

管电极耦合激光电解复合加工的理论分析与实验研究

杨雪^{1,2}, 杨成娟^{1,2*}, 佟浩^{3,4}, 戚慧敏^{1,2}, 姚尧^{3,4}, 杨振^{1,2}¹天津大学机械工程学院, 天津 300072;²天津大学机械工程学院机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300072;³清华大学机械工程系摩擦学国家重点实验室, 北京 100084;⁴清华大学精密/超精密制造装备与控制北京市重点实验室, 北京 100084

摘要 激光电解复合加工是将激光加工与电化学加工相结合的复合加工方法,可用于加工硬质导电材料,具有加快电化学溶解速率、避免重铸层和提高表面质量等优势。笔者提出了一种管电极耦合激光电解复合加工工艺,利用设计的管电极实现了激光能量与电化学能量在管电极内部同轴传导以及在加工间隙处的可控耦合,所提工艺适用于高品质超大深径比小孔的加工。基于激光与电化学能量在加工间隙处的可控调节,提出了以激光加工为主导和以电化学加工为主导的耦合作用机制。通过分析激光辐照区温升对电解质电导率、电流密度、液相传质和电化学溶解速率的影响,以及电解产生的气泡和杂质等对激光能量的影响,建立了激光电解复合加工的材料去除模型,并进行了初步的激光电解复合加工仿真分析与实验研究。

关键词 激光技术; 电解加工; 理论模型; 耦合机制; 高深径比; 深孔

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231182

1 引言

随着航空航天、微电子和微机电系统等现代工业的发展以及新型材料的出现,人们对先进工艺制造能力提出了更高要求。目前,多种复合加工工艺已成为工业界和学术界的研究重点,如超声辅助电火花加工^[1-2]、激光辅助车削加工^[3-4]、水导激光加工^[5-6]和激光电解复合加工^[7-11]等工艺。其中,激光电解复合加工是针对激光加工产生热影响区和电化学加工引起杂散腐蚀问题而逐渐发展起来的一项技术^[12],该技术利用电化学作用来减少激光加工产生的热影响区以及避免重铸层缺陷,同时利用激光的高分辨率来降低电化学反应的杂散腐蚀,提高电解加工定域性,实现了两种加工工艺的优势叠加互补。此外,激光电解复合加工具有加速材料溶解、减少氧化层和提高表面质量等优势以及非接触加工、无刀具磨损的特点,已逐渐成为先进制造领域的研究重点。

现阶段,针对高品质高深径比结构的制造难题,人们提出了基于工具电极的激光电解复合加工工艺,该技术利用管状工具电极实现激光能量和电化学能量的同轴传导,通过对激光和电解脉冲时间的有序调控实现高精度小孔加工。在国外,比利时鲁汶大学的 Saxena 等^[12]采用不锈钢管内层嵌套石英玻璃毛细导

光管的工具电极结构,实现了金属管内激光与电解液的同轴传导功能以及加工微区激光与电化学能量的耦合加工功能,制造出了毫米级小孔,但由于激光能量损失严重,仍存在杂散腐蚀问题,并且存在加工效率偏低、孔壁表面粗糙度较大、孔深度不足等缺陷,目前仍处于实验室探索阶段。在国内,中国科学院宁波材料技术与工程研究所的王玉峰等^[9]采用金属管内壁涂覆反射涂层的工具电极结构,同样实现了激光与电解液的同轴传导功能以及加工微区激光与电化学能量的耦合加工功能,增大了小孔的加工深度并提高了小孔锥角的控制精度。激光与电化学耦合的多能场是实现激光电解复合加工最主要的能量来源,需要从理论层面分析复合场能量耦合机制,研究不同输入参数对耦合能场时间和空间分布的影响规律,验证多能场耦合作用机制,进而探索耦合能量场时空分布的调控方法。江苏大学的张朝阳等^[13-15]和青岛理工大学的孙树峰等^[16-18]在浸液式激光电解复合加工方面进行了深入研究,结果显示:激光对加工区的局部温升效应不仅可以提升局部电解液的电导率以及电化学反应界面的离子输运效率,还可以降低电化学反应活化能并提高光照区的电解反应速度,因而实现了激光加工定域性。同时,电解反应可以去除激光加工过程中产生的重铸层、热影响区和微裂纹等表面缺陷,提高蚀坑壁面的加工

收稿日期: 2023-09-08; 修回日期: 2023-10-12; 录用日期: 2023-11-06; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFF0500203)

通信作者: *cjytju@tju.edu.cn

质量。在理论研究方面,比利时布鲁塞尔自由大学的 Deconinck 等^[19]通过理论分析和数值模拟的方式对电化学加工过程进行了研究,提出了用于电化学加工过程数值模拟的温度相关多离子模型,实现了温度的精确计算和电化学加工形貌的预测。比利时鲁汶大学的 Saxena 等^[10]通过分析激光诱导温度场和电化学加工过程的相互作用建立了多学科有限元模型,模拟了混合激光和电解加工过程中涉及的几种微观物理、化学现象。中国科学院宁波材料技术与工程研究所的王玉峰等^[9]采用多物理场模拟研究了激光诱导温升对电解加工过程的影响。江苏大学的张朝阳课题组^[20]对激光电化学复合刻蚀加工靶材的瞬态温度场和电场进行了有限元数值模拟,研究了温度场、电场变化对激光电解复合加工区域范围和加工深度的影响。

目前,工具电极内部以电解液和全反射层或者电解液和石英毛细导光管为传导激光的介质,均存在较大的激光功率损耗,削弱了激光电解复合加工过程中激光对材料的作用效果,易导致高深径比/深宽比结构加工过程中由电极中心部位材料蚀除不及时引起的工具电极短路问题。针对现有工具电极存在的问题,笔者设计了一种管电极耦合激光电解复合加工工具,利用管电极约束电解液和激光束在其内部同轴同步或异步传导,并通过管电极内部同轴光纤进一步约束激光在光纤内部全反射传导,实现了激光能量和电化学能量在管电极内部的独立调控能力。同时,笔者基于该工艺探究激光与电化学能量的耦合机制,提出了以激光为主导和以电解为主导的复合加工机制;基于耦合能量引起的局部温度和应力的时空分布,探究了激光对电化学耦合加工微区液相传质和电极电位的影响规律,建立了复合

能量作用下材料去除动力学演变行为的理论模型,对激光电解复合加工进行了初步仿真分析,并通过实验分析了激光电解复合加工的优势,以期探索高品质高深径比复杂结构加工工艺奠定理论与工艺基础。

2 管电极结构设计

为了改进现有工具电极存在的激光能量损耗、杂散腐蚀、加工深度不足和表面质量不高等问题,笔者提出了一种“电解液环绕激光”式管电极结构,该结构由光纤器件和电极器件同轴装配组成,如图 1 所示。光纤器件设计有通用的 SMA 连接器接口,适用于空间光和光纤激光的导入,同时该接头设计的密封结构与密封圈的配合使用可以起到良好的电解液密封效果。光纤器件内部可同轴装配常规光纤或特种光纤,如柱形光纤、锥形光纤、透镜光纤等,光纤外部由薄壁金属管保护,可以避免光纤因电解液冲击而损坏。电极器件由金属毛细管和绝缘层组成,内部中空结构用于装配光纤器件,二者之间的间隙为电解液的传输通道。这种管电极结构具有结构灵活、性能稳定和拆换快速的特点,同时可以通过调节激光输入能量、电解液流速和电解电压等参数,实现管电极内部激光能量和电化学能量的有效调控,以及管电极与工件间隙处的耦合加工。这种管电极有望解决激光加工中由热量和光束分布状态导致的重铸层、微裂纹、热影响区、入口飞溅、出口毛刺、孔锥度大和深度不足的问题,以及电解加工过程中由工具电极中心孔堵塞导致的加工结构深径比/深宽比受限和杂散腐蚀的问题。选用不同规格的管电极可以实现直径范围在 0.5~1.5 mm、深径比 $\geq 50:1$ 的高品质小孔的加工。

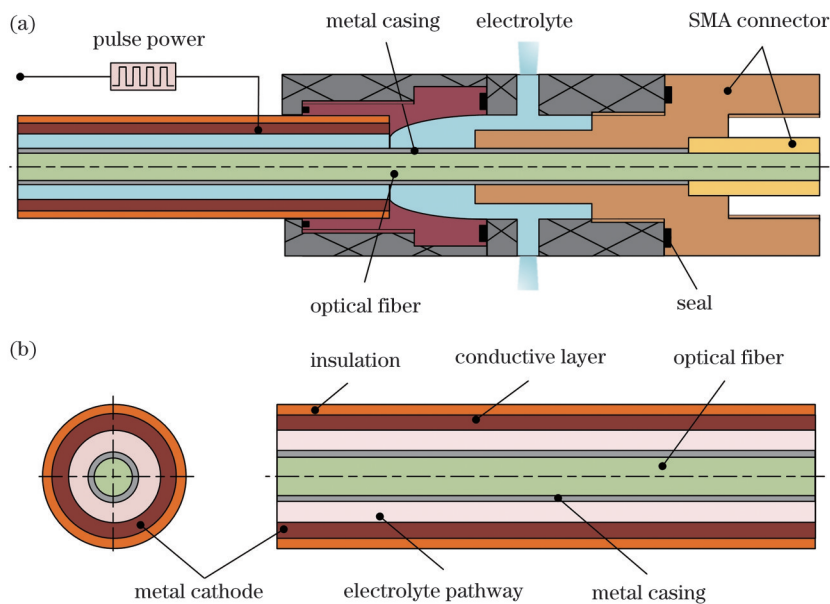


图 1 管电极结构原理图。(a) 光纤器件与电极器件装配原理图;(b) 电极器件结构原理图

Fig. 1 Tubular electrode structure schematic diagrams. (a) Schematic diagram of fiber device and electrode device assembly; (b) schematic diagram of electrode device structure

3 管电极耦合激光电解复合加工理论模型

3.1 激光与电化学能量耦合作用机制

激光电解复合加工是将激光能量与电化学能量进行复合,利用激光在电解液中对工件材料的热力效应以及电解对工件材料的电化学溶解作用实现材料的去除^[21]。在目前设计的管电极结构下,激光通过管电极内部光纤传导至加工间隙,电解液通过管电极内部流道传输至加工区域,实现激光能量和电化学能量在管电极内部的可控传输以及在加工间隙处的耦合加工。

