TC4钛合金射流电解质等离子体微加工流场仿真与实验研究

易 军[1,2*] 陈洪峰[1] 苗长春[1] 尹泽清[1] 邓 辉[1,2]
1.湖南科技大学机电工程学院,湘潭,411201
2.难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室,湘潭,411201

摘要:提出了一种射流电解质等离子体微加工(Jet-EPM)方法。以TC4钛合金为研究对象,开展了定点射流加工实验,探究加工时间对加工形貌演化的影响机制。通过移动射流微加工实验,分析了喷嘴移动速度及扫描重叠率对加工形貌的影响规律。结果表明:定点射流加工初期,材料去除集中于射流接触中心区域;随着加工时间的延长,加工定域性逐渐降低。微槽加工中,加工质量随喷嘴移动速度提高而提升,但速度过高会导致路径两端材料过度去除。扫描加工时,若路径重叠率低于75%,工件表面将出现垂直于扫描方向的波纹状起伏。

关键词:电解质等离子体;射流加工;TC4钛合金;表面形貌;流场
中图分类号:TG580
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.023 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Flow Field Simulation and Experimental Study of Jet Electrolyte Plasma Micro-machining on TC4 Titanium Alloy

YI Jun[1,2*] CHEN Hongfeng[1] MIAO Changchun[1] YIN Zeqing[1] DENG Hui[1,2]
1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201
2. Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material, Xiangtan, Hunan, 411201

Abstract: A jet electrolyte plasma micro-machining(Jet-EPM) method was proposed. Using TC4 titanium alloy as the research subject, stationary jet machining experiments were first conducted to investigate the influence mechanism of machining time on the evolution of the machined morphology. Subsequently, moving jet micro-machining experiments were performed to analyze the influence of nozzle traverse speed and scan overlap ratio on the machined morphology. The results indicate that during the initial stage of stationary jet machining, material removal is concentrated in the central contact area of the jet. As machining time increases, the localization of material removal gradually decreases. In micro-groove machining, the machining quality improves with increasing nozzle traverse speed, but excessively high speeds cause excessive material removal at both ends of the path. During scanning machining, if the path overlap ratio is below 75%, wavy undulations perpendicular to the scanning direction appear on the workpiece surface.

Key words: electrolyte plasma; jet machining; TC4 titanium alloy; surface morphology; flow field

0 引言

随着先进制造技术的发展,微小金属零件在航空航天、医疗器械等领域的应用日益广泛,如心血管支架、航空发动机叶片气膜冷却孔等[1-3]。这类应用不仅要求零件具备优异的耐磨耐腐蚀性能,还需满足高精度加工质量要求。钛合金因具有优秀的力学性能,以及耐高温、抗腐蚀等特性,成为理想的微小金属零件制造材料。然而,钛合金较差的导热性和较低的弹性模量等,导致传统加工方法(如铣削、激光加工)在制造微小孔、微沟槽时易产生重熔层和微裂纹,难以满足高加工质量要求[4-6]。

射流电解微铣削(jet electrochemical micro milling, Jet-ECMM)通常采用质量分数为10%~20%的$NaNO_3$溶液作为电解液,工件接阳极并施加20~50 V电压,基于阳极电化学溶解原理[7],通

收稿日期:2025-07-26
基金项目:湖南省自然科学基金(2024JJ5150);湖湘青年科技创新人才项目(2023RC3178);湖南省教育厅重点项目(24A0327)

过点射流或扫描射流实现微小孔和微槽的加工，该技术已在国内外得到广泛研究。MITCHELL-SMITH等[8]针对镍基高温合金，采用计算机辅助调控射流角度和移动路径，当射流与工件表面夹角为22.5°时，获得了表面粗糙度Ra为0.04μm的加工表面。GUO等[9]采用图像算法辅助同轴抽吸射流电解加工，通过调节电解液供给速率和抽吸压力以获得更高加工定域性。YU等[10]提出一种激光诱导射流电解加工方法，通过激光与射流束耦合获得更高的加工效率，材料去除率达到2.23 mm^3/min。然而，Jet-ECMM加工电压较低、电解液浓度较高，导致加工效率受限、加工成本上升，且大量电解液的使用易造成环境污染[6]，亟需发展更高效、绿色的加工方法。

电解质等离子体加工(electrolytic plasma machining，EPM)是一种新兴的加工方法，使用低浓度的中性盐或弱酸性溶液，对工件施加200～500 V电压，通过复杂的等离子体物理作用和化学反应实现工件表面材料去除[11-13]，具有加工效率高、加工成本低、污染小的优点。将EPM与射流技术结合，形成了射流电解质等离子体加工(jet electrolytic plasma machining，Jet-EPM)方法，可有效改善Jet-ECMM加工效率低的问题。QUITZKE等[14]使用5 mm直径喷嘴开展实验，对比分析加工电压对工件表面粗糙度的影响，得到400 V左右加工电压有较好的表面粗糙度。KRANHOLD等[15]以316L不锈钢为对象，研究了加工电压、电解液温度等因素对加工电流稳定性的影响，提出最优加工电压为300～400 V，电解液温度不低于75 ℃。

Jet-EPM在加工钛合金表面微结构时，其高材料去除率导致已加工区域的形貌会扰动后续射流的流场和电场分布，进而降低加工定域性和最终加工质量。鉴于此，本文以TC4钛合金为研究对象，通过定点射流实验厘清加工时间对微孔形貌的演化规律，继而通过移动射流实验，着重考察喷嘴移动速度与扫描重叠率等关键参数对微槽加工定域性的影响，并对比实验结果以揭示其内在机制。

1 原理与实验方案

1.1 基本原理

EPM的基本原理是利用高电压在工件与电解液接触界面引发剧烈的电化学反应与瞬时汽化形成一层气态包络层，带电粒子(电子与离子)在强电场作用下穿越该包络层，导致局部电场畸变，从而在工件表面诱发复杂的等离子体物理效应与电化学反应，最终实现材料的高效去除，其原理如图1a所示。而Jet-EPM技术旨在将材料去除区域精确限定于射流冲击点。为此，射流需达到临界速度以形成水跃现象，迫使电流密度在冲击区域呈现典型的高斯分布[16]，从而将有效加工范围严格约束在射流束覆盖区内，如图1b所示。

