

文章编号: 1001-5078(2026)02-0220-07

· 激光应用技术 ·

飞秒激光制备不锈钢微孔的实验研究

代海龙, 肖强, 张永杰

(西安工业大学 机电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要:与传统加工方式相比飞秒激光具有“冷”加工效应,加工质量高,但在加工直径 200 μm 以下微孔时存在加工深度受限的缺点。针对深微孔难加工问题,通过单因素控制变量法全面研究了飞秒激光功率、填充间距、重复频率、单层进给量和扫描速度对目标直径 100 μm 、深 1 mm 不锈钢微孔质量的影响规律,比较分析了激光环形加工、环形—螺旋线组合加工两种工艺方式下微孔的入口直径、出口直径、锥度,得出了最优加工工艺。结果表明:选择组合方式加工、重复频率 75 kHz、扫描速度 30 mm/s、单层进给量 10 μm 、填充间距 8 μm 、激光功率 24 W 的微孔质量最好,微孔入口直径为 158.38 μm ,出口直径为 69.75 μm ,锥度为 0.04°。

关键词:飞秒激光;环形加工;螺旋线加工

中图分类号: TN249; TG665 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.010

Experimental study on the preparation of microholes in stainless steel using femtosecond laser

DAI Hai-long, XIAO Qiang, ZHANG Yong-jie

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

Abstract: Compared with traditional processing methods, femtosecond laser has a 'cold' processing effect, resulting in high processing quality. However, there is a limitation in processing depth when creating micropores with a diameter of less than 200 μm . To address the difficulties in machining deep micropores, a comprehensive study is conducted using the single-factor variable control method. The effects of femtosecond laser power, fill spacing, repetition frequency, single-layer feed amount, and scanning speed on the quality of stainless steel micropores with a target diameter of 100 μm and depth of 1 mm are systematically investigated. A comparative analysis is performed on the entrance diameter, exit diameter, and taper of micro-holes processed via two techniques: laser annular processing and annular-spiral combined processing, leading to the optimal processing technique. The results show that the highest micro-hole quality is achieved under the combined processing method with parameters set as follows: a repetition frequency of 75 kHz, a scanning speed of 30 mm/s, a single-layer feed amount of 10 μm , a fill spacing of 8 μm , and a laser power of 24 W. The entrance diameter of the micropore is 158.38 μm , the exit diameter is 69.75 μm , and the taper is 0.04°.

Keywords: femtosecond laser; ring machining; spiral machining

1 引言

工业界通常将孔径小于 0.5 mm 的孔定义为微

孔,将孔的长度与直径比值大于 6 的孔加工定义为深孔加工^[1]。直径在 0.3 ~ 0.5 mm 之间的冷却气

基金项目:西安科技局项目(No. 24GXFW0032)资助。

作者简介:代海龙(2000-),男,硕士研究生,主要研究方向为特种加工。E-mail:1196967892@qq.com

通讯作者:肖强(1976-),男,博士,教授,主要研究方向为特种加工。E-mail:175230206@qq.com

收稿日期:2025-05-12

膜孔要求无微裂纹、无重铸层,因此高质量微孔加工一直是技术难点^[2]。传统的机械钻孔、电火花打孔、电化学打孔很难适用于孔径小于 0.5 mm 的微孔加工。飞秒激光具有脉冲持续时间极短、峰值功率极高的特点,与传统加工方式相比飞秒激光具有“冷”加工效应,加工质量高,可加工材料种类广泛,近年来已成为众多学者的研究热点。

西安交通大学张书愿等^[3]用倾斜工件旋转钻孔技术在 Inconel 718 镍基高温合金表面加工出入口孔径为 631.8 μm 、出口孔径为 602.3 μm 的微孔,并得出了随着激光与工件旋转中心线夹角增大微孔锥度也在增大的重要结论。杨薇^[4]采用正交实验法方法分析了激光功率、单层作用时间和进给距离对直径 400 μm 镍基高温合金微孔孔型的影响规律,获得了无微裂纹且孔型较好的加工参数组合。王旭等^[5]实验团队通过控制变量法系统研究了不同激光参数对直径 390 μm 微孔内壁组织的影响,结果表明飞秒激光可制备无重铸层、热影响区小的微孔。江苏大学任云鹏等人^[6]在铝合金表面对目标直径 200 μm 微孔进行了试验研究,发现激光单步旋切技术加工的微孔存在锥度大,孔口形貌差的缺点。随着孔直径的减小,去除材料过程中会产生大量的残渣和碎屑,这些残渣很难排出,限制了微孔深度方向的进一步加工。