在激光电解复合加工过程中,电解加工通过电化学反应溶解材料,产生的金属阳离子在电解液的驱动下向管电极侧壁与工件的间隙处迁移;水分解产生的羟基阴离子进一步反应生成氢气,导致电解液中形成气泡,抑制电解质的电导率;金属离子与羟基离子结合形成沉淀物,沉淀物在电解液的持续冲刷作用下排出间隙。纳秒激光辐照水基电解质可能出现激光诱导热击穿、光学击穿、水蒸气相气泡生成和激光诱导局部沸

腾等物理现象^[12]。激光诱导的气泡可能由局部和短暂的等离子体、空化气泡、电解质沸腾产生的气泡组成。当低功率密度激光辐照工件表面时,气泡在电解液的冲刷作用下在几毫秒内湮灭,对加工过程的影响较小;当高功率密度激光辐照工件表面时,局域温度快速升高,导致电解液沸腾产生大量气泡,此时电解液的冲刷作用不足以将气泡完全带离加工间隙,导致激光和电解两种工艺能量的耦合状态发生变化,对加工过程的影响较大。激光的高分辨率可以抑制电化学反应的杂散腐蚀,实现定域电解加工;激光辐照区域温度升高可以引起局部分子活性和电解质电导率增加,导致电流密度增大和电化学溶解速率加快。电解液通常采用氯化钠或硝酸钠等钝化电解质配制,目的是使工件表面钝化,抑制氧化层的形成;电解液的持续供应可以增强加工间隙处的物质传输,同时可以防止加工间隙处的热量积累,有利于激光电解的协同效益^[10]。

3.2 激光电解参数对材料去除的影响机制

激光对工件材料的加工能力主要取决于耦合作用区域的激光功率密度。如图 2 所示,输入激光能量在电解液中的衰减因素包括散射(金属离子、悬浮物、激

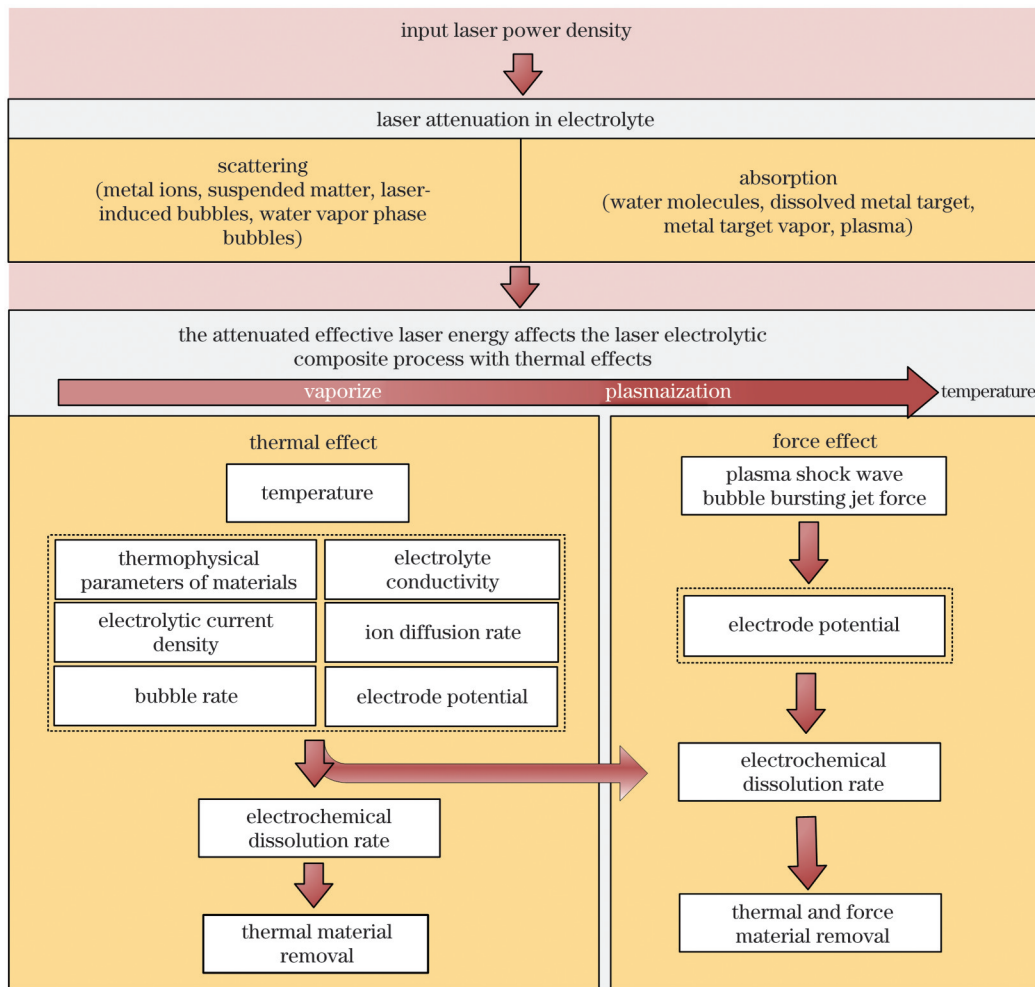


图 2 激光对复合能场作用的逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of laser action on complex energy field

光诱导气泡和水蒸气相气泡)和吸收(水分子、金属靶材溶解物、金属靶材蒸气和等离子体)^[22-24]。衰减后的有效激光功率密度以热效应或热力效应的形式影响激光电解复合加工过程。当激光功率密度较低时,激光通过热效应影响工件材料的热物性参数和加工间隙内电解质的电导率、电解电流密度、离子扩散速率、气泡率和电极电势的变化,加快阳极工件的电化学溶解速率;当激光功率密度达到电解液击穿阈值时,激光通过热效应和力效应共同影响激光电解复合加工过程。激光辐照水基电解质产生的力效应(由等离子体冲击波和空泡溃灭产生的射流冲击力引起)使电极电势负向偏移,工件阳极氧化趋势增大,净电流密度增大,因此进一步加快了电化学溶解速率^[7]。

在电解加工过程中,通过改变电解脉冲宽度调整激光和电解的并行或顺序加工过程。如图 3 所示,从时间分辨的角度来看,激光和电解脉冲重叠期间进行

并行加工;激光或电解脉冲关断期间进行顺序加工,脉冲关断时加工间隙内的副产物和热累积可以在电解液的作用下被带出间隙,此时加工间隙状态得以更新。因此,通过调整电解脉冲宽度实现两种工艺能量对材料去除和热累积的局部控制。在激光电解复合加工过程中采用纳秒脉冲激光和微秒脉冲电压源,以最大限度地减小加工间隙内过度能量释放的不利影响,例如电解质沸腾、杂散腐蚀和不可控的材料去除^[12]。采用纳秒脉冲激光的原因在于,纳秒脉冲激光在纯水中的吸收率极低而且相对飞秒脉冲激光和皮秒脉冲激光兼顾了加工精度和加工效率。采用微秒脉冲电压源的原因在于,微秒电解易与纳秒激光进行协同加工,而且相比纳秒脉冲电压源和毫秒脉冲电压源,既可以避免杂散电容和电感等问题,又可以实现较快的电化学溶解速率。因此,可以利用纳秒激光与微秒电解相互促进和协同作用实现高质高效的结构加工。

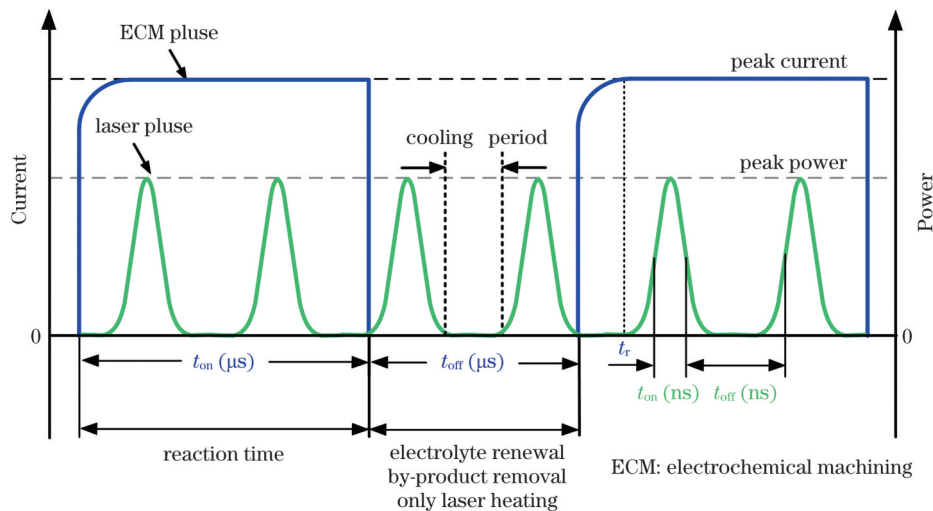


图 3 激光和电解脉冲示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser and electrolytic pulses

基于管电极内激光能量和电化学能量的可控调节,将激光和电化学能量引起的耦合作用区域状态变化机制分为三种,即激光辅助电解加工机制、激光电解协同加工机制和电解辅助激光加工机制,如图 4 所示。

当激光功率密度较低且电解电压或脉冲宽度较大时,加工区域温度处于环境温度与电解液沸腾或蒸发温度之间,此时由于激光对加工区域的热效应,温度升高,导致电解质电导率升高,进而使得加工区域的电流密度增大,加快了阳极工件材料的溶解。该过程主要通过激光辅助电解加工作用来提高材料的去除速率。当激光功率密度和电解电压或脉冲宽度适中时,加工区域温度介于电解液沸腾或蒸发温度与工件材料熔化或烧蚀温度之间,此时除了激光加速去除材料外,还涉及工件材料在较高激光功率密度作用下的熔化和重铸,激光电解产物在加工间隙中积累,副反应产物(氢

