

纳秒激光加工机械密封动压槽的槽深计算及实验验证

毛文元, 刘小磊, 陈硕, 宋鹏云, 许恒杰*

昆明理工大学化学工程学院, 云南 昆明 650500

摘要 为了实现高效、低成本的机械密封动压槽激光精密加工, 基于槽深与激光能量密度和作用时间之间的关系, 构建了一个简单有效的槽深计算模型, 研究了激光功率、重复频率、扫描速度、填充间距和标刻次数等工艺参数对槽深的影响规律, 并进行了实验验证。结果表明: 在所研究的工艺参数取值范围内, 槽深计算结果随变量参数变化的趋势和实验结果呈现良好的一致性, 槽深与各个工艺参数之间具有明确的数学关系, 即槽深与激光功率、标刻次数成正比, 与扫描速度成反比, 与填充间距近似成反比, 且随重复频率的增大, 槽深线性减小。在 5 组工艺参数计算案例中, 槽深的计算结果与实验结果均较为吻合, 槽深最大相对误差不超过 15.07%。

关键词 激光技术; 激光加工; 机械密封; 动压槽; 槽深计算; 工艺参数

中图分类号 TB42 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL221565

1 引言

以干气密封和上游泵送密封为代表的流体动压型机械密封, 其一般利用动环端面上的动压槽所产生的流体动压效应, 在密封环端面间形成一层微米级润滑膜, 从而实现非接触密封^[1-3]。流体动压型机械密封的核心技术在于动压槽的精密加工。为了减缓磨损, 密封环材质通常选用硬度高及耐磨性和强度均较优的碳化硅(SiC)陶瓷或碳化钨(WC)硬质合金, 这导致常规的机械加工法无能为力。已有文献报道采用光刻加工法^[4-6]、电火花加工法^[7]能够实现动压槽加工, 但工序繁琐且加工效率较低。目前动压槽最主流的加工方式是激光加工法^[8-10], 即利用高能密度激光束逐层烧蚀材料以形成动压槽, 但一般仅能将槽深的加工精度控制在微米量级, 而动压槽的常用槽深仅为 5~10 μm , 槽深的微小变化可能引起润滑膜刚度或开启力不足, 易造成密封性能不稳定或密封失效, 即槽深的加工精度对密封性能有显著的影响, 这对槽深的加工精度提出了很高的要求。

目前, 实际工程应用中最常见的槽深控制方法是实验法, 但需要反复实验才能保证实际槽深满足设计要求, 成本高且加工效率较低。为了解决实验法的不足, 研究人员通过理论计算、非参数回归分析、数值模拟等方法开展了槽深预测的相关研究。Gilbert 等^[11]提出了一种基于时间的脉冲激光烧蚀工件表面微观形貌的预测方法, Wang 等^[12]则提出了一种基于一维热传导方程和几何数学的纳秒脉冲激光加工模型, 结果均表明

烧蚀深度预测结果与实验结果吻合, 但所提出的烧蚀深度模型主要是针对单脉冲凹槽或沟槽, 并不适用于动压槽。Zhang 等^[13-14]采用响应曲面法构建了凹槽深度的回归模型, 预测结果与实验结果较为吻合, 但通过多元回归分析获得的槽深模型仅是一个经验回归公式, 物理意义不明确且通用性不足。Marla 等^[15-16]提出纳秒激光烧蚀金属的一维模型, 该模型考虑了气化、相爆炸以及等离子体屏蔽的影响, 烧蚀深度的预测值与低通量下的实验测量值一致。王一飞等^[17]则利用 Comsol 开展了纳秒激光烧蚀钛合金微坑形貌的数值模拟研究, 结果表明, 在烧蚀次数较低时, 仿真结果和实验结果相符, 但数值仿真对计算机的配置要求极高, 且计算成本非常高。近年来, 随着机械密封动压槽激光加工重要性的日益突出, 国内逐渐开展了动压槽激光加工方面的研究^[18-20]。其中, 张珊等^[18-19]开展了 SiC 密封环动压槽激光加工工艺研究, 揭示了不同工艺参数对槽深的影响规律, 但其影响规律均是定性描述, 并未明确槽深与工艺参数之间的数学关系。目前, 关于机械密封动压槽槽深计算及预测等方面的研究成果很少。毛文元等^[21]基于均匀实验法和交替条件期望变换(ACE)法开展了干气密封螺旋槽激光加工的优化研究, 获得了三组达到设计控制目标的优化工艺参数, 所编制的程序可以较为准确地预测不同工艺参数下的槽深, 但需通过合理设计均匀实验方案, 并在此基础上利用 ACE 法构建槽深与工艺参数的变换关系, 操作较为繁琐, 也未能建立槽深与工艺参数的数学模型。

综上所述, 目前国内外研究者尚未提出一种简单

收稿日期: 2022-12-28; 修回日期: 2023-02-19; 录用日期: 2023-03-14; 网络首发日期: 2023-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(52105189)

通信作者: *why_551@126.com

有效的激光加工动压槽槽深计算模型,难以实现高效、低成本的动压槽激光精密加工。本文以机械密封为例,提出一种基于激光能量密度和作用时间的动压槽槽深计算模型,在此基础上,通过计算不同工艺参数下的槽深,并与实验结果进行对比,讨论分析不同工艺参数对槽深的影响,以期机械密封动压槽及其他领域微槽的激光精密加工提供参考。

