

纳秒激光加工中脉冲能量对熔体体积的影响

胡璐瑶^a, 金卫凤^b, 黎建麟^a, 房锐^a, 李健^a

(江苏大学 a.材料科学与工程学院 b.机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: **目的** 考察调节激光脉冲能量对纳秒激光加工中熔体体积控制的途径。**方法** 通过纳秒激光加工实验中的微结构火山口相对高度随脉冲能量的变化规律, 来间接反映熔体体积随脉冲能量的变化规律。在 MATLAB 环境下, 通过有限元法基于双温模型模拟, 研究纳秒激光脉冲作用于铝合金材料表面时脉冲能量对熔体体积的影响规律。**结果** 在低能量密度下, 可实现低于 10% 的火山口相对高度, 远低于文献记载的高能量密度下~100% 的火山口相对高度。随着激光脉冲能量的增加, 模拟结果和实验结果都表明熔体体积随能量密度的增加而略有减少, 这与文献模型相悖。**结论** 在较宽的能量范围内, 纳秒激光加工产生的熔体体积随激光脉冲能量密度的变化规律符合 C Körner 等人提出的模型, 表明通过控制激光能量密度能够有效控制纳秒激光加工中的熔体体积。然而, 在较低的能量密度下, 熔体体积随能量密度反常变化规律意味着有其他因素伴随能量密度共同影响熔体体积, 这种影响还有待进一步研究。

关键词: 纳秒激光; 脉冲能量; 熔体体积; 双温模型; 火山口相对高度

中图分类号: V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0048-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.007

Effects of Pulse Energy on Melt Volume in Nanosecond Pulsed Laser Processing

HU Lu-yao^a, JIN Wei-feng^b, LI Jian-lin^a, FANG Rui^a, LI Jian^a

(a.School of Materials Science and Engineering, b.School of Mechanical Engineering,
Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the way of controlling melt volume in nanosecond laser processing by regulating the laser pulse energy. The variation of melt volume with pulse energy was reflected through the variation of the relative height of the microstructure crater in nanosecond laser processing experiment with the pulse energy. In MATLAB environment, the finite element method based on the double temperature model simulation was used to study the effect of pulse energy on the melt volume when the nanosecond laser pulse was applied on the surface of aluminum alloy material. At low energy density, the relative height of the crater below 10% could be achieved, which was much lower than the relative height of the crater of ~100% under high energy density recorded in the literature. At low energy density, with the increase of laser pulse energy, the simulation results and experimental results showed that the melt volume decreased slightly with the increase of energy density, which was contrary to the model in the literature. In the wider energy range, the melt volume produced by nanosecond laser

收稿日期: 2019-03-19; 修订日期: 2019-06-19

Received: 2019-03-19; **Revised:** 2019-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51775248); 江苏省自然科学基金项目 (BK20150477); 江苏大学科研立项项目 (16A017)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775248), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20150477) and the Scientific Research Projects of Jiangsu University (16A017)

作者简介: 胡璐瑶 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: HU Lu-yao (1994—), Female, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 李健 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面工程。邮箱: lijian1949@163.com

Corresponding author: LI Jian (1983—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface engineering. E-mail: lijian1949@163.com

processing conforms to the model proposed by C Körner et al, which shows that the melt volume in nanosecond laser processing can be controlled effectively by controlling the laser energy density. However, the abnormal variation of melt volume with energy density at lower energy density means that there are other factors that accompany this energy density to affect melt volume together, and this effect has yet to be further studied.

KEY WORDS: nanosecond laser; melt volume; two temperature model; pulse energy; relative height of the crater

激光加工在微米尺度结构,如摩擦学领域的表面织构^[1-4]及难加工材料的微孔加工中^[5-8],已得到广泛应用。在这些领域,所制备的表面微结构的形貌及性能对微结构的应用有较大影响,如激光织构中的火山口效应能使所制备的微结构具有特殊的减摩效果^[9-10],微孔加工中的重铸层厚度会影响微孔的应用^[11-13]。理论上,火山口和重铸层的出现都是激光作用于材料表面产生熔体所致^[10-11],因此控制熔体体积是控制火山口和重铸层的最直接途径。

