

引文格式: 姚尧, 杨雪, 佟浩, 等. 管电极激光电解复合加工研究进展[J]. 航空制造技术, 2026, 69(18): 25010161.

YAO Yao, YANG Xue, TONG Hao, et al. Research progress on laser-electrochemical hybrid machining based on tubular electrodes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(18): 25010161.

## 管电极激光电解复合加工研究进展

姚 尧<sup>1</sup>, 杨 雪<sup>2</sup>, 佟 浩<sup>1</sup>, 李 勇<sup>1</sup>, 刘国栋<sup>3</sup>, 杨成娟<sup>2</sup>

(1. 清华大学机械工程系高端装备界面科学与技术全国重点实验室, 北京 100084;

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. 北京理工大学, 北京 100081)

**[摘要]** 管电极激光电解复合加工是一种新兴的特种加工方法, 具有在难加工金属材料上实现高深宽比结构高效无损伤加工的潜力。该方法通过工具电极实现光-电-液的多能场传输与耦合, 可综合激光加工高效率与电解加工高表面完整性的优势。本文综述了管电极激光电解复合加工在管电极设计制造、复合能场协同材料作用机制和高深径比/高质量小孔加工典型结果的研究进展。分析了各类管电极的能场传输结构原理与特点, 分类梳理了流道导光型和光纤导光型管电极的复合能场耦合特征及其激光传输模式, 并进一步探讨了管电极高效光-液能场耦合输入的方法和技术。根据激光与电解在复合加工中主导能场的不同, 区分了激光辅助电解加工和电解辅助激光加工两种模式, 分析了能场大小及分布对材料去除行为的影响, 阐述了激光电解复合能场作用下的材料去除机理。最后简述了典型难加工材料上的小孔加工试验研究结果, 分析了管电极激光电解复合加工方法的潜在应用场景与未来发展方向, 旨在为特种复合能场加工的后续研究及应用提供参考。

**关键词:** 激光电解复合加工; 管电极; 多能场耦合; 难加工材料; 深小孔加工

**中图分类号:** V26; TG66 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.25010161

## Research Progress on Laser-Electrochemical Hybrid Machining Based on Tubular Electrodes

YAO Yao<sup>1</sup>, YANG Xue<sup>2</sup>, TONG Hao<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, LIU Guodong<sup>3</sup>, YANG Chengjuan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Tribology in Advanced Equipment, Department of Mechanical Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design, Ministry of Education,

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

3. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**[ABSTRACT]** Laser-electrochemical hybrid machining (LECM) based on tubular electrode is an emerging non-traditional machining method with great potential for high-efficiency and damage-free fabrication of high-aspect-ratio features in difficult-to-machine superalloys. The tubular electrode enables simultaneous coupling and transmission of laser, electrical, and fluid energy fields, thereby integrating the high efficiency of laser machining with the great surface integrity of electrochemical machining. In this paper, recent studies on LECM based on tubular electrodes are firstly reviewed, including electrode design and fabrication, hybrid field coupling mechanisms in material interaction, and representative results in high-aspect-ratio and high-quality small-hole machining. The structural principles and characteristics of various

收稿日期: 2025-11-10; 退修日期: 2025-11-26; 录用日期: 2025-12-08

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFF0500200, 2021YFF0500201, 2021YFF0500202); 高端装备界面科学与技术全国重点实验室自主研究课题(SKLT2022B08)

通信作者: 佟浩, 副研究员, 博士, 研究方向为多能场复合加工、微细特种加工工艺及装备。

electrode configurations are analyzed, while the coupling and transmission mechanisms of both “flow-channel laser-guiding” and “optical fiber laser-guiding” tubular electrodes are systematically summarized. In addition, technical methods for achieving efficient laser-liquid energy-field coupling within tubular electrodes are further discussed. According to the dominant energy field in the hybrid machining process, the material removal mechanisms under the interactions of laser and electrochemical hybrid fields are discussed, distinguishing between laser-assisted electrochemical machining and electrochemical-assisted laser processing. Furthermore, the influence of the intensity and spatial distribution of the energy fields on material removal behavior is preliminarily investigated. Finally, representative experimental results on typical difficult-to-machine materials are presented. The potential applications and future development prospects of this technology are outlined. This paper aims to provide theoretical insights and technical guidance for further research and industrial implementation of LECM based on tubular electrodes.

**Keywords:** Laser-electrochemical hybrid machining (LECM); Tubular electrodes; Multi-energy field coupling; Difficult-to-machine superalloys; Deep small hole machining

镍基合金、钛合金等难加工金属合金材料在航空航天、能源动力及医疗器械等领域应用广泛,亟需发展适配此类材料零部件的先进加工技术。针对关键零部件中的深孔、深槽等高深宽比结构,在提升加工效率的前提下,对加工精度和表面质量也提出了更高要求<sup>[1]</sup>。

机械钻削在加工高硬度高强度材料时存在刀具磨损严重和表面毛刺等问题<sup>[2]</sup>。电火花加工和常规激光加工的效率虽然高,但是加工表面易产生热影响区和重铸层<sup>[3]</sup>。超短脉冲激光加工精度高,无热影响区,但是加工屑排出困难,加工结构的深宽比受限。电解加工虽具有加工表面完整性好的优点,但是加工尺寸精度、加工效率仍有待提升<sup>[4]</sup>。

针对难加工金属合金中大深径比小孔(深径比 $\geq 20$ )的加工难题,学者们不断尝试组合与复合加工工艺技术的开发。水导激光加工使用水射流引导传输激光至加工区域<sup>[5]</sup>,明显改善了常规激光加工的排屑与冷却效果,有效提升了加工表面质量和加工精度,但是目前仍难以实现深宽比 $>20$ 的深小孔结构加工。管电极电火花电解复合加工采用同一根电极<sup>[6-7]</sup>,在低电导率工作液中,可实现以端部电火花加工为主的小孔成形,以及以侧面电解加工为主的重铸层同步去除,但该工艺存在电极损耗较大、小孔锥度偏高的问题。管电极激光电解复合加工使用特定结构的工具电极,将激光、电解液、加工电场传输至加工间隙,并且依靠工具电极的进给实现多能场在电极端部耦合,并向材料内部开展纵深加工,是一种深小孔等高深宽比结构加工的有效途径。

目前,国内外学者已提出并设计了多种管电极结构,并围绕各自的结构特征开展了原理验证与参数优化试验,初步验证了该方法在难加工金属合金材料加工领域的应用潜力。然而,管电极内部的能场分布特征及其

对材料去除行为的影响规律尚不清晰,多能场之间的耦合作用机制缺乏系统揭示,复合加工工艺在加工效率与尺寸精度方面仍存在共性瓶颈。基于此,本文旨在梳理分析管电极激光电解复合加工研究进展,为后续相关研究提供一定参考。

## 1 管电极的结构原理

在管电极激光电解复合加工中,管电极作为电化学反应的阴极,同时实现激光传导与电解液供给。根据激光能场的传输特点,可将现有的管电极结构分为两类。(1)流道导光型管电极:金属管作为阴极传导电场,而激光在管电极内孔流道的电解液中传输至加工区。(2)光纤导光型管电极:由管电极内置的固体光纤传输激光,不受电解液流动条件的影响。两类管电极结构在能场的耦合效率、抗干扰能力及功率承载能力上各有侧重,进而一定程度上决定了其加工能力及应用边界。

### 1.1 流道导光型管电极

水导激光加工(Water-jet guided laser machining)已验证了使用纯水介质进行“液束导光”的可行性<sup>[8]</sup>。依托高质量射流水柱与周围气体环境的折射率之差形成的全反射边界,或者依靠射流内部的折射率梯度,直径数十至数百微米的射流水束能够定向传输脉冲激光,显著改善加工排屑与冷却效果,增大了常规激光加工的有效加工深度。喷射液束电解辅助激光加工(Laser drilling assisted with jet electrochemical machining)将纯水更换为特定成分浓度的电解液并施加外部电场<sup>[9-10]</sup>,尽管电场作用下电解液的离子迁移、气泡析出与局部温升等多物理场耦合效应会影响液束成形与光学稳定性,但通过合理设计的加工头喷嘴结构与匹配的压力/流量参数窗口,电解液射流同样可作为激光的传输通道,承

担稳定的导光与能量耦合作用。电解液中的正负离子在外加电场的作用下定向运动传递电荷,在工具阴极和工件阳极之间构成电解回路,促使金属工件表面发生阳极电化学溶解,进一步去除激光加工产生的重铸层与热影响区。

相较于自由液束,管电极的内孔流道能够延长电解液束的可控传输距离,并通过电极的进给运动增强加工间隙的电流密度与产物排出能力,实现激光电解复合场场的深入加工。2019年,中国科学院宁波材料技术与工程研究所 Wang 等<sup>[11-12]</sup>提出了内壁附有低折射率约束层的管电极结构。如图 1(a)所示<sup>[11]</sup>,该管电极由金属管、低折射率内衬层(聚四氟乙烯, Teflon),以及金属管外壁的绝缘层构成。在复合加工过程中,金属管传导电流实现阳极工件的电解溶解,电解液通过管电极内孔喷出进行加工区的传质与冷却。因电解液折射率为 1.33~1.35,特氟龙内衬层折射率为 1.24~1.29,激光束在内孔电解液中传播至电解液与内衬层交界面时,入射角达到全反射临界角的光束会发生全反射并回流至电解液内,持续向前传输至加工区域,从而实现激光与电解能场协同作用。

