

DOI: 10.7652/xjtuxb201902020

激光切割过程中位置检测系统抗干扰研究

律昌硕¹, 吴孜越², 杨树明¹, 贾松涛³

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 河南科技大学机电工程学院, 471023, 河南洛阳; 3. 固高科技(深圳)有限公司, 518057, 广东深圳)

摘要: 针对激光切割过程中位置检测系统的电容传感器检测信号易受切割熔渣影响的问题, 提出了一种通过有限元法计算熔渣溅射对电容传感器影响的方法。首先, 通过 COMSOL 软件对传感器建模, 并采用有限元法对电容传感器的电容变化及熔渣飞溅过程中各因素改变对电容的影响进行仿真计算; 然后, 采用金属球模拟熔渣, 对仿真结果进行实验验证; 最后, 通过插补法处理仿真计算结果及实测电容, 绘制电容的等值线图并得到熔渣溅射过程中电容的变化规律: 在熔渣飞向切割头的过程中, 电容变化存在逐渐增大并两次突变的特征, 变化大小与熔渣体积呈正比关系, 与极板间距呈反比关系, 且熔渣处于平面影响区及其下方区域时对传感器影响更大。实测值与仿真结果误差在 0.001 pF 以内, 因此仿真结果可准确地反映熔渣溅射对电容传感器的干扰情况, 为干扰滤除及切割头设计提供理论依据。

关键词: 激光切割; 位置检测; 熔渣溅射; 电容传感器

中图分类号: TG485 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)02-0150-07

A Study on the Interference of Position Detection Systems During Laser Cutting

LÜ Changshuo¹, WU Ziyue², YANG Shuming¹, JIA Songtao³

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;
3. Googol Technology (Shenzhen) Ltd., Shenzhen, Guangdong 518057, China)

Abstract: A method for calculating the influence of slag splash on capacitance sensor is proposed by using a finite element method to solve the problem that the capacitance sensor detection signal of the position detection system is susceptible to the influence of cutting slag in the laser cutting process. Firstly, a model for the sensor is built through COMSOL software, and the finite element method is used to simulate the capacitance change of the capacitive sensor and the influence of various factors on the effect of the capacitance during the slag splash process. Secondly, metal balls are used to simulate molten slags and to verify the simulation results. Finally, an interpolation method is used to process the simulation results and the measured capacitance, and an isoline map of capacitance is drawn to obtain the change rule of capacitance in the process of slag sputtering. Capacitance change is characterized by gradual increasing and two mutations in the process of slag moving towards the cutting head, while the size of the change is directly proportional to the volume of the slag and has an inverse relationship with the spacing of

the plates. Moreover, the slag has great impact on sensors when it is in the plane affected area and the lower area. Experimental results show that the error between the measured value and the simulation result is less than 0.001 pF, the simulation results accurately reflect the interference of slag splash to capacitance sensor, and provide a theoretical basis for interference filtering and cutting head design.

Keywords: laser cutting; position detection; slag splash; capacitive sensor

激光加工因工艺成本低、处理时间短、加工精度高等特点被广泛用于加工各种工艺材料^[1]。为了使切口处获得最佳的功率密度及辅助气体压强,从而保证激光切割的切口质量,要求激光光束的焦点位置在整个加工过程中保持不变。然而,在实际切割过程中,由于被切割工件固定不稳、材料局部热变形、切割系统运动惯量较大等因素的干扰,在切割过程中无法保证焦点位置始终不变。因此,激光切割头位置的实时监测与控制成为保证激光切割切口质量的一项关键技术^[2]。

根据检测原理,激光切割头位置检测系统可分为 3 类:接触式、光学式及电容式。前两种由于测量精度低、无法应用于复杂表面、结构复杂等因素在实际工程中使用较少。电容式位置检测系统由于具有精度高、实时性强、稳定性好、无接触等优点更适用于实际的激光加工^[3]。虽然电容传感器结构简单,对测量环境要求较低,但仍无法完全克服激光切割过程中产生的检测干扰,其中切割温度、切割过程中产生的等离子体以及金属熔渣的溅射对其影响最大。目前已有大量研究者注意到了此类干扰,并进行了一些讨论^[4-13]。