飞秒激光环切和旋切技术在加工过程中可去除微孔内部的材料,逐圈逐层的加工方式为加工碎屑的排出提供了逃逸空间。本研究通过单因素控制变量法研究了激光功率、填充间距、重复频率、单层进给量和扫描速度对微孔质量的影响规律,比较分析了激光环形加工和环形—螺旋线组合加工两种工艺方式下微孔的入口直径、出口直径、锥度,确定了更小锥度微孔的最优加工参数组合和工艺方法。

2 实验设备、材料与原理

图 1 为本实验使用的飞秒激光设备,该加工系统配备了高重复率、高脉冲功率 Yb : KGW 飞秒激光器,最高输出功率为 30 W,光斑直径为 13 μm ,重复频率为 50 ~ 1000 kHz,光束波长为 1030 nm。控制系统的加工软件 SCA 可精确的设置工艺参数和激光扫描轨迹。

实验材料选择 06Cr19Ni10,尺寸规格为 30 mm × 70 mm × 1 mm。06Cr19Ni10 的各化学元素含量如表

1 所示。实验前使用 1000 目砂纸对工件表面粗磨,后用 2000 目砂纸精磨,之后将工件放置在含无水乙醇的烧杯里,用超声波清洗机清洗 5 min,去除用砂纸打磨时粘附在材料表面的碎屑。清洗结束将工件置于空气中干燥后即可加工。加工结束后将实验件放置在含无水乙醇的烧杯里,用超声波清洗机清洗 5 min,去除微孔入口、出口和侧壁的附着物。最后置于空气中干燥后封装标记。

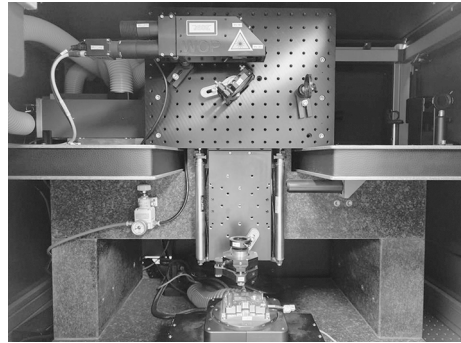


图 1 飞秒激光器

Fig. 1 Femtosecond laser equipment

表 1 06Cr19Ni10 的化学元素含量

Tab. 1 Chemical element content of 06Cr19Ni10

元素	含量/%	元素	含量/%
C	≤0.08	S	≤0.03
Si	≤1	Cr	18 ~ 20
Mn	≤2	Ni	8 ~ 11
P	≤0.045	N	≤0.1

实验原理分别采用环形工艺法和、环形—螺旋线组合法对直径 100 μm 、厚 1 mm 的不锈钢板加工。在进行环形工艺方法加工时,本研究改变了传统实验过程中填充间距为固定值的模式,将其设置为实验变量进行激光加工。光束沿着预设的填充距离由内向外逐圈扫描,直至完成直径为 100 μm 的最外圈加工,之后焦点向下平移指定距离后开始第二层的加工,往复循环直至加工结束,扫描路径如图 2(a)所示。之后实验中将预设的填充距离依次减小,按照上述的扫描方式加工。组合加工方式的扫描路径包含了环形轨迹和螺旋线轨迹,螺旋线由不同半径大小的半圆首尾拼接而成,光束逐圈完成环形轨迹、最后一个螺旋线加工后,再沿着 100 μm 的目标直径红色圆环扫描,由此完成每一层的加工,扫描路径如图 2(b)所示。

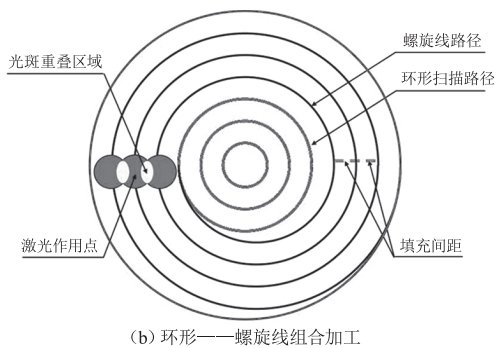
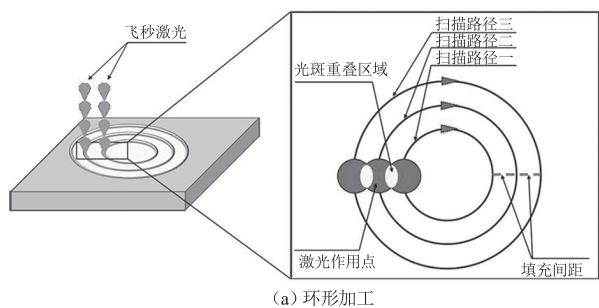


