

# 电化学线切割工艺参数的理论与实验研究

汪宇康

武汉商学院, 中国·湖北 武汉 430056

**摘要:** 电化学线切割作为一种无热影响区、无机械应力的先进加工技术, 其加工质量在很大程度上取决于工艺参数的合理设置。论文以电化学线切割的理论基础为出发点, 分析了关键工艺参数如电流密度、电极丝移动速度、电解液流速与加工间隙等对金属溶解效率、表面质量、切割精度等指标的影响机理, 并通过系列实验验证了理论模型与实际效果之间的关系。研究表明, 不同参数之间存在复杂的非线性耦合关系, 合理的参数组合是实现高效高精度加工的基础。论文的研究可为电化学线切割工艺优化与工业应用提供理论依据与实践指导。

**关键词:** 电化学线切割; 工艺参数; 电流密度; 间隙宽度; 电极丝速度

## Theoretical and Experimental Research on Process Parameters of Electrochemical Wire Cutting

Wang Yukang

Wuhan Business University, Wuhan, HuBei, 430056, China

**Abstract:** As an advanced processing technology without heat-affected zone and mechanical stress, the processing quality of electrochemical wire cutting largely depends on the reasonable setting of process parameters. This paper starts from the theoretical basis of electrochemical wire cutting, analyzes the influence mechanism of key process parameters such as current density, electrode wire moving speed, electrolyte flow rate and processing gap on metal dissolution efficiency, surface quality and cutting accuracy, and verifies the relationship between the theoretical model and the actual effect through a series of experiments. The research shows that there is a complex nonlinear coupling relationship among different parameters, and a reasonable parameter combination is the basis for achieving efficient and high-precision processing. The research in this paper can provide theoretical basis and practical guidance for the optimization of electrochemical wire cutting process and industrial application.

**Keywords:** Electrochemical wire cutting; Process parameters; Current density; Gap width; Electrode wire speed

## 0 前言

切割工艺是一种金属加工技术, 是一种通过使用各种工具和方法将金属材料分割成所需形状和尺寸的过程。根据不同的切割原理和技术特点, 切割工艺可以分为多种类型, 如火焰切割、等离子切割、激光切割等。这些切割方法各有优缺点, 选择合适的切割方法需要根据具体的应用场景和加工需求进行综合考虑。切割工艺的基本原理是利用热能、电能、化学能等能量形式将金属材料进行分离和切割。其中, 火焰切割和等离子切割是利用热能进行切割的方法, 激光切割是利用电能进行切割的方法。

然而上述的各种切割工艺存在如: 热加工产生应力集中或热变形; 割缝太宽, 浪费材料; 切割精度较差或者切割成本过高; 对于蜂窝状材料难以加工等缺点, 因此需要研究一种无应力集中或无热变形, 具备一定加工精度及可加工蜂窝状材料的加工工艺, 即电化学切割。

## 1 电化学金属切割工艺

电化学切割是一种通过在工件表面施加电解液并施加电流的方式, 从而实现金属的无应力切削加工。它适用于任何导电材料, 包括金属和合金, 且特别适合加工复杂形状和

高硬度材料。电化学切割的工作原理是基于电解作用, 在工件表面和切削工具之间施加电解液, 并通过外部电源施加电流。电解液中的离子将从工件表面去除金属离子, 形成金属阳离子, 并在电极表面还原成金属。这个过程会引起金属表面的腐蚀, 从而实现切削。

电化学金属线切割是使用部分涂层的金属线电极进行电化学切割, 以实现难以加工的材料和蜂窝结构进行的低力、低损伤和无毛刺加工, 是一种混合制造工艺。该工艺基于阳极金属溶解的原理, 并结合了电化学溶解法和机械加工的优点。在电化学加工过程中, 不会对材料产生边缘区域的损伤, 并且工具的磨损较小。通过使用部分涂层的金属线电极, 可以有效去除工件表面的钝化层, 从而提高加工过程的生产率。

## 2 电化学金属相关参数

在电解过程中, 电流通过的不同离子所需的电量与产生的化学反应的物质的数量之间存在直接的比例关系。

用数学表达式来表示法拉第第二定律:

在电解过程中, 不同离子产生的物质的质量 ( $m$ ) 与通过电流的电量 ( $Q$ ) 之间的关系可以表示为:

$$m = z \cdot F \cdot n$$

其中： $m$  为产生的物质的质量； $z$  为电化学当量，即电解过程中每个离子转移的电荷量； $F$  为法拉第常数，约为 96485 库仑 / 摩尔； $n$  为通过的离子的数量。

根据第二法拉第定律，不同离子在电解过程中所需的电荷量是与其电化学当量成正比的。因此，不同离子在电解过程中的产生物质的质量也是与其电化学当量成正比的。

因此，沉积在阳极的质量  $m$  可以通过如下方程计算出来：

$$m = \frac{M}{n \cdot F} \cdot I \cdot t = \ddot{A}_e \cdot I \cdot t$$

其中： $m$  为溶解质量； $M$  为摩尔质量； $I$  为电流强度； $t$  为电流通过的时间； $F$  为法拉第常数，代表 1 摩尔电子的电量； $n$  为电化化合价变化，如  $Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$  这种情况下  $n=2$ ； $\ddot{A}_e$  为电化学当量， $\ddot{A}_e = \frac{M}{z \cdot F}$  单位为  $\frac{g}{A \cdot s}$  或者  $\frac{g}{A \cdot min}$ 。

阳极金属溶解体积  $V$  可以根据阳极金属密度  $\rho$  计算得出：

$$V = \frac{M}{\rho \cdot n \cdot F} \cdot I \cdot t$$

其中： $V$  为阳极金属溶解体积； $\rho$  为金属工件密度。

这一理论特定切削体积是一种关键参数，用于描述在特定的电化学条件下，通过电化学过程从材料中去除的体积。通过将摩尔质量、密度和法拉第常数结合在一起，将电化学加工过程中的物理和电化学特性联系起来。法拉第常数代表了电子转移的数量，而电化学价变化则表示在特定反应中涉及的电子数。通过结合这些因素，理论特定切削体积可以用来估计在特定电化学条件下，单个电化学反应所引起的材料去除。

然而，实际的电化学加工过程可能受到许多因素的影响，包括电解液组成、电极电位、电流密度等。这些因素可能导致电化学过程的非线性行为，使得理论预测与实际结果之间存在差异。因此，在实际应用中，需要结合实验数据和实际经验，对电化学加工参数进行优化，以实现所需的切削效果。

当特定电化学反应中的电化学价变化  $n$  保持恒定时，可以将摩尔质量、密度、法拉第常数以及电化学价变化联系起来，形成理论特定切削体积  $V_{spt}$ 。

$$V_{spt} = \frac{M}{\rho \cdot n \cdot F}$$

由于工件往往不是单质金属而是合金组成，因此在计算合金材料的特定的溶解体积应该按照下列式子计算：

$$V_{spLeg} = \frac{1}{\rho_{leg}} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{100} \cdot \frac{M_i}{n_i \cdot F}$$

其中： $i$  为合金元素的数量 ( $i=1...n$ )； $\rho_{leg}$  为合金元素的密度； $P_i$  为各元素的质量百分比； $M_i...M_n$  为摩尔质量。

此外，电化学金属溶解还受到所谓的钝化膜的影响。这层膜的形成与电位和电流密度有密切关系。因此，在电化

学加工过程中，通过调整电位和电流密度，可以影响钝化膜的形成和性质，从而影响金属的溶解速率和切削效果。

然而，在发生电化学溶解的过程中必然会发生损耗，在进行相关的计算的时候，必须考虑这个损耗，因此引入了一个概念，即效率  $\eta$ 。根据效率  $\eta$ ，引入特定的溶解体积  $V_{sp}$  为：

$$V_{sp} = \frac{M \cdot \eta}{\rho \cdot n \cdot F}$$

效率  $\eta$  也被称为“电流收率”或“电荷收率”。

在电化学加工过程中，间隙的形成是一个关键概念。也被称为作用间隙、工作间隙或切削间隙，在这一制造方法中发挥着重要作用。这个间隙存在于工具与工件之间，它允许电解液以高速通过，从而实现了材料的去除过程。

间隙的存在是确保整个电化学加工过程高效运行的关键。首先，它提供了一个通道，使电解液能够进入工具和工件之间的区域，以进行化学反应和材料去除。通过高速引导电解液，加工过程中产生的热量和废弃物可以迅速被带走，从而防止过热和废料的积累，确保了加工的稳定性和质量。