2020 年,比利时鲁汶大学 Saxena 等<sup>[13-14]</sup>设计了一种反射型管电极结构,如图 1(b)所示。该管电极由外层的金属管与同轴内置的石英毛细管组成:作为电解加工阴极的金属管,依靠内壁面反射引导激光在电解液中沿轴向传播,内置的石英毛细管用于隔绝电解液对金属内壁的化学腐蚀,保护金属电极的端部免受激光的热烧伤。该电极结构的导光机制具有不受电解液折射率限

制的优点,但由于金属管的内壁并非理想的反射镜面,表面的漫反射及材料吸收会造成激光能量的泄漏与衰减,因此该结构属于“反射型多模漏波波导(Leaky-type multimode reflective waveguide)”。相关研究使用的不锈钢金属管外径为 1.2 mm,有效导电截面积为 0.799 mm<sup>2</sup>;石英毛细管的内径范围为 0.30~0.35 mm,壁厚约为 0.15 mm;石英毛细管与金属管之间的装配间隙约为 50 μm,并以透明 UV 固化胶填充黏结,管电极的典型长度为 30 mm、45 mm 及 60 mm。

2022 年,中国科学院宁波材料技术与工程研究所进一步优化并制备了内壁附有低折射率约束层的管电极结构,如图 1(c)所示<sup>[15]</sup>。将低折射率约束层先制备在石英毛细管的外侧,再同轴装配入金属管内以保护全反射界面,令石英毛细管相对于金属管的出口端向内回缩,提高电极中心区域的电流密度。当回缩距离从 0 增至 1.5 mm 时,最大进给速度提升至 4.1 mm/min,成功实现了直径约 1.4 mm、长径比达 15 的小孔加工。根据现有研究报道,内壁附有低折射率约束层的管电极,其金属管外径约为 1.0 mm,典型壁厚约为 0.1 mm;特氟龙套管的等效壁厚约为 0.1~0.15 mm;金属管外壁的陶瓷绝缘涂层厚度约为 30 μm。

流道导光型管电极具有电极结构稳定,制备相对简便的优势,但是电解液的吸收与散射会导致激光能量的沿程损耗。依据 Beer-Lambert 定律,激光在液体中的理想传输强度随着传播距离按吸收系数呈指数衰减,且不同波长激光的吸收系数差异明显<sup>[16]</sup>。在纯水环境中<sup>[17-19]</sup>,波长 532 nm 激光的吸收系数约为 0.044 m<sup>-1</sup>,此

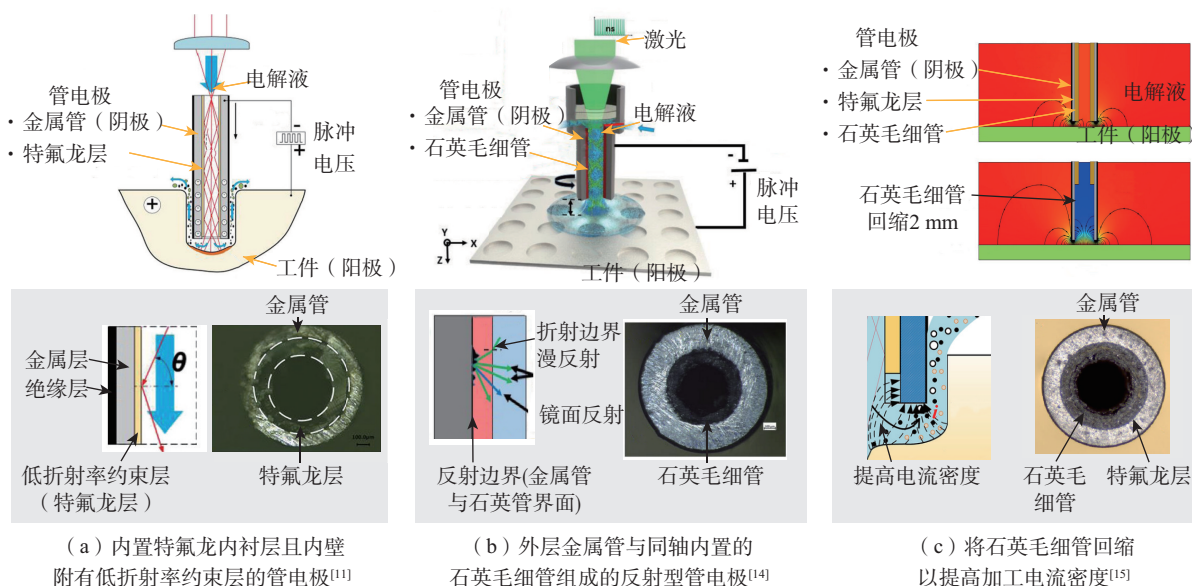


图1 流道导光型管电极结构原理与实物图

Fig.1 Structural principle and photographs of flow-channel light-guided tubular electrode

时 100 mm 长度流道的理论激光透过率为 99.5%; 而波长 1064 nm 激光的吸收系数约为  $13.5 \text{ m}^{-1}$ , 100 mm 长度流道内的理论激光透过率仅为 25.9%。在电解液环境中, 实际的吸收系数还会随着电解液浓度与激光功率密度的升高而增大。在质量分数 5% 的 NaCl 溶液中, 使用波长 532 nm、功率 5 W、聚焦半径 30  $\mu\text{m}$  的聚焦激光, 测得的吸收系数(测量中对应为损耗系数<sup>[12]</sup>)已超过  $10 \text{ m}^{-1}$ ; 在该环境下, 长度 15 mm 管电极的最大激光传输效率计算为 86.1%, 而长度 100 mm 管电极的最大激光传输效率则将下降至 36.8%。

目前, 流道导光型管电极多采用吸收系数较低的 532 nm 波长的纳秒脉冲激光, 并配合选取合适的管电极长度与电解液参数, 用以提高激光的传输效率与复合加工过程的稳定性。

## 1.2 光纤导光型管电极

为避免大长径比管电极内激光和电解液在传输过程中的互相干扰, 光纤导光型管电极在电极结构内设置同轴的光纤传导激光。基于这一思路, 电解液环绕激光(液包光)式管电极是在阴极金属管中央插入一根多模光纤<sup>[20]</sup>, 将脉冲激光限制在光纤纤芯内, 直达加工区中心, 电解液则在多模光纤和金属管内孔之间缝隙流道传输, 形成液体包围光束的“液包光”传输模式, 有效规避电解液环境的吸收、散射以及气泡扰动对激光传输的影响。

2023 年, 哈尔滨工业大学舒高旺<sup>[21]</sup>仿真研究了液包光式管电极中不同间隙下的间隙流场-电场-温度场的分布规律, 结果表明, 使用光纤直接将激光传导至工件表面能够明显提高小孔中央的电解液温度, 在管电极中心可以更高效蚀除工件材料, 但也需要更高速的电解液流才能及时排出加工气泡和热量。研究人员采用液包光式管电极开展加工试验, 完成了直径 1.25~1.75 mm 的小孔加工验证。

2023 年, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 Li 等<sup>[22]</sup>设计了一种光纤嵌入式电极结构。该电极在阴极金属管内配合嵌入一根多模光纤进行激光的同轴传输, 并将多模光纤填满管电极流道。由于管内流道被占据, 电解液在电极的外侧, 通过额外的喷嘴侧向冲入加工区域。相关研究在试验中选用外径 1.2 mm、内径 0.8 mm、光纤芯径 0.4 mm 的典型电极, 进行表面扫描与浅孔/槽类加工。

2024 年, 清华大学和天津大学设计了一种可实现高压电解液传输的液包光式管电极及加工头<sup>[20]</sup>, 如图 2(a) 所示, 特定设计的 SMA 激光耦合接口与径向电解液接头可缓冲高速高压流场对中央光纤的直接冲击。2025 年, 研究人员进一步设计了一种中央光纤插入的内外双阴极式管电极, 如图 2(b) 和 (c) 所示<sup>[23]</sup>。相比于单阴极的光纤导光型管电极, 新增的内侧阴极可提高孔中央的电解电流密度, 配合中央光纤的激光热效应去除小孔中心的残余凸起, 增强激光电解能场的复合作用。同时, 该管电极外侧装配毛细玻璃管进行电极的侧壁绝缘, 抑制高温及腐蚀环境下的电解杂散腐蚀。典型管电极的外径为 1.24 mm, 中央石英光纤直径为 0.330 mm, 外侧毛细玻璃管壁厚为 0.1~0.12 mm; 内外双阴极的整体有效导电面积约为  $0.462 \text{ mm}^2$ , 管电极的有效加工长度达 60 mm, 试验中加工深小孔的最大深径比达 42<sup>[20]</sup>。

使用中央光纤的光纤导光型管电极能够避免电解液对激光传输的干扰, 适用于较大深径比的加工场合。但光纤对流道的占用却易造成深入加工时的排屑不畅, 且激光的热效应更易导致管电极侧壁绝缘层(陶瓷或特氟龙)的损伤与退化, 影响加工精度。本文研究团队提出环形导光侧壁绝缘管电极, 如图 3 所示, 该电极在金属阴极的外侧同轴装配石英环形光波导(环状光纤), 环状光纤具有圆环状纤芯和内外侧低折射率包层, 激光在环形纤芯中全反射传导, 同时依托石英材料的耐高温、耐腐蚀的性能实现可靠的侧壁绝缘。电解液在金属管的完整内孔流道中传输,