纳秒激光在微结构制备中已得到广泛应用,其短脉冲特性理论上能够有效控制热量在材料内的传导时间,从而控制熔体的产生,然而目前的纳秒激光加工微观结构伴随着明显的火山口效应^[8,10,14]。C Körner 等人^[15]在 1996 年提出,纳秒激光加工模型控制纳秒激光加工中的熔体体积,还需要考虑激光脉冲能量密度的影响。他们认为,在高能量纳秒激光脉冲的作用下,产生更多的熔体体积并发生熔体飞溅,形成火山口;而在低能量脉冲的作用下,熔体体积得到有效控制,熔体厚度在孔壁上分布较均匀,没有熔体飞溅及火山口形貌的产生。然而,到目前为止,还未见与该文献模型预测规律相关的有说服力的实验证据。通过实验证实 Körner 等人^[15]的模型面临着较大困难:对于微小结构而言,由于激光加工过程中熔体飞溅,导致残留于孔壁的熔体厚度与加工中产生的熔体厚度有明显差别,即使采用精确的材料表征手段来间接描述重铸层厚度分布,也难以再现加工时产生的熔体厚度分布。此外,微小结构本身制样困难,制样过程中可能引入重铸层或使重铸层产生变形,使得重铸层厚度的测量结果和激光加工后的重铸层真实厚度有所出入。因此,仅采用实验方法还难以确定能量密度对熔体体积的影响规律,有必要采用数值模拟方法对加工过程进行研究。为了实现对激光加工过程的模拟,通常将长脉冲激光和连续激光加工简化为稳态过程,并采用热传导的模型实现模拟^[16-18],而对于超短脉冲而言,通常采用双温模型来模拟温度分布的实时变化^[19-20]。考虑到 C Körner 等人^[15]所提出的熔体体积随激光能量变化模型的特殊性,借鉴飞秒激光和皮秒激光等短脉冲激光加工中的双温模型,来对纳秒激光进行模拟,更能考虑材料温度的非均匀分布。

本文通过纳秒激光加工铝合金材料实验,研究激光脉冲能量对熔体体积的影响规律,其中熔体体积采用微结构火山口相对高度来间接衡量,并采用双温模

型模拟研究加工过程中纳秒激光脉冲能量对熔体体积的影响规律。基于 MATLAB 模拟结果,进一步分析了纳秒激光加工时熔体体积的可控性。

1 方法

采用纳秒激光在低脉冲能量密度时加工 1060 铝材表面微结构,采用超景深显微镜测量微结构轮廓,考察微结构边缘的火山口相对高度受激光脉冲能量的影响规律。通过基于双温模型的有限元法,模拟了熔融层与固体层的界面和熔融层表面的位置,考察激光脉冲能量密度对界面和表面位置的影响规律。

1.1 微结构制备

采用 Nd:YAG 纳秒激光器(RLA1504-AG/A, Bright solutions Inc, Italy)在 1060 铝板上加工一系列微结构。加工前先对铝板表面进行抛光和纯水超声波清洗处理,干燥后进行试验。实验中,待加工表面放置于振镜的焦点位置,设定激光器电压(激光脉冲能量),在确定的脉冲能量下对样品作用 6 个脉冲,以获取可观测的微结构形貌。实验中所采用的脉冲能量为 0.08、0.114、0.144、0.170、0.195、0.215、0.235 mJ。

1.2 微结构测量

对微结构形貌的测量采用超景深三维显微镜(VHX-1000C, Keyence),测量后在确定的方向上获取微结构轮廓,根据获取的微结构轮廓测量出微结构边缘凸起(火山口)的高度,将测量高度除以微结构深度即获得火山口的相对高度。对不同脉冲能量下所制备的微结构的火山口相对高度进行计算,以考察激光脉冲能量对火山口相对高度的影响规律。

