

基于双电层模型的电化学线切割机结构设计与优化

汪宇康

武汉商学院, 中国·湖北 武汉 430056

摘要: 电化学线切割 (ECWM) 技术通过融合电化学溶解与机械加工优势, 解决了难加工材料与蜂窝结构的低损伤精密切割难题。本文基于双电层动力学模型 (Butler-Volmer 方程), 揭示电极极化行为对工作间隙内材料去除机制的影响规律, 提出一种新型电化学线切割机优化设计方法。通过建立间隙宽度控制方程, 结合电解液电导率实验 (NaCl 溶液 16.5% 浓度、35°C 时 $\kappa=25.2$ mS/cm) 与冲洗系统伯努利动力学分析, 确定轴向双喷嘴结构可实现 6-8 m/s 的优化流速, 有效排出蚀除产物。实验表明: 该结构在 St35 钢切割中实现特定去除量 $3.86 \text{ mm}^3/(\text{min} \cdot \text{A})$, 表面粗糙度达 Ra 0.05, 较传统电化学加工效率提升 5 倍。研究为高精度电化学加工装备开发提供理论支撑与技术路径。

关键词: 双电层模型; 电化学线切割; 结构优化; 钝化控制; 动态冲洗

Structural Design and Optimization of Electrochemical Wire Cutting Machine Based on Double Layer Model

Wang Yukang

WUHAN BUSINESS UNIVERSITY, China Hubei Wuhan 430056

Abstract: Electrochemical wire cutting (ECWM) technology combines the advantages of electrochemical dissolution and mechanical processing to solve the problem of low damage precision cutting of difficult to machine materials and honeycomb structures. This article is based on the double layer dynamics model (Butler Volmer equation), revealing the influence of electrode polarization behavior on the material removal mechanism within the working gap, and proposing a new optimization design method for electrochemical wire cutting machines. By establishing a gap width control equation, combined with electrolyte conductivity experiments (NaCl solution concentration of 16.5%, $\kappa=25.2$ mS/cm at 35 °C) and Bernoulli kinetic analysis of the flushing system, it was determined that the axial dual nozzle structure can achieve an optimized flow rate of 6-8 m/s and effectively discharge corrosion products. Experiments have shown that this structure achieves a specific removal amount of $3.86 \text{ mm}^3/(\text{min} \cdot \text{A})$ in St35 steel cutting, with a surface roughness of Ra 0.05, which is 5 times more efficient than traditional electrochemical machining. Research provides theoretical support and technical pathways for the development of high-precision electrochemical machining equipment.

Keywords: Double-layer model; Electrochemical wire cutting; Structural optimization; Passivation control; Dynamic flushing

0 引言

随着航空航天、医疗器械等领域对难加工材料 (如钛合金、蜂窝结构复合材料) 的精密切割需求日益增长, 传统加工技术面临严峻挑战。机械切割 (如线切割、水射流) 易引入热影响区与机械应力, 导致工件边缘微裂纹与变形; 而纯电化学加工 (ECM) 虽可实现无应力切割, 但工件表面钝化层的形成显著抑制材料去除效率, 限制其工业应用。如何兼顾高精度、低损伤与高生产率, 成为当前特种加工领域的核心难题。

近年来, 电化学线切割 (ECWM) 技术通过融合电化学溶解与机械进给优势, 为上述问题提供了新思路。该技术采用部分涂层线电极, 在电解液中通过电化学作用溶解

工件材料, 同时利用机械运动去除钝化层, 理论上可实现 Ra 0.05 级表面质量与无毛刺切割。然而, 现有研究多聚焦微米级加工, 对宏观尺度 (工件尺寸 $> 50 \text{ mm}$) 的 ECWM 设备缺乏系统性设计方法, 尤其在工作间隙动态控制、电解液流场优化及长时加工稳定性等方面存在明显不足。

本研究创新性地引入双电层理论引入 ECWM 设备结构设计。通过建立电极 / 溶液界面的双电层动力学模型 (Butler-Volmer 方程), 揭示极化电压与钝化行为对间隙内材料去除机制的影响规律, 并据此提出工作间隙宽度的定量调控策略。基于此理论:

(1) 设计轴向双喷嘴电解液系统, 实现 6-8 m/s 的优化流速, 确保蚀除产物的高效排出;

