

干气密封动环表面的螺旋槽纳秒激光制备

李文倩^{1,2,3,4} 刘战强^{1,2,4,5*} 赵金富^{1,2,3,4} 王兵^{1,2,3,4} 蔡玉奎^{1,2,3,4}

1. 山东大学机械工程学院, 济南, 250061
2. 山东大学金属成形先进装备与技术国家重点实验室, 济南, 250061
3. 高效清洁机械制造教育部重点实验室, 济南, 250061
4. 国家机械工程实验教学示范中心, 济南, 250061
5. 山东大学机电与信息工程学院, 威海, 264209

摘要: 针对GH4169材质的干气密封动环表面开展了纳秒激光加工螺旋槽工艺的试验研究。利用正交试验和单因素法, 揭示激光功率、扫描速度、填充间距和重复频率对螺旋槽槽深和槽底粗糙度 R_a 的影响规律, 确定合适的激光加工参数组合。结果表明, 对GH4169合金表面螺旋槽深度影响最大的是激光功率, 其次为重复频率以及扫描速度, 对槽底粗糙度影响最大的是扫描速度, 其次为重复频率和填充间距。采用激光功率18 W、扫描速度40 mm/s、填充间距0.005 mm、重复频率50 kHz时, 加工后动环表面螺旋槽能够满足槽深7 μm 、槽底粗糙度 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$ 的加工需求。

关键词: 纳秒激光加工; GH4169合金; 干气密封; 表面螺旋槽; 表面粗糙度

中图分类号: TH162

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Nanosecond Laser Machining of Spiral Grooves of Dry Gas Seal Rotational Ring Surfaces

LI Wenqian^{1,2,3,4} LIU Zhanqiang^{1,2,4,5*} ZHAO Jinfu^{1,2,3,4} WANG Bing^{1,2,3,4} CAI Yukui^{1,2,3,4}

1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, 250061
2. State Key Laboratory of Advanced Equipment and Technology for Metal Forming, Shandong University, Jinan, 250061
3. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Jinan, 250061
4. Key National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Jinan, 250061
5. School of Mechanical, Electrical & Information Engineering, Shandong University, Weihai, Shandong, 264209

Abstract: An experimental study on the nanosecond laser processing of the spiral groove on the dry gas seal rotational ring surfaces made of GH4169 was carried out. Orthogonal tests and one-factor methods were utilized to reveal the effects of laser power, scanning speed, filling spacing and repetition frequency on the spiral groove depth and bottom roughness R_a , and to determine the appropriate combination of laser processing parameters. The results show that the greatest influence on the depth of the spiral grooves on the surfaces of GH4169 alloy is the laser power, followed by the repetition frequency and the scanning speed, and the greatest influence on the roughness of the groove bottoms is the scanning speed, followed by the repetition frequency and the scanning spacing. With the laser power of 18 W, scanning speed of 40 mm/s, fill spacing of 0.005 mm, and repetition frequency of 50 kHz, the spiral grooves on the machined rotational ring surfaces is able to meet the machining requirements of groove depth of 7 μm , and groove bottom roughness of $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$.

Key words: nanosecond laser machining; GH4169 alloy; dry gas seal; surface spiral groove; surface roughness

0 引言

干气密封作为一种典型的非接触式密封,其

特点是在动环表面周向加工动压浅槽,动压槽的槽深一般为5~10 μm ,且槽底表面粗糙度不应超过0.8 μm ,动压槽的槽深与槽底粗糙度对干气密封的摩擦磨损性能和密封性能都有着重要影响^[1]。当前,密封环所工作的环境逐渐向高温、高转速等方向发展,GH4169高温合金以其良好的耐腐蚀性、耐热性及耐磨性,以及能够在极端环境

收稿日期:2024-06-05

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(92360311);国家自然科学基金(52275444,91860207,52205482);山东省重点研发计划(2020CXGC010204);山东省青年自然科学基金(ZR202111150191)

下保持优异的强度和硬度的优点,被应用于高参数工况下干气密封的动环材料。

激光加工技术因成本低、加工简单、过程可控性好、加工效率高等优点而成为最主流的干气密封动压槽加工技术^[2-3]。不同的激光加工参数和加工材料会出现不同的烧蚀情况^[4]。ZHAO等^[5]对镍合金表面微槽单次和多次扫描加工技术进行比较研究,结果表明多次扫描加工可以实现凹槽周边熔融飞溅的自清洁,从而获得高质量的凹槽加工。DOU等^[6]通过试验研究激光功率、扫描速度、重复扫描次数和离焦距离对金刚石表面微槽尺寸的影响,得出了合适的工艺参数。HU等^[7]利用响应面法研究了飞秒激光的功率、扫描速度和离焦量等激光参数及其相互作用对SiC/SiC陶瓷基复合材料表面微沟槽深度、宽度及表面粗糙度的影响,建立了二次回归模型预测微沟槽深度、宽度及表面粗糙度并优化了加工参数。许多学者也对激光加工GH4169材料进行了研究,DHAKER等^[8]研究了激光输入参数对GH4169材料表面孔质量特性的影响,并提出了改善孔圆度和减小孔锥度的最佳激光输入参数值;NAVEED等^[9]对GH4169材料进行了激光加工,通过控制工艺参数来实现预测的材料去除率和表面粗糙度;为了提高GH4169刀具的切削性能,DENKENA等^[10]和AVADHOOT等^[11]使用纳秒光纤激光器在GH4169刀具上加工微结构。