1.3 双温模型

当使用短脉冲激光烧蚀金属时,由于吸收了激光能量,金属温度升高。然而,金属中的晶格热容远高于自由电子热容,所以当电子吸收能量时,温度快速升高,导致电子和晶格温度在初始阶段处于非热平衡状态。双温模型^[21-23]即被用来描述这种激光辐照加热过程,见公式(1)、(2),其中,下标 e 和 l 分别代表电子和晶格, C_e 、 C_l 分别代表电子和晶格的热容, K_e 、 K_l 分别代表电子和晶格的热导率, T_e 、 T_l 分别代表电子和晶格的温度, G 代表电子晶格耦合系数, S 代表

高斯激光脉冲照射下的热源项。 $S(x,t)$ 的表达式见式(3), 其中 α 是吸收深度, x 是距材料表面的深度, t 是时间变量, $\beta=4\ln 2$, R 是表面对激光的反射率 ($R=0.6$), t_p 是脉冲宽度, J 是激光能量密度。当 $T_1 < T_F$ 时 (T_F 为费米温度), 电子热容的表达式为 $C_e=\gamma T_e^{[21]}$, 其中 $\gamma=\pi^2 k_B n_e / (2T_F)$ (n_e 为电子密度, k_B 为玻尔兹曼常数)。

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla (K_e \nabla T_e) - G(T_e - T_1) + S \quad (1)$$

$$C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \nabla (K_1 \nabla T_1) - G(T_e - T_1) \quad (2)$$

$$S(x,t) = \sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \frac{(1-R)J}{t_p \alpha} \exp \left[-\frac{x}{\alpha} - \beta \left(\frac{t-t_p}{t_p} \right)^2 \right] \quad (3)$$

电子导热率公式由式(4)表示^[20]:

$$K_e = \chi \frac{(u_e^2 + 0.16)^{\frac{4}{5}} (u_e^2 + 0.44) u_e}{(u_e^2 + 0.92)^{\frac{1}{2}} (u_e^2 + \eta u_1)} \quad (4)$$

式中 $\mu_e = T_e / T_F$, $\mu_1 = T_1 / T_F$, 参数 χ 和 η 是与材料相关的常数。

1.4 数值方法

短脉冲激光辐照金属材料的双温模型有限元控制方程见式(5)^[24], 其中 $[K_T]$ 为热传导矩阵, \mathbf{T} 表示电子与晶格温度矢量, $\dot{\mathbf{T}}$ 是温度矢量对时间的导数, $[C_p]$ 为热容矩阵, $\{p_1\}$ 表示热流矢量, $\{p_2\}$ 为热源向量。

$$[K_T] \mathbf{T} + [C_p] \dot{\mathbf{T}} = \{p_1\} \{p_2\} \quad (5)$$

研究模型沿着激光入射方向具有对称性, 为简便计算, 可以将计算模型简化为二维有限元模型。根据不同激光能量密度对有限元网格进行划分, 以提升计算效率。电子和晶格温度在不同的激光加热阶段, 其变化也不相同, 所以时间步长 t 的选择不仅要考虑熔池的稳定性, 还应当考虑温度场温度的变化。当温度变化比较慢时, 时间步长可以适当地放大, 以提升计算速率; 当温度的变化速度较快时, 时间步长应适当减小, 以保证精度。有限元模型必须满足时间步长:

$$\Delta t \|\dot{\mathbf{T}}\| \approx \|\mathbf{T}^n - \mathbf{T}^{n-1}\| = \frac{\delta}{c_0} \quad (6)$$

其中, Δt 是时间步长, \mathbf{T}^n 代表 $t+\Delta t$ 矩阵的解向量, C_0 是一个常数, \mathbf{T}^{n-1} 是对应于某一时刻的解向量, 作为此时间积分的初始条件 \mathbf{T}^{n-1} 已知。当 $\|\mathbf{T}^n - \mathbf{T}^{n-1}\|$ 接近 $\frac{\delta}{c_0}$ 时, 时间步长 Δt 和解向量 \mathbf{T}^n 则是可以接受的。

的, 否则将 Δt 缩短, 直到 $\|\mathbf{U}^n - \mathbf{U}^{n-1}\| \leq \frac{\delta}{c_0}$ 。计算模型如图 1 所示。根据计算流程, 通过 MATLAB 进行编程计算。