图 2 激光扫描路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser scanning paths

本文通过单因素控制变量法研究了两种工艺方式下激光功率、填充间距、重复频率、单层进给量和扫描速度对微孔质量的影响,通过微孔的入口直径、出口直径和锥度三个指标评价微孔质量。微孔锥度的计算方法^[7]:

$$T_A = \arctan\left(\frac{D_{\text{entrance}} - D_{\text{exit}}}{2T}\right) \quad (1)$$

式中, T_A 为微孔锥度; D_{entrance} 为微孔入口直径; D_{exit} 为微孔出口直径; T 为板材厚度。

3 激光参数对微孔质量的影响

3.1 重复频率对微孔质量的影响

激光重复频率影响着前后相邻两次脉冲激光作用时间。以重复频率为实验变量探究对加工质量的影响,重复频率设置为 50 kHz、100 kHz、200 kHz 和 300 kHz 四个梯度等级,其他工艺参数分别选用扫描速度 30 mm/s;单层进给量 20 μm ;填充间距 9 μm ;激光功率 12 W。不同脉冲重复频率下微孔的出入口形貌如图 3 所示,图 4 是微孔质量与脉冲重复频率的关系图。

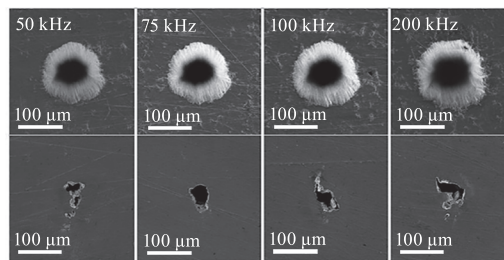
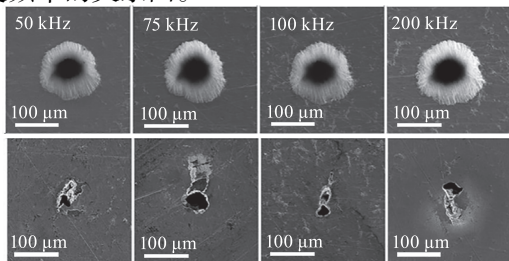
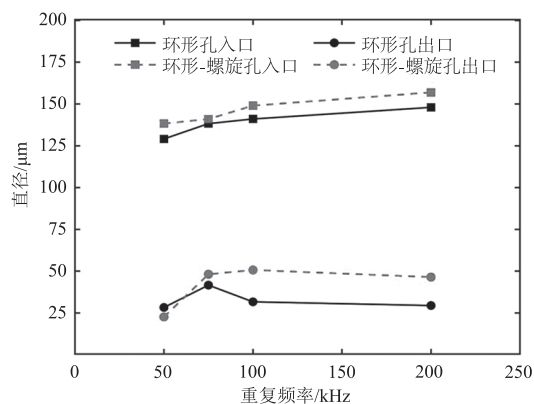
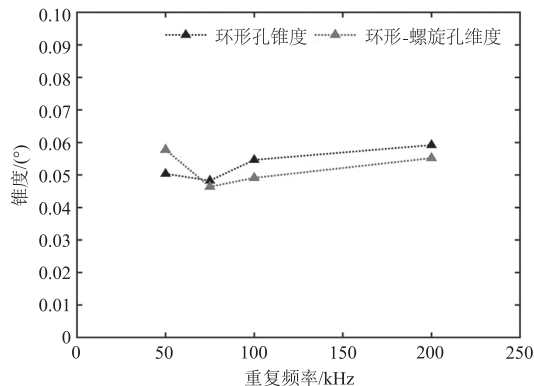


图 3 不同重复频率下微孔的出入口形貌

Fig. 3 Morphology of the entrance and exit of micropores at different repetition frequencies



(a) 孔口直径与重复频率的关系



(b) 锥度与重复频率的关系

图 4 微孔质量与重复频率的关系图

Fig. 4 Relationship between micropore quality and repetition frequency

如图 4(a) 所示,微孔的入口直径随激光重复频率增大而增大,出口直径呈现出先增大后减小的变化趋势。重复频率过小则会导致相同时间内的脉冲数减小,从而激光对材料的作用次数减少,激光重复频率为 50 kHz 时的出入口直径都较小。当重复频率增加至 75 kHz 时,相邻两次的脉冲激光作用时间变短,热量累计效应更加明显,更多的材料达到烧蚀阈值从而被激光去除,此时微孔入口直径为 141 μm ,出口直径达到峰值 48.17 μm ,锥度降低至最小值 0.05 $^\circ$,如图 4(a)、(b) 所示。材料被去除的同时在微孔内部产生了大量的等离子体云,当激光

