

DOI: 10.3901/JME.2022.07.258

铜表面脉冲电化学射流加工的定域性和粗糙度分析*

王 可 周 平 闫 英 张 超 郭东明

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

摘要: 电化学射流加工(Jet-ECM)是一种用于表面微细结构加工的超精密加工方法。但是, Jet-ECM 加工的定域性不足, 表面质量不高, 无法满足高精度表面加工的需求。采用合理的电解液和脉冲电源参数可以提高电化学加工的精度和表面质量, 但单纯基于试错的方法获得合理参数的难度极大。根据电化学反应和双电层的基本原理, 将 Jet-ECM 系统等效为 RC 电路, 用于指导脉冲 Jet-ECM 加工参数的选择。研究结果显示, 磷酸基电解液 Jet-ECM 中采用脉冲电源能有效减少过切, 提高铜表面加工的定域性, 当加工电压为 6.5 V 时, 采用 10 kHz, 50% 占空比的脉冲电源相比直流电源定域性提高 36%。降低加工电压和占空比也可有效提高加工定域性。但表面质量和定域性的变化趋势相反, 降低加工电压和占空比不利于工件表面黏膜层的形成, 降低了表面质量。本研究有助于进一步明确 Jet-ECM 加工中的电化学去除机理, 提高无应力加工方法的加工精度, 为 Jet-ECM 在工业中的进一步应用提供了指导。

关键词: 电化学射流加工; 脉冲电源; 双电层; 定域性; 表面质量

中图分类号: TG156

The Localization and Roughness Analysis of Pulsed Jet Electrochemical Machining on Copper Surface

WANG Ke ZHOU Ping YAN Ying ZHANG Chao GUO Dongming

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Jet electrochemical machining (Jet-ECM) is a ultra-precision machining method that is widely used in microstructure processing. However, the localization and surface roughness of Jet-ECM may not meet the needs of the high-precision machining process. Appropriate electrolyte and pulse power parameters can improve the localization and surface roughness of Jet-ECM processing. However, it is very difficult to obtain the appropriate parameters based on trial and error. According to the mechanism of electrochemical reactions and electric double-layer (EDL), the Jet-ECM system is equivalent to the RC circuit which can be used to guide the selection of processing parameters. The results show that pulsed Jet-ECM has a higher localization than Jet-ECM with direct current (DC) power. When the pulse power parameters are 6.5 V, 10 kHz, 50% duty ratio, the localization increased 36% compared with the DC power. Reducing the voltage and duty ratio can effectively improve the machining localization. The surface quality is opposite to the localization, reducing the voltage and duty ratio are not conducive to the formation of the viscous film on the workpiece surface. The lack of the viscous film causes the surface roughness deterioration. This study helps to understand the mechanism in Jet-ECM of Cu, and guides the further use of Jet-ECM in industry.

Key words: jet electrochemical machining; pulse power; electric double-layer; localization; surface roughness

* 国家自然科学基金重大(51991373)和中央高校基本科研业务费专项资金(DUT20LAB108, DUT20ZD216)资助项目。20210525 收到初稿, 20210926 收到修改稿

0 前言

金属铜由于具备优良的导电性和导热性,在光学^[1-2]和航空航天^[3]等领域中有着广泛的应用。在这些领域中,常通过在工件表面上加工不同尺度的微结构^[4],用于调控工件表面润湿性、传热能力和摩擦特性等,从而改善零件的使用性能。微结构的加工精度和表面质量对所制备器件的性能有着至关重要的影响^[5-6]。

目前,金属铜表面微结构的传统加工方法是激光加工,微铣削加工和激光微冲击成形技术。但 these 方法均依赖于高温或机械作用,会导致工件产生热影响区、重铸层、加工毛刺以及加工应力等缺陷,影响工件的性能。此外,铣削过程中,刀具的磨损降低了加工的稳定性 and 表面质量。

电化学射流(Jet-ECM)加工是依靠电化学阳极溶解来实现材料去除的一种非传统的精密和超精密加工方法。加工过程中,高流速的电解液经由阴极喷嘴射向阳极工件表面,在工件表面形成水跃现象,在电场和水跃的共同作用下,电流密度和材料去除均被约束在喷嘴下方的有限区域内,从而实现了工件材料的高选择性去除^[6-10]。Jet-ECM 具有去除效率高、无阴极消耗、加工过程中无热影响区、无残余应力、无需考虑工件材料硬度等优点^[7]。此外,Jet-ECM 具有高的灵活性^[6,9],结合数控技术无需复杂的阴极结构,就可灵活进行孔^[10],槽^[11-12],光学零件表面修形^[2]以及航空器上复杂结构的加工^[6]。

目前,Jet-ECM 用于表面微结构的加工存在定域性差的问题。WU 等^[13-15]认为该现象产生的原因是电化学反应对金属是各向同性的,这导致材料的去除同时发生于孔径和孔深方向,加工后的孔径大于喷嘴直径,产生了过切现象,过切量越大,加工定域性越低。因此,为了加工小的结构尺寸,必须减小喷嘴的内径。这不仅增加了制造成本,而且容易导致水跃现象的不稳定,降低了 Jet-ECM 加工的稳定性^[2,9,15]。因而,减少过切,提高 Jet-ECM 加工的定域性,对微细加工技术向更高的加工精度和极限尺寸推进,具有重要的研究价值^[16]。MING 等^[7]通过将喷嘴和工件浸没在煤油中,避免电解液的四处溅射,提高了加工的定域性,降低了表面粗糙度,但是增加了电解液的消耗。HUNG 等^[17]采用特殊的喷嘴设计,将高压空气和电解液在喷嘴中混合变为气-液两相混合流并射出,增加了电解液的电阻,提高了定域性。LIU 等^[18]通过采用抽吸电极,约束电