在干气密封动压槽的加工方面,毛文元等^[12-13]研究了纳秒激光加工工艺参数及其相互作用对干气密封常用的碳化硅陶瓷和碳化钨硬质合金材料螺旋槽深度和底部粗糙度的影响,并且构建了一个计算模型,研究了工艺参数对槽深的影响规律,该团队还通过交替条件期望变换法建立了加工参数与碳化硅密封环的槽深和槽底粗糙度的映射关系,得到满足设计目标下的螺旋槽激光加工参数^[14];王衍等^[15]采用超快激光加工技术,以材料气化阈值对应最小激光能量为基准结合有序造型设计方法研究了碳化硅材料表面槽型的加工,该团队还通过数值模拟系统地研究了激光填充间距、光斑直径与槽深、粗糙度之间的关系并建立了激光填充间距、光斑直径两个变量的槽深与粗糙度预测模型,发现光斑直径对槽深基本没有影响^[16]。

纳秒激光器因其重复频率高、稳定可靠且维护简单而被广泛应用于工业生产中干气密封动压槽的加工。激光加工GH4169合金的表面改性研究已取得了一定的进展,但关于纳秒激光在GH4169合金表面加工干气密封动压槽的系统研

究鲜有报道。本文系统研究了纳秒激光的激光功率 P 、填充间距 s 、扫描速度 v 、重复频率 f 等加工参数对GH4169表面动压槽的槽深和槽底表面粗糙度的影响规律,进一步获得了GH4169表面动压槽的较优加工参数组合。

1 试验装置及材料

本文采用的YLP-MP20型纳秒激光设备主要由激光器、扫描振镜、聚焦透镜和计算机控制系统等组成,激光波长为1064 nm,脉冲宽度为120 ns,激光脉冲光斑直径为20 μm 。纳秒激光设备及其工作原理如图1所示。采用外半径 $r_o=24$ mm、内半径 $r_i=16$ mm、厚度12 mm的GH4169密封环。图2所示为GH4169密封环基体组织,表1所示为其材料属性。GH4169密封环动压槽结构和测量位置如图3所示,槽根半径 $r_g=20$ mm,试验完成后采用物镜镜头为50倍的基恩士激光共聚焦显微镜对GH4169密封环动压槽的槽深及槽底形貌和粗糙度进行分析测量,取三次测量平均值以确定动压槽加工质量。为便于视图,本文图中的轮廓高度值均采用绝对值表示。

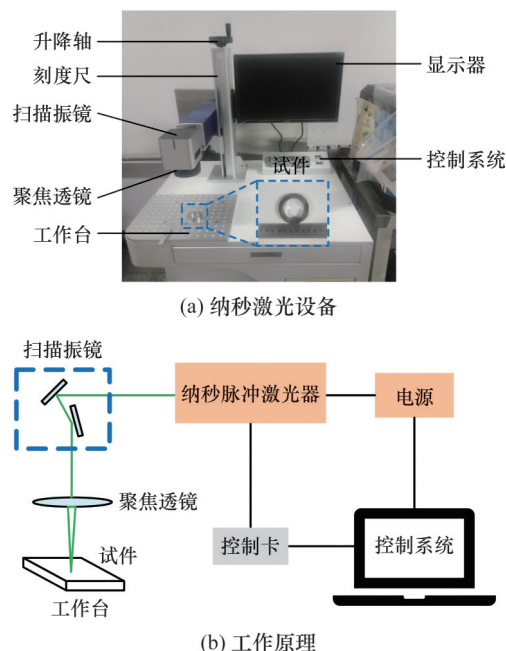


图1 YLP-MP20型纳秒激光设备及其工作原理

Fig.1 YLP-MP20 nanosecond laser equipment and principle of operation

2 动压槽加工试验

为了提高动压槽加工质量,减小加工过程的烧蚀区域,保证动压槽结构完整,首先采用外推法^[17]计算纳秒激光烧蚀GH4169的烧蚀阈值。

峰值能量密度 φ_0 与激光平均功率 P_0 的关

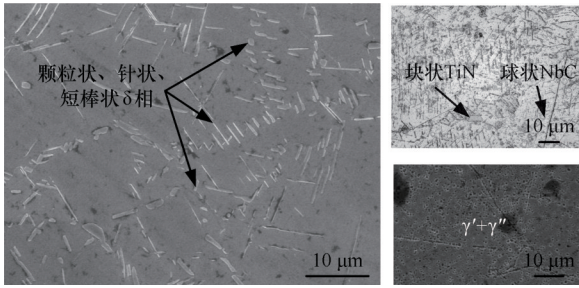


图2 GH4169基体组织

Fig.2 GH4169 matrix organization

表1 GH4169试件材料属性

Tab.1 GH4169 specimen material properties

参数	值
化学成分 (质量分数)/%	Ni: 52.03; Cr: 18.53; Nb: 5.33; Mo: 3.09; Ti: 0.96; Al: 0.58; C: 0.03; Co: 0.01
密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	8.19
硬度	432HBW

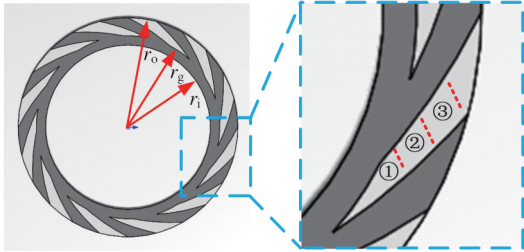


图3 动压槽结构和测量位置

Fig.3 Dynamic pressure groove structure and measurement position

系为

$$\varphi_0 = \frac{2P_0}{f\pi\omega^2} \quad (1)$$

烧蚀阈值 φ_{th} 与烧蚀点激光功率 P_{th} 的关系为

$$\varphi_{th} = \frac{2P_{th}}{f\pi\omega^2} \quad (2)$$

烧蚀区域的直径 D 与烧蚀阈值及能量密度的关系为

$$D^2 = 2\omega^2 \ln P_0 - 2\omega^2 \ln P_{th} \quad (3)$$

式中: ω 为激光束腰半径, mm。

将式(3)作为以 $\ln P_0$ 为变量、以 D^2 为因变量的直线关系式, 可以根据截距 b 计算出烧蚀点激光功率:

$$P_{th} = e^{-\frac{b}{2\omega^2}} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)即可求得材料的烧蚀阈值。