龚时华等通过电容原理,定量地分析了等离子体对电容传感器干扰产生的误差,提出只有在切割开始时,工件尚未被切穿的瞬间,等离子体才会对电容传感器产生干扰,在工件尚未被切穿时,通过增大切割喷头中心孔直径,并嵌入耐热陶瓷材料可以有效地减小等离子云的干扰影响^[14]。在厚板类切割等穿板时间较长的激光切割中,已采用上述方式来降低等离子体的影响。然而,在实际加工生产中,激光调高系统仍会经常出现因位置检测传感器受到干扰而造成切割系统报警、停机的情况。因此,在目前的应用情况中,电容传感器的主要干扰来源于切割过程中的熔渣飞溅,但目前研究中缺乏针对熔渣飞溅干扰的深入研究和实质性建议,致使在目前的工业应用中,激光切割机时常由于位置检测系统的误报出现停机^[15]。因此,需要对激光切割过程中熔渣飞溅情况对传感器的影响特性进行研究,并提出有

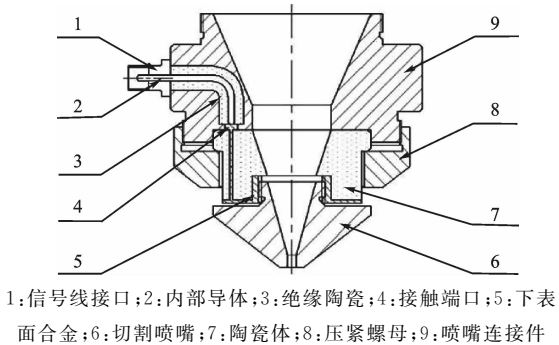
效的识别和滤除手段。

针对上述问题,本文通过采用有限元法对电容传感器的电容变化及熔渣飞溅过程中各因素改变对电容的影响进行了仿真计算,用金属球模拟熔渣,对仿真得到的金属熔渣附着在切割头不同位置上电容的变化进行了实验验证,并通过插补法处理仿真计算的电容值和实测电容,绘制电容的等值线图,得到熔渣溅射过程中电容的变化规律。仿真和初步的试验结果表明,熔渣飞溅过程对电容传感器的影响具有一定规律,该规律可为检测系统识别和滤除熔渣飞溅干扰提供指导。

1 电容传感器

激光切割使用的电容式非接触位置传感器是根据变极距电容器原理工作的。切割喷嘴既作为保护激光光学系统的部件,又作为传感器的可动电极,被测工件为固定电极,当两电极之间的距离发生改变时,传感器电容也随之变化,对电容变化进行在线测量就可以得到实际的距离信息。

在实际应用时,为尽量屏蔽外界环境带来的干扰,传感器的内部结构更加复杂。如图 1 所示:切割喷嘴通过螺纹与陶瓷体相连,陶瓷体被压紧螺母固定在喷嘴连接件上;喷嘴连接件内部通过定位销为陶瓷体提供周向定位,并在侧边排布有进气口和信号线接口;套件内部切割喷嘴通过金属螺纹与陶瓷体下表面合金连接,陶瓷内部通过铜导线将合金与另一侧的接触端口相连;最上部的喷嘴连接件通过弹簧顶针与陶瓷体上接触端口接触,连接件内部顶



1: 信号线接口;2: 内部导体;3: 绝缘陶瓷;4: 接触端口;5: 下表面合金;6: 切割喷嘴;7: 陶瓷体;8: 压紧螺母;9: 喷嘴连接件

图 1 激光切割头底部套件剖面图

针通过导线与侧边信号线接口连接。

假设在该电容传感器可动电极与固定电极之间的区域内没有自由电荷存在,则该区域的静电场问题就可以用拉普拉斯方程描述^[16-17]

$$\nabla \cdot [\epsilon_0 \epsilon_r(x, y, z) \nabla \Phi(x, y, z)] = 0 \quad (1)$$

式中: $\Phi(x, y, z)$ 为三维场中的电势分布函数; $\epsilon_r(x, y, z)$ 表示三维场中材料的相对介电常数分布函数; $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m 为真空中的介电常数; $\nabla \cdot$ 、 ∇ 分别为散度和梯度算子。