解液仅在抽吸电极内部流动,从而限制电解液的作用范围,大大提高了加工的定域性。但是,特殊的电极结构,增加了装置的复杂程度,限制了 Jet-ECM 的应用范围。CHEN 等^[14-15]在工件表面覆盖掩模板,用于提高 Jet-ECM 加工定域性。但是掩模板的使用,影响了电解产物的排出。因而,急需一种简便易行,且能够有效减少过切,提高 Jet-ECM 加工定域性的方法。

目前提高电化学加工精度的有效方法之一是采用高频脉冲电源。但是,Jet-ECM 相比其它电化学加工有其自身的特点。在 Jet-ECM 中,电解液由喷嘴高速射向工件表面,始终处于高速的流动中。此外,在 Jet-ECM 加工中,喷嘴和工件表面之间保持微小加工间隙,仅微间隙内的工件发生材料的局部溶解,电解产物排出困难,影响了电流密度分布的均匀性和稳定性^[13]。KAWANAKA 等^[19]使用脉冲电源用于 Jet-ECM 加工不锈钢 (SUS304)。试验发现,使用脉冲电源有利于提高表面质量,但材料去除率降低。LIU 等^[9]采用脉冲电源用于钛合金加工。试验发现,占空比减少,孔深增加,电流效率提高,并提出其材料去除机理需进一步研究。现有研究均显示,在 Jet-ECM 中采用脉冲电源加工,加工参数对表面质量和精度均有显著的影响。但是,脉冲电源对 Jet-ECM 加工精度和表面质量的影响规律尚无深入研究。因此,研究脉冲电源对 Jet-ECM 精度和表面质量的影响规律,对了解加工机理并指导加工工艺有重要意义。

本研究通过理论模型结合试验确定了脉冲 Jet-ECM 加工铜的可行参数,分析了脉冲 Jet-ECM 加工铜的定域性的影响因素,明确了加工精度和表面质量之间的关系。

1 加工原理

1.1 Jet-ECM 的基本原理

如图 1 所示,在 Jet-ECM 加工过程中,工件接电源阳极,喷嘴连接电源阴极,喷嘴和工件之间留有微小的加工间隙以利于电解液的排出。电解液通过喷嘴高速射至工件表面。高速流动的电解液在接触工件表面后,流速和流向均发生剧烈变化,形成了由射流中心向外快速扩散的薄液膜,且在薄液膜边缘厚度突然增加,形成水跃现象。该液膜具有高的电阻率,随液膜半径增加,电解液的电阻值迅速增大^[10,19]。阴极喷嘴和阳极工件在电解液的连通下有电流通过,喷嘴下方的工件在电化学作用下形成

离子态被去除。

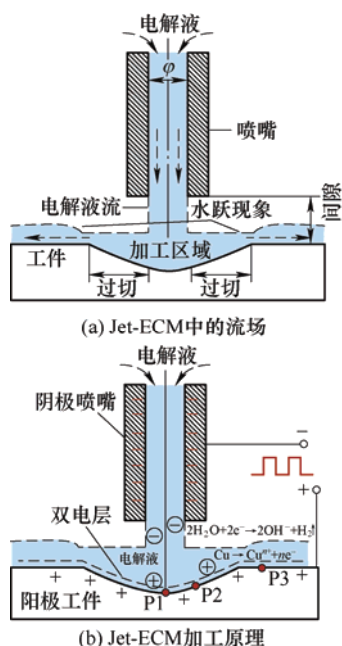


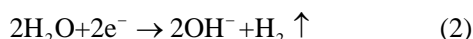
图1 Jet-ECM 加工原理示意图

在阳极(纯铜工件), 金属铜(Cu)溶解为离子^[20]



其中 n 表示铜溶解反应过程中释放的电子数。

在阴极(镍喷嘴), 电解液中的水分解成氢氧根离子并生成氢气, 如式(2)。



1.2 脉冲 Jet-ECM 理论分析

电化学加工中, 在金属和溶液的界面上, 正负电荷定向排列, 形成双电层。输送到电极上的电流, 一部分用于双电层的充电, 称为非法拉第电流, 另外一部分参与电化学反应, 称为法拉第电流^[12]。当使用脉冲电源进行 Jet-ECM 加工时, 工件表面的双电层不断的充电放电, 起到了电容器的作用^[21]。分别将 Jet-ECM 加工系统中电解液和电化学反应引起的阻力当作电阻, 双电层当作电容器。将整个加工系统等效为 RC 电路进行理论分析(图 2a), 其中 R_{ct} 表示电荷传递电阻, C_d 为双电层电容, R_s 表示电解液电阻, 其大小与电解液种类以及阳极和阴极之间的距离有关, 随该距离的增大而增大^[19]。