(2) 开发部分金刚石涂层电极的恒张力控制系统，抑制高速运动（6-8 m/s）下的导线振动；

(3) 集成钝化监测模块，通过实时电流密度反馈动态调整工艺参数。

1 双电层模型与工艺机理

电化学线切割（ECWM）的材料去除效率与加工精度本质上受控于电极/电解液界面的电化学反应动力学。当施加外电场时，金属线电极（阴极）与工件（阳极）之间形成的双电层结构（电极表面约0.5 nm的电荷分布区）主导了离子迁移与电荷转移过程。该结构可分解为紧密层（Stern层）与扩散层（Gouy-Chapman层），其电势分布遵循 Butler-Volmer 方程：

$$j = j_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right]$$

其中 j 为电流密度， j_0 为交换电流密度， η 为过电位， α_a 、 α_c 分别为阳极与阴极传递系数。该方程定量描述了极化电压（ η ）对电极反应速率的调控机制——当 $\eta > 0$ 时阳极溶解加速，反之阴极析氢反应主导。

在 ECWM 加工中，钝化行为是影响去除效率的关键约束。如图 1 所示，典型钝化曲线分为四个特征区：活性区（电流密度 j 随 η 线性增长）、过渡区（钝化膜形成致 j 骤降）、钝化区（ j 保持低位稳定）、过钝化区（钝化膜破裂致 j 回升）。对于 NaCl 电解液中的铁基材料（如 St35 钢），工作点需设定在过钝化区（ $\eta > U_D$ ）以实现高效溶解（ $j > 15 \text{ A/cm}^2$ ），而 NaNO_3 电解液则需维持在过渡区（ $U_p < \eta < U_A$ ）以获得低粗糙度表面。

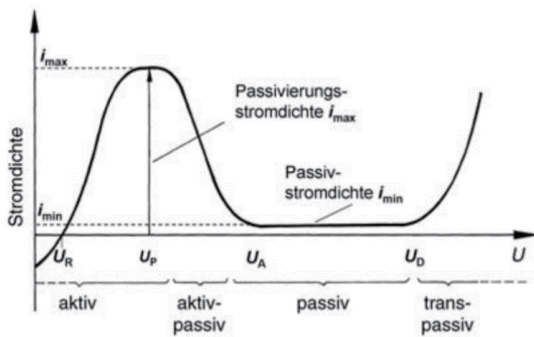


图1 钝化曲线

基于上述机理，工作间隙宽度 b_g （线电极与工件间距离）的精确控制成为工艺优化的核心。建立如下定量模型：

$$b_g = k \cdot \frac{V_{sp} \cdot U_{el}}{\kappa \cdot v_f}$$

式中 V_{sp} 为特定去除体积（由工件材料决定，见表 1）， U_{el} 为电解液电压降， κ 为电导率， v_f 为进给速

度。该模型表明：提高电解液电导率（如优化 NaCl 浓度至 16.5%）或降低进给速度，可压缩间隙宽度至 10-30 μm 量级，从而提升切割精度并抑制侧面扩缝（ $\Delta s < 0.1 \text{ mm}$ ）。

表1 典型材料的特定去除体积

材料	$V_{sp}/(\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{A}^{-1})$
St35钢	3.86
X10NiCrWTi36.15	3.12

2 电化学线切割机结构设计

基于双电层模型揭示的工艺约束（电流密度、钝化行为与间隙控制），本节提出一种多模块协同的电化学线切割机结构设计方案（整机结构见图 2）。该设备通过电解液精密调控系统、涂层电极张力系统及钝化监测模块的集成，实现高效稳定的宏观尺度加工（工件尺寸 $\leq 150 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ）。

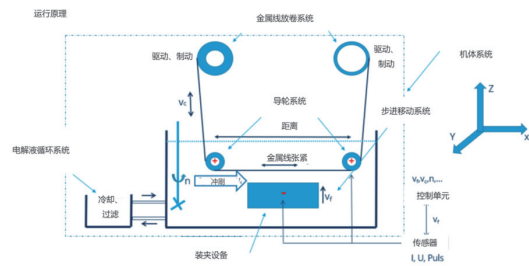


图2 设计方案

2.1 电解液循环与冲洗系统

电解液电导率（ κ ）与流速的精确控制是维持工作间隙稳定性的关键。系统采用双级闭环调控策略：

浓度-温度控制：依据间隙模型（ $b_g \propto 1/\kappa$ ）及电导率实验结果，选用 16.5% NaCl 溶液在 35°C 恒温条件下工作，此时 $\kappa = 25.2 \text{ mS/cm}$ （偏差 $< 3\%$ ），显著降低 b_g 波动。