气和氧气)加速生成。该过程主要通过激光电解协同加工作用来提高材料的去除速率。当激光能量密度较高且电解电压或脉冲宽度较低时,加工区域温度高于金属工件材料熔化或烧蚀温度,此时以激光去除工件材料为主。当激光通过电解液作用于工件表面时,工件材料吸收激光能量后瞬时升温至上万摄氏度,材料瞬时熔化、汽化和产生等离子体云,汽化物和等离子体迅速膨胀产生高压,使材料熔化物从熔体底部向加工间隙处喷射,从而达到了加快去除工件材料的目的。在工件和管电极之间施加的高电压通过电化学反应使工件表面溶解,同时,激光作用产生的热量提高了工件加工区域的温度,从而加快了激光辐照区域的电解加工速度,提高了电解加工的定域性。此外,激光会导致电解液发生光学击穿,工件表面生成的气泡在溃灭时产生等离子体冲击波和射流冲击力,因此在激光辐照应力作用下,工件表面发生弹性变形,使得金属的电极

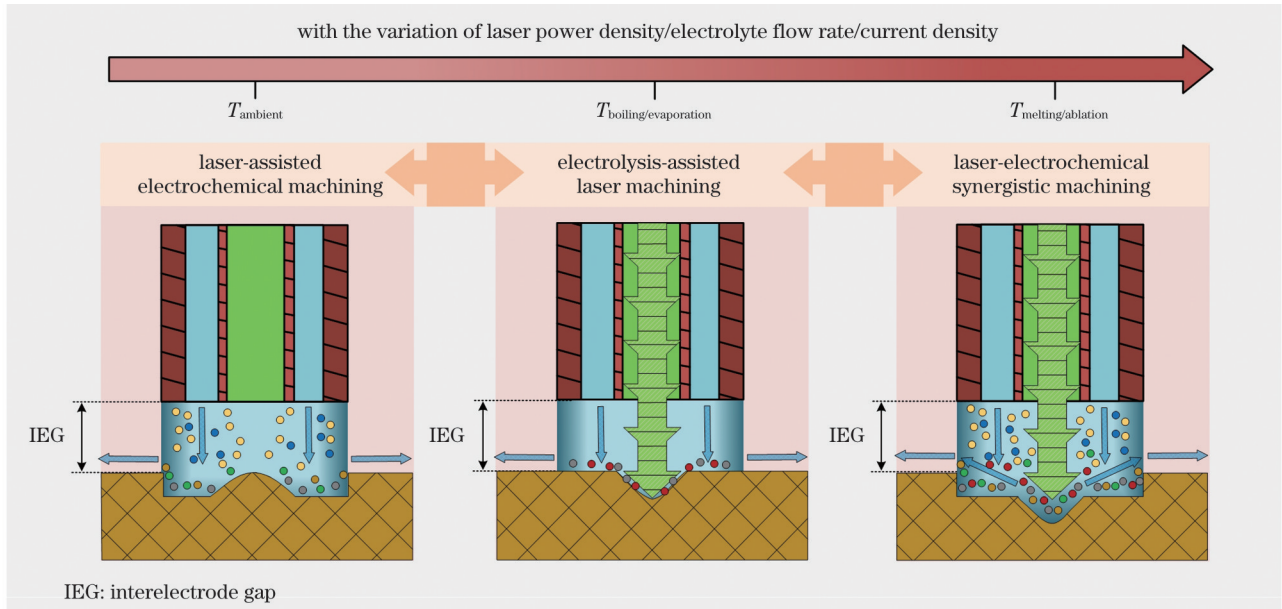


图 4 激光电解复合加工机制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of laser and electrochemical hybrid machining mechanism

电势向负向偏移,金属阳极氧化趋势增大,最终使得净电流密度增大。在激光脉冲辐照期间,激光能量远大于电化学能量,此时主要通过电解辅助激光加工作用来提高材料的去除速率。

3.3 管电极耦合激光电解复合加工理论分析

根据管电极耦合激光电解复合加工过程的实际情况,需要提出一些近似的假设,然后逐步建立复合加工

的数学模型,包括电场模型、两相流场模型、电极和电解液传热模型、气泡产生模型、电解质物质运输模型和材料去除模型。数学模型的建立可为纳秒激光与电化学复合加工的 COMSOL 仿真提供理论依据。管电极耦合激光电解复合加工模型的所有域和边界如图 5 所示。域 I 表示工件,域 II 表示电解液,域 III 表示光纤,域 IV 表示光纤保护管,域 V 表示工具阴极。

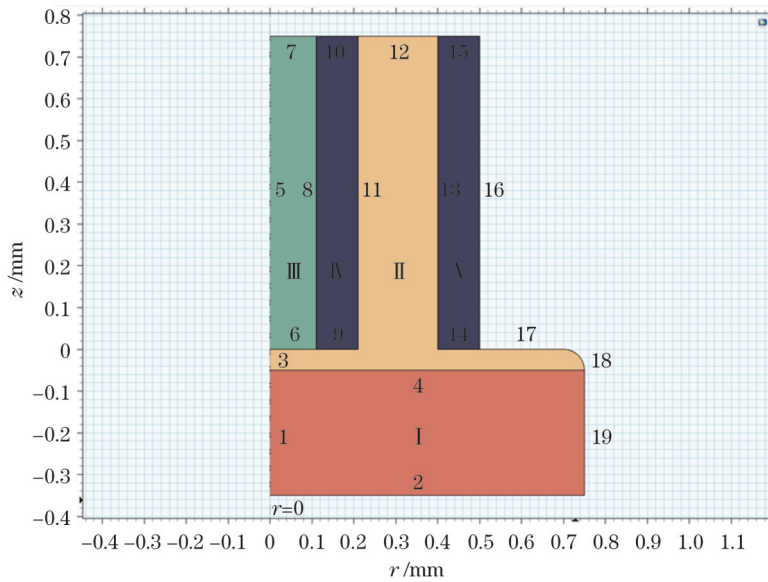


图 5 管电极耦合激光电解复合加工模型所有域和边界示意图

Fig. 5 Schematic diagram of all domains and boundaries of the tubular electrode-coupled laser and electrochemical hybrid model

加工间隙内的电解液加热是通过工具电极与电解液之间的热量传递以及工件表面与电解液之间的热量传递实现的。电解液温度的局部升高导致电流密度、分子活性、电化学反应动力学和电解质电导率局部增大,从而使得工件的电化学溶解速率加快。加工电流密度遵循 Butler-Volmer 方程^[25],即

$$i = i_0 \left\{ \exp \left[\frac{(1 - \beta) F (E - E_\tau)}{R_g T} \right] - \exp \left[\frac{-\beta F (E - E_\tau)}{R_g T} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中: i_0 为交换电流密度; β 为交换系数; E 为电极电

位; E_r 为平衡电势; R_g 为气体常数; T 为热力学温度; F 为法拉第常数。交换电流密度 i_0 的计算公式^[10]为

$$i_0 = nF \frac{k_B T}{h} C_{\text{Ox}} \exp\left(\frac{-\Delta G + \beta F E_r}{R_g T}\right), \quad (2)$$

式中: n 为发生反应的离子的价态; ΔG 为活化自由能; C_{Ox} 为每平方厘米的离子浓度; h 为普朗克常数; k_B 为玻耳兹曼常数。交换电流密度取决于 Arrhenius 能量项 $\exp[-\Delta G/(RT)]$, 表明电化学反应动力学将随温度的升高而增强。

3.3.1 电场模型

激光除了可以引起温升外, 还可以加速工具阴极上氢气和阳极上氧气的生成, 因此需要同时考虑氢气和氧气的产生以及温度影响导致的电解质电导率的变化。根据电荷守恒定律, 采用拉普拉斯方程表示电极和电解液中的电势^[26], 即

$$\nabla \cdot (-\sigma_e \nabla V) = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (-\sigma_1 \nabla U) = 0, \quad (4)$$

式中: σ_e 和 σ_1 分别表示电极和电解液的电导率; V 和 U 分别表示电极和电解液的电势。电解液电导率随温度和气泡率的变化^[26]可以表示为

$$\sigma_1 = \sigma_0 (1 - \beta_g)^{3/2} [1 + \delta_1 (T - T_0)], \quad (5)$$

式中: σ_0 为初始环境温度下的电导率; β_g 为气泡体积分数; T_0 为初始环境温度; δ_1 是与温度相关的系数。电极和电解液接触面上存在电极极化现象, 该现象可通过一个与温度相关的线性极化模型表示^[26], 即

$$i = (1 - \beta_g)^{3/2} [1 + \delta_1 (T - T_0)] \frac{(V - U) - E_r}{R_p}, \quad (6)$$

式中: i 为电化学反应电流密度; E_r 为平衡电势, R_p 为极化电阻。施加在工作阳极边界 14 上的有效电势为

$$V|_{\Gamma_{14}} = V_{\text{eff}}, \quad (7)$$

其中有效电位 V_{eff} 可以表示为

$$V_{\text{eff}} = V_{\text{app}} - V_{\text{ox}}, \quad (8)$$

式中: V_{app} 为电源电压; V_{ox} 为工件表面氧化层的压降 (工件表面在钝化电解液作用下可能会生成几纳米厚的氧化层, 同时工件表面在过饱和盐溶液作用下会生成黏性层, 这种双重结构会对电流流动产生边界阻力, 从而引起压降)。工具阴极边界 15 上的电势为

$$\phi|_{\Gamma_{15}} = 0. \quad (9)$$

其余边界均采用电气绝缘条件, 即

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{\Gamma_{2,7,10,12,16,17,18}} = 0. \quad (10)$$

3.3.2 两相流场模型

流场模型采用层流两相流, 两相分别为电解液和气体, 气体由激光电解复合加工产生的氢气、氧气和水蒸气组成。采用水平集方法来追踪电解液相和气体相界面。对于不可压缩流体, Navier-Stokes 方程可表示为

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot \left\{ -p \mathbf{I} + \mu_1 \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^\top \right] \right\} + F_v, \quad (11)$$

$$\rho_1 \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (12)$$

式中: ρ_1 为电解液密度; \mathbf{u} 为电解液流速; p 为电解液压力; \mathbf{I} 为单位矩阵; μ_1 为电解液的动力黏度; F_v 为体积力。电解液入口为边界 12, 入口流速的大小表示为

$$u_n|_{\Gamma_{12}} = u_{\text{inlet}} + u_{\text{feed}}, u_{\text{inlet}} = Q_i/A_{\text{in}}, \quad (13)$$

式中: u_{inlet} 为入口流速的大小; A_{in} 为管电极内电解液的横截面积; Q_i 为入口处流量; u_{feed} 为电极进给速率。设置出口边界为边界 17 和 18, 压力为零, 抑制回流, 设置滑移边界为边界 4, 设置无滑移边界为边界 6、9、11、13、14。