测量不同激光能量下激光烧蚀 GH4169 表面所得孔的直径的平方与脉冲能量对数的关系, 计算出纳秒激光烧蚀 GH4169 的烧蚀阈值为 0.38 J/cm^2 。

研究表明, 烧蚀质量好的表面出现在能量密

度稍高于烧蚀阈值的范围内^[17], 因此可以根据烧蚀阈值选择激光加工工艺参数范围。设计正交试验探究激光功率 P 、重复频率 f 、扫描速度 v 、填充间距 s 等激光加工参数对动压槽的槽深 h_g 和槽底粗糙度 Ra 的影响程度, 进一步选择影响较大的参数设计单因素试验, 对 GH4169 环表面进行加工得到不同加工参数组合的动压槽槽深和槽底粗糙度结果, 得到最佳加工参数组合。

激光扫描方式采用“弓”字形激光扫描, 如图4所示。加工环境为大气氛围, 不使用任何保护气体, 每次试验前后将试件放入无水乙醇中进行超声清洗 10 min。

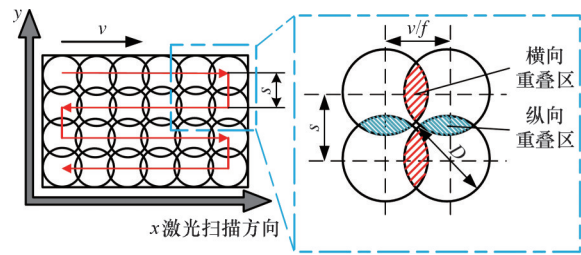


图4 激光加工扫描方式

Fig.4 Laser processing scanning method

3 分析与讨论

3.1 正交试验结果分析

为确定加工参数对动压槽槽深及粗糙度的影响程度, 本文采用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验设计, 对4个因素分别选择3个水平进行正交分析。表2所示为正交试验设计表及各组试验加工的动压槽深度和粗糙度测量结果, 图5所示为正交试验后动压槽的表面形貌及轮廓对照。

表2 正交试验参数及测量结果

Tab.2 Orthogonal test parameters and measurement results

组号	激光功率 P/W	扫描速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	重复频率 f/kHz	填充间距 s/mm	槽深 $h_g/\mu\text{m}$	槽底粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$
1	15	30	50	0.005	5.720	0.915
2	15	40	60	0.01	3.500	0.795
3	15	50	70	0.013	2.430	0.911
4	18	30	60	0.013	6.334	0.791
5	18	40	70	0.005	6.419	0.796
6	18	50	50	0.01	6.426	0.912
7	21	30	70	0.01	10.454	0.740
8	21	40	50	0.013	13.684	1.029
9	21	50	60	0.005	7.413	0.928

对比第1~3组的测量结果和表面形貌发现, 随着纳秒激光加工参数的变化, 动压槽槽深从 $5.72 \mu\text{m}$ 减小到 $2.43 \mu\text{m}$, 槽底粗糙度呈现先减小

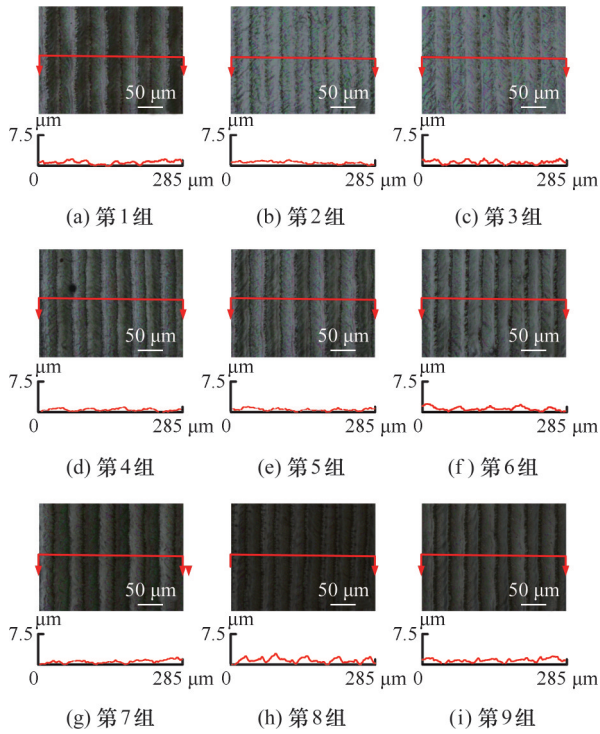


图5 动压槽底表面形貌及轮廓对照

Fig.5 Comparison of the surface morphology and contour of the bottom of the dynamic compression groove

后增大的趋势。对比第1、4、7组的测量结果和表面形貌发现,当激光能量密度和扫描速度相同时,重复频率和填充间距的变化会引起光斑重叠率增大,导致槽深从 $5.72\ \mu\text{m}$ 增大到 $10.454\ \mu\text{m}$,槽底粗糙度在 $0.740\ \mu\text{m}$ 到 $0.915\ \mu\text{m}$ 之间变化,但无法明确对槽底粗糙度的影响规律。第8组的参数组合使激光能量密度达到 $1.34\ \text{J}/\text{cm}^2$,其动压槽深度可达 $13.684\ \mu\text{m}$,超过目标参数 95.49% ,槽底粗糙度可达 $1.029\ \mu\text{m}$,超过目标参数 28.63% 。第3组激光功率小但重复频率大,激光能量密度最小,其动压槽深度值最小为 $2.43\ \mu\text{m}$ 。