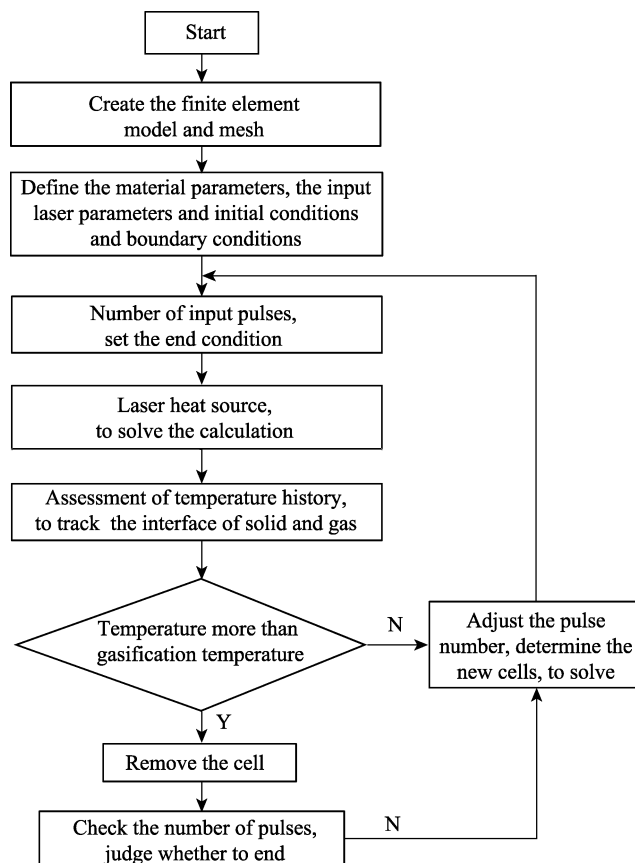


图 1 数值模拟流程图

Fig.1 Flowchart of the numerical simulation

1.5 模拟参数

基于上述理论分析, 采用双温模型研究了不同能量密度和不同脉冲数量对织构轮廓的影响, 材料沿-y轴方向的厚度为 350 μm , 辐照金属为 1060 铝合金, 材料表面采用绝热边界条件, 其他边界的初始温度为 300 K, 有限元网格的最小长度为 0.01 μm , 最大长度为 7 μm , 最小时间步长为 100 fs, 激光光束半径为 50 μm , 激光模式为高斯光束, 具体激光参数见表 1。

表 1 数值模拟计算参数

Tab.1 Calculation parameters of numerical simulation

Parameter	Value
Electronic heat capacity $C_e / (\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	70
Crystal lattice heat capacity $C_l / (\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	3.5×10^6
Electronic thermal conductivity $K_e / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	237
Lattice thermal conductivity $K_l / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	301
Coupling coefficient $G / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	2.2×10^{16}
Absorption depth α / nm	125.6
Pulse width t_p / ns	3
Fermi temperature T_F / K^{-1}	6.42×10^4
Material constant $\chi / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	353
Material constant η	0.16

2 结果和分析

为了考察纳秒激光能量密度对熔体体积的影响规律,开展纳秒激光加工实验。由于在实验中难以直接对熔体厚度进行测量,考虑到火山口产生的根源是激光作用于材料上产生的熔体(意味着熔体厚度越厚,产生的火山口高度越高),如图 2 所示,采用火山口相对高度(h_b/h_c)变化情况来代表熔体厚度变化情况,其中 h_b 为火山口高度, h_c 为微结构深度。采用纳秒激光加工微结构的实验结果如图 3 所示,可以看出,经过脉冲能量控制以后,微结构边缘的火山口效应并不明显(图 3a),这与文献[26]中的实验结果形成鲜明对比(图 3c,微结构边缘具有明显的火山口效应)。从微结构的轮廓中(图 3b)明显可以看出,火山口效应得到很好的控制,火山口相对高度小于 10%,而文献[26]中的较高能量密度下加工的火山口高度与微结构深度处于同一尺度,即火山口相对高度为~100%。因此,通过控制纳秒激光能量密度能实现熔体体积的有效控制。