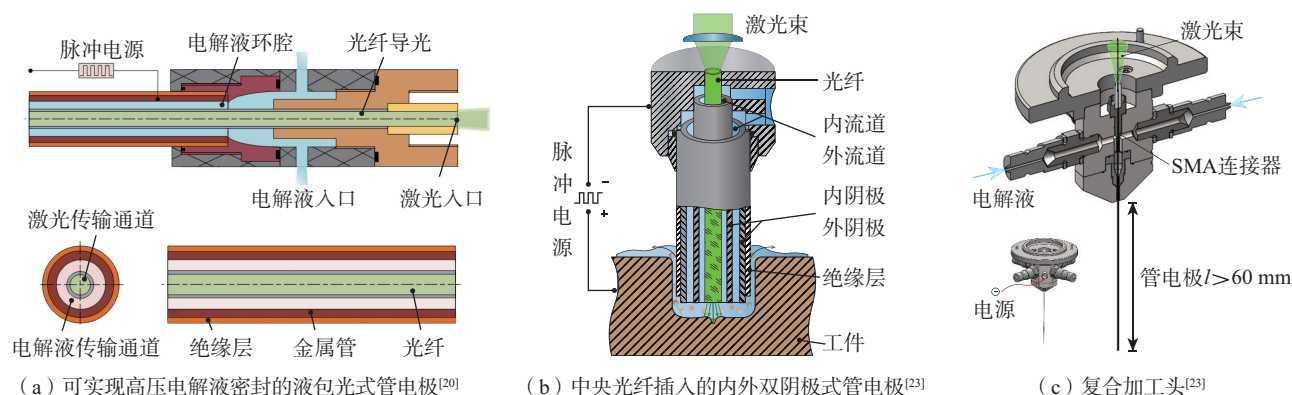


图 2 光纤导光型管电极结构原理

Fig.2 Structural principle of optical fiber light-guided tubular electrode

形成光束包围液体的“光包液”传输模式。基于等离子体管内化学气相沉积(PCVD)工艺制备出环形光纤,纤芯厚度约为0.150 mm,内外包层厚度约为25  $\mu\text{m}$ ,数值孔径(Numerical aperture, NA)达到0.24;试验中制备出外径1.05 mm、内径0.3 mm、长度70 mm的环形导光侧壁绝缘管电极,展现出良好的结构稳定性与应用潜力。

如图4所示,本文梳理对比了两类管电极的技术路线。流道导光型管电极使用管电极内流道传输激光和电解液,其整体结构相对简化,电极的制备难度较低;光纤导光型管电极使用固体光纤/光波导传输激光,在深孔加工中具备更高的传输效率和抗干扰能力。

## 2 管电极的光-电-液能场耦合方法

通过管电极将电解和激光能场有效耦合是加工系统的核心环节。管电极的能场入口需要同时实现激光

的高效入射,金属阴极的可靠导电连接导入,以及电解液的稳定输入,3种能场的匹配状态直接决定了能量沿程传输的效率与稳定性,从而影响最终的加工性能。在现有的管电极结构中,加工电场和电解液通常由加工头连接导入至管电极的金属管。由于中央光纤导光型管电极的部分流道被光纤占据,流场压力的沿程损耗增加。清华大学和天津大学通过优化电-液耦合腔体的流道结构及关键尺寸,分析了电-液耦合腔体的流道直径对耦合流场压力损失的影响(图5<sup>[23]</sup>),降低局部压力损失,保持电解液流场在脉动压力工况下的稳定性,提高管电极在深入加工时加工间隙内电解液更新与排屑能力。

管电极的激光耦合过程与平端面多模光纤的透镜耦合的技术特征相近。一种具备耦合激光功率检测、耦合位姿调整与耦合区域观测功能的激光耦合系统,其原

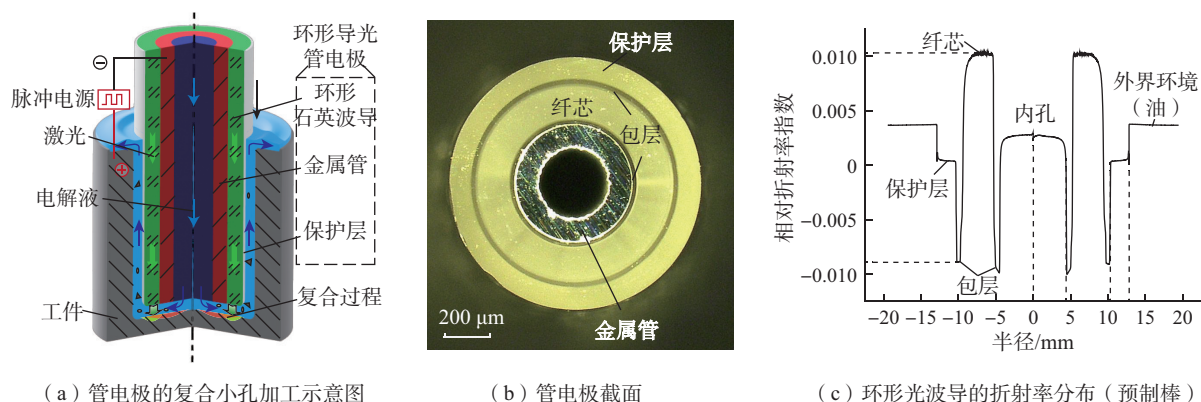


图3 环形导光侧壁绝缘管电极的结构原理与实物

Fig.3 Structural principle and photographs of ring-shaped light-guided tubular electrode with insulated side wall

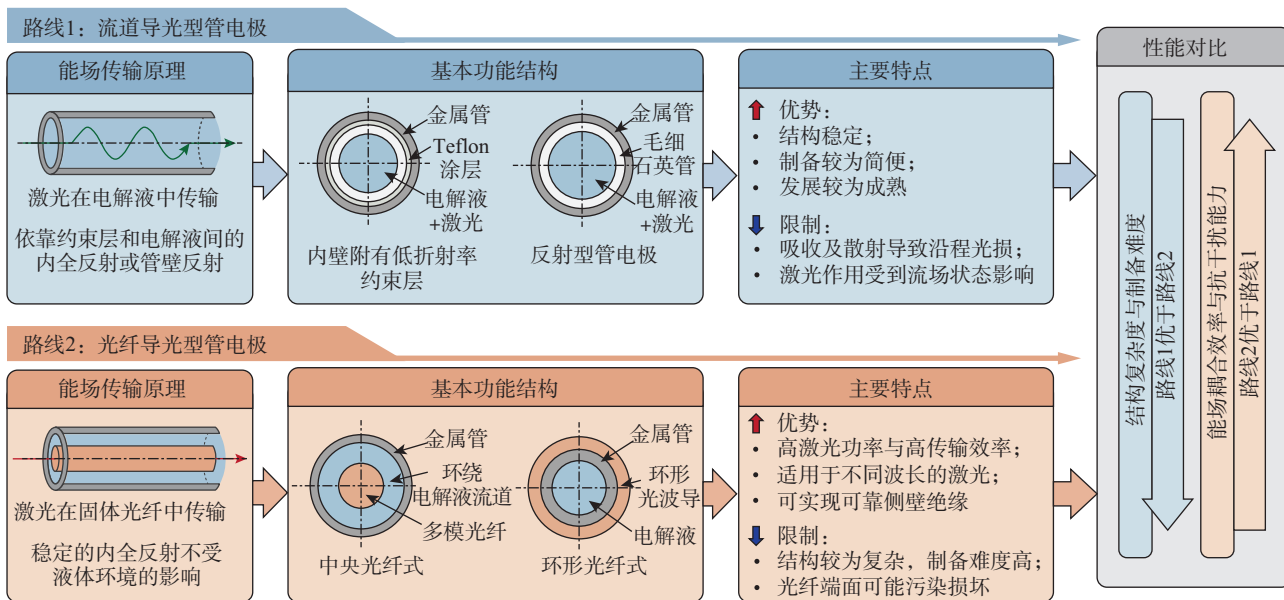


图4 流道导光型管电极和光纤导光型管电极的技术路线对比

Fig.4 Comparison of technical routes between flow-channel light-guided and optical fiber light-guided tubular electrode

理如图6(a)所示。聚焦后的激光光斑对准管电极的内孔流道或多模光纤的纤芯端面,在光斑直径匹配、数值孔径匹配和控制对准误差的条件下完成激光的输入,如图6(b)所示<sup>[24]</sup>,影响激光耦合效率的主要因素如下。