3.3.3 电极和电解液传热模型

工具电极和工件均与电解液域存在热量传递, 因此采用瞬态传热方程求解固体和流体域的温度分布^[10,19]。计算公式为

$$\rho_e C_{p,e} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\kappa_e \nabla T) + Q_e, \quad (14)$$

$$\rho_1 C_{p,1} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\kappa_1 \nabla T) + Q_1, \quad (15)$$

式中: ρ_e 为电极密度; $C_{p,e}$ 为电极的比定压热容; κ_e 为电极的热导率; Q_e 为电极产生的焦耳热, $Q_e = \sigma_e (\nabla V)^2$; ρ_1 为电解液的密度; $C_{p,1}$ 为电解液的比定压热容; κ_1 为电解液的热导率; Q_1 为电解液产生的焦耳热, $Q_1 = \sigma_1 (\nabla U)^2$ 。激光在电解液中的衰减遵循 Beer-Lambert 定律, 因此呈高斯分布的激光束衰减后的激光能量^[10,27]可以表示为

$$Q_\delta(\lambda) = Q_0(\lambda) \cdot \exp[-\mu(\lambda) \cdot \delta] \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right), \quad (16)$$

式中: δ 为加工间隙内电解液的厚度; Q_0 为管电极入口处的激光功率密度; $\mu(\lambda)$ 为激光在电解液中的总衰减系数 (与激光波长 λ 有关); R 为激光光斑半径。电解液是以钠盐为溶质、纯水为溶剂的中性盐溶液, 含有水分子、金属离子和悬浮物等微粒, 这些微粒对激光在电解液中的吸收和散射衰减有很大影响。总衰减系数可以表示为

$$\mu(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda), \quad (17)$$

式中: $\alpha(\lambda)$ 为吸收系数; $\beta(\lambda)$ 为散射系数。

吸收系数与溶液的折射率有关。溶液的折射率和消光系数分别为 $n(\lambda)$ 和 $k(\lambda)$ 。光谱复折射率^[28]表示为

$$n_c(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda), \quad (18)$$

吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 由 $k(\lambda)$ 决定, 其表达式为

$$\alpha(\lambda) = 4\pi k(\lambda)/\lambda. \quad (19)$$

总散射系数包括瑞利散射系数 $\beta_R(\lambda)$ 和米氏散射系数 $\beta_M(\lambda)$ 两部分, 可写成

$$\beta(\lambda) = \beta_R(\lambda) + \beta_M(\lambda). \quad (20)$$

散射系数由溶液中颗粒的半径决定。用一个无量纲参数 q ($q = 2\pi R/\lambda$) 来表示颗粒的大小。当 q 值为 0.1 时, 散射为瑞利散射, 反之则为米氏散射。电解液中含有的悬浮颗粒 (半径为 5~10 μm) 会影响散射效应, 电解液浓度越高, 悬浮颗粒越多, 散射效应越显著。因此, 激光在电解液中的衰减直接受到溶液浓度的影响。此外, 溶液温度也是影响衰减系数的一个因素。这里用两个参数 ψ_c 和 ψ_T 来表示浓度和温度的影响, 那么式 (16) 可以变形^[22]为

$$Q_o(\lambda) = Q_o(\lambda) \cdot \exp\left\{-\left[\alpha(\lambda) + \beta_M(\lambda) + \psi_c(C - C_o) + \psi_T(T - T_o)\right] \cdot \delta\right\} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right), \quad (21)$$

其中 Q_o 定义为

$$Q_o = \frac{P_a}{\pi R^2}, \quad (22)$$

式中: P_a 为激光平均功率。

在激光电解加工过程中, 激光辅助增强了化学反应动力学, 电化学反应速率越快, 电解液中离子的产生速率越大, 这些离子在电极和电解液界面聚集, 形成带相反电荷的双电层。双电层对电解液的加热^[10]表示为

$$Q_{\text{di},c}|_{\Gamma_{14}} = V_{\text{di}} \hat{i}_n \zeta, \quad (23)$$

$$Q_{\text{di},a}|_{\Gamma_4} = (V_{\text{ox}} - V_{\text{di}}) \hat{i}_n \zeta, \quad (24)$$

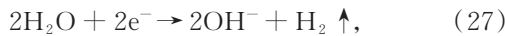
式中: V_{di} 为双层过电位; V_{ox} 为氧化层的电压降; \hat{i}_n 为电流密度; ζ 为脉冲电压的占空比。其余边界为环境温度, 工件底面模拟为隔热层, 因此

$$T|_{\Gamma_7, 10, 12, 15, 16, 19} = T_o, \quad (25)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = 0. \quad (26)$$

3.3.4 气泡产生模型

在电化学加工过程中, 氧气通常被认为是副反应产物 (当电流密度大于 10 A/cm^2 时)。在钝化电解液中, 工件阳极生成氧气, 可导致溶解气体的生成和氧化物表面的形成或氧气气泡的演化。氢气和氧气分别在工具电极阴极和工件阳极通过化学反应生成^[29-30], 反应方程式为



氢气的实时生成可以表示为工具电极的边界通量源, 如式 (29) 所示。氧气的产生导致钝化电解液的电流效率较低, 氧气的实时生成通过一个通量来描述^[10], 如式 (30) 所示。

$$q_{\text{H}_2}|_{\Gamma_{14}} = -\frac{M_{\text{H}_2}}{2F} \hat{i}_n \cdot \zeta, \quad (29)$$

$$q_{\text{O}_2}|_{\Gamma_4} = -\frac{(1-\eta)M_{\text{H}_2}}{4F} \hat{i}_n \cdot \zeta, \quad (30)$$

式中: M_{H_2} 为氢气的摩尔质量; η 为电流效率。

假设氢气和氧气的生成速度与电解液流速相同, 则氢气和氧气的体积分数可以用气体运输方程^[10]表示为

$$\frac{\partial \phi_g \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_g \rho_g \mathbf{u}) = \Gamma + D_{\text{ig}} \nabla^2 (\phi_g \rho_g), \quad (31)$$

$$\rho_g = \frac{PM_g}{RT}, \quad (32)$$

式中: P 为局部压力; M_g 为氢/氧气的摩尔质量; \mathbf{u} 为电解液流速; Γ 为气体的通量源; D_{ig} 为受温度影响的氢/氧气的扩散系数; ρ_g 为氢/氧气的密度。其中, 局部压力使用 Bernoulli 方程^[10]表示, 即

$$P = P_{\text{tot}} - \frac{|\mathbf{u}|^2}{2} [(1 - \phi_g) \cdot \rho_l + \phi_g \rho_g], \quad (33)$$

式中: P_{tot} 为总压。氢/氧气的扩散系数可表示为温度的函数^[10], 即

$$D_{\text{ig}} = D_{\text{og}} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (34)$$

式中: D_{og} 为初始氢/氧气的扩散系数; E_a 为活化能。

3.3.5 电解质物质运输模型

在激光电解复合加工过程中, 激光的辅助作用促进了电化学反应的动力学过程。激光能量引起电解液温度上升, 加快电解质中的离子扩散, 进而消耗电解质。根据 Fick 第二定律, 考虑物质运输由扩散、迁移和对流控制, 则物质的运输平衡方程^[19]可以表示为

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left(c_i \mathbf{u} - D_i \nabla c_i - \frac{z_i F D_i c_i}{RT} \nabla U \right) = 0, \quad (35)$$

式中: D_i 为扩散系数; c_i 为离子浓度; z_i 为化合价。

扩散系数为温度的函数^[19, 30-31], 可以表示为

$$D_i = \left[D_i^0 \exp(-\alpha_i c_{\text{NO}_3^-}) + D_i^{\text{min}} \right] [1 + \delta(T - T_o)], \quad (36)$$

式中: D_i^0 为无限稀释时的扩散系数; D_i^{min} 为无限硝酸盐浓度下的扩散系数; α_i 为拟合参数; $c_{\text{NO}_3^-}$ 为局部硝酸盐浓度; T_o 为环境温度。扩散系数的温度依赖性在 2~3 $\%/^\circ\text{C}$ 范围内, 因此 δ 取 0.025 K^{-1} 。在阳极边界处, 通量边界条件^[10]为

$$D_i \nabla c_i|_{\Gamma_4} = -k_t c_i, \quad (37)$$

式中: k_t 为电解质线性动力学的速率常数。边界 17 和 18 被指定为流出边界条件。这些物理学模型与流体动力学模型相耦合。

3.3.6 材料去除模型

当激光功率密度较低时, 总的材料去除量被定义为由法拉第定律定义的电化学加工的材料去除以及由温度引起的离子加速扩散导致材料去除。给定占空比为 ζ 的脉冲电压, 则法向体积材料去除速度为

$$\mathbf{v}_{n_i} = \eta_1 \omega \mathbf{i}_n \zeta + D_i \nabla c_i \cdot \mathbf{V}_w, \quad (38)$$

式中: η_1 为电流效率; \mathbf{i}_n 为电流密度矢量; $\omega = M_w/(\rho_w zF)$ 为体积电化学当量, 其中 z 为离子的价数;

V_w 为工件的摩尔体积, $V_w = M_w / \rho_w$; M_w 为工件的摩尔质量; ρ_w 为工件的密度; 电流效率表示为 $\eta_1 = (M_{\text{true}} / M_{\text{theoretical}}) \cdot 100\%$ 。

当激光功率密度较高时,总的材料去除量除了激光热作用驱动下的电化学溶解和离子加速扩散实现的材料去除外,还涉及激光通过热烧蚀实现的材料去除,以及高能束激光击穿电解液产生的等离子冲击力 and 空泡溃灭产生的射流冲击力引起的材料去除。

当激光作用于工件表面使其温度达到烧蚀温度后,材料发生相变,进而被去除。激光引起的烧蚀热通量表示为

$$q_a \Big|_{\Gamma_a} = h_a (T_a - T), \quad (39)$$

式中: q_a 表示工件材料烧蚀吸收的热通量; T_a 表示烧蚀温度; $h_a = h_a(T)$ 是与温度相关的传热系数。因此,由激光热烧蚀引起的材料去除速度可表示为

$$v_a = \frac{q_a}{\rho_w H_s}, \quad (40)$$

式中: v_a 表示激光热烧蚀实现的材料去除速度; H_s 表示升华热。

等离子体冲击波压强[7,19]可以表示为

$$p_1 = 0.01 \left(\frac{\alpha_p}{2\alpha_p + 3} \right)^{0.5} Z^{0.5} (a_A Q_{\text{eff}})^{0.5}, \quad (41)$$