2 数学模型

2.1 加工原理

图 1 为动压槽图形填充示意图。图形填充参数主要包括填充角度(β)、填充间距(S)及填充方式。其中:填充间距是指相邻两条填充线之间的垂直距离,又称线间距;填充方式可分为单向填充和双向填充(交叉填充),所对应的加工方式分别称为单向加工和双向加工,其中,双向填充的填充角度分别为 β_1 和 β_2 ,填充间距分别为 S_1 和 S_2 。图 2 为动压槽单向加工原理示意图。 X 和 Y 分别为填充方向和扫描方向, x 、 y 分别为 X 、 Y 方向上相邻两个光斑的距离, Δx 、 Δy 分别表示 X 、 Y 方向上相邻两个光斑重叠部分的距离, O 点为加工前激光束起点, A 点为图形填充起点。 $M_i N_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为动压槽填充线,其中, M_i 和 N_i 分别为每次扫描时的标刻起点和标刻终点,线段 AB 、 BC 、 CD 及 DA 为动压槽边界线。

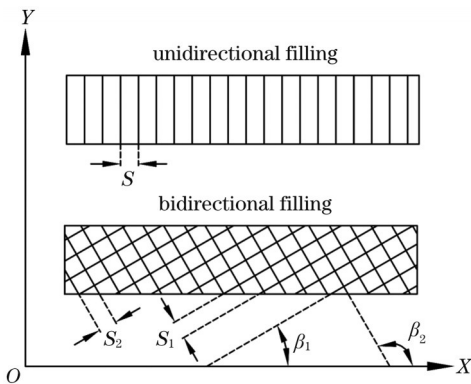


图 1 动压槽图形填充示意图

Fig. 1 Schematic of hydrodynamic groove graphic filling

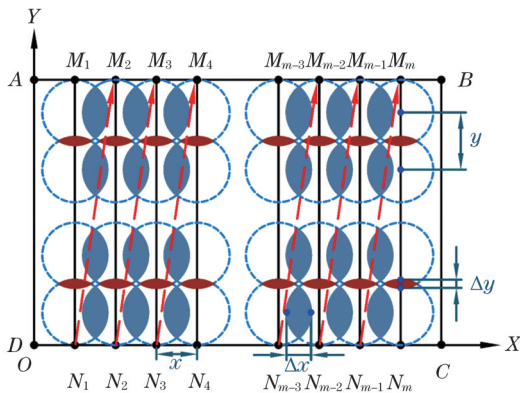


图 2 动压槽单向加工原理示意图

Fig. 2 Schematic of one-way machining principle of hydrodynamic groove

在进行动压槽激光加工时,第 1 次扫描路径和空移路径分别为 $M_1 \rightarrow N_1$ 和 $N_1 \rightarrow M_2$,而第 2 次扫描路径和空移路径分别为 $M_2 \rightarrow N_2$ 和 $N_2 \rightarrow M_3$,并以此类推。每次扫描时,表层材料受高能量密度的激光束辐照而瞬间气化,且 X 和 Y 方向上相邻光斑均有一定重合,因此所有填充线扫描结束后,图形内的材料被去除,形成动压槽槽区。

2.2 槽深数学模型

动压槽槽深加工的深浅取决于材料表面接受的能量,即激光能量密度和作用时间。本质上,调节工艺参数是改变激光能量密度和作用时间,从而使动压槽具有不同的槽深。

激光能量密度(F)与激光功率(P)、重复频率(f)和聚焦光斑半径(r_0)有关,其表达式^[22]为

$$F = \frac{2P}{\pi r_0^2 f} \quad (1)$$

实验研究表明,在较高激光能量密度下,实验槽深(h_{ge})与激光能量密度 F 之间呈线性关系^[23],其线性拟合关系式为

$$h_{ge} = a + b \times \frac{2P}{\pi r_0^2 f} \quad (2)$$

式中: a 和 b 分别为拟合关系式的截距和斜率。

烧蚀阈值是决定激光与材料相互作用的重要参数,也是与激光器本身和材料特性有关的固有参数,通常由实验获得^[24-25]。假定材料刚好气化时的烧蚀功率阈值为 P_{th} ,其对应的烧蚀能量阈值为 F_{th} ,采用外推法^[26-28]将拟合线推至实验槽深 $h_{ge}=0$ 处,即可得到烧蚀功率阈值 P_{th} 和烧蚀能量阈值 F_{th} ,即

$$P_{th} = -\frac{a}{2b} \pi r_0^2 f \quad (3)$$

$$F_{th} = -\frac{a}{b} \quad (4)$$

根据脉冲激光特点可知,在动压槽加工过程中,脉冲激光器会周期性开光和关光,而脉冲激光仅在开光期间作用于材料,材料接收能量而被去除。结合动压槽激光加工原理可知,作用时间(t_{ht})的表达式为

$$t_{ht} = n\tau f \frac{L_{mark}}{v_{scan}} \quad (5)$$

式中: n 为标刻次数; τ 为脉冲宽度; v_{scan} 为扫描速度; L_{mark} 为标刻长度,由填充线长度(L_{fill})和边界线长度($L_{boundary}$)两部分构成,但由于标刻边界线对槽深影响甚微,故标刻长度 $L_{mark} \approx L_{fill}$ 。

由式(5)可知,作用时间与激光功率无关。当激光功率足够引起材料的气化时,槽深正比于所吸收的能量,即在同一激光功率下,作用时间越长,则槽深越大,两者的关系为 $t_{ht} \propto h_{ge}$ 。计算槽深(h_{ge})的表达式为

$$h_{ge} = \frac{t_{ht}}{t_{ht0}} h_{ge0} \quad (6)$$

式中: h_{ge0} 和 t_{ht0} 分别为一组已知工艺参数(重复频率 f_0 、

扫描速度 v_{scan0} 、填充间距 S_0 、标刻次数 n_0 、激光功率 P_0) 下的实验槽深和作用时间, 该组工艺参数下的标刻长度为 L_{mark0} 。