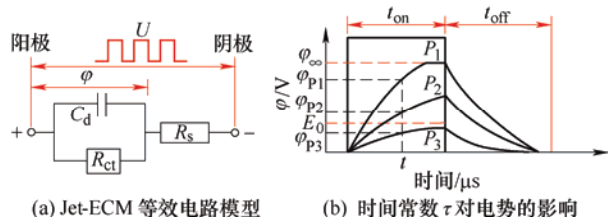


图2 Jet-ECM 加工模型

RC 电路中, 常用时间常数(τ)来描述电路响应速度。

$$\tau = R_s \cdot C_d \quad (3)$$

时间常数 τ 越小, 电路响应越快, 电容充放电速度越快。 τ 越大, 电路的响应速度变慢, 电容充放电速度变慢^[22-23]。由公式(3)可知, 在工件表面不同的位置 P_1 , P_2 , P_3 (图 1b), 随着距离喷嘴距离的增加, 时间常数增加^[19],

$$\tau_{p3} > \tau_{p2} > \tau_{p1} \quad (4)$$

在双电层的充电过程中, 电极上过电位 φ 处于瞬态变化状态, 其和时间常数 τ 的关系^[23-24]

$$\varphi = \varphi_{\infty} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (5)$$

式中, t 为脉冲电源的通电时间; τ 为等效电路的时间常数; φ_{∞} 为双电层的稳态电势。

如图 2b 所示, t_{on} 为脉冲电源一个脉冲周期内的通电时长, t_{off} 为脉冲电源一个脉冲周期内的断电时长。由式(5)可知, 工件 P_1 位置点处的电势响应最快, 在相同时间 t , 该位置最早达到材料的分解电位(E_0), 工件开始溶解。随着距离喷嘴距离的增加, P_2 点处电势响应速度降低, P_3 点在 t_{on} 时间内, 电势均小于 E_0 , 不会发生材料去除。

根据式(3)结合工件和喷嘴的间隙距离可以用于脉冲频率的计算。为了形成稳定的水跃, 喷嘴和工件的间隙一般在 0.5 mm 到 1 mm。在本研究中, 间隙为 0.6 mm, 根据 τ 的值, 选用频率为 10 kHz, 占空比为 50% 的脉冲电源用于 Jet-ECM 加工。

此外, 在单个脉冲周期内, 脉冲电源的加工时间 t 和双电层的稳态电势 φ_{∞} 为

$$t = \frac{D}{f} \quad (6)$$

$$\varphi_{\infty} = U - i \cdot R_s \quad (7)$$

式中, U 为脉冲电源电压幅值; D 为脉冲电源占空比; f 为脉冲频率; i 为工件表面电流密度。

将式(6)、(7), 代入式(5)

$$\varphi = (U - i \cdot R_s) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{D}{f \cdot \tau}\right) \right) \quad (8)$$

因为只有当 φ 大于 E_0 , 才会有材料的去除。当 φ 低于 E_0 时, 工件表面仅发生双电层的充放电, 没有工件材料的去除^[12]。根据式(8)可知, φ 受电压幅值 U , 占空比 D 的影响。降低加工电压, 减少占空比, 可有效降低 φ , 抑制加工边缘材料的去除, 提高加工定性。

2 试验装置和方法

试验装置如图 3 所示，工件放置于电解槽中，通过调平装置保证工件始终处于水平。喷嘴电极连接力传感器，力传感器固定在 Z 向进给位移平台上，通过电脑控制 Z 向位移平台实现喷嘴的上下移动。通过力传感器判断喷嘴和工件的初始接触位置，然后，通过 Z 向宏微位移平台控制喷嘴电极向上移动到指定加工间隙处。

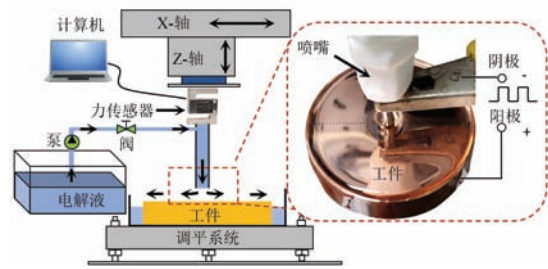


图 3 Jet-ECM 加工试验装置

试验选用内径 1 mm 的金属镍圆柱喷嘴，工件使用纯度高于 99.9 % 的无氧纯铜，电解液采用高黏度的磷酸基酸性电解液，以避免加工中絮状沉淀物的产生，提高加工稳定性。电解液成分详见表 1。电解液存储于 35 ℃ 的恒温水浴箱中，通过隔膜泵向喷嘴电极供液，电解液在工件表面形成稳定水跃。

表 1 电解液成分以及占比

组成	数值
磷酸/ mL	425
乙醇/ mL	45
乳酸/ mL	30
苯并三氮唑/g	3
乙酸铵/g	1.5

选用苏州玖盟信息科技有限公司生产的高频脉冲电源(NMDZ220AD24V10A)，该电源可提供直流模式以及脉冲模式，并可以对占空比进行调节(0-100%)，加工参数详见表 2。

表 2 Jet-ECM 加工条件

加工参数	数值
加工电压/V	1.5, 3.5, 6.5, 10
脉冲频率/kHz	0, 10
占空比/%	25, 50, 75, 100
加工间隙/mm	0.6
电解液流速/(mL/min)	460
电解液温度 /℃	35