为了反映正交试验的结果,采用直观式分析方法获得各因素对槽深和槽底粗糙度的重要程度,如表3和表4所示。表中, T_1 、 T_2 、 T_3 分别表示各影响因素(p 、 v 、 f 、 s) $1\sim 3$ 组、 $4\sim 6$ 组、 $7\sim 9$ 组试验中每因素每水平时槽深、槽底粗糙度的加和值, \bar{T}_1 、 \bar{T}_2 、 \bar{T}_3 分别表示各影响因素在 $1\sim 3$ 组、 $4\sim 6$ 组、 $7\sim 9$ 组试验中每因素每水平时槽深、槽底粗糙度的平均值, R 为极差。

表3和表4表明,各因素对槽深的影响程度从大到小为激光功率 P 、重复频率 f 、扫描速度 v 、填充间距 s ,各因素对槽底粗糙度的影响程度从大到小为扫描速度 v 、重复频率 f 、填充间距 s 、激光功率 P 。激光功率对槽深的影响最大,其次是重复频率 f 和扫描速度 s ,这是因为功率为单位时间内激

表3 槽深的平均值和极差分析

Tab.3 Mean and extreme variance analysis of slot depths

参数	激光功率的重要程度	扫描速度的重要程度	重复频率的重要程度	填充间距的重要程度
T_1	11.650	22.508	25.830	19.552
T_2	19.179	23.603	17.247	20.380
T_3	31.551	16.269	19.303	22.448
\bar{T}_1	3.880	7.503	8.610	6.517
\bar{T}_2	6.393	7.868	5.749	6.793
\bar{T}_3	10.517	5.423	6.434	7.483
R	6.637	2.445	2.861	0.966

表4 槽底粗糙度的平均值和极差分析

Tab.4 Mean and extreme variance analysis of roughness of groove bottom

参数	激光功率的重要程度	扫描速度的重要程度	重复频率的重要程度	填充间距的重要程度
T_1	2.621	2.446	2.856	2.639
T_2	2.499	2.331	2.514	2.447
T_3	2.697	2.751	2.447	2.731
\bar{T}_1	0.874	0.815	0.952	0.880
\bar{T}_2	0.833	0.777	0.838	0.816
\bar{T}_3	0.899	0.917	0.816	0.910
R	0.066	0.140	0.136	0.094

光辐射能量的大小,随着激光功率的增加,激光能量密度增加,目标材料更容易吸收更多的能量,这会加速材料的瞬时蒸发和热位移过程,促使更多的材料被去除,进而槽深增加。扫描速度对槽底粗糙度的影响最大,其次是重复频率,这是因为扫描速度与重复频率共同影响激光光斑间距从而影响光斑重叠率。当光斑重叠率较小时,槽底加工质量较差,随着光斑重叠率的增大,槽底会变得连续和光滑,但过大的光斑重叠率会导致明显的热积累效应,增加热影响区从而降低加工质量^[18],因此需要优选加工参数,以获得较高的动压槽加工质量。

为了明确激光功率、扫描速度、重复频率及填充间距对纳秒激光加工后动压槽加工质量的影响规律,需进一步开展单因素试验研究。

3.2 单因素试验结果分析

3.2.1 激光功率的影响

激光功率决定了单位时间内激光在材料表面辐射能量的大小,为了明确激光功率对GH4169表面动压槽加工质量的影响规律,开展不同激光功率加工动压槽试验,每组试验保持扫描速度 $40\ \text{mm}/\text{s}$ 、填充间距 $0.005\ \text{mm}$ 、重复频率 $50\ \text{kHz}$ 。

图6所示为不同激光功率 P 对槽深 h_g 和槽底粗糙度 R_a 的影响规律。由图6可以看出, h_g 随着

P 的增大呈非线性增长趋势,从 $0.472\ \mu\text{m}$ 增大到 $14.359\ \mu\text{m}$, R_a 在 $P=18\ \text{W}$ 时达到最小值 $0.786\ \mu\text{m}$,之后随着 P 进一步的增大而升高。

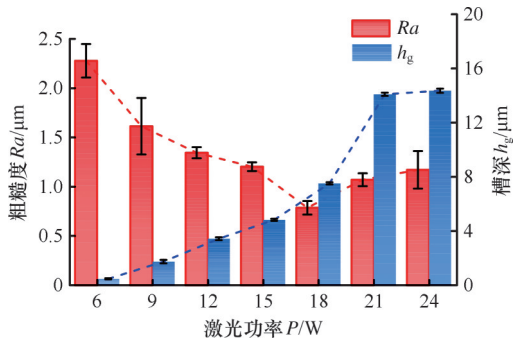


图6 激光功率对槽深和槽底表面粗糙度的影响

Fig.6 Effect of laser power on shallow groove depth and groove bottom surface roughness