将式(6)中的实验槽深 h_{gc0} 用式(2)代替, 结合式(5)和式(6), 即可得到动压槽槽深计算模型, 其表达式为

$$h_{gc} = \begin{cases} \left(af + b \times \frac{2P}{\pi r_0^2} \right) \times n\tau \times \frac{L_{mark}}{v_{scan}} & , P \geq P_{th} \\ 0, & P < P_{th} \end{cases} \quad (7)$$

上述槽深计算模型中仅有两个未知量: 截距 a 和斜率 b , 可通过实验确定。其余参数中激光功率 P 、重复频率 f 、扫描速度 v_{scan} 、标刻次数 n 、脉冲宽度 τ 、聚焦光斑半径 r_0 均已知, 作用时间 t_{ht0} 可由式(5)计算得到,

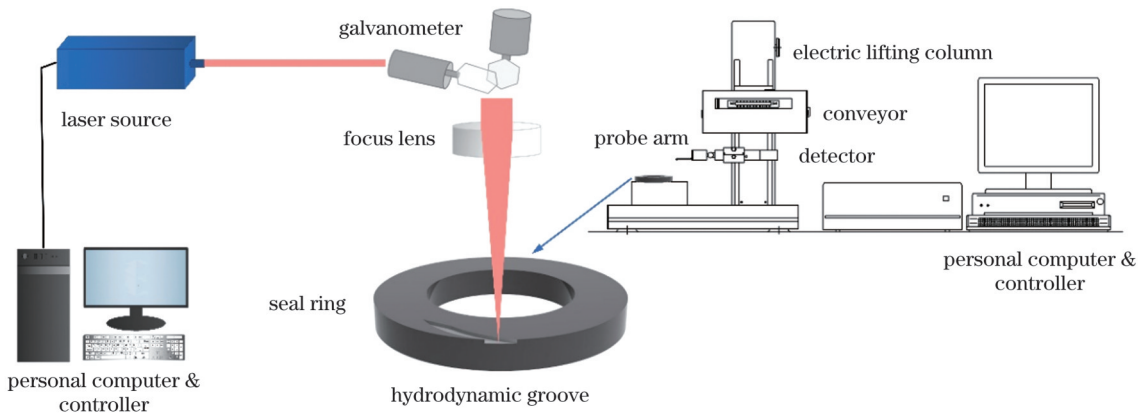


图 3 动压槽激光加工及测量系统示意图

Fig. 3 Schematics of laser processing and measuring system for hydrodynamic groove

3.2 槽深测量方法

图 4 为动压槽槽深测量示意图。测量槽深时, 沿扫描方向随机取 3 个位置进行测量, 获得动压槽的二维表面形貌, 并以密封端面作为基准面, 对槽底测量区域进行数据处理, 以基准面与槽底之间的高度差作为槽深测量值, 取 3 次测量结果的平均值作为动压槽槽深 h_{gc} 。

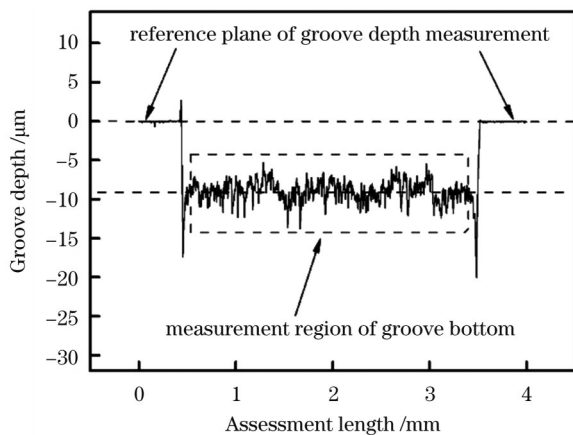


图 4 动压槽槽深测量示意图

Fig. 4 Schematic of hydrodynamic groove depth measurement

而标刻长度 L_{mark} 可根据图形几何参数及填充参数计算得到或直接通过相关软件获取, 且填充间距 S 已隐含在标刻长度 L_{mark} 中。因此, 本文所提出的槽深计算模型涵盖了所有工艺参数并具有明确的物理意义, 可适用于任意工艺参数下动压槽或微槽的槽深计算。

3 实验设计

3.1 实验装置及材料

图 3 为动压槽激光加工及测量系统示意图。该系统使用光纤激光标刻机加工动压槽, 激光参数如下: 波长为 1064 nm, 脉冲宽度为 110 ns, 聚焦光斑半径为 25 μm ; 利用表面粗糙度轮廓形状测定机测量槽深, 测量精度为 0.01 μm 。实验密封环材料为 SiC, 材料表面经过镜面抛光, 粗糙度 $R_a \leq 0.03 \mu\text{m}$ 。

3.3 实验方案

本文均选取 3 mm \times 3 mm 正方形作为动压槽图形, 图形采用单向填充, 填充角度为 90°。首先在重复频率 $f_0 = 30 \text{ kHz}$, 扫描速度 $v_{scan0} = 432.19 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 填充间距 $S_0 = 15 \mu\text{m}$, 标刻次数 $n_0 = 5$, 激光功率为 2.80~17.11 W (激光能量密度为 9.51~58.12 J/cm^2) 下进行实验研究, 各组工艺参数下的作用时间 $t_{ht0} = 4.558412 \times 10^{-3} \text{ s}$, 标刻长度 $L_{mark0} = 597 \text{ mm}$ 。