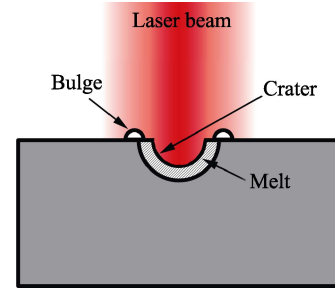
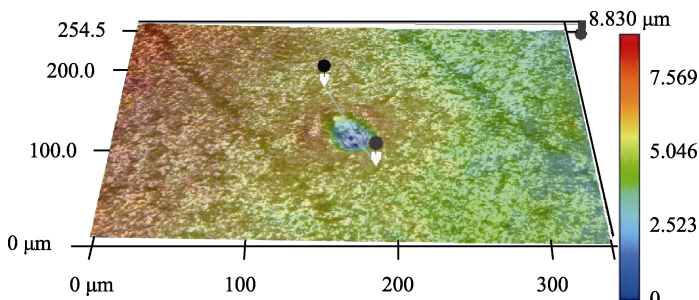
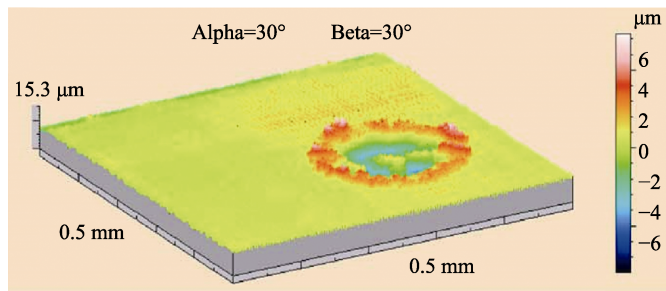


图 2 火山口产生模型
Fig.2 Crater generation model

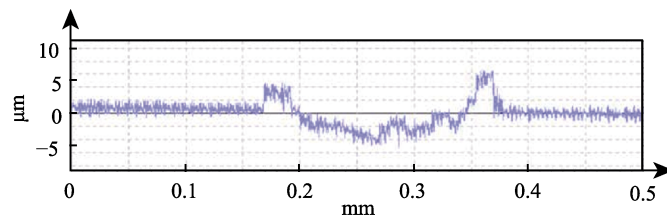
对比本文的实验结果(典型结果如图 3a 所示,脉冲能量为 0.08~0.235 mJ)与文献[26]中的实验结果(典型结果如图 3c 所示,脉冲能量为 6.8 mJ),发现 Körner 等人^[15]所提出的模型能够较好地描述激光脉冲能量密度对熔体厚度的影响。然而,在较低的脉冲能量密度范围,实验结果都表明熔体厚度随能量密度的增大而减小(图 3d),这与 Körner 等人^[15]的模型不一致,可能在能量密度变化过程中还有其他因素对熔体厚度产生影响,仍需要更深入研究。



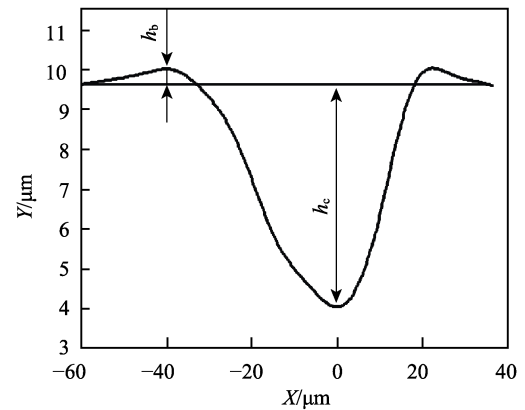
a 采用脉冲能量为 0.08 mJ 的纳秒激光经 6 个脉冲作用后的微结构形貌



b a 图中微结构沿标准线的轮廓



c 文献[26]中通过脉冲能量为 6.8 mJ 的纳秒激光作用 3 脉冲后的微结构形貌



d 火山口相对高度(h_b/h_c)随脉冲能量的变化情况

图 3 纳秒激光加工的微结构边缘火山口形貌

Fig.3 Morphology of the crater around the microcavity processed by nanosecond laser: (a) morphology of the microstructure induced by 6 laser pulses with pulsed energy of 0.08 mJ; (b) profile of the microstructure in (a) along the standard line; (c) morphology of the microstructure induced by 3 laser pulses with pulse energy of 6.8 mJ in the literature^[26]; (d) variation of the relative height of the crater (h_b/h_c) with the pulse energy