(1)数值孔径匹配。数值孔径反映了管电极接受激光入射的角度范围(孔径角),入射角在数值孔径范围内的光束发生全反射,而范围外的激光将透过反射界面作用于金属管的内壁,造成能量损失并可能在高功率激光下烧伤电极。全反射导光管电极的数值孔径 $NA_{TE}$ 由激光传输介质的折射率 $n_1$ 和约束层折射率 $n_2$ 决定。

$$NA_{TE} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$

管电极的数值孔径 $NA_{TE}$ 越大,越有利于实现聚焦激光的耦合输入。假设激光耦合系统的入射激光为准直高斯光束,且忽略孔径光阑对光场分布的截光及衍射影响<sup>[25]</sup>,聚焦激光的发散角 $\theta$ 与聚焦光斑半径 $\omega$ 之积为常量,即光束参数积(Beam parameter product, BPP)。为减小激光损耗,避免电极入口烧伤,发散角应满足数值孔径匹配条件,且束腰直径应小于导光流道或中央多模光纤的直径 $D_g$ 。据此,激光耦合系统的参数应满足式(2)中的约束关系,即

$$\begin{aligned} \theta \times \omega &= BPP \\ n_{in} \sin \theta &\leq NA_{TE} \\ \omega &\leq D_g/2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $n_{in}$ 表示激光进入管电极前所经过传输介质的折射率。对于反射型管电极,其内壁反射导光机制不受孔径的直接影响,耦合系统较小的发散角 $\theta$ 可减少激光在金属管内壁的反射次数,间接提升管电极的激光传输效率。

(2)耦合对准误差。在聚焦激光与管电极入口的对准过程中,主要存在3类位姿误差:轴角倾斜、径向轴偏离和轴向离焦。其中,激光耦合效果对轴角倾斜最敏感。当光轴与管电极轴线之间存在 $1^\circ \sim 3^\circ$ 的轴角偏差时,容易导致管电极出口光场分布不均或环行化<sup>[24]</sup>。聚焦光斑与电极中心位置的径向轴偏离会增加非子午光线比例,在电极长度较短时易引起电极出口光场的非均匀分布,若径向轴偏离过大,还会使聚焦光斑与约束层重叠,造成光线进入约束层或金属层,引发吸收与损伤。轴向离焦对耦合的影响相对较小,在保持激光光斑直径小于管电极内孔孔径的前提下,适当的正向离焦可增大电极入口光斑尺寸,降低电极入口处的激光功率密度,从而避免电极入口因频繁光致击穿发生损毁。

已有研究表明<sup>[14,23-24]</sup>,内壁附有低折射率约束层的管电极在质量分数为12.5%的 $NaNO_3$ 电解液中,激光耦合效率可达81%。反射型管电极在60 mm传输距离下的激光耦合与传输效率为30%~40%。如图6(c)所示<sup>[23]</sup>,中央光纤导光型管电极(长度70 mm)的耦合传输

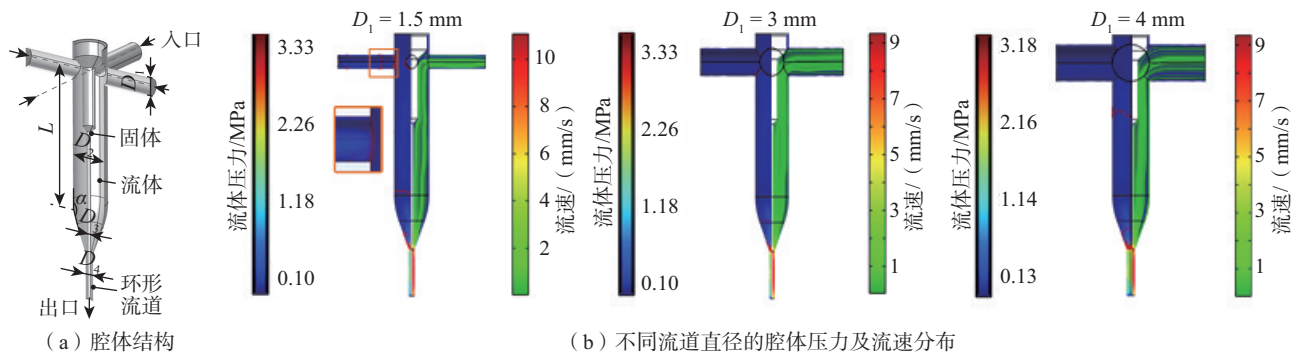


图5 管电极电-液耦合腔体的结构优化<sup>[23]</sup>

Fig.5 Structural optimization of electro-hydraulic coupling cavity of tubular electrode<sup>[23]</sup>

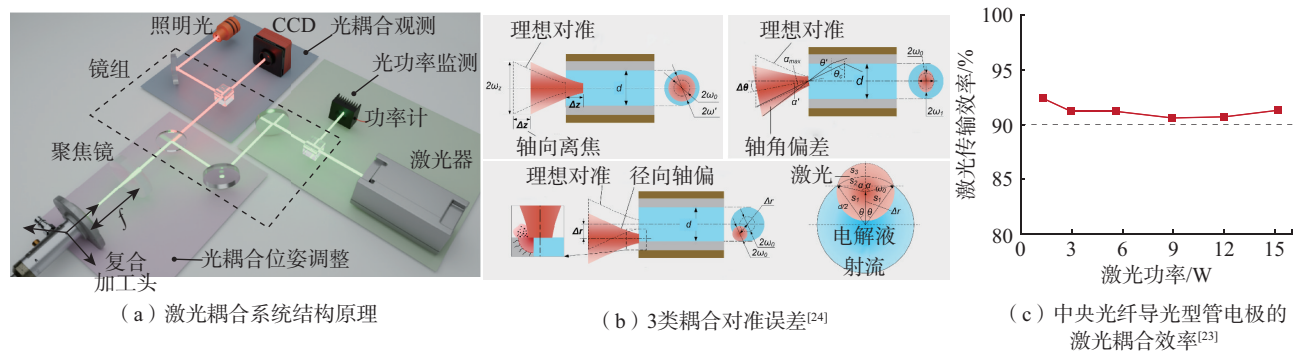


图6 管电极的激光耦合过程

Fig.6 Laser coupling process of tubular electrode

效率达到92.4%,其主要损耗来源于界面透射过程中引起的反射。

环形导光型管电极的金属阴极被外侧的环形激光传输区包围,其光-电-液能场的耦合过程较为复杂。通过一对锥透镜的光束整形将激光器的圆形光斑调制为环径与线径可控的均匀环形光斑<sup>[26]</sup>,并在同轴CCD的观测辅助下对准环形光纤纤芯,可以实现管电极的激光耦合。但是在电-液耦合的过程中,为了将导液流道和导电连接结构引至管电极内侧的阴极金属管,两者必须穿过外侧的环形光束<sup>[27]</sup>。其中电解液本身可以导光,通过压缩导液流道尺寸缩短其内部光程,电解液薄层对耦合效率的影响可忽略不计。但导电连接结构和环形光束的干涉难以避免,遮挡部分激光的反射与吸收会造成耦合效率与电极寿命下降。

本研究团队提出了一种环形激光分束导入的光-电-液耦合方法。如图7(a)所示,使用光纤分束器将环形光束离散为一个或多个均匀分布的圆形光斑,让离散的光斑在适当的离焦条件下照射在环形光纤的纤芯端面。金属管的导电连接结构则从光纤的间隙引入,规避与空间光束传输路径的干涉。如图7(b)所示,对单光斑离散输入管电极后的光线轨迹进行仿真,耦合端面的离散光斑在大长径比管电极内的传输过程中可逐渐实现能量均化,充满环形导光芯层,并最终在加工端形成均匀的环形光场。如图7(c)所示,在试验中成功实现了环形导光型管电极的光-电-液能场高效耦合输入,管电极在0~18 W的激光功率范围内传输效率稳定高于82%。如图7(d)所示,为减少激光传输路径中的界面数量,进一步提高激光传输效率及最大承受功率,将管电极的环形光波导离散为紧密排列的多根多模光纤,从而演化形成了环形多光纤束式管电极。制备所得的环形多光纤束式管电极外径为1.1 mm,有效加工长度超过100 mm,导光区域厚度约为0.130 mm。测试结果表明,该结构对波长532 nm激光的传输效率提高至90%,对波长1035 nm激光的传输效率达到87%。

表1整理了现有管电极的结构尺寸范围及激光耦合传输效率。其中,液包光式管电极和光纤嵌入式电极的传输效率虽尚未见明确报道,但由于其导光结构与中央光纤导光型管电极相似,理论上的最大耦合效率应较为接近。

### 3 管电极耦合激光电解复合能场下材料作用机制

激光能场与电解能场共同作用于工件材料表面,其能量强度和空间分布特征决定了材料去除的主导机制。现有管电极复合加工研究中多以电解能场为主进行材

料去除,激光发挥促进或协同作用。近年来,随着使用激光功率的提升,表征观察到激光的局部烧蚀作用,但其对完整小孔成形过程的实际贡献仍有待深入研究。因此,本文归纳梳理了两类能场的协同作用逻辑,根据不同的主导能场将材料作用机制划分为激光辅助电解加工和电解辅助激光加工两类。在实际的复合加工过程中,这两种作用机制可能在不同区域同时发生并相互