图 5 为不同激光能量密度下的槽深实验结果。可以看出, 实验槽深与激光能量密度满足线性关系。通过线性拟合得到: 截距 $a = -7.51257$, 斜率 $b = 0.879543$, 拟合线与实验数据散点的拟合优度 $R^2 = 0.99694$, 说明拟合程度非常好, 为动压槽槽深的精确计算奠定了基础。将截距 a 、斜率 b 及作用时间 t_{ht0} 代入到式(7)中即可得到正方形动压槽槽深计算模型。此外, 由式(3)和式(4)可知, 烧蚀功率阈值 $P_{th} = 2.52 \text{ W}$, 烧蚀能量阈值 $F_{th} = 8.56 \text{ J}/\text{cm}^2$ 。

基于正方形动压槽槽深计算模型, 采用控制变量法开展动压槽激光加工的理论 and 实验研究, 分析不同工艺参数对槽深的影响。固定工艺参数如下: 激光功率为 10.72 W, 重复频率为 30 kHz, 扫描速度为 555.18 mm/s ,

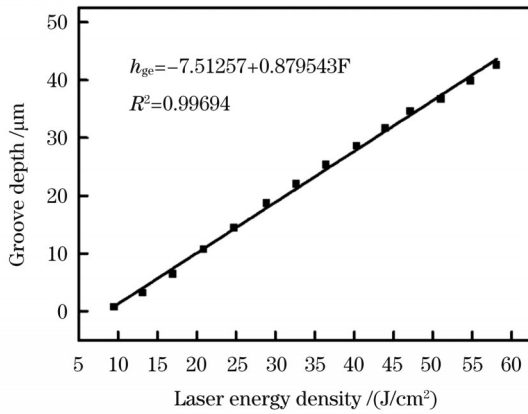


图5 不同激光能量密度下的槽深实验结果

Fig. 5 Experimental results of groove depth at different laser energy densities

标刻次数为2,填充间距为10 μm。各个工艺参数研究范围如下:激光功率为4.99~17.11 W,重复频率为30~60 kHz,扫描速度为86.60~913.39 mm/s,填充间距为2~24 μm,标刻次数为1~10。需说明的是,本文所采用的激光功率和扫描速度均为标定值。

4 结果与分析

为了便于描述动压槽槽深的加工精度,定义槽深相对误差(ϵ),表达式为

$$\epsilon = \frac{|h_{gc} - h_{ge}|}{h_{ge}} \times 100\% \quad (8)$$

4.1 激光功率

激光功率是一个用于调节激光能量密度的参数,也是影响动压槽槽深的一个重要因素。图6为不同激光功率对槽深的影响,可以看出:随着激光功率的增大,计算槽深和实验槽深的变化趋势一致,均线性增加。当激光功率从4.99 W增加到17.11 W时,计算槽深从3.46 μm增加到20.39 μm,实验槽深从3.22 μm增加到19.79 μm。其中,当激光功率在4.99~12.94 W范围内时,计算槽深与实验槽深基本一致。在激光功率大于12.94 W后,实验槽深略低于计算槽深。

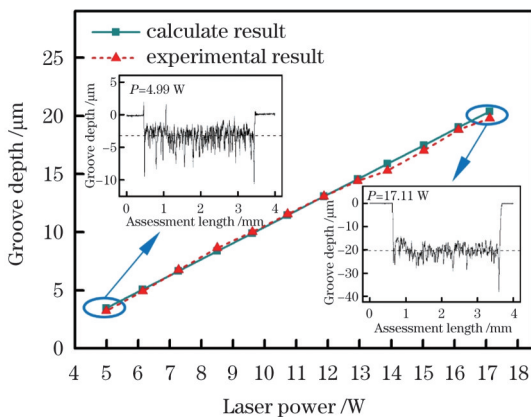


图6 激光功率对槽深的影响

Fig. 6 Influence of laser power on groove depth

对上述现象产生的原因解释如下:槽深的深浅取决于材料表面接受的能量,即槽深与激光能量密度和作用时间有关。当其他工艺参数不变时,随激光功率的增加,激光能量密度线性增大,而激光对材料的作用时间相同,因此槽深也线性增加。在激光功率大于12.94 W后,随着激光功率的进一步增加,烧蚀物质在材料表面形成等离子体羽流,并通过韧致辐射逆过程吸收更多的激光能量,产生等离子体屏蔽效应,进而作用于材料表面的激光能量密度降低,从而材料表面温度降低^[29-30],因此实验槽深略低于计算槽深。

此外,根据槽深计算模型可知,槽深与 $-7.51257 \times f + 1.75909 \times P / (\pi r_0^2)$ 项成正比,当其他工艺参数固定时,则槽深与激光功率 P 呈正比关系。特别需要说明的是,对于不同的材料,槽深与激光能量密度之间并非完全呈线性关系,一些研究也指出槽深与激光能量密度呈对数函数关系^[11,31-32],即槽深与激光能量密度之间有可能呈现出非线性关系。因此,对于不同的材料,必须通过实验重新获取槽深与激光能量密度的拟合表达式,并以此修改槽深计算模型,从而应用于动压槽或微槽的实际加工中。由于槽深与激光能量密度的拟合表达式仅通过有限个实验数据即可获取,因此,对于不同的材料,本文所提出的槽深计算方法均具有较好的操作性和便捷性。此外,对于同一材料,一旦明确槽深与激光能量密度之间的关系,即可计算出不同工艺参数下的槽深,进而为不同目标槽深的动压槽实际加工提供指导。以上分析表明,当其他工艺参数不变时,采用较大的激光功率有利于材料的去除,因此,实际加工时可选择较大的激光功率以提高动压槽的加工效率。