图7所示为加工后的槽底形貌,揭示了不同功率下的熔覆机理。如图7a和图7b所示,当功率较低时,激光能量密度仅略高于材料的烧蚀阈值 $0.38\ \text{J}/\text{cm}^2$,导致表面发生轻微烧蚀,形成不规则凹坑和熔融物,槽底表面粗糙度较大,而槽深几乎为零。这与文献[19]中关于激光烧蚀阈值以下的熔体流动现象相一致,即在该功率水平下,激光能量主要用于材料的熔化,而熔化飞溅和相爆炸现象并不明显。随着激光加工功率的继续增大,如图7c和图7d所示,激光的能量密度超过材料的烧蚀阈值,材料获得了更充分的熔化和凝固过程^[20],加工表面逐渐显示出规律的加工轨迹,表面轮廓更加平坦,槽深 h_g 不断增大,槽底粗糙度 R_a 整体呈

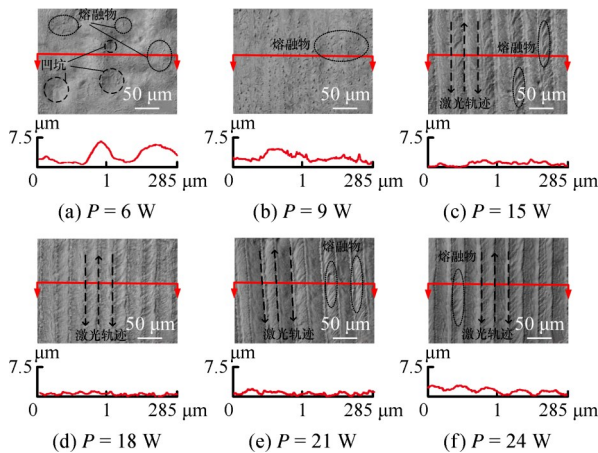


图7 不同激光功率加工后的槽底形貌及轮廓

Fig.7 Morphology and contour of the groove bottom after processing with different laser powers

现减小趋势。当激光功率继续增大时,每个激光脉冲携带的能量大幅增加,材料进一步进入过热状态,马兰戈尼对流效应导致材料表面熔体以混合物的形式无序流出,冷却后在材料表面出现了

大量的材料堆积,造成表面粗糙度增大。因此,为了获得更好的加工表面质量,应选择合适的激光加工功率。过低的功率会导致表面粗糙度过高,过高的功率则会造成材料堆积,降低表面质量。

3.2.2 激光扫描速度的影响

激光的扫描速度决定了激光在材料表面的作用时间,为了明确扫描速度对GH4169表面动压槽加工质量的影响规律,开展不同扫描速度加工动压槽试验,每组试验保持激光功率 $18\ \text{W}$ 、填充间距 $0.005\ \text{mm}$ 、重复频率 $50\ \text{kHz}$ 。

图8所示为不同扫描速度对槽深 h_g 和槽底粗糙度 R_a 的影响规律,槽深随着扫描速度的增大从 $15.013\ \mu\text{m}$ 减小到 $4.421\ \mu\text{m}$,而槽底粗糙度随着扫描速度的增大呈现先减小后增大的趋势。当频率一定时,扫描速度增大意味着每个区域的激光照射时间缩短,同时光斑重叠率减小,这种变化会导致无法给材料足够的时间熔化而快速冷却凝固,进而影响槽深与表面粗糙度。

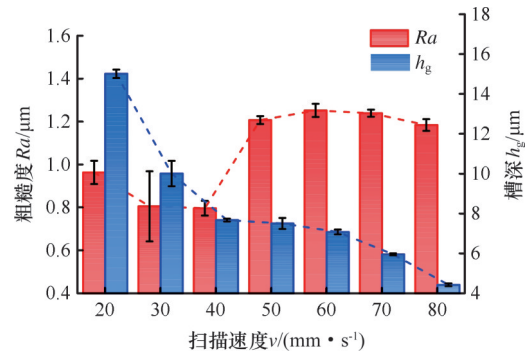


图8 扫描速度对槽深和槽底表面粗糙度的影响

Fig.8 Effect of scanning speed on shallow groove depth and groove bottom surface roughness

图9所示为不同扫描速度加工后的槽底形貌及轮廓。试验结果表明,当扫描速度为 $20\ \text{mm}/\text{s}$ 时,槽深可达 $15.013\ \mu\text{m}$,槽底呈现明显的波浪形状,这是由于较低的扫描速度导致更高的光斑重合率,在烧蚀区积累了更多的激光能量使材料能够更充分地熔化,产生过熔现象^[20],同时更长的激光照射时间允许激光能量更好地渗透到材料深层,导致更大的槽深。当扫描速度为 $40\ \text{mm}/\text{s}$ 时, $h_g=7.669\ \mu\text{m}$, $R_a=0.796\ \mu\text{m}$,图9b表明槽底形成了较为均匀的激光加工轨迹。扫描速度增大可以减小材料去除量、提高加工精度,但过高的扫描速度导致激光在单位时间内照射到工件表面的时间缩短,使得材料表面无法充分熔化,不足的熔融深度和不均匀的熔融导致表面形成不规则的凹凸,从而增加了槽底的粗糙度,如图9c~9f所示。

3.2.3 激光填充间距的影响

填充间距是指两条激光扫描线之间的距离,

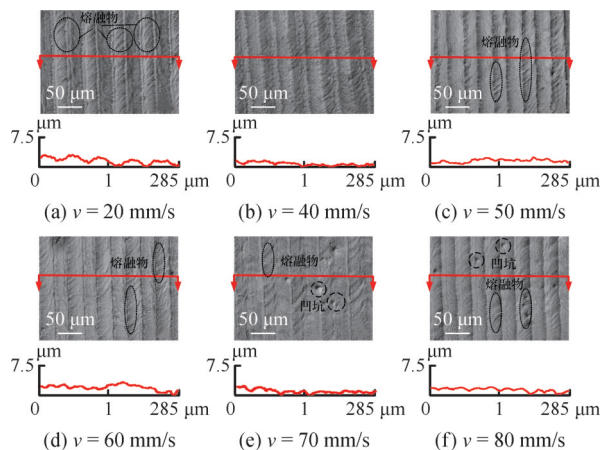


图9 不同扫描速度加工后的槽底形貌及轮廓

Fig.9 Morphology and contour of the groove bottom after machining with different scanning speeds