在给定边界条件后,通过求解式(1)就可以确定电势的分布。其边界条件为:①可动电极所施加的电压 U ;②固定电极的电位为虚地(0 V);③其余的边界条件为自然边界条件($\partial \Phi / \partial n = 0$)。解出电势分布函数后就可以由式(2)确定电场的分布

$$\mathbf{E}(x, y, z) = -\nabla \Phi(x, y, z) \quad (2)$$

可以清楚地看到,式(1)是一个非常复杂的电势函数分布方程,很难通过解析的方法计算出式(1)的解。为解决这一问题,用有限元法求解式(1),得到电势分布,然后根据式(3)求出该区域的电场能量 W_e ,进而计算出电容值

$$W_e = \frac{1}{2} \iiint_{\Omega} \epsilon(x, y, z) |\nabla \Phi|^2 dv \quad (3)$$

$$C = 2W_e / U^2 \quad (4)$$

式中: W_e 为电场能量; Ω 为 3 维区域。

2 仿真计算及分析

为了便于进行仿真计算,对传感器结构参数做出一定简化。

(1)由于螺纹等连接件在装配后相互结合并形成一个整体,故在仿真时将通过螺纹结合的两个实体视为一个部件进行处理。

(2)由于可动极板的正对面积远大于切割头上如直纹滚花等微观结构的面积,且此类结构距离电容传感器两极板较远,故在仿真时将此类结构忽略。

(3)由于熔渣处于熔融状态,其溅射属于瞬态过程,如考虑其空间中的形态变化,仿真的复杂度较高,故仿真时认为熔渣在飞行过程中为标准球体。

(4)由于熔融金属表面张力的作用,液态金属均以球形附着在切割喷头表面。仿真时将附着熔渣近似为圆心与切割喷头外表面重合的球体。

(5)根据现场观测的现象,位置传感器报警的情况出现在熔渣溅射至切割头表面的瞬间。因此,仿真计算时认为熔渣附着在切割头表面时仍保持熔融的液态,即认为此时的熔渣成分与被切割板材相同

且未与空气发生其他化学反应。

为进行有限元计算,首先将电容传感器的两极板进行网格剖分。有限元剖分是将连续场域剖分成有限数量的单元,然后用这些单元顶点上的数值解逼近连续场的真实解。为得到较高精度的解,要求:①网元上节点多;②任一网元最长的边与最短的边的比应小于 3:1,即矩形网元应尽量接近正方形,三角形网元应尽量接近正三角形^[19]。为此,选择 3 节点的三角形网元剖分传感器的两个极板及其正对区域空间,如图 2 所示。

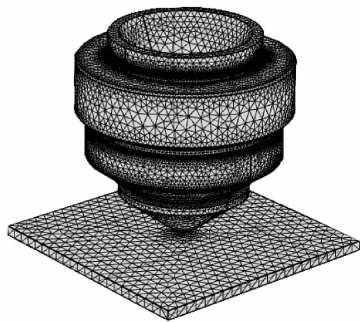


图2 传感器上下极板的有限元网格图

2.1 熔渣飞行过程对电容的影响

在飞行过程中,熔渣是以虚地的固定极板为飞行起点向可动极板飞行,熔渣不携带电荷,因此对电容的影响主要来自对局域空间中介电常数的影响。

设两极板间距为 4 mm, d 为熔渣距切割头距离,仿真计算直径为 1 mm 的熔渣球体在不同空间位置时的电容值大小。为使仿真尽可能覆盖所有熔渣可能的飞行位置,以激光切割喷头截面外形为基准,以切割头外轮廓为起点以一定间距设定 7 组熔渣的分段位置曲线,并在分段曲线上等间距选取位置点进行电容值的计算。电容计算结果如图 3 所示。

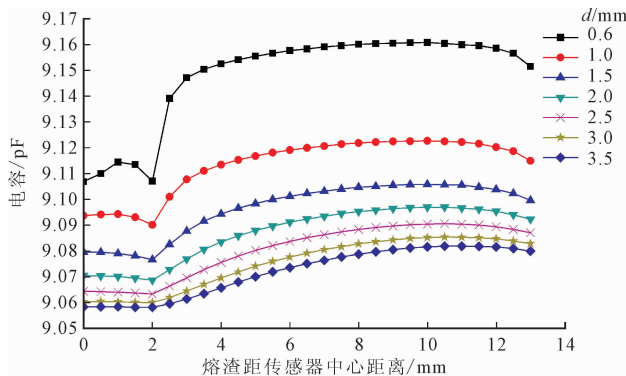


图3 模拟熔渣不同空间位置处的电容传感器读数

由图 3 可见:①熔渣距离切割喷头越近,对电容的影响越大;②在一组熔渣位置的分段曲线中,其斜率在 2~4 mm 处最大,表明在此位置电容对熔渣位

置的变化最为敏感;③熔渣在 4~14 mm 处时传感器的电容值明显大于熔渣在 0~2 mm 处的电容值, 这意味着熔渣处于侧锥面下方时对电容的影响大于熔渣位于喷嘴底面下方时对电容的影响。