4.2 重复频率

重复频率是单位时间内激光器所发出的脉冲个数。在平均功率恒定的情况下,通过改变重复频率来改变激光的单脉冲能量,进而调节激光的能量密度,因此,重复频率也是另一个影响激光能量密度的参数。图7为不同重复频率对槽深的影响,可以看出,随着重复频率的增加,计算槽深和实验槽深的变化趋势基本一致,槽深均减小。当重复频率从30 kHz增加到60 kHz时,计算槽深从11.46 μm减小至7.95 μm,实验槽深从11.44 μm减小至7.51 μm。其原因在于:当其他工艺参数恒定时,随着重复频率的提高,激光能量密度线性减小,扫描方向上的脉冲数则线性增加,即激光对材料的作用时间会线性增加,但此时对槽深起主导作用的是激光能量密度,激光能量密度的减小使得激光对材料的气化作用减弱,导致槽深变浅。此外,由槽深计算模型可知,槽深只与 $-7.51257 \times f + 1.75909 \times P / (\pi r_0^2)$ 项有关,由于激光功率保持恒定,因此随着重复频率 f 的增大,槽深线性减小。以上研究表明,当其他工艺参数恒定时,降低重复频率有利于增大槽深,从而提高动压槽的加工效率,因此实际加工时可选择较小的重复频率以获得较高的动压槽加工效率。

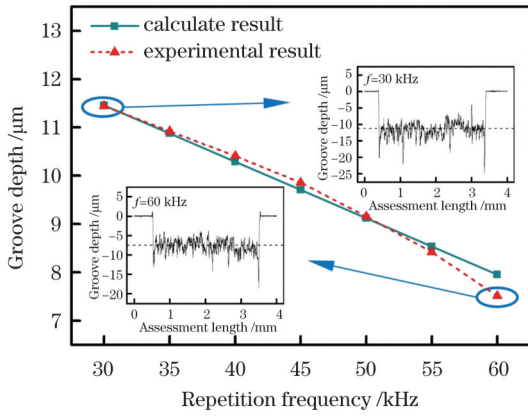


图 7 重复频率对槽深的影响

Fig. 7 Influence of repetition frequency on groove depth

4.3 扫描速度

扫描速度是指单位时间内脉冲激光沿扫描方向的移动距离,是用于调节作用时间的参数。图 8 为不同扫描速度对槽深的影响规律,从整体的变化趋势来看,计算槽深和实验槽深与扫描速度呈反比例关系,均随扫描速度的增加而减小。当扫描速度从 86.60 mm/s 增大到 913.39 mm/s 时,计算槽深从 73.49 μm 减小至 6.97 μm,实验槽深从 73.87 μm 减小至 6.28 μm。这是因为当其他工艺参数固定时,随着扫描速度的增大,激光对材料的作用时间减少,而激光能量密度不变,因此槽深会随着扫描速度的增大而减小。注意到,当扫描速度为 86.60~432.19 mm/s 时,计算槽深均小于实验槽深。其主要原因在于:当扫描速度较小时,扫描方向上光斑的重合率较高,同一材料表面处会经历多个脉冲激光的提前或滞后加热,存在严重的热累积效应,这使得槽深进一步加深,而槽深计算模型未考虑热累积效应的影响,造成计算槽深小于实验槽深。此外,根据槽深计算模型可知,当其他工艺参数恒定时,槽深与扫描速度 v_{scan} 的乘积恒为定值,因此两者呈反比例关系。以上分析表明,采用较低的扫描速度可以获得更强的刻蚀能力,但同时也会导致加工效率降低。因此,在实际加工中,应通过增加激光功率或减小重复频率来增

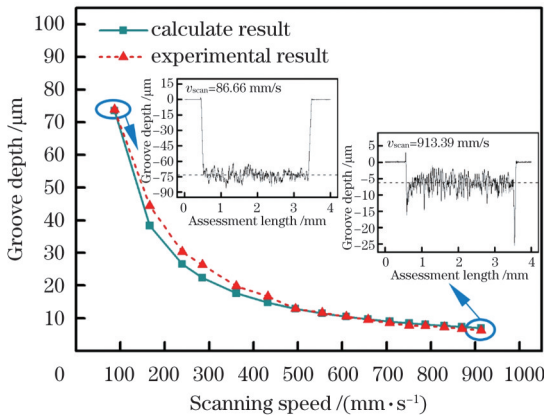


图 8 扫描速度对槽深的影响

Fig. 8 Influence of scanning speed on groove depth

大激光能量密度,同时通过增大扫描速度来提升动压槽的加工效率。

4.4 填充间距

填充间距也是一个影响激光作用材料时间的参数。图 9 为不同填充间距对槽深的影响规律,可以看出,计算槽深和实验槽深与填充间距近似呈反比例关系,均随填充间距的增大而逐渐减小。当填充间距从 2 μm 增加至 24 μm 时,计算槽深从 57.47 μm 减小至 4.75 μm,实验槽深从 53.31 μm 减小至 4.96 μm。其原因在于:当其他工艺参数恒定时,填充间距越大则标刻长度越短,即激光对材料的作用时间越少,而激光能量密度不变,因此槽深会随之减小。