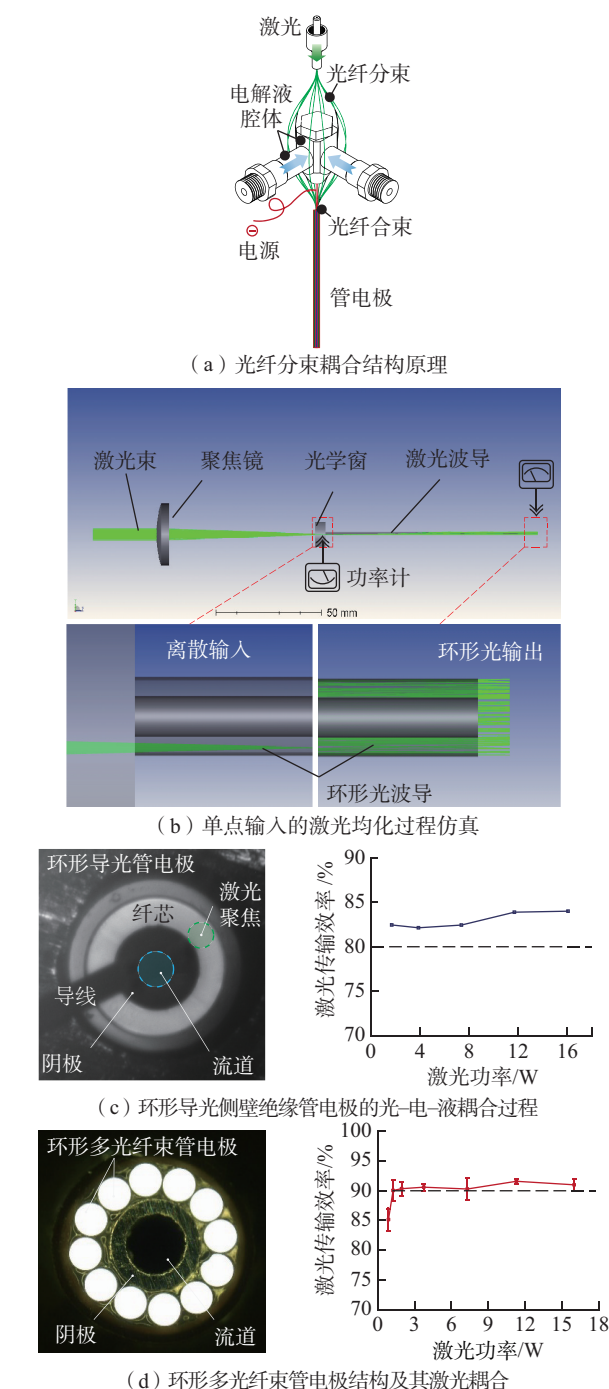


图7 环形激光分束导入的光-电-液耦合方法  
Fig.7 Optic-electric-fluid coupling method based on split annular laser beam

表1 管电极结构对比表

Table 1 Comparison of tubular electrode structures

| 管电极类型         | 电极名称             | 直径/mm   | 激光耦合传输效率/% |
|---------------|------------------|---------|------------|
| 流道导光型管电极      | 内壁附有低折射率约束层的管电极  | 1.2~1.3 | >81        |
|               | 反射型管电极           | 1.2     | 40         |
| 光纤导光型管电极-中央光纤 | 中央光纤插入的内外双阴极式管电极 | 1.24    | 92.4       |
|               | 液包光式管电极          | 1~1.1   | —          |
|               | 光纤嵌入式电极          | 1.2     | —          |
| 光纤导光型管电极-环形光纤 | 环形导光侧壁绝缘管电极      | 1.05    | >82        |
|               | 环形多光纤束式管电极结构     | 1.1     | >87        |

叠加,协同影响材料的去除行为与表面创成特征。

### 3.1 激光辅助电解加工机制

电解加工依靠电化学反应实现工件材料的去除。在外加电场的驱动下,阳极工件在电解液界面以离子形式溶解进入电解液,流动的电解液既作为正负离子传递扩散的介质,又排出电解产物和反应热,维持稳定加工。辅助激光并不直接热烧蚀材料,而是通过提高辐照区域电解液及界面双电层的局部温度,加速电化学反应的动力学过程<sup>[28]</sup>。

将激光作为外部热源,构建温度-电化学-流场耦合的全局多物理场模型,依据法拉第定律并叠加温升诱导的扩散加速来计算工件表面的法向蚀除速率分布,评估激光在电解体系中的辅助作用<sup>[29-30]</sup>。如图8(a)和(b)所示<sup>[30]</sup>,清华大学和天津大学的仿真结果揭示了激光对电解效率的双重影响:一方面,在适当的功率密度下,激光辐照有助于提升局部区域的材料去除速率,因此中央激光照射可有效去除管电极电解加工中常见的中心残柱,获得更平整的加工底面,而靠近侧壁的环形激光照射亦能提高通孔的整体穿孔速率<sup>[27]</sup>;另一方面,若激光功率过高致使电解液相变,沸腾气泡与光致击穿会使电流密度骤降并屏蔽激光,抑制复合加工过程。

如图8(c)所示<sup>[29]</sup>,经试验验证,激光辅助电解小孔加工存在最佳工艺参数窗口。在合适的电压与激光参数下(如反射型管电极使用加工电压10~20 V,激光脉冲能量36  $\mu\text{J}$ ),复合小孔加工的材料蚀除效率相较纯电解加工提升9%~27%,电流效率提升14%~19%。同时,激光辅助可以强化电极端面的电场约束,提高孔底材料的蚀除速率并降低侧向加工过切52.1%~60.1%,改善了加工的尺寸精度。相反,过强的加工参数(如反射型管电

极使用加工电压 $\geq 25$  V,激光脉冲能量60  $\mu\text{J}$ )会引发电解液沸腾与产物堆积等负面现象,致使材料蚀除速率显著下降。

在特定环境的电解加工中,阳极表面的金属原子或者界面处溶解的金属离子会与电解液中部分组分发生化学反应,生成导电性很低的金属氧化物或盐类,附着在金属表面形成致密钝化膜。这种界面钝化现象会抑制阳极溶解速率,使材料去除效率明显下降,甚至完全停滞。研究表明,激光的辅助高温有助于加速膜的溶解与剥离,降低反应阻抗,在较低电位下促进电化学反应<sup>[31]</sup>。并且脉冲激光的等离子体冲击波及空化气泡塌陷所产生的微射流冲击可进一步破坏钝化层,加速阳极溶解速率并使材料去除更加均匀<sup>[32]</sup>。

### 3.2 电解辅助激光加工机制

目前,管电极激光电解复合加工普遍采用短脉宽纳秒激光,该类激光的脉宽大于被加工材料的电子-晶格弛豫时间(Electron-lattice relaxation time),材料表面的自由电子吸收激光光能,通过电子-声子相互作用将能量快速传递给晶格。随着晶格温度的上升,局部热能逐渐积累并引发材料熔化、汽化、再凝固等相变过程。因此,热蚀除是管电极激光电解复合加工中激光对材料直接作用的主要去除机制。此外,由于在电解液中存在较高密度的自由载流子,高功率密度纳秒激光在电解液中易诱发雪崩电离,引起电解液的光致击穿(Laser-induced breakdown)。击穿区域内形成高温高压等离子体,并伴随强烈的白光辐射、声发射及空化现象。当光学击穿发生于加工间隙内,空化气泡在生成与塌陷过程中会产生高压冲击波和高速微射流<sup>[33]</sup>,对工件表面施加瞬态冲击与侵蚀作用<sup>[34]</sup>。

电解加工可与激光加工组合,作为后续工序实现热影响区去除与表面质量提升。2018年,Sun等<sup>[35]</sup>提出一种激光电解组合小孔加工方法,首先在辅助气体作用下利用聚焦激光快速蚀除形成预制微孔,然后使用侧壁绝缘管电极进行脉冲电解,在质量分数8%的 $\text{NaNO}_3$ 溶液中去除孔壁重铸层,获得直径0.664 mm,无重铸层缺陷的小孔。2020年,西安交通大学Duan等<sup>[36]</sup>研究了辅助气体种类对激光电解组合加工孔壁形貌的影响,如图9(a)~(c)所示,结果表明,当采用含氧气体(如氧气或压缩空气)进行激光加工时,孔壁重铸层表面会形成绝缘氧化层,抑制后续电解反应的进行;而在采用非氧化性气体(如氮气或氩气)环境下,可有效避免绝缘氧化层的形成,同轴电解加工能够均匀地剥离重铸层,获得理想的孔形与更优的表面质量。2024年,中国科学院宁波材料技术与工程研究所、江苏大学、浙江工业大学研究了Inconel 718合金材料激光加工重铸层的电解溶解机