2.2 熔渣附着对电容的影响

由于熔渣附着在可动极板上, 改变了可动极板局部的表面形貌, 略微缩短了局部范围内两极板间的距离, 因此板间电容会因熔渣溅射而产生上升趋势。根据可动极板的表面形貌特征, 可将熔渣附着的区域分为切割喷头上与被切割板材平行的平面和切割喷头的侧锥面(以下简称平行平面影响区和侧锥面影响区)两部分进行讨论。初步推测熔渣对电容值的影响程度可能与熔渣的大小(体积)、熔渣附着的位置以及两极板间的间距有关, 因此分别计算极板间距离 L 为 1、2、3、4、5 mm, 附着熔渣半径 R 为 0.5、0.75、1 mm, 熔渣附着于切割喷头不同位置时对电容的影响, 得到的计算结果如图 4、图 5 所示。

由图 4 可知, 熔渣附着使传感器的检测电容增大, 且熔渣的体积越大电容变化越大。由图 5 可见, 3 条不同体积熔渣的位置-电容曲线基本重合, 这说明熔渣体积与其对电容的影响量呈线性关系, 单位

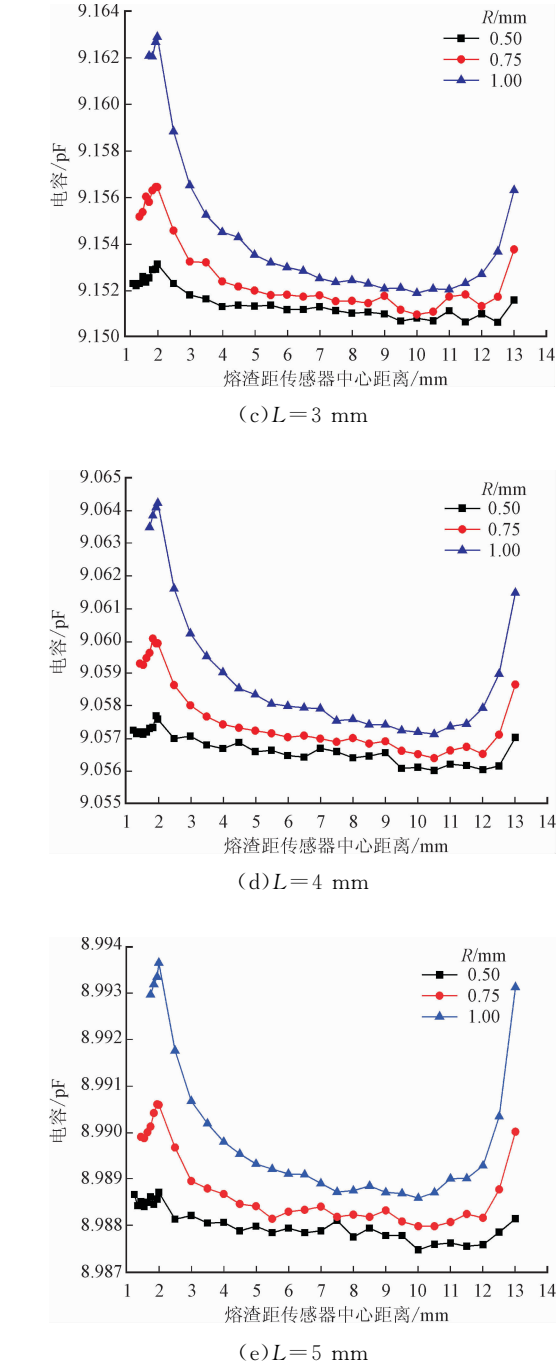
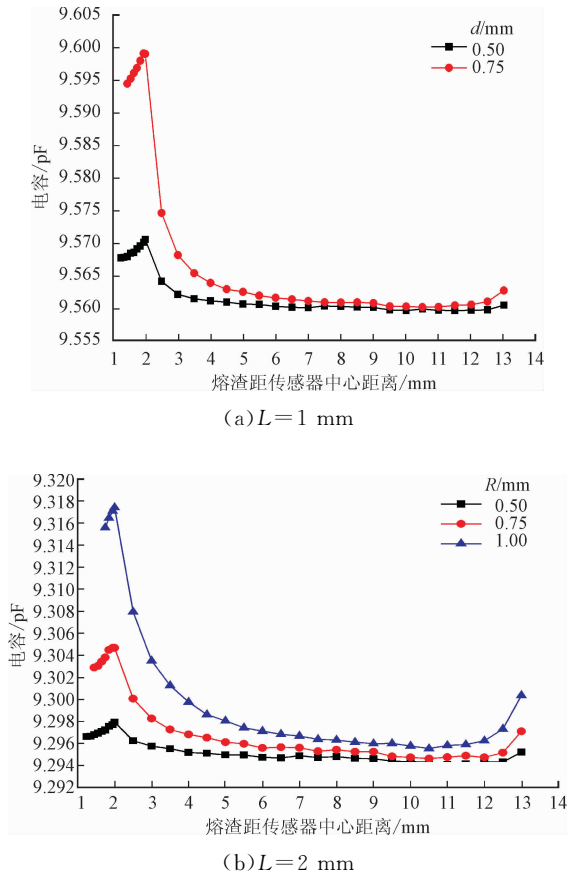