填充间距影响激光的纵向光斑重叠率,决定了激光在材料表面的作用时间。本文开展不同填充间距加工动槽试验,每组试验保持激光功率18 W、扫描速度40 mm/s、重复频率50 kHz。

图10所示为不同填充间距对槽深 h_g 和槽底表面粗糙度 Ra 的影响规律,图11进一步展示了不同填充间距下槽底的表面形貌和轮廓。由图10可知,随着填充间距的增大,浅槽深度呈下降趋势,从 $8.665 \mu\text{m}$ 减小到 $6.841 \mu\text{m}$,这一现象可解释为填充间距的增大导致纵向光斑重合率降低,激光作用在材料表面的时间缩短,进而导致槽深减小。随着填充间距从0.003 mm增到0.01 mm,槽底粗糙度从 $0.881 \mu\text{m}$ 减小到 $0.792 \mu\text{m}$,在填充间距继续增大后槽底粗糙度从 $0.792 \mu\text{m}$ 增大到 $0.854 \mu\text{m}$ 。该现象可解释如下:当填充间距为0.003 mm时,由于光斑重合率较高,熔融池会受到前一层熔化区域的影响,导致熔融池不稳定和过度熔化,最终影响表面质量。当填充间距为0.005 mm、0.01 mm时,可以较好地消除前一道“扫描线”附近的微谷或微峰^[21],使织构成形更加

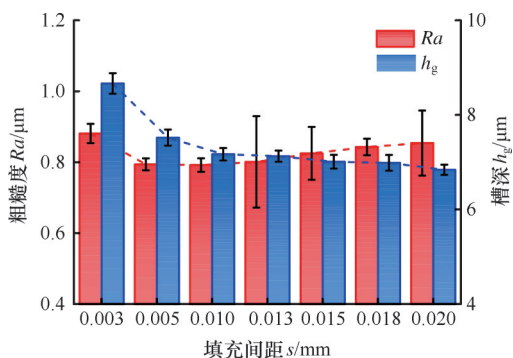


图10 填充间距对槽深和槽底表面粗糙度的影响

Fig.10 Effect of fill spacing on shallow groove depth and groove bottom surface roughness

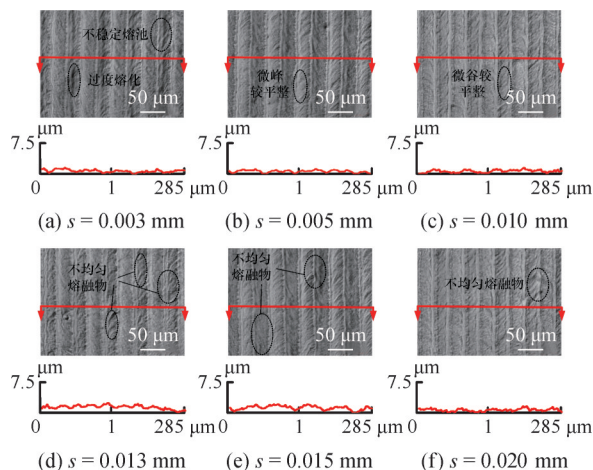


图11 不同填充间距加工后的槽底形貌及轮廓

Fig.11 Bottom shape and contour of the groove after machining with different filler spacing

平滑、粗糙起伏程度更小,得到较好的表面质量和较小的粗糙度。

3.2.4 激光重复频率的影响

重复频率是指单位时间内输出激光的脉冲个数,重复频率会影响激光能量密度与横向光斑重叠率。本文开展不同重复频率加工动压槽试验,每组试验保持激光功率18 W、扫描速度40 mm/s、填充间距0.005 mm。

图12所示为不同重复频率对浅槽深度 h_g 和槽底粗糙度 Ra 的影响规律,图13为不同重复频率加工后的槽底形貌及轮廓图。结果表明,随着重复频率的提高,槽深从 $17.38 \mu\text{m}$ 减小到 $4.821 \mu\text{m}$,槽底粗糙度随着重复频率的提高呈现先增大后减小的趋势,并在 $f=50 \text{ kHz}$ 时达到最小值 $0.782 \mu\text{m}$ 。重复频率较低时,槽底表面分布有大量不规则凹坑,这是因为激光能量密度较大而光斑横向重叠率小,烧蚀区热量分布不均导致熔融池的形成不稳定。此外,两次激光照射之间较长的冷却时间使得熔融池在不同照射周期内的形状和大小变化较大,导致熔融不充分,增加了表面的不均匀性和粗糙度,如图13a和图13b所示。随着重复频率的提高,槽底加工质量逐渐改善,这是因为当两次脉冲之间的时间缩短时,熔融金属的喷射时间以及激光加工过程中的冷却时间被缩短,形成的“扫描线”逐渐平滑^[22],从而使沟槽底部更平滑,起伏更小,形状更好。然而,当重复频率达到70 kHz时,粗糙度开始缓慢增大,这是因为当重复频率继续提高时,激光与材料相互作用会产生热累积效应,材料没有足够的冷却时间,激光作用在材料表面时材料仍处于熔融状态,激光将熔化的材料打碎成液滴状向外喷射,增大了槽底的表面粗糙度。