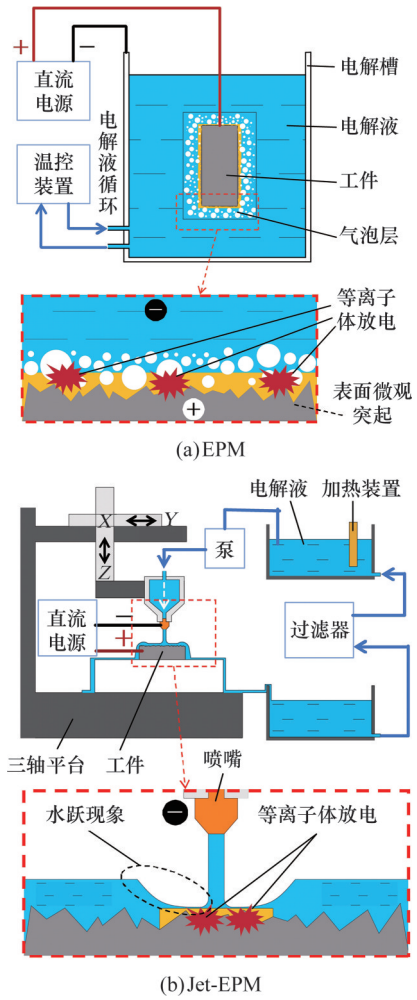


图1 加工原理图

Fig.1 Processing schematic

在定点射流加工中，初始阶段的电流密度沿射流轴线呈理想的高斯分布。然而，随着加工凹坑的形成与演化，工件表面形貌的改变会显著扰动流场结构与电流分布，进而影响材料去除的定域性。移动射流加工微槽可视为喷嘴在离散点位上短暂驻留加工的叠加结果。因此，研究定点加工中时间对形貌演化的影响规律是理解与预测移动加工形貌的基础。

在移动射流加工过程中，喷嘴移动速度直接决定了射流在单位路径上的驻留时间，是控制微槽形貌的关键参数。同时，已加工区域的形貌会反作用于后续射流的流场与电场分布，形成复杂的动态耦合，因此，系统分析移动速度对微槽形貌的影响是确定最优工艺窗口的必要途径。同理，

在重叠扫描加工中，扫描重叠率决定了已加工形貌对后续射流的干扰程度，直接影响宽槽加工的均匀性与一致性，故需深入研究不同重叠率对材料去除定域性的影响机制。

1.2　实验设备与检测

搭建了图2所示的Jet-EPM实验平台，主要由三轴移动平台、直流电源、绝缘夹具、供液系统组成。直流电源额定功率为10 kW，输出电压范围0～400 V可调，精度±0.1 V，阳极与加工工件连接，阴极与喷嘴连接；移动平台可实现喷嘴相对于工件表面的精确三维（X、Y、Z）运动，其末端最低移动速度为5 mm/s；供液系统由储液箱、过滤器、负压泵、喷嘴、集液槽组成，电解液经过滤器由负压泵输送至喷嘴，形成射流作用于工件表面，加工后电解液通过集液槽收集过滤后回收。储液箱内置加热装置，可稳定控制电解液温度。射流喷嘴通过绝缘夹具安装于Z轴末端，可精确调节其高度和姿态。

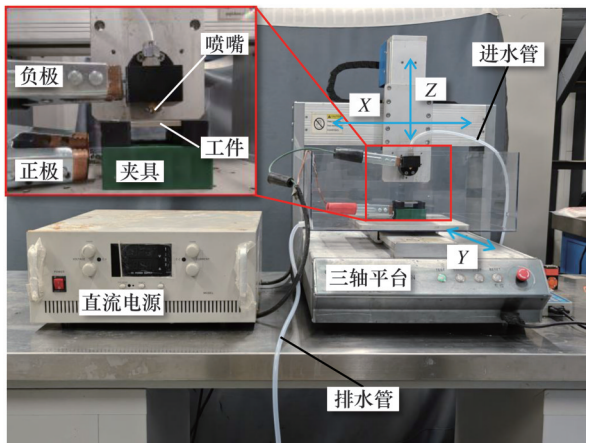


图2　实验平台

Fig.2　Experimental setup

使用0.6 mm直径喷嘴在TC4钛合金板上进行点射流实验，结合COMSOL Multiphysics仿真结果，对Jet-EPM加工微小孔过程中的形貌演化和加工定域性进行验证分析。设计定点加工实验（参数如表1所示）用于分析定点射流凹坑形貌随加工时间的变化规律。基于此，进一步通过实验研究移动射流加工中喷嘴移动速度和扫描重叠率的影响，实验参数如表2所示。

工件加工后形貌通过白光干涉仪进行三维轮廓检测，通过截面轮廓曲线与等高线分析加工定域性。

不同于传统接触式加工方法，Jet-EPM方法加工微小孔与微型槽时依赖电场分布，虽然加工形貌与射流有对应关系，但由于加工时电流密度分布的变化以及杂散电流的腐蚀导致加工形貌与预期不一致，形成过切现象[17]，因此，参考电解加

表1　定点加工实验参数

Tab. 1　Experimental parameters for stationary jet machining

实验参数	数值
抛光液	1%（质量分数，下同）氟化钠＋3%盐酸羟胺
抛光电压/V	300
温度/℃	85
时间t/s	15、30、45、60、90
喷嘴直径/mm	0.6
射流间隙/mm	8

表2　移动加工实验参数

Tab. 2　Experimental parameters for moving jet machining

实验参数	数值
抛光液	1%氟化钠＋3%盐酸羟胺
抛光电压/V	300
温度/℃	85
时间t/s	30
喷嘴直径/mm	0.6
射流间隙/mm	8
移动速度v/(mm·s^{-1})	10、20、30、40
重叠率/%	25、50、62.5