图 4 不同板间距及熔渣尺寸下电容随熔渣位置变化关系

体积熔渣对电容的影响仅与熔渣位置与极板间距有关, 与熔渣体积无关。熔渣处在不同影响区时的电容变化相差较大, 但在同一影响区内的变化较小。说明熔渣位置对电容的影响与其所处的影响区关系较大, 与处于影响区内的位置关系较小。对于不同极板间距下的电容变化, 极板间距越大熔渣附着对电容的影响越小。

通过上述对熔渣溅射两个过程的电容仿真计算可知: 在熔渣的飞行过程中, 熔渣处于侧锥面下方时

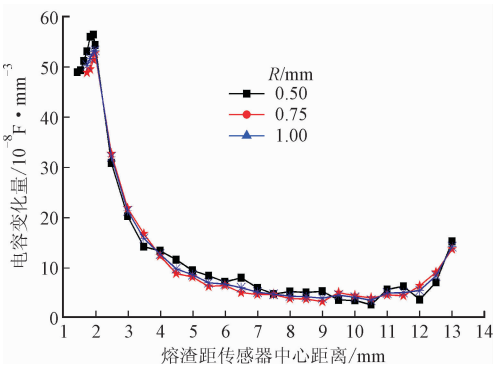


图 5 极板间距 $L=2\text{ mm}$ 时单位体积熔渣对电容的影响

对电容的影响更大;熔渣附着的情况相反,熔渣附着在平面影响区时引起的电容变化大于附着在侧锥面影响区时的电容变化。这意味着,无论熔渣附着位置如何,其溅射过程都会引起至少一次的电容突变。有所区别的是:最终附着在平面影响区的熔渣所引起的电容突变,发生在其附着在平面影响区的瞬间;而最终附着在侧锥面影响区的熔渣,所引起的电容突变发生在熔渣从平面影响区下方飞入侧锥面影响区下方的瞬间。

3 实验设置和实验结果

用金属球模拟溅射的熔渣,对金属熔渣的溅射情况进行实验研究。分 3 种情况对传感器的电容变化进行实际测量:①传感器两极板间没有熔渣飞溅的情况,测量电容与极板间距离的关系;②传感器可动极板上存在熔渣附着情况,熔渣位置与电容变化之间的关系;③传感器可动极板上存在多个熔渣同时附着的情况,电容传感器的读数是否为几个熔渣对电容影响的叠加。