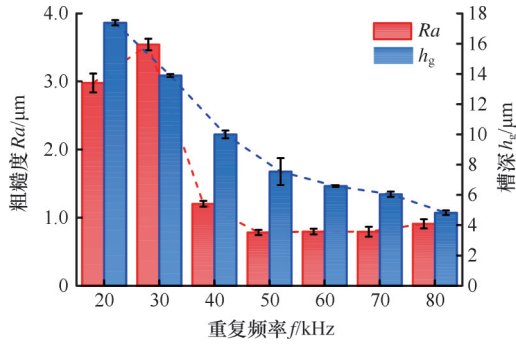


图 12 重复频率对槽深和槽底表面粗糙度的影响

Fig.12 Effect of repetition frequency on shallow groove depth and groove bottom surface roughness

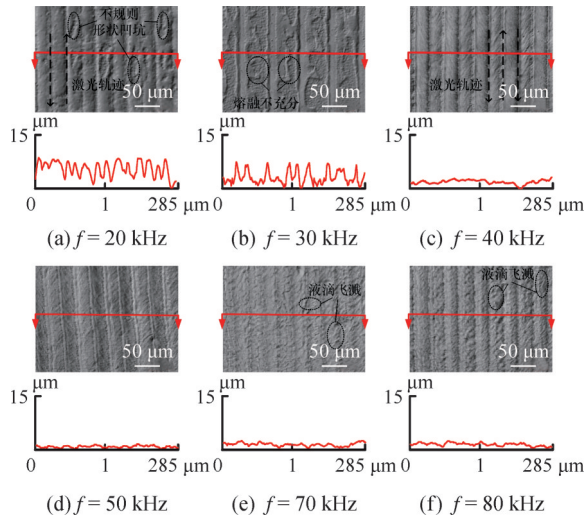


图 13 不同重复频率加工后的槽底形貌及轮廓

Fig.13 Morphology and contour of groove bottom after machining with different repetition frequencies

4 结论

1) 采用光纤纳秒激光器在 GH4169 合金表面加工螺旋槽结构, 研究激光功率、扫描速度、填充间距以及重复频率对加工表面质量的影响规律。各因素对加工质量均有影响, 在所研究的加工参数范围内, 对 GH4169 合金表面动压槽深度影响最大的是激光功率, 其次为重复频率以及扫描速度, 对槽底粗糙度影响最大的是扫描速度, 其次为重复频率和扫描间距。

2) 不同激光加工参数通过改变能量密度和光斑重叠率对 GH4169 合金产生影响, 加工时应优先选择较高的重复频率和较小的填充间距。过低的激光功率和重复频率加工后的槽深较大但同时会降低槽底的表面质量, 过高的扫描速度会造成表面熔融物堆积和不均匀凹坑, 同时影响槽深和槽底粗糙度, 选择合理的加工参数可以提高动压槽的加工质量。

3) 纳秒激光加工功率为 18 W、扫描速度为

40 mm/s、填充间距为 0.005 mm、重复频率为 50 kHz 时, GH4169 合金表面动压槽可以满足槽深 $h_g = 7 \mu\text{m}$ 、槽底粗糙度 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$ 的加工要求。

参考文献:

[1] 毛文元, 宋鹏云, 邓强国, 等. 螺旋槽底表面粗糙度对干气密封性能的影响 [J]. 润滑与密封, 2017, 42 (1): 27-33.

MAO Wenyuan, SONG Pengyun, DENG Qiangguo, et al. Influence of Surface Roughness of Spiral Groove Bottom on Dry Gas Sealing Performance [J]. Lubrication and Sealing, 2017, 42 (1): 27-33.

[2] MAO Bo, SIDDAIAH A, LIAO Yiliang, et al. Laser Surface Texturing and Related Techniques for Enhancing Tribological Performance of Engineering Materials; a Review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53: 153-173.

[3] 王衍, 于雪梅, 卢龙, 等. 非接触式机械密封表面开槽技术研究现状 [J]. 液压气动与密封, 2016, 36 (11): 1-6.

WANG Yan, YU Xuemei, LU Long, et al. Research Status of Non-contact Mechanical Seal Surface Grooving Technology [J]. Hydraulic Pneumatic and Seal, 2016, 36 (11): 1-6.

[4] MARTÍNEZ S, LAMIKIZ A, UKAR E, et al. Analysis of the Regimes in the Scanner-based Laser Hardening Process [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 90: 72-80.

[5] ZHAO Wanqin, WANG Lingzhi, YU Zhishui, et al. A Processing Technology of Grooves by Picosecond Ultrashort Pulse Laser in Ni Alloy: Enhancing Efficiency and Quality [J]. Optics and Laser Technology, 2019, 111: 214-221.

[6] DOU J, CUI J, FANG X, et al. Theoretical and Experimental Study on Machining Rectangular Microgroove of Diamond by Femtosecond Laser [J]. Integrated Ferroelectrics, 2020, 208 (1): 104-116.

[7] HU Tianrui, YUAN Songmei, WEI Jiayong, et al. Micro-grooves Machining and Optimizing on SiC/SiC Composites by Femtosecond Laser-based on Response Surface Methodology [J]. Ceramics International, 2024, 50 (1PB): 1665-1682.

[8] DHAKER L K, PANDEY K A. Particle Swarm Optimisation of Hole Quality Characteristics in Laser Trepan Drilling of Inconel 718 [J]. Defence Science Journal, 2019, 69(1): 37-45.

[9] NAVEED A, MADIHA R, SALMAN P, et al. Controlling the Material Removal and Roughness of Inconel 718 in Laser Machining [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(10): 1169-1181.