式中: p_1 为等离子体刻蚀压强; α_p 为激光等离子体热力学能转化为热能的比例系数; Z 为约束介质和被作用工件的折合阻抗; a_A 为工件对激光的吸收比; Q_{eff} 为有效激光功率密度。气泡溃灭所产生的射流冲击力对工件的压强^[7,19]为

$$p_2 = \frac{\rho_1 c_1 \rho_e c_e}{\rho_1 c_1 + \rho_e c_e} u, \quad (42)$$

式中: c_1 为液体中的声速; c_e 为工件中的声速; u 为射流冲击速率。在激光辐照应力作用下,发生弹性变形的电极的电势变化值为

$$\Delta V_2 = - \frac{V_m \Delta p}{zF}, \quad (43)$$

式中: V_m 为工件的摩尔体积。根据法拉第定律导出由激光辐照应力引起的阳极金属溶解速度为

$$v_{n_2} = \eta_2 \omega i_{n_2} \cdot \zeta, \quad (44)$$

式中: η_2 为电流效率; i_{n_2} 为电流密度矢量。

因此,当激光以热效应和力效应共同作用于工件表面时,法向阳极材料的去除速度可以表示为

$$v_n = \eta_2 \omega i_{n_2} \cdot \zeta + D_i \nabla c_i \cdot V_w + v_a. \quad (45)$$

4 管电极耦合激光电解复合加工仿真分析

为了提高计算效率,对仿真模型进行了简化,并作出以下假设:激光能量在时空上呈高斯分布;采用压力入口,忽略射流冲击刻蚀的影响;阳极电化学反应符合

法拉第定律,电势分布符合拉普拉斯方程;电解质是不可压缩的黏性流体;不考虑电解液的汽化和蒸发;流场受质量守恒定律和动量守恒定律的约束;工件材料的热物理性质不随温度变化;电解液的电导率仅受温度的影响。模拟参数如表1所示。

表1 模拟参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value	Unit
Voltage	12	V
Electrolyte conductivity	12.5	S/m
Initial electrolyte temperature	293	K
Workpiece material	DD6	
Machining time	1	s
Interelectrode gap	50	μm
Laser power density	5×10^7	W/cm^2
Fiber diameter	200	μm
Current efficiency	50%	
Density	8780	kg/m^3
Ideal gas constant	8.314	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
Faraday constant	96500	C

管电极耦合激光电解复合加工仿真结果如图6所示。图6显示了加工时间为0、0.5、1.0 s时的流场分布、压力分布、电场分布和温度分布情况。图6(a)~(c)所示的流场分布结果表明,在给定入口压力为1 MPa的条件下,电解液从管状流道入口进入工具阴极和工件阳极的间隙,随后从出口流出。在该过程中,得益于输入的高压,电解液流速迅速增大,有助于极间间隙产物和气泡的快速排出。图6(d)~(f)所示的压力分布结果表明,电解液压力主要集中在工具阴极与工件阳极相对应的区域内,并且随着电解去除量的增加,极间间隙受压面积增加。图6(g)~(i)所示的电场分布结果表明,电解液内部的电势分布和电流密度分布受到工件表面形貌的影响,随着加工时间增加,极间间隙逐渐增大,电势分布和电流密度分布发生变化。图6(j)~(l)所示的温度分布结果表明,温度分布主要受激光热源的影响,温升主要集中在工件中心直径约为0.2 mm的圆形区域内,该区域的直径对应为用于传导激光的光纤内径的大小。图6所示仿真结果直观地呈现出了激光电解复合能场的流场分布、电场分布、压力分布和温度分布情况,给出了激光电解复合加工去除材料的形貌演化趋势,有助于评估激光电解复合加工过程中工件不同位置处的材料去除情况。

图7给出了靠近工具阴极和工件阳极处的截线图,其模型所有域和边界均与图5一致。图7(a)展示了靠近工具阴极处的截线位置,图7(b)展示了靠近工件阳极处的截线位置。图8是图7中靠近工具阴极和工件阳极截线位置处的物理场参数随时间的变化。从

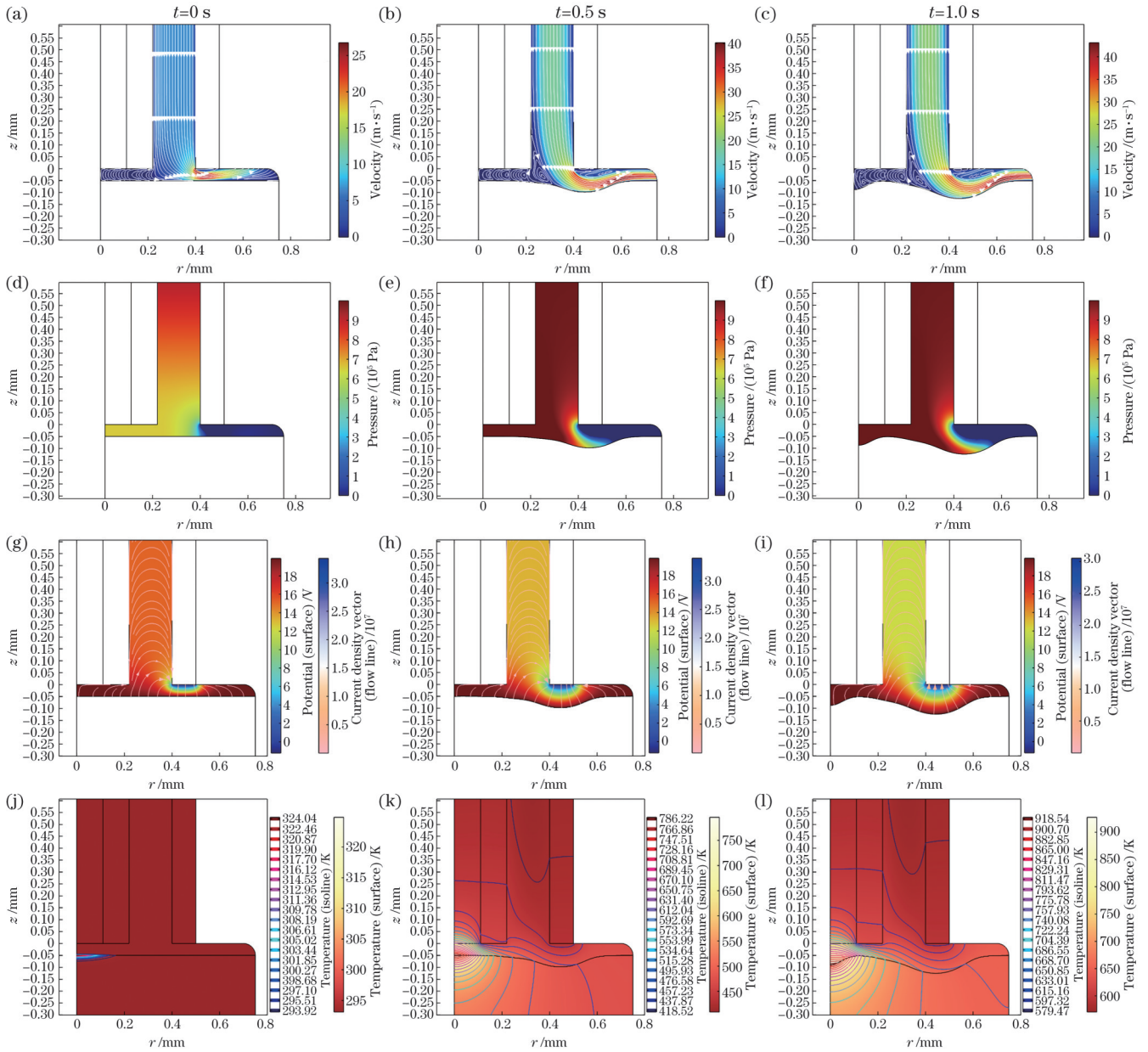


图 6 管电极耦合激光电解复合加工仿真结果。(a)~(c)不同时刻的流场分布;(d)~(f)不同时刻的压力分布;(g)~(i)不同时刻的电场分布;(j)~(l)不同时刻的温度分布

Fig. 6 Simulation results of tubular electrode-coupled laser and electrochemical hybrid machining. (a)–(c) Flow field distributions at different time; (d)–(f) pressure distributions at different time; (g)–(i) electric field distributions at different time; (j)–(l) temperature distributions at different time

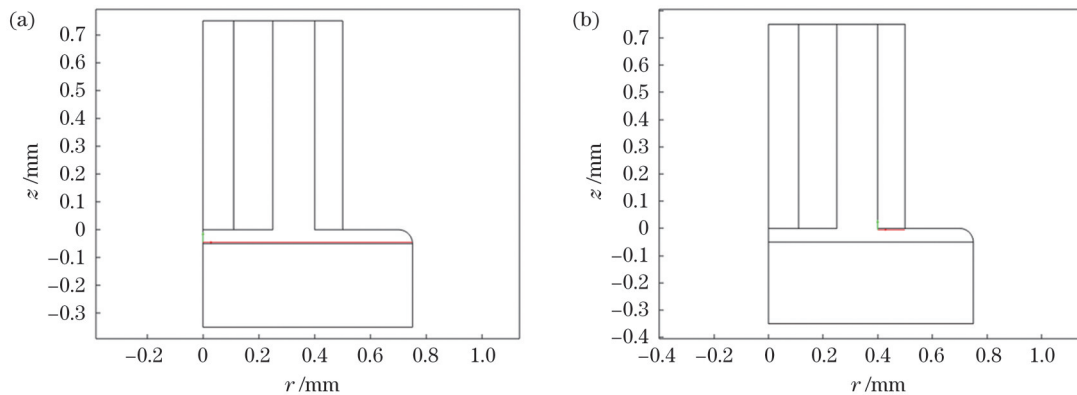


图 7 截线图。(a)靠近工具阴极处的截线;(b)靠近工件阳极处的截线

Fig. 7 Cross-sectional profiles. (a) Cross-section near the cathode; (b) cross-section near the anode