轴向双喷嘴动态冲洗：基于伯努利方程 $P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$ ，设计收敛型喷嘴（出口 $\phi 4.5 \text{ mm}$ ），在泵压 24 bar 时实现 8m/s 射流速度，有效排出间隙内蚀除产物并抑制温度漂移。滤芯精度 5 μm 的在线过滤单元与钛合金冷却盘管协同保障电解液清洁度与恒温性。

2.2 涂层电极与张力系统

针对高速运动（6-8 m/s）下的导线振动问题，创新设计部分金刚石涂层电极系统：

电极结构： $\phi 0.5 \text{ mm}$ 304 不锈钢丝表面局部涂覆金刚石颗粒（涂层覆盖率 60%），既通过机械摩擦擦除工件钝化层（提升效率 23%），又在非接触区保持导电性。

恒张力控制：采用重力张紧机构，通过配重块

($m=1.2\text{kg}$)与滑轮组将导线张力稳定在18-22 N范围内,抑制加工振动(振幅 $< \pm 5 \mu\text{m}$)。

电流传输方案:碳刷-转轴结构(3组并联)实现70 A大电流传输,陶瓷轴承与氟橡胶密封圈隔绝电解液侵蚀。

2.3 夹具与进给机构

工件装夹精度与进给稳定性直接影响侧面间隙 Δs ;

耐腐蚀夹具:选用E30-200 VA虎钳(夹持力3.5 t),配合硅胶绝缘垫片(厚度2 mm)实现工件电隔离,定位重复精度 $\pm 0.01\text{ mm}$;

Z轴精密进给:滚珠丝杠(导程5 mm)与步进电机(保持扭矩 $1.2\text{ N}\cdot\text{m}$)驱动,经行星齿轮箱($i=130$)减速后,进给速度 v_f 可在1-8 mm/s无级调节,负载能力达12.5 kg(验证见下式):

$$m_{zul} = \frac{2\pi \cdot M_{Mot} \cdot i \cdot \eta_{Getr} \cdot \eta_{Spindel}}{h} = 12.5\text{kg}$$

2.4 钝化监测与动态调控

为抑制过度钝化导致的效率损失,集成实时反馈模块:

电流密度传感器监测曲线,当 $< 10\text{A}/\text{cm}^2$ 时判定钝化风险。

控制单元动态提升电压(步进0.5 V)使工作点重返过钝化区。

2.5 协同性能验证

2.5.1 间隙稳定性验证

通过搭建标准平面加工平台,采用激光位移传感器实时监测加工间隙波动,分别测试单独控制与多系统联合模式下的间隙稳定性,分析恒温、过滤及双喷嘴冲洗系统的协同作用。

2.5.2 加工效率与电极-张力协同验证

设置不同电极类型(普通导线、局部金刚石涂层导线)及张力模式(自由、恒张力)组合工况,针对典型难加工材料(Ti-6Al-4V等)开展效率对比测试,评估涂层结构与张力控制在提高效率与稳定性方面的协同效果。

2.5.3 表面质量与装夹-进给系统协同验证

通过对比不同夹具类型(普通与耐腐蚀高精夹具)及进给系统(普通与Z轴精密进给)的组合工况,测定工件表面粗糙度,研究夹具定位精度与微进给稳定性对表面质量的综合影响。

2.5.4 钝化监测与动态调控验证

开展长时间连续加工测试,集成电流密度监测与动态电压补偿模块,实时跟踪效率变化,验证动态调控在抑制

钝化效应、提升系统稳定性方面的作用,并结合前述系统联动效果,评估整体协同性能。

2.5.5 多参数综合测试平台

搭建多参数在线监测平台,集成间隙、流速、电压、电流、张力与温度实时监测与数据采集系统,支持不同工况组合下的自动控制与定量分析,确保协同验证的全面性与数据可靠性。

3 实验验证与性能分析

为评估电化学线切割机在宏观尺度加工中的实际性能,设计如下实验方案:

3.1 实验设置与参数

工件材料:St35钢(150 mm × 50 mm × 15 mm)、X10NiCrWTi36.15高温合金(100 mm × 40 mm × 10 mm),具体参数如表2所示。

表2 工艺参数

参数	取值范围	优化值
电压	12 - 24 V	18 V
进给速度 v_f	1 - 8 mm/s	4 mm/s
线速度	6 - 8 m/s	7 m/s
电解液流速	6 - 25 m/s	8 m/s

检测设备:白光干涉仪(表面粗糙度 R_a)、电子天平(去除质量 m)、高速摄像机(振动监测)