[10] DENKENA B, GROVE T, KRÖDEL A, et al. In-

- creased Performance in High Speed Turning of Inconel 718 by Laser Structuring of Pcbn Tools[J]. Procedia CIRP, 2018, 77:602-605.
- [11] AVADHOOT R, SATISH C. Experimental Investigation on Laser-processed Micro-dimple and Micro-channel Textured Tools during Turning of Inconel 718 Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(5):1-16.
- [12] 毛文元, 宋鹏云, 邓强国, 等. 干气密封螺旋槽的激光加工工艺研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(5): 253-262.
MAO Wenyuan, SONG Pengyun, DENG Qiangguo, et al. Research on Laser Machining Process of Spiral Groove of Dry Gas Seal[J]. Engineering Science and Technology, 2018, 50(5): 253-262.
- [13] 毛文元, 刘小磊, 陈硕, 等. 纳秒激光加工机械密封动压槽的槽深计算及实验验证[J]. 中国激光, 2023, 50(12): 269-276.
MAO Wenyuan, LIU Xiaolei, CHEN Shuo, et al. Calculation and Experimental Validation of Groove Depth for Nanosecond Laser Machining of Dynamic Pressure Grooves in Mechanical Seals[J]. China Laser, 2023, 50(12): 269-276.
- [14] 毛文元, 宋鹏云, 邓强国, 等. 干气密封螺旋槽激光加工工艺的ACE法优化[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(2): 195-202.
MAO Wenyuan, SONG Pengyun, DENG Qiangguo, et al. Optimization of Laser Machining Process of Dry Gas Seal Spiral Groove by ACE Method[J]. Engineering Science and Technology, 2021, 53(2): 195-202.
- [15] 王衍, 王英尧, 肖喻丰, 等. 基于有序造型设计的干气密封超快激光精密加工[J]. 材料导报, 2022, 36(5): 44-52.
WANG Yan, WANG Yingyao, XIAO Yufeng, et al. Ultrafast Laser Precision Machining of Dry Gas Seals Based on Ordered Modeling Design [J]. Materials Guide, 2022, 36(5): 44-52.
- [16] 王衍, 孔康杰, 何一鸣, 等. 干气密封端面型槽可控激光制备的参数模型及实验验证[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(10): 142-150.
WANG Yan, KONG Kangjie, HE Yiming, et al. Parametric Modeling and Experimental Validation of Controlled Laser Preparation of Dry Gas Seal End Face Grooves[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2023, 50(10): 142-150.
- [17] 焦浩文, 陈冰, 罗良, 等. 纳秒激光加工2.5维Cf/SiC复合材料的烧蚀孔洞特征[J]. 中国机械工程, 2020, 31(8): 983-990.
JIAO Haowen, CHEN Bing, LUO Liang, et al. Ablation Hole Characterization of 2.5-Dimensional Cf/SiC Composites Processed by Nanosecond Laser [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(8): 983-990.
- [18] 马桂英, 陈晓晓, 陈涛, 等. 基于双向光斑重叠率调控的耦合激光抛光碳化硅陶瓷的表面质量研究[J]. 中国激光, 2023, 50(16): 186-197.
MA Guiying, CHEN Xiaoxiao, CHEN Tao, et al. Surface Quality of Coupled Laser-polished Silicon Carbide Ceramics Based on Bidirectional Spot Overlap Rate Modulation [J]. China Laser, 2023, 50(16): 186-197.
- [19] 肖蒲庐, 陈观华, 陈宇, 等. 飞秒激光织构钛合金表面形貌及润湿性研究[J]. 中国激光, 2023, 50(16): 175-185.
XIAO Pulu, CHEN Guanhua, CHEN Yu, et al. Femtosecond Laser Structuring of Titanium Alloy Surface Morphology and Wettability [J]. China Laser, 2023, 50(16): 175-185.
- [20] 符永宏, 顾亚励, 康正阳, 等. 硬质合金激光毛化工工艺试验研究[J]. 激光技术, 2016, 40(4): 512-515.
FU Yonghong, GU Yali, KANG Zhengyang, et al. Experimental Study on Laser Burring Process of Cemented Carbide [J]. Laser Technology, 2016, 40(4): 512-515.
- [21] 何婉盈, 姚鹏, 褚东凯, 等. 钛表面微凹凸织构的激光加工及其细胞黏附研究[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 258-272.
HE Wanying, YAO Peng, CHU Dongkai, et al. Laser Processing of Titanium Surface Micro-convex Weave and its Cell Adhesion [J]. China Laser, 2022, 49(10): 258-272.
- [22] 韩源, 马玉平, 王海航, 等. 飞秒激光刻蚀纳米金刚石涂层材料去除率的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 247-255.
HAN Yuan, MA Yuping, WANG Haihang, et al. Femtosecond Laser Etching of Nanodiamond Coating Material Removal Rate [J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2021, 58(11): 247-255.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:李文倩,女,2002年生,硕士研究生。研究方向为长寿命密封表面的设计与加工。E-mail: sduliwenqian@mail.sdu.edu.cn。刘战强(通信作者),男,1969年生,教授、博士研究生导师。研究方向为先进加工理论与装备技术,制造科学与刀具技术,结构表面功能化设计与加工,增减材复合加工工艺与装备,加工过程监控与智能制造。E-mail: melius@sdu.edu.cn。

本文引用格式:

李文倩,刘战强,赵金富,等. 干气密封动环表面的螺旋槽纳秒激光制备[J]. 中国机械工程, 2025, 36(10): 2207-2214.

LI Wenqian, LIU Zhanqiang, ZHAO Jinfu, et al. Nanosecond Laser Machining of Spiral Grooves of Dry Gas Seal Rotational Ring Surfaces [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(10): 2207-2214.