重复频率由 75 kHz 增大至 100 kHz 时,这些未排出孔内的等离子体吸收了一部分激光能量,到达微孔底部最终只有少部分激光能量,造成出口直径骤然减小的现象,如图 3 所示。激光重复频率对微孔的作用接近饱和,伴随激光重复频率进一步增大,孔口直径只发生微小变化。综合分析得出,在实际加工时激光重复频率应选取在 75 kHz,组合加工法的出口略大,锥度略小。

3.2 扫描速度对微孔质量的影响

扫描速度代表激光束沿着指定运动轨迹在单位时间内移动的距离,对微孔的孔口形貌有明显的影响。以扫描速度为实验变量探究对加工质量的影响,扫描速度划分为 30 mm/s、40 mm/s、50 mm/s 和 60 mm/s 四个水平等级,其他工艺参数分别选用重复频率 75 kHz;单层进给量 20 μm;填充间距 9 μm;激光功率 12 W。不同扫描速度下微孔的出入口形貌如图 5 所示,图 6 是微孔质量与扫描速度的关系图。

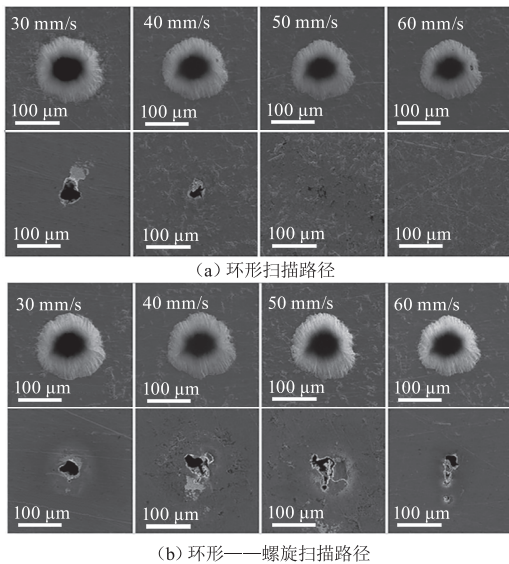
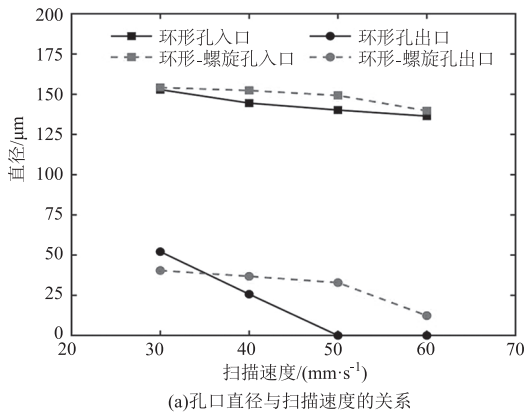


图 5 不同扫描速度下微孔的出入口形貌
Fig. 5 The morphology of the inlet and outlet of micropores at different scanning speeds



(a)孔口直径与扫描速度的关系

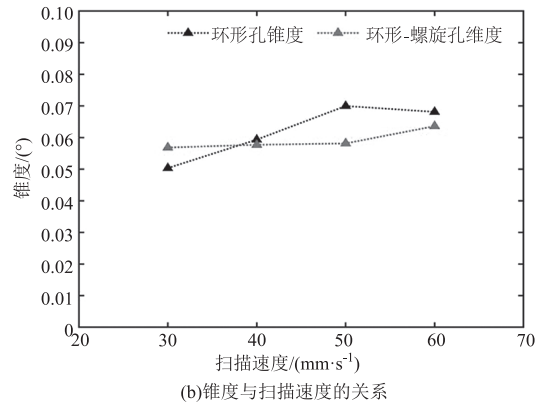


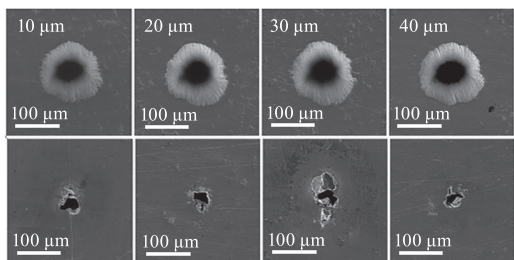
图 6 微孔质量与扫描速度的关系图
Fig. 6 Relationship between micropore quality and scanning speed