实验相同采用与仿真选用的固定极板材料 304 不锈钢珠(半径为 0.5 mm),模拟熔渣通过焊锡焊接在可动极板表面。从工件中心向外逐渐改变焊接

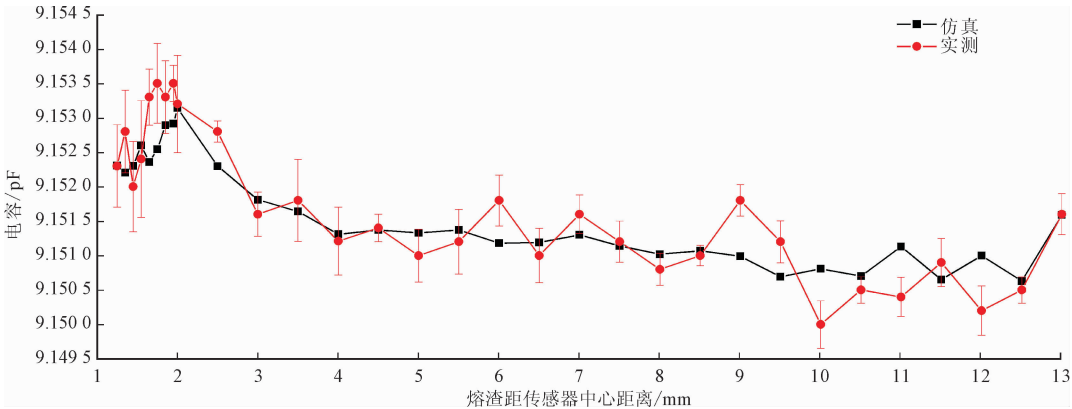


图 8 存在熔渣附着时测量数据与仿真数据的对比

位置,并分别选取 $R=0.5\text{ mm}$ 和 $R=0.75\text{ mm}$ 的不锈钢珠模拟多个熔渣同时附着的情况,随机选取 9 个不同位置点。通过 HIOKI IM3533LCR 测试仪记录各位置下的电容传感器读数 20 次,3 种情况的实验与仿真结果的对照如图 6~图 8 所示。

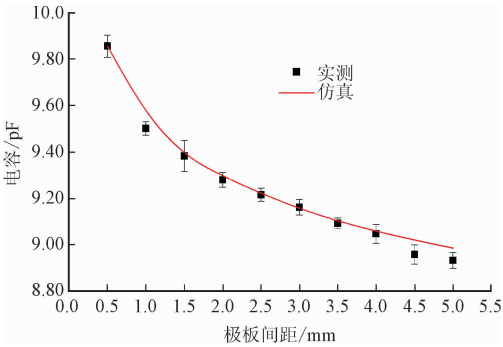


图 6 无熔渣溅射时测量数据与仿真数据的对比

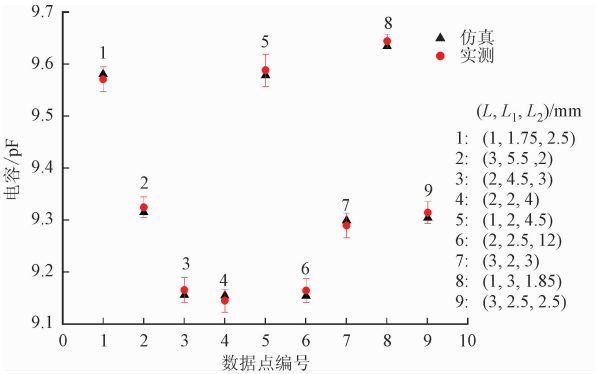


图 7 多熔渣同时附着时测量数据与仿真数据的对比

图 7 中数据点上的数字表示测量本数据点时的位置信息, L 为极板间距, L_1 为半径为 0.5 mm 熔渣中心距传感器中心距离, L_2 为半径为 0.75 mm 熔渣中心距传感器中心距离。仿真计算结果与实测结果误差较小,说明熔渣对传感器的干扰相互独立并可以累加。

图 8 中熔渣距传感器中心 $9\sim13\text{ mm}$ 处实测电

容对比仿真结果波动较大,原因在于实际切割喷头的边缘位置处存在防滑纹路,而仿真时为了便于进行有限元划分将防滑纹路缺省。实测电容受边缘效应的干扰出现了较大的数值偏差。尽管实验测得电容值与仿真结果存在一些微小的差别,但当附着熔渣的位置发生改变时电容的变化趋势是一致的,与仿真结果吻合。

由仿真和实验结果可知,熔渣附着在平面影响区时的电容变化大于附着在侧锥面影响区时的电容变化。综合实验与仿真结果:熔渣溅射引起的传感

器电容变化存在一定规律,但其特征仍不明显。根据仿真得到的电容与熔渣空间位置的关系,进行数据处理。利用熔渣在传感器剖面的 x 、 y 位置坐标和仿真电容值生成空间网格。通过插值法计算熔渣处在其他空间位置点时的板间电容大小,以熔渣在截面内的位置坐标为 x 、 y 坐标,插补得到的电容值为 z 轴坐标,绘制电容的空间曲面,并以此空间平面为基准,向 xy 平面作等值线,得到熔渣处于各位置点处的电容等值线图,如图 9 所示。