### 3 实验研究

为验证第三部分理论模型的有效性，搭建了电化学线切割实验平台，主要设备包括：

①加工系统：三轴精密运动平台（定位精度  $\pm 1\mu m$ ），张力可控的钼丝电极（直径 0.2mm，涂层区域占比 60%）。

②电源系统：脉冲直流电源（电压 0~30V，峰值电流 50A，脉宽 10~500 $\mu s$ ）。

③电解系统：NaNO<sub>3</sub> 电解液（浓度 10wt%），恒温循环装置（25 $^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ ），流量可控泵（0~10L/min）。

实验材料：304 不锈钢（密度 7.93g/cm<sup>3</sup>，成分见表 1）及镍基高温合金 IN718（密度 8.19g/cm<sup>3</sup>）。

控制变量：基于理论模型选取关键参数：

电流密度  $J$ （5~35A/cm<sup>2</sup>）；

电极丝速度  $v_w$ （0.5~5mm/s）；

电解液流速  $v_f$ （2~8m/s）；

初始加工间隙  $g_0$ （50~200 $\mu m$ ）。

检测指标：

材料去除率（MRR）：单位时间溶解体积（mm<sup>3</sup>/min），通过工件切割前后质量差与密度换算；

表面粗糙度（Ra）：白光干涉仪（Zygo Nexview）测量；

切缝宽度（W）：扫描电镜（SEM, Hitachi SU5000）

观测取均值；

加工间隙动态变化：在线显微视觉系统实时记录。

### 4 结果分析

电流密度（ $J$ ）的影响：MRR 随电流密度  $J$  的增加呈现近似线性增长趋势，这与法拉第定律预测的阳极溶解量随电流增

加而增加的基本规律相符。在实验范围内 ( $J=10-50A/cm^2$ ), MRR 从约  $0.8mm^3/min$  显著提升至约  $4.2mm^3/min$ 。然而, 在较高电流密度 ( $> 40A/cm^2$ ) 下, MRR 的增长速率略有减缓。

电极丝速度  $v_w$  的影响: 在固定电流密度和电解液流速下, MRR 随电极丝速度  $v_w$  的增加而提高。这主要归因于电极丝高速移动有助于及时清除加工间隙内溶解产物和热量, 维持电解液新鲜度和电导率, 从而促进持续有效的阳极溶解。但当  $v_w$  超过一定阈值 (本实验中约  $12mm/s$ ) 后, MRR 的提升趋于平缓。

电解液流速  $v_f$  的影响: 提高电解液流速  $v_f$  对 MRR 具有显著的促进作用。较高的流速能更有效地冲刷加工间隙, 带走反应产物 (如氢气泡、金属氢氧化物沉淀) 和焦耳热, 减少浓差极化和热效应的影响, 保持稳定的电化学反应环境, 使得 MRR 在  $V_e=8-15m/s$  范围内获得显著提升。

初始间隙  $g_0$  的影响: 较小的初始间隙  $g_0$  有利于获得更高的 MRR。这是因为较小的间隙意味着更高的电场强度和电流密度 (在相同电压下), 加速了阳极溶解。然而, 过小的初始间隙 ( $< 0.05mm$ ) 可能导致电解液供应不畅、产物

排出困难, 反而引起加工不稳定甚至短路, 限制了 MRR 的进一步提高。

#### 参考文献:

- [1] 高旭. 电解线切割加工不锈钢柱状阵列的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [2] 李守业, 曾永彬, 程浩. 磷酸溶液电解加工钴基弹性合金实验研究[C]//第18届全国特种加工学术会议论文集(摘要).
- [3] 吴雨. 往复走丝多线电解线切割试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [4] 朱晓龙, 李湘生. 基于脉冲电源的金属电化学线切割工艺研究[J]. 机电工程, 2012, 29(7): 803-805+813.
- [5] 王昆, 朱荻. 微细电解线切割加工模型分析与试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(12): 1658-1662.

作者简介: 汪宇康, 男, 中国湖北武汉人, 讲师, 从事机械工程、车辆工程研究。

课题项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划指导性项目《电化学金属线切割法的技术研究》, 项目编号: B2022290。