从图 6(a)可以看出,两种工艺方法的孔口直径随着扫描速度的增大呈现出降低的趋势。扫描速度由 30 mm/s 增加至 50 mm/s 时,孔口直径表现为线性降低,由 50 mm/s 增加至 60 mm/s 时,孔径骤降。在整个速度区间范围内,微孔入口直径由 153 μm 左右降低至 138 μm 附近,组合工艺法的出口直径由 40.39 μm 降低至 12.39 μm,环形工艺方法的出口直径由 52.12 μm 降低至 25.68 μm,之后激光均未穿透材料形成盲孔。这是因为当扫描速度过大时,激光束在单位时间内移动的距离也就越大,与材料的作用时间则减小,能量还未能有效去除材料时就发生移动,导致材料的去除量降低,最终使得出入口直径均减小。因此在加工时应合理控制扫描速度的大小,但同时扫描速度不能过低,否则会影响加工效率。综合分析得出,在实际加工时扫描速度应为 30 mm/s,环形加工法的出口直径更大,锥度更小。

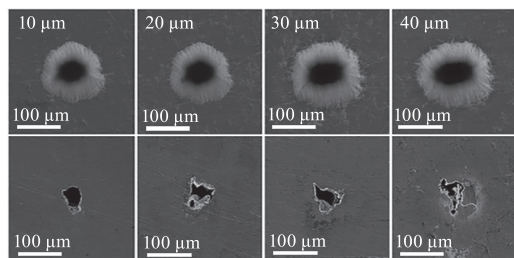
3.3 单层进给距离对微孔质量的影响

单层进给距离是指光束结束上一层材料的加工即将加工下一层材料时,激光焦点向下平移的距离。以单层进给距离为实验变量探究对加工质量的影响,进给量划分为 10 μm、20 μm、30 μm 和 40 μm 四个水平等级,其他工艺参数分别选用重复频率 75 kHz;扫描速度 30 mm/s;填充间距 9 μm;激光功率 12 W。不同进给距离下微孔的出入口形貌如图 7 所示,图 8 是微孔质量与进给量的关系图。

从图 7(a)可以发现,随着进给距离的逐渐增大,微孔的入口直径也在变大,出口直径在逐渐减小。在设置的进给距离范围内,两种方法的出口直径大约一致。当进给距离 ≥ 30 μm 后,入口直径有了



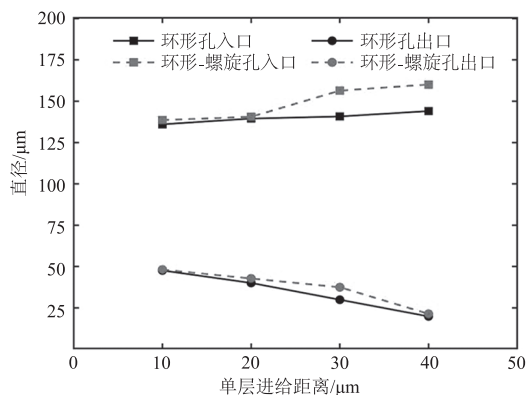
(a) 环形扫描路径



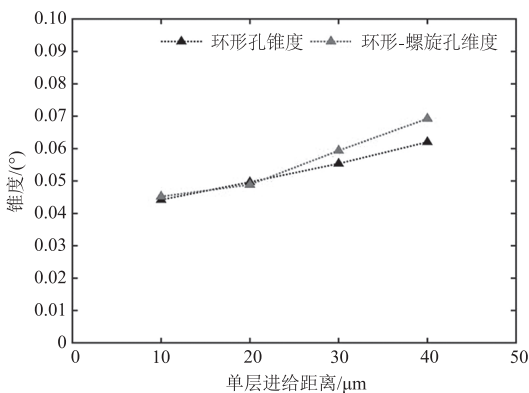
(b) 环形—螺旋扫描路径

图7 不同进给距离下微孔的出入口形貌

Fig. 7 Morphology of the entrance and exit of micropores at different feed distances



(a) 孔口直径与单层进给距离的关系



(b) 锥度与单层进给距离的关系

图8 微孔质量与单层进给距离的关系图

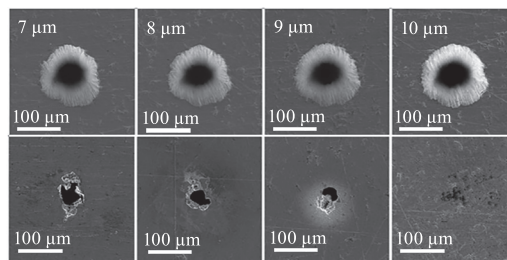
Fig. 8 Relationship between micropore quality and single-layer feeding distance

明显差别,相差约 14 μm。当进给距离过大时,激光结束上一层加工后焦点向下平移的距离也在增大,导致两个加工层之间的材料不能被全面去除。随着加工深度的不断增大,未被去除的材料逐渐在孔内