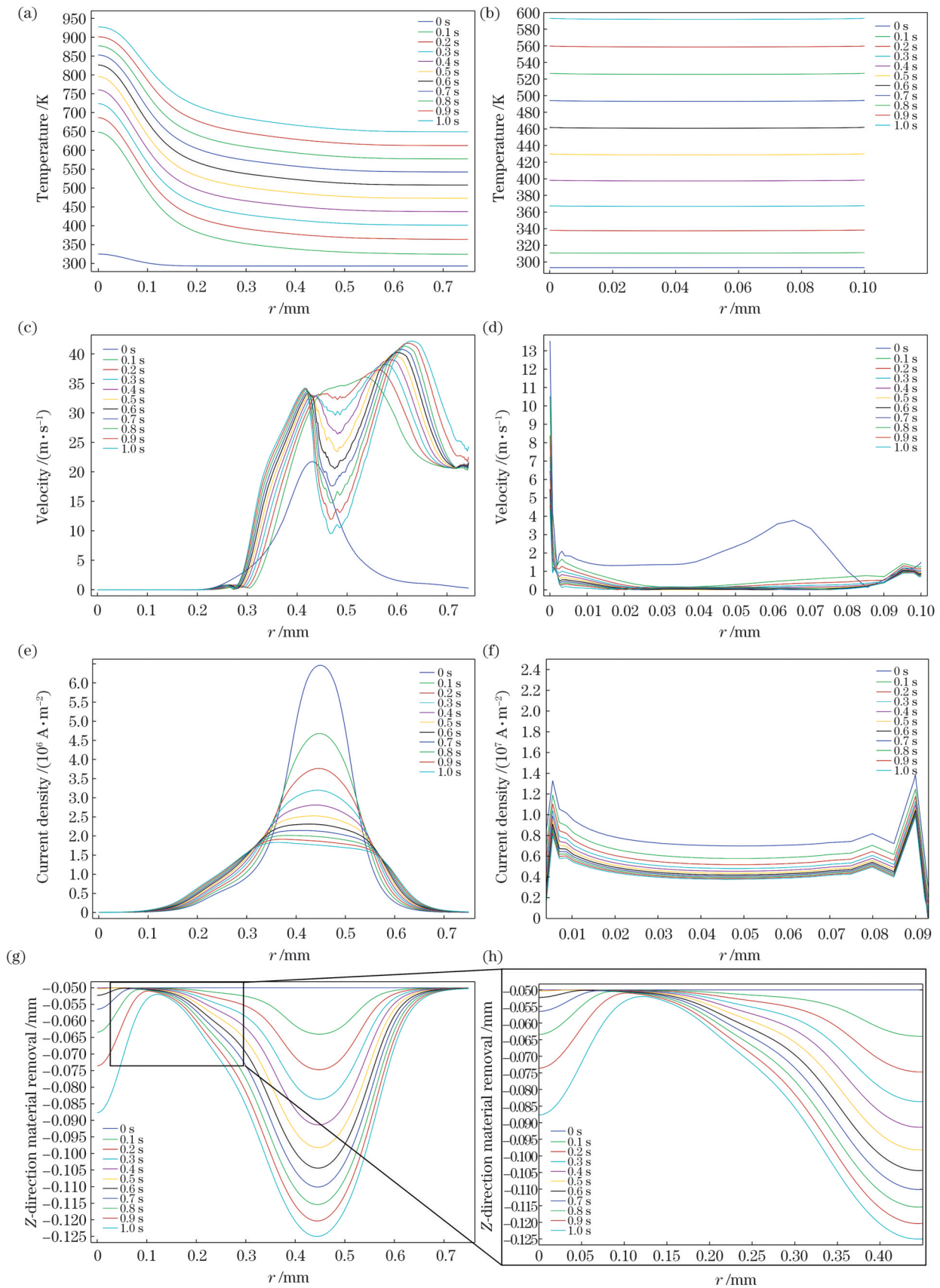


图 8 工件表面温度、电解液流速、电解液电流密度和 Z 向材料去除量随加工深度和加工时间的变化趋势。(a)(b) 工件表面温度的变化趋势；(c)(d) 电解液流速的变化趋势；(e)(f) 电解液电流密度的变化趋势；(g)(h) Z 向材料去除量的变化趋势

Fig. 8 Variations of workpiece surface temperature, electrolyte velocity, electrolyte current density, and Z-direction material removal with machining depth and processing time. (a)(b) Variation of workpiece surface temperature; (c)(d) variation of electrolyte velocity; (e)(f) variation of electrolyte current density; (g)(h) variation of with Z-direction material removal

图 8(a)、(b)可以看出,工件阳极中心区域的温度变化主要由激光热传导引起,在激光光斑直径范围内,温度场呈现为高斯分布(与激光热源一致)。热传导作用导致该区域附近电解液、电极和工件的温度升高,而且温度随着传导距离的增加而降低,随时间延长而逐渐升高。从图 8(c)、(d)可以看出,在 0 s 到 0.1 s 过程中,流场存在初始化的过程,因此流速会有大幅度变化的情况,并且随着时间延长而逐渐趋于稳定。此外,由于工具阴极处存在拐角和流道变窄的情况,因此该处的流速相对于其他处有明显变化。图 8(e)展示了电流密度分布情况,电流密度与阳极到阴极的距离有关。电流密度在距离原点位置 0.45 mm 处(即电极端面中心位置处)最大;随着时间延长,电化学加工去除的阳极工件材料增加,这使得工具阴极与工件阳极间的距离增大,因此电流密度随时间延长呈现下降趋势。图 8(f)所示 0.005 mm 处电流密度的升高是由激光热效应引起的电极内壁附近温升导致的。图 8(g)展示了激光电解共同作用得到的工件上表面轮廓。从图 8(h)可以看出激光光斑半径区域附近的材料去除速度有一定的增加,这是由于激光辐照引起的温升使得温度场发生变化,电解液电导率和电流密度升高,因此材料的去除速度有所提高。这一现象说明激光具有定域蚀除的作用,同时激光可以促进电化学加工过程。

5 管电极耦合激光电解复合加工小孔实验

5.1 实验设备与材料

激光电解实验设备主要包括英谷纳秒绿光激光器(波长为 532 nm,脉冲宽度为 100 ns)和 IT6932A 直流电源。激光加工参数:激光平均功率为 15 W 和 30 W,激光重复频率为 40 kHz。电解加工参数:电解电压为 20 V,电解液入口压力为 1 MPa,电解液采用质量分数为 12% 的 NaNO_3 溶液。管电极采用外径为 0.8 mm、壁厚为 0.1 mm 的不锈钢毛细管。光纤采用

适用于 532 nm 波段芯径为 200 μm 的石英光纤。管电极的进给速度设置为 1.5 mm/min(匀速进给),加工初始间隙设置为 100 μm 。实验材料为 DD6 镍基单晶合金,其厚度分别为 20 mm 和 50 mm。实验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

Parameter	Content
Electrolyte	NaNO_3 (mass fraction: 12%)
Electrolyte pressure	1 MPa
Electrolytic voltage	20 V
Laser wavelength	532 nm
Laser pulse duration	100 ns
Laser average power	15, 30 W
Laser repetition rate	40 kHz
Fiber diameter	220 μm
Outer diameter of tubular electrode	0.8 mm

5.2 实验结果分析

图 9 所示为电解加工和激光电解复合加工盲孔的三维形貌图。对比图 9(a)、(b)可以看出仅管电极电解加工的盲孔中心有明显的凸起,而管电极耦合激光电解复合加工的盲孔中心并无凸起。这说明采用管电极电解加工仅仅依靠管电极形状(外径为 0.8 mm,内径为 0.6 mm)是无法对盲孔中心区域进行电解材料去除的,而采用管电极耦合激光电解复合加工可以在原有电解加工的基础上实现激光诱导复合加工的材料去除,因而实现了盲孔中心材料残余的有效去除。这一结果说明采用管电极耦合激光电解复合加工技术可以实现超大深径比小孔的理想加工。此外,盲孔中心材料残余的去除可以降低由管电极堵塞造成的电极短路问题,从而延长了管电极的使用寿命,节省了成本。

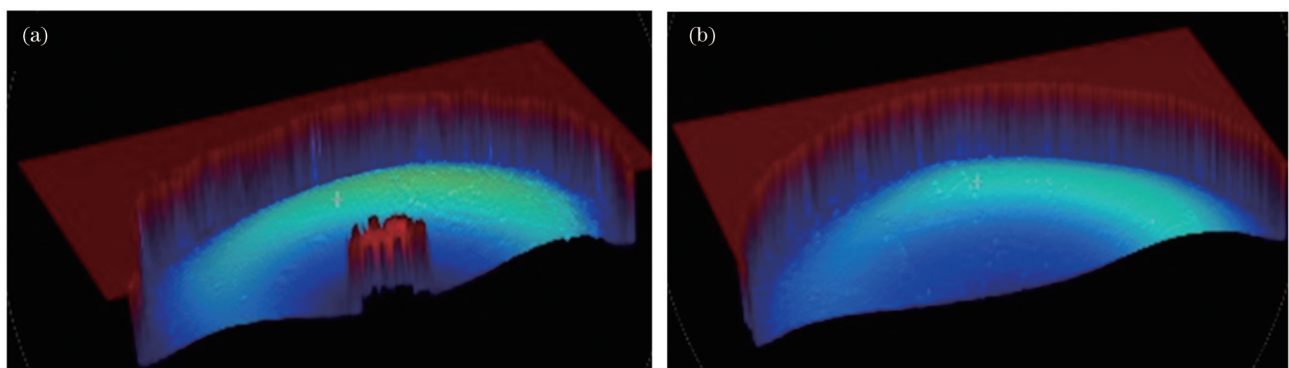


图 9 盲孔剖面的三维形貌。(a)电解加工盲孔剖面的三维形貌;(b)激光电解复合加工盲孔剖面的三维形貌

Fig. 9 Three-dimensional morphology of blind hole cross-section. (a) Three-dimensional morphology of blind hole cross-section in electrochemical machining; (b) three-dimension morphology of blind hole cross-section in laser and electrochemical hybrid machining