使用激光共聚焦显微镜(VK-X250, Keyence Co., 日本)测量加工后孔的轮廓以及表面粗糙度。使用粗糙度 Sa 用于表征表面质量，粗糙度的测量范围 $10\text{ }\mu\text{m}\times 10\text{ }\mu\text{m}$ ，每个试样测量 4 次并求平均值。

使用过切量(L)用于表征加工的定域性，因为孔的边缘是渐变的，为了更加精准的对加工的定域性进行评价，通过在有效加工时间为 1 秒的孔轮廓中定义 L 如下

$$L=d_1-\frac{L_2}{2} \tag{9}$$

如图 4 所示，点 A 为孔几何中心，孔深为 h ， B 点为孔截面 $0.8h$ 处， L_2 为喷嘴内径， d_1 为加工孔的半径。

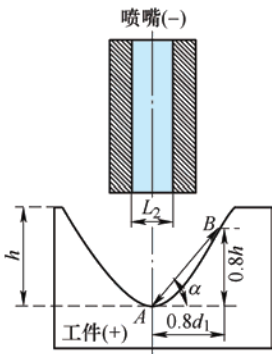


图 4 孔尺寸测量示意图

3 结果和讨论

3.1 脉冲电源对 Jet-ECM 加工定域性的影响

为了验证脉冲电源对 Jet-ECM 加工定域性的影响，分别采用直流电源和脉冲电源进行 Jet-ECM 加工。为了保证两种加工模式(直流/脉冲)有效加工时间相同，直流电源加工时间为 90 s，脉冲电源使用频率为 10 kHz，占空比为 50% 的方波加工，加工时间 180 s。

加工后，使用共聚焦显微镜进行轮廓观测，如图 5 所示，使用 3.5 V，6.5 V，10 V 的脉冲电源加工得到的孔深度均大于直流电源加工后孔的深度。采用 6.5 V 脉冲电源加工获得最深的加工深度 95 μm 。脉冲电源加工后孔的直径均小于直流电源加工后孔的直径。降低电压幅值，能够将工件表面的阳极溶解约束在喷嘴附近的区域，减少过切，提高定域性。根据式(9)，分别计算脉冲电源和直流电源加工后孔的定域性。结果显示，当脉冲电源在 6.5 V 时，相比直流电源，脉冲电源的定域性提高比例最大为 36%。因而选择 6.5 V 的脉冲电源用于 Jet-ECM 加工。通过上述分析可以得到，相比于直流电源，

采用脉冲频率 10 kHz 的脉冲电源能够有效抑制过切, 提高 Jet-ECM 加工的定域性。这是因为距离喷嘴越近的区域, 双电层充电响应越快, 在射流边缘的低电流密度区域, 双电层充电响应慢, 将需要更长的时间来完成双电层的充电。采用脉冲电源后, 通过在低电流密度区域中双电层充电完成之前关闭电压脉冲, 可有效抑制射流边缘低电流密度区的材料去除, 提高加工的定域性。

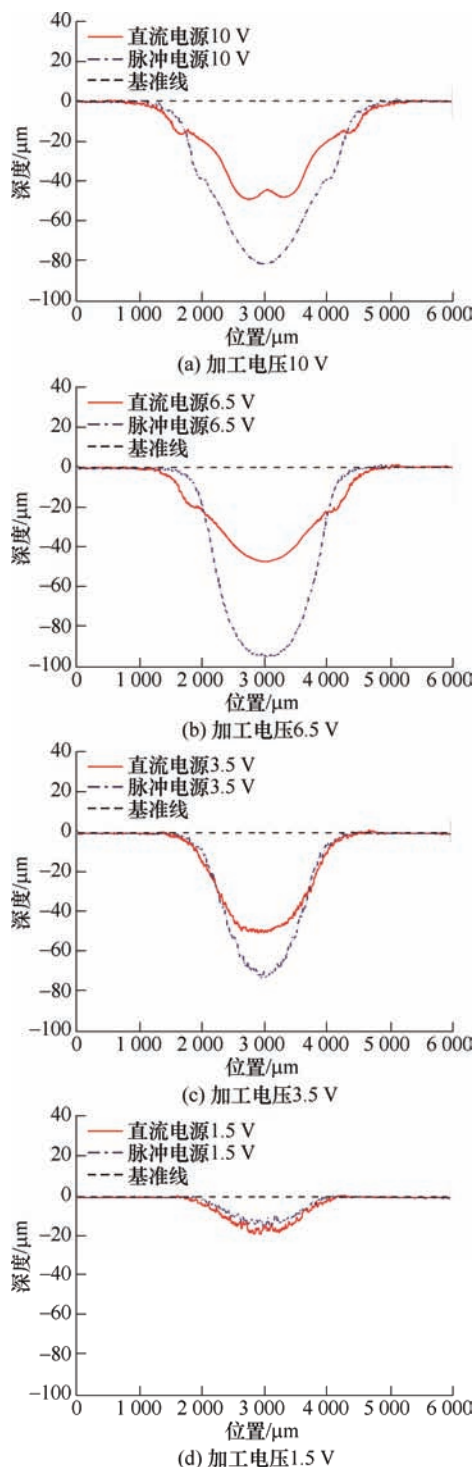


图 5 脉冲对 Jet-ECM 的影响

3.2 电压对 Jet-ECM 加工定域性和表面质量的影响分析

为了研究 Jet-ECM 中, 加工电压对 Jet-ECM 加工定域性和表面质量的影响规律, 分别比较不同电压加工后的表面轮廓和表面质量。如图 6 所示, 当采用直流电源加工时(图 6a), 1.5 V 加工后的孔最浅, 为 19 μm , 当电压增加到 3.5 V 时, 孔的深度快速增加到 50 μm , 进一步提高加工电压, 孔深不在明显变化。当采用脉冲电源时(图 6b), 电压低于 6.5 V