此外,由槽深计算模型可知,槽深与标刻长度 L_{mark} 成正比,其中,标刻长度 $L_{mark} = nW[\text{fix}(L/S)-1]$,其中, L 和 W 分别表示正方形动压槽的长度和宽度, $\text{fix}(L/S)$ 为槽长 L 与填充间距 S 比值的圆整值。当其他参数不变时,标刻长度与填充间距近似呈反比例关系,随填充间距的增大而减小,因此槽深与填充间距 S 近似呈反比例的关系。上述研究表明,采用较小的填充间距有利于增加槽深,但同时会降低加工效率。因此,在实际加工中,应选择较大的激光功率或较小的重复频率以提高激光能量密度,同时增大填充间距,从而提高动压槽的加工效率。

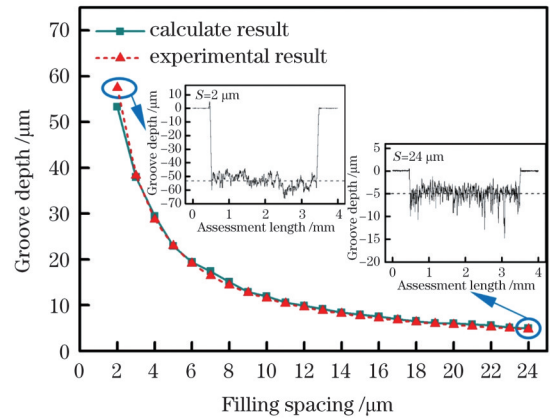


图 9 填充间距对槽深的影响

Fig. 9 Influence of filling space on groove depth

4.5 标刻次数

标刻次数也是调节激光作用材料时间的重要参数。图 10 为不同标刻次数对槽深的影响规律,可以看出,随着标刻次数的增加,计算槽深和实验槽深均线性增大。当标刻次数从 1 增大至 10 时,计算槽深从 5.73 μm 增加到 57.32 μm,实验槽深从 5.90 μm 增加到 58.74 μm。这是因为在同一激光能量密度下,标刻次数的增加使得激光作用材料的时间也增加,而单次标刻时激光作用材料的时间及材料的去除量均保持不变,因此槽深随标刻次数的增加而线性增大。此外,根据槽深计算模型可知,当其他参数固定时,槽深与标刻次数 n 呈正比关系。上述分析表明,当其他工艺参数不变时,采用

多次标刻有利于增加槽深,但由于单次标刻动压槽的加工时间不变,标刻次数越多则加工时间越长,从而动压槽的加工效率降低。因此,在实际加工中可通过增加激光功率或减小重复频率来增大激光能量密度,同时缩减标刻次数以提高动压槽的加工效率。

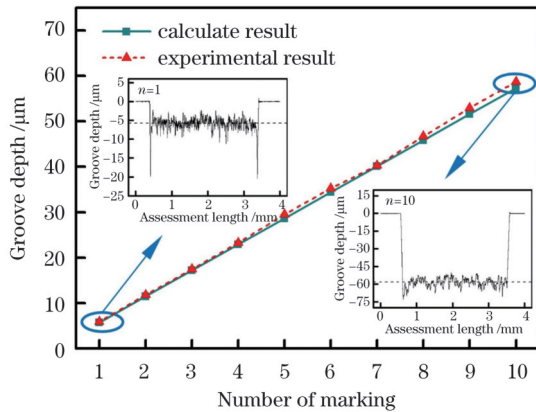


图 10 标刻次数对槽深的影响

Fig. 10 Influence of number of marking on groove depth

通过计算槽深的相对误差可知,在研究工艺参数范围内,在激光功率、重复频率、扫描速度、填充间距及标刻次数对槽深影响的研究中,计算槽深与实验槽深的最大相对误差分别为 7.25%、5.83%、15.07%、7.81%、2.89%,说明本文所提出的槽深计算模型具有较高的计算精度。

5 结 论

通过开展机械密封动压槽槽深的理论和实验研究,分析得到了不同工艺参数对槽深的影响规律,主要结论如下:

1) 在研究工艺参数范围内,基于所构建的槽深计算模型,获得了槽深与各个工艺参数之间确定的数学关系,在不同工艺参数条件下,计算槽深与实验槽深的变化趋势一致且数值相近,槽深最大相对误差不超过 15.07%。

2) 在 5 个工艺参数中,激光功率可以直接调节激光能量密度,当平均功率恒定时,利用重复频率的变化可以实现激光单脉冲能量的改变,进而改变激光能量密度,而扫描速度、填充间距和标刻次数则用于调节作用时间。不同工艺参数对槽深的影响规律实质上可从激光能量密度和作用时间的角度进行揭示,即激光能量密度越高,作用时间越长,则槽深越深。

3) 在实际加工中,可通过增大激光功率、扫描速度和填充间距以及减小重复频率和标刻次数来提高动压槽的加工效率。

4) 对于任意一种材料,所提出的槽深计算方法仅利用有限个实验数据就可确定槽深与激光能量密度的拟合表达式,即可用于不同工艺参数下的槽深计算。因此,该方法适用于不同材料及不同目标槽深下的动