工深小孔的加工质量评价方法，采用过切量作为评价阳极材料集中去除能力（即加工定域性）的指标[18]。按照图3所示测量凹坑截面轮廓尺寸数据，按照下式计算获得平均过切量O_{Cavg}：

$$O_{Cavg}=\frac{d_1+d_2}{2}-d$$

式中：d_1、d_2分别为凹坑顶部、底部直径；d为喷嘴直径。

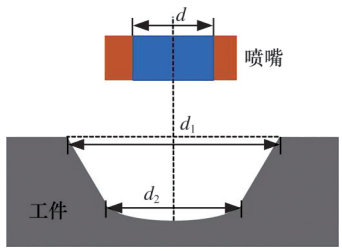


图3　平均过切量计算示意图

Fig.3　Schematic diagram of the calculation of the average overcut

由于Jet-EPM加工的凹坑底部并非平面，因此将通过凹坑最深点的截面轮廓上，从表面基准线向下至最大深度80%处的水平切距作为d_2。

2　定点射流下加工时间对形貌演化影响规律

2.1　定点射流电流密度分布仿真

采用有限元法对Jet-EPM过程进行仿真，旨在分析加工过程中电流密度分布的演变，进而预测加工形貌。基于COMSOL Multiphysics建立

简化Jet-EPM过程二维模型，以模拟Jet-EPM过程中表面凹坑形成过程中的电流密度分布，该简化模型主要包含喷嘴、电解液域和工件表面，如图4所示。电解液射流到工件表面形成薄液膜覆盖，在水跃现象作用下将电流限制在射流接触点，通过腐蚀变形几何模拟仿真材料去除过程中的凹坑形成过程与电流密度分布变化。

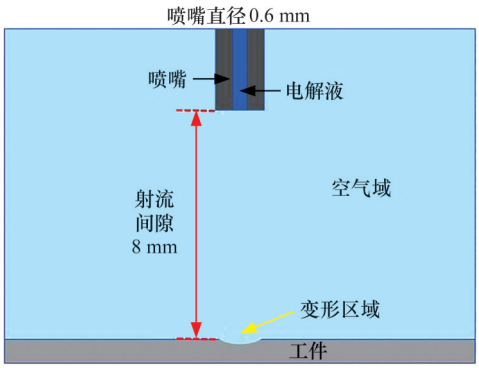


图4 仿真模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of the simulation model

图5为定点射流加工下凹坑形成过程的变形区域放大图。通过图5a可以明显看出，射流刚接触到工件表面时，电流密度以射流轴线为中心呈高斯分布，在射流中心点达到峰值，并向边缘迅速衰减至接近零，表现出良好的区域限制性。随着加工时间的延长，凹坑深度与宽度快速增大，电流密度最大值迅速下降，有效分布区域范围扩大，如图5c所示。当加工时间进一步延长，如图5d～图5f所示，材料去除效率降低，凹坑宽度变化接近停止，深度缓慢增加，电流密度峰值及其有效分布范围逐渐趋于稳定。