图 10 给出了通孔的表面形貌,其中图 10(a)~(c)展示的是深度为 20 mm 的小孔入口表面形貌、小孔横截面形貌和小孔出口表面形貌,图 10(d)~(f)展示的是图 10(a)~(c)中小孔边缘的局部放大图。可以看出,三个位置处的孔径相差较小,孔壁几乎无重铸层,小孔出口质量优于入口质量,小孔具有较大的深径比和较小的锥度。图 10(g)~(i)依次展示的是深度为 50 mm 的小孔入口表面形貌、小孔横截面形貌和小孔出口表面形貌,图 10(j)~(l)展示的是图 10(g)~(i)中小孔边缘的局部放大图。可以看出,小孔出入口直径略有差别,入口孔径大于出口孔径,孔壁几乎无重铸层,小孔出口加工质量优于入口质量。图 11 是 20 mm 和 50 mm 深通孔的孔壁形貌,孔壁平整光滑,粗糙度

较低,几乎无裂纹和重铸层等缺陷。表 3 给出了深度为 20 mm 和 50 mm 通孔的出入口直径、深径比和锥度值。当孔深为 20 mm 时,出入口直径相差不大,差值仅为 30 μm ;随着孔深达到 50 mm,出入口直径差值逐渐增大,差值达到了 140 μm 。综合实验结果来看,激光电解复合加工弥补了单一激光或电解加工的不足,具备制造超大深径比($\geq 50:1$)小孔的潜力。在后续的研究中可以进一步采取如下改进措施:1) 通过改进管电极侧壁绝缘的方式来提升侧壁绝缘层的均匀性和耐久性;2) 采用管电极导向进给方式提升小孔的垂直度;3) 通过控制管电极与工件的初始加工间隙以及调节激光电解加工工艺参数来提高小孔的表面质量、圆度和深度等。

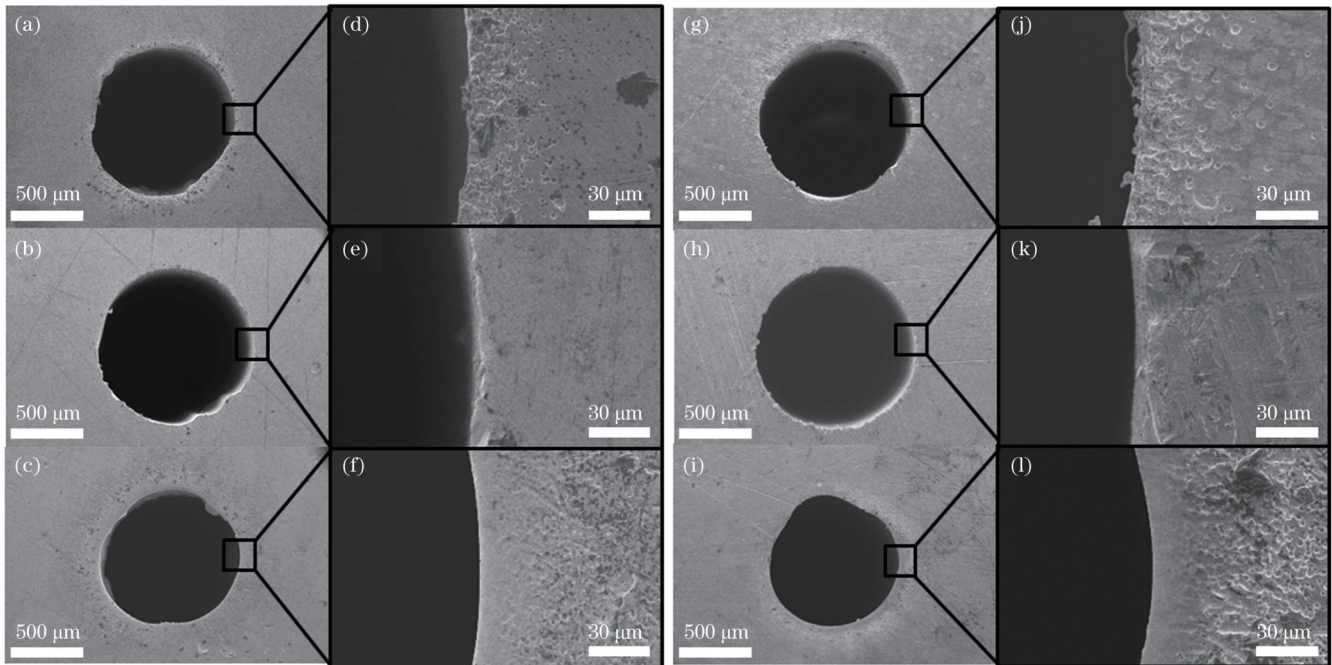


图 10 高深径比小孔形貌及小孔边缘局部放大图,其中第一行图为小孔入口形貌,第二行图为小孔横截面形貌,第三行图为小孔出口形貌

Fig. 10 Morphology of small holes with high aspect ratio and local magnified images of the small holes edge, where the first row shows the small holes entrance, the second row shows small holes cross-section, and the third row shows the small holes exit

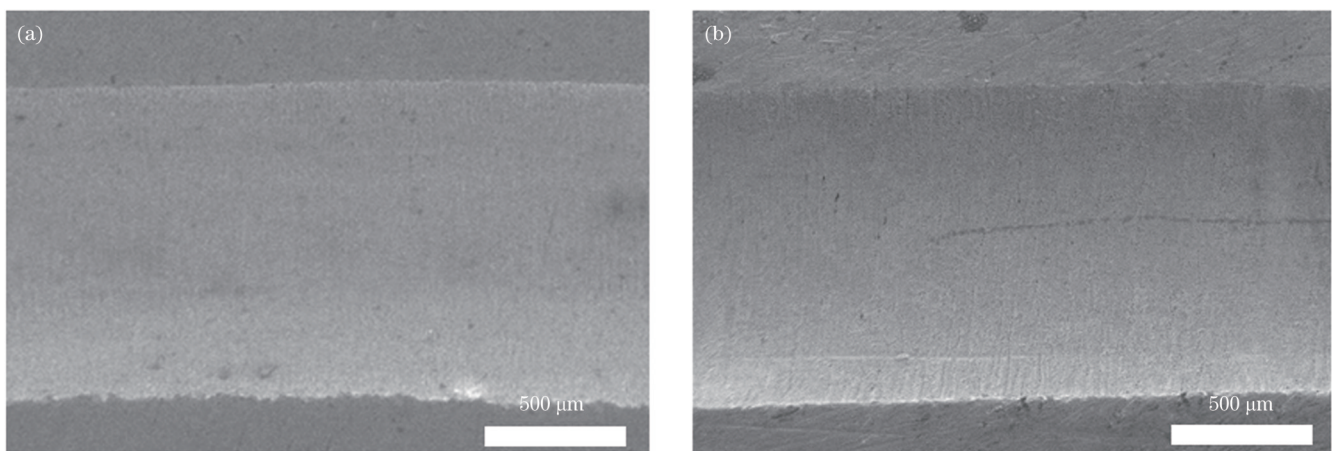


图 11 高深径比小孔的侧壁形貌。(a) 20 mm 通孔;(b) 50 mm 通孔

Fig. 11 Side wall morphology of small holes with high aspect ratio. (a) 20 mm through-hole; (b) 50 mm through-hole

表 3 实验结果
Table 3 Experimental results

Through-hole depth /mm	Parameter	Value
20	Inlet diameter /mm	1.26
	Outlet diameter /mm	1.23
	Aspect ratio	16:1
	Taper /($^{\circ}$)	0.04
50	Inlet diameter /mm	1.25
	Outlet diameter /mm	1.11
	Aspect ratio	42:1
	Taper /($^{\circ}$)	0.08

6 结 论

激光电解复合加工通常存在电化学加工引起的杂散腐蚀缺陷和激光加工引起的重铸层缺陷,为了避免缺陷产生,提高加工表面质量,笔者设计了一种管电极耦合激光电解复合加工工艺,实现了管电极内部的激光能量和电化学能量的同轴传导以及在加工间隙处的可控耦合,有效避免了杂散腐蚀和重铸层等缺陷损伤,适用于高品质超大深径/宽比结构的加工。根据激光能量和电化学能量的可控调节,提出了以激光为主导、以电解为主导以及激光电解协同加工的作用机制,分析了激光的热力效应对激光电解复合加工的影响以及脉冲宽度对激光电解复合加工的影响;建立了复合能量作用下材料去除动力学演变的理论模型,结合仿真模型初步探究了激光电解复合能场随时间的分布情况以及激光对复合加工形貌的影响;通过实验研究验证了激光电解复合加工的优势,并加工出了孔径为 1.25 mm、深径比高达 42:1 的几乎无重铸层的小孔。本研究为探索高品质高深径/宽比复杂结构的加工工艺奠定了理论和工艺基础。

参 考 文 献

- [1] 殷振, 张鹏, 于大国, 等. 超声振动辅助电火花微孔加工研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(8): 53-63.
Yin Z, Zhang P, Yu D G, et al. Research progress on ultrasonic vibration-assisted EDM micro-hole machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(8): 53-63.
- [2] Khatri B C, Rathod P, Valaki J B. Ultrasonic vibration-assisted electric discharge machining: a research review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(2): 319-330.
- [3] Dhupal D, Doloi B, Bhattacharyya B. Modeling and optimization on Nd: YAG laser turned micro-grooving of cylindrical ceramic material[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(9): 917-925.
- [4] Kibria G, Doloi B, Bhattacharyya B. Experimental analysis on Nd: YAG laser micro-turning of alumina ceramic[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(5): 643-650.
- [5] 王水旺, 丁焯, 程柏, 等. 水导激光微加工机理与研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002404.
Wang S W, Ding Y, Cheng B, et al. Mechanism and research