通过缩小等值线的取值间隔,使等值线更加密

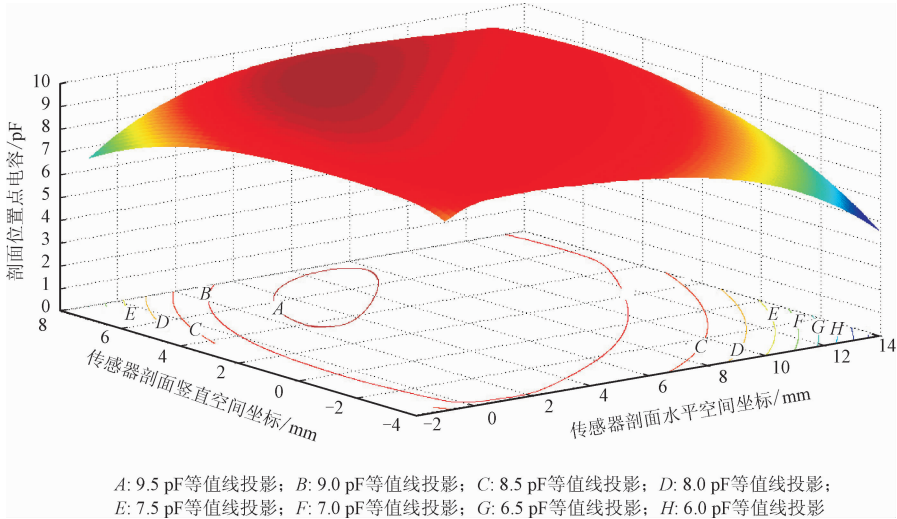


图 9 熔渣处于各位置点处的电容等值线图

集。便于观察容值随空间位置变化的波动情况,图 10 为图 9 的 xy 平面内等值线密集后的电容分布图。注意到,图 10 中在靠近飞溅起点(0, -4) mm 处上方存在一定范围的闭合等值线,且该区域位于飞溅起点的正上方,为熔渣向切割喷头飞溅的必经位置。因此,在飞溅过程的初期,由于熔渣通过等值线闭合区,电容存在短时突跳的特性,可以将这一变化作为熔渣飞溅出现的另一标志。

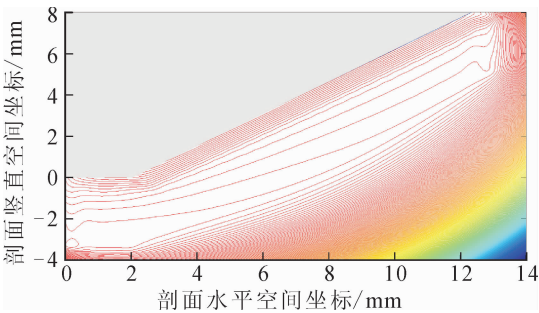


图 10 传感器剖面空间电容等值线图

总体来说,熔渣溅射过程产生的电容波动主要特性可概括如下:①在熔渣溅射的整个周期中,传感

器电容读数持续增长;②电容在溅射过程中存在两次突变,第 1 次由熔渣穿过电容等值线闭环区产生,变化量约为 $0.954 \times 10^{-12} \text{ F/mm}^3$,第 2 次由熔渣附着在平面影响区或熔渣从平面影响区下方飞入侧锥面影响区下方产生,电容变化量约为 $0.04 \times 10^{-12} \text{ F/mm}^3$ 。

4 结 论

针对激光切割过程中,位置检测系统的电容传感器读数易受切割熔渣影响的问题,本文通过 COMSOL 软件计算得到熔渣飞溅过程中传感器电容的变化特征,具体结论如下。

(1)在熔渣飞溅过程中,熔渣距离切割喷头越近,电容传感器读数越大。由此产生的读数变化大小受两极板间距的影响,极板间距越大则读数变化越小。

(2)熔渣体积越大造成的电容传感器读数的变化越大,且近似为线性正比关系。

(3)总体来说,熔渣处于平面影响区及其下方区域时对电容传感器产生的影响大于熔渣处于侧锥面

影响区及其下方区域时产生的影响。

(4)在熔渣飞溅时,存在两个会使电容传感器读数产生突变的区域,分别位于紧贴切割熔池上方0.8 mm直径范围内和平面影响区与侧锥面影响区下方的交界区域,且读数的突变大小仅与熔渣体积有关。