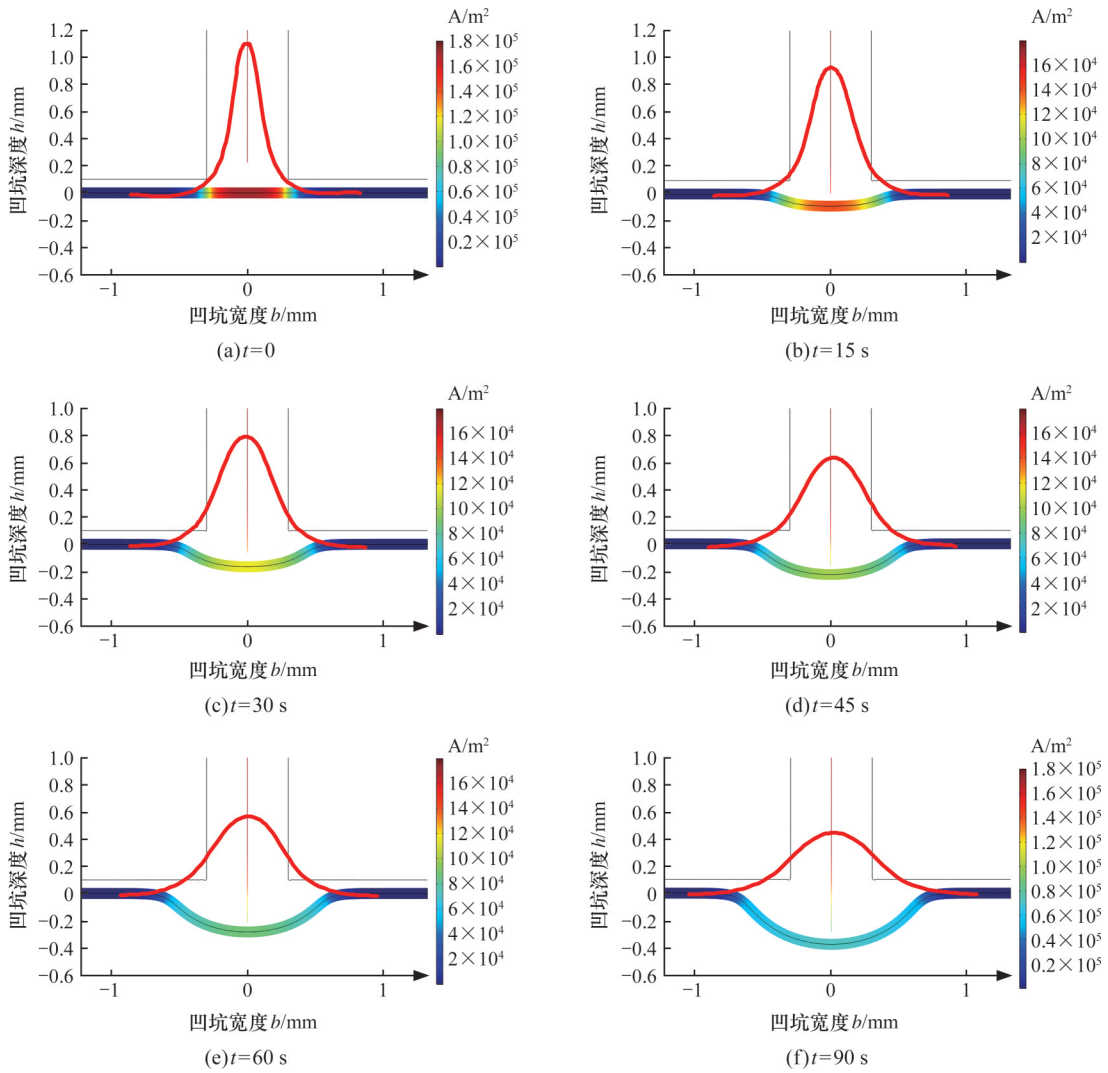


图5 不同加工时间下的凹坑形貌与电流密度分布

Fig.5 Pit morphology and current density distribution at different processing time

2.2 实验结果与仿真结果对比分析

图6为加工不同时间后获得的凹坑实物图，图7展示了不同加工时间下加工凹坑的二维形貌演变。可以看出，加工时间对凹坑形貌的影响呈明显的阶段性特征：当加工时间为15 s时，材料去除主要发生在射流接触区域，所形成的凹坑边缘

较为平缓，等高线分布稀疏，最大高度差约为25 μm；随着加工时间延长至30 s(图7b)，材料去除区域逐渐向射流中心聚焦，凹坑边缘趋于陡峭，底部形貌开始呈平坦化特征；当加工时间进一步增加至60 s以上，凹坑直径显著扩大，表明材料去除范围明显扩展。