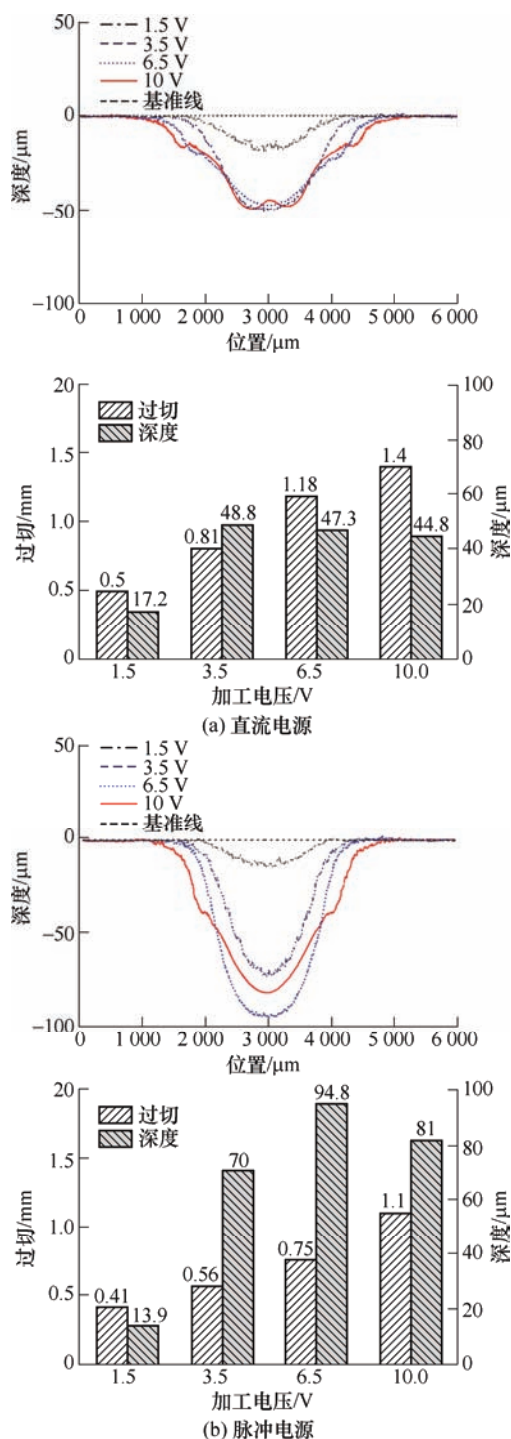


图 6 电压对 Jet-ECM 加工的影响

时, 去除深度随电压的增大而增大, 电压继续增大到 10 V 时, 孔的去除深度反而减少。且无论脉冲电源还是直流电源, 随着加工电压的增大, 孔的过切量逐渐增大, 定域性降低。由式(8)可知, 双电层瞬态电势受电压幅值 U 的影响。提高电压幅值, 相同的充电时间内, 提高了工件表面双电层电压, 使射流边缘达到分解电势的区域范围扩大, 降低了定域性。

如图 7 所示, 表面质量显示出和定域性相反的变化规律, 无论采用直流电源还是脉冲电源, 随着电压的增加, 表面质量迅速提高, 且表面晶界随电压增加逐渐消失。使用测量精度 1 mA 的电流传感器(CP5030, 鼎阳科技有限公司, 中国)对加工电流值进行了测量。电压 1.5 V 时, 电流为 4.5 mA, 3.5 V 时, 电流增加到 28.6 mA, 随着加工电压继续增加至 6.5 V 和 10 V, 电流分别为 64.7 mA 和 82.9 mA。在电化学加工中, 高的电流密度有利于提高表面质量, 这是因为当电流密度较低时, 电化学溶解速率较低, 金属离子扩散的速度大于金属离子生成的速度, 工件表面无法形成厚实的黏膜层。此时, 铜的溶解优先发生于晶界和表面缺陷处, 且不同的晶面溶解速度不同, 加工后工件表面存在晶界和晶粒的腐蚀缺陷^[25]。现有文献说明, 铜在磷酸中通过如下的反应, 使金属铜变为离子态^[20]。