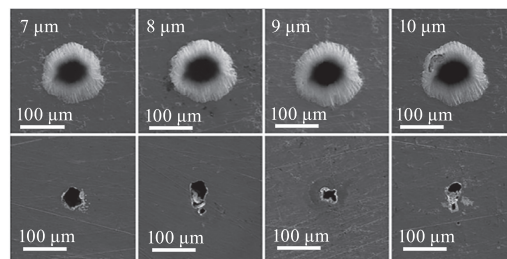
累积并开始产生锥度,导致了激光能量的传播、吸收效率逐渐降低,因此出口直径逐渐减小,微孔的锥度逐渐增大^[8]。分析图 7(b) 可以得出,当进给距离 ≤ 20 μm,微孔的锥度较小。综合分析发现,在实际加工时进给距离应选用 10 μm,两种工艺方法的出入口直径、锥度无明显区别。

3.4 填充间距对微孔质量的影响

在进行激光加工时,相邻两个扫描路径之间的距离称为激光填充间距。以填充间距为实验变量探究对加工质量的影响,填充间距设置为 7 μm、8 μm、9 μm 和 10 μm 四个梯度等级,其他工艺参数分别选用重复频率 75 kHz;扫描速度 30 mm/s;单层进给量 10 μm;激光功率 12 W。不同填充间距下微孔的出入口形貌如图 9 所示,图 10 是微孔质量与填充间距的关系图。



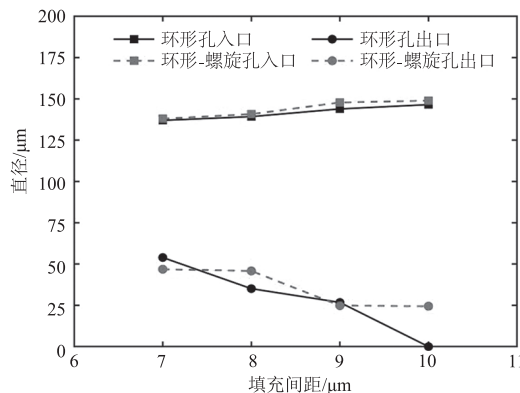
(a) 环形扫描路径



(b) 环形—螺旋扫描路径

图9 不同填充间距下微孔的出入口形貌

Fig. 9 Morphology of micro-pore entrances and exits under different filling spacings



(a) 孔口直径与填充间距的关系

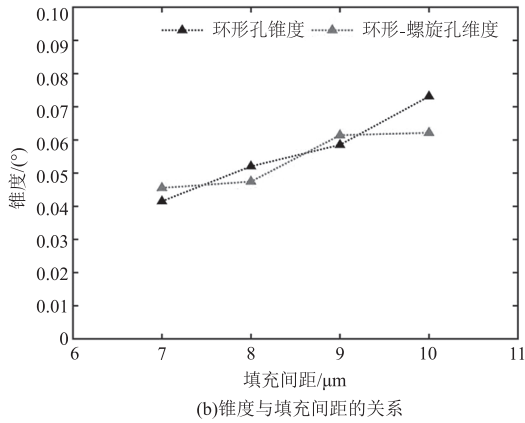


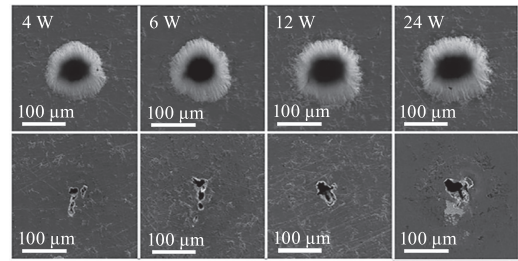
图 10 微孔质量与填充间距的关系图

Fig. 10 Relationship between micropore quality and filling spacing

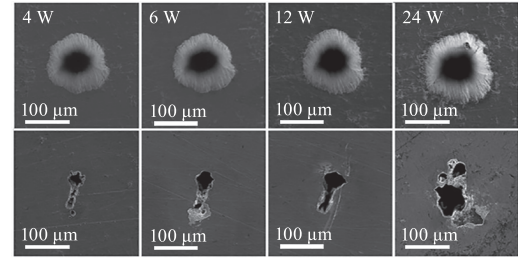
从图 10(a) 可以得出,随着填充间距的逐渐增大,微孔的入口直径也在变大,出口直径在逐渐减小。填充距离由 $7 \mu\text{m}$ 增加至 $10 \mu\text{m}$,两种工艺方法的入口直径基本相同且变化微小,(由 $138 \mu\text{m}$ 增加至 $146.5 \mu\text{m}$)。微孔出口直径变化较大,环形工艺方法的出口直径 $53.93 \mu\text{m}$ (填充间距 = $7 \mu\text{m}$) 减小至 0 (填充间距 = $10 \mu\text{m}$)。当相邻两个激光束之间的距离即填充间距过大时,则存在未被去除的加工余量,这些剩余材料不仅会阻挡激光能量的传播,还会影响后续加工过程中碎屑的排出,导致加工碎屑重新附着在微孔内壁,使得被削减后的激光能量需要去除更多的材料,因此激光最终未穿透板材。当填充距离为 $9 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m}$ 时,光束恰好在有重叠区域内逐层去除材料,出口直径表现出增大的趋势。当填充距离为 $7 \mu\text{m}$ 时,尽管此时微孔出口形貌最好,锥度最小,但是由于填充距离过小,要达到预设的孔径大小时所需要的加工圈数也就越多,造成激光加工时长增加,降低加工效率。综合分析得出,在实际加工时填充间距应为 $8 \mu\text{m}$,组合加工法的出口形貌好、圆度高,锥度比环形工艺小 0.01° 。