图8给出了不同加工时间下凹坑的截面轮廓曲线。结果表明，凹坑的深度与直径均随加工时间的增加而持续增大，进一步验证了加工时间对材料去除范围与形貌演变的系统性影响。

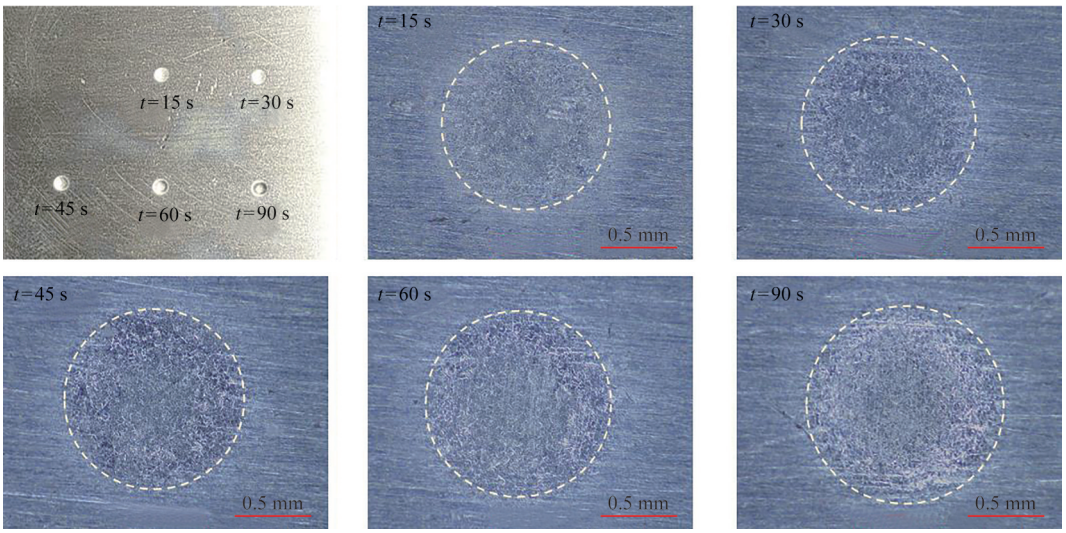


图6　不同加工时间下的凹坑实物图

Fig.6　Physical images of pits under different processing time

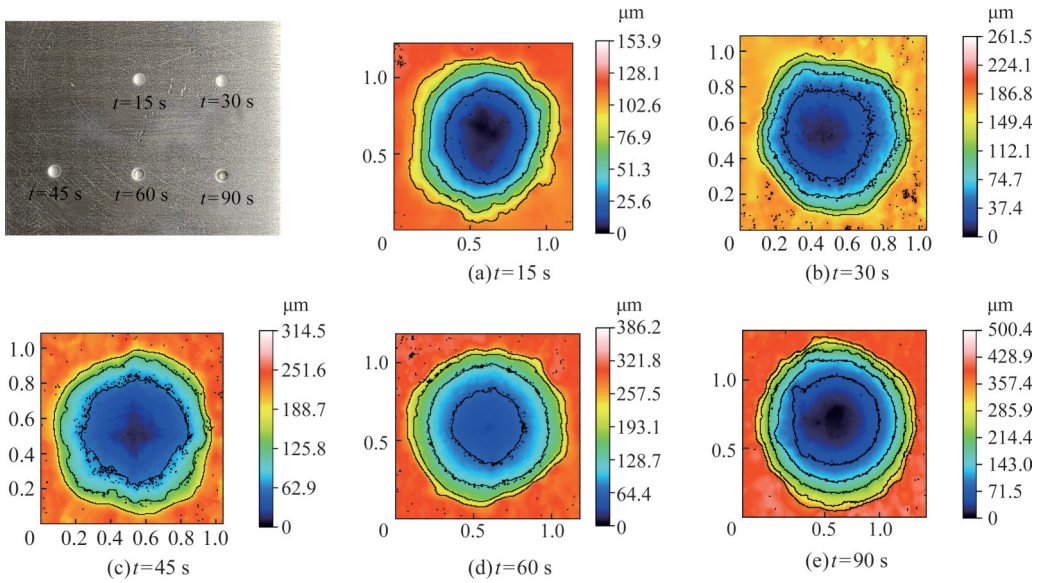


图7　不同加工时间下的凹坑二维形貌图

Fig.7　Two-dimensional topography of pits under different processing time

图9展示了不同加工时间下凹坑的平均过切量变化。如图9所示，平均过切量随加工时间呈V形变化，在30 s时降至最低(216 μm)，而后随加工时间延长而增大，其中在30～45 s时间段增大速度较缓，在45～90 s快速增大，在90 s时达到415 μm。该变化趋势与仿真结果高度一致：加工初期(0～45 s)，电流密度高度集中于射流中心区域，材料去除以轴向为主，过切量较小；随着加工时间延长(60～90 s)，凹坑逐渐形成并加深，导致射流与工件表面的流动边界发生显著变化，电流密度分布由初始的高斯集中形态逐渐扩散、畸变，有效作用区域扩大。这种电流的“散焦”效应，使得材料去除不再局限于中心区域，而是向凹坑侧壁径向扩展，从而导致过切量迅速增大。

综上所述，定点射流加工初期材料去除区域集中在射流接触点中心，然后快速沿径向去除，增大凹坑直径，这将进一步扩大已加工凹坑在移动射流加工中的路径影响长度。仿真结果有效揭示了过切量随加工时间变化的物理机制，与实验观测相互印证。

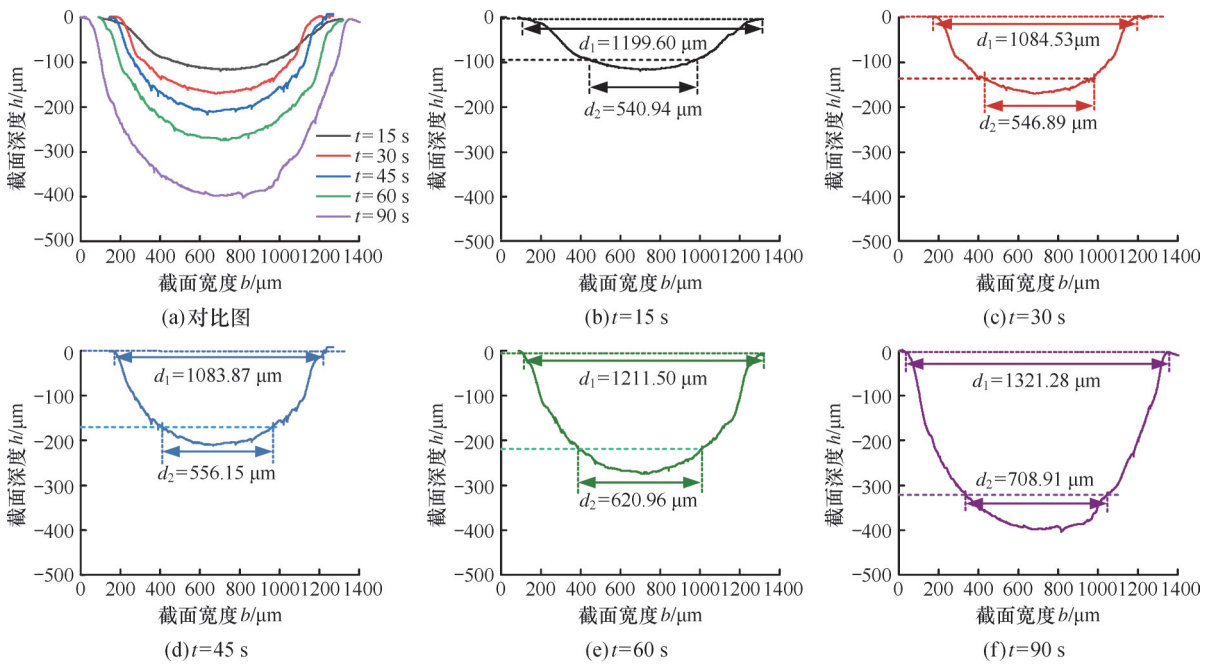


图8 不同加工时间下的凹坑截面轮廓

Fig.8 Cross-sectional profiles of pits at different processing time

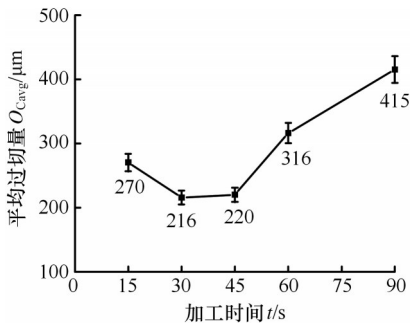


图9 不同加工时间下的平均过切量

Fig.9 Average overcut at different processing time

3 移动射流加工微槽形貌分析

在明确加工时间对单一点位加工形貌的影响规律后，通过调控移动速度与路径重叠率降低已加工形貌对流场重构的影响。首先使用10、20、30、40 mm/s喷嘴移动速度对工件进行直线往复扫描加工，对比分析不同移动速度对微槽加工形貌的影响机理。在此基础上进一步进行25%、50%、62.5%这3种不同扫描重叠率下的加工实验，分析不同扫描重叠率对微槽加工形貌的影响规律。

3.1 移动速度对微槽质量的影响

图10为不同喷嘴移动速度下微槽的实物图，图11所示为不同喷嘴移动速度下微槽三维形貌及槽宽沿扫描方向的分布。分析可见，当喷嘴移动速度较低时(如v=10 mm/s)，加工形成的微槽边界不规则，槽宽波动显著(达0.49 mm)。随着移动速度的提高，微槽边缘逐渐趋于规整，槽宽均匀性改善；当速度为30 mm/s时，槽宽波动最小(0.12 mm)，表明此时射流作用范围最为稳定，加工一致性最佳。