压槽加工,其适用范围广、操作性强,可为各类机械密封动压槽或其他领域微槽的激光精密加工提供理论和工程指导。

参 考 文 献

- [1] 徐奇超, 江锦波, 陈源, 等. 经典曲线型槽干气密封稳动态密封特性数值分析[J]. 摩擦学报, 2018, 38(5): 584-594.
Xu Q C, Jiang J B, Chen Y, et al. Numerical analysis of steady-state and dynamic characteristics of typical molded line groove dry gas seals[J]. Tribology, 2018, 38(5): 584-594.
- [2] Chen Y, Jiang J B, Peng X D. Dynamic characteristics and transient sealing performance analysis of hyperelliptic curve groove dry gas seals[J]. Tribology International, 2017, 116: 217-228.
- [3] Yan R Q, Chen H Q, Zhang W Z, et al. Calculation and verification of flow field in supercritical carbon dioxide dry gas seal based on turbulent adiabatic flow model[J]. Tribology International, 2022, 165: 107275.
- [4] 王玉明, 王强, 吕岩, 等. 高速透平压缩机用螺旋槽端面密封及其系统的研制[J]. 流体工程, 1992, 20(4): 1-6, 65.
Wang Y M, Wang Q, Lü Y, et al. Research and development of a spiral groove face seal and its supporting system used for turbocompressors[J]. Fluid Machinery, 1992, 20(4): 1-6, 65.
- [5] 宋鹏云. 螺旋槽流体动压型机械密封端面间液膜特性研究[D]. 成都: 四川大学, 1999.
Song P Y. The liquid film characteristics of the hydrodynamic mechanical seal with a spiral grooved face[D]. Chengdu: Sichuan University, 1999.
- [6] 宁建华. 光刻技术在流体动力密封研究中的应用[J]. 火箭推进, 2005, 31(4): 41-43.
Ning J H. Application of photoetching to liquid hydrodynamic seal [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005, 31(4): 41-43.
- [7] Chen S L, Hsu Q C. Studies on electric-discharge machining of non-contact seal face grooves[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1/2/3): 363-367.
- [8] Chen Y, Peng X D, Jiang J B, et al. Experimental and theoretical studies of the dynamic behavior of a spiral-groove dry gas seal at high-speeds[J]. Tribology International, 2018, 125: 17-26.
- [9] Jiang J B, Peng X D, Li J Y, et al. A comparative study on the performance of typical types of bionic groove dry gas seal based on bird wing[J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13(2): 324-334.
- [10] Ma X Z, Meng X K, Wang Y M, et al. Suction effect of cavitation in the reverse-spiral-grooved mechanical face seals[J]. Tribology International, 2019, 132: 142-153.
- [11] Gilbert D, Stoesslein M, Axinte D, et al. A time based method for predicting the workpiece surface micro-topography under pulsed laser ablation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 3077-3088.
- [12] Wang Y, Zhang M Y, Dong Y H, et al. Morphology modelling and validation in nanosecond pulsed laser ablation of metallic materials[J]. Precision Engineering, 2023, 79: 34-42.
- [13] Zhang R, Huang C Z, Wang J, et al. Experimental investigation and optimization of femtosecond laser processing parameters of silicon carbide - based on response surface methodology[J]. Ceramics International, 2022, 48(10): 14507-14517.
- [14] Marques A, Cunha A, Faria S, et al. Predictive models on the influence of laser texturing parameters on the Inconel 718 surface by using Nd: YVO₄ laser[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 154: 108320.
- [15] Marla D, Bhandarkar U V, Joshi S S. A model of laser ablation with temperature-dependent material properties, vaporization, phase explosion and plasma shielding[J]. Applied Physics A, 2014, 116(1): 273-285.
- [16] Marla D, Bhandarkar U V, Joshi S S. Modeling nanosecond pulsed laser ablation: a focus on temperature dependence of material properties[J]. Manufacturing Letters, 2014, 2(2): 13-16.

- [17] 王一飞, 虞宙, 李康妹, 等. 纳秒激光烧蚀钛合金微坑形貌的数值模拟分析[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 0802008.
Wang Y F, Yu Z, Li K M, et al. Numerical simulation of micro-pit morphology of titanium alloy ablated by nanosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 0802008.
- [18] 张珊, 温劲苇. SiC 陶瓷密封环端面流体动压槽的激光加工[J]. 应用激光, 2000, 20(4): 175-178, 184.
Zhang S, Wen J W. Study on laser processing technique of SiC ceramic ring seal end surface fluid dynamic grooves[J]. Applied Laser, 2000, 20(4): 175-178, 184.
- [19] 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 W Y, Song P Y, Deng Q G, et al. Research on laser processing technology of spiral groove for dry gas seal[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(5): 253-262.
- [20] 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 Y, Wang Y Y, Xiao Y F, et al. Ultrafast laser precision machining of dry gas seal based on ordered texture design[J]. Materials Reports, 2022, 36(5): 44-52.
- [21] 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 W Y, Song P Y, Deng Q G, et al. Optimization of laser processing technology for dry gas seal spiral groove based on ACE method[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(2): 195-202.
- [22] 林嘉剑, 明瑞, 李学坤, 等. 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的形貌特征研究[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402017.
Lin J J, Ming R, Li X K, et al. Study on morphology characteristics of femtosecond laser-ablated face gear materials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402017.
- [23] Elsieid A M, Dieffenbach P C, Diwakar P K, et al. Nanosecond laser-metal ablation at different ambient conditions[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2018, 143: 26-31.
- [24] Wang Y, Zhang M Y, Huang Y, et al. Ablation threshold modelling and validation of metal Nanosecond laser processing[J]. Optics Communications, 2022, 523: 128608.
- [25] Pecholt B, Vendan M, Dong Y Y, et al. Ultrafast laser micromachining of 3C-SiC thin films for MEMS device fabrication [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(3): 239-250.
- [26] Zheng B X, Jiang G D, Wang W J, et al. Ablation experiment and threshold calculation of titanium alloy irradiated by ultra-fast pulse laser[J]. AIP Advances, 2014, 4(3): 031310.
- [27] Dou H Q, Yao C Z, Liu H, et al. Femtosecond laser ablation of Al-Mg alloy in vacuum and air[J]. Applied Surface Science, 2018, 447: 388-392.
- [28] An H J, Wang J S, Fang F Z. Removal of SiC at atomic and close-to-atomic scale by nanosecond ultraviolet laser[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 158: 108863.
- [29] Vasantgadkar N A, Bhandarkar U V, Joshi S S. A finite element model to predict the ablation depth in pulsed laser ablation[J]. Thin Solid Films, 2010, 519(4): 1421-1430.
- [30] Yan Z X, Mei X S, Wang W J, et al. Numerical simulation on nanosecond laser ablation of titanium considering plasma shield and evaporation-affected surface thermocapillary convection[J]. Optics Communications, 2019, 453: 124384.
- [31] Nolte S, Momma C, Jacobs H, et al. Ablation of metals by ultrashort laser pulses[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1997, 14(10): 2716-2722.
- [32] 李健, 季凌飞, 胡炎, 等. 532 nm 激光铣削 Y-TZP 陶瓷实验研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0806002.
Li J, Ji L F, Hu Y, et al. Experimental study on milling of Y-TZP ceramic by 532 nm laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42 (8): 0806002.