为了考察低能量密度下纳秒激光加工所产生的熔体情况,采用双温模型,通过有限元法对纳秒激光加工过程进行了模拟,模拟的熔体厚度分布情况如图4所示。由于模拟中仅考虑熔体厚度的情况,为直观地描述熔体厚度分布,假设前面的脉冲只对材料温度分布有影响而对表面形状没有影响,所以模拟出的微结构只是最后一个脉冲作用的微结构。从模拟结果中可以看出,在激光光斑作用范围内,部分熔体附着在表面,在熔体上形成了特定的微结构。这是由激光与金属材料作用过程决定的。由于激光的作用,金属材料表面产生熔体,激光的持续作用使部分熔体蒸发而逃离表面,而部分熔体残留于表面,所形成的微结构

具有特定的深度分布。这是由激光强度的非均匀分布从而引起熔体蒸发速率非均匀分布所致:在边缘区域,激光光强弱,熔体蒸发速率较慢,所以微结构深度较浅;在中心区域,激光光强较强,蒸发速率快,微结构深度较深。从图4中还可以看出,附着在表面的熔体具有特定的厚度分布。需要注意的是,图4中微结构在半径方向和深度方向的标尺不同,统一标尺后会发现熔体厚度分布变化不大,几种模拟情况下的熔体厚度约为130 nm,这一结果与文献[25]中针对激光抛光过程的模拟结果吻合得较好,说明通过纳秒激光在控制脉冲能量密度的情况下,能够实现熔体厚度的良好控制。