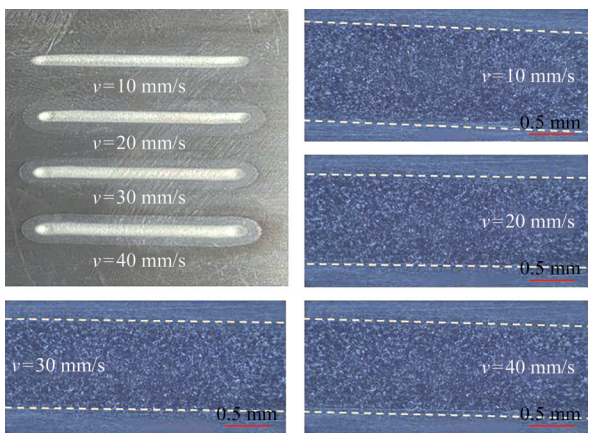


图10 不同喷嘴移动速度下的微槽实物图

Fig.10 Physical images of micro-grooves under different nozzle travel speeds

图12进一步给出了不同速度下微槽的三维形貌及槽底中部的截面轮廓曲线。结果显示，在较低移动速度下(如10 mm/s)，槽底起伏剧烈，最大波高可达130.856 μm，形貌呈多个不连续凹坑叠加的特征。随着速度提高至30 mm/s，槽底轮廓趋于平滑，波高显著降低至15.942 μm，材料去除均匀性明显改善，证实该条件下加工形貌最优。然而，当速度进一步提高至40 mm/s时，在扫描路径的起始与终止端出现了局部深坑，反映出路径两端的材料去除量增大。

上述现象与Jet-EPM的加工特性密切相关。在较低移动速度下，射流在单位点位的驻留时间

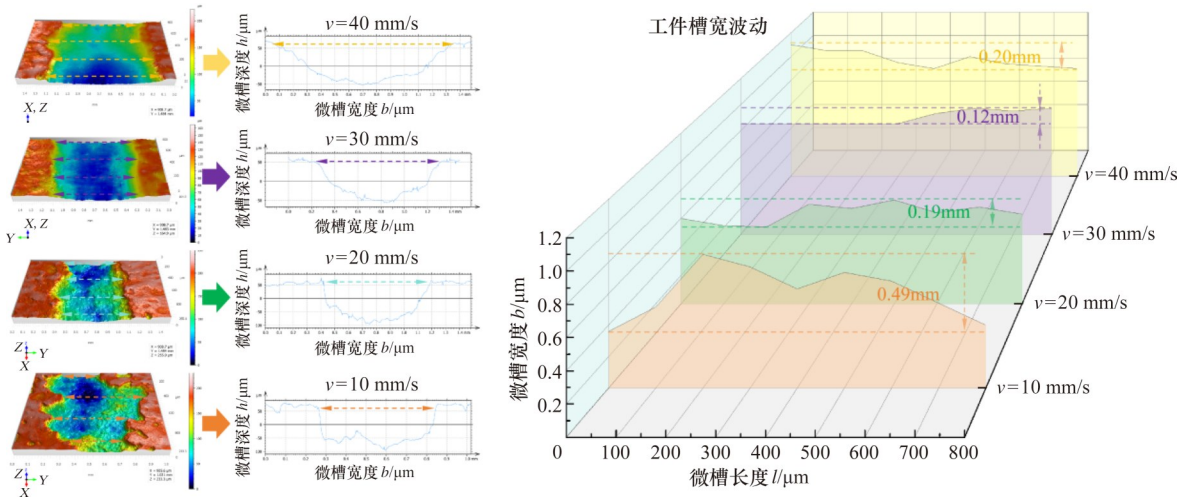


图 11　槽宽沿扫描方向的分布

Fig.11　Distribution of groove width along the scanning direction

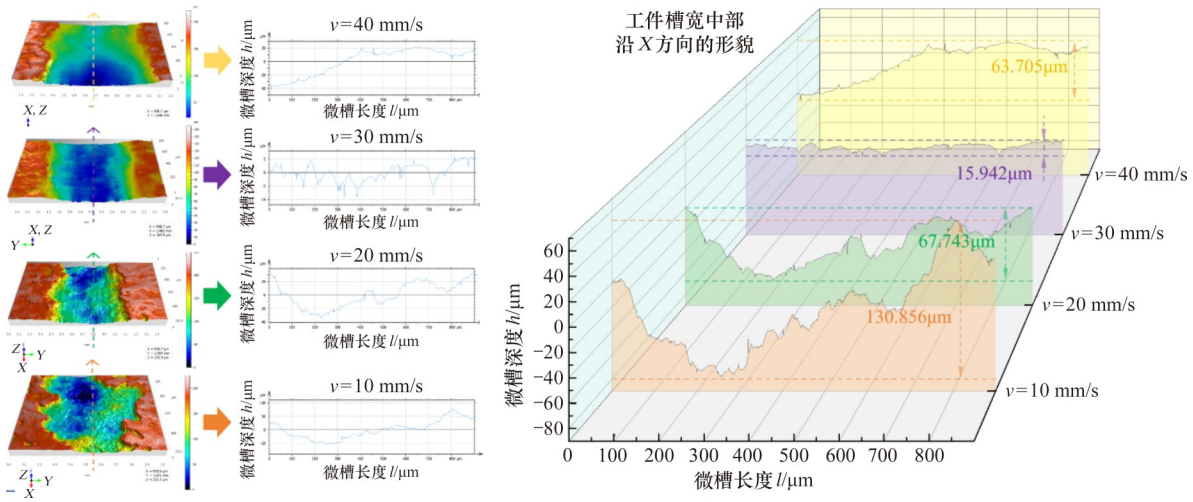


图 12　槽底中部沿扫描方向的截面轮廓曲线

Fig.12　Cross-sectional profile at the middle of groove bottom along the scanning direction

较长，材料去除量大，已形成的凹坑将扰动后续射流的流场与电场分布，导致材料去除区域失稳，形貌均匀性下降。而在较高移动速度下，尽管整体形貌趋于均匀，但由于运动平台在路径端点处的加减速或转向停留，导致该区域实际驻留时间延长，引发局部过度蚀除，形成终端深坑。

