1602001.
Wang Y F, Zhu H, Zhang C Y, et al. Mechanism and experimental study of rotating magnetic field assisted laser machining micropores [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(16): 1602001.
- 李靖怡,李元,丁焯,等.水导激光加工光源选型与材料蚀除研究[J].*北京理工大学学报*, 2022, 42(1): 36-45.
Li J Y, Li Y, Ding Y, et al. Research on the selection of light source and material removal in water jet guided laser processing[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(1): 36-45.
- Wang L Z, Zhao W Q, Mei X S, et al. Improving quality and machining efficiency of hole during AlN trepanning with nanosecond pulse laser[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(15): 24018-24028.
- Diboine J, Martin R, Bruckert F, et al. Towards near-net shape micro-machining of aerospace materials by means of a water jet-guided laser beam[EB/OL]. (2017-06-26) [2021-10-20]. https://www.wlt.de/lim/Proceedings2017/Data/PDF/Contribution169_final.pdf.

Experimental Research on Waterjet-Guided Laser Processing of Microholes in Single Crystal Ni-Based Superalloys

Wang Shunshan^{1,2,3}, Qiao Hongchao^{1,2*}, Cao Zhihe^{1,2}, Liang Jinsheng^{1,2,3},
Han Dongyu^{1,2}, Zhao Jibin^{1,2}

¹State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang
110016, Liaoning, China;

²Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, Liaoning, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective With the rapid development of the aerospace, ship, power, and energy fields, single-crystal Ni-based superalloys have been widely used in aeroengine and gas turbine components because of their excellent comprehensive performance. This has resulted in an increase in the quality requirements for related microhole structures, which has translated to higher processing technology requirements. Waterjet-guided laser drilling technology, when compared with other traditional microhole processing techniques, such as electrochemical machining, electrical discharge machining, and “dry laser” processing, has the advantages of a large working distance, no thermal damage, neat cutting, and no obvious taper. However, the high specific strength and low thermal conductivity of single-crystal Ni-based superalloys make them prone to defects such as poor microhole surface morphologies and large tapers during processing. Hence, it is crucial to investigate the effects of the processing parameters on the microhole surface morphologies and taper for high-quality machining of superalloy microholes.

Methods This study investigates the mechanism and experimental research of waterjet-guided laser drilling of the single-crystal Ni-based superalloy, DD91. First, the effects of the laser single-pulse energy, scanning speed, feed time, and scanning time on the surface morphologies and tapers of microholes are studied by setting up single-factor experiments. Then, based on the single-step spiral scanning mode [Fig. 2(a)], a multistep spiral scanning mode drilling method [Fig. 2(b)] is proposed to improve the defects of poor microhole surface morphologies and large tapers. In the multistep spiral scanning mode, the coupled energy beam repeatedly scans the innermost circle (circle 1) N times, cut across the material to form a prefabricated hole at the center of the microhole, and then scans the second circle (circle 2) to the outermost circle (circle N) N times with a single-step spiral scanning mode to complete the processing of the filling circle and hence widen the aperture and improve the microhole geometry. Finally, the quality of microhole machining via the single/multistep spiral drilling methods is compared under the appropriate processing parameters. The microhole surface morphologies are observed using optical microscope, the entrance and exit apertures are measured via ultra-depth-of-field microscope, and the corresponding taper is calculated.

Results and Discussions During waterjet-guided laser trepanning on metals, material removal is dominated by laser ablation through mechanisms such as photothermal mechanisms, including material melting, evaporation, and sublimation. The water jet, with its high heat capacity, can provide good heat management as well as clean molten material and debris from the ablation zone (Fig. 3). As the laser single-pulse energy increases, the material removal rate also increases, which enlarges the exit diameters and causes the taper to increase (Fig. 5). A pulse energy that is too low will lead to serious microhole surface morphology damage (Fig. 4). With an increase in scanning speed, the ablation time per unit area decreases, which leads to a worsening of the circularity of the hole (Fig. 7), a decrease in the exit diameter, and an increase in the taper (Fig. 6). As shown in Fig. 9, the entrance diameters of the microholes are all steady at approximately 1025 μm , regardless of how many feeds are applied. The exit diameters increase with an increasing number of feeds and reach a saturation value (approximately 1000 μm) after the feed time is over 6 (Fig. 9). Multiple feeds can improve the circularity of the microhole (Fig. 8). When the scanning time is 1, the microhole taper is smallest, but the dimensional accuracy is low. With an increase in the scanning times, the quality of the microhole deteriorates, the entrance aperture decreases linearly, the exit aperture first decreases and then becomes saturated, and the taper of the microhole first increases and then decreases (Figs. 10 and 11). Based on the above results, the appropriate processing parameters are selected to compare the quality of microhole machining via the single/multistep spiral drilling methods. The surface morphologies and taper of the microhole processed using the multistep spiral drilling method are obviously improved (Fig. 12 and Table 2). This is because a prefabricated hole at the center of the microhole can discharge debris and water from the bottom of the hole, reduce the interference with laser transmission, and improve the surface morphologies and taper of the microhole.

Conclusions The variations in the laser single-pulse energy, scanning speed, feed time, and scanning time on the surface morphologies and taper of microholes using the single spiral drilling method are investigated. A multistep spiral scanning mode drilling method is proposed to improve the defects of poor microhole surface morphologies and large tapers caused by the single-step spiral scanning mode. The quality of microhole machining using the single/multistep spiral drilling methods is compared under appropriate

processing parameters. The experiments indicate that increasing the single-pulse energy and reducing the scanning speed can improve the surface morphology of microholes and reduce the microhole taper. With an increase in the feed times, the surface morphology of the microhole gradually improves, and the microhole taper initially decreases and then saturates. As the number of scanning rounds increases, the surface morphology of microhole gradually deteriorates, and the microhole taper first increases and then decreases. The taper of microholes processed using the multistep spiral method is only 0.29° , which is a 70% reduction compared to that using the single-step spiral method, and the dimensional deviation and roundness are controlled within $20\ \mu\text{m}$.

Key words laser technique; waterjet guided laser; spiral drilling; superalloy; surface morphology; taper