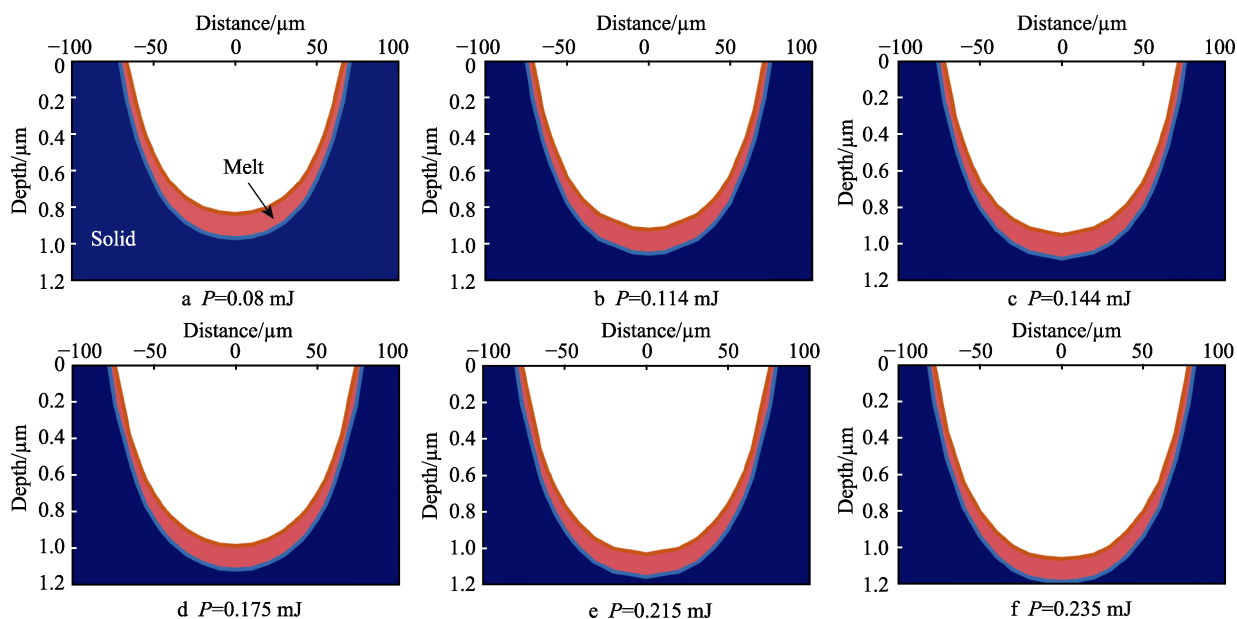


图4 模拟的熔体厚度分布情况
Fig.4 Simulated melt thickness distribution

通过纳秒激光加工实现熔体厚度的控制,有利于对加工过程中熔体流动及飞溅实现有效控制。例如,对于模拟出130 nm左右的熔体厚度,由于加工过程受到熔体厚度的限制,熔体流动需要较大的剪切力驱动($\tau \sim \eta du/dz \sim \eta U/h_m \sim \eta X/(h_m \Delta t)$),其中 η 为熔体黏度, u 为熔体速度分布, U 为表面熔体速度, h_m 为熔体厚度, X 为熔体在表面的分布半径,约为50 μm , Δt 为脉冲持续时间,约为2 ns),因此熔体流动必将受到限制。根据以上分析,限制熔体流动的主要因素包括两方面,一是熔体厚度较薄,二是脉冲加工持续时间短。采用纳秒激光在低能量密度情况下进行加工,一方面缩短了脉冲加工持续时间,另一方面根据C Körner等人^[15]所提出的纳秒激光加工模型,可有效控制熔体厚度。

为进一步考察激光能量密度对熔体体积的影响,考察了模拟中心点位置的熔体厚度随激光脉冲能量的变化情况,如图5所示。可以看出,在所考察的能量范围内,中心点处熔体厚度随激光能量的增加而减

小,但变化非常微弱,这与前述在低能量密度情况下的规律一致(图3d),说明在能量密度变化过程中,其他因素可能对熔体厚度产生影响。

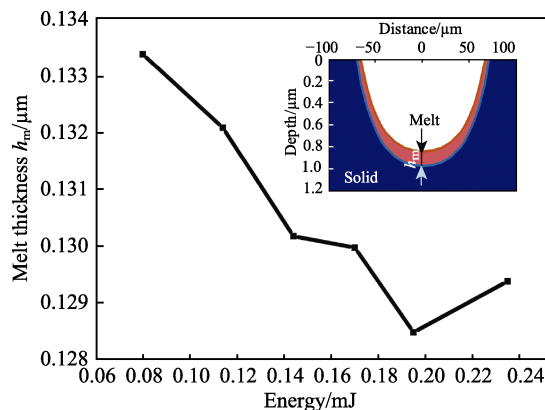


图5 模拟的熔体厚度随脉冲能量的变化情况
(h_m 取光斑中心处对应的熔体厚度)

Fig.5 Variation of the melt thickness with the pulse energy (h_m is the melt thickness corresponding to the center of the structure)

3 结论

1) 在较宽的能量范围内, 纳秒激光加工产生的熔体体积随激光脉冲能量密度的变化规律符合 C Körner 等人所提出的模型, 表明通过控制激光能量密度能够有效控制纳秒激光加工中的熔体体积。