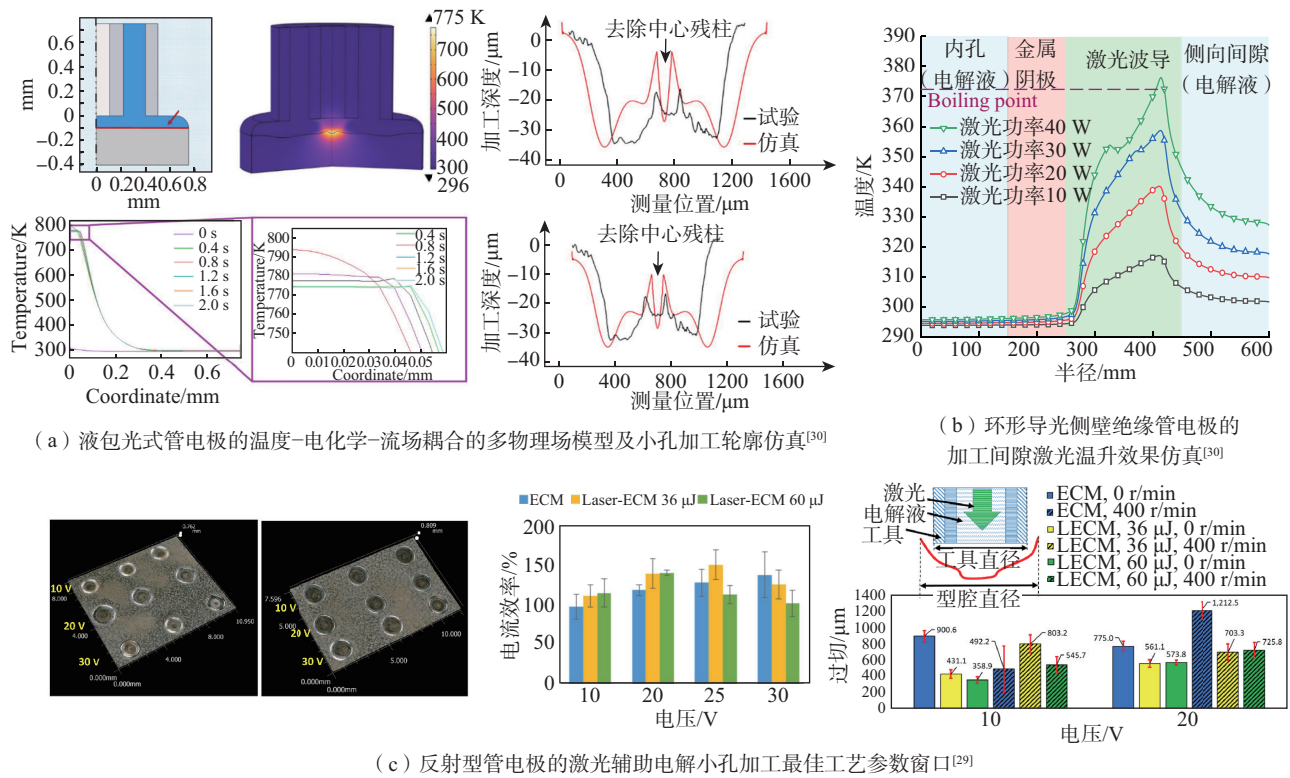


图8 管电极激光辅助电解加工仿真与试验结果

Fig.8 Simulation and experimental results of laser-assisted electrochemical machining with tubular electrode

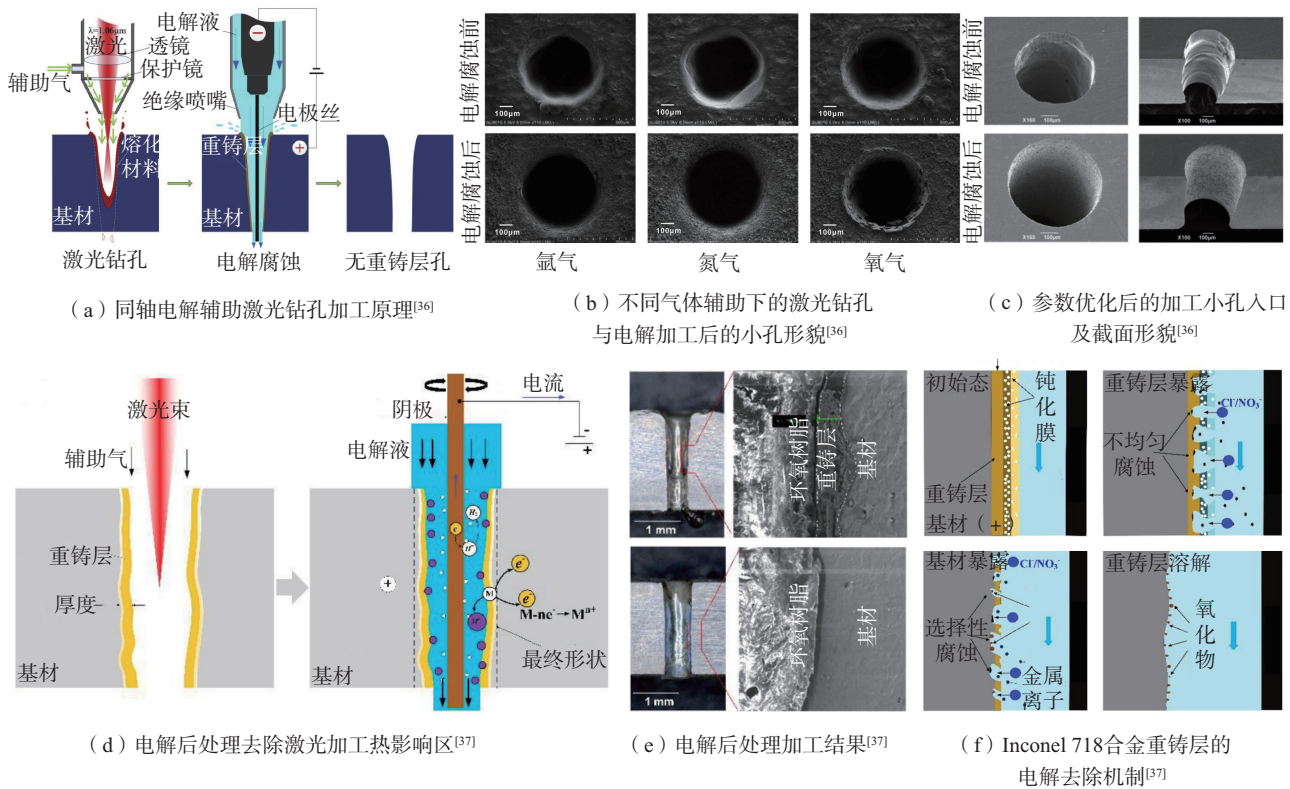


图9 组合电解后处理去除激光加工的重铸层

Fig.9 Removal of recast layer after laser machining via combined electrochemical post-processing

理<sup>[37]</sup>,如图9(d)~(e)所示,结果表明,重铸层的疏松多孔结构会降低材料的耐蚀性,而富氧成分和不均匀性则易导致局部溶解不稳定及坑蚀现象。优化电解液成分与浓度,以及加工的电流密度和处理时间等后处理参数,可实现小孔重铸层的完全去除。

与组合加工不同,电解辅助激光复合加工实现两种去除机制的同步协同:激光负责材料的快速熔蚀去除,电解则进行重铸层的同步溶解。在此过程中,激光热力冲击的应力蚀刻(Stress-etching)<sup>[38]</sup>调控局部过电位和阳极溶解行为,使加工表面发生“氧化层滑移-钝化膜破裂-金属电解溶解-再钝化”的循环过程,实现表面材料的电解同步去除。同时,激光辐照产生的高温梯度可在材料内部产生热电势差,诱发高温梯度诱导的电化学溶解<sup>[39]</sup>,进一步提高材料去除速率。

然而,目前针对管电极激光电解复合加工能场强度及分布的协同作用机理研究相对不足,尽管通过提高输入激光功率可实现局部材料熔蚀,但如何在加工间隙内匹配激光与电解能量及其时空作用效果,同时提高深小孔的整体加工效率和表面质量,仍需进一步研究。

#### 4 典型加工结果

目前,管电极激光电解复合加工方法还处于机理和工艺探索的研究阶段。现有研究主要在典型金属材料上进行了深小孔加工试验,得到了可行的工艺参数与加

工规律,验证了其在难加工金属合金及高性能材料上的有效性与可行性,具备良好的应用潜力。

##### 4.1 难加工金属合金材料的深小孔加工

中国科学院宁波材料技术与工程研究所使用内壁附有低折射率约束层的管电极,在镍基高温合金 Inconel 718 上实现了深度 6.5 mm 的阵列孔与深度 60 mm 的通孔加工<sup>[40]</sup>,比较了不同类型电解质对钛合金 TC4 复合加工性能的影响,实现了直径为 1.5 mm,深度为 38 mm 的交错通孔加工,表面粗糙度  $R_a$  达  $2\ \mu\text{m}$ <sup>[41]</sup>。通过优化激光功率和脉冲电压等加工参数,在激光波长 532 nm、激光功率 10 W、加工电压 18 V 的条件下,在镍基高温合金涡轮叶片上加工出入口直径 1.25 mm、出口直径 1.15 mm、深度 150 mm 的小孔,加工精度达到 0.07 mm,锥度  $0.02^\circ$ ,复合加工的进给速率达到 6 mm/min<sup>[42]</sup>。部分典型加工结果如图 10(a)~(c)所示。

清华大学和天津大学使用中央光纤插入的内外双阴极式管电极进行了小孔加工验证<sup>[23]</sup>,在 TC4 钛合金上实现了孔径范围 1.2~1.38 mm,深度 50 mm 的大径比小孔加工(深径比>40);在单晶高温合金 DD6 材料上实现了孔径<0.5 mm,深度 10 mm 的深小孔加工(深径比>20);并在 Inconel 718 上进行了浅孔的重复加工测试(图 10(d)),小孔的平均圆度误差为  $5.6\ \mu\text{m}$ ,粗糙度  $R_a=4.78\ \mu\text{m}$ ,加工尺寸精度 $\pm 3\ \mu\text{m}$ ,小孔锥度达到  $0.031^\circ$ ,平均圆度误差达到  $5.6\ \mu\text{m}$ 。如图 10(e)所示<sup>[27]</sup>,哈尔滨