- advances of water-jet guided laser micromachining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002404.
- [6] 张光辉, 黄宇星, 黄平, 等. 水导激光技术中水-光耦合传能规律研究[J]. 激光技术, 2022, 46(6): 749-754.
Zhang G H, Huang Y X, Huang P, et al. Study on energy transmission law of water-laser coupling in water-jet guided laser technology[J]. Laser Technology, 2022, 46(6): 749-754.
- [7] 张朝阳, 秦昌亮, 冯钦玉, 等. 脉冲激光电化学复合的定性研究及三维微细蚀加工[J]. 机械工程学报, 2014, 50(23): 200-206.
Zhang Z Y, Qin C L, Feng Q Y, et al. Investigation on localisation and three-dimensional micro-etching based on pulse laser electrochemical machining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(23): 200-206.
- [8] Wang Y F, Zhang W W. Theoretical and experimental study on hybrid laser and shaped tube electrochemical machining (laser-STEM) process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(5): 1601-1615.
- [9] Wang Y F, Yang F, Zhang W W. Development of laser and electrochemical machining based on internal total reflection[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(14): E481-E488.
- [10] Saxena K K, Chen X L, Qian J, et al. A tool-based precision hybrid laser-electrochemical micromachining process: process analysis by multidisciplinary simulations and experiments[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(14): 143502.
- [11] Saxena K K, Qian J, Reynaerts D. Development and investigations on a hybrid tooling concept for coaxial and concurrent application of electrochemical and laser micromachining processes[J]. Precision Engineering, 2020, 65: 171-184.
- [12] Saxena K K, Qian J, Reynaerts D. A tool-based hybrid laser-electrochemical micromachining process: experimental investigations and synergistic effects[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 155: 103569.
- [13] 张朝阳, 王耀民, 陈飞, 等. 过程稳定性对纳秒脉冲电解加工精度的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(1): 66-70.
Zhang Z Y, Wang Y M, Chen F, et al. Effects of process stability on precision of micro-ECM using nanosecond pulse current[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(1): 66-70.
- [14] Zhu H, Jiang Z X, Han J C, et al. Fabrication of oxide-free dimple structure on germanium via electrochemical jet machining enhanced by opposing laser irradiation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85: 623-635.
- [15] Zhang Z Y, Jiang Y J, Huang L, et al. Experiment study of laser thermal enhanced electrochemical deposition[J]. Microsystem Technologies, 2017, 23(6): 1695-1701.
- [16] 孙树峰, 邵勇. 水辅助激光诱导等离子体背部刻蚀 Pyrex7740 玻璃[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101404.
Sun S F, Shao Y. Water-assisted laser induced plasma backside etching of Pyrex7740 glass[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101404.
- [17] 曹颖, 孙树峰, 张丰云, 等. 激光高温化学复合加工 GH4049 合金化学液筛选研究[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(6): 33-39.
Cao Y, Sun S F, Zhang F Y, et al. Screening of chemical solution for laser high temperature chemical composite processing of GH4049 alloy[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(6): 33-39.
- [18] 丁瑞堂, 孙树峰, 刘庆玉, 等. 激光化学复合抛光工艺参量对 304 不锈钢性能的影响[J]. 激光技术, 2019, 43(3): 295-300.
Ding R T, Sun S F, Liu Q Y, et al. Effect of process parameters of laser chemical composite polishing on 304 stainless steel surface properties[J]. Laser Technology, 2019, 43(3): 295-300.
- [19] Deconinck D, van Damme S, Deconinck J. A temperature dependent multi-ion model for time accurate numerical simulation of the electrochemical machining process. Part I: theoretical basis [J]. Electrochimica Acta, 2012, 60: 321-328.
- [20] 印洁, 张朝阳, 曾永彬, 等. 激光电化学复合加工的温度场与电场模拟研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 121403.

- Yin J, Zhang Z Y, Zeng Y B, et al. Simulation research of temperature field and electric field in laser electrochemical compound processing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(12): 121403.
- [21] Zhang Z Y, Feng Q Y, Cai M X, et al. Research on stress-etching complex microstructure of aluminum alloy in laser electrochemical machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(9): 2157-2165.
- [22] Zhang H, Xu J W, Wang J M. Investigation of a novel hybrid process of laser drilling assisted with jet electrochemical machining [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(11): 1242-1249.
- [23] 张洪峰. 超薄壁材料的激光空化冲击微成形机理及特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- Zhang H F. Research on the mechanism and characteristics of laser-induced cavitation impact micro-forming on ultra-thin wall materials [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [24] 强豪. 水环境激光空泡与金属靶材相互作用过程及机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- Qiang H. Study on interaction mechanism between laser-induced cavitation bubble and metal target underwater[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [25] Dickinson E J F, Wain A J. The Butler-Volmer equation in electrochemical theory: origins, value, and practical application[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2020, 872: 114145.
- [26] Deconinck D, van Damme S, Albu C, et al. Study of the effects of heat removal on the copying accuracy of the electrochemical machining process[J]. *Electrochimica Acta*, 2011, 56(16): 5642-5649.
- [27] Sogandares F M, Fry E S. Absorption spectrum (340 - 640 nm) of pure water. I. Photothermal measurements[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(33): 8699-8709.
- [28] Hale G M, Query M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μm wavelength region[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(3): 555-563.
- [29] de Silva A K M, Altena H S J, McGeough J A. Precision ECM by process characteristic modelling[J]. *CIRP Annals*, 2000, 49(1): 151-155.
- [30] Lohregel M M, Klüppel I, Rosenkranz C, et al. Microscopic investigations of electrochemical machining of Fe in NaNO_3 [J]. *Electrochimica Acta*, 2003, 48(20/21/22): 3203-3211.
- [31] Deconinck D, Hoogsteen W, Deconinck J. A temperature dependent multi-ion model for time accurate numerical simulation of the electrochemical machining process. Part III: experimental validation[J]. *Electrochimica Acta*, 2013, 103: 161-173.

Theoretical Analysis and Experimental Research on Tubular Electrode-Coupled Laser and Electrochemical Hybrid Machining

Yang Xue^{1,2}, Yang Chengjuan^{1,2*}, Tong Hao^{3,4}, Qi Huimin^{1,2}, Yao Yao^{3,4}, Yang Zhen^{1,2}

¹School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

³State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

⁴Beijing Key Lab of Precision/Ultra-Precision Manufacturing Equipment and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract

Objective Laser and electrochemical hybrid machining is a composite processing method that combines laser and electrochemical processing. It can be used to process hard conductive materials. It can accelerate the electrochemical dissolution rate, avoiding recasting layers, thus improving the surface quality. This study proposes a tubular electrode-coupled laser and electrochemical hybrid machining technology that uses a newly designed tubular electrode. This realizes coaxial transmission of laser and electrochemical energy inside the tubular electrode and controllable coupling at the processing gap, which is suitable for high-quality small hole processing with a high aspect ratio. A coupling mechanism dominated by laser and an electrochemical processing is proposed based on the controllable adjustment of the laser and electrochemical energy at the processing gap. The effects of the temperature rise in the laser irradiation zone on the electrolyte conductivity, current density, liquid-phase mass transfer, and electrochemical dissolution rate, as well as the effects of bubbles and impurities generated during electrolysis on the laser energy. Material removal models for laser and electrochemical hybrid machining are established, and preliminary simulation analysis and experimental research on laser and electrochemical hybrid machining are conducted.

Methods This study introduced a tool for laser and electrochemical hybrid machining with a tubular electrode that confined the electrolyte and laser beam coaxially or asynchronously. In addition, it utilized a coaxial optical fiber inside the tubular electrode to enable total internal reflection of the laser, thereby achieving independent control of laser and electrochemical energy within the tubular electrode. Based on this process, a coupling mechanism for the laser and electrochemical energy was explored, as well as the mechanisms where the laser and electrolysis dominate in the hybrid machining process. By investigating the temporal and spatial distributions of local temperature and stress induced by coupled energy, we study the influence of laser on mass transport and electrode potential in the micro-region of electrochemical machining. A theoretical model for the kinetic behavior of materials removal

under the action of hybrid energy was established, and a preliminary simulation analysis of laser and electrochemical hybrid machining was conducted. The results of this study laid a theoretical foundation for the fabrication of complex structures with high quality and aspect ratio.

Results and Discussions First, the influence of laser power density on the machining capability of workpiece materials is explored (Fig. 2). When the laser power density is low, the laser affects the thermal and electrochemical parameters of the workpiece material and the changes in the electrolyte's electrical conductivity, electrolytic current density, ion diffusion rate, bubble rate, and electrode potential within the machining gap through thermal effects. When the laser power density reaches the electrolyte breakdown threshold, the laser impacts the laser and electrochemical hybrid machining process through both thermal and mechanical effects. Second, based on the controllable adjustment of the laser and electrochemical energy within the tubular electrode, the state changes in the coupling region caused by these energy are classified into three mechanisms: laser-assisted electrochemical machining, laser and electrochemical hybrid machining, and electrolysis-assisted laser machining (Fig. 4). Furthermore, through theoretical analysis and preliminary simulation studies, the electric field and current density distributions in the laser and electrochemical hybrid energy field, the flow field distribution, the temperature distribution, and the resulting machining surface are investigated. This facilitates in the evaluation of material removal at different locations on the workpiece during the laser and electrochemical hybrid machining processes. Finally, three-dimensional morphologies of blind holes produced by the only electrochemical machining and laser and electrochemical hybrid machining are compared. The advantages of the hybrid laser and electrochemical processing are confirmed (Fig. 9). It successfully manufactures through-holes with a diameter of 1.26 mm and a high aspect ratio of 16:1 and through-holes with a diameter of 1.25 mm and high aspect ratios of 42:1 (Figs. 10 and 11).

Conclusions Laser and electrochemical hybrid machining typically suffer from defects such as stray corrosion caused by electrochemical machining and resolidification defects caused by laser machining. To avoid the occurrence of defects and improve the surface quality, this study introduces a tool for laser and electrochemical hybrid machining with a tubular electrode. This enables the coaxial transmission of laser and electrochemical energy within the tubular electrode and the controlled coupling at the machining gap, thereby effectively preventing defects such as stray corrosion and resolidification of layers. This approach is suitable for fabricating complex structures with high quality and aspect ratios. Based on the controllable adjustment of the laser and electrochemical energy, this study proposes mechanisms in which laser and electrolysis dominate, and both cooperate in hybrid machining. The thermal effects of the laser on the laser and electrochemical hybrid machining and the influence of the pulse width of electrolysis on the process are analyzed. This study establishes a theoretical model for the kinetic behavior of material removal under the action of hybrid energy. Preliminary investigations are also conducted on the time and spatial distribution of the hybrid energy field and its impact on the machining surface using simulation models. Through experiments, the advantages of laser and electrochemical hybrid machining are verified. Small holes with a diameter of 1.25 mm and aspect ratio of up to 42:1 without resolidified layers are successfully produced. This study lays a theoretical foundation for the fabrication of complex structures with high quality and aspect ratio.

Key words laser technique; electrolytic processing; theoretical model; coupling mechanism; high aspect ratio; deep holes