Groove Depth Calculation and Experimental Verification in Nanosecond Laser Machining of Hydrodynamic Grooves of Mechanical Seal

Mao Wenyuan, Liu Xiaolei, Chen Shuo, Song Pengyun, Xu Hengjie*

Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China

Abstract

Objective The core technology of hydrodynamic mechanical seals, represented by a dry gas seal and an upstream pumping mechanical seal, is the precision machining of hydrodynamic grooves. Laser ablation has gradually become the main machining method for hydrodynamic grooves, and the accuracy of the groove depth can generally be controlled on the order of magnitude of microns, while the hydrodynamic groove depth is usually set to 5–10 μm . For hydrodynamic mechanical seals, the insufficient stiffness and opening force may be caused by small variations in the groove depth, leading to instability or failure of the sealing operation. Thus, there is a strict requirement of accuracy for the groove depth and achieving dynamic groove precision machining with high efficiency and at a low cost remains a challenge. Taking hydrodynamic mechanical seals as an example, a novel theoretical calculation model for hydrodynamic groove depth is proposed based on laser energy density and actuation duration in this study. The influence of the process parameters on the groove depth is fully investigated by calculating the groove depth and comparing it with the experimental value, which provides a reference for the laser processing of hydrodynamic grooves of mechanical seals and microgroove processing in other fields.

Methods A novel theoretical calculation model for hydrodynamic groove depth was established based on the relationship among the groove depth, laser energy density, and actuation duration. For a silicon carbide (SiC) sealing ring, a theoretical analysis on the laser machining of square hydrodynamic grooves was carried out by the control variable method. Moreover, an experimental comparison investigation was implemented by employing a fiber laser marking machine and a surface roughness profile shape measuring machine to explore the influence of the process parameters (e. g., laser power, repetition rate, scanning speed, filling spacing, and number of marking) on the hydrodynamic groove depth.

Results and Discussions The depth of the hydrodynamic groove depends on the laser energy intensity acting on the material

surface; that is, the groove depth is related to the laser energy density and actuation duration. According to the theoretical calculation model of the hydrodynamic groove depth, the laser energy density increases as the laser power increases. The groove depth calculation values are in good agreement with the experimental data, and they follow a linearly increasing trend with an increasing laser power value (Fig. 6). The higher the repetition rate, the lower is the laser energy density. The calculated and experimental groove depths decrease as the repetition rate increases and are consistent with each other (Fig. 7). With an increase in the scanning speed, the actuation duration shows a decreasing trend, resulting in both the calculated and experimental values of the groove depth decreasing inversely (Fig. 8). Similarly, the actuation duration decreases as the filling spacing increases, resulting in the calculation and experimental values of the groove depth decreasing. This reduction variation is found to be approximately inverse in proportion to the increase in the filling spacing (Fig. 9). With an increase in the number of markings, the actuation duration increases, and the calculated and experimental values of the groove depth increase linearly (Fig. 10). Within the range of the investigated process parameters, the maximum relative errors between the calculated and experimental groove depths are 7.25%, 5.83%, 15.07%, 7.81%, and 2.89% for the five process parameters of laser power, repetition frequency, scanning speed, filling spacing, and number of marking, respectively, indicating that the groove depth calculation model proposed in this study has a high calculation accuracy.

Conclusions Theoretical and experimental investigations on the hydrodynamic groove depth of mechanical seals were conducted in this study. The influence of the process parameters (e. g. , laser power, repetition rate, scanning speed, filling spacing and number of marking) on the hydrodynamic groove depth were explored and a comparison with the experimental data was done, which indicates that the variation trend in the calculation and experiment results is similar and their values are close to each other, the maximum deviation between both results is 15.07%. Laser power and repetition rate are usually utilized to adjust the laser energy density, and the actuation duration depends on the scanning speed, filling spacing, and number of marking. The law according to which the process parameters affect the hydrodynamic groove depth can be revealed by looking at the laser energy density and actuation duration; that is, the higher the laser energy density, the longer the laser acts on the material, leading to a deeper hydrodynamic groove. During the laser machining process, increasing the laser power, scanning speed, and filling spacing, and lowering the number of marking and repetition rate can effectively contribute to an improvement in the processing efficiency of hydrodynamic grooves. The groove depth calculation method proposed in this study has a high adaptability for hydrodynamic groove depth calculations for different materials and design depths, which provides theoretical and engineering guidance for various types of hydrodynamic grooves of mechanical seals or the laser precision machining of microgrooves in other fields.

Key words laser technique; laser machining; mechanical seal; hydrodynamic groove; groove depth calculation; processing parameters