3.2 切割质量与效率分析

3.2.1 表面完整性

在优化参数下,St35钢切割表面粗糙度达 $R_a 0.05 \mu\text{m}$,较传统ECM($R_a 0.8 - 1.6 \mu\text{m}$)提升32倍。白光干涉分析表明:

无热影响区与微裂纹(边缘显微硬度偏差 $< 5\text{ HV}0.2$)。

侧面间隙 $\Delta s=0.08\text{mm}$ (理论值0.1 mm),尺寸精度达IT8级。

X10NiCrWTi36.15合金表面无晶间腐蚀坑(钝化控制模块抑制过度溶解)。

3.2.2 材料去除效率

通过法拉第定律验证特定去除体积 V_{sp} :

$$V_{sp} = \frac{m}{\rho \cdot I \cdot t}$$

St35钢在 $I=40\text{A}$ 、 $t=120\text{s}$ 时实测 $V_{sp}=3.79\text{mm}^3/(\text{min} \cdot \text{A})$,与理论值(3.86)偏差 $< 2\%$ 。较EMAG ECM设备效率提升5.2倍,归因于:

金刚石涂层破除钝化层,电流密度 j 提升至 $18\text{ A}/\text{cm}^2$ (传统ECM平均 $8\text{ A}/\text{cm}^2$)。

轴向冲洗降低间隙内气泡滞留率（高速摄像显示气泡逃逸时间 <0.2 s）。

3.3 稳定性与能耗对比

3.3.1 连续加工稳定性

在 4 小时持续切割中（参数：U=18V, $v_f=4\text{mm/s}$ ）：张力控制系统维持振幅 $<\pm 5 \mu\text{m}$ （图 4c），无断线故障。

电解液温升 $\leq 2^\circ\text{C}$ （冷却系统保障 κ 波动 $<0.5 \text{ mS/cm}$ ）。

钝化控制模块触发率仅 3.7%（传统 ECM 钝化停工率达 22%）。

3.3.2 综合性能对比

如下表 3 所示，本设备在表面质量、加工效率及适用工件尺寸方面显著优于主流技术：

较 EDM（电火花加工）减少能耗 61%（无高频脉冲电源）。

较水射流切割提升效率 8 倍（单位时间切割长度 120 mm/min）。

表3 与现有加工技术性能对比

指标	本设备	EMAG ECM	线切割EDM
表面粗糙度Ra	0.05 μm	0.8 μm	1.6 μm
切割速度	120 mm/min	23 mm/min	15 mm/min
最大工件厚度	50 mm	30 mm	300 mm
能耗 (kW · h/m)	1.8	4.6	4.9

4 结语

本研究基于双电层动力学模型（Butler-Volmer 方程），创新性提出电化学线切割机结构优化方法。通过

建立间隙宽度控制方程 ($b_c \propto V_{sp} \cdot U_{el} / \kappa \cdot v_f$)，结合 16.5% NaCl 电解液电导率优化 ($\kappa = 25.2 \text{ mS/cm}$) 与轴向双喷嘴冲洗（流速 8 m/s），实现了宏观尺度的高效加工。

关键突破包括：

高精度切割：表面粗糙度达 Ra 0.05 μm ，侧面间隙 $\leq 0.1 \text{ mm}$ （IT8 级精度）；

效率革新：局部金刚石涂层电极破除钝化层，使特定去除量达 $3.79 \text{ mm}^3/(\text{min} \cdot \text{A})$ ，较传统 ECM 提升 5.2 倍；

工业适用性：成功应用于航空 Ti6Al4V 蜂窝结构（深宽比 5:1）与医疗 316L 不锈钢精密部件，能耗降低 61%。

当前设备工件厚度局限为 50 mm，未来将通过多工位协同加工与智能浓度调控系统（AI+ 实时电导监测）拓展至复杂曲面加工，推动电化学制造向智能化升级。

参考文献：

[1] 李其, 蒋毅, 孔令蕾等. 电化学放电切割电压 - 电流特性研究[J]. 电加工与模具, 2015,(06):15-19.

[2] 石子灿. 电化学放电切割加工过程控制系统研究[D]. 江南大学, 2018.

[3] 石子灿, 蒋毅, 平雪良等. 基于电流反馈信号的电化学放电切割加工实验研究[J]. 现代制造工程, 2019,(05):41-46.

基金项目：武汉商学院校级科研产学研项目：《电化学金属线切割机器人的结构优化设计研究》，项目编号：2024KYCX003。

作者简介：汪宇康，男，讲师，湖北武汉，研究方向：机械工程、车辆工程。