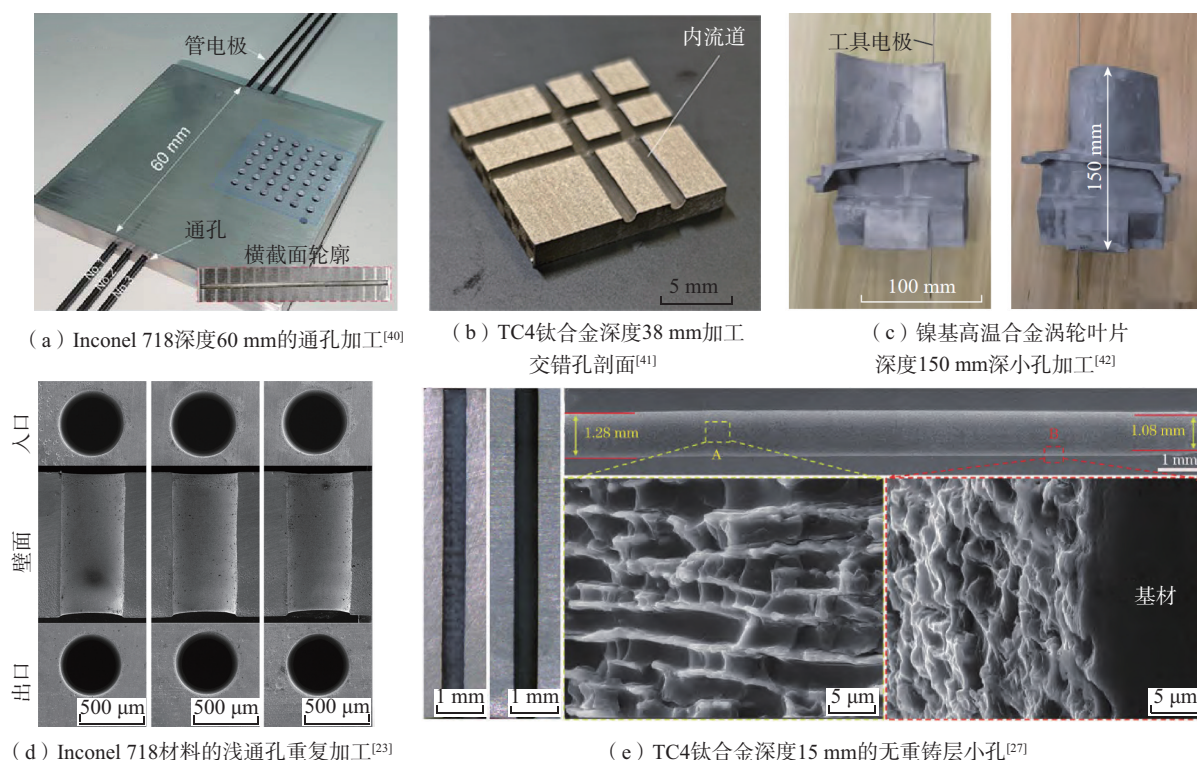


图 10 难加工金属合金材料上的深小孔加工

Fig.10 Deep small holes machining in difficult-to-machine alloy materials

工业大学使用环形导光侧壁绝缘管电极成功在TC4钛合金材料上实现了深度15 mm的无重铸层小孔加工,与传统纯电解加工相比,复合加工后的小孔孔壁粗糙度得到明显改善, $R_a \approx 2.3 \mu\text{m}$ 。

## 4.2 加工特殊合金材料

比利时鲁汶大学使用反射型管电极实现了镍钛形状记忆合金(Nitinol)的激光电解复合小孔加工<sup>[43]</sup>,如图11(a)和(b)所示,试验结果表明加工后材料的形状记忆转变温度基本保持稳定,仅出现 $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内的微小波动,展现出激光电解复合加工方法在降低加工热力影响方面的优势。鲁汶大学进一步研究了管电极激光电解复合加工在NbC-Ni金属陶瓷上的去除机理与工艺行为<sup>[44]</sup>,如图11(c)~(e)所示。在同步耦合条件下,激光的加热作用可提高电解液的电导率与界面反应速率,削弱

中央区域钝化层,使电流密度由加工边缘向中心转移,从而提高材料去除的定域性。研究揭示了复合加工能够抑制金属陶瓷颗粒崩解现象,改善多相金属陶瓷的溶解均匀性,相较纯电解加工,加工表面的过切降低约62%,沟槽深度提高34%,平均电流增幅17.5%,表面粗糙度明显减小,验证了管电极激光电解复合加工在高钝化、多相体系材料加工中的应用潜力。

## 5 结论

管电极激光电解复合加工综合激光与电解能场的协同作用,为难加工金属合金材料的高效高精度加工提供了新方法。本文梳理了现有的光-电-液能场耦合方式,讨论了通过改进电-液耦合腔体结构、优化激光耦合能量分布等保持流场稳定并提高能场传输效率的技术

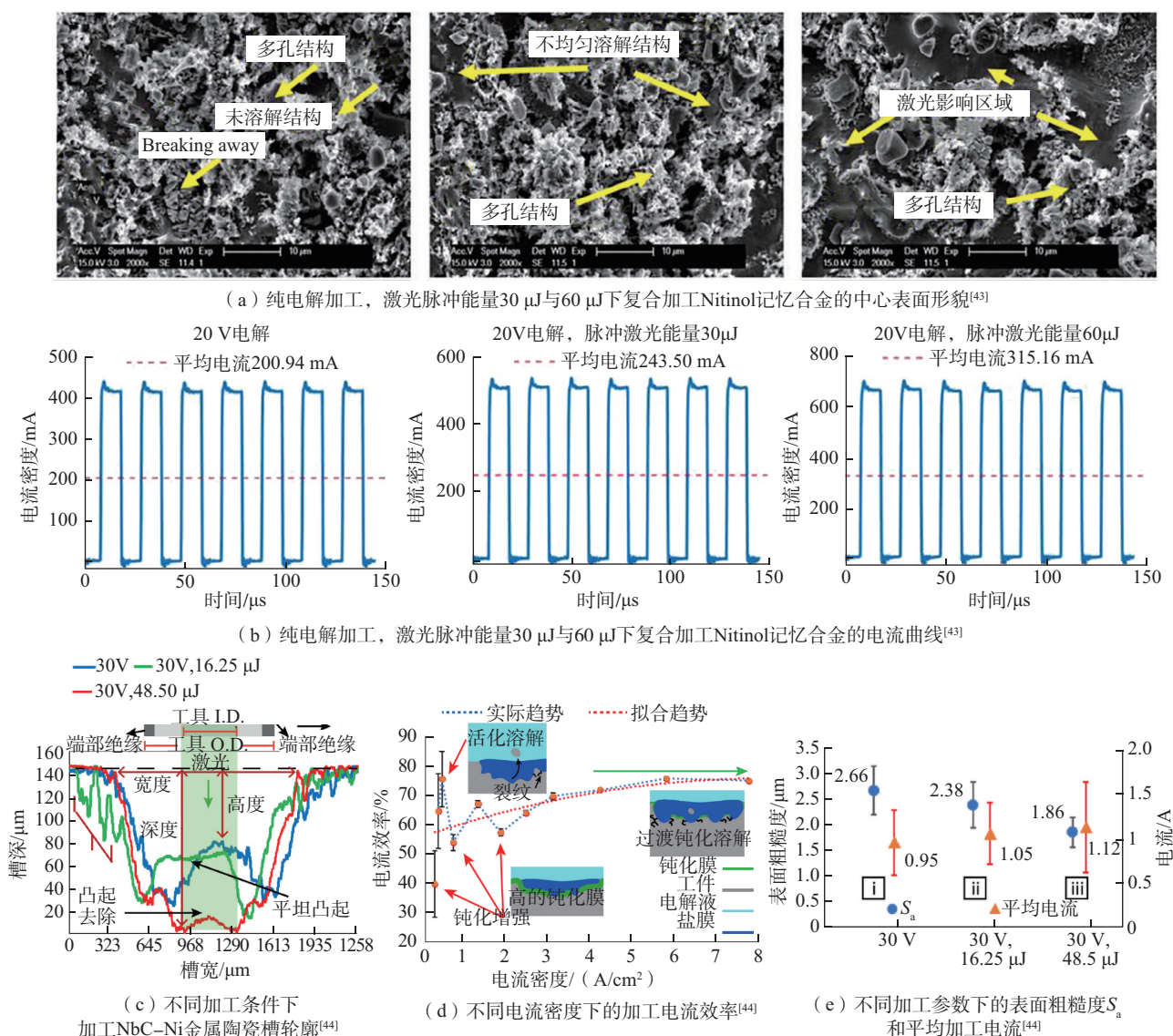


图11 反射型管电极加工Nitinol记忆合金与NbC-Ni金属陶瓷

Fig.11 Machining of Nitinol shape memory alloy and NbC-Ni cermet using a reflective tubular electrode

途径,阐述了激光辅助电解加工与电解辅助激光加工两类加工机理的目前研究结果,并汇总了镍基高温合金、钛合金及金属陶瓷等难加工材料上典型试验结果,表明了管电极激光电解复合加工方法在高品质大深径比结构制造中的可行性。