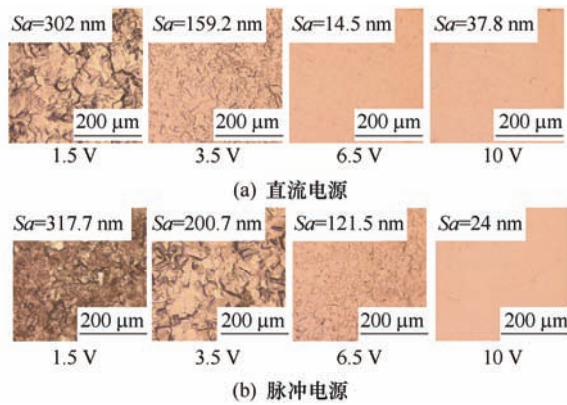


图 7 电压对 Jet-ECM 加工表面粗糙度 S_a 的影响

随着电流密度的增大, 单位时间内, 有更多的铜离子生成并在工件表面生成水溶性的 CuH_2PO_4 , 随着 CuH_2PO_4 不断聚集, 最终形成具有高阻抗性的黏膜层^[2, 26-27]。在工件表面的黏膜层形成以后, 工件表面的微观峰谷处的电阻值大于峰顶处的电阻值, 从而使微观峰顶处的电流大于峰谷处, 材料溶解较快, 从而抑制晶界和缺陷的产生, 表面质量明显提高。

根据法拉第定律计算不同电压加工的电流效率 (η), 定义如下

$$\eta = \frac{M}{M_t} \quad (12)$$

式中, M 为实际材料去除质量; M_t 为理论材料去除质量

$$M_t = k \cdot i_m \cdot t_a \quad (13)$$

式中, k 为质量电化学当量; i_m 是加工过程中的电流; t_a 为发生电化学反应的总时间。

结合式(12)和(13), η 可转换为

$$\eta = \frac{V \cdot \rho}{k \cdot i_m \cdot t_a} \quad (14)$$

式中, V 为去除材料的总体积; ρ 为金属铜的密度。

如图 8 所示, 电流效率显示出和表面质量相反的变化规律, 随着加工电压的提高, 表面质量提高, 电流效率降低。这是因为, 黏膜层的厚度对电流效率有影响。随着电压增加, 黏膜层厚度增加, 黏膜层电阻增大, 用于铜溶解的分压比例减少。此外, 副反应占比增加也是电流效率降低的原因之一^[12]。在采用 1.5 V 直流加工时, 电流效率最高为 92%, 在该电压下离子的生成速度慢, 黏膜层较薄。此时, 采用脉冲电源, 工件表面双电层反复充放电, 消耗了电流, 降低了电流效率。当电压值大于 3.5 V 时, 加工后工件表面的晶界和表面缺陷相比于 1.5 V 有显著减少, 从而判断 3.5 V 时, 工件表面开始有黏膜层生成, 黏膜层的生成也导致了电流效率的降低。当电压达到 6.5 V 时, 直流电源加工后的表面光滑且无明显晶界和表面缺陷, 从而判断 6.5 V 时生成了足够厚实稳定的黏膜层, 进一步提高了表面质量。继续增加电压, 电流效率也不再发生明显变化, 说明黏膜层的厚度存在极限值, 不会随电压的增加无限制的增加。而脉冲电源在 10 V 后, 才形成稳定厚实的黏膜层。结果显示, 黏膜层形成前, 电流效率受双电层充放电影响, 脉冲电源加工的电流效率低于直流电源。黏膜层开始生成后, 脉冲电源的电流效率高于直流电源。

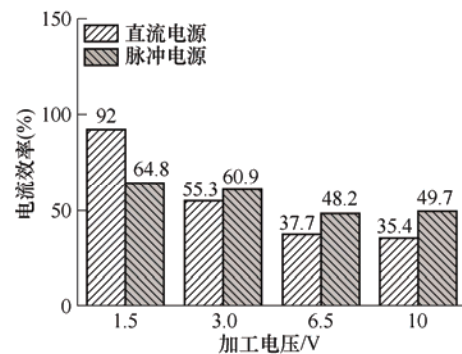


图 8 电压对 Jet-ECM 电流效率的影响

3.3 占空比对 Jet-ECM 加工定域性和表面质量的影响分析

为了研究 Jet-ECM 中, 占空比对 Jet-ECM 加工定域性和表面质量的影响规律, 分别采用 100%, 75%, 50%, 25% 的占空比进行试验。

由图 9 所示, 随着占空比减少, 加工后孔的过切量减少, 定域性提高, 但是表面质量变差(图 10)。当采用 75% 占空比时孔的定域性较差, 且孔边缘轮廓有突变现象。当采用 50% 占空比时, 孔的表面轮廓平滑且孔边缘无突变区域, 当采用 25% 占空比时, 铜工件表面有明显的晶界缺陷(图 10a)。因而确定铜 Jet-ECM 的加工参数为 6.5 V, 10 kHz, 50% 占空比。根据式(6), 减少占空比, 缩短了脉冲周期内双电层的充电时间, 使低电流密度区域达到分解电势的范围进一步缩小, 有效抑制射流边缘低电流密度区的材料去除, 提高加工的定域性。且加工深度, 随占空比的降低而增加。当 100% 占空比时, 孔深度 47.4 μm , 当占空比为 75% 和 50% 时, 孔深增加至 56.8 μm , 94.4 μm 。当占空比为 25% 时, 孔深为 126.6 μm 。孔深的变化和黏膜层的厚度有关, 在 t_{on} 时产生电解产物, t_{off} 时电解产物随电解液的更新而排出^[28], 随着 t_{off} 的增加, 黏膜层变薄, 材料去除率增加。