2) 在较低的能量密度下, 实验结果和模拟结果都表明熔体体积随能量密度的增大而减小, 这意味着有其他因素伴随能量密度共同影响熔体体积, 这种影响还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 符永宏, 叶云霞, 张永康, 等. 用于显著改善摩擦副润滑状态的激光珩磨技术[J]. 机械工程学报, 2002, 38(8): 115-117.
FU Yong-hong, YE Yun-xia, ZHANG Yong-kang, et al. Technology of laser honing applied in distinctively of improving the lubrication of frictional units[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2002, 38(8): 115-117.
- [2] ETSION I. State of the art in laser surface texturing[J]. ASME journal of tribology, 2005, 127: 248-253.
- [3] 万轶, 熊党生. 激光表面织构化改善摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(6): 603-607.
WAN Yi, XIONG Dang-sheng. Study of laser surface texturing for improving tribological properties[J]. Tribology, 2006, 26(6): 603-607.
- [4] 赵文杰, 王立平, 薛群基. 织构化提高表面摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(6): 622-631.
ZHAO Wen-jie, WANG Li-ping, XUE Qun-ji. Development and research progress of surface texturing on improving tribological performance of surface[J]. Tribology, 2011, 31(6): 622-631.
- [5] MARIMUTHU S, ANTAR M, DUNLEAVEY J, et al. An experimental study on quasi-CW fiber laser drilling of nickel superalloy[J]. Optics & laser technology, 2017, 94: 119-127.
- [6] MARIMUTHU S, ANTAR M, DUNLEAVEY J, et al. Millisecond fibre laser trepanning drilling of angular holes[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 102(9-12): 2833-2843.
- [7] 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.
- [8] GAUTAM G D, PANDEY A K. Pulsed Nd:YAG laser beam drilling: A review[J]. Optics & laser technology, 2018, 100: 183-215.
- [9] LI J, WANG X. Numerical simulation of the influence of the bulges around laser surface textures on the tribological performance[J]. Tribology transactions, 2013, 56: 1011-1018.
- [10] KANG Z, FU Y, JI J, et al. Effect of local laser surface texturing on tribological performance of injection cam[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 92(5-8): 1751-1760.
- [11] KONONENKO T V, FREITAG C, SOVYK D N, et al. Influence of pulse repetition rate on percussion drilling of Ti-based alloy by picosecond laser pulses[J]. Optics and lasers in engineering, 2018, 103: 65-70.
- [12] ZHANG H, ZHOU M, WANG Y, 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: 74.
- [13] IMRAN M, MATIVENGA P, GHOLINIA P A, et al. Assessment of surface integrity of Ni superalloy after electrical-discharge, laser and mechanical micro-drilling processes[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2015, 79(5-8): 1303-1311.
- [14] 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: 537-543.
- [15] KÖRNER C, MAYERHOFER R, HARTMANN M, et al. Physical and material aspects in using visible laser pulses of nanosecond duration for ablation[J]. Appl phys A, 1996, 63: 123-131.
- [16] QIN Y, FÖRSTER D J, WEBER R, et al. Numerical study of the dynamics of the hole formation during drilling with combined ms and ns laser pulses[J]. Optics & laser technology, 2019, 112: 8-19.
- [17] REN N, JIANG L, LIU D, et al. Comparison of the simulation and experimental of hole characteristics during nanosecond-pulsed laser drilling of thin titanium sheets [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2014, 76(5-8): 735-743.
- [18] ABIDOU D, YUSOFF N, NAZRI N, et al. Numerical simulation of metal removal in laser drilling using symmetric smoothed particle hydrodynamics[J]. Precision engineering, 2017, 49: 69-77.
- [19] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Appl phys A, 1996, 63: 109-115.
- [20] 陈安民, 高勋, 姜远飞, 等. 数值模拟飞秒激光加热金属的热电子发射[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 7198-7202.
CHEN An-min, GAO Xun, JIANG Yuan-fei, et al. Numerical simulation of femtosecond laser heating of metal films using electron thermal emission[J]. Acta phys sin, 2010, 59(10): 7198 -7202.
- [21] KIM J, NA S. Metal thin film ablation with femtosecond pulsed laser[J]. Optics and laser technology, 2007, 39(7): 1443-1448.
- [22] MARCIAK-KOZŁOWSKA J, MUCHA Z, KOZŁOWSKI M. Picosecond thermal pulses in thin gold films[J]. International journal of thermophysics, 1995, 16(6): 1489-1497.
- [23] YAMASHITA Y, YOKOMINE T, EBARA S, et al. Heat transport analysis of femtosecond laser ablation with full lagrangian modified molecular dynamics[J]. International journal of thermophysics, 2006, 27(2): 627-646.
- [24] WANG J, SHEN Z, XU B, et al. Numerical simulation of laser-generated ultrasound in nonmetallic material by the finite element method[J]. Optics and laser technology, 2007, 39(4): 806-813.
- [25] PERRY T L, WERSCHMOELLER D, LI X, et al. Pulsed laser polishing of micro-milled Ti6Al4V samples[J]. Journal of manufacturing processes, 2009, 11(2): 74-81.
- [26] VILHENA L M, SEDLAČEK M, PODGORNIK B, et al. Surface texturing by pulsed Nd:YAG laser[J]. Tribology international, 2009, 42: 1496-1504.