3.5 激光功率对微孔质量的影响

最后探究激光功率对加工质量的影响,激光功率决定了作用在靶材表面的能量大小。如果功率过大,实际加工的微孔直径和理想直径严重偏离,过小则达不到目标直径的大小。将激光功率划分为 4 W 、 6 W 、 12 W 和 24 W 四个水平等级,设置其他加工参数分别为重复频率 75 kHz ;扫描速度 30 mm/s 、单层进给量 $10 \mu\text{m}$;填充间距 $8 \mu\text{m}$ 进行加工。不同激光功率下微孔的出入口形貌如图 11 所示,图 12 是微孔质量与激光功率的关系图。



(a) 环形扫描路径



(b) 环形—螺旋扫描路径

图 11 不同激光功率下微孔的出入口形貌

Fig. 11 Morphology of the entrance and exit of micropores under different laser powers

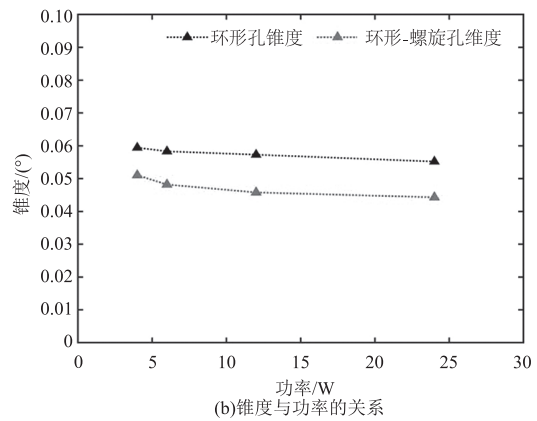
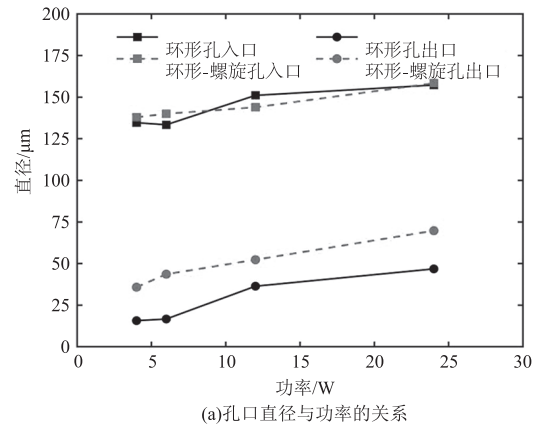


图 12 微孔质量与激光功率的关系图

Fig. 12 Relationship between micropore quality and laser power

从图 12(a) 可以发现,随着激光功率的增大,环形加工和组合加工微孔的出入口直径均增大,出口直径的变化最为显著。环形工艺方法的出口直径由 $15.69 \mu\text{m}$ 增加至 $46.8 \mu\text{m}$,组合工艺方法的出口直径

由 $35.79\ \mu\text{m}$ 增加至 $69.75\ \mu\text{m}$, 出口直径增加约一倍。当激光功率为 $24\ \text{W}$ 时, 微孔出入口直径达到最大值, 分别为 $158.38\ \mu\text{m}$ 和 $69.75\ \mu\text{m}$, 锥度最小为 0.04° , 如图 12(a)、(b) 所示。这是因为在增大激光功率的同时, 整个高斯光束的能量随之增强, 作用在钢材表面的有效激光能量也在逐渐增大, 入口直径的增大让经过反射后到达微孔底部的激光能量更多, 从而使微孔底部更多的材料被去除, 因此出口直径也在增大, 锥度在逐渐减小, 如图 12(b) 所示。综合分析得出, 在实际加工时激光功率应选取 $24\ \text{W}$, 组合加工法的出口直径更大, 锥度比环形工艺降低了 20% 。