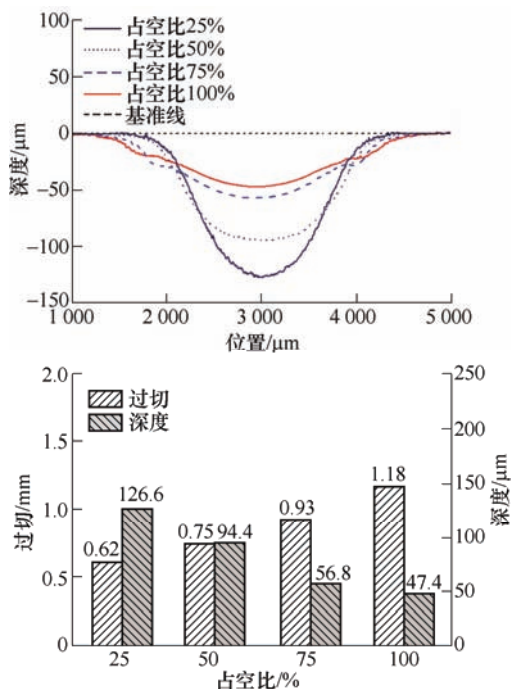


图 9 脉冲占空比对 Jet-ECM 加工的影响

如图 10 所示, 当占空比为 25% 时, 加工后的表面能够清楚地看到晶界(图 10a), 这是因为 t_{on} 时间太短, 金属铜溶解产生的铜离子很少, 且扩散时间足够长, 无法形成黏膜层(图 11b)。随着占空比提

高到 50%, t_{on} 时间增加, 表面质量有了显著的提高, 但是仍然可以看到晶界和表面缺陷(图 10b), 说明随着 t_{on} 时间的增加, 黏膜层开始形成(图 11c)。当占空比提高到 75%, 加工后得到光滑洁净的工件表面, 表面粗糙度 Sa 达到 17.4 nm, 且没有晶界和表面缺陷(图 10c), 说明随着占空比的提高, 黏膜层厚度增加, 能够有效地提高表面质量(图 11d)。当占空比进一步增加到 100%, 表面质量进一步提高到 $Sa=14.5$ nm。研究结果显示, 随着占空比的增加, 加工后表面晶界和缺陷逐渐消失, 表面质量不断提高。这说明表面质量不仅受电压和电流大小的影响, 增加占空比也可以提高表面质量。

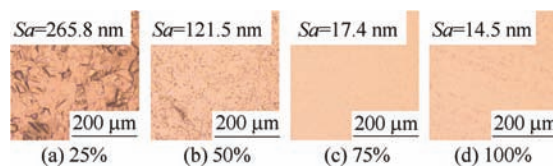


图 10 占空比对 Jet-ECM 加工表面粗糙度 Sa 的影响

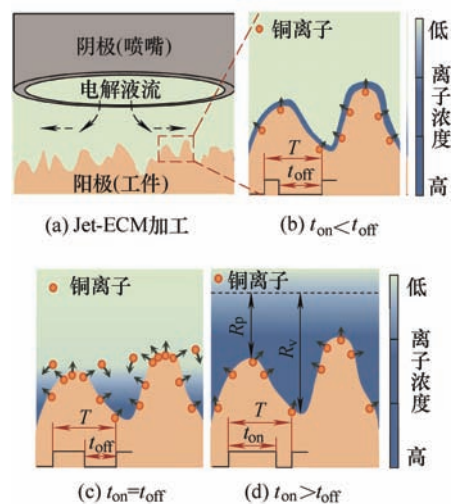


图 11 脉冲占空比对 Jet-ECM 加工影响机制

4 结论

(1) Jet-ECM 加工铜时, 受到表面双电层的影响, 采用脉冲电源能够有效缩小加工后孔的孔径, 提高定域性。通过理论模型和试验确定了加工的可行参数为 6.5 V, 10 kHz, 50% 占空比。此时, 相比直流电源, 定域性提高 36%。

(2) Jet-ECM 加工的定域性受到脉冲电源电压和占空比的影响。降低加工电压和占空比能够有效提高加工定域性。

(3) 工件表面质量显示出和定域性相反的变化规律, 随加工电压和占空比的增加, 表面质量显著

提高。直流电源在电压值大于 6.5 V 时可获得光滑无缺陷表面。脉冲电源在 10 V 时可获得光滑无缺陷表面, 加工后的表面粗糙度 Sa 为 24 nm。当加工参数为 6.5 V, 10 kHz, 100% 占空比时获得最低表面粗糙度 Sa 为 14.5 nm。