参考文献:

- [1] SENTHILKUMAR V, JAYAPRAKASH G. Parametric investigation and modelling of hardness and surface quality in CO₂ laser cutting process of AISI 314 stainless steel [J]. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 2017, 20(3): 101-107.
- [2] LÓPEZ-MERCADO C A, SPIRIN V V, KABLUKOV S I, et al. Accuracy of single-cut adjustment technique for double resonant Brillouin fiber lasers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(3): 194-198.
- [3] MITRAKOS V, MACINTYRE L, DENISON F, et al. Design, manufacture and testing of capacitive pressure sensors for low-pressure measurement ranges [J]. *Micromachines*, 2017, 8(2): 41.
- [4] GOLYSHEV A A, MALIKOV A G, ORISHICH A M, et al. High-quality laser cutting of stainless steel in inert gas atmosphere by ytterbium fibre and CO₂ lasers [J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(3): 233-238.
- [5] LUTEY A H A, FORTUNATO A, ASCARI A, et al. Laser cutting of lithium iron phosphate battery electrodes: characterization of process efficiency and quality [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 65: 164-174.
- [6] ADALARASAN R, SANTHANAKUMAR M, RAJMOHAN M. Optimization of laser cutting parameters for Al6061/SiCp/Al₂O₃ composite using grey based response surface methodology (GRSM) [J]. *Measurement*, 2015, 73: 596-606.
- [7] CHEN C, GAO M, ZENG X. Relationship between temperature at cut front edge and kerf quality in fiber laser cutting of Al-Cu aluminum alloy [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2016, 109: 58-64.
- [8] 李淑玉, 田新国, 贺敬地, 等. 自动流量平衡阀过流曲线激光切割工艺 [J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 79-83.
LI Shuyu, TIAN Xinguo, HE Jingdi, et al. Laser cutting flow curve of automatic flow control valves [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(10): 1003008.
- [9] SCHUÖCKER D, AICHINGER J, MAJER R. Dynamic phenomena in laser cutting and process performance [J]. *Physics Procedia*, 2012, 39(39): 179-185.
- [10] ELTAWAHNI H A, HAGINO M, BENYOUNIS K Y. Effect of CO₂ laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4): 1068-1082.
- [11] LUTEY A H A, FORTUNATO A, ASCARI A, et al. Laser cutting of lithium iron phosphate battery electrodes: characterization of process efficiency and quality [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 65: 164-174.
- [12] SHARMA A, YADAVA V. Modelling and optimization of cut quality during pulsed Nd: YAG laser cutting of thin Al-alloy sheet for curved profile [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 51(1): 77-88.
- [13] RIVEIRO A, QUINTERO F, LUSQUINOS F, et al. Effects of processing parameters on laser cutting of aluminium: copper alloys using off-axial supersonic nozzles [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(12): 5393-5397.
- [14] 龚时华, 朱国力, 李培根, 等. 激光切割加工过程中等离子体对焦点位置检测干扰研究 [J]. *机械与电子*, 1999(3): 33-35.
GONG Shihua, ZHU Guoli, LI Peigen, et al. Study on the interference of plasma focus position detection during laser cutting process [J]. *Machinery & Electronics*, 1999(3): 33-35.
- [15] 叶建斌, 戴春祥. 激光切割技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012: 56-67.
- [16] SOLEIMANI M, WANG H, LI Y, et al. A comparative study of 3D electrical capacitance tomography [J]. *International Journal of Systems Science*, 2007, 3(2): 292-306.
- [17] YOSSONTIKUL C, UNGPINITPONG P, CHITSAKUL K, et al. A comparative study of capacitance image reconstruction [C] // IEEE Pacific RIM Conference on Communications, Computers and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1024-1027.
- [18] 董恩生, 董永贵, 吕文尔, 等. 同面多电极电容传感器的仿真与试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2006, 42(2): 6-11.
DONG Ensheng, DONE Yonggui, LÜ Wen'er, et al. Simulation and experiment for a uniplanar capacitance sensor with multi-electrode [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(2): 6-11.

(编辑 刘杨)