4 结论

本文通过单因素控制变量法全面研究了激光功率、填充间距、重复频率、单层进给量和扫描速度对目标直径 $100\ \mu\text{m}$ 微孔质量的影响规律。在增大激光功率的同时, 整个高斯光束的能量也在增强, 作用在钢材表面的有效激光能量随之增多, 微孔的出入口直径也在增大。相对较小的填充距离可以提高相邻两次光束的重叠率, 光束恰好在有重叠区域内逐层去除材料。当填充间距过大时, 则存在未被去除的加工余量, 会阻挡激光能量的传播和后续加工过程中碎屑的排出, 限制了激光加工材料的深度。激光重复频率影响着前后相邻两次的脉冲激光作用时间, 重复频率为 $75\ \text{kHz}$ 的微孔锥度更小。单层进给距离对微孔的锥度影响最大, 过大的进给距离导致两个加工层之间材料不能被彻底烧蚀。激光能量的传播、吸收效率逐渐降低, 微孔锥度明显增大。当扫描速度过大时, 激光束在单位时间内移动的距离也就越大, 与材料的作用时间则减小, 导致材料的去除量降低, 微孔出入口直径均减小。因此在加工时应合理控制扫描速度的大小, 但同时扫描速度不能过低, 否则会影响加工效率。

综合分析得出, 在加工直径 $100\ \mu\text{m}$ 、深 $1\ \text{mm}$ 的不锈钢微孔时, 选择环形——螺旋线组合法加工、激光功率 $24\ \text{W}$ 、填充间距 $8\ \mu\text{m}$ 、重复频率 $75\ \text{kHz}$ 、单层进给量 $10\ \mu\text{m}$ 、扫描速度 $30\ \text{mm/s}$ 的微孔质量最好, 用此参数组合加工的微孔入口直径为 $158.38\ \mu\text{m}$, 出口直径为 $69.75\ \mu\text{m}$, 锥度为 0.04° 。

参考文献:

[1] Yuan B. Research on deep hole machining process of

large forging rotor parts[J]. Mechanical Management and Development, 2024, 39(5): 127 - 129. (in Chinese)

袁斌. 大型锻件转子零件深孔加工工艺研究[J]. 机械管理开发, 2024, 39(5): 127 - 129.

[2] Jiao Y, He B, Li P, et al. Development of micro-holes machining with high-aspect ratio[J]. Aeronautical Science and Technology, 2018, 29(3): 1 - 7. (in Chinese)

焦悦, 贺斌, 李朋, 等. 大深径比微孔加工技术及其发展[J]. 航空科学技术, 2018, 29(3): 1 - 7.

[3] Zhang S Y, Zhou X J, Cui J L, et al. Experimental study on femtosecond laser processing non-taper microholes in nickel-based alloys (cover paper · invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(11): 20240430. (in Chinese)

张书愿, 周熙杰, 崔健磊, 等. 飞秒激光加工镍基合金无锥度微孔试验研究(封面文章·特邀)[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(11): 20240430.

[4] Yang W. Experimental study on femtosecond laser micro hole machining of nickel-based superalloy[J]. Electromachining & Mould, 2021, (4): 56 - 60. (in Chinese)

杨薇. 飞秒激光加工镍基高温合金微孔试验研究[J]. 电加工与模具, 2021, (4): 56 - 60.

[5] Wang X, Zhang Z H, Li L Q, et al. Femtosecond laser precision machining of fuel injection holes in nickel-based superalloys[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(6): 849 - 859. (in Chinese)

王旭, 张子浩, 李俐群, 等. 镍基高温合金喷油孔的飞秒激光精密加工[J]. 光学精密工程, 2023, 31(6): 849 - 859.

[6] Ren Y P, Cheng L, Zhou W F, et al. Femtosecond laser single-step and three-step trepanning drilling technology of aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202020. (in Chinese)

任云鹏, 程力, 周王凡, 等. 铝合金飞秒激光单步法和三步法旋切打孔技术研究[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2202020.

[7] Zhang F Y, Sun S F, Wang X, et al. Optimization of the femtosecond laser trepan drilling strategy on IN792 for improving hole geometrical characteristics and machining efficiency[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(1): 93 - 106.

[8] He X L, Ma G Q, Xiao Q. The experiment research on femtosecond laser machining of film holes on Ni-based superalloys blade [J]. Laser & Infrared, 2022, 52(4): 476 - 482. (in Chinese)

何雪莉, 马国庆, 肖强. 飞秒激光加工镍基高温合金叶片气膜孔的试验研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(4): 476 - 482.