参 考 文 献

- [1] HOLMES S, KLUGMAN A, KRAATZ P. Copper mirror surfaces for high power infrared lasers[J]. *Applied optics*, 1973, 12(8): 1743-1745.
- [2] WANG K, YAN Y, ZHOU P, et al. Preparation of flat and smooth copper surface by jet electrochemical machining and electrochemical polishing[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2020, 167(16): 163501.
- [3] 刘敏, 杨自鹏, 张丽娜, 等. 铜及铜合金真空扩散焊接工艺优化及接头组织性能分析[J]. *航天制造技术*, 2018(2): 49-51, 56.
LIU Min, YANG Zipeng, ZHANG Lina, et al. Vacuum diffusion welding technology optimization and microstructure analysis of copper and copper-alloy[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*. 2018(2): 49-51, 56.
- [4] 张朝阳, 秦昌亮, 冯钦玉, 等. 脉冲激光电化学复合的定域性研究及三维微细刻蚀加工[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(23): 200-206.
ZHANG Zhaoyang, QIN Changliang, FENG Qinyu, et al. Investigation on localization and three-dimensional micro-etching based on pulse laser electrochemical machining[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(23): 200-206.
- [5] 严广和, 姜晨, 张勇斌, 等. 50 μm 级 D 形硬质合金微铣刀铣削纯铜试验研究[J]. *电子科技*, 2021, 34(01): 36-42.
YAN Guanghe, JIANG Chen, ZHANG Yongbin, et al. Experimental study on milling pure copper with 50 μm D-shaped cemented carbide micro-milling cutter[J]. *Electronic Science and Technology*, 2021, 34(01): 36-42.
- [6] LIU Y, QU N S. Obtaining high surface quality in electrolyte jet machining TB6 titanium alloy via enhanced product transport[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 276: 116381.
- [7] MING P M, LI X, ZHANG X, et al. Study on kerosene submerged jet electrolytic micromachining[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 68: 432-437.
- [8] KOZAK J, RAJURKAR K P, BALKRISHNA R. Study of electrochemical jet machining process[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*, 1996, 118: 490-498.
- [9] LIU W, LUO Z, KUNIEDA M. Electrolyte jet machining of Ti1023 titanium alloy using NaCl ethylene glycol-based electrolyte[J]. *Journal of materials Processing Technology*, 2020, 283: 116731.
- [10] MITCHELL-SMITH J, SPEIDEL A, CLARE A T. Transitory electrochemical masking for precision jet processing techniques[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 31: 273-285.
- [11] CHEN X L, DONG B Y, FAN G C, et al. Investigation on modified jet electrochemical machining of micro-channel[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(9-12): 4433-4443.
- [12] LIU W D, LUO Z, LI Y, et al. Investigation on parametric effects on groove profile generated on Ti1023 titanium alloy by jet electrochemical machining[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(9-12): 2357-2370.
- [13] 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.
- [14] CHEN X L, DONG B Y, ZHANG C Y, et al. Jet electrochemical machining of micro dimples with conductive mask[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 257: 101-111.
- [15] WU M, LIU J W, HE J F, et al. Fabrication of surface microstructures by mask electrolyte jet machining[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 148: 103471.
- [16] 孙雅洲, 梁迎春, 程凯. 微米和中间尺度机械制造[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(5): 1-6.
SUN Yazhou, LIANG Yingchun, CHENG Kai. Micro-scale and meso-scale mechanical manufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(5): 1-6.
- [17] HUNG J C, LIU J H, FAN Z W. Fabrication of microscale concave and grooves through mixed-gas electrochemical jet machining[J]. *Precision Engineering*, 2019, 55: 310-321.
- [18] LIU G, ZHANG Y, NATSU W. Influence of electrolyte flow mode on characteristics of electrochemical machining with electrolyte suction tool[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 142: 66-75.

- [19] KAWANAKA T, KUNIEDA M. Mirror-like finishing by electrolyte jet machining[J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(1): 237-240.
- [20] GLARUM S H, MARSHALL J H. The anodic dissolution of copper into phosphoric acid: II. impedance behavior[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(12): 2878-2885.
- [21] PAZ-GARCIA J M, JOHANNESSON B, OTTOSEN L M, et al. Modeling of electric double-layers including chemical reaction effects[J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 150: 263-268.
- [22] SCHUSTER R, KIRCHNER V, ALLONGUE P, et al. Electrochemical micromachining[J]. *Science*, 2000, 289(5476): 98-101.
- [23] KIM B H, NA C W, LEE Y S, et al. Micro electrochemical machining of 3D micro structure using dilute sulfuric acid[J]. *CIRP Annals*, 2005, 54(1): 191-194.
- [24] ZHANG Z Y, ZHU D, QU N S, et al. Theoretical and experimental investigation on electrochemical micromachining[J]. *Microsystem Technologies*, 2007, 13(7): 607-612.
- [25] HULETT L D, YOUNG F W. Ledge formation on the (111) surface of copper[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1966, 113(5): 410.
- [26] WU Y F, TSAI T H, LIN J Y. Some aspects of mechanism of electropolishing of copper in phosphoric acid[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2019, 14: 11035-11047.
- [27] FANG J L, WU N J. Determination of the composition of viscous liquid film on electropolishing copper surface by XPS and AES[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1989, 136: 3800-3803.
- [28] 王维, 朱荻, 曲宁松, 等. 管电极电解加工工艺过程稳定性研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(11): 179-184.
- WANG Wei, ZHU Di, QU Ningsong, et al. Investigation on the process stability of electrochemical drilling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(11): 179-184.
-
- 作者简介: 王可, 男, 1983 年出生, 博士研究生。主要研究方向为特种加工。
E-mail: 252441598@qq.com
- 周平(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超精密加工技术和表面功能结构设计与制造。
E-mail: pzhou@dlut.edu.cn