3.2　重叠率对加工质量的影响

3.2.1　路径重叠率射流仿真

通过流场仿真分析了不同重叠率下的流体流速和压力分布，结果如图 13 所示。扫描重叠率通过调控二次射流与已加工微槽形貌间的流场压力分布，进而主导了宽槽截面形貌的演化规律。其内在机理遵循“压力分布—气膜厚度—电流密度—材料去除”的链式反应原则。

在 25% 低重叠率条件下（图 13a），二次射流核心区的稳定流场完全位于初次加工边缘外侧。该区域压力分布均匀且集中，导致气体包络层厚度均一，使得电流密度和材料去除集中分布于射流直接接触区。

当重叠率增至 50% 时（图 13b），二次射流中心与初次槽边缘重合。已加工形貌对流场产生干扰，引发了显著的压力场偏置。压力较高的区域气膜变薄、电阻下降，将导致该处电流密度集中。

当重叠率高于 50%（图 13c 和图 13d），二次射流核心区完全覆盖初次槽结构。尽管流场扰动仍会导致一定的压力偏置，但高度重叠的扫描路径使高电流密度区有效作用于初次槽内部。

3.2.2　重叠射流加工实验验证

为验证上述仿真结果，进行了重叠射流加工实验，并对加工后沟槽形貌进行了分析。

在 25% 重叠率下，三维形貌呈现出两个独立的凹槽，其截面轮廓相似且对称（图 14a）。这与仿真中预测的独立、局部的压力集中区相符，直观地证实了两次扫描加工相互干涉度小，低重叠率下流场与电场影响微弱。

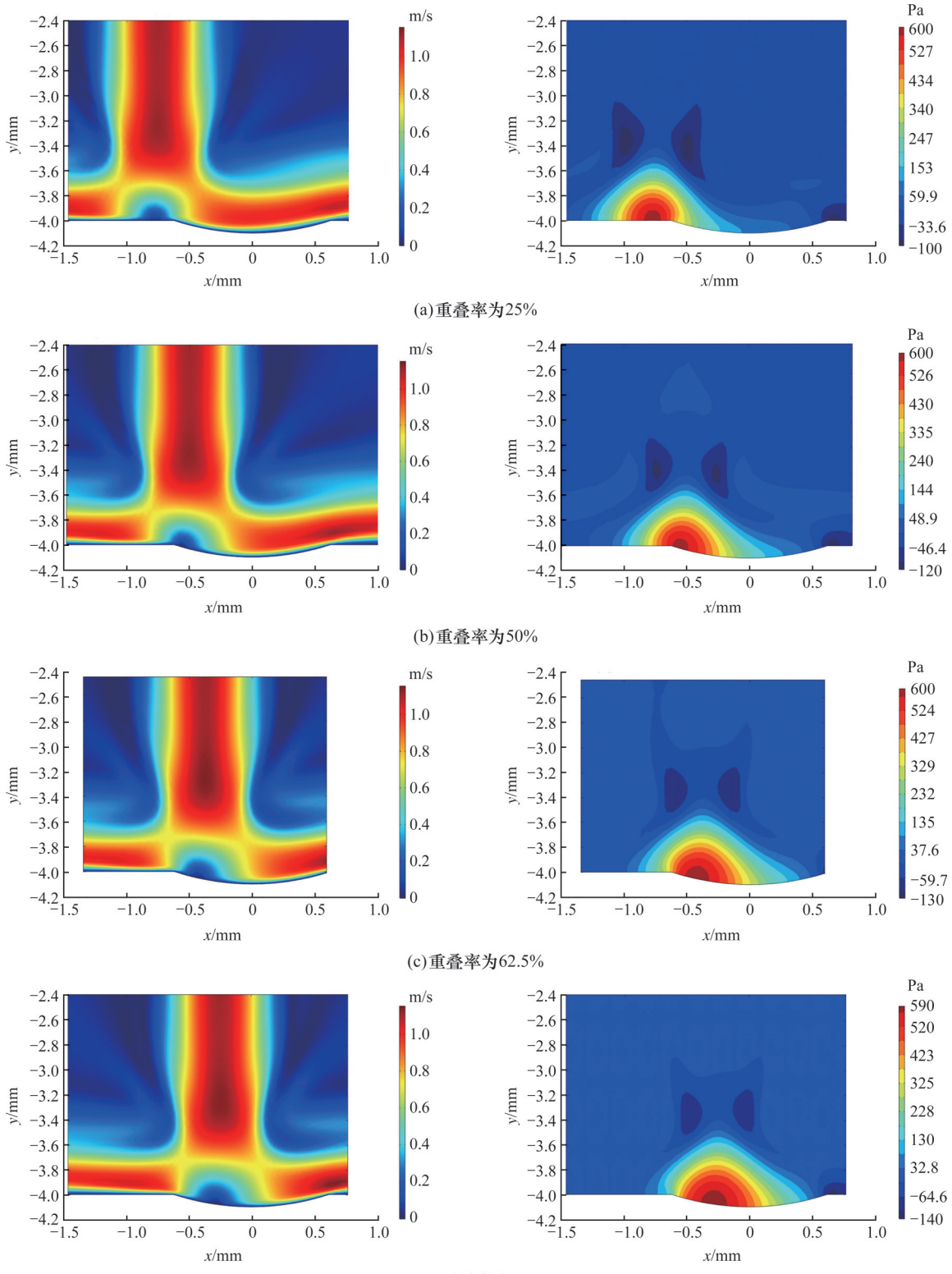


图13　不同重叠率下的微槽横截面流速及压力分布

Fig.13　Flow velocity and pressure distribution on micro-groove cross-section at different overlap rates

当重叠率增至50%，截面轮廓演变为显著的不规则形貌(图14b)。该形貌特征直接体现了仿真中呈现的压力场偏置效应，即初次加工形貌干扰二次射流，导致其流场与电场发生畸变，使材料去除区域偏向初次扫描槽，最终形成不对称的加工形貌。