虽然管电极激光电解复合加工研究已取得实质性进展,但距离产业应用仍存在多方面挑战。首先,电极在高温-强电-化学腐蚀复杂环境下的寿命有限,尤其是电极的侧壁绝缘层和光纤端面的可靠性仍需提升;其次,多能场之间的耦合规律与量化模型尚不完善,加工间隙的能场分布难以精确控制。能量传入加工区后,如何实现激光与电解反应空间的匹配,仍是提高复合加工效率与质量的关键问题。此外,目前尚未建立有效的复合加工间隙监测与闭环控制手段,导致复合加工工艺的稳定性不足,难以满足长期稳定加工需求。因此,未来的研究可从以下几个方面发展深化。

(1)电极结构与材料创新。开发具备高能场传输效率、稳定绝缘性与耐蚀性的长寿命电极结构,结合精密进给机构与高稳定光源,推动加工对象从毫米级的小孔拓展至复杂三维结构、微孔及功能表面的应用。

(2)机理研究与模型构建。针对高效或高质量的加工需求,完善管电极激光电解加工的多场耦合模型,揭示能场匹配与不同材料的作用机制,为加工参数设计与加工间隙的能量时空调控提供理论依据。

(3)加工状态感知与控制。通过实时信号的采集反馈,实现加工进给的闭环控制与工艺过程自动调节,进一步提升复合加工的效率与精度,拓展管电极激光电解复合加工在航空发动机、能源装备和精密医疗器械等领域的应用潜力。

## 参考文献

- [1] CHANDAR J B, NAGARAJAN L, KUMAR M S. Recent research progress in deep hole drilling process: A review[J]. Surface Review and Letters, 2021, 28(11): 2130003.
- [2] SOO S L, HOOD R, ASPINWALL D K, et al. Machinability and surface integrity of RR1000 nickel based superalloy[J]. CIRP Annals, 2011, 60(1): 89–92.
- [3] IMRAN M, MATIVENGA P T, GHOLINIA 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.
- [4] BURGER M, KOLL L, WERNER E A, et al. Electrochemical machining characteristics and resulting surface quality of the nickel-base single-crystalline material LEK94[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2012, 14(1): 62–70.
- [5] MALIK A, MANNA A. Investigation on the laser-assisted jet electrochemical machining process for improvement in machining performance[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9–12): 3917–3932.
- [6] ZHANG Y, XU Z Y, ZHU Y, et al. Machining of a film-cooling hole in a single-crystal superalloy by high-speed electrochemical discharge drilling[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(2): 560–570.
- [7] GENG T Y, XU Z Y, LU J W, et al. Insights into the high-speed electrochemical discharge drilling for film cooling hole: Machining phenomena, morphological evolution, and visualize simulation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2024, 196: 104126.
- [8] WANG S W, XIE W D, DING Y, et al. Investigations on the Water-jet guided laser drilling film cooling holes on the 8.5 mm-thick TBC superalloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 125: 374–388.
- [9] 袁立新. 喷射液束电解——激光复合加工系统及加工工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [10] YUAN Lixin. Research on system and techniques of hybrid processing of laser beam machining with jet electrochemical machining [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [11] ZHANG H, GAO P, XU J W, et al. Effect of electrochemical dissolving in laser drilling assisted with jet electrochemical machining[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2021, 16(5): 21056.
- [12] WANG Y F, YANG F, ZHANG G Y, et al. Fabrication of deep and small holes by synchronized laser and shaped tube electrochemical machining (laser–STEM) hybrid process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(5–6): 2721–2731.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] YANG Y, WANG Y F, GUI Y J, et al. Improving performance of laser and shaped tube electrochemical machining by using retracted hybrid tubular tool electrode[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(5–6): 1779–1791.
- [17] KOU L H, LABRIE D, CHYLEK P. Refractive indices of water and ice in the 0.65- to 2.5- $\mu\text{m}$  spectral range[J]. Applied Optics, 1993, 32(19): 3531–3540.
- [18] POPE R M, FRY E S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water II Integrating cavity measurements[J]. Applied Optics, 1997, 36(33): 8710.
- [19] 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.
- [20] SEMAK V V, GERAIS A, SHNEIDER M N. Measurement

of temperature dependent absorption coefficient of water at 1064 nm wavelength[J]. AIP Advances, 2019, 9(8): 085016.

[20] 杨雪, 杨成娟, 佟浩, 等. 管电极耦合激光电解复合加工的理论分析与实验研究[J]. 中国激光, 2024, 51(16): 1602402.

YANG Xue, YANG Chengjuan, TONG Hao, et al. Theoretical analysis and experimental research on tubular electrode-coupled laser and electrochemical hybrid machining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(16): 1602402.

[21] 舒高旺. 液包光式管电极耦合激光电解打孔技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.

SHU Gaowang. Research on the tube electrode coupled “electrolyte surrounding laser” laser-electrolytic drilling technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

[22] LI Y L, YANG Y, WANG Y F, et al. Laser-assisted electrochemical machining based on optical fiber-based tool electrode[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2023, 170(7): 073509.

[23] YANG X, YAO Y, YANG C J, et al. Laser-electrochemical hybrid machining process based on novel dual-cathode and dual-channel tube electrodes inserted with optical fibers[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 155: 775–791.

[24] YANG Y, WANG Y F, YANG J, et al. High-efficiency and stable laser transmission for laser and electrochemical machining[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 179: 111392.

[25] UREY H. Spot size, depth-of-focus, and diffraction ring intensity formulas for truncated Gaussian beams[J]. Applied Optics, 2004, 43(3): 620.

[26] 许永波, 谢万达, 陈珂, 等. 环形激光与管电极电解复合加工多能场耦合分析与实验研究[J]. 电加工与模具, 2024(6): 0402405.

XU Yongbo, XIE Wanda, CHEN Ke, et al. Multi-energy field coupling analysis and experimental study in annular laser and tube electrode electrochemical hybrid processing[J]. Electromachining & Mould, 2024(6): 0402405.

[27] 许永波, 胡韩, 谢万达, 等. 环形激光与管电极电解复合加工大深径比小孔多物理场耦合分析与实验研究[J]. 中国激光, 2025, 52(4): 0402405.

XU Yongbo, HU Han, XIE Wanda, et al. Multi-physical field coupling analysis and experimental research in annular laser and tube-electrode electrochemical hybrid processing for small holes with large depth-to-diameter ratios[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(4): 0402405.

[28] STEPHEN A, VOLLERTSEN F. Mechanisms and processing limits in laser thermochemical machining[J]. CIRP Annals, 2010, 59(1): 251–254.

[29] 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.

[30] YANG C J, QI H M, YANG X, et al. Multifield simulation and experimental research on laser electrochemical composite micromachining[J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2025, 8: 4.

[31] STEPHEN A, SEPOLD G, METEV S, et al. Laser-induced

liquid-phase jet-chemical etching of metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1–3): 536–540.

[32] YANG Y, WANG Y F, JIANG W M, et al. Effects of synchronous laser irradiation on anodic dissolution behavior[J]. Electrochimica Acta, 2025, 535: 146713.

[33] VOGEL A, BUSCH S, PARLITZ U. Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 100(1): 148–165.

[34] YE Y X, WU M, REN X D, et al. Hole-like surface morphologies on the stainless steel surface through laser surface texturing underwater[J]. Applied Surface Science, 2018, 462: 847–855.

[35] SUN A X, CHANG Y B, LIU H J. Metal micro-hole formation without recast layer by laser machining and electrochemical machining[J]. Optik, 2018, 171: 694–705.

[36] DUAN W Q, MEI X S, FAN Z J, et al. Electrochemical corrosion assisted laser drilling of micro-hole without recast layer[J]. Optik, 2020, 202: 163577.

[37] BAO L, WANG Y F, WANG R J, et al. Study on anodic dissolution behavior and surface evolution of laser-drilled Ni-based superalloys during electrochemical post-processing[J]. Electrochimica Acta, 2024, 473: 143471.

[38] 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(9–12): 2157–2165.

[39] ZHOU Z Q, WANG Y F, LIU Y, et al. Fiber laser irradiation in chemical solution for micro fabrication: Mechanisms and applications[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 125: 523–537.

[40] WANG Y F, YANG Y, LI Y L, et al. Profile characteristics and evolution in combined laser and electrochemical machining[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(9): 093505.

[41] SUN C Y, WANG Y F, YANG Y, et al. Study on the effect of electrolytes on processing efficiency and accuracy of titanium alloy utilizing laser and shaped tube electrochemical machining[J]. Materials, 2024, 17(3): 689.

[42] 王玉峰, 杨勇, 刘云峰, 等. 大深径比小孔激光与管电极电解同步复合加工技术[J]. 航空制造技术, 2025, 68(1/2): 64–72.

WANG Yufeng, YANG Yong, LIU Yunfeng, et al. Fabrication of high-aspect-ratio small holes by laser and shaped tube electrochemical machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(1/2): 64–72.

[43] SAXENA K K, HAZAK ARSHAD M, VAN MAELE S, et al. Electrochemical micromachining of actuator-grade Nitinol shape memory alloy with and without laser assistance[J]. Manufacturing Letters, 2021, 30: 5–10.

[44] ARSHAD M H, SAXENA K K, HUANG S G, et al. Macro and micro-scale material removal mechanisms during ECM/hybrid laser-ECM of a passivating multiphase NbC–Ni cermet[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2024, 200: 104182.

(责编 七七)