在62.5%高重叠率下，三维形貌展现出平坦的槽底与平缓的槽壁过渡(图14c)。这一形貌验证了高重叠率的核心优势，即尽管存在流场扰动，但高重叠率的扫描路径使得电流密度的作用区域在空间上充分叠加。该结果与仿真结论一致，表明高重叠率能有效利用材料去除的叠加效应，抑制不

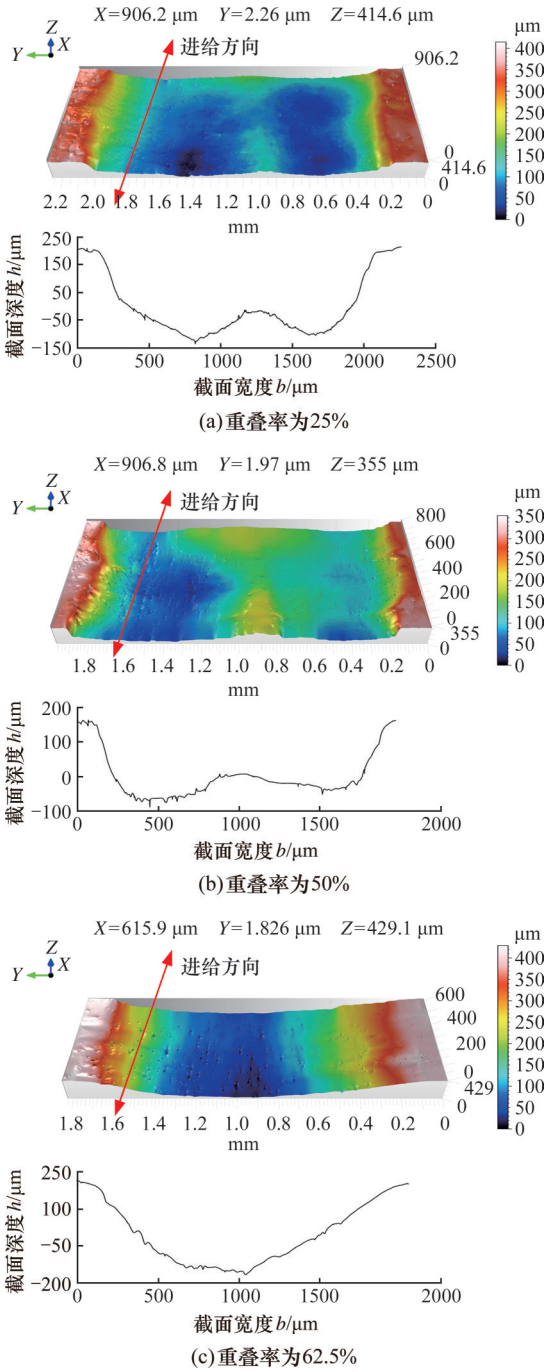


图14　不同扫描重叠率下的微槽三维形貌与截面轮廓图

Fig.14　Three-dimensional morphology and cross-sectional profile of the micro-groove under different scanning overlap rates

利的局部畸变，从而实现槽底整平与形貌均匀化。

4　结论

本文通过实验研究了采用射流电解质等离子体加工(Jet-EPM)方法在TC4钛合金上加工微槽时不同加工参数对加工定域性的影响机理，得到如下结果：

1)定点射流加工初期，材料去除集中于射流接触中心区域，随着加工时间的延长，加工定域性逐渐下降。

2)移动射流加工微槽时，加工质量随喷嘴移动速度的提高而提高，但当速度超过30 mm/s时，扫描路径两端因驻留时间延长而出现材料过度去除。

3)采用重叠扫描路径加工宽槽时，路径重叠率需高于50%才能获得平坦槽底。

参考文献：

[1] BIFFI C A, FIOCCHI J, FERRARIO E, et al. Effects of the Scanning Strategy on the Microstructure and Mechanical Properties of a TiAl6V4 Alloy Produced by Electron Beam Additive Manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(11): 4913-4924.

[2] 王庆娟，杜旭东，蒋立，等. 退火处理对TC4钛合金航空发动机叶片组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理，2024，49(10)：126-132.
WANG Qingjuan, DU Xudong, JIANG Li, et al. Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy Aeroengine Blades[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(10): 126-132.

[3] 许璐瑶，辛朝阳，王丽明. 航空内燃机用TB6钛合金高温压缩成形特性分析[J]. 锻压装备与制造技术，2024，59(4)：144-146.
XU Luyao, XIN Chaoyang, WANG Liming. High Temperature Compression Molding Characteristics of TB6 Titanium Alloy for Aviation Internal Combustion Engine[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2024, 59(4): 144-146.

[4] KE Xiaolong, WU Wei, WANG Chunjin, et al. Material Removal and Surface Integrity Analysis of Ti6Al4V Alloy after Polishing by Flexible Tools with Different Rigidity[J]. Materials, 2022, 15(5): 1642.

[5] BORDATCHEV E V, HAFIZ A M K, TUTUNEA-FATAN O R. Performance of Laser Polishing in Finishing of Metallic Surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1): 35-52.

[6] BEZUIDENHOUT M, HAAR G T, BECKER T, et al. The Effect of HF-HNO_3 Chemical Polishing on the Surface Roughness and Fatigue Life of Laser Powder Bed Fusion Produced Ti6Al4V[J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101396.

[7] QU Ningsong, FANG Xiaolong, ZHANG Junzhong, et al. Macro Electrochemical Milling and Its Hybrid Variants[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(8): 1-35.

[8] MITCHELL-SMITH J, SPEIDEL A, CLARE A T. Advancing Electrochemical Jet Methods through Manipulation of the Angle of Address[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 364-372.

[9] GUO Cheng, QIAN Jun, REYNAERTS D. Deterministic Removal Strategy for Machine Vision Assisted Scanning Micro Electrochemical Flow Cell[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 167-178.

[10] YU Mingxin, DU Liqun, WANG Fenglai, et al. A New Laser-induced Plasma Electrolyte Jet Machining Method: Efficient Material Removal Mechanism and Synergistic Effects[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 326: 118319.

(下转第2325页)